

Златановић И.Ј. СУШЕЊЕ У БИОТЕХНИЧКИМ СИСТЕМИМА

Универзитет у Београду - Машински факултет

Иван Ј. Златановић

СУШЕЊЕ

У БИОТЕХНИЧКИМ СИСТЕМИМА



Београд, 2022.

Универзитет у Београду - Машински факултет

СУШЕЊЕ

У БИОТЕХНИЧКИМ СИСТЕМИМА

Иван Ј. Златановић

Београд, 2022.

PLANETA *print*

Проф. др Иван Ј. Златановић
СУШЕЊЕ У БИОТЕХНИЧКИМ СИСТЕМИМА

I издање

Рецензенти

Др Валентина Турањанин, научни саветник

Др Неџад Рудоња, ванредни професор

Издавач

Универзитет у Београду - Машински факултет

Краљице Марије 16, 11120 Београд 35

тел. (+381-11) 3302-205, факс. (+381-11) 3370-364

За издавача

Декан, др Владимир Поповић, редовни професор

Уредник

Др Милан Лечић, редовни професор

Председник комисије за издавачку делатност

Машинског факултета Универзитета у Београду

Тираж

100 примерака

Штампање првог издања одобрила

Комисија за издавачку делатност Машинског факултета у Београду

и Декан Машинског факултета у Београду

Одлуком бр. 31/2022 од 06.10.2022.

Штампа и повез

"ПЛАНЕТА *print*", Виноградски венац бр. 9, 11136 Београд

Београд, 2022. године

ISBN 978-86-6060-141-6

© Сва права задржава аутор. Није дозвољено да, без претходне писмене дозволе аутора, било који део овог уџбеника буде снимљен, емитован или репродукован, укључујући али не и ограничавајући се на фотокопирање, фотографију, магнетни или било који други вид записа.

*Сваку реченицу,, реч, слово, број,
знак интерункције, једначину, формулу,
скицу и слику у овој књизи,
посвећујем теби Јелена,
моја највећа
љубави.*



... И.Ј. Златановић

О аутору



Др Иван Ј. Златановић, дипл. инж. машинства, рођен је 6. Јула 1977. године у Прокупљу, Србија. После завршене Гимназије у Прокупљу (природно-математички смер), уписује Машински факултет Универзитета у Београду на коме је дипломирао 2003. године, а докторирао 2013. године, одбранвши докторску дисертацију под називом „Термомеханички процеси при сушењу прехранбених материјала у системима са рецикулацијом ваздуха” на катедри за Термомеханику. На Машинском факултету Универзитета у Београду ради од школске 2020/21. године у звању ванредног професора на Катедри за пољопривредно машинство, која је носилац студијског програма мастер студија Инжињерство биотехничких система. Његово претходно радно искуство укључује вишегодишњи рад на Пољопривредном факултету у Београду (2003-2020) на Катедри за пољопривредну технику, изводећи наставу на модулима Биотехнички и информациони инжењеринг и свим модулима одсека за Прехрамбене технологије и биохемију. Руководио је радом Лабораторије за термотехничка и струјно-техничка мерења и обављао функцију заменика директора Института за пољопривредну технику. председавао је организационим одбором интернационалног симпозијума „The International Symposium on Agricultural engineering - ISAE2019”, члан је уређивачког одбора два часописа националног значаја, научних одбора три интернационална симпозијума и рецензент је више домаћих и међународних часописа. Своје научно-стручно усавршавање обавио је 2019. године у Истраживачком центру за науку о животној средини (CIRSA) у Равени, Италија (при Универзитету у Болоњи) на тему искоришћења биомасе као енергента. Од 2007. године члан је Инжењерске коморе Србије и поседује лиценце категорија 330 и 430. Добитник је годишње награде Инжењерске Коморе Србије у 2009. години, за изузетне постигнуте резултате на почетку стручне каријере. Као одговорни пројектант, стручни сарадник и консултант бива ангажован на више од 70 главних машинских, технолошко-машинских и идејних пројеката и научних студија у земљи и иностранству.

Предговор

Када кажем да у савременим биотехничким системима за производњу и прераду хране не постоји производ чија основна сировина у некој својој фази није прошла кроз некакав процес сушења, верујте ми да нисам много погрешно. На то се слободно може додати чињеница да се сушење убраја у најстарије методе конзервације хране и енергетски најзахтевнију операцију у прехранбеној индустрији. Теоријом и основним принципима сушења, данас се у свету бави велики број научника, који су својим публикацијама истичу сложеност процеса који се јављају приликом делимичног или потпуног издвајања влаге из материјала. У циљу одређивања одговарајућих параметара сушења развијају се и користе различите експерименталне технике које из дана у дан доносе нова сазнања у овој научној области. Са развојем науке и технологије, мерне и регулационе опреме, мења се приступ проучавању процеса сушења. Оригинале класичне теорије сушења допуњују се и надограђују елементима и сазнањима стеченим микроскопским посматрањима процеса и другим напредним техникама снимања микро и нано структуре прехранбених материјала.

На Машинском факултету Универзитета у Београду на Катедри за пољопривредно машинство, која је носилац модула *Инжењерство биотехничких система*, изучавају се наставни предмети који се директно или посредно баве тематиком сушења прехранбених материјала. Сваки од наставних предмета користи одређена поглавља овог уџбеника чији су обим и тежина прилагођени нивоу студија (основне, мастер или докторске академске студије) на коме се проучавају.

- ▶ Сушење и хигротермички процеси (ОАС, поглавља 1 до 4),
- ▶ Технике и технологије процеса сушења (МАС, поглавље 6),
- ▶ Моделирање процеса у производњи и преради хране (МАС, поглавље 5), и
- ▶ Моделирање процеса сушења (ДАС, поглавље 5).

Основна идеја којом сам се руководио приликом писања ове књиге је да попутним релативну празнину када је реч о литератури на српском језику из ове области и систематизујем градиво које је од значаја за ову област. Велики напор, с'обзиром на ширину тематике, уложио сам у то да обим књиге остане у прихватљивим границама. Тежио сам да књига буде заокружена целина, и као таква, пружи основни увид у проблематику сушења прехранбених материјала. Следећи корак у надоградњи овог материјала представљало би бављење конкретним прорачунима појединачних метода сушења, што би био корак напред ка приближавању науке и праксе. Оваквом надоградњом књига би постала вреднији ресурс за инжењере и пројектанте система сушења. Искрено се надам да ћу у неком наредном издању ове књиге успети да овако нешто постигнем.

Књига је првенствено намењена студентима Машинског факултета, као уџбеник, али намењена је и студентима других техничких факултета, као и стручњацима у пракси, и свима онима који се баве или које интересује област сушења прехранбених и пољопривредних материјала. Текст књиге праћен је бројним илустрацијама (237 слика и 40 дијаграма) и табелама (54), а све са намером да се да бољи увид и олакша разумевање проблематике изложене у књизи. Књига је писана савременим стилем, који подразумева да је главни текст праћен термилошким и илустративним појашњењима приказаним у маргини непосредно уз појам од интереса. Називи огромне већине стручних појмова дати су паралелно и на енглеском језику. На крају књиге сачињен је индекс појмова. Ознаке величина су усаглашене са ознакама које се користе у сродним фундаменталним областима које се изучавају на Машинском факултету у Београду, првенствено у термодинамици и механици флуида.

На задњој корици књиге налази се 3D модел лабораторијске сушаре који је нацртао др Михајло Милановић, коме се захваљујем на уступљеном цртежу. Илустрације на тему плодова воћа и поврћа, које прожимају целу књигу, нацртале су Кристина Златановић и Анђела Златановић, којима се захваљујем на креативности.

Захваљујем се рецензентима овог уџбеника, пре свега изванредним колегама и пријатељима, научном саветнику др Валентини Турањанин и професору др Неџаду Рудоњи, на издвојеном драгоценом времену и сугестијама које су допринеле да овај материјал буде бољи и квалитетнији. Захваљујем се својим драгим колегама са Катедре за пољопривредно машинство, Машинског факултета у Београду, професорима др Драгану Марковићу и др Војиславу Симоновићу, на великој подршци у томе да овај уџбеник угледа светлост дана.

Унапред се захваљујем сваком читаоцу који својим сугестијама допринесе побољшању и унапређењу садржаја књиге.

Иван Ј. Златановић

Садржај

Предговор	vi
Садржај	viii
1 Основе технике сушења	1
1.1 Конзервација хране	1
1.2 Дехидратација	2
1.3 Особине материјала	3
1.4 Преношење топлоте	26
1.5 Преношење масе	35
1.6 Влажан ваздух	51
1.7 Агенси за сушење	58
1.8 Прехрамбени материјали	61
1.9 Припрема намирнице за сушење	65
2 Статика процеса сушења	71
2.1 Форме везивања влаге и материјала	71
2.2 Хигротермална равнотежа	74
2.3 Рехидратација	76
2.4 Активност воде	78
3 Кинетика процеса сушења	81
3.1 Уклањање влаге	81
3.2 Криве сушења	82
3.3 Једначине кинетике сушења	86
3.4 Температура материјала	89
4 Динамика процеса сушења	91
4.1 Теорије сушења засноване на постојању градијената потенцијала преношења	95
4.2 Теорије сушења засноване на микроскопском посматрању структуре материјала	106
5 Моделирање процеса сушења	115
5.1 Емпиријски модели	119
5.2 Једнофазни дифузиони модел	125
5.3 Вишефазни порозни модел	129
5.4 Моделирање у микро-размери	134
5.5 CFD моделирање	142
5.6 Моделирање са деформацијом материјала	146
5.7 Вишеразмерно моделирање	149

5.8	Моделирање на принципима машинског учења и вештачке интелигенције	152
6	Техника и технологије сушења	155
6.1	Коморна сушара	159
6.2	Тунелска сушара	163
6.3	Сушара са транспортером	164
6.4	Шахтна сушара	166
6.5	Ротациона сушара	168
6.6	Сушара са флуидизованим слојем	171
6.7	Пнеуматска сушара	175
6.8	Сушара са распршивањем материјала	176
6.9	Добошаста сушара	180
6.10	Лиофилизациона сушара	182
6.11	Сушаре за осмотско сушење	187
6.12	Соларна сушара	192
6.13	Сушара са интегрисаном топлотном пумпом	201
6.14	Сушара са микроталасним или диелектричним загревањем	207
6.15	Сушара са инфрацрвеним загревањем	211
6.16	Сушаре за месо и рибу	213
6.17	Млазна сушара	216
6.18	Сушара за екструдирану храну	218
6.19	Сушара са ултразвучним вибрацијама	220
6.20	Сушара са технологијом Refractance Window®	224
6.21	Хибридне сушаре	227
	Прилози	231
A	Ознаке и јединице	233
A.1	Грчка слова са начином изговора	233
A.2	Међународни систем префикса мерних јединица	234
B	Прехрамбени материјали	235
B.1	Особине материјала	235
B.2	Параметри сушења	238
C	Процесни материјали	245
C.1	Физичке и термо-механичке особине	245
	Литература	247
	Индекс појмова	257

1.1 Конзервација хране

Конзервирање или конзервација хране (*lat. conservare* - сачувати) је било који од низа метода којима се храна чува од кварења након бербе/жетве или клања, на краће или дуже време. Конзервирањем намирнице се штите од нежељених физичко-хемијских и микробиолошких процеса који мењају квалитет и прехранбену вредност хране. Три основна начина конзервације хране су:

- ▶ термичка обрада хране на повишеним температурама (пастеризација, стерилизација или апертизација, асептичко пуњење)¹,
- ▶ излагање ниским температурама (хлађење, замрзавање)² и
- ▶ смањење активности воде (сушење, концентрисање, додавање једињења, на пример соли).

Међутим, често се користе и други поступци као што су: примена различитих физичко-хемијских средстава, биолошко конзервисање, биолошка филтрација и бактофугација, хемијски конзерванси, различити видови радијације (топлотна, ултразвучна, јонизујућа,...), излагање високим притисцима, паковање у херметички затворену амбалажу, итд. Сви ови поступци не смеју умањивати хранљиву и дијететску вредност хране нити мењати њена органолептичка својства.

Класично тумачење појма „конзервација” хране првенствено се односи на спречавање кварења хране као последице активности микроорганизама. Активност микроорганизама зависи од параметара средине у којој се развијају, од којих су најважнији температура, киселост (рН) и доступност кисеоника. Поред микробиолошких процеса у храни су присутни и други оксидо-редукциони процеси којима од сложених органских настају проста једињења, што суштински деградира квалитет и прехранбену вредност хране.

1.1 Конзервација хране . . .	1
1.2 Дехидратација	2
1.3 Особине материјала . . .	3
1.4 Преношење топлоте . . .	26
1.5 Преношење масе	35
1.6 Влажан ваздух	51
1.7 Агенси за сушење	58
1.8 Прехрамбени материјали	61
1.9 Припрема намирнице за сушење	65

1: Под *термичком опшорношћу* микроорганизама подразумева се њихова способност да преживе термички третман. За постизање леталног ефекта термичког третмана, осим познавања температуре и времена третмана, потребно је познавати својства средине и све параметре контаминираности микроорганизмима

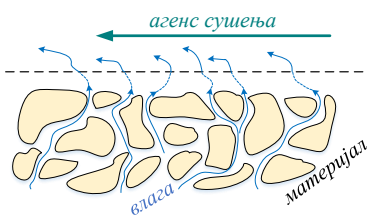
2: Снижавањем температуре хране успоравају се хемијске промене у њој. Познато је да се снижењем температуре за 10°C већина хемијских и биохемијских реакција успорава 2 до 3 пута. Додатно очување хране може се постићи хлађеним складиштењем у контролисаној атмосфери, тј. у атмосфери са сниженом концентрацијом кисеоника, тзв. ULO атмосфера (*енг. Ultra Low Oxygen*)



Слика 1.1: Илустрација старог традиционалног начина сушења. (извор: *National Museum of Scotland*)

На илустрацији је приказана пећ за сушење. Овакве пећи су се традиционално користиле све до индустријске револуције у 19. веку. Обично су се састојале од укопане јаме, у облику кључаонице или осмице, покривене надградњом од разних материјала попут земљаних бусена, дрвета, камена и сламе. У јама се ложила ватра, а изнад у надграђеном делу се сушило жито.

3: У страниој литератури се прави разлика између појмова „дехидратација” и „сушење”. Наиме, дехидратација подразумева уклањање воде из материјала, док је сушење шири појам и подразумева губитак било које супстанце у течном стању коју материјал може садржати. Имајући у виду да је код прехранбених материјала вода доминантан флуид у материјалу, поменути појмове можемо поистоветити.



Слика 1.2: Илустрација процеса преношења влаге из унутрашњих слојева материјала у агенс који опструјава материјал.

1.2 Дехидратација

Када се влажан материјал стави у поље агенса сушења, са нижим парцијалним притиском водене паре (на истој температури), вода ће напуштати влажан материјал све док се не успостави стање равнотеже (Слика 1.1). Агенс је најчешће влажан ваздух који се може наћи на притисцима у распону од дубоког вакуума до атмосферског притиска (и више). Међутим, као агенс, може се користити и прегрејана водена пара, врело уље, разни растварачи и раствори. Теорија сушења својим огромним делом наслања се на део термодинамике који се бави преношењем масе и топлоте.

*Дехидратација (или сушење*³*) дефинише се као „довођење топлоте под контролисаним условима, како би се вода присутна у материјалу уклонила испаравањем или у случају процеса лиофлизације сублимацијом”.* Оваквом дефиницијом се искључују остали случајеви операција за уклањање воде (нпр. механичка или мембранска сепарација, укувавање и печење). Изузетак је осмотско сушење, где се уклањање воде врши услед разлике осмотских притисака. Дехидратација је сложен нестационарни технолошки процес који подразумева истовремено преношење масе и топлоте кроз хигроскопни систем чија се запремина и структура често мењају током извођења самог процеса (Слика 1.2). Овај процес захтева разумевање и познавање равнотежних релација између воде садржане у материјалу и воде у агенсу. Познавање структурно-механичких, технолошких и биохемијских својстава материјала који се суши, такође доприноси разумевању дехидратације.

Главни технолошки циљеви дехидратације хране су:

- ▶ смањење активности воде,
- ▶ смањење масе и запремине хране,
- ▶ трансформација хране у форму погоднију за складиштење, паковање, транспорт и употребу,
- ▶ давање храни одређених пожељних особина као што су другачији укус, хрскавост, жилавост итд.

Дехидратација је можда најразноврснији начин конзервирања у погледу методологије, применљивости и свестраности, међутим у основи дехидратације налази се крајње једноставан принцип: материјал се ставља у домет агенса чији је парцијални притисак воде низак и остаје ту све док садржај воде у материјалу не падне до жељеног нивоа. Супротан процес се назива *рехидратација*⁴ материјала.

Брзина процеса сушења зависи од брзина процеса преношења масе и топлоте. Преношење топлоте са агенса сушења на материјал се може обавити било којим од механизма простирања топлоте⁵ појединачно или њиховом комбинацијом.

1.3 Особине материјала

Решавању проблема преношења топлоте и масе у техници сушења приступа се другачије него што би се то радило у другим областима машинства. Главни узрок за овакву промену приступа је сложеност структуре третираног материјала чије особине (у најширем смислу те речи) могу битно варирати унутар истог узорка (шарже, контингента). Због тога овде, више него у било којој области техничко-технолошких наука, експериментално истраживање представља основу за прорачун и пројектовање система за сушење. Експериментима се долази до података који су потребни за упознавање особина агенса и материјала, као и корелација међу параметрима процеса, па је потом и могуће одредити погонску силу процеса сушења.

Најчешће испитиване особине прехранбених материјала могу се класификовати у две главне групе: *инжењерске особине* материјала и особине које су повезане са *квалитетом материјала*. Инжењерске особине материјала су од суштинског значаја за пројектовање прехранбених процеса и опреме за прераду, као и за ефикасан рад и контролу система за прераду. Под појмом „квалитет“ прехранбеног материјала подразумева се низ особина сушеног материјала које су карактеристичне за различите фазе процеса сушења. Иако особине повезане са квалитетом материјала нису потребне за предвиђање времена сушења и моделирање процеса, оне су важне за карактеризацију и предвиђање квалитета осушеног производа (Слика 1.3). Такође, веома су важне и приликом развоја нових индустријских производа са жељеним особинама или за побољшање квалитета већ постојећих. Током процеса сушења, жељене особине прехранбених материјала могу се постићи: контролом карактеристика хране додавањем или одузимањем састојака у циљу њиховог очувања, излагањем различитим формама енергије (топлота, светлост, електрицитет, физичка сила), и контролом или избегавањем реконструкције хране.

Актуелна класификација особина прехранбених материјала доживела је неколико ревизија од њеног првог објављивања у

4: *Рехидратација* се може сматрати мером деструкције материјала током процеса дехидратације. Већа рехидратација указује на то да је производ квалитетнији. Рехидратацијом осушени производ враћа у себе (упија) влагу и на тај начин долази у стање влажности блиско стању пре сушења материјала. О рехидратацији ће се говорити у посебном потпоглављу.

5: Основни механизми преношења топлоте су: *кондукција* (провођење), *конвекција* (прелажење) и *радијација* (зрачење).



Слика 1.3: Осушени орашasti плодови и воће (илустрација: К&А Злајановић)

International Journal of Food Properties 1999. године [1]. Према овој класификацији особине материјала могу се сврстати у четири главне групе:

1. Физичке и физичко-хемијске особине

а) Механичке особине

- ▶ Акустичке особине
- ▶ Особине у вези са масом, запремином и површином прехранбеног материјала
- ▶ Морфометријске особине (величина и облик, обриси и контуре, форма)
- ▶ Реолошке особине⁶
- ▶ Структуралне карактеристике
- ▶ Површинске особине

б) Термичке особине

в) Термодинамичке особине⁷

г) Дифузионе особине

д) Електромагнетне особине (описују интеракцију материјала са електромагнетним пољем)

ђ) Физичко-хемијске константе

2. Кинетичке особине

а) Биолошке, биохемијске, хемијске, физичко-хемијске и физичке промене у храни описане кинетичким константама

б) Микробиолошка активност описана кинетичким константама

3. Органолептичке особине⁸

а) Особине примећене чулом додиром

б) Особине текстуре

в) Оптичке особине (боја и изглед)

г) Особине укуса

д) Особине мириса

ђ) Звучне особине

4. Здравствене особине

а) Позитивне по здравље људи

▶ Нутритивни састав⁹

▶ Медицинске или терапеутске особине (од значаја за превенцију болести и лечење болести)

▶ Функционалне особине (од значаја за индивидуално физичко и ментално здравље, као и успоравање процеса старења)

б) Негативне по здравље људи

▶ Токсичност при било којој концентрацији

▶ Токсичност при одређеној концентрацији

▶ Прекомерни или неуравнотежени унос

6: Реологија је грана физике која се бави проучавањем деформације и протока материјала, чврстих и течних материја, односно материјала са карактеристикама чврстог и течног стања.

7: За разлику од *термичких* особина које описују понашање прехранбеног материјала кроз који се преноси топлота, *термодинамичке* особине описују понашање прехранбеног материјала приликом промене термодинамичког стања или фазне промене.

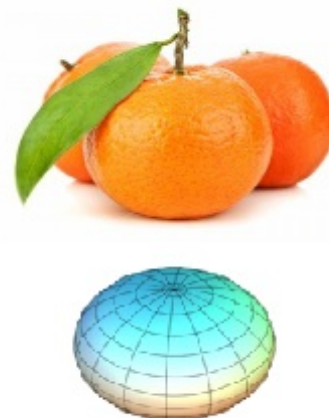
8: *Органолептичка својства* хране се одређују људским чулима, а не могу се одредити инструменталним аналитичким техникама. То су: изглед, боја, мирис и укус, при чему се под изгледом производа подразумевају облик и величина који се испитују додиром руке или језика (вискозност, чврстоћа, тврдоћа, растезљивост, пластичност, хрскавост и слично).

9: *Нутритивни или хранљиви* састојци се могу поделити у две основне групе: макронутријенти (вода, угљени хидрати, протеини и масти) и микронутријенти (витамини, ензими, пигменти, минералне материје, ароматичне материје, пектини, танинске материје и друго).

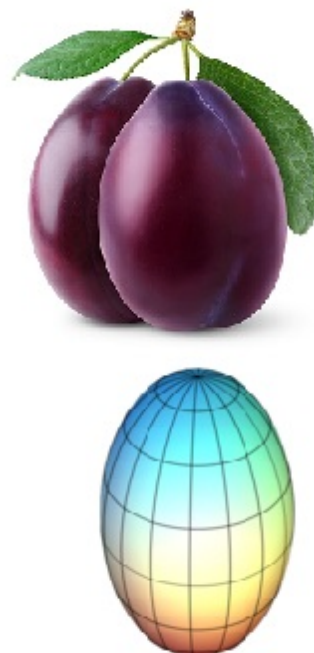
Карактеристике квалитета су под утицајем многобројних фактора који се јављају током сушења, али све оне су на крају повезане са температуром сушења и динамиком уклањања влаге из материјала. Доведена топлота и време излагања производа агенсу повишене температуре приликом сушења, утичу на нутритивни квалитет прехранбених производа. Такође, процес сушења утиче и на рехидратацију, растворљивост, изглед текстуре и губитак ароме. Повећање температуре сушења и периода излагања материјала утиче на његову хранљивост, садржај витамина и протеина, као микробиолошка структуру материјала. Током сушења материјал губи природну боју и услед оксидације липида добија браонкасту боју. Такође, губитак природних пигмената као што су каротеноиди, хлорофил и ксантофил је повезан са променом боје сушеног воћа и поврћа. Иако је промена боје понекад повезана са нежељеним хемијским променама које се дешавају у материјалу, прави проблем је у (не)прихватању од стране конзумента. Индустрijски развијене земље, производњу и примену одговарајућих технологија сушења уређују специјалним протоколима који узимају обзир различите утицајне факторе још у раним фазама пројектовања. На пример, Агенција за заштиту животне средине САД (енг. *United States Environmental Protection Agency - US EPA*) захтева да се при дизајнирању система сушења посебно обрати пажња на: карактеристике материјала који се суши, контролу продукције прашине и честица приликом сушења, складиштење осушеног производа, спречавање бактериолошке неисправности материјала, положај система сушења у односу на канализационе системе, капацитете система и инфраструктуре на коју се повезује, прикупљање и складиштење отпадног материјала, енергетску ефикасност постројења, безбедносне ризике и заштиту на раду.

У наставку текста биће речи само о особинама које су од изузетног значаја за одвијање процеса сушења, не умањујући значај осталих особина.

Запремина. *Сиварна запремина* је запремина материјала обухваћена геометријском границом материјала. Запремина коју храна заузима (плод или паковање) често се може апроксимирати запремином неког од правилних геометријских тела (сфера, ваљак, купа, коцка, квадар) или сложеним геометријама као што су спљоштен (Слика 1.4) или издужен (Слика 1.5) сфероид, зарубљена пирамида или купа, и слично (Табела 1.1). Запремина материјала може се мерити силом узгона; течност, гас или чврста супстанца; или адсорпцијом гаса; такође се може проценити на основу геометријских димензија ма-



Слика 1.4: Илустрација апроксимације геометријског облика плода мандарине спљоштеним сфероидом.



Слика 1.5: Илустрација апроксимације геометријског облика плода шљиве издуженим сфероидом.

Табела 1.1: Запремина и површина неких од правилних геометријских тела.

За сфероид:

 a и b - велика и мала оса елипсе редом, e - ексцентричност:

$$e = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2},$$

За зарубљену купу:

 r_1 и r_2 - полупречници базе и зарубљеног дела редом, L - висина,

За торус:

 R - главни полупречник торуса, r - полупречник цеви торуса.

Тело	V, m^3	A, m^2
Лопта	$\frac{4}{3}\pi r^3$	$4\pi r^2$
Ваљак	$\pi r^2 L$	$2\pi r^2 + 2\pi r L$
Коцка	a^3	$6a^2$
Квадар	abc	$2ab + bc + ca$
Купа	$\frac{1}{3}\pi r^2 h$	$\pi r \sqrt{r^2 + h^2}$
Издужен сфероид	$\frac{4}{3}\pi ab^2$	$2\pi b^2 + \frac{2\pi ab}{e} \sin^{-1} e$
Спљоштен сфероид	$\frac{4}{3}\pi a^2 b$	$2\pi a^2 + \frac{\pi b^2}{e} \ln\left(\frac{1+e}{1-e}\right)$
Зарубљена купа	$\frac{\pi}{3}L(r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2)$	$\pi(r_1 + r_2)\sqrt{L^2 + (r_1 - r_2)^2}$
Торус	$2\pi^2 R r^2$	$4\pi^2 R r$

теријала. *Запремина пора* је запремина празнина или ваздуха унутар материјала. Код намирница сложеног геометријског облика, запремина се може одредити комбинацијом целих или делова правилних геометријских тела (Слика 1.6).

Специфична површина. *Специфична површина* материјала се дефинише као однос контактне површине материјала (честица) са околном средином и запремине материјала, према (1.1),

$$S = \frac{A_{12}}{V} = 1 - \frac{\beta}{\delta} \quad (1.1)$$

где су: S - специфична површина у m^{-1} ; A_{12} - контактна површина између материјала (или фаза) 1 и 2 у m^2 ; V - запремина материјала у m^3 ; β - фактор облика (за сферу је $\beta = 6$); δ - карактеристична дужина у m . У прорачунима процеса сушења веома често се користе две врсте површине: спољашња гранична површина честице (или предмета) и површина свих пора/шупљина уколико се посматра порозни материјал. Изрази за одређивање специфичних површина сушења за тела правилног геометријског облика, за случај да су са свих страна

Табела 1.2: Специфичне површине правилних геометријских тела.

Тело	S, m^{-1}
Коцка, ивица a	$\frac{6}{a}$
Лопта, пречника d	$\frac{6}{d}$
Ваљак, полупречника r и висине h	$2\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{h}\right)$
Дуги цилиндар, полупречника r	$\frac{2}{r}$
Квадар, ивица $a \times b \times c$	$2\left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c}\right)$
Слој материјала велике површине и дебљине l	$\frac{2}{l}$

опструјавана ваздушном струјом, дати су у табели 1.2. У случају да материјал није изложен дејству ваздуха са свих страна, потребно је кориговати приказане формуле, множењем са уделом опструјаване површине у укупној спољашњој површини материјала. На тај начин може се добити активна површина, тј. површина која учествује у размени топлоте и масе.

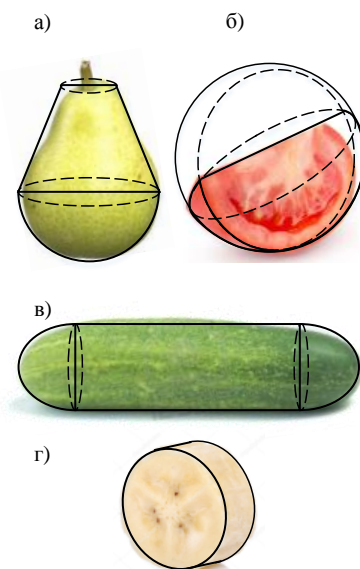
Дисперзност. *Дисперзност* је особина прешкастих, ситњених, мрвљених или зрнастих материјала, од значаја за описивање дисперзионог стања материјала. *Дисперзија* је хетерогени систем који се састоји најмање од две фазе материјала, и у коме су честице једног материјала (диспергована компонента/ честица)¹⁰ распршене у континуираној фази другог материјала (дисперзионо средство или средина). Ове две фазе могу бити у истим или различитим агрегатним стањима материје. Међутим, уколико су капљице течности (уместо чврстих честица) распршене у другој течности, овакав систем називамо *емулзијом*. Уколико су честице довољно велике за седиментацију (таложење) дисперзију називамо *суспензијом*, док се оне са мањим честицама називају *колоиди или раствори*. Дисперзије не поседују никакву структуру, те се претпоставља да су честице распршене у течној или чврстој матрици дисперзионог средства. Њихове особине се често описују статистичким методама. Према међународним стандардима дисперзије се описују величином која се назива *дисперзност* (стари назив је *индекс полудисперзности*), а одређује према (1.2),

$$D = \frac{M_w}{M_n} \quad (1.2)$$

где су: D - дисперзност (или некада индекс полудисперзности - PDI); M_w - просечна моларна маса; M_n - просечна бројна моларна маса. На дисперзност утичу облик и димензије честица, карактер и стање површине честица, примесе, итд.

Еквивалентни пречник. *Еквивалентни пречник* геометријског тела неправилног облика је пречник хипотетичког идеалног геометријског тела које може имати исте специфичне особине (запремину, површину, површину пројекције, брзину таложења, хидраулични отпор и слично) као и неправилно тело. Неки од карактеристичних пречника (Слика 1.7) који се користе при описивању димензија комада материјала (плода, узорка, честице, итд.) су:

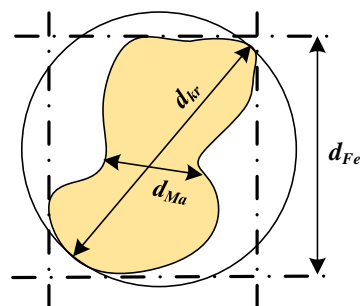
- *Феретов пречник* (d_{Fe}) - представља висину хоризонталне пројекције.



Слика 1.6: Одређивање запремених облика намирница. а) крушка (зарубљена купа и полулопта), б) парадајз (четвртина лопте), в) краставац (ваљак и две половине сфероиде), г) колут банане (ваљак).

10: Према величини диспергованих честица, дисперзиони системи могу бити:

1. грубодисперзни (пречник честице $d > 10^{-7}$ m)
2. колоидни ($10^{-9} \leq d \leq 10^{-7}$ m)
3. финодисперзни ($d < 10^{-9}$ m)



Слика 1.7: Хоризонтална пројекција (поглед одозго) комада материјала (плода, узорка, честице, итд.) са уцртаним:

- d_{Fe} - Феретовим,
- d_{Ma} - Мартиновим и
- d_{kr} - главним пречником.

Табела 1.3: Примери сферичности по Ваделу неких геометријских облика. [2]

Облик	φ_{Wa}
Сфера	1,000
Цилиндар	0,874
Октаедар	0,846
Коцка	0,806
Тетраедар	0,670
Игла	$\rightarrow 0$
Зрно:	
- кукуруза	0,655
- пшенице	0,833
- овса	0,970
- соје	0,860
Кромпир	0,780

► *Марџинов пречник* (d_{Ma}) - пречник који пресеца хоризонталну пројекцију на два дела истих површина које могу или не морају бити различитих облика).

► *Главни пречник* (d_{kr}) - пречник најмање описане кружнице око хоризонталне пројекције.

Сферичност. *Сферичност* је бездимензиони однос којим се описује сличност облика комада материјала са идеалним сферним обликом. Одређује се количником било ког еквивалентног пречника комада материјала ($d_{m.ekv}$) и пречника најмање сфере описане око посматраног комада материјала (d_{sf}), према (1.3).

$$\varphi = \frac{d_{m.ekv}}{d_{sf}} \quad (1.3)$$

$$\varphi_{Wa} = \frac{A_{V.sf}}{A_m} \quad (1.4)$$

Сферичност по Ваделу је често коришћен фактор облика (Табела 1.3) који се дефинише количником површине запремински-еквивалентне сфере посматраног комада материјала ($A_{V.sf}$) и површине комада материјала (A_m), према (1.4).

Заобљеност. *Заобљеност* је фактор облика пројекције комада материјала на неку раван, а тиче се описивања заобљености добијене пројекције (Слика 1.8). Фактор заобљености (f_R) пољопривредних производа се може дефинисати на три начина:

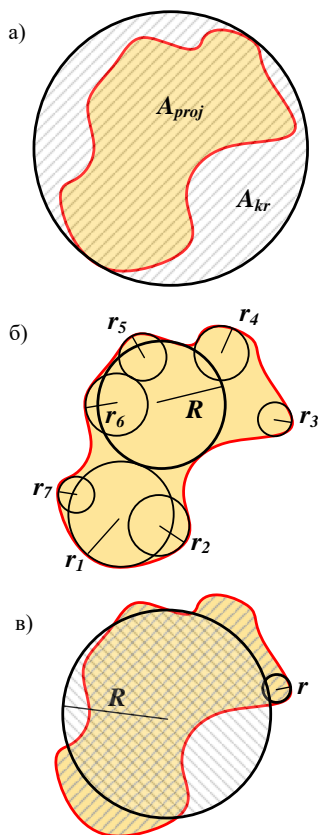
1. *начин* (Слика 1.8а): f_R се израчунава као количник површине највеће пројекције (A_{proj}) и површине најмање описане кружнице око те пројекције (A_{kr}), према (1.5).

$$f_R = \frac{A_{proj}}{A_{kr}} \quad (1.5)$$

2. *начин* (Слика 1.8б): На попречном пресеку контуре, унутар заобљења, уписују се кругови и мере њихови полупречници (r_1 до r_N), а потом упише и највећи могући круг пречника R . f_R се израчунава на основу свих измерених полупречника, према (1.6).

$$f_R = \frac{\sum_{i=1}^N r_i}{NR} \quad (1.6)$$

3. *начин* (Слика 1.8в): f_R се израчунава као количник полупречника (r) најмањег измереног заобљења на контури и полупречника средњег круга (R)



Слика 1.8: Илустрација одређивања заобљености плода неправилног геометријског облика.

(круг који има површину једнаку површини посматраног попречног пресека), према (1.7).

$$f_R = \frac{r}{R} \quad (1.7)$$

Приликом посматрања материјала кроз неки оптички уређај, ради добијања дводимензионалне слике (пројектована површина), оријентација комада материјала (узорка, плода, семенке, зрна, честице, итд.) током посматрања најчешће је последица тенденције материјала да стоји у стабилном природном положају. Стога се на тај начин уочен (снимљен) фактор заобљености најчешће разликује од узорка до узорка. Репрезентативна вредност заобљености се мора установити снимањем већег броја узорака и рачунањем просечне вредности.

Пропорционалност. *Пројорционалности* је особина која се дефинише кроз фактор пропорционалности геометријског облика комада/узорка материјала, као количник ширине A и висине H посматраног облика, према (1.8).

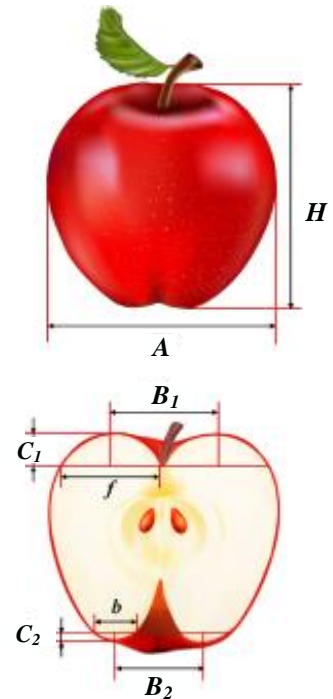
$$f_p = \frac{A}{H} \quad (1.8)$$

Вредност $f_p = 1$ указује на компактнији геометријски облик близак облицима сфере или коцке, док много мање/веће вредности указују на издуженост/спљоштеност посматраног тела (Слика 1.9).

Фрактална димензија. *Фрактална димензија* материјала је особина која проистиче из комплексније математичке анализе тј. фракталне анализе. Фрактали се користе да опишу комплексне облике материјала како би квантификовали њихове структурне промене током различитих процеса. Често се користе и за проучавање структурних и механичких промена прехранбених материјала, примећених микроскопским посматрањем узорака материјала. Фрактална димензија се одређује пребројавањем поља од интереса (на транспарентној квадратној мрежи преклопљеној преко графичког или фото приказа за или снимка), а рачуна према (1.9),

$$FD = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log(N(r))}{\log(1/r)} \quad (1.9)$$

где су: FD - фрактална димензија; $N(r)$ - број поља од интереса; r - укупан број поља преклопљене мреже. Фракталном анализом је могуће доћи до резултата којим ће се предвидети понашање материјала приликом скупљања или рехидратације, посебно код материјала код којих промена запреmine није једнодимен-



Слика 1.9: Илустрација најчешће коришћених геометријских карактеристика плода Јабуре за описивање њених морфометријских особина.

Еквивалентни пречник:

$$d_{m.ekv} = (H \cdot A^2)^{\frac{1}{3}}$$

Сферичност:

$$\varphi = \frac{d_{m.ekv}}{H}$$

Површина површи:

$$S = \frac{\pi \cdot d_{m.ekv}^2}{2}$$

Запремина:

$$V = \frac{\pi \cdot d_{m.ekv}^3}{6}$$

Површина пројекције:

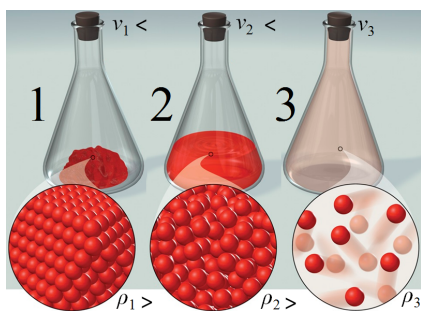
$$P = \frac{\pi \cdot d_{m.ekv}^2}{4}$$

Фактор пропорционалности:

$$f_p = \frac{A}{H}$$

Напомена:

Параметри b , f , B_1 , B_2 , C_1 и C_2 се одређују емпиријским једначинама модела у којима фигуришу величине у наведеним једначинама. [3]



Слика 1.10: Илустрација повезаности густине и специфичне запремине: 1-чврсто, 2-течно и 3-гасовито агрегатно стање материје.

11: Изузетак представља *осмотско сушење*. Осмотско сушење утиче на праве вредности густине због феномена преноса масе који се дешавају током осмотског третмана. Губитак воде и увећање чврсте супстанце осмотски-дехидрираног воћа утичу на густину сувих чврстих супстанци, која може достићи вредност густине шећера. О овој врсти сушења ће се говорити у посебном потпоглављу (страна 187).

Табела 1.4: Емпиријске једначине за израчунавање густине различитих састојака хране. [4]
 t - температура у °C

зионална нити изотропно тродимензионална, већ прати фрактално-димензионалне релације.

Густина. *Густина* је једна од најважнијих механичких особина материјала која се одређује количником масе и запремине материјала, према (1.10),

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v} \quad (1.10)$$

где су: ρ - густина у kg/m^3 ; m - маса у kg ; V - укупна запремина у m^3 ; v - специфична запремина у m^3/kg .

Густина је интензивна термодинамичка величина чија се реципрочна вредност назива *специфична запремина* материјала (Слика 1.10). Густина је величина која се углавном користи за описивање чисте материје што није случај са намирницама, које су мултикомпонентне мешавине, често и нехомогене. Током сушења се густина материјала повећава све док не достигне вредност густине потпуно сувог материјала. Начин сушења не утиче на густину потпуно сувог материјала на крају процеса¹¹. Густина намирница се најчешће одређује експериментално или емпиријским једначинама. Имајући у виду адитивну особину специфичне запремине, *густина смеше* се може одредити према (1.11),

$$\rho_m = \left[\frac{1}{m_1/\rho_1 + m_2/\rho_2 + \dots + m_n/\rho_n} \right] \quad (1.11)$$

где су: ρ_m - густина смеше у kg/m^3 ; ρ_n - густина n -тог састојка у kg/m^3 ; m_n - маса n -тог састојка у kg . Густина макронутријенатских састојака хране се може одредити и емпиријским једначинама у зависности од температуре материјала (Табела 1.4). Код течних намирница се често употребљава величина која се назива *специфична густина* (енг. *specific gravity*), а одређује се количником између густине течности и густине воде

Материјал	ρ , kg/m^3
Вода	$997.18 + 3.1439 \cdot 10^{-3} t - 3.7574 \cdot 10^{-3} t^2$
Лед	$916.98 - 1.3071 \cdot 10^{-1} t$
Протеини	$1329.9 - 5.1840 \cdot 10^{-1} t$
Маси	$925.59 - 4.1757 \cdot 10^{-1} t$
Угљени хидрати	$1599.1 - 3.6589 \cdot 10^{-1} t$
Влакна	$1311.5 - 3.6589 \cdot 10^{-1} t$
Суви остатак	$2423.8 - 2.8063 \cdot 10^{-1} t$

(као референтне течности за поређење) према (1.12),

$$SG = \frac{\rho}{\rho_{H_2O}} \quad (1.12)$$

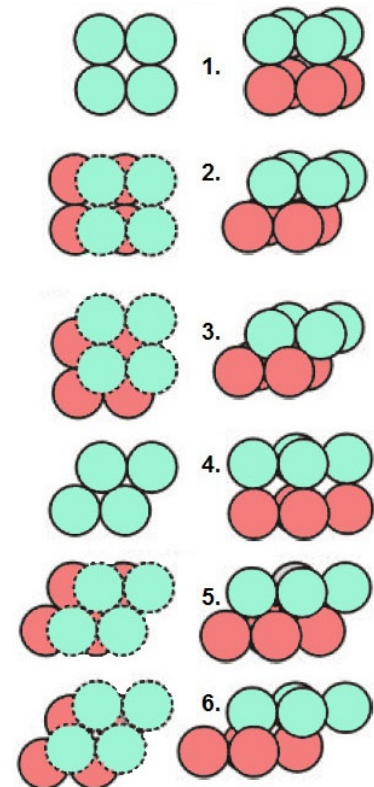
где је: SG - специфична густина. Приликом коришћења ове величине, температура и притисак морају бити наведени и за узорак и за референцу.

Насипна (ћривидна, заћремиска) ћусћина је особина прашкастих, грануластих, зрнастих и сличних растреситих материјала. Може се израчунати тако што се укупна маса свих честица материјала подели са укупном запремином коју је насут материјал заузео. Укупна запремина укључује запремину честица, празнину међу честицама и унутрашњу запремину пора. Насипна густина није суштинска особина материјала јер се може променити у зависности од начина на који се са материјалом поступа.

Порозност. *Порозносћ* је особина која указује на запремински удео празног простора или ваздуха у материјалу, чиме је могуће сагледати величину пора/шупљина у материјалу. Порозност је особина која постоји код насутих материјала, као и само код једног појединачног комада материјала. Може се израчунати из (1.13) као количник запремине празног простора и укупне запремине коју заузима влажан материјал или на основу познавања вредности насипне густине и густине материјала.

$$\epsilon = \frac{V_p}{V} = 1 - \frac{\rho_n}{\rho} \quad (1.13)$$

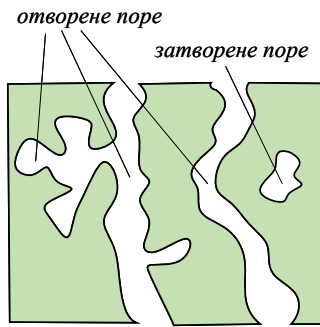
где су: V_p - запремина празног простора у m^3 ; V - укупна запремина материјала у m^3 ; ρ_n - насипна густина у kg/m^3 ; ρ - густина у kg/m^3 . Стога, порозност је бездимензиона величина која може имати вредности од $0 \div 1$, односно процентуално од $0 \div 100\%$. Већа величина честице значи и већу порозност материјала. Највећу порозност имају материјали чије су честице сферне. Величина порозности материјала чије се честице могу апроксимирати сферним обликом може варирати услед различитог распореда честица и њиховог међусобног налегања (Слика 1.11) у опсегу $26 \div 47.6\%$. За насумично насуте материјале се препоручује усвајање прорачунске вредности порозности $\epsilon \geq 39\%$. Уколико посматрамо јединствени комад материјала (не насут), порозност осушеног материјала доста зависи од начина сушења и директно утиче на квалитет рехидратације тог материјала. Током процеса сушења порозност расте док се



Слика 1.11: Илустрација међусобног налегања сферних честица, при чему су са леве стране приказане пројекције одозго, а са десне стране погледи са стране.

У зависности од облика геометријског тела које се добије спајањем центара сфери у приказаним случајевима, могућа су следећа међусобна налегања сферних честица и њима одговарајући проценат порозности материјала у том појединачном случају:

1. Коцка (47.6%)
2. Хексагонално (39.5%)
3. Ромбохедрално (26%)
4. Орторомбично (39.5%)
5. Тетрагонално (30.2%)
6. Триклинично (26%)



Слика 1.12: Илустрација отворених и затворених пора у материјалу.

12: Вредности коефицијената статичког и динамичког трења зависе од врсте и облика прехранбеног материјала као и од материјала површине по којој клизи. Тако на пример, мање вредности се добијају код глатких површина подлоге (стакло, пластика, винил, фолије, итд.), док се веће вредности добијају код хранавијих површина (гума, префориране површи, благо оребрене или назубљене површи, итд.

13: Маса апсолутно сувог материјала за потребе испитивања у области сушења намирница, најчешће се одређује *методом загревања материјала на 105°C* у периоду од 24 часа. Може се сматрати да је након овог третмана материјал апсолутно сув.

не постигне коначна порозност потпуно сувог материјала. Порозност материјала на крају сушења зависи и од структурних карактеристика материјала и деформације коју је процес сушења изазвао. У поређењу са осталим начинима сушења, најпорознији су материјали осушени у поступку лиофилизације, потом следе микроталасно и вакуумско сушење, и на крају класичне методе конвективног сушења у ваздушној струји. Међутим, ово не треба узети као правило јер порозност осушеног производа зависи од великог броја фактора. Различите форме порозности (Слика 1.12) присутне су код прехранбених материјала у виду отворених и затворених пора. *Отворене поре* су повезане са површи материјала и утичу на његову *површинску порозност*. Повезане су са околном средином или са другим отвореним порима које се прожимају кроз материјал. *Затворене поре* се јављају у унутрашњости материјала и нису ни на који начин повезане са спољашњом средином.

Коефицијенти статичког и динамичког трења. *Коефицијенти статичког и динамичког трења* материјала дефинишу најмањи угао при којем материјал клизи (или почиње да клизи) по некој површини¹². Ове величине су од значаја при пројектовању различитих врста транспортера зрнастих материјала и семена. Коефицијент *статичког* трења је једнак тангенсу најмањег угла при којем материјал почиње да клизи по површини. Коефицијент *динамичког* трења је једнак тангенсу најмањег угла при којем материјал клизи по површини. Код зрнастих материјала можемо разликовати две врсте трења: трење које се јавља између зрнастог материјала и зидова (или подлоге) простора у/по коме се материјал креће; и унутрашње трење које се јавља између површина самог зрнења које се додирује међусобно током транспорта/кретања.

Структура влажног материјала. Влажан материјал (скр. в.м.) има структуру састављену од чврстог скелета чије су поре и капиларе испуњене течностима и гасом. Маса гаса (ваздуха) се најчешће занемарује у односу на масе других структурних компоненти, тако да се укупна маса в.м. може одредити према (1.14),

$$m = m_{sm} + m_w \quad (1.14)$$

где су: m - укупна маса в.м. у kg; m_{sm} - маса апсолутно сувог материјала¹³ у kg; m_w - маса влаге у kg. Стање в.м. одређују температура и влажност материјала. Влажност материјала се у области сушења материјала

представља помоћу *релативне* и *апсолутне* влажности материјала. *Релативна влажност* в.м. се може одредити према¹⁴ (1.15),

$$y = \frac{m_w}{m} = \frac{m_w}{m_{sm} + m_w} \quad (1.15)$$

где је: y - релативна в.м. у ($\text{kg}_w/\text{kg}_{v.m.}$). *Апсолутна влажност* в.м. представља однос масе садржане влаге у в.м. и масе апсолутно сувог материјала, према (1.16),

$$u = \frac{m_w}{m_{sm}} \quad (1.16)$$

где је: u - апсолутна в.м. у ($\text{kg}_w/\text{kg}_{sm}$).

$$u = \frac{y}{1 - y} \quad (1.17)$$

Веза између релативне и апсолутне в.м. се може успоставити према (1.17). *Концентрација влаге* материјала се дефинише као однос масе влаге по јединици запремине в.м., према (1.18),

$$c_w = \rho_{sm} \cdot u \quad (1.18)$$

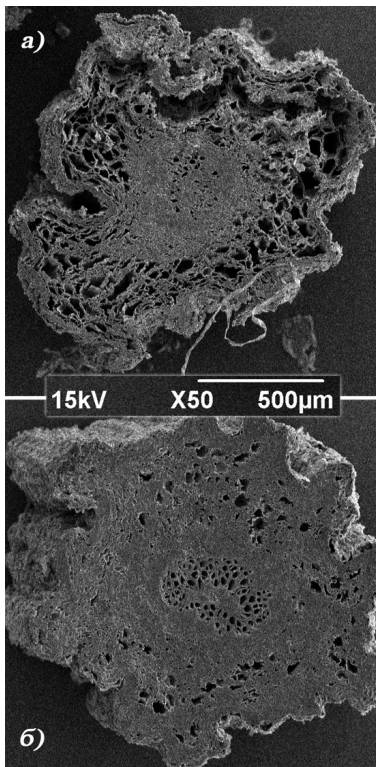
где су: c_w - концентрација влаге у $\text{kg}_w/\text{m}_{sm}^3$; ρ_{sm} - густина апсолутно сувог материјала у $\text{kg}_{sm}/\text{m}_{sm}^3$.

Контракција (скупљање) материјала. *Контракција материјала* је промена запремине прехранбеног материјала, која се дешава током процеса сушења (Слика 1.13), формирања кристала леда код замрзавања, или формирање пора при екструдирању хране. Очвршћавање материјала је повезано или је последица скупљања материјала, што некада може бити и пожељно када је у питању коначан изглед осушеног производа. *Привидна контракција* материјала је однос запремина на крају и почетку процеса сушења, а често се приказује процентуално од 0÷100%. Брзина сушења материјала доста утиче на начин контракције материјала (Слика 1.14). Током сушења не долази само до смањивања намирнице већ и до значајне деформације облика, што може утицати на визуелну привлачност (пуцање површине материјала, смањена могућност рехидратације, и слично) и начин паковања производа. Деформација и колапс порозне структуре намирнице може утицати на промену њених физичких својстава. Контракција се често посматра као промена карактеристичне димензије материјала (*линеарна, 1D контракција*) или површине материјала (*површинска, 2D контракција*). *Линеарна контракција* узорка се може одредити према (1.19),

14: Недостатак оваквог начина приказивања в.м. је у томе што је укупна маса в.м. величина која се током процеса сушења мења (опада).



Слика 1.13: Илустрација скупљања парадајза сеченог на 1/2 током процеса сушења.



Слика 1.14: Илустрација скупљања корена Валериане (*Valeriana officinalis*).

Попречни пресек корена је посматран електронским микроскопом са увећањем $\times 50$. На слици (а) се може видети како је интензивно и брзо сушење "шокирало" материјал, довело до формирања очврснеле љуске на спољашњим површима, што је даље отежало излазак влаге из унутрашњих слојева материјала. Равномерније сушење (б) довело је до уједначенијег напуштања влаге из свих слојева материјала, а самим тим и равномернијег скупљања.

15: *Пластицизација* је гужвање мембранске структуре материјала услед напуштања течности, а често и истовременог продирања гасова кроз мембрану. Губитак хрскавости хране је на пример последица пластицизације воде.

16: На пример, у спреј сушарама се млеко у праху добија из млека које је потпуно течног стања на почетку процеса сушења. Сличан пример је добијање екстракта кафе лиофилизацијом.

$$\alpha = \frac{L - L_0}{L_0(u_p - u_k)} \quad (1.19)$$

где су: α - коефицијент линеарне контракције; L - линеарна димензија узорка у m ; L_0 - почетна димензија узорка; u_p и u_k - почетна и крајња влажност материјала респективно у (kg_w/kg_{sm}) . *Запреминска контракција* се може одредити према (1.20),

$$\beta = \frac{V - V_0}{V_0(u_p - u_k)} \quad (1.20)$$

где су: β - коефицијент запреминске контракције; V - запремина узорка у m^3 ; V_0 - почетна запремина узорка у m^3 . *Изоћројна контракција* представља равномерно скупљање свих геометријских димензија материјала. Већина воћа и поврћа се приликом сушења се скупља изотропно. *Анизоћројна контракција* представља неравномерно скупљање неких димензија материјала. Материјали влакнасте структуре се скупљају анизотропно, тј. контракција у подужном правцу влакана није иста као контракција у правцу попречном на влакна. Контролисано скупљање материјала захтева детаљније познавање неколико фундаменталних механизма који директно утичу на овај процес: површински напон, пластицизација¹⁵, електростатички ефекат, механизми транспорта влаге кроз материјал и гравитациони утицај. Додатну потешкоћу у успешном предвиђању начина скупљања намирнице представља чињеница да се ни један узорак не смањује и деформише на исти начин, чак и у најконтролисанијим условима сушења. Сложена структура материјала онемогућава експлицитно формулисање законитости скупљања, тако да се сусрећу разни модели предвиђања скупљања: линеарни, еластични, хипер-еластични, еластопластични и вискоеластични модели, чија примена зависи од карактеристика материјала.

Вискозност. *Вискозност* је особина којом се описује деловање сила унутрашњег трења у флуидима. Вискозност течности представља отпор којим се поједини слојеви течности супротстављају кретању једног у односу на други као и кретању неког тела кроз течност, а зависи од природе течности, температуре и притиска. Механичке особине хране су по природи мултифазне и варирају од изразито течног стања (нпр. пиво, воћни сокови, итд.) до изразито чврстог стања (нпр. бисквити, чоколада, итд.). Међутим, сушењем се влага уклања и храна мења стање ка чврстој форми,¹⁶ концентрише

се, згушњава и тиме бива изложена потпуним механичким променама. На свом путу од течног ка "сувом" стању, храна пролази кроз низ међустања чија својства могу варирати практично неограничено и у простору и у времену. *Њутновски флуиди (или нормалне течно-сци)* су флуиди који се понашају по Њутновом закону вискозности (1.21).

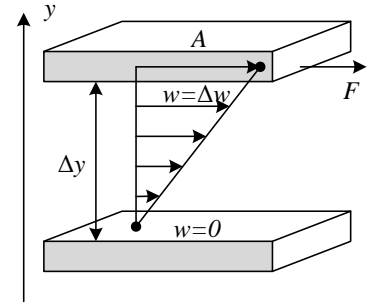
$$\tau_y = \frac{F}{A} = -\mu \frac{\Delta w}{\Delta y} \quad (1.21)$$

где су: τ_y - напон смицања у Ра; F - сила смицања у N; A - површина нормална на y -правац у m^2 ; μ - динамичка вискозност у Ра·s; $\Delta w/\Delta y$ - градијент брзине дуж y -правца (брзина деформисања) (Слика 1.15). *Нењутновски флуиди* показују нелинеарну зависност између примењене силе по јединици површине и градијента брзине. Ова нелинеарност би се математички обухватила помоћу *индекса понашања пројшока (n)* којим би градијент брзине у једначини (1.21) био степенован (тј. $(\Delta w/\Delta y)^n$). То значи да њутновски флуиди имају $n = 1$.

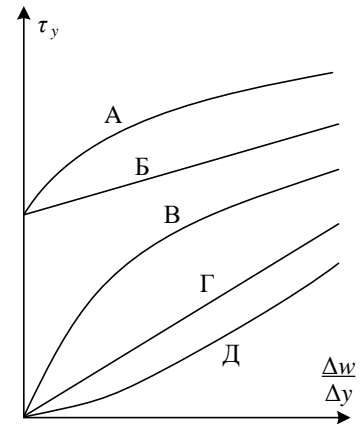
Храна као материјал сложених својстава, најчешће поседује и својства еластичности која могу или не морају бити у складу са Хуковим законом еластичности. Овакви материјали се називају *вискоеластични* материјали и веома тешко их је математички описати јер се њихова својства мењају у времену. Храна која је изложена неком стресу или напрезању може се сматрати вискоеластичним материјалом (Слика 1.16). Течна храна је често изложена различитим температурама током обраде, складиштења, транспорта, маркетинга и припреме. Због тога се реолошке особине хране често посматрају и представљају у функцији температуре. Утицај температуре на вискозност при одређеној брзини смицања може се одредити *Аренијусовом*¹⁷ релацијом (1.22).

$$\mu = \mu_\infty \frac{E_a}{RT} \quad (1.22)$$

где су: μ - динамичка вискозност у Ра·s; μ_∞ - динамичка вискозност при бесконачно великој брзини смицања у Ра·s; E_a - енергија активације у J/mol; R - универзална гасна константа ≈ 8.314 J/(mol·K); T - температура у K. Енергија активације је најмања енергија коју систем мора поседовати да би реакција почела (Табела 1.10). Реципрочна вредност динамичке вискозности назива се *флуидносћ* (1.23). Количник динамичке вискозности и густине назива се *кинематичка вискозносћ* (1.24).



Слика 1.15: Шематски приказ једнодимензионог процеса смицања.



Слика 1.16: Нека од типичних реолошких понашања нењутновских флуида у поређењу са њутновским.

А - псеудопластични са границом течења,
Б - бингамски,
В - псеудопластични,
Г - њутновски, и
Д - дилатантски.

17: *Svante August Arrhenius* (1859-1927) је шведски научник, физичар и хемичар, један од оснивача савремене физичке хемије. Добитник је Нобелове награде за хемију 1903. године. Припадају му велике заслуге за истраживања везана за присуство CO_2 у атмосфери и ефекта стаклене баште.

Табела 1.5: Вредности енергије активације за неке примере течне хране у зависности од садржаја шећера и воде. [5]

Ознаке и појмови у табели:

°Brix је јединица за концентрацију којом се представља количина чврстих честица унутар течне фазе (1°Brix=1% шећера), уређај којим се мери назива се рефрактометар;

n - индекс понашања протока флуида;

E_a - енергија активације.

* Деспектинизирани значи без пектина (*pectin* је скроб који се природно јавља у ћелијским зидовима воћа и поврћа).

Течна храна	Садржај	n	E_a , J/mol
Деспектинизирани*	75 °Brix	1.0	59.5
Јабучни сок	50 °Brix	1.0	35.2
	30 °Brix	1.0	26.4
Густи јабучни сок	40 °Brix	1.0	24.3
	30 °Brix	1.0	21.4
Грожђани сок	50 °Brix	1.0	28.9
	30 °Brix	1.0	26.0
Јабучни кљук	11 °Brix	0.3	5.0
Бресква, пире	11.7 °Brix	0.3	7.1
Крушка, пире	16 °Brix	0.3	8.0
Парадајз, концентрат	6.0-32 °Brix	0.26	9.2
Јаје, цело	75% воде	1.0	24.7
Јаје, беланце пена	88% воде	1.0	16.3
Јаје, жуманце	55% воде	1.0	26.8

$$\phi = \frac{1}{\mu} \quad (1.23)$$

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.24)$$

где су: ϕ - флуидност у $1/(\text{Pa}\cdot\text{s})$; μ - динамичка вискозност у $\text{Pa}\cdot\text{s}$; v - кинематичка вискозност у m^2/s ; ρ - густина у kg/m^3 .

Специфични топлотни капацитет.

Специфични топлотни капацитет (скр. СТК) је величина која описује колико је топлоте потребно за загревање једног килограма материјала како би му се температура променила за 1К (или 1°C). Специфични топлотни капацитет хране зависи у највећој мери од садржане воде зато што вода има много већи СТК од осталих макронутријентских састојака хране (Табела 1.6). Приликом одређивања СТК материјала познатог састава може се користити једначина (1.25),

$$c = \sum x_i c_i \quad (1.25)$$

где су: c - СТК у J/kgK ; x_i - масени удео i -тог састојка

Табела 1.6: Емпиријске једначине за израчунавање специфичног топлотног капацитета различитих састојака хране.[4]
 t - температура у °C

Материјал	c , J/(kg°C)
Вода	$4176.2 - 0.0909 t + 5.4731 \cdot 10^{-3} t^2$
Лед	$2062.3 + 6.0769 t$
Протеини	$2008.2 + 1.2089 t - 1.3129 \cdot 10^{-3} t^2$
Маси	$1984.2 + 1.4373 t - 4.8008 \cdot 10^{-3} t^2$
Угљени хидрати	$1548.8 + 1.9625 t - 5.9399 \cdot 10^{-3} t^2$
Влакна	$1845.9 + 1.8306 t - 4.6509 \cdot 10^{-3} t^2$
Суви остатак	$1092.6 + 1.8896 t - 3.6817 \cdot 10^{-3} t^2$

у материјалу; c_i - СТК i -тог састојка у J/kgK. Најједноставнији начин за израчунавање приближне вредности СТК неког прехранбеног материјала је према (1.26),

$$mc = m_{H_2O}c_{H_2O} + m_{sm}c_{sm} \quad (1.26)$$

где су: m_{H_2O} - маса воде у kg; m_{sm} - маса сувог материјала у kg; c_{H_2O} - СТК воде у J/kgK; c_{sm} - СТК сувог материјала у J/kgK.

Топлотна проводљивост. *Топлотна проводљивост* је особина материјала која описује способност материјала да проводи топлоту (Табела 1.7). Материјали који је ефектно воде топлоту имају велику вредност топлотне проводљивости. Топлотна проводљивост највише зависи од састава хране, али у понекад може варирати у зависности од физичке оријентације састојака у храни (нпр. производи од меса). Топлотну проводљивост приказаних структура (Слика 1.17) може се одредити према (1.27, 1.28 и 1.29).

$$\frac{1}{\lambda_V} = \sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon_i}{\lambda_i} \quad (1.27)$$

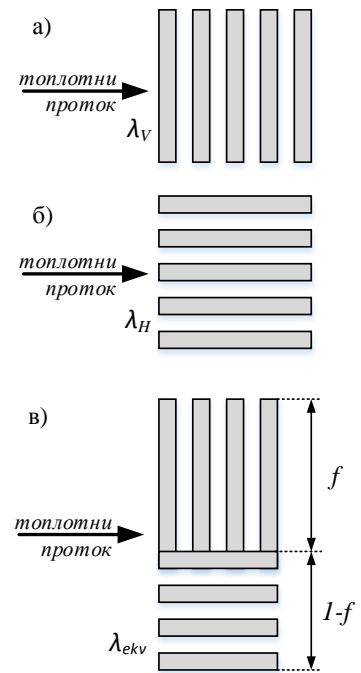
$$\frac{1}{\lambda_H} = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \lambda_i \quad (1.28)$$

$$\frac{1}{\lambda_{ekv}} = \frac{1-f}{\lambda_H} + \frac{f}{\lambda_V} \quad (1.29)$$

где су: λ - топлотна проводљивост материјала у W/(mK) (ознаке у индексу су V - вертикална оријентација, H - хоризонтална оријентација, ekv - еквивалентна, i - i -ти састојак); ε_i - запремински удео i -тог састојка у материјалу; f - удео вертикалне оријентације. Садржај воде у материјалу у великој мери утиче на топлотну проводљивост и треба га узети у обзир током процеса сушења. Топлотна проводљивост може зависити и од структуре материјала, методе сушења и одабраног режима сушења (температуре, притиска). *Топлотни проток* услед провођења (кондукције) топлоте кроз материјал може се одредити Фуријеовим¹⁸ законом (1.30).

$$\dot{Q}_n = -\lambda A \frac{\partial T}{\partial n} \quad (1.30)$$

где су: \dot{Q}_n - топлотни проток у J/s=W; λ - топлотна проводљивост материјала у W/(mK); A - површина нормална на правац провођења топлоте у m²; $\partial T/\partial n$ - градијент температуре; n - правац нормале на изотермску површ.



Слика 1.17: Шематски приказ две најједноставније структуре: а) вертикална оријентација структуре (серијски модел), б) хоризонтална оријентација структуре (паралелни модел) и в) комбинована оријентација.

18: *Joseph Fourier* (1768-1830) је француски математичар и физичар најпознатији по изучавању Фуријеових редова и трансформацијама истих, Фуријеовом закону провођења топлоте и открићу ефекта стаклене башге. Школовао се у чувеној *École Polytechnique* у Паризу, Француска.

Табела 1.7: Емпиријске једначине за израчунавање топлотне проводљивости различитих састојака хране.[4]
 t - температура у °C

Материјал	λ , W/(m°C)
Вода	$0.57109 + 1.762 \cdot 10^{-3} t - 7.6036 \cdot 10^{-6} t^2$
Лед	$2.21960 - 6.2489 \cdot 10^{-3} t + 1.0154 \cdot 10^{-4} t^2$
Протеини	$0.17881 + 1.1958 \cdot 10^{-3} t - 2.7178 \cdot 10^{-6} t^2$
Масти	$0.18071 - 2.7604 \cdot 10^{-3} t - 1.7749 \cdot 10^{-7} t^2$
Угљени хидрати	$0.20141 + 1.3874 \cdot 10^{-3} t - 4.3312 \cdot 10^{-6} t^2$
Влакна	$0.18331 + 1.2497 \cdot 10^{-3} t - 3.1683 \cdot 10^{-6} t^2$
Суви остатак	$0.32961 + 1.4011 \cdot 10^{-3} t - 2.9069 \cdot 10^{-6} t^2$

Температурна дифузивност. Температурна дифузивност

је величина уско повезана са топлотном проводљивошћу (1.31). Дефинише се као промена температуре одређене количине материјала у времену, услед топлотног протока кроз јединичну површину, а који се јавља услед различитих температура на супротним странама.

$$a = \frac{\lambda}{c_p \rho} \quad (1.31)$$

где су: a - температурна дифузивност у m^2/s ; λ - топлотна проводљивост у $W/(mK)$; c_p - специфични топлотни капацитет при $p = const.$ у $J/(kgK)$; ρ - густина у kg/m^3 . У материјалу са високом температурном дифузивношћу топлота се креће брзо¹⁹ јер је материјал интензивно проводи спрам свог запреминског топлотног капацитета. Температурна дифузивност је позитиван коефицијент у диференцијалној једначини простирања топлоте (1.32).

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \nabla^2 T \quad (1.32)$$

где су: a - температурна дифузивност у m^2/s ; T - температура у K ; τ - време у секундама.

Топлотна ефузивност. Топлотна ефузивност²⁰ (или *топлотна инерција*) је мера способности материјала да размењује топлоту са својим окружењем (околном средином или другим материјалима са којима је у непосредном контакту). Дефинише се као квадратни корен производа топлотне проводљивости материјала и његовог запреминског топлотног капацитета (1.33).

$$e = \sqrt{\lambda \rho c_p} \quad (1.33)$$

где су: e - топлотна ефузивност у $W\sqrt{s}/m^2K$; ρc_p - запремински топлотни капацитет у J/m^3K ; λ - топлотна проводљивост у $W/(mK)$. Топлотна ефузивност се још сматра и квази-квалитативном мером субјективног осе-

19: Температурна дифузивност материјала је повезана са брзином успостављања топлотне равнотеже под променљивим топлотним условима. Из тог разлога су код прехранбених материјала боље ниске вредности температурне дифузивности како би се смањила могућност да се висока вредност температуре изненадно постигне у дубини и оштети унутрашње слојеве материјала.

20: Топлотна ефузивност се у страној литератури среће као коефицијент *продирања топлоте* од спољашњих ка унутрашњим слојевима материјала. У прехранбеним материјалима слојеви воде могу убрзати овај процес, док га слојеви масти успоравају.

ћаја топлоте/хладноће при додиривању неке површине.
Хемијски потенцијал. *Хемијски потенцијал* је термодинамичка карактеристика материјала која, у контексту преношења влаге у процесима сушења, представља општи потенцијал преноса масе који се може одредити као парцијални извод неке од карактеристичних функција система по маси, према (1.34),

$$\mu = [\partial\Psi_{i,j}/\partial m]_{i,j} \quad (1.34)$$

где су: μ - хемијски потенцијал преношења масе; Ψ - нека од карактеристичних функција система²¹; i, j - одређени парови величина стања којима се описују услови између материјала и околине или појединих зона материјала.

Специфичан капацитет преношења влаге. *Специфични капацитет преношења влаге* је величина која је по аналогiji слична специфичном топлотном капацитету, а дефинише се као парцијални извод влажности материјала по потенцијалу преношења влаге при константној температури, према (1.35),

$$c_u = [\partial u/\partial \Pi]_T \quad (1.35)$$

где су: Π - потенцијал преношења влаге, градијент неке величине која је узрок покретачке силе процеса (код апсолутно сувих материјала је ова величина једнака нули); c_u - специфични капацитет преношења влаге у $\text{kg}_w/(\text{kg}^\circ\text{M})$.²²

Пермеабилност. *Пермеабилност* је особина порозних материјала којом се описује квалитет транспорта неке супстанце кроз порозну структуру материјала. У контексту технике сушења, ова величина описује квалитет проласка ваздуха или неког другог агенса кроз дебео слој порозног материјала.²³ Пермеабилност помаже утврђивању неопходне енергије потребне за постизање потребног принудног струјања агенса кроз саму структуру порозног материјал (на пример при пролажењу пара кроз осушене спољне слојеве материјала). Може се одредити из Дарсијевог закона, према (1.36),

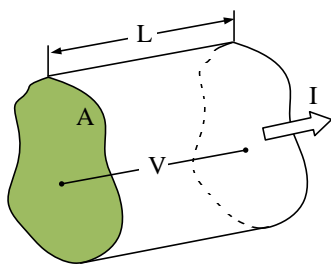
$$k = w\mu \frac{\Delta l}{\Delta p} = K \frac{\mu}{\rho g} \quad (1.36)$$

где су: k - коефицијент пермеабилности (унутрашње, апсолутне) флуида у m^2 ; w - брзина кретања флуида кроз порозни медијум у m/s ; μ - динамичка вискозност флуида у $\text{Pa}\cdot\text{s}$; $\Delta l/\Delta p$ - количник дебљине порозног слоја и промене притиска у m/Pa ; K - пермеабилност у m/s ;

21: Карактеристичне функције система су: *унутрашња енергија, слободна енергија, енthalпија и слободна енthalпија*. Ове функције се задају преко сталних вредности тачно одређеног пара величина стања: притиска, запремине, температуре и ентропије.

22: Са $^\circ\text{M}$ је означен градијент преношења масе (влаге).

23: *Пермеација* подразумева транспорт масе кроз слој порозног материјала (нпр. житарица или неког зрнастог материјала, влакнасти слој лековитог биља или покошене траве, и слично). Поред употребе у техници сушења, ове величине се веома често користи и код разматрања интеракције материјала и амбалаже у којој је упакован (пластични материјали, различите врсте фолија, целофан, вакуум паковања, платнени материјали, тетра-пак, картони и слично).



Слика 1.18: Узорак материјала дужине L , попречног пресека A , кроз који тече електрична струја јачине I и налази се под напонем U .

ρ - густина; g - убрзање силе Земљине теже.

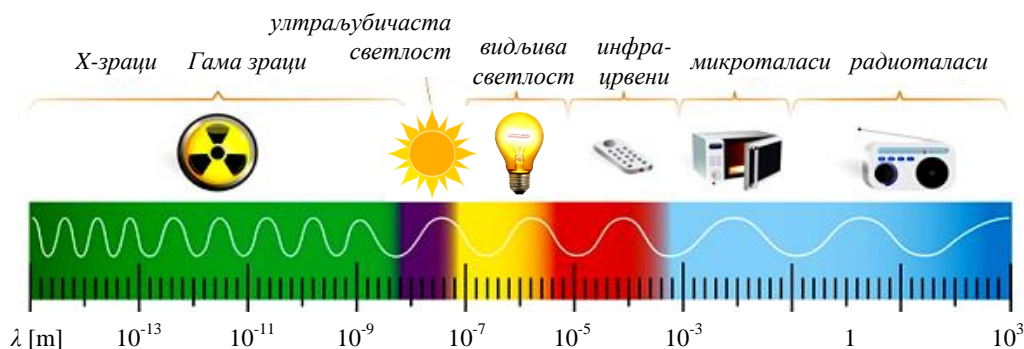
Електрична проводљивост. *Електрична проводљивост* је физичка величина која описује својство материјала да проводи електричну струју (Слика 1.18) и може се одредити мерењем јачине електричне струје, напона електричне струје и карактеристичне димензије материјала према (1.37),

$$\sigma = \frac{L}{A \cdot R} \quad (1.37)$$

где су: σ - електрична проводљивост у S/m (Сименс по метру); L - димензија материјала у m; A - површина попречног пресека материјала у m²; R - електрични отпор у Ω , а који се може одредити применом Омовог закона (1.38),

$$R = \frac{U}{I} \quad (1.38)$$

где су: U - напон електричне струје у V; I - јачина електричне струје у A. У зависности од електричне проводљивости материјали се деле на проводнике, полупроводнике и изолаторе (диелектрике). Реципрочна вредност електричне проводљивости материјала назива се *електрична отпорност*. Влажније намирнице боље воде електричну струју, те се са опадањем садржаја влаге у материјалу ова особина погоршава. Електрична проводљивост намирнице најчешће зависи од садржаја јона, унутрашњег кретања влаге у материјалу, физичке структуре и начина загревања. Електрична проводљивост је важна особина материјала који се загревају: електро-отпорно (енг. *ohmic heating*), у променљивом електричном пољу (енг. *pulse electric heating*), индукционо, инфрацрвено, радиоталасно или микроталасно (Слика 1.19). Утицај температуре материјала на његову електричну проводљивост може се одредити према



Слика 1.19: Спектар електромагнетног зрачења (λ - таласна дужина).

(1.39),

$$\sigma = \sigma_0(1 + mT) \quad (1.39)$$

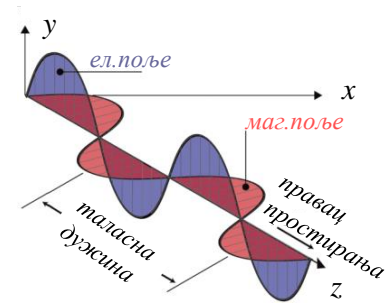
где су: σ_0 - електрична проводљивост на референтној температури у S/m; m - температурна компензациона константа; T - температура у K.

Диелектричне особине. Диелектричне или изолационе особине су физичке особине које су од значаја за понашање материјала када се нађе у електромагнетном пољу (Слика 1.20). Када микроталаси доспеју на прехранбени материјал, део њихове енергије бива апсорбован што доводи до пораста температуре хране. Материјал који се суши у електромагнетном пољу загрева се равномерно до дубине продирања електромагнетних таласа. Градијент температуре унутар захваћене запремине материјала је једнак нули, међутим, може се појавити услед хлађења спољашњих површина материјала. Количина и расподела апсорбоване микроталасне енергије у прехранбеном материјалу описана је Максвеловим²⁴ једначинама електромагнетике. Процес који се дешава је *електромагнетно загревање* и присутан је при радиоталасном и микроталасном загревању материјала. Према прописима Међународне телекомуникационе уније (енг. *International Telecommunication Union - ITU*), фреквенце електромагнетних таласа које су резервисане за индустријску, научну и медицинску употребу су код:

- ▶ радиоталасног загревања:
13,56MHz, 27,12MHz и 40,68MHz; и
- ▶ микроталасног загревања:
915MHz, 2450MHz, 5800MHz и 24125MHz.

Диелектрична ѓермијивносћ материјала је карактеристика интеракције материјала са електричним пољем микроталаса. Ова интеракција се може описати помоћу две величине: *диелектрична констанћа* (описује енергију која може продрети у материјал) и *фактор диелектричног губитка* (описује количину енергије коју материјал може апсорбовати). Диелектричне особине намирница зависе од састава где су садржај воде, садржај соли, садржај угљених хидрата, протеина и масти неке од главних релевантних компоненти. Биљни материјали најчешће имају својства полупроводника. Физичке промене које се дешавају током обраде, попут губитка воде и разградње протеина, такође утичу на диелектрична својства.

Акустичне особине. Акустичне особине материјала могу се посматрати са становишта органолептичких звучних особина и особина понашања материјала у акустичном



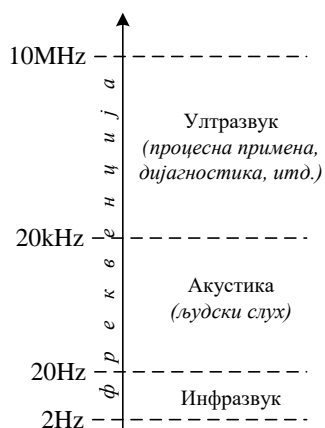
Слика 1.20: Илустрација простирања електромагнетног поља у простору.

Електромагнетно поље се састоји од електричног поља и магнетног поља. Брзина електромагнетних таласа у вакууму је једнака брзини светлости. Основне величине електромагнетног таласа су: амплитуда, фреквенција, таласна дужина, фаза и брзина.

24: *James Clerk Maxwell* (1831-1879) је шкотски математичар и научник, аутор Класичне теорије електромагнетног зрачења. Први је описао електрицитет, магнетизам и светлост као различите манифестације истог феномена.

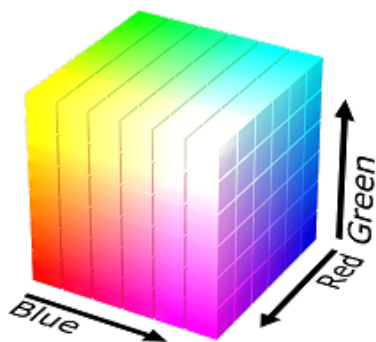


Слика 1.21: Илустрација акустичне емисије и одговарајућег начина њеног мерења на специјализованој мерној опреми.[6]



Слика 1.22: Илустрација звучног опсега фреквенција.

Ултразвук има фреквенције веће од 20 kHz и на атмосферском притиску има таласне дужине мање од 1,9 cm. Људско ухо нема могућност перцепције ултразвука који се зато може детектовати само специјалним мерним инструментима и техникама.



Слика 1.23: Илустрација RGB система боја.

Према овом систему приказ боја се изводи у Декартовом правоуглом координатном систему, у коме је свака од три боје приказана на по једној координатној оси.

пољу одређене фреквенције. *Акустична емисија* је особина хране која се односи на звук који храна произведе у тренутку када је конзумирамо (Слика 1.21). Акустична мерења која су у вези са испитивањем намирница се најчешће изводе помоћу сензора звука (микрофона) који јесте/није у директном контакту са испитиваним материјалом. Резултати се сврставају према измереној фреквенцији звука у неки од четири опсега (0,1Hz-15kHz; 1Hz-40kHz; 1kHz-150kHz; и 100kHz-1MHz). Таласна функција акустичне емисије се може апроксимирати са (1.40),

$$v(\tau) = A_m e^{(\alpha\tau)} \sin(2\pi f_m \tau) \quad (1.40)$$

где су: $v(\tau)$ - функција тренутне вредности амплитуде звучног сигнала у времену; A_m - максимална регистрована амплитуда током мерења у V; f_m - фреквенца сигнала са максималним интензитетом у s^{-1} ; α - пригушеност сигнала у систему у s^{-1} ; τ - време.

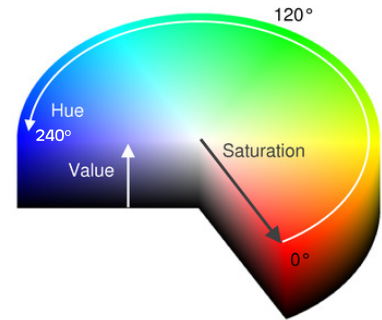
Хрскавости (енг. *ch crunchiness/crispness*) је термин који описује акустичну емисију припремљене хране (на пример: осушене намирнице, корица печеног хлеба, чипсеви, смоки и слично) или свеже хране (на пример: крпа шаргарепа, свежа јабука и слично) током конзумације зубима, ломљења прстима или помоћу прибора за јело (сечење ножем или убадање виљушком). Акустичну емисију перципира људски слух и на основу тога ствара субјективни утисак о квалитету припреме или свежини посматране намирнице. Хрскавост осушених намирница доста зависи од нехомогености намирнице, структурних дефеката, унутрашњих напона и осталих макроскопских или микроскопских својстава. Структурни елементи материјала који највише утичу на хрскавост су структура ћелијског и међућелијског простора, преграда између простора различитог фазног стања, пора и порозности материјала.

Излагање материјала *ултразвучним вибрацијама* (енг. *ultrasonic vibration*) може се радити пре или током процеса сушења (Слика 1.22). Генератори ултразвука могу производити континуалне или пулсирајуће ултразвучне вибрације (фреквенца осциловања >20 KHz). Ултразвучни предтретман или третман побољшавају процес сушења интензивирајући преношење масе и топлоте кроз појаву микро-струјања влаге кроз структуру матријала. Током ових третмана долази до претварања акустичне енергије у топлотну уз одговарајуће испара-

вање влаге из материјала, при чему важну улогу у ефикасности читавог процеса има дубина продирања акустичних таласа у материјал. Ултразвук у материјалу изазива разне физичко-механичке ефекте. Природа и интензитет ултразвучних ефеката зависе од услова примене, посебно од температуре, својстава звучног таласа и вискозности материјала. Посматрано на микроскопском нивоу, јављају се варијације притиска које могу достићи вредности и до 100 МПа, високе температуре до 5000 К и слично. Такође, присутни су компресија и разређивање материјала, микрострујања на додирним површинама фаза гас/течност и слично. Свеукупно се тиме битно интензивира процес дифузије, а самим тим и дехидратације материјала. *Ултразвучно сушење* се често комбинује са другим конвенционалним техникама сушења (конвективно, кондуктивно, и слично) у циљу смањења потрошње енергије неопходне за издвајање влаге, интензивирање процеса сушења и очувања квалитета материјала. Једна од предности оваквог начина сушења је занемарљиво мало загревање материјала, што погодује сушењу материјала осетљивих на излагање повишеним температурама.

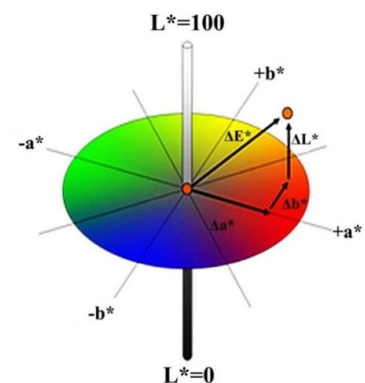
Боја материјала *Боја* материјала је најважнија и најчешће праћена органолептичка особина осушених производа која код потрошача формира први утисак о посматраној намирници. Боја хране утиче на нашу перцепцију о томе да ли је храна добра или лоша. Мерење боје се врши колориметријским техникама, којима се прво светлост произведе, упери у површину производа, а након тога се мери и анализира рефлектована светлост. Описивање боје је могуће урадити помоћу неколико координатних система у боји (тзв. "простори боја"):

- ▶ RGB систем (енг. *Red, Green, Blue*) је адитивни колор систем и најмање се користи за описивање боја намирница због мале практичне употребљивости информација о бојама које даје (Слика 1.23).
- ▶ HSV систем (енг. *Hue, Saturation, Value*) је доста заступљен код описивања боје намирница и ближи је перцепцији људског ока од претходног система. Веома је ефикасан у идентификовању предмета на основу вредности нијансе боје. (Слика 1.24).
- ▶ CIE Lab систем (енг. *International Commission on Illumination, L*a*b**) (или Цуд-Хантерова скала) се најчешће користи због концепције описивања која је најближа онаквој какву поседује људско око (Слика 1.25). Често праћена и моделирана вредност према овом систему је 3D колор-параметар



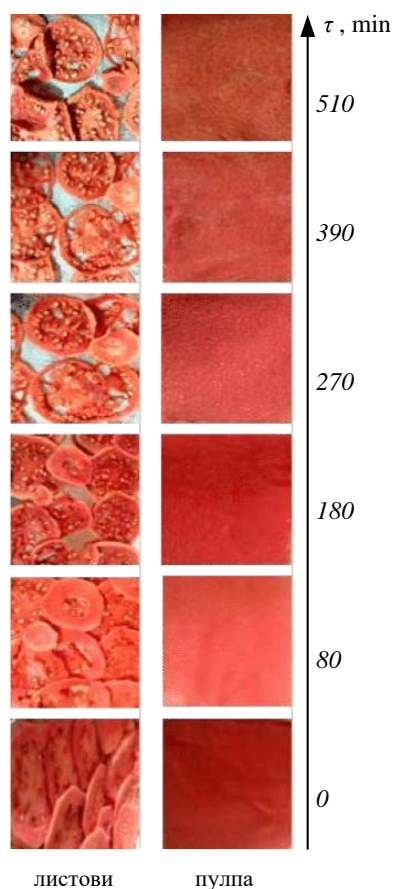
Слика 1.24: Илустрација HSV система боја.

Према овом систему приказ боја се изводи у цилиндричном координатном систему (простору) где радијални угао представља нијансу (енг. *Hue*) (почетак је 0° - црвена боја), по висини цилиндра се мења интензитет осветљености (енг. *Value, Lighthness*), а засићење (енг. *Saturation*) боје је дато растојањем до осе цилиндра.



Слика 1.25: Илустрација CIE Lab система боја (Цуд-Хантерова скала).

Према овом систему боја је одређена Цуд-Хантеровим јединицама: L^* је интензитетом осветљености (од 0-црна до 100-бела), и колор индексима a^* и b^* који описују јединствене боје које перципира људски вид: црвена, зелена, плава и жута. Оса a^* је постављена у правцу зелено-црвене боје (негативне вредности према зеленој боји, позитивне према црвеној), а оса b^* је постављена у правцу плаво-жуте боје (негативне вредности према плавој боји, позитивне према жутој).



Слика 1.26: Илустрација промене боје листова и пулпе парадајза током времена за време трајања процеса сушења.

25: Велики број *микронутријивних* компоненти, попут антиоксиданаса (картеноиди и феноли), витамина, есенцијалних масних киселина, минерала, и осталих хранљивих састојака, може бити умањено или уништено у процесима не адекватне припреме за сушење, током самог сушења и касније услед неадекватног паковања.

ΔE^* , који се одређује према (1.41).

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (1.41)$$

Промена боје која је директно одређена променом колор-параметра може бити: занемарљива/мала ($0 \leq \Delta E^* \leq 0,5$), прихватљива/умерена ($0,5 \leq \Delta E^* \leq 12$) и приметна/велика ($\Delta E^* > 12$). Још један од показатеља промене нијанси боја је метрички угао нијансе (*hue*) који се одређује према (1.42).

$$hue = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (1.42)$$

Током сушења намирница, промена боје се јавља услед хемијских и биохемијских реакција у материјалу, као што су: ензимске реакције, Маилардова реакција, карамелизација, деструкција пигмената и слично (Слика 1.26). Промене у боји код ваздухом сушених намирница су далеко веће него код намирница сушених поступком лиофилизације. На промену боје се може утицати различитим процедурама, као што су: девијација температуре сушења у специфичним режимима сушења, сушење у интервалима, примена заштитних агенаса (нпр. сумпор-диоксида) и слично.

Мирис, укус и арома. *Мирис, укус и арома* припадају групи органолептичких особина намирница. Ради очувања квалитета производа важно је предвиђање промене појединих особина материјала током процеса сушења, као што су утицај на: микроорганизме и њихову физиологију, ензимске, хемијске, физичко-хемијске и физичке промене, губитак/задржавање ароме, активност воде и трајање процеса и слично, како би се могла проценити корисност/штетност изабраног поступка. У комерцијалној производњи сушене хране, на промену мириса, укуса и ароме утиче се правилним избором адекватне технологије и режима сушења, калибрацијом материјала који се суши, предтретманима (бланширањем, потапањем у аскорбинску или лимунску киселину или у натријум бисулфит) и слично.

Током процеса сушења, заједно са водом крећу се и различити састојци намирница²⁵ који су у њој отопљени/растворени. Загревањем, намирница постаје пропустљивија не само за воду, већ и за молекуле растворене у води, а који могу бити главни чиниоци и носиоци ароме карактеристичне за ту намирницу. Губитак те ароме представља недостатак у квалитету осушеног производа јер се као такав битно разликује од свежег.

У техници сушења је делимично могуће задржати арому намирнице избором начина и режима сушења. До губитка ароме долази услед разлика у њиховој великој релативној испарљивости у односу на воду као носиоца. Релативна испарљивост неког састојка у односу на воду, дефинише се према (1.43),

$$\alpha_{iw} = \frac{\gamma_i p_{i.p}}{\gamma_w p_{w.p}} \quad (1.43)$$

где су: α_{iw} - релативна испарљивост система састојак (i) - вода (w); γ_i - коефицијент активности састојка у смеси са водом; γ_w - коефицијент активности воде у смеси са састојком; $p_{i.p}$ - притисак састојка у чистом парном стању; $p_{w.p}$ - притисак воде у чистом парном стању. Већина ароматичних састојака је у води присутна са веома мало удела, тако да се најчешће узима да је $\gamma_w = 1$. Ароматични састојци су 100÷1000 пута више испарљивији од воде и скоро у потпуности се губе испаравањем воде. Код сушења у пољу ултразвука или електромагнетном пољу, на микро нивоу могу се јавити повишене температуре које могу довести до *Маилардове реакције*²⁶, а самим тим и промене органолептичких особина намирница. Ова реакција се може јавити код комбинованих техника сушења са специфичним начином загревања материјала.

Калоричка вредност намирница. *Калоричка или енерџиска вредност* намирница је специфична енергија коју људски организам може добити метаболизмом макронутријената садржаних у храни. Често се још назива *физиолошком топлоћом сагоревања* или *физиолошком калоричком вредношћу*. Намирнице су углавном састављене од воде, угљених хидрата, масти и протеина. Оне се у људском организму претварају у енергију реакцијама сагоревања уз подршку кисеоника добијеног дисањем. Енергетска вредност намирнице се може добити множењем масе макронутријента и њему припадајућег *Атвотеровог фактора*²⁷, према (1.44),

$$E = \sum (m_i \cdot e_i) \quad (1.44)$$

где су: E - физиолошка енергија сагоревања намирнице (калоричка вредност) у kJ; m_i - маса макронутријента у g; e_i - Атвотеров фактор у kJ/g. Осушена храна задржава оригиналну нутритивну вредност упркос смањењу садржаја влаге.

26: *Маилардова реакција* је хемијска реакција између аминокиселина и простих шећера која се јавља унутар намирнице, најчешће при температурама од 140°C до 165°C, при чему храна мења своје особине, односно добија препознатљиву боју, мирис и укус. На температурама већим од поменутих, даље може доћи до карамелизације шећера у храни, и коначно до процеса пиролизе и спаљивања узорка.

27: *Wilbur Olin Atwater* (1844-1907) је амерички хемичар познат по својим истраживањима о људској исхрани и метаболизму. Оснивач је модерних нутриционистичких истраживања и Атвотеровог система рачунања енергетске вредности намирница.

Атвотерови фактори (e_i) неких од основних макронутријената намирница. [7]

Масти (39 kJ/g, 9 kcal/g),
Алкохол (29 kJ/g, 7 kcal/g),
Протеини (17 kJ/g, 4 kcal/g),
Угљени хидрати
(17 kJ/g, 4 kcal/g),
Вода (0 kJ/g, 0 kcal/g).

1.4 Преношење топлоте

Код термичког начина сушења прехранбених материјала разликујемо два процеса:

- ▶ испаравање влаге која се жели уклонити и
- ▶ одвођење настале паре са површине материјала.

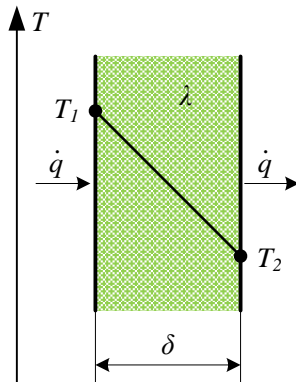
За испаравање неке количине влаге је непоходно материјалу довести одговарајућу количину топлоте. Довођење топлоте, за загревање материјала и влаге у њему, представља битан процес у сушарама. У ту сврху примењују се сва три механизма преношења топлоте: провођење (кондукција) топлоте, прелажење (конвекција) топлоте и зрачење (радијација). У сушарама се често дешава комбинација наведених механизма ради ефикаснијег процеса загревања материјала. Потешкоћу представља чињеница да се током процеса сушења фронт испаравања влаге повлачи у дубину материјала.

Провођење топлоте (кондукција) је механизам преноса топлоте кроз чврста тела или кроз непокретне течности и гасове²⁸ и настаје као последица постојања градијента температуре у материјалу (Слика 1.27). Топлота се кроз материјал преноси из области више у област ниже температуре. Градијент температуре унутар материјала зависи од начина загревања материјала (Слика 1.28). Специфични топлотни проток при провођењу топлоте може се одредити решавањем једначине (1.30), односно према (1.45),

$$\dot{q} = \frac{\lambda(T_1 - T_2)}{\delta} \quad (1.45)$$

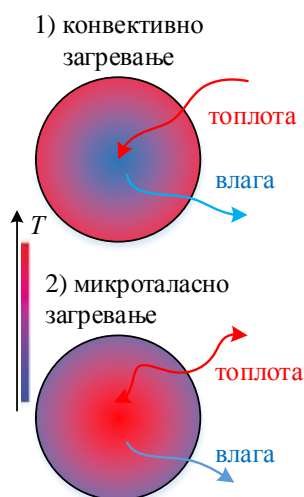
где је: \dot{q} - специфичан топлотни проток у W/m^2 ; λ - топлотна проводљивост материјала у $W/(mK)$; A - површина нормална на правац провођења топлоте у m^2 ; T_1 и T_2 - температуре на посматраном растојању; δ - растојање у m .

Повлачењем фронта испаравања влаге у унутрашњост материјала површина материјала остаје сува и порозна. У сувим порозним срединама топлота се не преноси само кондуктивно кроз чврст скелет и унутрашње поре материјала у којима је ваздух заробљен, већ се јавља и конвекција кроз отворене поре и узајамно зрачење зидова у материјалу. Из тог разлога се уводи појам *еквивалентне топлотне проводљивости* која би обухватила све наведене појаве. Ово је нарочито погодно код моделирања сушења прашкастих и грануластих материјала, као и намирница чија се порозност битно мења током процеса сушења, остављајући сложену структуру осушеног скелета материјала. Равномерност скупљања



Слика 1.27: Провођење топлоте кроз једнослојан раван зид.

28: Кондуктивно преношење топлоте може се реализовати на два начина: - код неметала *фономски* (слично као што се преноси звук) где атоми осцилују око својих равнотежних положаја и побуђују суседне атоме; - код метала *слободним електронима* где електрони пролазе кроз материјал као кроз проводник.



Слика 1.28: Термографска илустрација градијентата температуре и влаге у зависности од начина загревања материјала.

материјала током сушења утиче на тачност усвојене вредности еквивалентне топлотне проводљивости (Слика 1.14). Топлотна проводљивост порозних материјала битно зависи од топлотне проводљивости и густине ваздуха у порама.²⁹ Топлотна проводљивост влажних материјала не зависи само од влаге у материјалу, већ и од начина испаравања, појаве рекондензације у порама узроковане градијентом температуре у материјалу. Брзина испаравања влаге и појава рекондензације зависе од градијента температуре у материјалу и утичу на вредности еквивалентне топлотне проводљивости. Може се десити да се топлотне проводљивости појединих делова/зона материјала локално веома разликују од еквивалентне топлотне проводљивости.

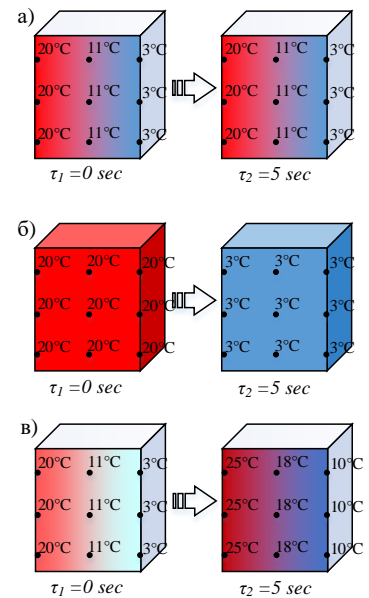
Брзина провођења топлоте кроз материјал зависи од облика и величине комада материјала, термичких особина и температурних разлика у материјалу. На основу просторних и временских карактеристика, провођење топлоте се може посматрати као стационарно, нестационарно и провођење кроз материјал са бесконачно малим унутрашњим отпором (Слика 1.29).

- ▶ *Стационарно провођење топлоте* подразумева да се температура материјала у било којој посматраној тачки не мења током времена. У овом случају могуће је несметано применити једначину Фуријеовог закона (једначина (1.30) на страници 17). Топлотна проводљивост варира са променом температуре материјала, али при малим температурним градијентима може се узети средња вредност топлотне проводљивости за цео материјал. Хетерогеност структуре материјала такође утиче на топлотну проводљивост, што нарочито долази до изражаја код анизотропних биљних материјала.
- ▶ *Провођење топлоте кроз материјал са бесконачно малим унутрашњим термичким отпором* подразумева да се температура материјала мења у времену, али је униформна по целој запремини у посматраном временском тренутку. У зависности од почетних и граничних услова може се написати једначина (1.46),

$$\frac{T(\tau) - T_a}{T_0 - T_a} = \exp\left(-\frac{\alpha A}{\rho V c} \tau\right) \quad (1.46)$$

где је: T - температура (ознаке у индексу 0 - почетна, материјала, a - амбијентална); α - коефицијент прелажења топлоте; A - површина материјала; V - запремина материјала; ρ - густина материјала; c - специфични топлотни капацитет материјала; τ - време.

29: На стање ваздуха у порозном материјалу може се утицати избором адекватне технике сушења. Као пример могу се узети сушење на повишеним притисцима или сушење у вакууму.



Слика 1.29: Различите форме провођења топлоте. [8]

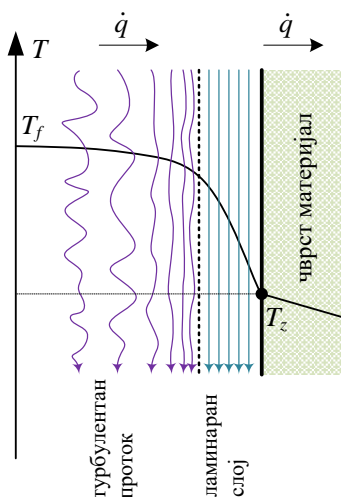
- а) Стационарно провођење топлоте;
- б) Провођење топлоте кроз материјал са бесконачно малим унутрашњим термичким отпором;
- в) Нестационарно провођење топлоте.

- *Нестационарно провођење топлоте* подразумева и просторну и временску промену температуре током сушења материјала, што је уједно и најреалнији приступ од свих поменутих. Варијација површине у правцу преношења топлоте може додатно допринети нестационарности процеса. У случају постојања топлотног извора унутар материјала (генерисани топлотни проток), нестационарно провођење топлоте се може описати једначином (1.47),

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\dot{Q}_{gen}}{\lambda} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (1.47)$$

где је: \dot{Q}_{gen} - генерисани топлотни проток (нпр. егзотермна топлота и сл.).

Прелажење топлоте (конвекција) је механизам преношења топлоте кроз флуиде (течности и гасове) и у основи обухвата два процеса (Слика 1.30):



Слика 1.30: Профил температуре при прелажењу топлоте од турбулентног језгра флуида до површине зида чврстог материјала кроз ламинарни гранични слој.

- прелажење топлоте са површине зида чврстог материјала кроз ламинарни гранични слој до почетних слојева турбулентног тока, и
- прелажење топлоте турбулентним преносом од краја ламинарног граничног слоја до језгра турбулентног тока.

Током процеса сушења прелажење топлоте дешава се најчешће у смеру од агенса сушења ка површини материјала, и може се одредити према (1.48),

$$\dot{q} = \alpha(T_f - T_z) \quad (1.48)$$

где је: \dot{q} - специфичан топлотни проток у W/m^2 ; α - коефицијент прелажења топлоте у $W/(m^2K)$; T_f - температура флуида у K ; T_z - температура површине зида на посматраном растојању у K . Процеси преношења топлоте могу се описати једначинама енергијских и масених биланса, међутим, за описивање оваквих феномена препоручује се коришћење *бездимензионалних бројева* који и повезују многе физичке и техничко-технолошке параметре. Стварне физичке зависности се помоћу бездимензионих бројева могу описати једноставније и јасније без непосредног коришћења физичких параметара који карактеришу процес. Бездимензиони бројеви се користе у теорији сличности за формулисање и моделирање закона који описују аеро- и хидро- динамичке процесе, процесе преношења топлоте и масе и слично.

Рејнолдсов број (Re) описује карактер принудног кретања флуида и може се одредити из односа инерцијалних и ви-

скрозних сила према (1.49),

$$\text{Re} = \frac{wl}{\nu} \quad (1.49)$$

где је: Re - Рејнолдсов³⁰ број; w - брзина струјања флуида у m/s ; l - карактеристична дужина у m ; ν - кинематичка вискозност у m^2/s . Код отворених струјања ламинарност на растојању x од почетка плоче престаје при вредностима $\text{Re}_x \approx 5 \cdot 10^5$. Код струјања у цевима ламинарно струјање постоји при $\text{Re}_D < 2300$. У зависности од храпавости опструјаване површине при већим вредностима Re , прво ће се јавити благи поремећаји у струјању (прелазно струјање), а потом и потпуно развијено турбулентно струјање. Визуелизација карактера струјања и изглед струјног поља може бити од користи код проучавања специјалних техника сушења (Слика 1.31).

Нуселтов број (Nu) представља однос отпора кондуктивног и конвективног преношења топлоте на површини материјала где се остварује контакт флуида и чврстог тела, а може се одредити према (1.50),

$$\text{Nu} = \frac{\alpha l}{\lambda} \quad (1.50)$$

где је: Nu - Нуселтов³¹ број; α - коефицијент прелажења топлоте у $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$; l - карактеристична дужина у m ; λ - топлотна проводљивост флуида у $\text{W}/(\text{mK})$. Уколико је $\text{Nu} = 1$ у питању је чиста кондукција.

Прандтлов број (Pr) описује својства флуида који окружује или опструјава посматрано тело успостављајући везу између брзинског и температурног поља према (1.51),

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a} \quad (1.51)$$

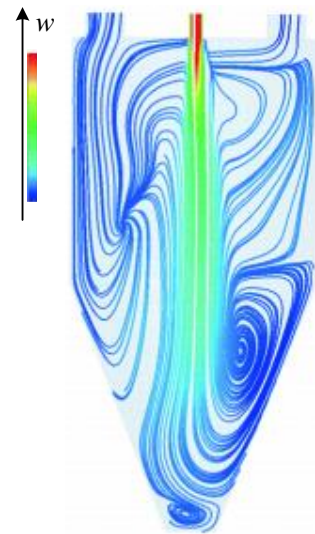
где је: Pr - Прандтлов³² број; ν - кинематичка вискозност у m^2/s ; a - температурна дифузивност флуида у m^2 , према (1.31).

Грасхофов број (Gr) описује струјање флуида при природној конвекцији и одређује се према (1.52),

$$\text{Gr} = \frac{\beta(T_z - T_f)gl^3}{\nu^2} \quad (1.52)$$

где је: Gr - Грасхофов³³ број; β - коефицијент запреминске контракције; g - убрзање силе Земљине теже у m/s^2 ; l - карактеристична дужина у m ; ν - кинематичка вискозност у m^2/s .

30: *Osborne Reynolds* (1842-1912) је ирски научник који се бавио проучавањем динамике флуида, размене топлоте између чврстих тела и флуида, дизајнирањем котлова и кондензатора. Каријеру је провео радијећи на Универзитету у Манчестеру, Енглеска.

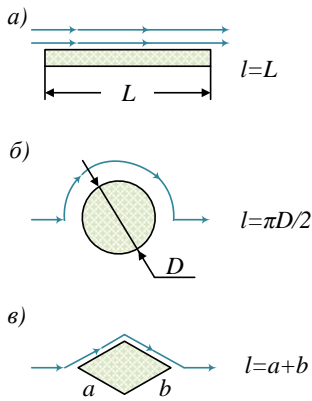


Слика 1.31: Визуелизација струјница обојених у складу са вредностима брзине струјања у спреј сушари.

31: *Ernst Kraft Wilhelm Nusselt* (1882-1957) је немачки инжењер, докторирао на Техничком универзитету у Минхену. Креирао је димензиону анализу преношења топлоте, а бавио се и дизајнирањем размењивача топлоте.

32: *Ludwig Prandtl* (1875-1953) је немачки инжењер који се бавио облашћу динамике флуида, физиком и аеронаутиком. Креирао је систематичну математичку анализу аеродинамичких појава, подзвучног и трансоничног струјања.

33: *Franz Grashof* (1826-1893) је немачки инжењер, професор примењене механике на Технолошком институту Карлсрухе. Бавио се моделирањем једначина струјања прегрејане паре и природном конвекцијом.



Слика 1.32: Неки од примера одређивања карактеристичне дужине.

34: Теорија сличности (eng. *similitude theory*) је концепт димензионе анализе применљив за тестирање инжењерских модела, којим се сматра да је модел сличан стварној изведби уколико са њом дели геометријску, кинематичку и динамичку сличност. Главна примена је у механици флуида, термодинамици, аеронаутици, хидраулици и слично. Димензиона анализа успоставља односе између различитих сложених физичких величина идентификовањем њихових основних величина и мерних јединица.

За карактеристичну дужину најчешће се узима димензија опструјане површи предмета у смеру протицања флуида (Слика 1.32), односно у правцу повећања дебљине граничног слоја флуида. У случају затворених струјања карактеристична дужина би била унутрашњи пречник D_u (код цевовода) или хидраулички пречник $D_H = 4A/O$ (код канала где попречни пресек није кружни облик; A - површина попречног пресека; O - оквашени обим пресека).

У складу са концептима теорије сличности³⁴ општа једначина прелажења топлоте при *принудном* *стирујању* флуида може се представити зависношћу три бездимензиона броја, према (1.53).

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (1.53)$$

Функција $f(Re, Pr)$ зависи од конкретних услова и у општем случају одређује се експериментално. У произвољном случају када се посматра опструјавање тела било ког геометријског облика, у зависности од величине Re броја, функција ће имати три различита домена посматрања: ламинарни, прелазни и турбулентни. За мале вредности Re броја и ламинарног режима струјања, Nu број има приближно константну вредност. Код већих вредности Re броја, Nu број, са довољном тачношћу, може се описати експоненцијалним корелацијама према (1.54),

$$Nu = CRe^n Pr^m \quad (1.54)$$

где је константа $n \approx 2/3$. Код сферног геометријског облика опструјаваног тела Nu број може имати најмању вредност $Nu = \pi$, док је код цилиндара, округлих дискова и равних површина $Nu > 2$. Једначина (1.54) може се користити и код струјања у цевима и каналима. За округла и цилиндрична тела може се користити емпиријска једначина В.К.Шчитникова (1.55),

$$Nu = 0,143 \cdot Re^{0,67} \quad (1.55)$$

која се са грешком од $\pm 5\%$ може користити у случају опструјавања ваздуха температуре $60 \div 140^\circ\text{C}$, у распону $1 \cdot 10^4 < Re < 15 \cdot 10^4$. Општа једначина преношења топлоте при *принудном* *стирујању* флуида може се представити зависношћу три бездимензиона броја, према (1.56),

$$Nu = f(Gr, Pr) \quad (1.56)$$

при чему се са довољном тачношћу може користити израз (1.57).

$$Nu = CGr^n Pr^m \quad (1.57)$$

У распону вредности $10^4 < Gr \cdot Pr < 10^8$, експериментални

подаци могу се описати релацијом (1.58).

$$\text{Nu} = 0,59 \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{0,25} \quad (1.58)$$

Зрачење шoйлоше (радијација) је механизам простирања топлоте путем електромагнетних таласа (Слика 1.19) при чему није неопходно присуство материје кроз коју се топлота преноси (могуће је и кроз вакуум). Енергија коју тело емитује у простор, према *Стефан-Болцмановом* закону, сразмерна је четвртој степену апсолутне температуре тела, према (1.59),

$$E = A\varepsilon\sigma T^4 \quad (1.59)$$

где је: E - емитована енергија у W; A - површина тела у m^2 ; ε - емисивност тела на температури T (Табела 1.8); $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ - Стефан-Болцманова константа; T - температура тела у K. Међутим, у техници сушења је учесталији случај постављања узорка материјала у комору за сушење (Слика 1.33) при чему су зидови простора, који окружују узорак, на вишој температури од узорка, те му предају топлоту зрачењем и тако га загревају. У комори узорак буде најчешће окружен ваздухом, те постоји и конвективни пренос топлоте која се прво преноси са зидова на ваздух, а потом и са ваздуха на узорак. Међутим, овај механизам простирања може се занемарити уколико нема интензивног принудног струјања ваздуха. У том случају размењени топлотни проток зрачењем топлоте може се одредити према (1.60),

$$\dot{Q}_{12} = H_{12}\varepsilon_{red}\sigma(T_1^4 - T_2^4) \quad (1.60)$$

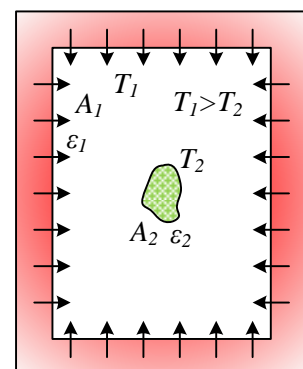
$$\varepsilon_{red} = \frac{1}{\frac{1-\varepsilon_1}{A_1\varepsilon_1} + \frac{1}{A_1\phi_{12}} + \frac{1-\varepsilon_2}{A_2\varepsilon_2}} \quad (1.61)$$

где је: \dot{Q} - топлотни проток пренет са тела 1 на тело 2 у W; $H_{12} = \phi_{12}A_1$ - ефективна површина узајамног зрачења у m^2 ; ϕ_{12} - геометријски фактор узајамног зрачења тела 1 на тело 2. У случају приказаном на (Слика 1.33) геометријски фактор је $\phi_{12} = A_2/A_1$. ε_{red} - редукована емисивност при унутрашњем зрачењу површина тела 1 на тело 2, која се може одредити према (1.61); A_1 - укупна унутрашња површина простора у m^2 ; A_2 - површина тела (узорка) у m^2 ; ε_1 - емисивност тела 1; ε_2 - емисивност тела 2.

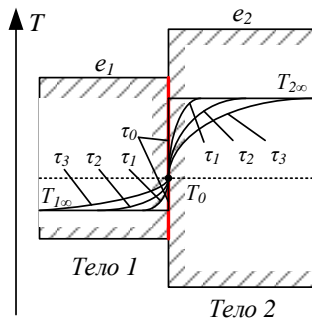
Контактна размена шoйлоше се јавља између два тела која се у тренутку контакта налазе на различитим температурама, а после контакта теже успостављању термичке

Табела 1.8: Емисивност неких намирница и материјала који се најчешће срећу у техници сушења.

Материјал	ε
Тесто	0,85
Вода	0,9-0,95
Лед	0,95-1,00
Млеко	0,7
Уље	0,9-1,00
Риба	0,98
Говеће месо	0,74-0,78
Парадајз	0,98
Паприка	0,97
Воће	0,94±0,04
Већина намирница	0,5-0,97
Зрнeвље житарица	0,98
Листови биљака	0,95-0,99
Папир	0,85-1,00
Дрво	0,8-0,95
Нерђајући челик:	
- неполиран	0,45-0,95
- полиран	0,1-0,15
Тефлон	0,85



Слика 1.33: Илустрација узорка материјала који се налази унутар коморе сушаре и загрева зрачењем топлоте.



Слика 1.34: Распореда температура у периоду непосредно после успостављања контакта топлог и хладног тела.

$T_{1\infty}$ и $T_{2\infty}$ - почетне температуре контактних површина тела 1 и 2; t_1 , t_2 и t_3 - температурне криве у различитим временским тренутцима 1, 2 и 3.

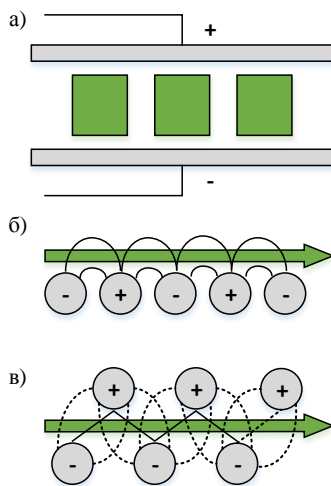
равнотеже и коначне равнотежне температуре. У техници сушења, ова појава јавља се у системима где хладан материјал доспева на врућу површину, по којој струји, клизи или вибрира. У почетном тренутку, након контакта два тела која су претходно имала различите температуре, на контактној површини успоставља се равнотежна температура (Слика 1.34), при чему важи (1.62),

$$\frac{T_2 - T_0}{T_0 - T_1} = \frac{e_1}{e_2} \quad (1.62)$$

где је: T_0 - равнотежна температура у К; T_1 и T_2 - температуре тела 1 и 2 у К; e_1 и e_2 - топлотне ефузивности тела 1 и 2 према (1.33). Фактори који могу утицати на ефикасност контактне размене топлоте су: контактни притисак, стање контактне површине (храпавост, валовитост и равност), деформисаност контактне површине и чистоћа. Средња вредност коефицијента преношења топлоте са топлог на хладно тело, у произвољном временском интервалу, при разлици температура $T_0 - T_{\infty}$, може се одредити према (1.63),

$$k_{sr} = \frac{2}{\pi} \frac{e}{\sqrt{\Delta\tau}} \quad (1.63)$$

где је: k_{sr} - средња вредност коефицијента преношења топлоте у $W/(m^2K)$; $\Delta\tau$ - временски интервал током кога је трајао контакт; e - топлотна ефузивност.



Слика 1.35: Илустрација конфигурација електрода код диелектричног загревања. Загревање материјала се изводи:

а) шаржно између поларизованих паралелних плоча,

б) у танком слоју материјала наизменично поларизованим електродама, и

в) у дебљем слоју или листовима унакрсно поларизованим електродама.

Преношење топлоте у променљивом електромагнетном пољу током загревања материјала најчешће се остварује постављањем материјала између две размакнуте металне плоче које су изложене променљивом магнетном пољу (Слика 1.35). Између њих ће се формирати наизменична струја чије ће особине зависити од снаге и капацитета магнетног поља, а чија ће јачина бити пропорционална диелектричној пермитивности материјала. Количина топлоте која се у јединици времена генерише по јединици запремине материјала, изложеног променљивом електромагнетном пољу, може се одредити према (1.64),

$$\dot{Q} = 2\pi f \epsilon'_0 \epsilon'' E^2 \quad (1.64)$$

где је: \dot{Q} - генерисана снага у W/m^3 ; E - снага електричног поља на посматраној локацији у V/m ; f - фреквенца електромагнетних таласа у Hz ; $\epsilon'_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} F/m$ - диелектрична константа вакуума; ϵ'' - фактор диелектричног губитка у F/m (Фарад по метру). Веза између диелектричне константе ϵ' и фактора диелектричних губитака ϵ'' може се представи-

ти укупном диелектричном константом, према (1.65),

$$\varepsilon = \varepsilon' - j \cdot \varepsilon'' \quad (1.65)$$

где је: $j = \sqrt{-1}$ - имагинаран број, односно према (1.66),

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (1.66)$$

при чему се величина $\tan \delta$ назива тангентом диелектричних губитака, и представља комбинацију способности електромагнетног поља да продире кроз материјал и материјала да апсорбује и расипа топлоту која је на тај начин генерисана. Диелектрична константа свежег воћа и поврћа може се израчунати емпиријски према (1.67) [9],

$$\varepsilon' = 2,14 - 0,104 \cdot T + 0,808 \cdot (y \cdot 100\%) \quad (1.67)$$

где је: T - температура материјала у К; $y \cdot 100\%$ - релативна влажност материјала у %. Искуства указују на то да су намирнице са фактором диелектричног губитка у опсегу $2 < \varepsilon'' < 10^2$ погодне за диелектрично загревање. На темпе-

Намирнице	$y \cdot 100\%$, %	ε'	ε''	t , °C
Јабука	88,0	57,0	8,0	23
Грожђе	82,0	69,0	15,0	23
Киви	87,0	70,0	18,0	23
Лимун	91,0	73,0	15,0	23
Бресква	90,0	70,0	12,0	23
Ананас	86,0	72,0	14,0	24
Броколи	40,8	15,7	8,3	21,5
Шаргарепа	87,0	59,0	18,0	23
Краставац	97,0	71,0	11,0	23
Црни лук	92,0	61,0	12,0	23
Кромпир	79,0	62,0	22,0	23
Мед	18,0	11,0	4,7	25
Млеко	88,0	79,4	15,0	35
Јаје, жуманце	47,0	41,4	12,1	20
Јаје, беланце	89,0	67,2	22,3	20
Туњевина	70,9	103,2	300	5
Пилеће груди	75,1	59,0	18,3	20
Ђуреће груди	74,5	56,3	18,0	20
Свињска плећка	73,9	49,4	15,1	90,1
Јунеће месо	71,5	43,7	13,7	-
Јагњеће месо	73,0	49,4	15,0	72,6
Биљно уље	-	2,6	0,1	25
Животињска маст	-	3,2	0,2	20
Воћни сокови	-	72,0	13,5	35
Вода	-	80	2,8	20

Табела 1.9: Диелектричне особине неких намирница.[10]

$y \cdot 100\%$ - релативна влажност материјала у %, ε' - диелектрична константа, ε'' - фактор диелектричних губитака, t - температура материјала у °C.

ратури $t > 0^\circ\text{C}$ вредност диелектричне константе влажног материјала приближава се вредностима за чисту воду $\epsilon' = 80$, тако да се ова особина може користити код одређивања садржаја воде у материјалу. Намирнице (Табела 1.9) са већим садржајем воде имају веће вредности диелектричне константе. При диелектричном сушењу зоне материјала са већим садржајем воде брже ће се загревати од мање влажних јер је генерисање топлоте веће тамо где је више воде. Из таквих зона влага брже испарава. У зависности од позиције ових зона може се десити да влага прво напусти унутрашње делове материјала.

Гранични услови код решавања једначина преношења топлоте могу се дефинисати на више начина. Познавање граничних услова је од кључног значаја за разматрање интеракције материјала са околином. Гранични услови су различити на свакој граници система. Једнодимензионални проблеми захтевају познавање два гранична услова, а дводимензионални проблеми захтевају познавање четири гранична услова. Најчешћи гранични услови³⁵ у вези са проблемима преношења топлоте приликом сушења прехранбених материјала наведени су у наставку.

35: Постоје четири основна типа граничних услова:

- ▶ Гранични услов *тврде* врсте подразумева постојање константне температуре на граници система;
- ▶ Гранични услов *грубе* врсте подразумева да се на граници система дешава константна размена енергије са околином;
- ▶ Гранични услов *тврде* врсте подразумева да је граница система адијабатска или изолована;
- ▶ Гранични услов *чврсте* врсте подразумева да се на граници система енергија размењује струјањем (конвективно).

36: *Johan Peter Gustav Lejeune Dirichlet* (1805-1859) је немачки математичар који се бавио Теоријом бројева, Фуријеовим једначинама и математичком анализом функција.

У математици се Дирихлеовим граничним условом сматра услов по коме решења диференцијалних једначина имају тачно дефинисане вредности на границама домена.

- ▶ *Дефинисана температура површи* је најједноставнији гранични услов. Ова температура се одржава константном током процеса сушења или се мења по познатој функцији. У математици се ово назива граничним условом првог реда - *Дирихлеов гранични услов*.³⁶ Константна температура на површини материјала може се одржати на контакту између лесе сушаре и површи којом материјал налаже на лесе.
- ▶ *Дефинисан притисак на граничној површи* је гранични услов који је функција простора и/или времена и током процеса сушења се мења по познатој функцији или је константан.
- ▶ *Дефинисана конвекција на граничној површи* је гранични услов који се примењује када постоји кретање флуида уз границу система. Ово је случај код конвективног сушења где комад материјала који се суши бива опструјаван са свих страна.
- ▶ *Дефинисана радијација на граничној површи* је гранични услов који се примењује када се на узорак топлота преноси зрачењем са удаљеног извора топлоте. Веома често се овај гранични услов занемарује ради поједностављења граничних услова. Радијациони гранични услови се често обједињују и заједнички посматрају са конвективним граничним условима.

1.5 Преношење масе

Сушењем се влага уклања из влажног материјала, тако да је током термичких поступака сушења процес преношења влаге из материјала у агенс сушења подједнако важан као и процес преношења топлоте. У већини случајева ови процеси се не могу одвојити и симултано прате један други. У случају капиларно-порозних материјала као што су воће и поврће, чија сложена структура подразумева постојање међућелијског простора, капилара и гасом испуњених шупљина, кретање влаге унутар оваквог материјала може се десити помоћу више механизма преношења влаге, као што су:

- ▶ дифузија течности услед капиларних сила и/или гравитационих сила,
- ▶ дифузија течности услед постојања градијента концентрације,
- ▶ дифузија течности или паре услед разлика тоталних притисака проузрокованих спољашњим притисцима и температурама,
- ▶ дифузија паре услед скупљања материјала и постојања градијента притиска,
- ▶ испаравање и кондензација проузрокована разликама у температури,
- ▶ термодифузија течности и паре, и
- ▶ површинска дифузија у слојевима течности на оквапшеним чврстим површинама услед површинских напона.

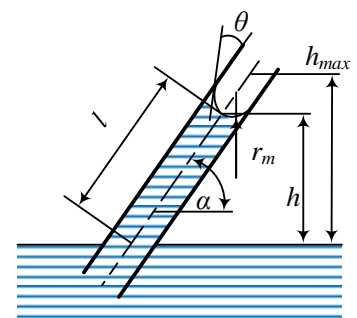
Капиларно преношење влаге дешава се у цилиндричним цевчицама потопљеним у течност (Слика 1.36) при чему силе³⁷ укључене у процес морају бити у стању равнотеже, према (1.68),

$$Al\rho\frac{d^2l}{d\tau^2} + A\rho\left(\frac{dl}{d\tau}\right)^2 + lg8\mu\pi\frac{dl}{d\tau} + \rho Alg\sin\alpha = Ag\frac{2\sigma}{r_m} \quad (1.68)$$

где је: A - површина попречног пресека капиларе у m^2 ; l - дужина стуба течности у m ; ρ - густина течности у kg/m^3 ; τ - време у s ; g - убрзање силе Земљине теже у m/s^2 ; μ - динамичка вискозност у $Pa\cdot s$; α - угао нагиба капиларе у степенима; σ - површински напон у N/m^2 ; r_m - полупречник мениска капиларе у m .

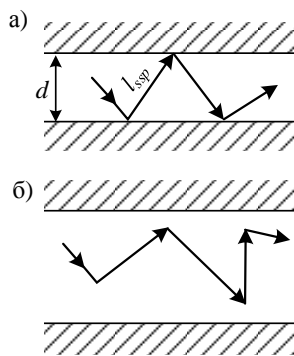
Капиларни број (Ca) описује ефекат вискозних сила наспрам површинског напона који делује на прелазу течност-гас (или између два флуида који се не мешају), а може се одредити

37: Чланови у једначини (1.68) по редоследу појављивања су:
сила инерције +
сила импулса +
сила трења +
сила гравитације
= капиларна сила



Слика 1.36: Илустрација нагнуте капиларне цеви.

α - угао нагиба капиларе,
 θ - угао квашења,
 r_m - полупречник мениска,
 l - дужина стуба течности,
 h - висина стуба течности.



Слика 1.37: Кретање молекула у цилиндричним порима:
а) Кнудсенова дифузија,
б) молекуларна дифузија.

38: *Martin Hans Christian Knudsen* (1871-1949) је дански физичар, професор на Техничком универзитету у Данској. Познат је по свом раду на протоку гасова, молекуларно-кинетичкој теорији гасова и феноменима кретања гасова под ниским притисцима.

39: *Механика континуума* је грана механике која се бави механичким понашањем моделованих материјала као континуалне масе, пре него дискретних честица. Овим се подразумева да супстанца материјала у потпуности испуњава простор који заузима. На овакве моделе се могу применити закони одржања масе, количине кретања и енергије. На микроскопском нивоу, материјали имају пукотине и дисконтинуитете, али уз адекватне претпоставке могуће је сматрати их континуалним срединама.

40: Међумолекуларне силе које се јављају између молекула исте супстанце називају се *кохезионе силе*, док се између различитих супстанци називају *адхезионе силе*.

према (1.69),

$$Ca = \frac{\mu w}{\sigma} \quad (1.69)$$

где је: Ca - капиларни број; μ - динамичка вискозност у Pa·s; w - карактеристична брзина у m/s; σ - површински напон у N/m². Уколико је $Ca < 10^{-5}$ може се сматрати да се у порозном материјалу дешава капиларно преношење влаге.

Кнудсенов број (Kn) је однос средњег слободног пута молекула течности између два судара и карактеристичне дужине капиларе (цеви) кроз коју флуид пролази (1.70),

$$Kn = \frac{l_{ssp}}{d} \quad (1.70)$$

где је: Kn - Кнудсенов³⁸ број; l_{ssp} - средња слободна путања молекула течности између два судара у m; d - пречник поре у m (Слика 1.37а). *Кнудсенова дифузија* јавља се при вредностима $Kn \geq 1$ и тада се флуидна средина не може третирати као континуум.³⁹ Кнудсенова дифузија подразумева да се молекули чешће сударају са зидовима пора кроз које се крећу него са другим молекулима. За вредности $Kn \leq 0,01$ може се сматрати да важе принципи механике континуума, а у случају вредности $0,01 < Kn < 10$ сматрамо да се ради о транзицији молекуларне ка Кнудсеновој дифузији. У случају кретања течности или пара кроз *микрокапиларе* (полупречници капиларе мањи од $10^{-7}m=100nm$), очекиване вредности Кнудсеновог броја биће $Kn < 0,001$, а преношења влаге ће се остварити на молекуларном нивоу.

Током процеса сушења инерцијалне силе и силе услед промене количине кретања у капилари су довољно мале да се могу занемарити, односно $d^2l/d\tau^2 = 0$ и $(dl/d\tau)^2 = 0$, па се померање мениска течности у капилари може изразити према (1.71),

$$w_m = \frac{dl}{d\tau} = \frac{A\rho}{8\pi\mu} \left(\frac{2\sigma}{r_m\rho l} - \sin\alpha \right) \quad (1.71)$$

где је: w_m - брзина померања мениска у m/s. У стању равнотеже је $dl/d\tau = 0$ па се из једначине (1.68), уз занемаривање утицаја гравитације, може добити максимална висина подизања течности у капилари, према (1.72),

$$h_{max} = l_{max} \sin\alpha = \frac{2\sigma \cos\theta}{r_m\rho g} \quad (1.72)$$

где је: θ - угао квашења (контакта течности и зида) који зависи од сила *кохезије* и *адхезије*⁴⁰ које делују на молекул течности у близини чврстог зида. Уколико се две капиларне цеви различитих пречника споје (Слика 1.38), разлика при-

тисака у капиларама се може одредити према (1.73).

$$\Delta p = 4\sigma \cos \theta \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right) \quad (1.73)$$

На основу једначина (1.71), (1.72) и (1.73) закључује се да материјал спорије упија воду уколико је влажнији. Такође, сув материјал са финијом структуром пора може да упије воду из материјала грубље структуре пора. У случају материјала са порам различитог попречног пресека извесно је да ће се влагом прво попунити онај са ситнијим порам. У хомогеним капиларно-порозним материјалима са различитим садржајем влаге у различитим деловима материјала (Слика 1.39), течност се креће капиларно према подручјима мање влажности, што се математички описује помоћу (1.74).

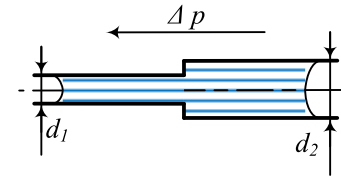
$$j_k = \frac{\dot{m}_{w.k}}{A} = -D_k \rho_{sm} \frac{du}{dl} \quad (1.74)$$

где је: j_k - интензитет капиларне дифузије у $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$; $\dot{m}_{w.k}$ - масени проток влаге услед капиларне дифузије у kg/s ; A - површина попречног пресека материјала у m^2 ; D_k - коефицијент капиларне дифузије течности у m^2/s ; ρ_{sm} - густина сувог материјала у $\text{kg}_{sm}/\text{m}^3$; du/dl - градијент влажности материјала у смеру преношења влаге у $\text{kg}_w/(\text{kg}_{sm}\cdot\text{m})$. Кретање течности у порам материјала јавља се због постојања површинских напона у капиларама. Загревањем материјала, течност у њему почиње да се креће ка зонама нижих температура. Промена притиска која се јавља током овог кретања може се израчунати према (1.75),

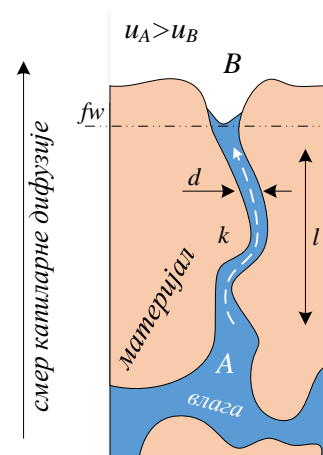
$$\Delta p = 2\sigma_{pr} \cos \theta \frac{\varepsilon}{r} (T_1 - T_2) \quad (1.75)$$

где је: σ_{pr} - просечна вредност површинских напона у N/m ; ε - температурни коефицијент који узима у обзир утицај температуре на површински напон у $1/\text{K}$; T_1 и T_2 - температуре течности на површини менисака у K .

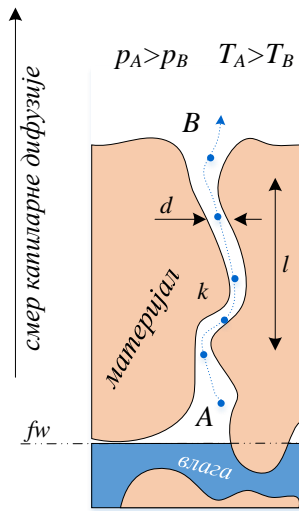
Капиларно преношење паре дешава се у микрокапиларама ($r < 10^{-7}\text{m}=100\text{nm}$), најчешће услед истовременог постојања градијената притисака и температуре, а уколико је Кнудсенов број $K \ll 1$. Пара која напушта влажан материјал креће се кроз осушен порозан скелет материјала од унутрашњих ка спољашњим слојевима/површима материјала. Нека се простори А и В унутар порозног материјала (Слика 1.40), повезани микрокапиларом дужине l и пречника $d = 2r$ у том систему, налазе на притисцима $p_A > p_B$, односно температурама $T_A > T_B$. Интензитет дифузије паре кроз пресек



Слика 1.38: Илустрација спојених капиларних цеви различитих пречника. d_1 и d_2 - пречници менисака, Δp - промена притиска.



Слика 1.39: Илустрација капиларног преношења течне влаге. u_A и u_B - влажност материјала у зонама А и В, d - пречник, l - дужина, k - капилара, fw - фронт испаравања.



Слика 1.40: Илустрација капиларног преношења паре.
 T_A и T_B - температуре,
 p_A и p_B - притисци,
 $d = 2r$ - пречник,
 l - дужина,
 k - капилара,
 fw - фронт испаравања.

41: Под *макрокапиларима* подразумевамо поре у материјалу чија је ширина довољно велика да се кретање влаге не сматра капиларним кретањем (полупречници капиларе $r > 10^{-7} \text{ m} = 100 \text{ nm}$).

42: *Adolf Eugen Fick* (1829-1901) је немачки физичар и психолог. Бавио се математиком и физиком једнако успешно као и медицином. Проучавао је дифузију гасова кроз мембране. Установио је процедуру мерења протока крви кроз срце, тзв. Фиков принцип.

43: $\nabla C = \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{\partial C}{\partial z}$
 Оператор ∇ назива се "набла" или Хамилтонов оператор и у Декартовом координатном систему има приказано значење.

капиларе површине A може се одредити према (1.76),

$$j_{k,p} = \frac{\dot{m}_p}{r^2 \pi} = \frac{8}{3} \sqrt{\frac{M}{2\pi R}} \left(\frac{p_B}{\sqrt{T_B}} - \frac{p_A}{\sqrt{T_A}} \right) \frac{r}{l} \quad (1.76)$$

где је: $j_{k,p}$ - интензитет капиларне дифузије паре у $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$; \dot{m}_p - масени проток влаге у парном стању у kg/s ; $A = d^2 \pi / 4 = r^2 \pi$ - површина попречног пресека капиларе у m^2 ; M - моларна маса паре у kg/mol ; R - универзална гасна константа $\text{J}/(\text{molK})$; T_A и T_B - температуре А и В у К; p_A и p_B - притисци А и В у Па; $r = d/2$ - полупречник капиларе у м; l - дужина капиларе у м.

Дифузионо преношење влаге кроз материјал подразумева преношење влаге у течном или парном стању кроз *макрокапиларе*⁴¹ материјала порозне структуре. Дифузионо преношење масе је неповратан физички процес и дешава се услед постојања:

- ▶ градијента концентрације,
- ▶ градијента притиска,
- ▶ градијента температуре или
- ▶ екстерних погонских сила,

и то на два начина који се најчешће дешавају истовремено:

- ▶ молекуларном дифузијом, и/или
- ▶ турбулентном дифузијом.

Молекуларна дифузија је начин преношења масе, изазван искључиво постојањем градијента концентрације и подразумева кретање индивидуалних молекула кроз средину услед енергије коју поседују (Слика 1.376). Кретање ће постојати докле год не дође до изједначавања концентрација. Овакав начин преношења масе описан је *Првим Фиковим*⁴² *законом дифузије*, према (1.77),

$$j_m = \frac{\dot{m}_{w,m}}{A} = -D_m \nabla C \quad (1.77)$$

где је: j_m - интензитет молекуларне дифузије у $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$; D_m - коефицијент молекуларне дифузије у m^2/s ; ∇C - градијент концентрације влаге у више праваца⁴³ у $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{m})$; $\dot{m}_{w,m}$ - масени проток влаге услед молекуларне дифузије у kg/s ; A - површина попречног пресека материјала у m^2 . Молекуларна дифузија је спор процес за разлику од дифузије која се јавља приликом мешања или конвективног кретања флуида. Молекуларна дифузија је процес приметан код флуида који мирују или се крећу у ламинарном режиму, а наравно она постоји и код осталих режима струјања али битно не долази до изражаја.

Уколико, проблем посматрамо једнодимензионо, односно уколико постоји разлика концентрација честица А и В у правцу z - осе (Слика 1.41), јавиће се спонтано дифузионо кретање флуида из делова веће ка деловима мање концентрације, те се у складу са (1.77), описује релацијом (1.78),

$$j_m = \frac{\dot{m}_{w,m}}{A} = -D_m \frac{dC}{dz} \quad (1.78)$$

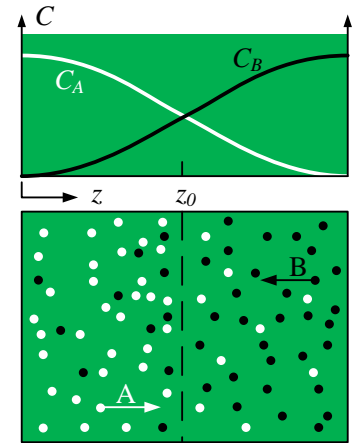
где је: dC/dz - градијент концентрације влаге у смеру преношења влаге у $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{m})$. Знак минус указује на то да се дифузија јавља у смеру опадања концентрације. Брзина кретања зависиће директно од градијента концентрације у правцу кретања. *Коефицијент молекуларне дифузије* изражава меру дифузионе мобилности и сматра се константном величином која је карактеристична за посматрани систем, а која зависи од температуре система и од временског периода током кога се дифузија одвија.

Површинска дифузија је општи процес који подразумева молекуларно кретање на чврстим површинама материјала (Слика 1.42). Процес се генерално може замислити у виду суседних честица које на површи материјала замене места брзином која се повећава са порастом температуре површи. На брзине и механизме површинске дифузије утичу разни фактори: енергија везивања честице за површ, температура површине и честица, оријентација површинске решетке материјала, привлачење и одбијање система површ-честица, хемијски потенцијал и слично (Слика 1.43). Макроскопски посматрано, интензитет површинске дифузије се може одредити према (1.79),

$$j_{pd} = \frac{\dot{m}_{w,pd}}{A} = C_{pov} w_{pov} \quad (1.79)$$

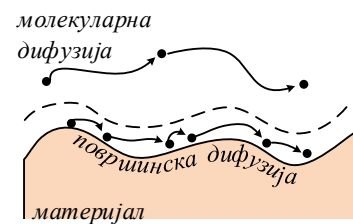
где је: j_{pd} - интензитет површинске дифузије у $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; $\dot{m}_{w,pd}$ - масени проток влаге услед површинске дифузије у kg/s ; A - површина у m^2 ; C_{pov} - концентрација влаге на површи материјала у kg/m^3 , w_{pov} - брзина кретања влаге по површи материјала у m/s . Површинска дифузија зависи од површинске порозности материјала која је може убрзати или успорити капиларном адсорпцијом. Капиларна адсорпција се јавља када шупљине у ћелијској структури површи материјала задржавају воду силама површинског напона.

Турбулентна дифузија је макроскопски начин преноса масе приметан код флуида који се крећу у турбулентном режиму струјања у случају јасно дефинисаног градијента концен-

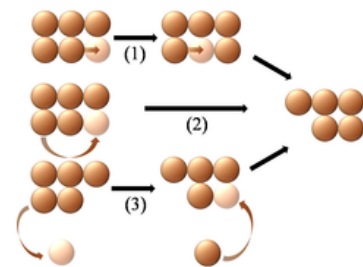


Слика 1.41: Молекуларна дифузија.

C_A и C_B - концентрације честица А и В у посматраним зонама.



Слика 1.42: Илустрација молекуларне и површинске дифузије влаге. [11]

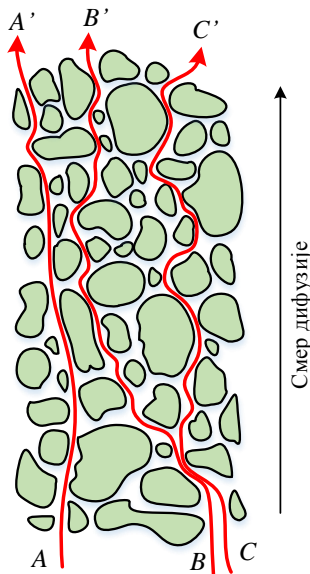


Слика 1.43: Механизми површинске дифузије влаге. [12]

(1) *секвенцијално померање*, молекул влаге се помера на најближе слободно место без прескакања других молекула,

(2) *ивично померање*, молекули који су на крајевима се померају на суседно место са сличним окружењем,

(3) *испаривање-рекондензација*, молекули испаре са једне и кондензују се на другој позицији на површи материјала.



Слика 1.44: Илустрација интензитета турбулентне дифузије влаге при преношењу кроз материјал. [13]

$A \rightarrow A'$ - слаба турбуленција,
 $B \rightarrow B'$ - средња турбуленција,
 $C \rightarrow C'$ - јака турбуленција.

44: Оператор $\nabla \cdot \nabla = \nabla^2$ назива се Лапласов оператор и у приказаним координатним системима има следеће значење:

декартов:

$$\nabla^2 C = \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}$$

цилиндрични:

$$\nabla^2 C = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 C}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}$$

сферни:

$$\nabla^2 C = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial C}{\partial r} \right) +$$

$$+ \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial C}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 C}{\partial \varphi^2}$$

трације у неком правцу, а може се одредити према (1.80),

$$j_{turb} = \frac{\dot{m}_{w,turb}}{A} = -D_{turb} \frac{dC}{dz} \quad (1.80)$$

где је: j_{turb} - интензитет турбулентне дифузије у $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$; $\dot{m}_{w,turb}$ - масени проток влаге услед турбулентне дифузије у kg/s ; A - површина попречног пресека материјала у m^2 ; D_{turb} - коефицијент турбулентне дифузије у m^2/s . Коефицијент *турбулентне дифузије* није константа, већ зависи од хидродинамичких особина процеса струјања. При транзицији струјања, од ламинарног ка потпуно развијеном турбулентном струјању, процес турбулентне дифузије постаје све интензивнији и све је теже тачно проценити градијент поља концентрације (Слика 1.44). Особине струјања и начин турбулентног кретања могу довести до нежељених начина преношења масе, као што су уздужна или попречна кретања, тако да турбулентна дифузија не мора увек изричито довести до побољшања процеса преношења масе. Укупан интензитет дифузије, остварен сумарно и молекуларном и турбулентном дифузијом, може се одредити једначином укупне дифузије према (1.81),

$$j_{uk} = j_m + j_{turb} = -(D_m + D_{turb}) \frac{dC}{dz} \quad (1.81)$$

где је: j_{uk} - интензитет укупне дифузије у $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$.

У случају нестационарног система дифузије, када се концентрација влаге мења са променом времена и када постоји брзина струјања влаге у више праваца, дифузионо кретање се у општем случају може описати *Друџим Фиковим законом дифузије*, према⁴⁴ (1.82),

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D_m \nabla^2 C \quad (1.82)$$

где је: D_m - коефицијент молекуларне дифузије у m^2/s . У општем случају тродимензионог поља концентрације, као и постојања турбулентности/померања у сва три правца, Друџи Фиков закон се може модификовати (1.83),

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial C}{\partial x} + w_y \frac{\partial C}{\partial y} + w_z \frac{\partial C}{\partial z} = D_m \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (1.83)$$

где лева страна једначине описује локалну и конвективну дифузију, а десна страна описује молекуларну дифузију.

Дифузија влаге са слободне површи течности јавиће се на позицији *фронти испаравања* који се премешта од спољашњих ка унутрашњим слојевима материјала током проце-

са сушења (Слика 1.45). На позицији фронта испаравања, водена пара са слободне површи воде продире у ваздух. Са друге стране, ваздух не пролази кроз слободну површ воде и може се сматрати да је брзина кретања ваздуха једнака нули. У општем случају интензитет дифузије влаге са слободне површи воде може се одредити према (1.85),

$$j_{fw} = \frac{\dot{m}_p}{A_{fw}} = -\frac{D_{fw}}{R_p T} \left(\frac{p}{p - p_p} \right) \frac{dp_p}{dl} \quad (1.84)$$

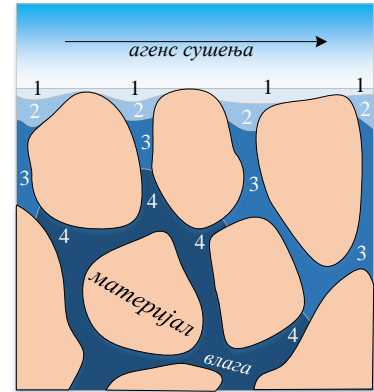
где је: j_{fw} - интензитет дифузије влаге са слободне површи течности (тј. на позицији фронта испаравања) у $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$; \dot{m}_p - масени проток паре у kg/s ; A_{fw} - површина слободне површи течности у m^2 ; D_{fw} - коефицијент дифузије паре са слободне површи течности у околни ваздух у m^2/s ; T - температура паре у K ; p - укупан притисак мешавине ваздуха и паре у Pa ; p_p - парцијални притисак паре у Pa ; l - карактеристична дужина у смеру дифузије паре у m .

У случају да вода испарава са слободне површи из макрокапиларе, која се може апроксимирати танком цеви дужине L , јавиће се *Стефаново кретање*.⁴⁵ За разлику од претходног случаја за који важи једначина (1.85), постојање Стефановог кретања може битно променити брзинско поље, а одступања су у толико већа уколико је ово кретање израженије. Интензитет испаравања у случају постојања Стефановог кретања, уз претпоставку мировања слободне површи, може се одредити према (1.85),

$$j_{fw.Stef} = \frac{\dot{m}_p}{A_{fw}} = \frac{D_{fw} p}{R_p T L} \ln \left(\frac{p - p_p}{p - p_{p.fw}} \right) \quad (1.85)$$

где је: $j_{fw.Stef}$ - интензитет дифузије влаге са слободне површи течности у случају постојања Стефановог кретања у $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$; L - дужина танке цеви у m ; p - укупан притисак мешавине ваздуха и паре у Pa ; $p_{p.fw}$ - парцијални притисак паре у непосредној близини слободне површи (фронта испаравања) у Pa .

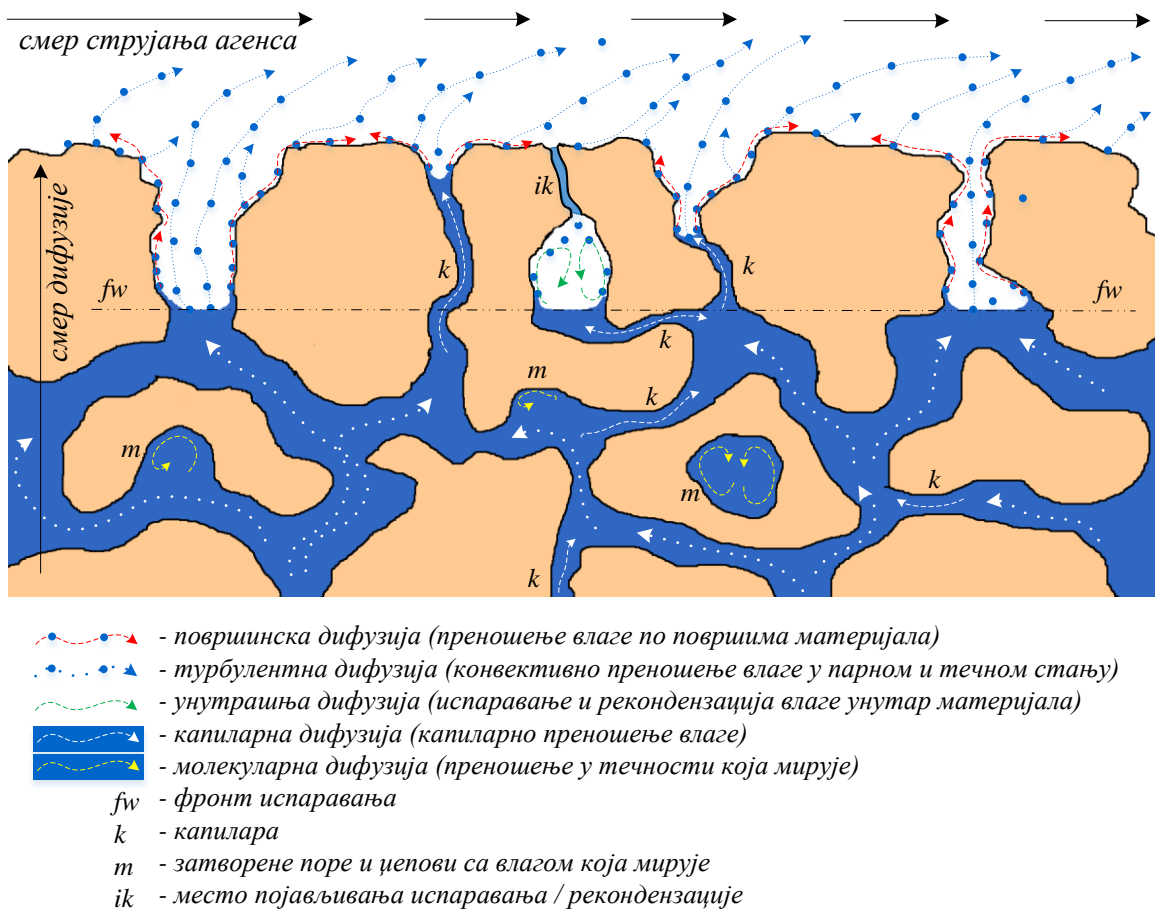
Водена пара, која је претходно дифундовала са слободне површи, премешта се из унутрашњих слојева материјала ка спољној површи материјала, одакле даље одлази у околну средину која је најчешће влажан ваздух или неки други агенс сушења. Укупни интензитет дифузије, који ће обухватити све, укључујући и дифузију са слободне површи влаге и дифузију услед конвективног кретања влаге кроз осушене делове скелета материјала, може се еперијски одредити помоћу



Слика 1.45: Илустрација премештања фронта испаравања од спољашњих ка унутрашњим слојевима материјала, $1 \rightarrow 4$, остављајући за собом осушене делове материјала. [14]

45: *Стефаново кретање* је попречно конвективно кретање паре, у правцу управном на слободну површ воде. Ово кретање мора постојати како би се избегло настајање градијента притиска мешавине ваздуха и паре у близини слободне површи. У стварности се догађа да се фронт испаравања помера ка унутрашњости материјала истовремено са дешавањем процеса дифузије влаге са слободне површи. Међутим, уз претпоставку да је интензитет дифузије константан и да је површина слободне површи непромењива, са довољном тачношћу се може користити једначина (1.85) и у случају померања слободне површи [15].

Josef Stefan (1835-1893) је физичар, математичар и поета пореклом Карантански Словен (национална мањина у Аустрији). Познат је по Стефановом закону зрачења апсолутно црног тела, Стефан-Болцмановом закону, али и мерењима топлотне проводљивости гасова, испаравања, дифузије и кондукције флуида.



Слика 1.46: Илустрација механизма преношења влаге кроз капиларно-порозни материјал који опструјава неки агенс сушења.

једначине Ликова према (1.86),

$$\dot{m}_p = A_{fw} \frac{M_w D_{fw} \Delta p_p}{R_A T_{fw} l} \cdot f(Re) \quad (1.86)$$

46: Средња температура граничног слоја одређује се као средња аритметичка вредност између температура површине течности и околне средине.

47: На пример:

$$f(Re) = 0,5Re^{0,58}$$

за $20 \leq Re \leq 20000$,

$$f(Re) = 0,85Re^{0,76}$$

за $20000 \leq Re \leq 200000$.

48: Основне претпоставке теорије ефективне дифузије јесу да се дифузија влаге дешава кроз скелет материјала, унутар капилара, пора и шупљина испуњених паром. Пара дифундује до отвореног краја капиларе и одлази у ваздушну струју или неки агенс сушења. Не узима се у обзир утицај очвршћавања нити скупљања материјала током сушења.

где је: \dot{m}_p - масени проток паре у kg/s ; A_{fw} - површина слободне површине течности (фронта испаравања) у m^2 ; M_w - моларна маса воде у kg/mol ; D_{fw} - коефицијент дифузије паре са слободне површи течности (фронта испаравања) у околном ваздуху (агенсу) у m^2/s ; T_{fw} - средња температура граничног слоја⁴⁶ течности у K ; R - универзална гасна константа у $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$; Δp_p - разлика парцијалних притисака водене паре у околној средини и засићене водене паре непосредно изнад слободне површине течности у Pa ; l - карактеристична дужина слободне површине у правцу струјања ваздуха (агенса) у m ; $f(Re)$ - функција⁴⁷ која описује карактер струјања.

Ефективна дифузија. Фиков закон дифузије важи само за молекуларну дифузију, међутим, он се може применити формално⁴⁸ и у случају дифузије влаге кроз масу флуида

Материјал	T , К	$D_{ef} \cdot 10^{10}$, m^2/s	E_a , kJ/mol
Јабучни кљук	75-105	11,48-68,05	23,951
Јабука	66	0,64	-
Крушка	665	9,63	-
Банана	30-70	1,3-7,8	39,8
Црни чај	80-120	0,114-0,298	406,02
Броколи	50-75	131,85-182,56	-
Шаргарепа	50-70	13,04-24,18	28,36
Бели лук	45-75	0,34-0,59	16,92
Листови нане	35-60	30,7-194,1	62,96
Пшенично зрно	40-60	1,218-2,861	37,013
Паста	44-71	0,166-0,358	21,757
Кромпир	50-70	5,94-9,69	23,6
Бундева	50-60	3,88-9,38	78,93
Суво грождје	25	41,7	-
Јогурт	40-50	9,5-13	26,07

Табела 1.10: Вредности ефективних коефицијената дифузије и енергија активације појединих прехранбених материјала. Ознаке и појмови у табели: T - температура; D_{ef} - ефективни коефицијент дифузије; E_a - енергија активације.

који се креће, односно у случају када се влага транспортује комбиновано различитим претходно поменутих механизма преношења (1.87),

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = D_{ef} \nabla^2 u \quad (1.87)$$

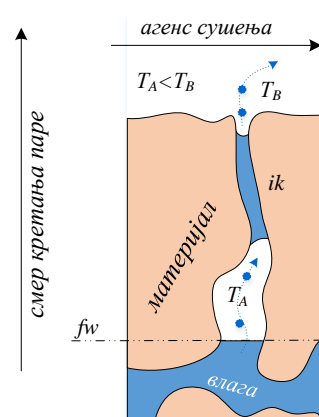
где је: D_{ef} - ефективни коефицијент дифузије у m^2/s ; u - апсолутна влажност материјала у kg_w/kg_{sm} . Ова једначина на неки начин представља модификовани/прилагођени запис Другог Фиковог закона дифузије. Уместо коефицијента молекуларне дифузије који се појављује у Фиковом закону, у једначини (1.87) користи се ефективни коефицијент дифузије којим се обједињују сви начини дифузије који се јављају током процеса сушења.

Ефективни коефицијент дифузије зависи од температуре и влажности материјала, и у општем случају се може описати Аренијусовом једначином према (1.88),

$$D_{ef} = D_0 \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (1.88)$$

где је: D_0 - референтни коефицијент дифузије који зависи од влажности материјала у m^2/s ; E_a - енергија активације која зависи од особина скелета и влажности материјала у kJ/mol ; R - универзална гасна константа у $kJ/(mol \cdot K)$; T - температура у K .

Испаравање и рекондензација влаге јављају се када се пара при кретању кроз скелет материјала кондензује у порам у близини његове површи, непосредно пре напуштања материјала (Слика 1.47). Испаравање/рекондензација се дешавају под претпоставком да је интензитет рекондензације



Слика 1.47: Илустрација процеса испаравања/рекондензације. ik - место појављивања испаравања/рекондензације, fw - фронт испаравања.

једнак интензитету испаравања, односно да нема нагомилавања влаге у порама. Процес испаравања/рекондензације може се описати одговарајућим једначина преношења масе (1.89) и топлоте (1.90),

$$\varepsilon_a f_z D_{ik} \nabla^2 C_p = \varepsilon_a \frac{\partial C_p}{\partial \tau} + (1 - \varepsilon_a) \rho_{sm} \frac{\partial u}{\partial \tau} \quad (1.89)$$

$$\varepsilon_a \rho_{sm} c_{sm} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_{ekv} \nabla^2 T - q_{sorp} \frac{\partial u}{\partial \tau} \quad (1.90)$$

где је: ε_a - запремински удео ваздуха у порама; f_z - фактор закривљености путање дифузије; D_{ik} - унутрашњи коефицијент дифузије која се јавља услед испаравања/рекондензације влаге унутар материјала; C_p - концентрација паре у порама; ρ_{sm} - густина сувог материјала; u - апсолутна влажност материјала; τ - време; c_{sm} - специфична топлота сувог материјала; λ_{ekv} - еквивалентна топлотна проводљивост материјала; T - температура у К; q_{sorp} - специфична топлота сорпционих процеса (десорпције и абсорпције).

Термодифузија (још и *термофореза*, *термомиграција* или *Соретов ефекат*)⁴⁹ је феномен кретања честица супстанце услед силе изазване постојањем градијента температуре, без обзира на агрегатно стање у коме се налазе, све до успостављања равнотежног стања. Кретање течности и гасова услед термодифузије често се може приметити и голим оком. Термодифузионо кретање се сматра позитивним уколико се честице крећу из топлије у хладнију средину, односно у смеру опадања температуре. Према Ликову, интензитет дифузије је влаге у колоидном капиларно-порозном материјалу, услед постојања градијента влажности и градијента температуре, може се одредити према (1.91),

$$j_{td} = -D_m \rho_{sm} (\nabla u - S_o \nabla T) \quad (1.91)$$

где је: j_{td} - интензитет термодифузије влаге у $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$; ρ_{sm} - густина сувог материјала у kg/m^3 ; D_m - коефицијент молекуларне дифузије у m^2/s ; T - температура у К; S_o - Соретов коефицијент.

Соретов коефицијент или *релативни коефицијент термодифузије* је дефинисан количником коефицијената термодифузије и молекуларне дифузије, према (1.92),

$$S_o = \frac{D_{td}}{D_m} \quad (1.92)$$

где је: D_{td} - коефицијент термодифузије у m^2/s . Соретов коефицијент се најчешће одређује експериментално и уз прет-

49: Термодифузија се још другачије назива *Соретов ефекат* или *Лудвиг-Соретов ефекат* и првенствено се односи на кретање флуида. Иако се често сви ови појмови поистовећују, међу њима ипак постоји нека разлика. *Термофореза* тачније представља кретање честица ношених флуидом који се креће услед *термодифузије*. Појава супротна Соретовом ефекту назива се *Дуфоров ефекат*. Термофореза је уређенији начин кретања честица у вишефазним системима, за разлику од, на пример, *Брауновог кретања* које хаотичније природе и које се описује молекулатно-кинетичком теоријом гасова.

Charles Soret (1854-1904) је швајцарски физичар и хемичар, познат по свом раду у области проучавања појава термодифузије.

Carl Friederich Wilhelm Ludwig (1816-1835) је немачки физичар и психолог, који се бавио проучавањем термофорезе у течним мешавинама.

поставку да ће градијент температуре изазвати предвидиву вредност градијента концентрације.

Укључно преношење влаге кроз материјал, у присуству градијента притиска водене паре у влажном материјалу, обухватиће капиларни и дифузиони пренос влаге. У сувљим слојевима материјала преовладава дифузионо кретање паре. Коэффициент отпора укупном преношењу масе кроз порозан материјал може се приказати према (1.93),

$$\mu_w = \frac{\dot{m}_{w0}}{\dot{m}_w} \quad (1.93)$$

где је: μ_w - коэффициент отпора дифузионом кретању влаге кроз порозан материјал; \dot{m}_{w0} - слободни проток дифундоване влаге у kg/s; \dot{m}_w - проток дифундоване влаге кроз порозан материјал у kg/s. Вредност коэффицијента отпора мења се у зависности од садржаја влаге у материјалу (Слика 1.48). У хомогеној структури капиларно-порозних материјала, која се налази на сталној температури, разлика у апсолутној влажности у одвојеним тачкама структуре изазваће пренос влаге у правцу ка нижој вредности апсолутне влажности. У том контексту, укупно преношење влаге кроз материјал може се одредити према (1.94),

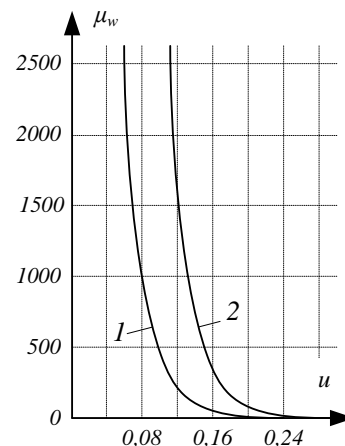
$$j_{uk} = \frac{\dot{m}_w}{A} = -D_{ef} \rho_{sm} \frac{du}{dl} \quad (1.94)$$

где је: j_{uk} - интензитет укупне дифузије влаге у kg/(m²s); \dot{m}_w - масени проток влаге у kg/s; A - површина кроз коју се посматра дифузија влаге у m²; D_{ef} - ефективни коэффициент дифузије у m²/s; ρ_{sm} - густина сувог материјала у kg/m³; du/dl - градијент садржаја влаге у смеру преношења у kg_w/(kg_{sm}·m). Ефективни коэффициент дифузије се у оштем случају одређује збиром коэффицијената дифузија свих начина преношења влаге (Слика 1.46), према (1.95),

$$D_{ef} = D_k + D_m + D_{turb} + D_{td} + D_{ik} \quad (1.95)$$

где је: D_k - коэффициент капиларне дифузије; D_m - коэффициент молекуларне дифузије; D_{turb} - коэффициент турбулентне дифузије; D_{td} - коэффициент термодифузије у m²/s; D_{ik} - унутрашњи коэффициент дифузије која се јавља услед испаравања/рекондензације влаге унутар материјала. Вредност ефективног коэффицијента дифузије (Слика 1.49) мења се у зависности од садржаја влаге у материјалу и од облика везе влаге са апсолутно сувим скелетом материјала.

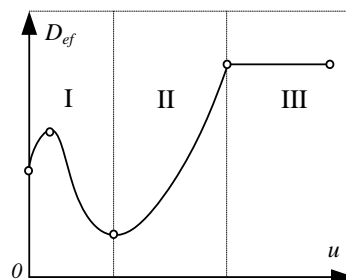
Конвективно (филтрационо) преношење влаге кроз порозан материјал јавља се на температурама изнад (или



Слика 1.48: График промене коэффицијента отпора у функцији апсолутне влажности материјала $\mu_w = f(u)$, за кромпир резан на листове:

1 - температура сушења 60°C;
2 - температура сушења 50°C.

Нагло смањење коэффицијента отпора са порастом садржаја влаге у материјалу указује на интензивирање процеса капиларног преношења влаге.



Слика 1.49: График промене укупног коэффицијента дифузије у функцији апсолутне влажности материјала $D_{ef} = f(u)$.

I - адсорпционо везана влага;

II - капиларна влага;

III - осмотски везана влага.

50: До наглог загревања унутрашњих слојева материјала може доћи при сушењу материјала са унутрашњим загревањем, као што је микроталасно загревање. Пара која би евентуално настала на овај начин се креће/филтрира кроз порозан материјал, напуштајући га услед разлике притиска унутар материјала и притиска околине.

блиским) температури кључања воде услед појаве градијента притиска паре настале најчешће загревањем материјала, односно влаге у њему.⁵⁰ Укупна дифузија паре, која се кроз материјал креће конвективно, може се извести према (1.96),

$$\begin{aligned} j_p &= \frac{\dot{m}_p}{A} = \beta(C_g - C_p) = -\beta \frac{p_{pg} - p_p}{R_p T} \\ &= -\beta_p(p_{pg} - p_p) = -D_p c_p \rho_{sm}(p_{pg} - p_p) \end{aligned} \quad (1.96)$$

где је: j_p - интензитет дифузије паре у $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$; \dot{m}_p - масени проток паре у kg/s ; A - површина пресека материјала у m^2 ; C_g - запреминска концентрација паре уз површ материјала у kg/m^3 ; C_p - запреминска концентрација долазне паре у kg/m^3 ; β - коефицијент преношења масе у m/s ; $\beta_p = \beta/(R_p T)$ - коефицијент конвективног (филтрационог) преношења паре у m/s ; D_p - коефицијент конвективне дифузије у m^2/s . Имајући у виду једначину Далтоновог закона (1.132) и једначину (1.133), могуће је успоставити везу између Луисовог коефицијента ветрења и коефицијента преношења масе, према (1.97),

$$\sigma = \beta \rho_p \frac{p - p_p}{p} \quad (1.97)$$

што значи да при ниским парцијалним притисцима паре одлучујућу улогу има густина паре.

Процеси преношења масе се такође могу моделирати и анализирати методама теорије сличности, односно разматрањем одговарајућих бездимензионих бројева.

Луисов број (Le) се користи за описивање протока течности онда када постоји истовремено преношење топлоте и масе. Њиме се успоставља веза између топлотног граничног слоја и концентрационог граничног слоја. Може се одредити као количник температурне дифузивности и коефицијента молекуларне дифузије, према (1.98),

$$Le = \frac{a}{D_m} = \frac{Sc}{Pr} \quad (1.98)$$

где је: a - температурна дифузивност у m^2/s ; D_m - коефицијента молекуларне дифузије у m^2/s ; Sc - Шмитов⁵¹ број према (1.99); Pr - Прандтлов број према (1.51).

Шмитов број (Sc) се користи за описивање протока флуида у којима се дешавају комбиновани процеси дифузионог и конвективног кретања масе, као количник кинематичке вискозности и коефицијента молекуларне дифузије, према (1.99),

$$Sc = \frac{\nu}{D_m} = \frac{\mu}{\rho D_m} \quad (1.99)$$

51: *Ernst Heinrich Wilhelm Schmidt* (1892-1975) је немачки термодинамичар и универзитетски професор на Техничком универзитету у Брауншвајгу, Немачка. Изумитељ је алуминијумске фолије и уређаја за мерење топлотног протока. Један од изумитеља млазног пропульзионог мотора.

где је: ν - кинематичка вискозност m^2/s ; D_m - коефицијента молекуларне дифузије у m^2/s ; μ - динамичка вискозност $\text{Pa}\cdot\text{s}$; ρ - густина у kg/m^3 . Шмитов број се често назива Прандтловим бројем преношења масе (Pr_m).

Пеклетов број (Pe_m) у контексту преношења масе представља производ Рејнолдсовог броја (1.49) и Шмитовог броја (1.99). Пеклетов⁵² број се дефинише односом брзине конвективног преношења масе на посматраној карактеристичној дужини и коефицијента молекуларне дифузије, изазваних истим градијентом, према (1.100),

$$\text{Pe}_m = \frac{w \cdot l}{D_m} = \text{Re} \cdot \text{Sc} \quad (1.100)$$

где је: w - брзина струјања m/s ; D_m - коефицијента молекуларне дифузије у m^2/s ; l - карактеристична дужина у m . У контексту преношења топлоте, Пеклетов број (Pe) се одређује као $\text{Pe} = \text{Re} \cdot \text{Pr}$. Посматрани флуид често има различите вредности Пеклетових бројева при преношењу топлоте и масе.

Шервудов број (Sh) за преношење масе представља исто што и Нуселтов број за преношење топлоте. Дефинише се односом конвективног преношења масе и молекуларне дифузије, према (1.101),

$$\text{Sh} = \frac{D_{ef} \cdot l}{D_m} \quad (1.101)$$

где је: D_{ef} - укупни коефицијент дифузије влаге у m^2/s ; D_m - коефицијент молекуларне дифузије влаге у m^2/s ; l - карактеристична дужина у m . Минимална вредност Шервудовог броја јавља се при прелажењу влаге са непокретне честице у непокретан агенс сушења. У складу са концептима теорије сличности, Шервудов⁵³ број се према аналогiji са изразима (1.53) и (1.54) може описати експоненцијалном корелацијом према (1.102).

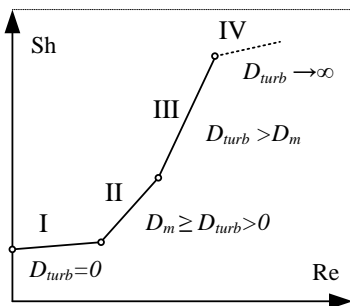
$$\text{Sh} = f(\text{Re}, \text{Sc}) = C \text{Re}^n \text{Sc}^m \quad (1.102)$$

Режим преношења масе у једнофазном току зависи од режима струјања (Слика 1.50). Имајући у виду аналогiju између Pr и Sc бројева према (1.98), а сагласно теорији сличности, за вредности $\text{Le} \approx 1$ када при преношењу влаге доминирају спољашњи отпори сушења, корелациона једначина за одређивање Nu броја (1.50) се може употребити за израчунавање Sh броја ($\text{Nu}=\text{Sh}$). Ово се са довољном тачношћу може применити уколико је Луисов број у опсегу $0,8 < \text{Le} < 3$. Шервудов број се често назива Нуселтовим бројем преношења масе (Nu_m).

52: *Jean Claude Eugène Péclet* (1793-1857) је француски физичар и професор физике.

53: *Thomas Kilgore Sherwood* (1903-1976) је амерички хемијски инжењер, истраживач у области преношења масе, абсорпције и екстракције. Оснивач је Националне инжењерске академије, САД.

54: *Jean-Baptiste Biot* (1774-1862) је француски физичар, астроном и математичар, који се бавио проучавањем магнетостатике (Биот-Савартов закон), метеорита, летења балонам, оптиком и поларизованом светлошћу (ротациона поларизација).



Слика 1.50: Дијаграм промене $Sh = f(Re)$ у једнофазном току. На дијаграму су приказане четири карактеристичне области:

I - режим молекуларне дифузије (ламинарно струјање) $D_{turb} = 0$;

II - средњи режим преноса масе када постоје и молекуларна и турбулентна дифузија (прелазно струјање) $D_m \geq D_{turb} > 0$;

III - режим турбулентне дифузије (турбулентно струјање) $D_{turb} > D_m$;

IV - режим потпуне турбулентне дифузије где се молекуларна дифузија може потпуно занемарити (потпуно развијено турбулентно струјање) $D_{turb} \rightarrow \infty$.

55: *Александр Агољфович Гухман* (1897-1991) је совјетски физичар и универзитетски професор. Био је шеф Катедре за термодинамику и простирање топлоте, Московског Института за хемију и машинство. Бавио се Теоријом сличности и њеном применом у креирању физичких модела техничких процеса.

*Биошов број*⁵⁴ представља однос отпора преношењу топлоте/месе унутар тела и на површини тела. У контексту преношења топлоте, *Биошов број преношења топлоте* (Bi) је дефинисан односом конвективног и кондуктивног преношења топлоте, који показује како ће се градијент температуре унутар тела мењати, током довођења или одвођења неке количине топлоте, у зависности од топлотног градијента примењеног на његову површину (1.103),

$$Bi = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \quad (1.103)$$

где је: α - коефицијент преношења топлоте у $W/(m^2K)$; λ - топлотна проводљивост у $W/(mK)$; l - карактеристична дужина у m . У контексту преношења масе, *Биошов број преношења масе* (Bi_m) је дефинисан односом конвективног преношења масе са површине материјала и дифузионог преношења масе кроз материјал, према (1.104),

$$Bi_m = \frac{\beta \cdot l}{D_{ef}} \quad (1.104)$$

где је: β - коефицијент преношења масе у m/s ; D_{ef} - укупни (ефективни) коефицијент дифузије влаге у m^2/s ; l - карактеристична дужина у m . Промена Bi утиче на промену Bi_m . Пораст вредности ових бројева значи да су процеси размене топлоте и влаге интензивнији, што доводи до значајног пораста температуре материјала. Велике вредности Биотових бројева указују на то да су те интензивности зависне од унутрашњих појава преношења у материјалу.

*Гухманов број*⁵⁵ описује како преношење влаге утиче на размену топлоте између површи влажног материјала и околне средине. *Гухманов број преношења топлоте* (Gu) описује температурну сличност на термичком нивоу процеса, кроз количних температурних разлика унутар и изван материјала, према (1.105),

$$Gu = \frac{T_m - T_g}{T_f - T_g} \quad (1.105)$$

где је: T - температура у K (m - унутар, f - ван, g - при површи материјала). *Гухманов број преношења масе* (Gu_m) представља однос топлотног протока пренетог влагом и конвективног топлотног протока који материјал/тело размењује са околином, према (1.106),

$$Gu_m = \frac{\dot{m}_t (h_p - h_t)}{\alpha (T_f - T_g)} \quad (1.106)$$

где је: \dot{m}_t/A - густина протока пренете влаге у $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$; h_p и h_t - специфичне енталпије паре и течности у J/kg ; α - коефицијент преношења топлоте у $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$.

*Кирџичев број*⁵⁶ описује интензивност преношења топлоте и влаге између површи влажног материјала и гасовитог агенса сушења. *Кирџичев број преношења шпоилоше* (Ki) представља однос топлоте пренете са агенса на површ влажног материјала и топлоте пренете са површи материјала ка унутрашњости тог материјала, према (1.107),

$$Ki = \frac{\frac{\dot{Q}}{A}}{\lambda} \cdot \frac{l}{T_m - T_g} \quad (1.107)$$

где је: \dot{Q}/A - густина размењеног топлотног протока у W/m^2 ; l - карактеристична дужина у m ; λ - коефицијент провођења топлоте у $\text{W}/(\text{mK})$; t - температура у K (m - унутар, g - при површи материјала). *Кирџичев број преношења масе* (Ki_m) представља однос густине протока влаге и протока влаге изотермски пренете из унутрашњости тела ка површи материјала, према (1.108),

$$Ki_m = \frac{\frac{\dot{m}_t}{A}}{D_{ef} \rho_{sm}} \cdot \frac{l}{u_m - u_g} \quad (1.108)$$

где је: \dot{m}_t/A - густина протока пренете влаге у $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$; D_{ef} - укупни (ефективни) коефицијент дифузије влаге у m^2/s ; ρ_{sm} - густина сувог материјала у kg/m^3 ; l - карактеристична дужина у m ; u - влажност материјала у $\text{kg}_w/\text{kg}_{sm}$ (m - унутар, g - при површи материјала).

Косовичев број (Ko) дефинисан је односом топлоте утрошене за испаравање течности из материјала и топлоте доведене за загревање материјала, према (1.109),

$$Ko = \frac{r_o(u_0 - u_1)}{c_{sm}(t_{m1} - t_{m0})} = \frac{r_o}{c_{sm}} \frac{\Delta u}{\Delta t_m} \quad (1.109)$$

где је: r_o - топлота испаравања воде на 0°C у J/kg_w ; u - влажност материјала у $\text{kg}_w/\text{kg}_{sm}$; t_m - температура материјала у K (0 - почетна, 1 - крајња).

*Стивенсонов број*⁵⁷ представља однос доведеног конвективног протока топлоте/масе до границе фазе према оном макроскопском току који може бити конвективно пренет (одведен или доведен до границе фазе) околном флуиду при промени температуре/концентрације. У контексту преношења топлоте, *Стивенсонов број преношења шпоилоше* (St) се одређује

56: *Михаил Викторович Кирџичев* (1879-1955) је руски физичар и универзитетски професор. Заједно са А.А.Гухманом је познат по свом раду у области практичне примене Теорије сличности. Био је члан Совјетске Академије наука.

Између процеса преношења топлоте и паре (масе) може се приметити дубока аналогија која проистиче из истих закона преношења, а очигледна је код једначина за:

конвективно преношење:

- шпоилоше

$$\dot{q} = \alpha \Delta t$$

- масе

$$j_p = -\beta_p \Delta p_p$$

провођење:

- шпоилоше

$$\dot{q} = \lambda \frac{dt}{dl}$$

- масе

$$j_{fw} = -\frac{D_{fw}}{R_p T} \frac{p}{p - p_p} \frac{dp_p}{dl}$$

57: *Thomas Stanton* (1865-1931) је британски инжењер, сарадник чувеног Рејнолдса. Познат је по свом раду у области механике флуида и унутрашњег трења у флуидима (проучавање сила вискозности), као и конвективном преношењу топлоте и топлотној дифузивности.

Аналогија између процеса преношења топлоте и преношења масе кроз сличност одговарајућих бездимензионих величина:

Нуселтов број

$$\text{Nu} = l\alpha/\lambda$$

Шервудов број

$$\text{Sh} = lD_{ef}/D_m = \text{Nu}_m$$

Прандтлов број

$$\text{Pr} = \nu/a$$

Шмишов број

$$\text{Sc} = \nu/D_m = \text{Pr}_m$$

Биошов број

преношења топлоте и масе

$$\text{Bi} = l\alpha/\lambda$$

$$\text{Bi}_m = l\beta/D_{ef}$$

Пеклешов број

преношења топлоте и масе

$$\text{Pe} = wl/a$$

$$\text{Pe}_m = wl/D_m$$

Гухманов број

преношења топлоте и масе

$$\text{Gu} = (T_m - T_g)/(T_f - T_g)$$

$$\text{Gu}_m = \frac{\dot{m}_t}{A\alpha} \left[(h_p - h_t)/(T_f - T_g) \right]$$

Киричев број

преношења топлоте и масе

$$\text{Ki} = \frac{\dot{Q}}{A\lambda} \left[l/(T_m - T_g) \right]$$

$$\text{Ki}_m = \frac{\dot{m}_t}{AD_{ef}\rho_{sm}} \left[l/(u_m - u_g) \right]$$

Стивенсонов број

преношења топлоте и масе

$$\text{St} = \text{Nu}/(\text{Re} \cdot \text{Pr})$$

$$\text{St}_m = \text{Sh}/(\text{Re} \cdot \text{Sc})$$

према (1.110),

$$\text{St} = \frac{\text{Nu}}{\text{RePr}} \quad (1.110)$$

$$\text{St}_m = \frac{\text{Sh}}{\text{ReSc}} \quad (1.111)$$

односно Стивенсонов број преношења масе (St_m) према (1.111), у контексту преношења масе.

Гранични услови код решавања једначина преношења масе слични су условима преношења топлоте, сходно аналогiji која постоји између релација које описују преношење топлоте и масе. Међутим, гранични услови код преношења масе имају своје специфичности, превасходно у зависности од посматраног агрегатног стања, односно фазног прелаза (течност-гас или чврсто-гас или чврсто течност). У зависности од посматраног фазног прелаза концентрација супстанци може бити различита док истовремено температуре могу бити једнаке. Најчешћи гранични услови који се примењују приликом решавања једначина преношења масе у процесима сушења прехрамбених материјала наведени су у наставку.

- ▶ Дефинисана концентрација супстанце на површи материјала је слична као дефинисана температура површи материјала. Овај гранични услов је могуће остварити у контролисаној средини где се концентрација одређене супстанце не мења током времена.
- ▶ Дефинисан масени проток на граничној површи је гранични услов који је функција простора и/или времена и константан је током процеса сушења. Може се остварити коришћењем граничног извора масе. Постоје два карактеристична гранична случаја у вези са масеним протоком на граници система. У првом случају нема масеног протока кроз површину $\partial C/\partial x = 0$, онда је можемо сматрати непропустном. У другом случају се масени проток на граници такође одржава као $\partial C/\partial x = 0$, при чему је граница истовремено линија симетрије узорка материјала.
- ▶ Дефинисана конвекција на граничној површи је гранични услов који се примењује када постоји кретање флуида уз границу система. Слично као и код преношења топлоте конвекцијом, комад материјала који се суши бива опструјаван са свих страна.

1.6 Влажан ваздух

Процес сушења зависи од односа између воде присутне у храни и воде присутне у агенсу сушења који је најчешће ваздух. Садржаји влаге су директно повезани са хемијским потенцијалима, а тиме и покретачком силом процеса сушења. Мешавина паре и гасова је таква мешавина код које се једна компонента појављује у парном, парном и течном, или парном, течном и чврстом стању истовремено, а остале компоненте само у гасовитом стању. *Влажан ваздух* је типичан представник мешавина паре и гасова. Влажним ваздухом називамо мешавину сувог ваздуха⁵⁸ и воде (влаге). Стање влажног ваздуха је потпуно одређено са три независне интензивне величине стања. Најчешће су то температура, притисак и нека од величина којом се дефинише састав мешавине. Приликом разматрања влажног ваздуха као радне материје чине се следеће претпоставке:

1. И сув ваздух и водена пара се третирају као идеални гасови, тј. за обе компоненте важе једначине стања идеалних гасова. Пошто је однос кисеоника према азоту практично непромењен, ваздух (иако је стварно двокомпонентна мешавина) се третира као једна компонента са датом гасном константом $R_{sv} = 287,1 \text{ J/(kgK)}$ и привидном релативном моларном масом.
2. Међусобни утицаји на понашање водене паре и сувог ваздуха се занемарују.
3. Специфични топлотни капацитети сувог ваздуха и влаге у сва три агрегатна стања сматрају се константним у датом опсегу температура и парцијалних притисака.

Апсолутна влажност ваздуха је величина којом се изражава састав влажног ваздуха, а представља се односом масе влаге и масе сувог ваздуха (1.112).

$$x = \frac{m_w}{m_{sv}} \quad (1.112)$$

где је: x - апсолутна влажност ваздуха у $\text{kg}_w/\text{kg}_{sv}$ (ознаке у индексу: w - влага, sv - сув ваздух)⁵⁹; m_{sv} - маса сувог ваздуха у kg ; m_w - маса влаге у kg . Састав влажног ваздуха се може изразити и односом броја молекула влаге и молекула сувог ваздуха, односно молским уделом (1.113).

$$\chi = \frac{n_w}{n_{sv}} = \frac{\frac{m_w}{M_w}}{\frac{m_{sv}}{M_{sv}}} = \frac{M_{sv}}{M_w} x = 1,61x \quad (1.113)$$

где је: χ - молски удео у $\text{kmol}_w/\text{kmol}_{sv}$; n_w - број молекула влаге у kmol ; n_{sv} - број молекула сувог ваздуха у kmol ; m_w -

58: *Сув ваздух* је ваздух у коме нема влаге и који и сам представља мешавину гасова. У атмосферском ваздуху су присутни следећи удели главних компонента сувог ваздуха:

- ▶ N_2 - Азот 78,084%,
 - ▶ O_2 - Кисеоник 20,946%,
- и гасовитих примеса испод 1%:
- ▶ Ar - Аргон 0,934%,
 - ▶ CO_2 - Угљен-диоксид 0,04%,
 - ▶ Ne - Неон 0,001818%,
 - ▶ He - Хелијум 0,000524%,
 - ▶ CH_4 - Метан 0,00017%,
 - ▶ Kr - Криптон 0,000114%,
 - ▶ H_2 - Водоник 0,000055%,
 - ▶ N_2O - Азот субоксид 0,00005%,
 - ▶ Xe - Ксенон 0,000009%,
 - ▶ NO_2 - Азот-диоксид 0,000002%.

За уобичајене техничке прорачуне појединих процеса може се сматрати да се састав сувог ваздуха не мења. Може се сматрати некондензујућом компонентом влажног ваздуха.

59: Вредности апсолутне влажности ваздуха се могу кретати у опсегу $0 \leq x \leq \infty$, при чему се може сматрати да је вредност апсолутне влажности сувог ваздуха $x = 0$, а у случају чисте влаге $x = \infty$.

маса влаге у kg; m_{sv} - маса сувог ваздуха у kg; $M_w = 18,016$ kg/kmol - релативна моларна маса влаге; $M_{sv} = 28,964$ kg/kmol - релативна моларна маса сувог ваздуха; x - апсолутна влажност ваздуха у kg_w/kg_{sv}.

Из разлога што је количина влаге у ваздуху променљива, за јединицу количине усваја се количина влажног ваздуха која у себи садржи 1 kg_{sv}. Када се влага појављује и у течном и/или чврстом стању, запремину ових фаза занемарујемо у односу на запремину коју заузима мешавина, при чему је грешка < 0,1%, чак и при високим притисцима мешавине > 10 bar. У општем случају, вода у влажном ваздуху може да се нађе у парном, течном или чврстом агрегатном стању (1.114).

$$m_{vv} = m_{sv} + m_w = m_{sv} + (m_p + m_t + m_c) \quad (1.114)$$

где су у kg представљене: m_{vv} - маса влажног ваздуха; m_{sv} - маса сувог ваздуха; m_w - маса влаге; m_p - маса влаге у парном стању; m_t - маса влаге у течном стању; m_c - маса влаге у чврстом стању.

Табела 1.11: Парциални притисак засићења влажног ваздуха на различитим температурама

$t, ^\circ\text{C}$	p'_p, kPa
-40	0,01
-30	0,03
-20	0,10
-10	0,26
0	0,61
10	1,23
20	2,34
30	4,24
40	7,37
50	12,33
60	19,92
70	31,17
80	47,37
90	70,11
100	101,32

Укупни *притисак влажног ваздуха* једнак је збиру парцијалних притисака сувог ваздуха и водене паре (1.115).

$$p = p_{sv} + p_p \quad (1.115)$$

где је: p - укупни притисак у Pa; p_{sv} - парцијални притисак сувог ваздуха у Pa; p_p - парцијални притисак водене паре у Pa. Ваздух се сматра засићеним када парцијални притисак водене паре достигне максималну вредност за дату температуру. Ту вредност називамо парцијални притисак засићења (Табела 1.11). За потребе моделирања процеса са влажним ваздухом парцијални притисак засићеног ваздуха може се израчунати и помоћу неких од математичких модела [16], и то у опсегу температура -100°C до 0°C према једначини (1.116),

$$\begin{aligned} \ln(p'_p) = & (-5674,53359/T) + 6,3925 - 0,9678 \cdot 10^{-2}T \\ & + 0,6222 \cdot 10^{-6}T^2 + 0,2075 \cdot 10^{-8}T^3 \\ & + 0,9484 \cdot 10^{-12}T^4 + 4,1635\ln(T) \end{aligned} \quad (1.116)$$

односно у опсегу 0°C до 200°C према једначини (1.117),

$$\begin{aligned} \ln(p'_p) = & (-5800,2206/T) + 1,3915 - 0,0486T \\ & + 0,4176 \cdot 10^{-4}T^2 - 0,1445 \cdot 10^{-7}T^3 \\ & + 6,546\ln(T) \end{aligned} \quad (1.117)$$

где је: p'_p - парцијални притисак засићеног ваздуха на датој температури у Pa; T - температура влажног ваздуха у K.

У том смислу, разлику се два карактеристична стања влажног ваздуха:

1. *Незасићен* влажан ваздух је мешавина сувог ваздуха и влаге у парном (гасовитом) стању. Овакво стање је слично мешавини идеалних гасова и постиже се када су вредности парцијалног притиска водене паре мање од вредности парцијалног притиска засићења на датој температури.
2. *Засићен* влажан ваздух је мешавина сувог ваздуха и две (или три) фазе влаге. Као пример може се узети замагљен или ледено-замагљен ваздух.

Релативна влажност ваздуха представља количник стварног и максимално могућег парцијалног притиска водене паре за дату температуру (1.118).

$$\varphi = \frac{p_p}{p'_p} \quad (1.118)$$

где је: φ - релативна влажност ваздуха⁶⁰; p_p - парцијални притисак водене паре у Ра; p'_p - парцијални притисак засићеног влажног ваздуха на датој температури у Ра. Код незасићеног влажног ваздуха, између парцијалног притиска влажног ваздуха и апсолутне влажности ваздуха постоји однос (1.119).

$$x_p = \frac{M_w}{M_{sv}} \frac{p_p}{p_{sv}} = \frac{M_w}{M_{sv}} \frac{p_p}{p - p_p} = 0,622 \frac{p_p}{p - p_p} \quad (1.119)$$

Максимална могућа апсолутна влажност ваздуха у парном стању x'_p одређена је једначином (1.119) за случај када је $p_p = p'_p$. Веза између релативне и апсолутне влажности ваздуха одређена је једначинама (1.120) и (1.121).

$$x_p = 0,622 \frac{\varphi p'_p}{p - \varphi p'_p} \quad (1.120)$$

$$\varphi = \frac{x_p \cdot p}{(0,622 + x_p)p'_p} \quad (1.121)$$

Степен засићења влажног ваздуха је однос стварне и максималне могуће апсолутне влажности ваздуха у парном стању (1.122).

$$\psi = \frac{x_p}{x'_p} = \varphi \frac{p - p'_p}{p - p_p} \quad (1.122)$$

где је: ψ - степен засићења влажног ваздуха; x_p - апсолутна влажност ваздуха у $\text{kg}_w/\text{kg}_{sv}$; x'_p - апсолутна влажност засићеног ваздуха у $\text{kg}_w/\text{kg}_{sv}$. За $p'_p \ll p$ биће $\varphi \approx \psi$.

60: Могуће вредности релативне влажности ваздуха по дефиницији су $\varphi = 0 \div 1$ (0 - сув ваздух, до 1 - засићен ваздух) или ако се изражава у процентима $\varphi = 0 \div 100\%$. За сваки презасићен влажан ваздух (присуство магле и/или леда) било које апсолутне влажности, било би $\varphi = 1$, и тада φ губи смисао и не може се користити као независна величина стања.

Енталпија влажног ваздуха се може израчунати као збир енталпије сувог ваздуха и енталпије влаге, при чему треба водити рачуна о фазном стању влаге. У општем случају, када је влага у ваздуху у сва три агрегатна стања, енталпија се може одредити према (1.123),

$$h = h_{sv} + x'_p h_p + x_t h_t + x_c h_c$$

$$= c_{p_{sv}} \cdot t + x'_p (r_o + c_{p_p} t) + x_t c_{p_t} t + x_c (r_c + c_{p_c} t) \quad (1.123)$$

61: Уобичајене вредности у техничким прорачунима за одређивање енталпије према приказаној једначини, за мешавину ваздух-влага, су:

- ▶ $c_{p_{sv}} = 1005 \text{ J/(kgK)}$
- ▶ $c_{p_p} = 1860 \text{ J/(kgK)}$
- ▶ $c_{p_t} = 4189 \text{ J/(kgK)}$
- ▶ $c_{p_c} = 2050 \text{ J/(kgK)}$
- ▶ $r_o = 2500000 \text{ J/(kgK)}$
- ▶ $r_c = -333000 \text{ J/(kgK)}$

Поступак одређивања непознатих величина стања незасићеног влажног ваздуха на основу познатих вредности температуре и релативне влажности

$$t = 30^\circ\text{C}$$

$$\varphi = 0,5$$

$$(Табела 1.11) \Rightarrow p'_p(t) = 4,24 \text{ kPa}$$

$$(1.118) \Rightarrow p_p = \varphi p'_p = 2,12 \text{ kPa}$$

$$(1.119) \Rightarrow x_p = 0,0133 \text{ kg}_w/\text{kg}_{sv}$$

$$(1.124) \Rightarrow h_p = 64,14 \text{ kJ/kg}_{sv}$$

$$(1.125) \Rightarrow \rho = 1,156 \text{ kg/m}^3$$

62: *Richard Mollier* (1863-1935) је немачки професор примењене физике и механике на универзитетима у Готингену и Дрездену, пионер у областима термодинаике и реалних радних материја (вода, водена пара и влажан ваздух).

где је: h - енталпија влажног ваздуха⁶¹ у J/kg_{sv} ; t - температура влажног ваздуха у $^\circ\text{C}$; r_o - латентна топлота испаравања воде на 0°C ; r_c - латентна топлота топљења леда на 0°C ; x_t - маса влаге у течном стању (вода) сведена на један килограм сувог ваздуха у $\text{kg}_t/\text{kg}_{sv}$; x_c - маса влаге у чврстом стању (лед) сведена на један килограм сувог ваздуха у $\text{kg}_c/\text{kg}_{sv}$. За $x_p < x'_p$ биће $x_t = 0$ и $x_c = 0$, чиме се долази до једначине за одређивање енталпије незасићеног влажног ваздуха (1.124).

$$h = c_{p_{sv}} \cdot t + x_p (r_o + c_{p_p} t) \quad (1.124)$$

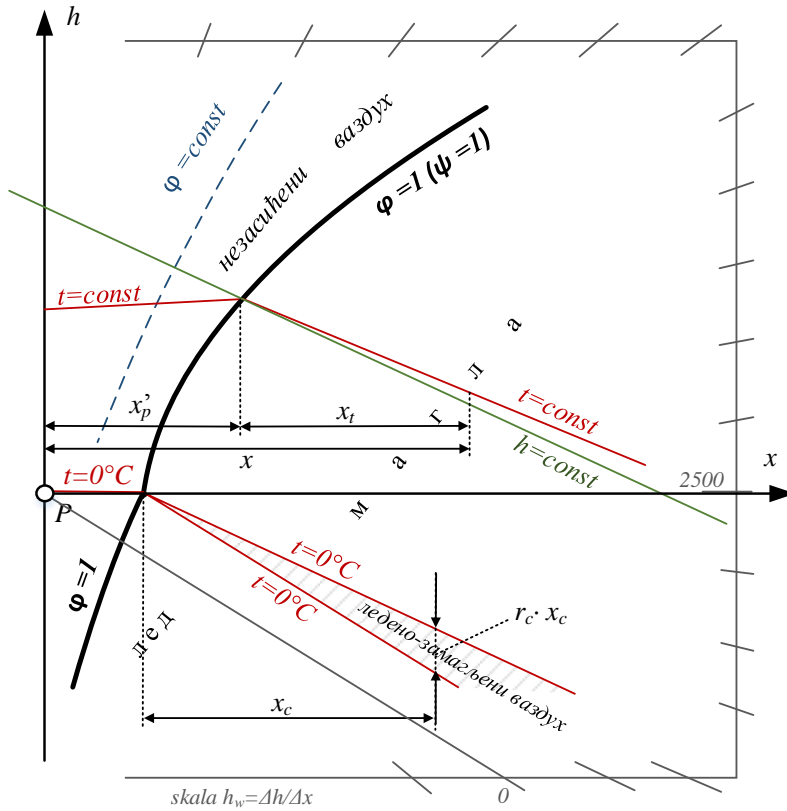
Густина влажног ваздуха у општем случају, узимајући у обзир масу и занемарујући запремину капљица росе, односно кристала леда, може се израчунати из (1.125),

$$\rho = \frac{M_w p}{RT} \cdot \frac{1 + x}{x_p + \frac{M_w}{M_{sv}}} \quad (1.125)$$

где је: ρ - густина влажног ваздуха у kg/m^3 ; T - температура у K ; $R = 8,314 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$ - универзална гасна константа. Густина незасићеног влажног ваздуха може се одредити из исте једначине када је $x = x_p$.

*Молијеров дијаграм*⁶² за влажан ваздух графички обједињује и приказује величине стања влажног ваздуха и њихове промене (Слика 1.51). Овакав графички приказ је могуће извести уколико се усвоји да је вредност укупног притиска влажног ваздуха параметар који се не мења. Стога, обично се усваја да је вредност укупног притиска једнака атмосферском $p = 1 \text{ bar}$. У процесима сушења ово не представља ограничавајући фактор пошто је огромна већина процеса изобарска. Основни процеси са влажним ваздухом који су од значаја за разматрање у вези са процесима сушења су:

- ▶ загревање и хлађење влажног ваздуха,
- ▶ мешање две струје влажног ваздуха,
- ▶ убризгавање воде или влаге (водене паре) у влажан ваздух.



Слика 1.51: Молијеров $h - x$ дијаграм за влажан ваздух. Дијаграм је нацртан према једначини (1.124) у косоуглом координатном систему због прегледности области незасићеног влажног ваздуха, тако да x -оса има коефицијент правца -2500 kJ/kg . Из тог разлога изенталпе $h = \text{const}$ нису хоризонталне линије, већ имају исти нагиб. Вредности $x'_p(t)$ дефинишу криву засићења $\varphi = 1$, која раздваја подручје незасићеног од подручја замагљеног ваздуха које је површином нулте изотерме (ледено-замагљени ваздух) подељено на подручје магле и подручје леда. Линије $\varphi = \text{const}$ могу се учртати тако да у подручју незасићеног влажног ваздуха опонашају криву $\varphi = 1$, а удаљавањем од ње вредност им се смањује. На рубу дијаграма учртани су пол P и скала енталпије влаге h_w .

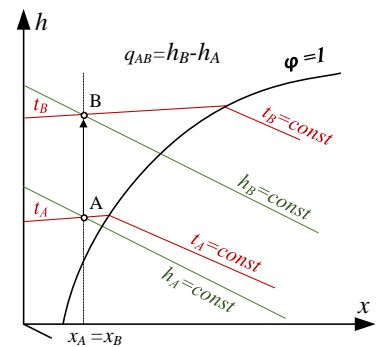
Незасићени влажан ваздух стања A може се загревати или хладити по $x = \text{const}$. У случају загревања се процес може приказати у $h - x$ дијаграму променом $A \rightarrow B$ (Слика 1.52), а снага потребна за загревање се може одредити према (1.126),

$$P_{z_{AB}} = \dot{m}_{sv} q_{AB} = \dot{m}_{sv} (h_B - h_A) \quad (1.126)$$

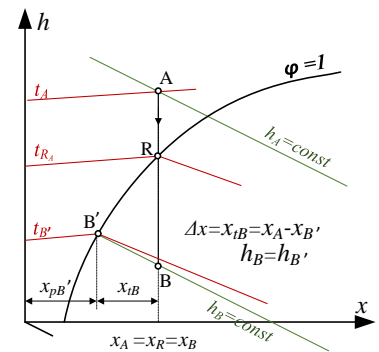
где је: $P_{z_{AB}}$ - снага потребна за загревање у W ; q_{AB} - специфична количина размењене топлоте у J .

Влажан ваздух стања A (Слика 1.53) може се хладити по $x = \text{const}$ све до температуре тачке росе t_{R_A} , када почиње издвајање влаге у течном стању (за $t_{R_A} < 0^\circ\text{C}$ у чврстом стању). Уласком из незасићеног у пресићено подручје, влажан ваздух се "раздваја" на засићени ваздух и вишак влаге. У стању B , на температури t_B по једном килограму сувог ваздуха, биће x'_{p_B} килограма водене паре и x_{t_B} килограма воде у течном стању који се може одстранити из мешавине. Овим се постиже сушење влажног ваздуха, при чему ће се стање влажног ваздуха на крају укањања $\Delta x = x_{t_B} = x_A - x_{B'}$ килограма влаге наћи у тачки B' . Снага потребна за хлађење се може одредити према (1.127),

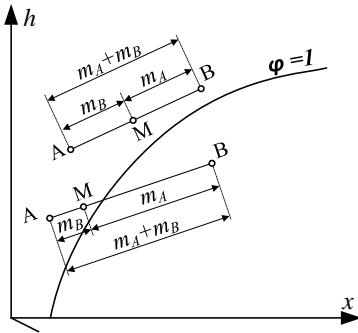
$$P_{hl_{AB}} = \dot{m}_{sv} |q_{AB}| = \dot{m}_{sv} |h_B - h_A| \quad (1.127)$$



Слика 1.52: Загревање влажног ваздуха при $x = \text{const}$.

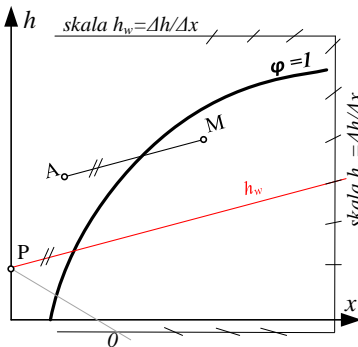


Слика 1.53: Хлађење влажног ваздуха при $x = \text{const}$.



Слика 1.54: Адијабатско изобарско мешање две струје влажног ваздуха.

Стање М се налази на правој линији којом су спојена стања А и В, при чему важе односи дужина и маса $AM : MB = m_B : m_A$.



Слика 1.55: Додавање влаге.

Стање М се налази на правој повученој кроз стање А са коефицијентом нагиба правца промене стања једнаком енталпији убачене влаге $dh/dx = h_w$, који се одређује помоћу пола дијаграма P и скале h_w на рубу Молијеровог $h-x$ дијаграма.

63: Индекс "g" указује да се ради о граничној вредности величине уз саму површину воде.

64: *Jonh Dalton* (1766-1844) је енглески хемичар, физичар и метеоролог. Познат је по увођењу атомске теорије у хемију и својим истраживањима у вези са нераспознавањем боја код човека (Далтонизам). Такође проучавао је понашање реалних радних материја, водене паре и влажног ваздуха.

65: Код коефицијента преношења масе, индекс "p" указује да је коефицијент примерен разлици парцијалних притисака. Коефицијент зависи од термодинамских карактеристика гаса и паре и од режима струјања у близини површине.

где је: $P_{hl_{AB}}$ - снага потребна за хлађење у W ; q_{AB} - специфична количина размењене топлоте у J (апсолутна вредност постоји како би се снага добила као позитивна величина). За случај када је $x_A = const$ и $t_B > t_{RA}$ специфична количина размењене топлоте се може одредити према (1.128),

$$q_{AB} = c_{p_A}(t_B - t_A) = (c_{p_{sv}} + c_{p_i}x_A)(t_B - t_A) \quad (1.128)$$

При адијабатском изобарском мешању струја А и В влажног ваздуха (Слика 1.54) добија се, на основу биланса масе влаге и енталпије, мешавина стања М за коју важе (1.129) и (1.130),

$$x_M = \frac{m_A x_A + m_B x_B}{m_A + m_B} \quad (1.129)$$

$$h_M = \frac{m_A h_A + m_B h_B}{m_A + m_B} \quad (1.130)$$

Када се влажном ваздуху стања А (h_A, x_A) додаје m_w килограма влаге специфичне енталпије h_w (Слика 1.55), добиће се влажан ваздух стања М (h_m, x_m), па се из биланса влаге и енталпија добија релација (1.131),

$$\frac{\Delta h}{\Delta x} = \frac{h_m - h_A}{x_m - x_A} = h_w \quad (1.131)$$

Вејтрењем (исхлајљавањем) називамо процес испаравања воде са слободне површине воде у влажан ваздух. У контексту сушења, слободна површина воде је тзв. фронт испаравања воде. За разлику од процеса кључања, при ветрењу се слободна површина воде налази под притиском $p = p'_p(t_{wg}) + p_{sv}$, који за висину парцијалног притиска сувог ваздуха p_{sv} виши од парцијалног притиска засићења паре p'_p на температури слободне површине воде t_{wg} .⁶³ *Рошење* је процес супротан од ветрења, током кога се вишак влаге из влажног ваздуха кондензује. Према *Далтоновом*⁶⁴ *закону вејтрења*, количина воде која у јединици времена изветри са елементарне површине слободне површи воде, сразмерна је разлици парцијалних притисака водене паре на површини воде и парцијалног притиска водене паре у околном влажном ваздуху (1.132),

$$-\frac{\dot{m}_w}{A_w} = \beta_p \cdot [p'_p(t_{wg}) - p_p] \quad (1.132)$$

где је: β_p - коефицијент преношења паре⁶⁵ у $kg_w/(Pa \cdot m^2)$; A_w - површина слободне површи воде у m^2 . Смањивање количине воде услед њеног ветрења се узима у обзир знаком "-" (минус) у једначини (1.132), односно услед рошења из ваздуха количина воде ће расти. Ако су апсолутне влажности

уз саму површину x_g и подаље од ње x_p мале, интензитет ветрења се по Луису може одредити као линеарна зависност од разлике апсолутних влажности (1.133),

$$-\frac{\dot{m}_w}{A_w} = \sigma(x_g - x_p) \quad (1.133)$$

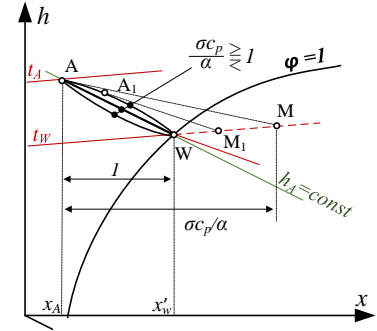
где је: σ - Луисов коефицијент ветрења у $\text{kg}_{sv}/(\text{m}^2\text{s})$. Луисов коефицијент ветрења представља количину сувог ваздуха која би, у јединици времена, када би се пренос топлоте и масе одвијао искључиво турбулентним мешањем, морала доћи у контакт са јединицом површине воде да би уз пораст апсолутне влажности од x_p до $x'_p(t_w)$ преузела дату количину воде.

Када влажни ваздух стања А струји преко мокре површине, температуре t_w размењиваће са њом топлоту и влагу. Правац промене стања (тангента у стању А) (Слика 1.56) одређен је према (1.134),

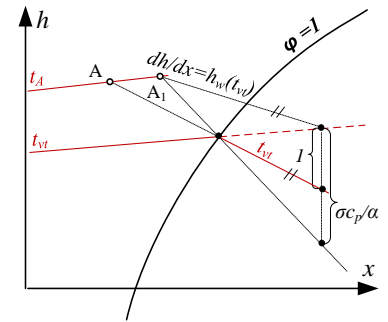
$$\left(\frac{dh}{dx}\right)_A = \frac{c_p(t_w - t_A)}{\frac{\sigma c_p}{\alpha} [x'_p(t_w) - x_A]} + h'_p(t_w) \quad (1.134)$$

где је: $x'_p(t_w)$ - апсолутна влажност засићене водене паре на t_w ; $h'_p(t_w)$ - енталпија засићене водене паре на t_w ; c_p - специфична топлота незасићеног влажног ваздуха стања А. Количник $\frac{\sigma c_p}{\alpha}$ назива се Луисов фактор. Коефицијент ветрења σ и прелаза топлоте α могу се одредити на основу одговарајућих критеријалних једначина познатих из науке о преносу топлоте и масе. Правац промене за дату стање може се одредити и графички (Слика 1.56).

Када велике количине незасићеног влажног ваздуха стања А (h_A, x_A) дуже времена наструјавају малу количину воде, њена температура ће постепено тежити ка некој одређеној вредности коју називамо *границом хлађења* или *температуром влажног термометра* (t_{vt}). Ова количина воде може размењивати топлоту само са наструјавајућим ваздухом и адијабатски је изолована за сваку другу размену топлоте са околином. Вредност t_{vt} зависи само од стања А и режима струјања ваздуха преко површине воде. Границу хлађења можемо одредити из услова адијабатичности процеса, јер са тада топлота потребна за испаравање воде може обезбедити једино на рачун хлађења ваздуха и/или воде. Када ваздух буде могао да одаје површини воде тачно онолико топлоте колико је потребно за испаравање количине влаге која му се придодaje, неће бити више разлога за промену температуре воде и она ће се усталити на t_{vt} . У том случају се енталпија ваздуха повећава само за енталпију h_w придодате воде, па је



Слика 1.56: Утицај Луисовог фактора на правац промене. Положај "вучне тачке" М, која са тачком А одређује правац промене, зависи од вредности Луисовог фактора, температуре t_w површине воде и стања ваздуха. На слици су приказане промене стања за $\frac{\sigma c_p}{\alpha} \geq 1$, за случај када је температура површине воде константна. За процесе са влажним ваздухом је $\frac{\sigma c_p}{\alpha} \approx 1$ и тада се са довољном тачношћу стварна промена стања може апроксимирати правом \overline{AW} (тачке M_i падају у тачку W).



Слика 1.57: Одређивање стања влажног ваздуха помоћу психрометра за $\frac{\sigma c_p}{\alpha} \neq 1$.

Претпоставка да је $\frac{\sigma c_p}{\alpha} = 1$ оправдана је када размена топлоте и материје настаје скоро искључиво турбулентним мешањем. У том случају се са довољном тачношћу може изотерма t_{vt} из подручја магле продужити до пресека са изотермом t_A у незасићеном подручју чиме се добија тачка А. Како се Луисов фактор приближава вредности 1, тако тачка A_1 пада у тачку А.

правац промене стања одређен са $dh/dx = h_w(t_{vt})$. Мерење стварне температуре влажног ваздуха (*штемпературира по сувом штермометру*) помоћу *хсихрометра* се може извршити графички помоћу одговарајуће конструкције (Слика 1.57).

1.7 Агенси за сушење

Под појмом агенса сушења подразумевамо медијум који ће прихватити влагу која напушта влажни материјал. У највећем броју случајева агенс сушења је гасовита супстанца. Осим влажног ваздуха, о којем се детаљније говорило у претходном поглављу, као агенси за сушење могу се користити: инертни гасови, димни гасови (продукти сагоревања), сувозасићена и прегрејана водена пара. Као средства за сушење или очување осушеног производа могу се користити и разне хигроскопне супстанце.

Влажан ваздух. *Влажан ваздух* је мешавина сувог ваздуха и водене паре. У току процеса сушења на материјал се доводи ваздух који је претходно припремљен за сушење како би потенцијал да у себе упије влагу био што већи. Ваздух мора бити што сувљи (ниска апсолутна и релативна влажност) и загрејан до температуре која ће одговарати технолошким захтевима за добијање жељеног квалитета финалног производа. Такође, ваздух мора струјати преко материјала одговарајућом брзином која ће обезбедити ефикасно уклањање влаге са површи материјала. У случају сушења влажним ваздухом на вишим температурама (нпр. $>60^{\circ}\text{C}$), са загревањем ваздуха уједно опада и релативна влажност ваздуха, те је процес припреме ваздуха једноставнији јер ове две величине истовремено обе "иду на руку" повећању потенцијала сушења. Са друге стране, на нижим температурама сушења (нпр. $<60^{\circ}\text{C}$), потенцијал сушења се смањује и неопходно је у систем припреме ваздуха укључити и компоненте које ће из ваздуха издвајати влагу.

Инертни гасови. Под *инертним гасом* подразумевамо сваки гас (или смешу гасова) који под одређеним условима не ступа ни у какву хемијску реакцију (најчешће оксидације⁶⁶ или хидролизе⁶⁷) са материјалом са којим је у додиру. У инертне гасове убрајамо све племените гасове али и неке друге гасове и једињења. Инертни гасови се добијају прерадом атмосферског ваздуха. Азот (N), Хелијум (He) и угљен-диоксид (CO₂) се најчешће примењују у техници сушења. Инертне гасове је могуће користити у различитим техникама сушења (класич-

66: *Оксидо - редуционе* (eng. *reduction - oxidation*) хемијске реакције или скраћено *редокс* (eng. *redox*) реакције су оне при којима се врши промена оксидационог броја (повећава/смањује), а тиме и стање учесника реакције.

67: *Хидролиза* је реакција која се заснива на распаду молекула хемијских једињења под утицајем контакта са водом или воденом паром.

не конвективне, спреј, и слично). Процент кисеоника у сушарама са инертним гасом најчешће се одржава <5%. Простор око сушаре се често налази на повишеном притиску како би се спречило цурење инертног гаса у околину. Инертан гас најчешће рециркулише у затвореном систему сушења и не сме реаговати са влажним материјалом, органским растварачима и експлозивним материјама.⁶⁸ Приликом сушења био-сензитивних прехранбених материјала, где присуство кисеоника током процеса сушења утиче негативно на квалитет производа, препоручује се коришћење одговарајућих инертних гасова и у току процеса сушења, а и касније при чувању и складиштењу (нпр. риблије месо са високим садржајем риблих масти и уља).

Димни гасови. *Димни гасови* се у техници сушења могу применити код оних влажних материјала код којих присуство сагорелих честица горива, чађи и пепела никако неће негативно утицати на изглед и квалитет осушеног производа. Димни гасови се добијају сагоревањем биљних материјала, органског отпада, фосилних горива или природног гаса.⁶⁹ Дим се може произвести у отвореном ложишту или у генератору дима (фрикциони генератор, флуидизатор и сл.). Без обзира на врсту горива, важно је да поступак сагоревања буде потпун. Непотпуно сагоревање горива може довести до преношења штетних супстанци и једињења на сушени материјал (нпр. тешки угљоводоници, биљни катран, сумпорна једињења и киселине). Чврста горива се ређе користе у директним сушарама због далеко мање ефикасности процеса сагоревања и мање могућности аутоматизације поступка.

Треба разликовати *сушење димним гасовима* од поступка *димљења*.

Сушење димним гасовима се изводи у *директним сушарама* код којих се конвективно сушење обавља агенсом који је мешавина ваздуха и продуката сагоревања горива које се користи као енергент. Материјал се најчешће излаже димним гасовима чија се температура може кретати у распону 200-600°C, при чему се топлота димне струје користи и за загревање материјала. Код сушења семенских материјала (кукуруз, јечам, сунцокрет, итд.) потребно је водити рачуна о температури сушења ради очувања клијавости. Неке сорте дувана се могу сушити директно на отвореној ватри која се пали на поду коморе, како би се постигла одговарајућа специфична арома.

Димљење подразумева излагање меса и рибе (и њихо-

68: Експлозивне материје се ретко јављају у техници сушења прехранбених материјала. Међутим, генерално посматрано, у другим гранама индустрије где се изводи сушење запаљивих и експлозивних материја, инертни гасови се увелико користе, првенствено из безбедносних и противпожарних разлога.



Слика 1.58: Илустрација поступка димљења меса.

69: Дим добијен сагоревањем природног гаса назива се још и *врвни димни гас* и сматра се енергетски ефикасним енергентом. Међутим, сушење хране природним гасом могуће је једино уз примену специјалних горјоника којима се постиже ниска концентрација азотних оксида (NO_x) у продукцији сагоревања. Медицински је доказано да сушење намирница гасом са повишеном концентрацијом азотних оксида има *канцерогени ефекат*. Главни продукти сагоревања природног гаса су угљен диоксид и вода који најчешће не штете материјалу који се суши.

70: *Екстракт дима* садржи само одређене компоненте дима које су неопходне за постизање антибактеријског и антиоксидативног дејства на месо током димљења. Овакав дим не садржи канцерогене компоненте. Производ димљен оваквим димом је увек истог мириса и укуса што екстракту дима даје велику предност у односу на обичан дим.

71: Неке од супстанци које се користе у органским лабораторијама су: калцијум хлорид (CaCl_2), натријум сулфат (Na_2SO_4), калцијум сулфат (CaSO_4 , дриерит) и магнезијум сулфат (MgSO_4).



Слика 1.59: *Силикагел* (*eng. silica gel*) је аморфни облици *силицијум-диоксида* (SiO_2) који има веома порозну структуру. Користи се као средство за упијање воде и може примити количину воде већу од 40% своје масе. Хемички је инертан и нетоксичан.

вих прерађевина) диму, температуре у распону $40\div 80^\circ\text{C}$, у сврху њиховог очувања и побољшања органолептичких својстава (Слика 1.58). Димљење се изводи у специјалним коморама - *пушницама*. Без обзира на величину пушнице, неопходно је користити ватру од тврдог дрвета (буква, трешња, орах, храст, јабука). Меко дрво (четинари попут смрче и бора) садржи смолу која квари укус намирнице. Хемикалије присутне у дрвету (нпр. формалдехиди, феноли, алкохоли и неке органске киселине) су природни конзерванси. У индустријским поступцима димљења користи се *екстракт дима* (тзв. „*течни дим*“) који се добија фракционом дестилацијом дима⁷⁰

Водена пара. *Водена пара* се у техници сушења користи у стању прегрејане паре и сматра се хемички неутралном компонентом. У оваквом стању она поседује способност да брзо и исплативо истера влагу из материјала, и при томе га не оштећује у великој мери. У прегрејаној пари нема слободног кисеоника, па се разградња лако оксидујућих хранљивих састојака (нпр. витамин С) знатно умањује, чиме се састојци чувају. На сниженим притисцима је могуће постићи и температуре паре испод 100°C , а за храну осетљиву на топлоту и до 45°C . Као извор топлотне енергије за добијање прегрејане водене паре могуће је искористити и обновљиву енергију (соларна, биомаса, итд.). Већину класичних концепција израде конвективних или кондуктивних сушара је могуће адаптирати да раде са прегрејаном воденом паром као агенсом.

Хигроскопне супстанце. *Хигроскопне супстанце* се могу користити као средства за сушење и присутне су у различитим облицима и стањима. Ове супстанце су пронашле широку употребу, како у индустрији прераде хране, тако и у производњи фармацеутских производа, амбалаже, електронској индустрији и многим другим производним индустријама.⁷¹ Оне у својој близини захваљујући особинама велике хигроскопности одржавају стање „сувоће“, а у идеалном случају су хемички стабилне и инертне. Супстанца која често користи у ове сврхе је *силикагел* (Слика 1.59). Један од главних проблема код примене хигроскопних супстанци је тај што многа средства за сушење не упијају само воду, већ и друга једињења из материјала, што се да спречити избегавањем употребе више агенса за сушење него што је довољно за апсорпцију циљаног једињења. Такође, средство за сушење ће деловати само док је незасићено водом.

1.8 Прехрамбени материјали

Доступна слободна вода у прехрамбеним материјалима и сировинама за производњу хране омогућује развој и раст микроорганизама. Процесом сушења се уклања вишак воде из материјала и на тај начин спречава развој микроорганизама. Материјал током процеса сушења смањује своју запремину и масу, што олакшава руковање, паковање, транспорт и смањује потрошњу енергије. У зависности од садржаја воде и структурних карактеристика, храна се може класификовати на различите начине. Међутим, генерално гледано на основу различитих структурно-физичких својстава уобичајене су следеће класификације:

Воће и поврће. Свеже воће и поврће су веома подложни микробиолошким активностима и кварењу које почиње непосредно после брања (Слика 1.60). Због тога се воће и поврће класификују као *високо кварљива роба*, која лако плесниви, превире и трули. Већина сорти воћа (најчешће: јабука, кајсија, смоква, бресква, крушка и грожђе) и поврћа (најчешће: цвекла, шаргарепа, грашак, лук, кромпир и бели лук) се може успешно сушити различитим техникама сушења. Свеже воће и поврће садржи велике количине воде $75\div 95\%$, а поред тога и извесну количину шећера, киселина, беланчевина и других састојака. Излагање нижим температурама или уклањање воде је најчешћи начин за продужење века трајања ових производа током складиштења. Процењује се да се око $20\div 30\%$ воћа и поврћа суши, док се више од 50% конзумира као свеже. Преостало се чува као замрзнуто, конзервирано или укисељено. Током сушења на воћу и поврћу могу наступити многе значајне промене, услед којих оно може знатно изгубити од свог почетног квалитета и као осушено постати неупотребљиво за јело. Техника сушења обухвата најпре припрему воћа и поврћа за сушење (сортирање, прање, ситњење и чишћење), а затим и сам начин сушења.

Зрнаста храна. У ову групу спадају житарице (кукуруз, сирак, овас, јечам, пшеница, раж, просо, хељда и др.), легуминозе (соја, грашак, пасуљ, лупина, сточни боб, кикирики), језгасто воће и поврће (орах, бадем, лешник, pistaћи и др.), зрнасти зачини (анис, бибер, чили, каранфилић, коријандер, и др.), кафа и какаовац, као и друге биљне врсте (сунцокрет, памук, уљана репица и др.) (Слика 1.61). Зрневље има релативно мањи садржај воде од свежег воћа и поврћа. Међутим, влажна зрна брзо пропадају уколико се складиште без



Слика 1.60: Илустрација различитог воћа и поврћа.



Слика 1.61: Илустрација различитих осушених зрнастих производа.

сушења до постизања равнотежног садржаја влаге, првенствено услед развоја микроорганизама. Равнотежни садржај влаге се креће од $9\div 15\%$ (нпр. кукуруза, пиринча са/без љуске, пасуља, сирка, и слично). Зрна са равнотежним садржајем влаге $< 9\%$ могу се очувати и до годину дана уз адекватно складиштење. Смањењем садржаја влаге у зрну елиминише се могућност деградације или клијања житарица, које се тако могу чувати чак и дуже време на безбедан начин, одржавајући квалитет производа. Зрна кукуруза се на сушење доносе са влагом која се креће од $25\div 38\%$, а у специјални случајевима чак и већом од 40% . Садржај влаге директно утиче на потрошњу енергије за сушење. Осушена зрна кукуруза садрже око 14% влаге.

Лишће и зачини. Зелено лишће и зачинско биље у свежем стању садрже значајну количину воде. Лишће приликом сушења губи и до 85% своје масе. *Листове* приликом сушења треба пажљиво сушити јер су веома танки и садрже углавном слободну воду. Сушено лишће има више активних хранљивих материја од свежег лишћа. Неодговарајуће сушење доводи до губитка квалитета и хранљивих састојака листова. Различите врсте листова захтевају посебне услове сушења како би задржале очекивани квалитет финалног производа. Свеже биљне делове лековитог биља треба сушити тако да сачувају боју и активне материје, а садржај влаге у осушеном материјалу најчешће буде $8\div 12\%$. Многе ароматичне врсте лековитог биља суше се на температурама $40\div 45^\circ\text{C}$. Зелене делове лековитог биља, листове и цветове најбоље је сушити целе, а уситњавање се врши тек непосредно пре употребе. Корен је пожељно исећи на пола или на комадиће дужине до 5 mm ради лакшег и бржег сушења. Сушење у сноповима се препоручује за биљке као што су лаванда, лимунова трава, рузмарин, мајоран, нана и жалфија (Слика 1.62). *Зачинско биље* садржи велике



Слика 1.62: Илустрација различитих врста лековитог биља.

количине лако испарљивих супстанци и осетљиво је на начин загревања и количину доведене топлоте током процеса сушења, тако да овим материјалима погодује сушење на ниским температурама (Слика 1.63). Потпуно осушено зачинско или лековито биље заштићено је од развоја бактерија, буђи и квасца, и као такво може очувати своја својства 6÷12 месеци. Осушени листови лако се мрве и ломе тако да при чувању и складиштењу треба водити рачуна да се ово што је могуће мање дешава. Осушено биље је добро чувати у херметичким посудама, без утицаја светлости и далеко од извора топлоте. Сушење на ваздуху је погодно за босиљак, ким, коријандер, тимијан и рузмарин. Биљке је потребно очистити од стабљика, а листиће одвојити и послати на лесу за сушење.

Млеко и јаја. Свеже млеко без икаквог процеса конзервације је изузетно кварљиво и није га могуће задржати у конзумном стању чак ни неколико сати. Једна од опција за дуготрајно очување млека је прерада течног млека ради добијања млека у праху (Слика 1.64), које задржава квалитет свежег млека и није подложно развоју микроорганизама. Млеко у праху се добија процесом сушења или одговарајућим мембранским техникама филтрирања. Техника сушења која се користи је распршивање, а сушаре се називају спреј сушарама. Сушење у спреј сушарама је најчешће коришћена метода за сушење целих јаја, жуманца или беланаца. Јаја се претходно загревају на 60°C, а затим распршују у комори за сушење кроз коју пролази ваздух температуре између 121÷149°C. Прах се одваја од ваздуха и континуирано се уклања из коморе за сушење. Осушена беланца садрже око 0,6% слободних угљених хидрата, првенствено у облику глукозе. При топлотном складиштењу, угљени хидрати могу да реагују са протеинима Маилардовом реакцијом, што доводи до губитка укуса, нерастворљивости и смеђе боје. Ови проблеми могу се спречити уклањањем глукозе из течног беланца пре него што се производ осуши. Осушена јаја су неварљива храна, док су свежа или течна јаја кварљива храна. Јаја у праху (Слика 1.65) имају век складиштења од 5÷10 година у зависности складишних услова. Век трајања се може додатно продужити стављањем јаја у праху у херметички затворене контејнере у анаеробним условима или стављањем на хладно место за складиштење. У овом случају нема потребе за хлађењем или хладним ланцем као у случају течних јаја. Једна од предности јаја у праху у односу на свежа јаја је та да нема мо-



Слика 1.63: Илустрација зачинског биља.



Слика 1.64: Илустрација млека у праху.



Слика 1.65: Илустрација јаја у праху.



Слика 1.66: Илустрација различитих врста осушене рибе.

гућности за контаминацију од ломљења љуске. Такође, за складиштење сушених јаја потребно је мање складишног простора. Јаја у праху се могу користити без рехидрације приликом печења, а могу се рехидрирати за прављење јела као што су кајгана и омлет.

Риба и месо. Риба и месо имају висок садржај влаге и спадају у групу високо кварљивих намирница. Грубо се може узети да је проценат воде и масти заједно прилично константан (меса животиња: $78 \div 82\%$; код рибе $60 \div 82\%$). Ове намирнице су се одувек конзвирале за каснију употребу, и то сољењем, сушењем, саламурењем и димљењем. Хлађење и замрзавање су скупље опције чувања ових намирница, док је сушење подједнако ефикасан и финансијски повољнији начин. Риба се чешће суши од меса (Слика 1.66). У развијеним земљама најчешће се конзумира прерађена, док се у земљама у развоју чешће користи свежа риба, првенствено услед недостатака одговарајућих технологија за складиштење или прераду. Контаминирајући микроорганизми не могу да се развијају у риби са садржајем влаге мањом од 15% . Месо има више влакана од рибе (Слика 1.67). Начин сушења рибе и меса разликује се у односу на њихово понашање приликом излагања повишеним температурама, тако да се сходно томе услови сушења морају прилагодити њиховим особинама и садржају хранљивих материја. Сушење, заједно са развојем боје и укуса производа, може се само донекле убрзати и од виталног је значаја за квалитетан производ. Производи сушени на ваздуху се углавном праве од свињског и говеђег ме-



Слика 1.67: Илустрација различитих осушених производа од меса.

са, као и од бивола и јелена, али исти принципи важе за производе као што су сушена дивљач и риба.

Сушењем комада меса, kobасице, сланине и слично, настала је група ових намирница коју називамо „сухомеснатим производима”. Осушени и одимљени производи могу се дуго чувати, а могу се конзумирати као сирови, кувани или печени. Сухомеснати производи се деле на полутрајне и трајне. *Полутрајни* сухомеснати производи током сушења мора изгубити најмање 16% своје првобитне тежине и не сме садржати више од 50% воде. У полутрајне производе сврставамо саламурене и димљене производе као што су: димљена шунка за кување, ролована кувана шунка, сува плећка, суви свињски каре, суви врат, сува ребра, суви језици, леђна и трбушна сланина, царско суво месо, хамбургерска или месна сланина, суве главе, ногице и реп, бекон и др. *Трајни* сухомеснати производи су они код којих се после сушења и димљења садржај воде (не узимајући у обзир кости) сведе испод 40%, а њихов рок употребе износи до једне године. Неки од уобичајених трајних сухомеснатих производа су пршут, свињска печеница, говеђа печеница, сушено овчије и козије месо.

1.9 Припрема намирнице за сушење

За добијање квалитетног осушеног производа потребна је квалитетна сировина, односно квалитетан свеж производ. Селекција свежег, здравог и зрелог плода је веома важан почетак целокупног поступка добијања квалитетно осушене намирнице. Најбоље нутритивне особине поседују они плодови који долазе на сушење непосредно после бербе/жетве.

Припрема воћа и поврћа за сушење почиње једноставним прањем материјала хладном водом (Слика 1.68), како би се уклониле нечистоће, бактерије и инсекти. Пажљивим прањем се са воћа и поврћа може одстранити и преко 90% клица. Прањем се не сме оштетити кора или покорица плода, нити утицати на механичке особине било ког дела/ слоја материјала. Треба имати у виду да се дуготрајнијим потапањем материјала у воду може негативно утицати на нутритивне особине намирнице, као и то да материјал може упити додатну количину воде и тиме повећати сопствени садржај влаге. Код воћа се после прања плод може даље послати на операције уклањања коштице и/или покорице уколико то технолошки поступак захтева. Код поврћа су после прања уобичајене операције луштења и уситњавања плода.



Слика 1.68: Илустрација аутоматизованог прања и чишћења јабука на четкама.

Табела 1.12: Уобичајене методе предтретмана воћа и поврћа.

Воће
потапање у раствор аскорбинске киселине,
потапање у раствор кухињске соли,
бланширање у шећерном сирупу,
потапање у мед,
третирање сумпором.
Поврће
бланширање прегрејаном воденом паром,
бланширање водом.

72: Састав воде има велики утицај на бланширање. Добра вода треба да је безбојна, са ограниченим садржајем кречњака и магнезијума, без присутних соли тешких метала (бакра, гвожђа и др.) и нечистоћа. Тврдоћа воде не сме бити већа од $12 \div 14^\circ \text{dH}$ (нем. *Deutsche Härte*) ($1^\circ \text{dH} = 17.9 \text{ mgCaCO}_3/\text{dm}^3$). Вода не сме бити кисела, већ неутрална или слабо алкална.

**Слика 1.69:** Илустрација машине за бланширање поврћа у кључалој води и хлађењем помоћу прскања хладном водом.

Основни циљеви предтретмана, односно припреме материјала за сушење, су:

- ▶ сачувати боју, укус и арому намирнице,
- ▶ погоршање нутритивних особина намирнице свести на минимум,
- ▶ зауставити биоразградњу намирнице (успорити или зауставити активност ензима),
- ▶ створити предуслове за већу ефикасност и квалитет процеса сушења,
- ▶ продужити век трајања намирнице.

Предтретмани воћа и поврћа се разликују првенствено због тога што воће најчешће садржи више шећера и киселина од поврћа, што спречава деловање ензима (Табела 1.12). Иако предтретман воћа није неопходан он позитивно утиче на очување квалитета производа (промена боје, губитак витамина и слично) и ефикасност процеса сушења.

Бланширање је поступак краткотрајног потапања намирнице у кључалу воду или излагања прегрејаној воденој пари, праћено наглим излагањем хладној води (тзв. "шокирање") како би се процес кувања зауставио (Слика 1.69). Бланширање успорава или зауставља деловање ензима, чија активност изазива губитак укуса, боје и текстуре намирнице. Време бланширања је веома важан параметар овог поступка и варира у зависности од врсте намирнице и њене величине. У поступцима бланширања воћа и поврћа се најчешће користи вода,⁷² а могуће је употребити и разне врсте водених раствора других једињења (лимунска киселина, водоник пероксид, натријум-хлорид, сахароза, глукоза, скробни сируп, итд.). Поред тога што позитивно утиче на очување боје, бланширањем се веома ефикасно уништавају микроорганизми на намирници, што доприноси дуготрајности намирнице. Бланширани плодови током сушења лакше испуштају влагу, јер им покожица и месо постају еластичнији. Осушено воће и поврће, које је пре сушења бланширано, еластично је и мање рехидрира него оно које није бланширано. Бланширање се може извести и само водом.

Третман аскорбинском киселином ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$) подразумева потапање воћа у раствор аскорбинске киселине одређени временски период. Аскорбинска киселина је једна од компоненти витамина С, тако да се потапањем материјала у њен раствор може повећати садржај витамина С у осушеном производу. За припремање раствора аскорбинске киселине често се користе таблете витамина С растворене у води (500 mg таблете витамина С у 1 lit воде). Исечени комади воћа пот-

пуно су потопљени у раствор киселине у трајању од око 5 min. Однос запремина раствора и материјала најчешће је 1:2.

Третман сланим раствором подразумева потапање материјала у водени раствор кухињске соли, тј. натријум-хлорида (NaCl), најчешће добијеног растварањем 35÷70 g кухињске соли у 4 lit воде, у временском периоду 2÷5 min. По завршетку третмана материјал је потребно добро оцедити.

Третман шећерним сирупом подразумева потапање материјала у кључали шећерни сируп, тј. бланширање или барење у шећерном сирупу. Шећерни сируп је најчешће раствор шећера у води у масеном односу 1:2, а време трајања поступка је око 5 min, после чега следи цеђење. Овакав предтретман ће засладити материјал, чији укус после завршеног поступка сушења може подсећати на укус кандираног воћа.

Третман медом подразумева потапање материјала у раствор меда и воде у масеном односу 1:4, а време трајања поступка је око 5 min. Предтретман је веома сличан претходном. Овакав предтретман може утицати на то да је осушено воће делимично попримило укус меда.

Третман сумпором (сумпорење) подразумева суво или влажно излагање материјала сумпору.⁷³ Суво сумпорење заснива се на примени сумпорног дима, тј. сумпор-диоксида (SO₂), добијеним сагоревањем сумпора. Материјал долази у контакт са сумпор-диоксидом у посебним коморама за сумпорење, у временском периоду 10÷50 min. Влажно сумпорење подразумева потапање материјала у раствор сумпорне киселине. Третмани сумпорењем, веома су ефикасни за успоравање оксидације и тамњења воћа. Укус воћа и период складиштења такође се могу побољшати. Скоро сво комерцијално произведено воће светле боје, као што су сушене јабуке, крушке и кајсије, третирају се једињењима сумпора.

Припрема материјала за сушење може се извести увођењем нових технологија, као што су примена ултразвука, пулсирајућих електричних поља, високог притиска и етанола.

Ултразвучни њредитретман подразумева директно или индиректно излагање материјала ултразвучним вибрацијама пре процеса сушења. О примени ултразвука у техници сушења биће речи у посебном поглављу (страна 220).

Третман њулсирајућим електричним њољем подразумева излагање материјала кратким високонапонским електричним импулсима, чиме се постиже ефекат *електроњорације*.⁷⁴ Елек-

73: Треба имати у виду да је сумпор један од алергена, а сама процедура сумпорења је потенцијално опасан поступак по руковаоца.

74: *Електроњорација* или *електроњермеабилитација* је микробиолошка техника у којој се електрично поље примењује на ћелије како би се повећала пермеабилност ћелијске мембране. Формиране поре у ћелијској мембрани биолошког материјала могу бити трајне или привремене, повећавају порозност мембране, а самим тим и транспорт масе кроз њу.

тропорација се користи као предтретман у различитим процесима сушења, као што су осмотска дехидратација, вакуумско сушење, конвективно сушење или лиофилизација. Различити фактори који утичу на ефикасност третмана пулсирајућим електричним пољем укључују: цену, дизајн опреме, погодност, карактеристике прехранбених производа и неправилни услови прераде. Остала ограничења која утичу на комерцијалну примену овог третмана су:

- ▶ ограничење у третирању већих количина материјала због величине инсталације,
- ▶ постојаност спора и микроорганизама у храни након обраде, што доводи до брзог кварења хране,
- ▶ економска и техничка ограничења при третирању материјала у чврстом стању ограничавају употребу третмана у прехранбеној индустрији.

Третман високим притиском подразумева излагање намирнице повишеном хидростатичком притиску (100÷500 МПа) током одређеног периода времена. Овај поступак се још назива *хладном стерилизацијом*. Намирнице у течном агрегатном стању могу се третирати директно, али чврсте намирнице морају бити претходно упаковане. Овакав третман изазива модификацију ћелијске структуре, смањујући тургорски притисак⁷⁵ и потом утичући на пропустљивост и пренос масе. Предности излагања материјала високом притиску су:

- ▶ притисак се на материјал хомогено примењује током целог периода третмана због конзистентности третмана,
- ▶ нема топлотног ефекта,
- ▶ век складиштења третираног материјала је продужен у поређењу са материјалом који је пастеризован термичким поступком,
- ▶ уштеда енергије.

Третман етанолом (C_2H_5OH) је једноставна, али ефикасна техника која доприноси интензивирању процеса сушења. Ефекат претходног третмана етанолом заснива се на његовој способности да раствори компоненте ћелијског зида, изазивајући промене у структури и повећавајући њену пропустљивост. У основи овог третмана налази се Гибс-Марагонијев ефекат,⁷⁶ заснован на формирању градијента површинског напона између етанола и воде садржане у намирници. Микроструктурном анализом може се показати да материјали који су претходно третиран етанолом имају компактније ћелије са танким зидовима, као и међућелијски губитак ваздуха. Такође, абсорпција етанола обезбеђује већу заштиту од оксидације различитих компоненти, као што је витамин С.

75: *Тургорски притисак* или *тургор*, је притисак који врши течност у ћелији која притиска ћелијску мембрану на ћелијски зид. Тургор је оно што живо ткиво биљка чини крутим. Губитак тургора, који је резултат губитка воде из биљних ћелија, доводи до увенућа биљке.

76: *Гибс-Марагонијев ефекат* је пренос масе дуж граничне површи између две течности због градијента површинског напона. У случају температурне зависности, овај феномен се може назвати термо-капиларном конвекцијом. Овај ефекат настаје приликом постојања неуједначене расподеле температуре или концентрације дуж границе између две течности.

Трейман осмотском дехидратацијом подразумева поступак током кога се површински слојеви намирнице натапају осмотском супстанцом/ раствором. Погонска сила за осмотску дехидратацију је концентрациони градијент успостављен на супротним странама ћелијске мембране. На крају процеса осмотске дехидратације, активност воде у материјалу је умањена, али недовољно да би се потпуно зауставила микробиолошка активност. О примени поступка осмотске дехидратације у техници сушења биће речи у посебном поглављу (страница 189).

Припрема меса за сушење почиње правилним избором сировине. Месо које је најпогодније за сушење долази од животиња средњег узраста.⁷⁷ Животиња не сме бити предебела (због присуства масних ткива), нити неухрањена (због присутности везивног ткива и жилавости). По правилу, само немасно месо је погодно за сушење, јер видљива масна ткива штетно утичу на квалитет осушеног производа. Веома је важно да се месо пажљиво испита на присуство непожељних промена, као што су промена боје, присуство мрља, непријатан мирис, присуство паразита и слично. Сви недостаци морају бити одстрањени/ подрезани. Месо мора бити правилно исечено да би било погодно за сушење. У недостатку могућности складиштења у хлађеном простору, месо мора бити исечено и откопчено одмах након клања. Дужи временски период очувања меса може се постићи *усољавањем меса*, које се може извршити на два начина:

1. *Сољење* - подразумева употребу само чисте кухињске или морске соли, која се утрљава у комаде меса или сланине, чиме привлачи воду из површинских слојева меса и образује раствор који даље продире у дубље слојеве меса (Слика 1.70). Пре сољења месо треба бити охлађено. Сољење меса је пожељно извршити у року од 5 сати након клања.
2. *Саламурење* - подразумева употребу кухињске соли, шалитре⁷⁸ (нитрата) и шећера. Такође, саламура може садржати и разне друге додатке попут зачинске паприке, бибера, белог лука и слично (Слика 1.71).

Усољавање меса може се извршити поступцима *сувог сољења* (месо се излаже директном дејству кристалне соли) или *влажног сољења* (месо се урања у слабији или јачи водени раствор соли или мешавине за саламурење). У случају меса сеченог на траке може се користити 14% раствор соли у води, у коме ће се месо потопити око 5 min, а потом оцедити и убацити у сушару.

77: Појмовима „мишић” и „месо” описује се иста ствар али се односе на различити тренутак у времену. Под „мишићем” подразумевамо подразумевамо ткиво живе животиње, док под „месом” подразумевамо то исто али после клања.



Слика 1.70: Илустрација сувог сољења меса кристалном сољу.

78: Натријумова шалитра (натријум-нитрат, NaNO_3) и калијумова шалитра (калијум-нитрат, KNO_3).



Слика 1.71: Илустрација влажног сољења меса мешавином за саламурење.



Слика 1.72: Илустрација поступка одкоштавања меса.



Слика 1.73: Илустрација поступка чишћења крљушти рибе.



Слика 1.74: Илустрација поступка одкоштавања рибе.

Откоштавање меса (Слика 1.72) има за циљ да се из сировине уклоне кости уз што мање оштећење мишића. Резови у мишићима су неизбежни, али ипак треба водити рачуна да их буде једино тамо где се кости морају сећи. Велике појединачне мишиће потребно је пажљиво исећи на танке траке, док се мањи мишићи могу оставити у целости. Пожељно је да све траке које се суше у истој шаржи буду исте величине/дебљине. Мишић се сече на траке дуж мишићних влакана. Дебљина трака битно утиче на време сушења. Уобичајене су дужине трака $20 \div 70$ cm.

Припрема рибе за сушење слична је као и код меса и почиње чишћењем рибе (Слика 1.73) и уклањањем костију (Слика 1.74), као и уклањањем крви, изнутрица и свих осталих нејестивих делова. Потребно је имати у виду да ће поступак припреме рибе битно зависити од врсте рибе. Тако на пример, код Лосога се уклања кичменица са ребрима и риба сече на две симетричне половине, рибе које живе и хране се на или при дну (Шаран, Бабушка, Деверика, Кечига, Мрена, Штука, Смуђ, Сом, и др.) секу се на филете, док се код ситне рибе уклањају само глава и изнутрице.

Свеже месо рибе може остати максимално до 2 h на собној температури, после чега се мора приступити неком третману како не би дошло до кварења. Пре сушења риба се најчешће усољава или дими, а често се примењују и оба предтретмана. Сољење рибе се најчешће врши њеним потапањем у 14% раствор соли у води током периода од 1 h. Након тога следи димљење усољеног меса рибе (Слика 1.75) на температурама дима $25 \div 35^\circ\text{C}$ током периода од око 2 h. Овако припремљена риба шаље се даље на сушење. У случају сушења рибе у сушари са принудном циркулацијом ваздуха, сушење траје $4 \div 5$ h, док у случају сушења на сунцу процес траје $24 \div 48$ h.



Слика 1.75: Илустрација поступка димљења рибе.

Статика процеса сушења се бави проучавањем влажног материјала и његове интеракције са околином у случају када не постоји преношење влаге. У додиру са агенсом неке константне температуре и влажности, у влажном материјалу ће се на датим условима успоставити стање равнотеже и усталисти одређена количина влаге. Након овако успостављеног равнотежног стања влажност материјала се при датим условима неће мењати.

2.1 Форме везивања влаге и материјала

Влажни материјали су у општем случају *колоидна кайиларно-џорозна* тела. *Колоид* или *колоидну дисџерзију* сачињавају супстанце које могу бити у једном, два или више различитих фазних стања, и представља мешавину ових супстанци, које су по свом изгледу и особинама, на прелазу између хомогене и хетерогене мешавине. Сви влажни материјали могу се поделити на:

- ▶ **Колоидна џела** током процеса сушења значајно мењају своју величину (скупљају се) али задржавају своја еластична својства (желатин, течни део џема, сир и слично).
- ▶ **Кайиларно-џорозна џела** током процеса сушења постају крхка, мало се смањују и могу се као осушена самлети у прах (воће и поврће, већина намирница).
- ▶ **Колоидна кайиларно-џорозна џела** поседују својства обе претходне групације. Апсорпцијом течности њихова структура набрекне услед еластичности капилара. У ову групу спада већина материјала који се користе у грађевинарству (дрво, картон, тканине, угаљ, глина, земља и сл.) али и материјали биолошког порекла (жита, кожа, месо и сл.).

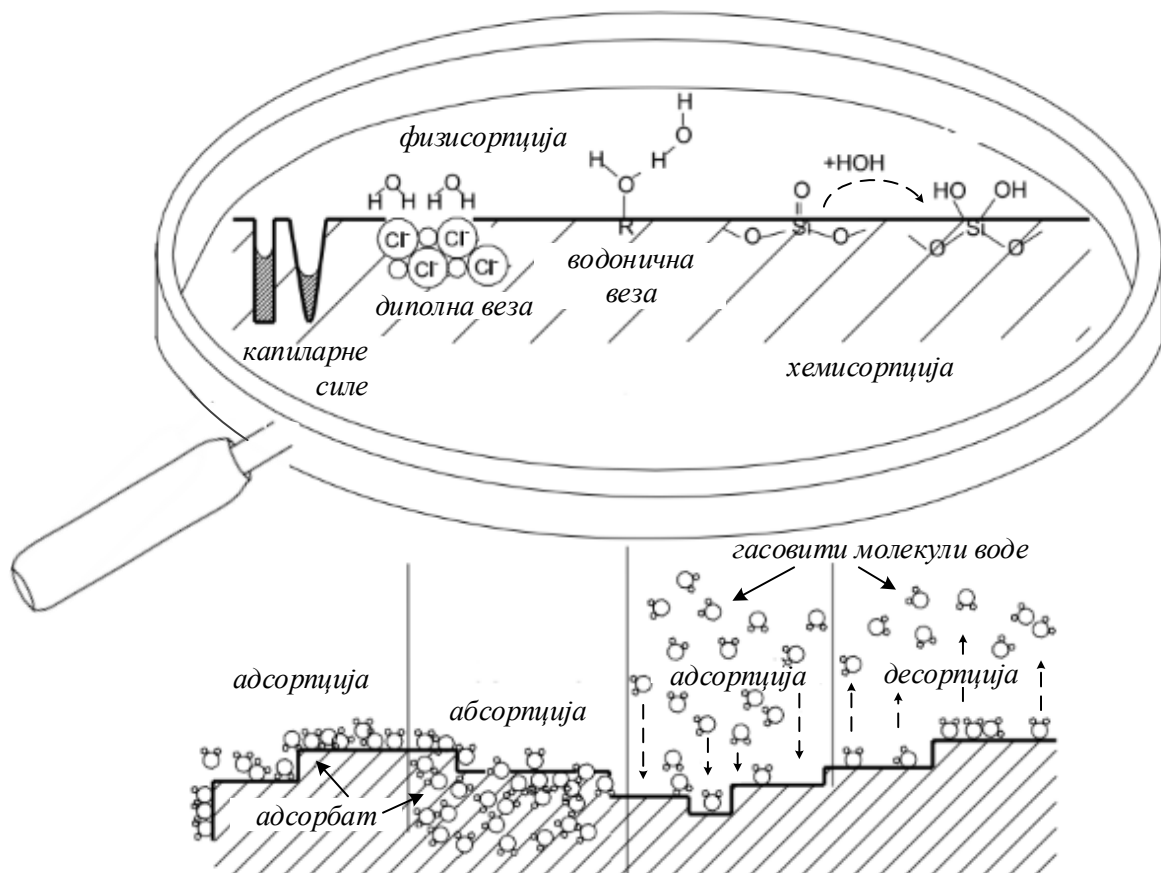
Процес сушења почиње онда када везе влаге и материјала почну да се раскидају, за шта је потребно уложити одређену количину енергије. Стога, према енергији која је потребна да се веза влаге и материјала раскине, могуће је класификовати¹ форме везивања влаге за скелет материјала. Разликујемо следеће форме везивања влаге, поређане од највеће ка

2.1 Форме везивања влаге и материјала	71
2.2 Хигротермална равнотежа	74
2.3 Рехидратација	76
2.4 Активност воде	78

1: Класификација према Ребингеру [17]

најмањој потребној енергији за раскидање везе влаге (Слика 2.1) и материјала:

- **Хемијски везана влага** је везана за материјал јонским и молекулским везама у тачно стехиометријски одређеној количини. Овако везану влагу по правилу није могуће уклонити поступком сушења, већ се мора



Слика 2.1: Илустрација типови везивања [18] и појашњење припадајуће терминологије:

Сорпција је физичко-хемијски процес којим се две супстанце међусобно привлаче. Специфични случајеви сорпције су: *адсорпција*, *абсорпција* и *јонска размена*. Процес супротан сорпцији назива се *десорпција*.

- **Адсорпција** је процес који се дешава приликом акумулирања молекула гаса или течности на чврстој површини *адсорбента* (неког чврстог материјала или ређе, течности) формирајући *адсорбат* (молекуларни или атомски слој, филм течности). Постоје две врсте адсорпције: *физисорпција* и *хемисорпција*.
 - **Физисорпцијом** је молекул привучен површини помоћу Ван дер Ваалсових сила (молекуларна адсорпција), при чему се формирају диполне везе или интеракције. У случају адсорпције воде бива привучен атом водоника чиме се формира водонична (хидрогенска) веза.
 - **Хемисорпција** је процес који се дешава тако што адсорбат и адсорбент деле електроне, односно долази до формирања хемијских веза.
- **Абсорпција** је физичко-хемијски процес у коме атоми, молекули или јони продиру у унутрашњост течности или чврстог материјала. Адсорбент дистрибуира прихваћену супстанцу кроз своју запремину, а не само по својој површини. Абсорпција може бити: *хемијска* (реактивна) или *физичка* (нереактивна).
- **Јонска размена** је реверзibilна замена једне врсте јона присутних у нерастворљивој чврстој супстанци са другим сличним наелектрисањима присутним у раствору који окружује чврсту супстанцу.

прибећи примени хемијских поступака или калцинацији.²

- **Физичко-хемијски везана влага** се у материјалу налази у нестехиометријској количини, као *адсорпционо* и *осмотски* везана влага.

Адсорпционо везана влага настаје адсорпцијом молекула водене паре из околине на спољним површима материјала у облику хидратантног слоја (филм течности). Карактеристике хидратантног слоја доста зависе од површинске порозности материјала и површинске дифузије влаге. Када се течност адсорбује долази до контракције (компресије) система течност-материјал. Материјал упија течност и повећава своју запремину (бубри), али укупна запремина бива мања од збира запремина сувог материјала и упијене течности. Током овог процеса јавља се егзотермни ефекат који је пропорционалан контракцији материјала.

Осмотска веза влаге је узрокована постојањем *осмотско-притиска*³ и карактерише је енергија везе ниског интензитета. Осмотски везана влага је влага која се уклања из материјала концентрованим раствором који њеним упијањем делимично мења своју структуру, а поступак се назива *осмотско сушење*.

- **Физичко-механички везану влагу** чине течност која се налази на површини материјала и течност која је заробљена у порама и капиларама материјала. За површину материјала капљице течности се везују силама површинског напона и силама привлачења других молекула течности. Као резултат се на површини материјала успоставља танак филм течности. Влага у *микрокапиларима* ($r < 10^{-7} \text{ m}$) је капиларна или везана влага, везана за скелет материјала капиларним силама. Влага у *макрокапиларима* ($r > 10^{-7} \text{ m}$) је слободна влага, која је у додиру само са зидовима пора, тј. скелетом материјала. Слободна влага може бити уклоњена и механичким техникама (нпр. цеђењем, пресовањем). Нека искуства указују на то да механичко уклањање воде троши само 1% од укупне енергије која би се потрошила да исту количину воде издвоји неким термичким поступком. У механичке поступке издвајања воде из течних и кашастих материјала убрајају се и поступци који користе посебно селективне мембране које дозвољавају пролаз само молекулима воде.

2: *Калцинација или калцинирање* је поступак загревања (жарења) материјала до температура већих од температуре кључања воде али нижих од температура топлљења материјала, како би се из њега уклонили угљен диоксид или вода.

3: *Осмотски притисак* се јавља између две супстанце: *растварача* (вода) и *раствора* (шећер, со и сл.) које су одвојене полупропустљивом мембраном (која дозвољава само пролаз растварача). Овај систем има две различите фазе које су у равнотежи, успостављеној након проласка воде кроз мембрану, тако да је на крају хидростатички притисак раствора избалансиран са разликом хемијских потенцијала растварача и раствора.

2.2 Хигротермална равнотежа

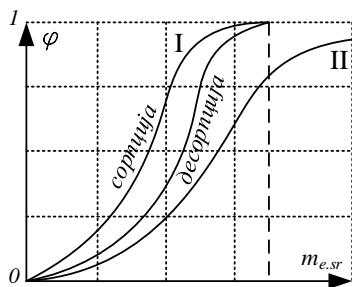
Стање *хигротермалне равнотеже* успоставља влажан материјал са влажним ваздухом који га окружује (или неким другим агенсом). Тада је температура влажног материјала једнака температури влажног ваздуха, а притисак водене паре у материјалу је једнак парцијалном притиску водене паре влажног ваздуха. После успостављања стања хигротермалне равнотеже не постоји размена топлоте и масе између влажног материјала и околног влажног ваздуха. Садржај влаге који материјал поседује у том тренутку назива се *равнотежни садржај влаге* (m_e), односно, апсолутна влажност материјала у стању равнотеже назива се *равнотежна влажност материјала* (u_e). Током успостављања стања равнотеже, материјал је могао доћи до равнотежног садржаја влаге десорпцијом или сушењем уколико је губио влагу, односно, сорпцијом или влажењем уколико је упијао влагу.

4: Овде треба имати у виду да се релативна влажност ваздуха може довести у везу са притиском водене паре у материјалу, $p_{p.m} = p_p$ (који је изједначен са парцијалним притиском паре у влажном ваздуху) и притиском водене паре непосредно изнад слободне површи течности, $p_{p.fw} = p'_p$ (који је изједначен са парцијалним притиском засићене водене паре на посматраној температури).

У стању хигротермалне равнотеже, при нормалном атмосферском притиску од 1bar и на температурама $t < 100^\circ\text{C}$, релативна влажност влажног ваздуха на посматраној температури може одредити⁴ према (2.1),

$$\varphi(t) = \frac{p_p}{p'_p} = \frac{p_{p.m}}{p_{p.fw}} \quad (2.1)$$

где су: $p_{p.m}$ - притисак паре у влажном материјалу у Pa; $p_{p.fw}$ - притисак засићене водене паре непосредно изнад слободне површи течности (фронта испаравања) у Pa; φ - релативна влажност ваздуха на посматраној температури према (1.118). Бројним експерименталним истраживањима је потврђено да је у стању хигротермалне равнотеже садржај влаге у материјалу исти у било којој тачки материјала. За успостављено стање равнотеже влажном материјалу одговара неки *средњи равнотежни садржај влаге* који се мења са променом релативне влажности ваздуха, односно са променом температуре и притиска ваздуха. Ова функционална зависност има облик $m_{e.sr} = f(\varphi)$ и назива се *сорпциона изотерма* (Слика 2.2). Током сорпције је средњи равнотежни садржај влаге нижи него током десорпције. Феномен неусклађености крива сорпције и десорпције назива се *сорпциони хистерезис*, а објашњава се различитим начином дешавања капиларне дифузије влаге током сорпције/десорпције. Материјали са већим вредностима средњег равнотежног саржаја влаге називају се *хигроскопним материјалима*. При сушењу материјала загрејаним ваздухом одређене температуре и релативне влажности, није могуће уклонити у потпуности сву влагу из материјала.



Слика 2.2: Сорпциона изотерма. I - капиларно-порозна тела, II - колоидна тела.

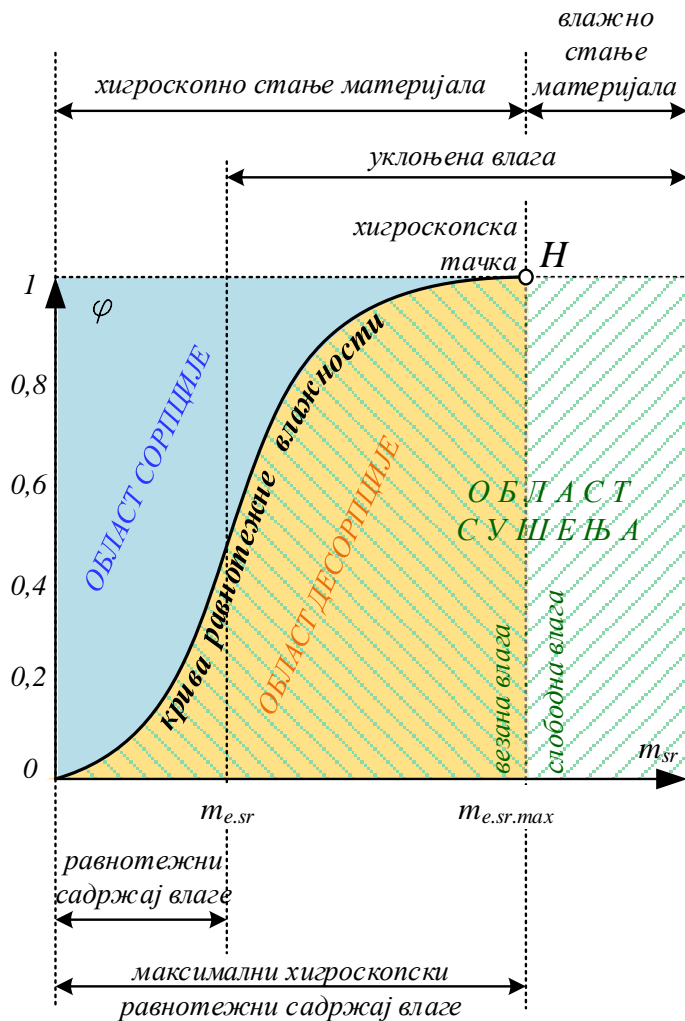
Код капиларно-порозних тела крива сорпције се завршава на вредности $\varphi = 1$, док код неограничено бубрећих колоидних тела она асимптотски тежи тој вредности. Међусобна одступања крива сорпције и десорпције могу се одредити и емпиријским изразима:

$$m_{e.sr} = 5,4\varphi^{0,5}$$

$$\text{за } 0 < \varphi < 0,35,$$

$$m_{e.sr} = 2,88 + 6,3\varphi^2$$

$$\text{за } 0,35 < \varphi < 0,90.$$



Слика 2.3: Методологија одређивања стања материјала у односу на процес сушења.

Крива равнотежне влажности (крива сорпције/десорпције) има облик латиничног слова S, а њен карактер се објашњава у зависности од опсега у коме се крећу вредности релативне влажности:

► $0 < \varphi < 0,1$ - крива сорпције је конвексна, а сорпција влаге има егзотерман карактер.

► $0,1 < \varphi < 0,9$ - крива сорпције је конкавна. У овом опсегу влага је везана за скелет материјала у облику мономолекуларног слоја ($0,4 < \varphi < 0,6$, већа егзотермност) и полималекуларног слоја ($0,6 < \varphi < 0,9$, мања егзотермност) влаге.

► $0,9 < \varphi < 1$ - крива зависи од начина везивања влаге за материјал и нема егзотермности.

У хигроскопској тачки H , материјал достиже максималан хигроскопски сарджај влаге и раздвајају се области хигроскопског стања материјала (стање паре на површи материјала зависи од влажности материјала на посматраном притиску и температури) и влажног стања материјала (не зависи од влажности материјала).

Процес уклањања влаге могуће је спровести само до постизања равнотежног садржаја влаге, односно до тренутка успостављања стања хигротермалне равнотеже. То значи да за дате параметре влажног ваздуха постоји *уклоњив садржај влаге* који је могуће издвојити из материјала на том режиму сушења (Слика 2.3). Равнотежни и максимални хигроскопски садржај влаге могу се емпиријски повезати једначином В.А.Поснова [19] која важи за $0,1 < \varphi < 1,0$, према (2.2),

$$\frac{1}{m_{e.sr}} = \frac{1}{m_{e.sr.max}} + B \cdot \ln \varphi \quad (2.2)$$

где је: B - коефицијент који зависи од температуре. Материјали у којима преовладава физичко-хемијски начин везивања влаге, у односу на физичко-механички начин везивања, имају високе вредности хигроскопности.

2.3 Рехидратација

5: Иако је у суштини реч о процесу супротном од дехидратације, рехидратацију не можемо сматрати повратним процесом процесу дехидратације зато што се материјал не враћа потпуно у почетно стање у коме се налазио пре почетка процеса дехидратације. Рехидратацијом материјала се углавном не може поправити структура материјала разорена дехидратацијом (сушењем). То значи да је рехидратација донекле и показатељ квалитета осушеног производа. Квалитетније осушен производ примиће већу количину воде и на тај начин регенерисаће у извесној мери првобитна физичка и хемијска својства.

6: *Реконституција* подразумева враћање у првобитни оригинални облик са свим пратећим својствима и особинама.

7: На пример: уколико је маса осушеног узорка 10 g, а маса после рехидратације 60 g, капацитет рехидратације ће имати вредност $RR = 60/10 = 6$.

8: На пример: уколико осушен узорак има масу 10 g, и током сушења је влажност опала са 87% на 5%, а после рехидратације има масу 60 g, коефицијент рехидратације ће имати вредност $CR = \frac{60 \cdot (1 - 0,87)}{10 \cdot (1 - 0,05)} = 0,821$.

Рехидратација је процес супротан процесу дехидратације и показатељ је способности осушених производа да кроз поступак влажења приме/упију воду.⁵ Осушени производи се по правилу пре употребе рехидрирају, квасе или потапају у воду (или неки други рехидратациони медијум) да би је упили и тиме повећали масу и запремину (бубрили). Дехидрирани производи могу се класификовати у оне који се користе као такви (нпр. већина сушеног воћа) и оне који се морају *реконституисати*⁶ рехидратацијом (нпр. млеко у праху, пире од кромпир-пахуљица, већина сушеног поврћа). У идеалном случају, дехидрирана храна треба да има могућност повратка првобитног садржаја влаге, запремине, облика и квалитета када се рехидрира. Поред количине воде коју упије битно је и време рехидратације материјала. Брзина којом упијају воду у почетку је већа и временом се смањује. Механизми упијања течности током рехидратације материјала могу се описати Фиковим законима дифузије, слично како је то рађено и приликом описивања дехидратације. Величине које указују на интензитет и ефикасност процеса рехидратације су капацитет рехидратације и коефицијент рехидратације. За стање материјала на почетку процеса рехидратације узима се стање осушеног материјала на крају процеса сушења, тј. стање хигротермалне равнотеже.

Степен или капацитет рехидратације (енг. *rehydration ratio/capacity*) представља количник масе рехидрираног оцеђеног материјала и масе осушеног материјала по успостављеној хигротермичкој равнотежи (равнотежни садржај влаге), према (2.3),

$$RR = \frac{m_{reh}}{m_e} \quad (2.3)$$

где су: RR - степен/капацитет рехидратације⁷; m_{reh} - маса рехидрираног и оцеђеног материјала у kg; m_e - маса осушеног материјала који се налази у стању хигротермалне равнотеже у kg. Типичне вредности капацитета рехидратације се приближно крећу у опсегу $2 < RR < 7$.

Коефицијент рехидратације (енг. *coefficient of rehydration*) је показатељ реконституције и одређује се према (2.4),

$$CR = \frac{m_{reh}(1 - y_0)}{m_e(1 - y_e)} = RR \left(\frac{1 - y_0}{1 - y_e} \right) \quad (2.4)$$

где су: CR - коефицијент рехидратације⁸; y_0 - релативна влажност свежег материјала пре процеса сушења; y_e - релативна влажност осушеног материјала који се налази у стању хигро-

термалне равнотеже. Коefицијент рехидратације најчешће заузима вредности $CR < 1$, због промена које се дешавају са материјалом током процеса сушења. Вредности $CR \approx 1$ се могу достићи једино у случајевима уколико се дехидратација и потом рехидратација дешавају под оптималним условима.

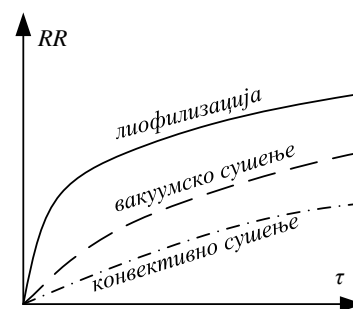
Степен и време рехидратације (Табела 2.1) су параметри кинетике рехидратације и зависе од услова чувања и складиштења осушених производа и квалитетом извршеног процеса сушења (Слика 2.4). По завршетку процеса рехидратације зауставља се упијање влаге и бубрење материјала и успоставља се стање хигротермалне равнотеже.

Главни фактори који утичу на кинетику рехидратације и реконституцију могу се поделити на:

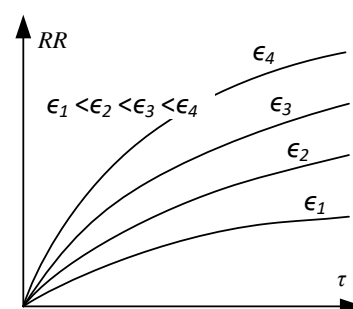
- ▶ фактори који утичу на осушени чврст материјал, као што су геометрија честица, садржај воде, порозност, тортуозност, густина и физичко стање;
- ▶ фактори који се односе на рехидратациони медијум, као што су температура медија, режим мешања, густина, вискозност, састав и присуство нерастворљивих материја.

Такође, на рехидратациона својства утичу: структура и порозност осушеног материјала (Слика 2.5), изглед капилара које су у вези са спољашњом површи материјала, количина затворених пора, аморфност и растворљивост материјала и слично. Опадање способности рехидратације може се десити услед превеликог скупљања материјала, термички неадекватног третмана, формирања коре/покорице и слично. Најосетљивије су оне намирнице које у себи сардже скроб, протеине и пектинске супстанце.

Намирница	Геометријски облик	RR	τ , min
Шаргарепа	коцкице 7×7×7 mm	4-6	15-20
Першун корен	коцкице 7×7×7 mm	7,2	10-15
Целер корен	коцкице 7×7×7 mm	>5	25-30
Кромпир	коцкице 5×5×5 mm	6-7	8-13
Грашак	оћишћен у зрну	2	20-30
Црни лук	исечен на листове 2-5 mm	3-6	150
Бели лук	преполовљени ченови	2-4	180
Печурке	исечене на листове 4 mm	1-3	100-250
Парадајз	исечена на половине	>4	200
Бундева	Ø25 mm, дебљина 5 mm	3-9	200
Шљива	исечена на половине	2-9	<60
Јабука	коцкице 10×10×10 mm	1,6-7,5	90
Шипак	цео плод	2-3	500
Манго	исечен на листове 5 mm	2-5	120



Слика 2.4: Утицај избора одговарајуће технике сушења на промену вредности степена/капацитета рехидратације у времену.



Слика 2.5: Утицај порозности материјала на промену вредности степена/капацитета рехидратације у времену.
 ϵ - порозност материјала.

Табела 2.1: Степен рехидратације и време рехидратације неких намирница на температурама у опсегу 25-65°C.[20-22]
 RR - степен рехидратације;
 τ - време рехидратације.

2.4 Активност воде

Сушењем се не утиче само на садржај воде у материјалу, већ и на друге физичке, биолошке и хемијске особине као што су активност ензима, микробиолошко кварање и разна органо-лептичка својства хране. Укупна влага присутна у материјалу се може поделити на слободну и везану влагу (Табела 2.2). *Слободна влага* није део материјала и долази споља, из околине (прањем или кондензацијом) и налази се на површинама материјала. Слободном се може сматрати свака влага док се не помеша или не реагује са материјалом. *Везана влага* из материјала ишчезава потпуно на ниским парцијалним притисцима, има занемарљиво малу покретљивост и знатно нижу температуру замрзавања од слободне воде. За конзервацију хране битнији је начин на који је влага везана за материјал од садржаја воде у материјалу.

Табела 2.2: Карактеристике везивања воде у материјалу изражене помоћу активности воде.

Веза воде	a_w
јака	$<0,3$
средња	$0,3 \div 0,7$
слаба	$>0,7$
слободна	$\approx 1,0$

9: *Изостерна појављивања или појављивања адсорпције*, јавља се при ниским притисцима и настаје из интеракције адсорбат-адсорбент, која се повећава са повећањем површине за интеракцију. На повишеним притисцима изостерна топлота се смањује. Функција којом се успоставља корелација између величина притиска и температуре у стању равнотеже, при непроменљивој количини супстанце, назива се *адсорпциона изостера*.

Табела 2.3: Вредности изостерне топлоте неких намирница.[5]

Материјал	q_{st} , kJ/kg
Јабука	$83 \div 1112$
Шаргарепа	$567 \div 1594$
Паприка	$722 \div 1961$
Парадајз	$411 \div 2383$
Кромпир	$461 \div 1933$
Пиринч	$142 \div 445$
Кукуруз	$111 \div 426$
Тапиока	$83 \div 889$
Јаја	$95 \div 491$
Млеко	$34 \div 395$
Јунеће месо	$356 \div 1374$
Пилеће месо	$249 \div 2662$

Активност воде (a_w) (енг. *water activity*) је бездимензиона величина и може се одредити према према (2.5),

$$a_w = \frac{p_{p.m}}{p_{p.f}} \quad (2.5)$$

где су: $p_{p.m}$ - парцијални притисак водене паре у материјалу у P_a ; $p_{p.f}$ - парцијални притисак водене паре ван материјала (околине) у P_a . Активност воде на некој произвољној температури је могуће одредити уколико су познате вредности активности воде на некој другој температури, Клаузијус-Клапејроновом једначином, према (2.6),

$$\ln \frac{a_{w2}}{a_{w1}} = \frac{q_{st}}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (2.6)$$

где је: q_{st} - специфична изостерна⁹ топлота у kJ/kg (Табела 2.3).

Активност воде је величина која описује стање воде у материјалу и њеног потенцијала да допринесе микробиолошким, токсичним, ензимским и неензимским реакцијама и дешавањима у материјалу. Њене вредности указују на количину воде која је доступна за развој микроорганизама и индикатор је микробиолошке стабилности хране.

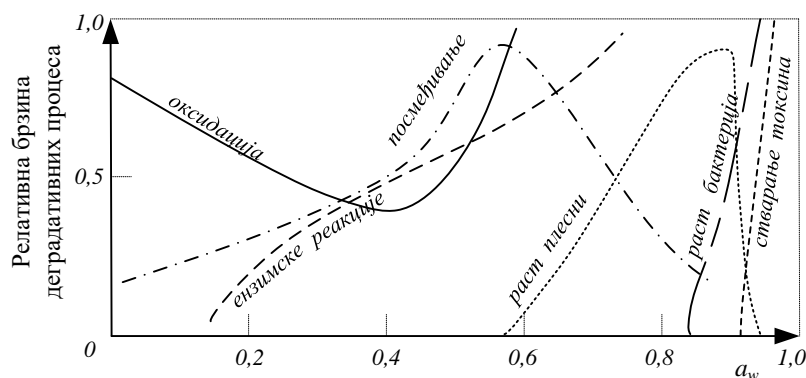
У техници сушења је пожељно да се на крају процеса успостављања хигротермалне равнотеже достигне оно стање равнотежне влажности материјала у коме је активност воде таква да се успори или заустави развој микроорганизама (Табела 2.4). Одговарајућим паковањем осушеног материјала спречиће се даља опасност од спонтане рехидратације на собним

условима и задржати активност воде на пожељним минималним вредностима (Табела 2.5). Влажност околине може утицати на адсорпцију влаге из околине, нарочито у условима складиштења на високој релативној влажности. Уклањањем влаге из материјала ствара се простор за кисеоник, који потом долази у бољи контакт са скелетом материјала. Осушени производ мора бити заштићен од додира са кисеоником и због тога се често затвара у амбалажу под сниженим притиском (вакумирање) или пакује у атмосфери инертног гаса (азот, угљен-диоксид) или се у паковање додаје нека хигроскопна супстанца (силикагел). Критична вредности активности воде материјала се препознаје почетком појављивања нежељених разграђујућих процеса на храни, изазваних разним патогенима који опстају изнад критичних вредности (Слика 2.6). Мерење активности воде се може извршити следећим методама:

- ▶ *Изоиесична метода* подразумева довођење узорка материјала у равнотежу са затвореном атмосфером познате релативне влажности. Релативна влажност се одржава константном, док материјал упија/отпушта влагу све до успостављања стања равнотеже. Потребно је познавати почетни садржај влаге у материјалу и пратити промену масе до успостављања равнотеже.
- ▶ *Тести активности воде* изводи се стављањем узорка материјала познатог садржаја влаге у малу затворену посуду. Када се парцијални притисци паре у материјалу и посуди изједначе, релативна влажност ваздуха који окружује узорак једнака је активности воде материјала на посматраној температури и назива се *равнотежна релативна влажност* ваздуха (енг. *Equilibrium Relative Humidity - ERH*).
- ▶ *Динамичка метода* подразумева излагање узорка материјала током кратког временског периода ваздушној струји чија се релативна влажност контролише и вари-

Табела 2.4: Вредности активности воде неких намирница.[23, 24]

Материјал	a_w
Млеко, месо, риба, сок, воће, поврће	$\approx 0,97 \div 0,99$
Кобасице, изнурнице, сир	$\approx 0,95$
Кечап, џем, хлеб, сируп, салама	$\approx 0,8 \div 0,95$
Суве шљиве, марципан	$\approx 0,7 \div 0,8$
Осушено поврће	$\approx 0,7 \div 0,77$
Мед, лешник, суво воће, суво грожђе	$\approx 0,6 \div 0,7$
Пекарски производи, зачини	$\approx 0,5$
Јаја у праху	$\approx 0,4$
Колачи	$\approx 0,3$
Млеко у праху	$\approx 0,2$



Слика 2.6: Утицај активности воде на интензитет одвијања различитих деградативних процеса у намирници.[25]

10: Термогравиметријско мерење подразумева мерење масе узорка материјала на прецизној ваги, смешеног у комори (рерни) и истовременим загревањем узорка током неког периода времена. Загревање може бити континуално или степенасто, и њиме се одржава константна температура амбијента и материјала током мерења.

ра уз симултано мерење масе узорка. У ову сврху је погодно користити изотермалну термогравиметријску методу¹⁰ као технику.

За све од наведених метода заједничко је то да се равнотежно стање влаге у материјалу и околини успоставља на малом простору (комора) на некој температури. У случају да се тражи активност воде на тачно одређеној температури, равнотежно стање се мора успоставити на тој температури. При истом садржају воде у материјалу, активност воде може бити различита због састава намирнице. Мале промене хемијског састава намирнице (сахарозе, скроба и слично) могу битно утицати на активност воде, тако да садржај воде у материјалу не даје потпуно тачан податак о активности хране.

Табела 2.5: Критичне вредности активности воде за развој микроорганизама у храни.[26]

a_w	Врста микроорганизама	Примери намирница
1,00÷0,95	Грам негативни штапићасти облици бактерија* ¹ , споре бактерија, неки квасци.	Кварљива свежа храна и конзервирано воће, поврће, месо, риба и млеко, кобасице, средина хлеба, храна која садржи до 40% шећера или 7% соли.
0,91÷0,95	Округласти облици бактерија* ² , лактобацили* ³ , неке буђи, квасци* ⁴ .	Намирнице са око 65% шећера или 15% соли, салама, трајни сиреви.
0,87÷0,91	Велики број сојева квасаца* ⁵ .	Намирнице са око 55% шећера или 12% соли, сува шунка, полутрајни сиреви.
0,80÷0,87	Велики број плесни, већина Staphylococcus aureus.	Брашно, пиринач, махунарке са 15-17% влаге, воћни колачи, заслађено млеко.
0,75÷0,80	Велики број халофилних бактерија.	Намирнице са око 26% соли, марципан са 16-17% влаге, џемови и мармеладе, воћни сируп, маршмелу.
0,65÷0,75	Ксерофилне плесни* ⁶ .	Очишћен оvas са око 10% влаге, зрна лешника, маршмелу, желе, сушено воће, ораси.
0,60÷0,65	Осмофилни квасци* ⁷ .	Сушено воће са 15-20% влаге, карамелна маса.
0,50	Отежан развој микроорганизама.	Тестенине и зачини са 10-20% воде.
0,40	Без развоја микроорганизама.	Јаја у праху са 5% воде.
0,30	Без развоја микроорганизама.	Бисквити, препечен хлеб, корица хлеба са 3-5% воде.
0,20	Без развоја микроорганизама.	Млеко у праху (2-3% воде), сушено воће и поврће (5% воде), кукурузне пахуљице (5% воде).

*1 - Pseudomonias, Echerichia, Proteus, Shigella, Klebsiella, Bacillus, Clostridium perfringens;

*2 - Salmonella, Vibro parahaemolyticus, Clostridium botulinum, Serratia;

*3 - Lactobacillus, Pediococcus;

*4 - Rhodotorula, Pichia;

*5 - Candida, Torulopsis, Hansenula;

*6 - Aspergillus chevalieri, A.candidus, Wallemia sebi, Saccharmyces bisporus;

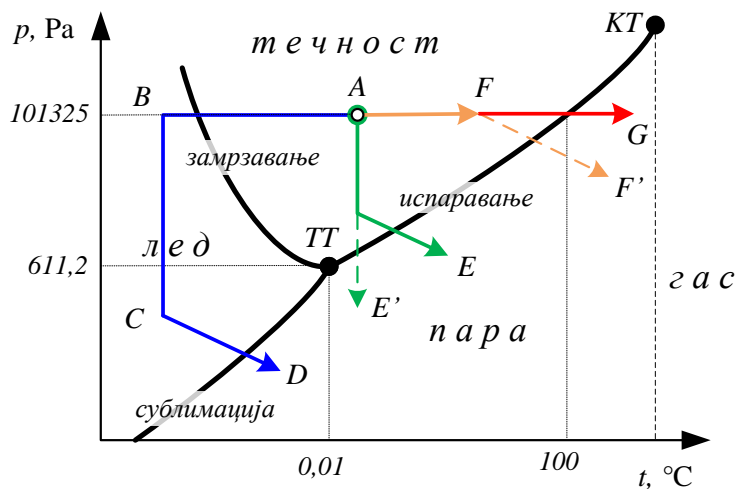
*7 - Saccharmyces rouxii, Aspergillus, Monoascus bisporus.

Кинетика процеса сушења

Кинетика сушења се бави променама просечног садржаја влаге у материјалу и просечне температуре материјала које се дешавају током процеса сушења. Промене ових величина у времену зависе од присутних механизма преношења топлоте и масе, и њихових корелација. На кинетику процеса сушења највише утиче природа веза влаге са материјалом и брзина раскидања ових веза током процеса сушења. Појаве преношење влаге и топлоте током процеса сушења дешавају се истовремено, а на време трајања целокупног процеса највише утиче она појава која је мање брзине. Брзину сушења контролишемо тако што утичемо на оне физичке параметре чије вредности убрзавају/успоравају процес.

3.1 Уклањање влаге

Процес сушења материјала обухвата све процесе који се дешавају од почетка процеса до успостављања хигротермалне равнотеже материјала са околним агенсом. Током процеса сушења влага напушта материјал у парном стању¹ и одлази у агенс који га опструјава. На $p-t$ дијаграму (Слика 3.1) приказано је неколико начина/путева којима влага у материјалу може да пређе из стања течности (А) у стање паре, променом



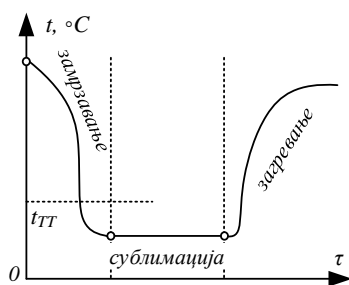
3.1 Уклањање влаге	81
3.2 Криве сушења	82
3.3 Једначине кинетике сушења	86
3.4 Температура материјала	89

1: За сада се из разматрања изузима осмотско сушење јер се по природи процеса разликује од класичних техника сушења сувим агенсом. О осмотском сушењу ће се говорити у посебном поглављу накнадно.

Слика 3.1: Приказ фазне промене воде у $p-t$ дијаграму. TT - тројна тачка воде, одређена је температуром и притиском на којима вода коегзистира у сва три агрегатна стања (чврсто, течно и парно): $p_{TT} = 611,2$ Pa и $t_{TT} = 0,01^{\circ}\text{C}$. KT - критична тачка или критично стање, представља крајњу тачку криве фазне равнотеже воде и означава услове на којима коегзистирају течно и парно стање воде: $p_{KT} = 22,064$ MPa и $t_{KT} = 373,946^{\circ}\text{C}$.

Табела 3.1: Вредности топлоте испаравања (r_0) и температуре кључања воде (t_0) на различитим апсолутним притисцима (p).

p , kPa	r_0 , kJ/kg	t_0 , °C
1	2485	7
2	2460	18
5	2424	33
10	2393	46
20	2358	60
50	2305	81
100	2258	99,6
101,35	2257	100
110	2251	102
120	2244	105
200	2202	120
500	2109	152



Слика 3.2: Промена температуре у времену током поступка лиофилизације.

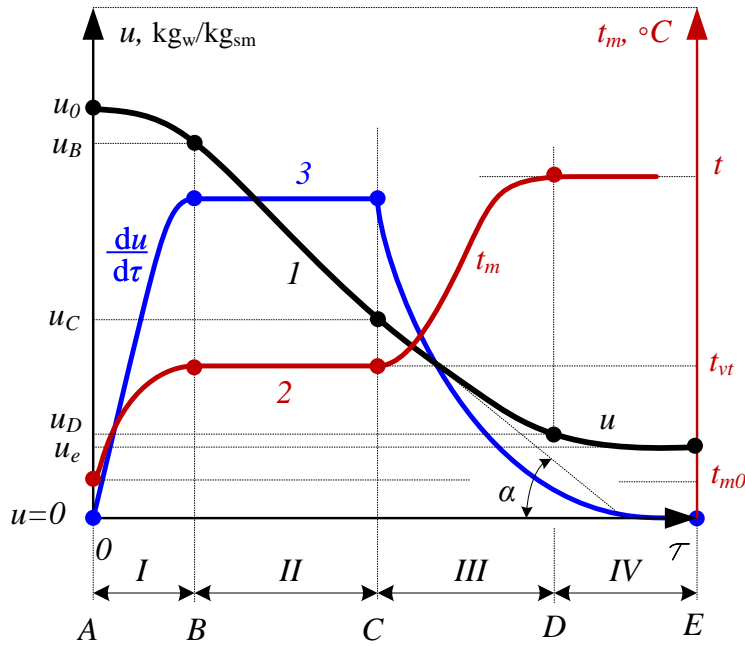
t_{TT} - температура тројне тачке воде.

температуре (загревање/хлађење) или притиска (снижавање притиска, тј. вакумирање).

- Загревањем материјала на атмосферском притиску се загрева и влага у њему. Уколико су током загревања постигнуте температуре веће од температуре кључања воде на тим условима, влага ће прећи из течног у парно стање *испараванем* (процес $A \rightarrow G$). Међутим, уколико је влага у материјалу загрејана до температура нижих од температура кључања воде ($A \rightarrow F$), влага ће прелазити из течног у парно стање процесом *вепрења* ($F \rightarrow F'$).
- Снижавањем апсолутног притиска на коме се материјал налази опада и притисак течности у њему, а поступак се назива *вакумирање*. На температурама већим од температуре тројне тачке воде (t_{TT}), вакумирањем ($A \rightarrow E'$) се из стања течности може доћи у стање паре. Овакав поступак се назива *вакуумско сушење* (*eng. vascit drying*) и његови параметри зависе од параметара стања воде (Табела 3.1) током овог процеса. Истовремено са вакумирањем може се вршити и загревање материјала ($A \rightarrow E$).
- *Лиофилизација* (*eng. freeze drying*) је процес којим вода, после замрзавања ($A \rightarrow B$) и вакумирања ($B \rightarrow C$), прелази директно из чврстог (лед) у парно стање сублимацијом ($C \rightarrow D$). Замрзавање се врши до температуре (Слика 3.2) мање од температуре тројне тачке воде (t_{TT}), а вакумирање до притисака мањих од притиска тројне тачке воде (p_{TT}). *Сублимација* се дешава на притисцима и температурама испод тројне тачке воде, а топлота која је потребна за процес сублимације обезбеђује се кондукцијом (загревање подлоге на којој је постављен материјал) или зрачењем топлоте (са околних зидова вакуумске коморе).

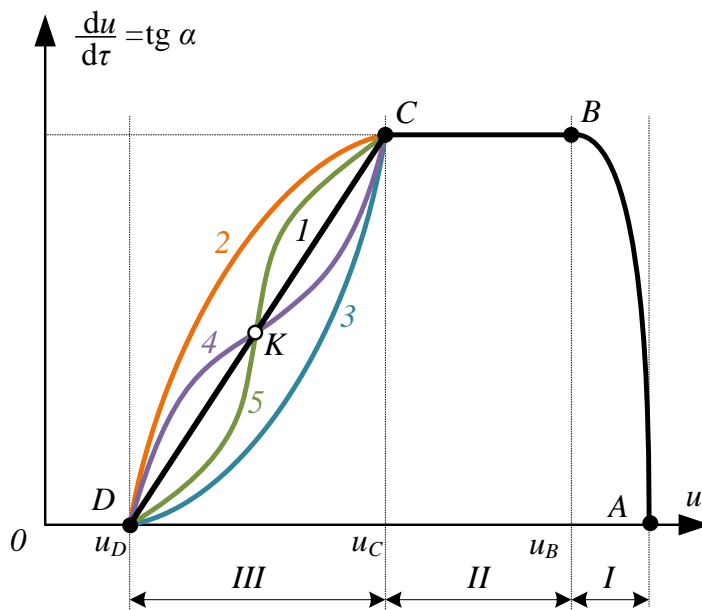
3.2 Криве сушења

При проучавању механизма по којима се дешава неки процес сушења, ради поједностављења, узима се да су параметри агенса (најчешће ваздуха) којима се описује стање агенса непромењиви у времену. У пракси је ову претпоставку могуће остварити на различите начине, првенствено у шаржним и проточним сушарама, у којима се укрштају токови материјала и агенса. Међутим, могуће је и мењати ове параметре током процеса сушења и тиме утицати на поједине фазе процеса, уколико за то постоји потреба (нпр. уколико то погодује очувању неких особина намирнице).



Слика 3.3: Криве сушења:

1 - промена влажности материјала у времену: $u = f(\tau)$,
 2 - промена температуре материјала у времену: $t_m = f(\tau)$,
 3 - промена брзине сушења у времену: $du/d\tau = f(\tau)$.
 (I) A-B период загревања материјала,
 (II) B-C период константне брзине сушења,
 (III) C-D период опадајуће брзине сушења,
 (IV) D-E успостављање хигротермичке равнотеже.



Слика 3.4: Крива промене брзине сушења у функцији влажности материјала: $du/d\tau = \text{tg } \alpha = f(u)$.

Током периода опадајуће брзине сушења могу се јавити следећи случајеви крива брзине сушења:
 1 - линеарна промена (нпр. танки и груби материјали),
 2 - конкавна промена (нпр. колоидна тела која садрже адсорпциону и осмотску влагу, растегнути материјали, тесто за тестенине),
 3 - конвексна промена (нпр. капиларно-порозна тела која садрже капиларну влагу, житарице),
 4 - сложена зависност (нпр. глина),
 5 - сложена зависност (нпр. кришке хлеба)
 C - критична тачка
 K - превојна тачка.

Криве сушења описују кинетику сушења и како се она мења током сушења, представљајући тако најосновније и најважније кинетичке податке о сушењу (Слика 3.3). Криве сушења су представљене следећим функционалним зависностима:

- ▶ $u = f(\tau)$ - промена влажности материјала у времену;
- ▶ $t_m = f(\tau)$ - промена температуре материјала у времену;
- ▶ $du/d\tau = f(\tau)$ - промена брзине сушења у времену;

2: Брзина сушења се добија као први извод (први диференцијал) функције $\dot{u} = du/d\tau$ промене влажности материјала $u = f(\tau)$ у времену.

3: Већина прехранбених материјала нема период константне брзине сушења. Ово се објашњава скупљањем материјала и недовољним временом за постизање температуре по влажном термометру, као и чињеницом да материјал најчешће не садржи довољну количину воде, нити је његова целокупна површ потпуно оквашена. Стога, веома често се код неких материјала може уочити период *квази-константне брзине сушења*, која се постиже на температури нешто вишој од температуре по влажном термометру.

4: *Спољашњи или екстерни ошћори* се налазе на страни агенса (не материјала) и у пракси се њихово постојање подразумева при вредностима Биотовог броја $Bi < 0,1$, што за последицу има то да су промене температуре материјала и промене влажности материјала линеарне. Велика влажност производа и неометан транспорт воде из унутрашњих слојева материјала ка површини доприноси сушењу материјала током кога доминирају спољашњи отпори. Стварање крутих површинских слојева (покорице) чини да отпори почињу да буду унутрашњи. Да би се избегло очвршћавање површинских слојева материјала при исушивању (нпр. код сушења пасте, неких воћа и поврћа) процес се мора екстерно контролисати контролом параметара агенса (брзине, температуре или релативне влажности).

У наведеним једначинама у питању су промене средњих вредности влажности и температуре материјала. На изглед криве сушења утичу својства материјала, величина или дебљина материјала за сушење и параметри сушења. Без обзира на то да ли су добијене прорачуном или емпиријски, криве сушења се могу искористити за одређивање: потребног времена задржавања материјала у сушари, коначне температуре материјала и количине топлоте потребне за загревање материјала. Ово подразумева да услови под којима су добијене одговарају онима који се постижу у сушари.

Брзина сушења² се може одредити графичком методом, повлачењем тангенте на криву промене влажности материјала у времену и читавањем угла α (Слика 3.3) који тангента закљача са апсцисом (хоризонталном осом), где ће бити $du/d\tau = \operatorname{tg} \alpha$. Крива брзине сушења се може представити и у функцији промене влажности материјала (Слика 3.4).

Анализом кинетике процеса сушења, у случају сушења агенсом неизменљивих параметара током целог процеса, цео процес сушења можемо поделити на неколико карактеристичних периода:

I - Период загревања материјала. Током периода загревања влажног материјала (А-В) површи материјала се загревају и слободна влага испарава. Почетна температура материјала (t_{m0}) расте до постизања температуре по влажном термометру (t_{vt}). Из тог разлога може привидно изгледати да се материјал током овог кратког периода хлади. Влажност материјала се током овог периода незнатно смањује. Током периода I брзина сушења нагло расте и приближава се вредности константне брзине сушења. Код материјала који су танки или се суше у танком слоју, овај период може се занемарити.

II - Период константне брзине сушења. Током периода (В-С) температура површи материјала се не мења и налази се на температури адијабатског засићења ваздуха (температура по влажном термометру) $t_m = t_{vt}$ која је постигнута у претходном периоду.³ Површи материјала су током овог периода сушења сличне слободној површини течности. Сва доведена топлота се користи на испаравање течности са површи материјала, а не на загревање материјала. Стога, температура површи материјала и температура унутрашњих слојева материјала су једнаке, а градијент температуре унутар материјала је једнак нули. Разлика температуре агенса (ваздуха) и температуре површи материјала током овог периода је константна. Током овог периода доминантни су *спољашњи ошћори*⁴ кретању воде, садржај воде у мате-

ријалу опада према линеарном закону и овакав процес ће се одржати све док су капиларне силе способне да допреме влагу из дубине влажног материјала на његову површ. Сходно томе брзина сушења ће имати константну вредност, $du/d\tau = const$, односно, нагиб криве промене влажности материјала према апсциси неће се мењати $tg\alpha = const$. По завршетку овог периода (тачка С) температура површи материјала почиње полако да расте са временом.

III - Период опадајуће брзине сушења. Током периода (С-Д) јавља се континуирани пораст температуре материјала уз истовремено смањивање брзине сушења. По достигнутој влажности материјала u_C , фронт испаравања влаге почиње да се повлачи у дубину материјала, остављајући за собом суве слојеве материјала чија температура постепено почиње да расте. Део доведене топлоте троши се и на загревање материјала. Услед пораста температуре површи материјала појављује се градијент температуре у материјалу. Влага из унутрашњости материјала мора савладати додатни отпор при проласку кроз осушене слојеве материјала како би напустила материјал, тј. у овом периоду доминирају *унутрашњи отпор*⁵ кретању влаге. У зависности од структуре материјала и начина везивања влаге, промена брзине сушења у функцији влажности материјала може се описати различитим функционалним зависностима (промене 1 до 5 на Слика 3.4).

IV - Успостављање хигротермалне равнотеже. У овом периоду (Д-Е) разлике између тренутног и равнотежног садржаја влаге све су мање и полако нестају, $u_D - u_e \approx 0$. Вредности влажности материјала све више и више почињу асимптотски да теже равнотежној влажности материјала (3.1).

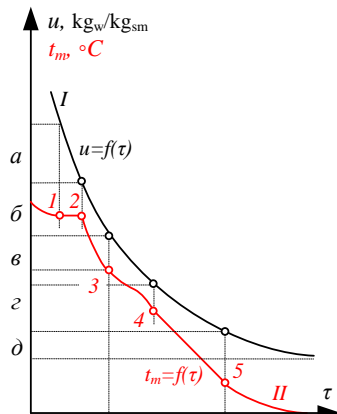
$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} u(\tau) = u_e \quad (3.1)$$

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} t_m(\tau) = t \quad (3.2)$$

Брзина сушења постаје једнака нули, $du/d\tau \approx 0$. Температура материјала је једнака температури агенса (3.2) а материјал више не испушта влагу у околни агенс, тј. успостављено је и стање хигротермалне равнотеже са агенсом.

5: *Унутрашњи или интерни отпори* се јављају када се фронт испаравања влаге повуче у унутрашњост материјала, остављајући за собом осушене делове материјала кроз који се влага додатно мора пробити приликом напуштања материјала.

6: Специфична површина материјала у овом случају одређује се као количник површине влажног материјала и запремине сувог материјала, $S = A_{vm}/V_{sm}$.



Слика 3.5: Крива сушења (I) и термограм (II) капиларно-порозних влажних материјала. Веза влаге према ознакама на слици:

a - осмотски везана влага колоидног тела или влага у порама са $r > 10^{-5}$ cm,
b - слободна влага у макропорима $r > 10^{-5}$ cm,
v - капиларна влага у микропорима $r < 10^{-5}$ cm,
 \bar{z} - влага полимолекуларне адсорпције,
g - влага мономолекуларне адсорпције.

7: *Пейр Александрович Ребиндер* (1898-1972) је совјетски физичар и хемичар, Академик Совјетске Академије наука, рођен у Санкт Петербургу. Највећи научни допринос дао је у области физичке хемије дисперзних система и површинских феномена, откривањем постојања феномена смањења чврстоће чврстих тела услед реверзибилних физичко-хемијских утицаја амбијента у коме се налазе. Познат је по тзв. *ребиндеровим феноменима* који се јављају у полимерима.

3.3 Једначине кинетике сушења

Примењујући законе одржања енергије и масе, могуће је успоставити односе између средњих вредности влажности материјала и температуре материјала са интензитетом испаравања и количном размењеном топлоте, односно даље и са брзином сушења. Сагласно томе, сва топлота доведена влажном материјалу троши се на загревање материјала и испаравање влаге из материјала, а може се изразити према (3.3),

$$q_g = \frac{\dot{Q}_g}{A} = q_{zagr} + q_{isp} \quad (3.3)$$

$$= (c_{sm} + c_w u) \rho_{sm} \frac{1}{S} \frac{dt_m}{d\tau} + \rho_{sm} r_0 \frac{1}{S} \frac{du}{d\tau}$$

где су: q_g - доведен специфични топлотни проток у W/m^2 ; \dot{Q}_g - топлотни проток доведен на површину A влажног материјала у W ; c_{sm} и c_w - специфични топлотни капацитети сувог материјала и влаге у $kJ/(kgK)$; u - влажност материјала у kg_w/kg_{sm} ; ρ_{sm} - густина сувог материјала у kg_{sm}/m^3 ; r_0 - топлота испаравања воде у kJ/kg ; S - специфична површина материјала ⁶ у $1/m$; $dt_m/d\tau$ - промена температуре материјала у времену; $du/d\tau$ - брзина сушења.

Једначина (3.3), која се још назива и *основном једначином кинетике сушења*, може се трансформисати у облик (3.4)

$$q_g = \rho_{sm} r_0 \frac{1}{S} \frac{du}{d\tau} \left(1 + \frac{c}{r_0} \frac{dt_m}{du} \right) \quad (3.4)$$

где је: $c = c_{sm} + c_w u$ - специфични топлотни капацитет влажног материјала. Величину $dt_m/du = b$ називамо *шемлеровим коефицијентом* сушења, она представља важну карактеристику кинетике процеса сушења и описује промену средње температуре материјала са променом средње влажности материјала током процеса сушења. Температурни коефицијент се одређује на основу криве промене температуре материјала у времену - *шermoграма* (Слика 3.5) или аналитичким решавањем диференцијалних једначина преношења масе и топлоте.

У кинетици сушења користе се методе теорије сличности и одговарајући бездимензиони бројеви, ради једноставнијег решавања добијених парцијалних диференцијалних једначина.

Ребиндеров број (Rb) дефинисан је односом количине топлоте доведене материјалу за загревање и количини топлоте утрошене на испаравање влаге, у бесконачно малом временском интервалу, према (3.5). Ребиндеров ⁷ број зависи од темпе-

ратурног коефицијента сушења b (као основне карактеристике кинетике сушења) и специфичног топлотног капацитета влажног материјала и топлоте испаравања воде (као карактеристика које зависе од особине везе воде и материјала).

$$Rb = \frac{c}{r_0} \frac{dt_m}{du} = \frac{c}{r_0} b \quad (3.5)$$

Ребиндеров број се може приказати у функцији промене влажности материјала на различитим температурама сушења (Слика 3.6). За период константне брзине сушења је $Rb=0$.

Ликовљев број (Lu) дефинисан је количником коефицијента молекуларне дифузије воде и топлотне дифузивности, према (3.6),

$$Lu = \frac{D_m}{a} \quad (3.6)$$

где су: D_m - коефицијент молекуларне дифузије у m^2/s ; a - температурна дифузивност у m^2/s . Ликовљев број карактерише инерцију ширења температурног поља у односу на поље садржаја воде (концентрационо поље). Функција промене Lu броја у зависности од влажности материјала $Lu = f(u)$ најчешће је линеарна (Слика 3.7).

Период опадајуће брзине сушења, период II (C-D) (Слика 3.3) и (Слика 3.4), имајући у виду претходно наведене релације и појмове, као и једначину (3.4), можемо описати сређеним обликом једначине према (3.7),

$$q_g = \rho_{sm} r_0 S \frac{du}{d\tau} (1 + Rb) \quad (3.7)$$

$$Ki = Ki_m Lu Ko (1 + Rb) \quad (3.8)$$

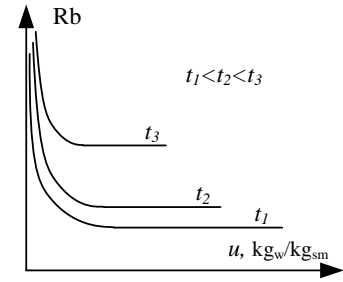
односно једначином (3.8), након узимања у обзир релација (1.107), (1.108), (3.6) и (1.109). Производом Ko и Rb бројева добија се бездимензиони температурни коефицијент сушења, према (3.9),

$$B = Ko Rb \quad (3.9)$$

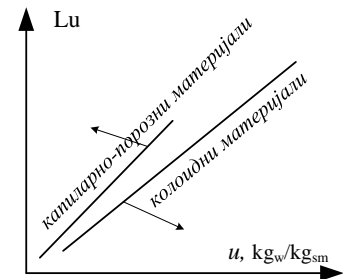
чиме се једначина (3.8) трансформише у (3.10).

$$\frac{Ki}{Ki_m} = Lu (Ko + B) \quad (3.10)$$

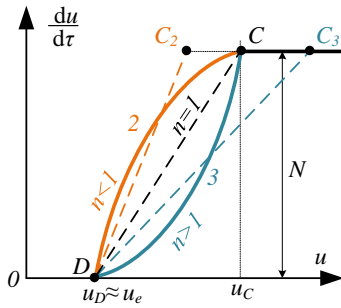
Међутим, за коришћење једначина (3.7), (3.8), (3.9) и (3.10), неопходно је познавати брзину сушења материјала. Током периода опадајуће брзине сушења брзина сушења зависи од влажности материјала, а ова зависност може имати најразличитије функционалне облике (промене 1 до 5, Слика 3.4). Према Ликову, свођење функција сложенијих облика потреб-



Слика 3.6: Зависност Rb броја од влажности материјала на различитим температурама сушења.



Слика 3.7: Промена Lu броја у функцији влажности материјала.



Слика 3.8: Графо-аналитички поступак одређивања критичне влажности материјала према Ликову.

Поступак предвиђа да се из тачке D, која означава крај периода опадајуће брзине сушења, повлачи права линија тако да је грешка одступања од сложене функције што мања. Критична тачка C, наћи ће се у пресеку са линијом $du/d\tau = N = const$. У зависности од карактера сложене функције, може се десити да положај критичне тачке, која је добијена графичким путем (тачке C₂ и C₃ су добијене за криве 2 и 3), одступи (буде мање/веће вредности влажности материјала) у односу на реалан положај критичне тачке (тачка C је реална критична тачка са правом вредношћу критичне влажности). Према Ликову, ово одступање се креће у границама прихватљивих вредности у смислу тачности поступка. n - експонент у једначини (3.16).

но апроксимирати једначинама са минималним бројем параметара, односно правим линијама, за шта се предлаже одговарајући графо-аналитички поступак (Слика 3.8).

Резултат графо-аналитичког поступка упрошћавања је права линија која спаја критичну тачку C влажности u_C (тзв. критична влажность) и тачку D влажности u_D која означава крај периода опадајуће брзине сушења и успостављање хигротермалне равнотеже, при чему је $u_D \approx u_e$ равнотежна влажность материјала. Поједностављени облик једначине криве брзине сушења у периоду опадајуће брзине сушења, захваљујући упрошћењем које је постигнуто графо-аналитичким поступком, представљен је према (3.11),

$$-\frac{du}{d\tau} = K(u - u_e) \quad (3.11)$$

где је: K - коефицијент пропорционалности или коефицијент сушења у $1/s$. Коефицијент сушења K је пропорционалан брзини сушења $du/d\tau = N = const$. постигнуте током периода константне брзине сушења, а може се одредити према (3.12),

$$K = \frac{N}{u_C - u_e} = \varkappa N \quad (3.12)$$

где су: \varkappa - релативни коефицијент сушења, који зависи од особина материјала и почетне влажности материјала; N - брзина сушења током периода константне брзине сушења. Интеграцијом једначине (3.11) добија се (3.13),

$$\frac{u - u_e}{u_C - u_e} = e^{(-K\tau)} = e^{(-\varkappa N\tau)} \quad (3.13)$$

Логаритмовањем израза (3.13) добија се облик једначине (3.14),

$$\ln(u - u_e) = \ln(u_C - u_e) - K\tau \quad (3.14)$$

одакле се даље може одредити коефицијент сушења током периода константне брзине сушења, према (3.15),

$$K = \frac{\ln \frac{u_1 - u_e}{u_2 - u_e}}{\tau_2 - \tau_1} \quad (3.15)$$

Комбиновањем једначина (3.11) и (3.12), се може доћи до израза (3.16),

$$-\frac{1}{N} \frac{du}{d\tau} = \varkappa (u - u_e)^n \quad (3.16)$$

где је: n - експонент који зависи од особина материјала. Тако ће за $n = 1$ једначина (3.16) бити идентична једначини (3.11), док ће за вредности $n < 1$ описивати криву 2, односно за $n > 1$ описивати криву 3, на (Слика 3.8).

Период константне брзине сушења, период I (B-C) (Слика 3.3) и (Слика 3.4), карактерише непроменљива температура материјала $dt_m/d\tau = 0$, тако да ће се, на основу једначине (3.3), целокупан доведени топлотни проток на површ материјала утрошити на испаравање влаге, према (3.17),

$$q_g = \rho_{sm} r_0 \frac{1}{S} \frac{du}{d\tau} \quad (3.17)$$

што значи да важи релација (3.18),

$$q_g = j_g r_0 \quad (3.18)$$

односно узимајући у обзир да је $du/d\tau = N = const.$ важиће једначина (3.19)

$$j_g = \rho_{sm} \frac{1}{S} \frac{du}{d\tau} = \rho_{sm} \frac{1}{S} N \quad (3.19)$$

У даљим разматрањима потребно је разликовати *интензитет испаравања*⁸ од *брзине сушења*. Функционална веза између ових величина приказана је једначином (3.20),

$$j_g = \left(\frac{\dot{m}_p}{A} \right) = - \frac{\rho_{sm.uk}}{S} \left(\frac{du}{d\tau} \right) \quad (3.20)$$

где су: $j_g = \dot{m}_p/A$ - интензитет испаравања влаге са површи материјала у $kg_w/(m^2s)$; $du/d\tau$ - брзина сушења у $kg_w/(kg_{sm}s)$; A - површина сувог материјала у m^2 ; S - специфична површина (дисперзност) материјала према (1.1) у $1/m$; $\rho_{sm.uk}$ - укупна⁹ густина сувог материјала у kg_{sm}/m^3 .

$$Ki = Ki_m LuKo \quad (3.21)$$

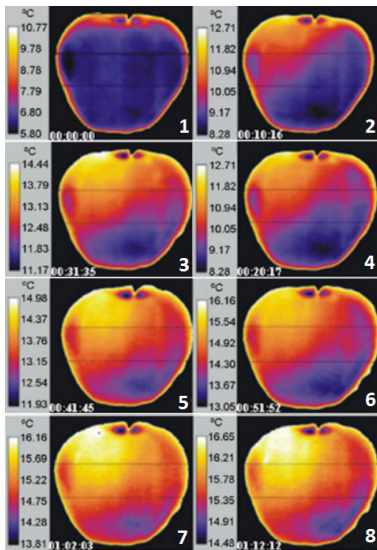
Имајући у виду да је током периода константне брзине сушења температурни коефицијент $b = 0$, а тиме и $Rb=0$, једначина (3.8) ће се трансформисати у (3.21).

3.4 Температура материјала

У техници сушења је неопходно познавати и пратити температуру материјала који се суши, а која зависи од фазе/периода сушења. За време *периода константне брзине сушења*, температура материјала се не мења и једнака је температури по влажном термометру на датим параметрима агенса за сушење, а сва доведена топлота се троши искључиво на испаравање влаге са површи материјала. У случају довођења додатне количине топлоте (више него што је неопходно)

8: *Интензитет испаравања или специфични масени проток влаге* представља масу влаге која је испарилa по јединици површине осушеног материјала по јединици времена.

9: За разлику од *густина* сувог материјала (ρ_{sm}) која узима у обзир само густину чврсте материје (скелета материјала), *укупна густина* сувог материјала ($\rho_{sm.uk}$) узима у обзир и затворене и отворене поре.



Слика 3.9: Термовизијски приказ површи пресека јабуке током неколико узастопних временских интервала током конвективног загревања топлим агенсом. [27]

Термовизија је начин безконтактног мерења температуре неке површи, односно инфрацрвеног зрачења које посматрана површина емитује. Свако тело које се налази на температури већој од температуре апсолутне нуле, са своје површине емитује у околину електромагнетне таласе (зрачење) пропорционално сопственој температури тела. Инфрацрвени део емитованог спектра, који подразумева електромагнетне таласе таласних дужина од 0,7 до 14 μm , може се користити за одређивање температуре тог тела.

Слика 3.10: Илустрација профила температуре површине и центра материјала у времену, и садржаја воде материјала. [28]

Код појединих материјала (најчешће оних који се суше у спреј сушарама) није неуобичајено да се на почетку процеса температуре централних слојева и површинских слојева материјала разликују краћи временски период.

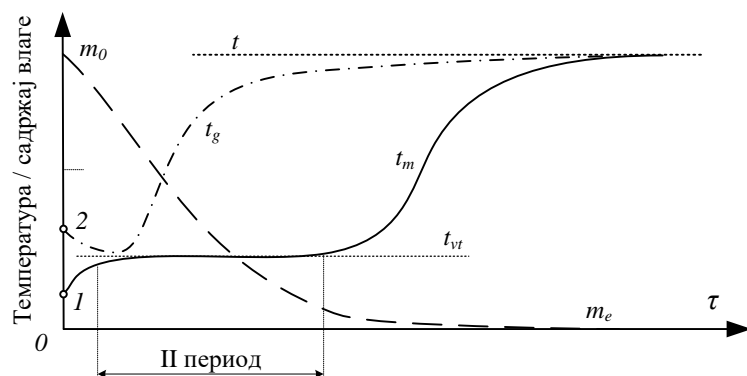
температура површи материјала може бити и већа од поменуте. Током овог периода фронт испаравања се налази на површи материјала. Померањем фронта испаравања ка унутрашњости материјала, испаравање ће се дешавати унутар материјала, тако да ће температура централних слојева материјала t_m бити нижа од температуре површинских слојева t_g (Слика 3.10). На тај начин формираће се температурни градијент кроз осушене слојеве материјала, односно, почеће да расте средња температура материјала. Како материјал постепено достиже критичну тачку C влажности u_C , наступа *период оштравајуће брзине сушења*, и температура материјала почиње да расте, постепено достижући температуру околине t (крива број 2, Слика 3.3).

Бездимензиони *температурни коефицијент сушења* је показатељ карактеристика локалне промене температуре материјала при промени његове влажности, према (3.22),

$$B = b \frac{\Delta t_m}{\Delta u} = \frac{\partial(t_m/t)}{\partial(u/u_0)} \quad (3.22)$$

где су: B - бездимензиони температурни коефицијент сушења; b - температурни коефицијент сушења; t_m - средња температура материјала; u - средња влажност материјала; t - температура околине (крајња температура материјала); u_0 - почетна влажност материјала.

У техници сушења је пожељно пратити температуру материјала у реалном времену како би се налазила у опсегу дозвољених вредности (Слика 3.9). Измерене вредности температуре се даље користе за управљање процесом сушења. Код вакуумског сушења је ова контрола још захтевнија јер се мора избећи кључање воде које се овде дешава на много нижим температурама. Неадекватна температура материјала може довести до Маилардове реакције у материјалу или достизања температуре транзиције.



Динамика сушења се бави међусобним односом величина проучаваних у кинетици сушења и њиховом повезаношћу и међусобном утицају у сваком тренутку времена трајања процеса сушења. То подразумева познавање расподеле садржаја влаге унутар материјала, познавање поља притиска и температуре унутар материјала, као и градијената поменутих величина унутар материјала. Аналитичко проучавање процеса кретања влаге у корелацији са временски променљивим пољем температура материјала на различитим локалним притисцима, веома је сложено, имајући у виду број и разноликост могућих механизма преношења топлоте и масе. Решавање једначина преношења масе, енергије и количине кретања, отежано је немогућношћу независног одређивања бројних термофизичких параметара заступљених у изразима који описују посматране процесе, а јављају се услед нехомогености и анизотропије материјала који се суши.

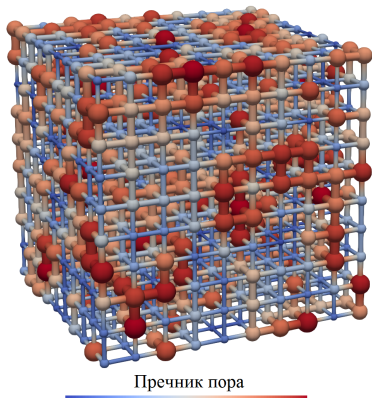
Већина прехранбених материјала (корење и лишће биљака, плодови, житарице и слично) спада у групу капиларно порозних материјала. Њима се придружују и многи други непрехрамбени материјали попут грађевинских материјала, керамике, камена, термоизолационих материјала и слично. Из тог разлога, већина теорија сушења описује динамичке процесе преношења влаге и топлоте управо у капиларно-порозним материјалима. Теоријску основу за проучавање протока влаге кроз порозан материјал, поставља Хенри Дарси,¹ формулисањем Дарсијевог закона² једначином (1.36), који је на порозне материјале примењив само под одређеним специфичним условима (нпр. постојање ламинарног кретања течности, и слично). Закон је претходио појављивању осталих теорија сушења које су све базиране на претпоставкама важења теорије континуума у домену посматрања. На основу скоро стогодишњег периода истраживања сушења порозних материјала, генерално може се приметити да се истраживања у вези са теоријом сушења крећу у три правца:

- Први правац обухвата истраживања која су усмерена на потенцијал сушења порозних материјала услед постојања једне доминантне погонске силе процеса. Ова истраживања довела су до формулисања неколико битних теорија сушења (Табела 4.1), као што су: Теорија дифузионог преношења влаге (енг. *Diffusion theory*),

4.1 Теорије сушења засноване на постојању градијената потенцијала преношења	95
4.2 Теорије сушења засноване на микроскопском посматрању структуре материјала	106

1: *Henry Darcy* (1803-1858) је француски инжењер који се бавио хидрауликом и инжењерским проблемима који се јављају приликом струјања флуида кроз порозне материјале. Школовао се на чувеној *École Polytechnique* у Паризу. Живео и радио у Дијону, Француска.

2: О овоме је већ било речи у претходним поглављима, код увођења у разматрање појма *термеабилности*, на страни 19.



Слика 4.1: Илустрација визуелизованог модела мреже пора у 3D простору. [29]

3: Етилен гас у плодовима се природно јавља услед сазревања плодова или може настати када су биљке на неки начин повређене. Етилен је незасићени угљоводоник C_2H_4 , а на собној температури је безбојан, сладуњавог мириса и запаљив.

Теорија капиларног преношења влаге (енг. *Capillary theory*) и Теорија испаравања-кондензације у порозним материјалима (енг. *Evaporation-condensation theory*).

- ▶ Други правац обухвата истраживања усмерена ка откривању природе феномена сушења, узимају у обзир термофизичке особине и структуру материјала. Моделли који произилазе из ових истраживања су вишепараметерски и засновани су на принципима теорије континуума. Ова истраживања довела су до неколико битних теорија (Табела 4.1): Теорија Ликова (енг. *Luikov drying theory*), Теорија Филипа и Де Вриеса (енг. *Philip and De Vries theory*) и Теорија Кришера (енг. *Krischer theory*)
- ▶ Трећи правац обухвата савремена истраживања сушења порозних материјала на микроскопском нивоу величине пора, мреже/канала пора и скелетне микроструктуре порозног материјала. Теорија мреже пора (енг. *pore-scale, pore network modelling, channel network*) има за циљ добијање макроскопских параметара преношења и осталих података у континуираном просторном моделу. Модел је описан каналском мрежом (Слика 4.1) која, током процеса сушења порозног материјала, каналише/спроводи течну или парну фазу флуида. Дистрибуција флуида у простору може се описати статистичким параметрима еквивалентне каналске мреже за опис правила струјања. Описивање структуре и облика порозног материјала у овим истраживањима често се базира на принципима фракталне геометрије применом фракталних димензија и карактеристика.

Сложеност проучавања процеса сушења порозних материјала огледа се у вишефазности, вишеразмерности и мултидисциплинарности физичких појава и процеса који улазе у разматрање.

Вишефазност се огледа у облицима у којима је релевантна материја присутна током процеса сушења. У чврстом стању налази се скелет материјала који се суши, али исто тако и лед у материјалу уколико се ради о процесу лиофилизације. У течном стању се налази вода у материјалу, која може бити слободна или везана. У гасовитом стању се налази водена пара и сув ваздух (O_2 , N_2 и CO_2), као и други гасови (нпр. етилен³ код воћа).

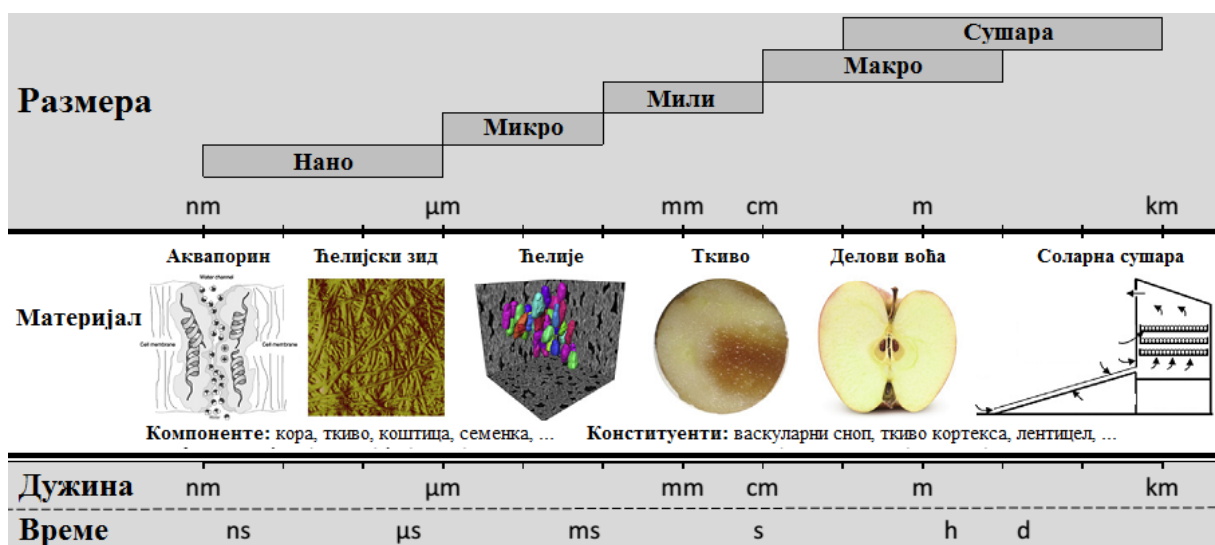
Вишеразмерност у посматрању процеса сушења проистиче из могућности посматрања ових процеса на више димензионих нивоа (Слика 4.2). Посматрање процеса *на нивоу коморе сушаре или целог њосипројења за сушење* ($\approx 10^{-1} - 10^3 m$), карактерише приступ да се појединачни комади/производи ко-

ји се суше у комори могу се разликовати, али се сматрају хомогеним. Конститутивни елементи комада се у оваквом приступу не узимају у обзир, већ је фокус на целом комаду (нпр. део јабуке или цела јабука). Посматрање у *макро-размери* ($10^{-2} - 10^1 \text{m}$) може обухватити постојање макро-пукотина али се материјал и даље сматра хомогеним. Даљим кретањем ка мањим димензијама у фокус долазе *микро-размере* ($10^{-6} - 10^{-4} \text{m}$) макро и микро поре, микро-капилари, влакна, микро-кристали, ћелије, итд., а на овом нивоу посматрања могуће је да се узорци не могу сматрати хомогеним. Напокон, посматрање у *нано-размерама* ($10^{-6} - 10^{-9} \text{m}$) обухватиће нано-капиларе, ћелијске зидове и мембране, и аквапорине⁴.

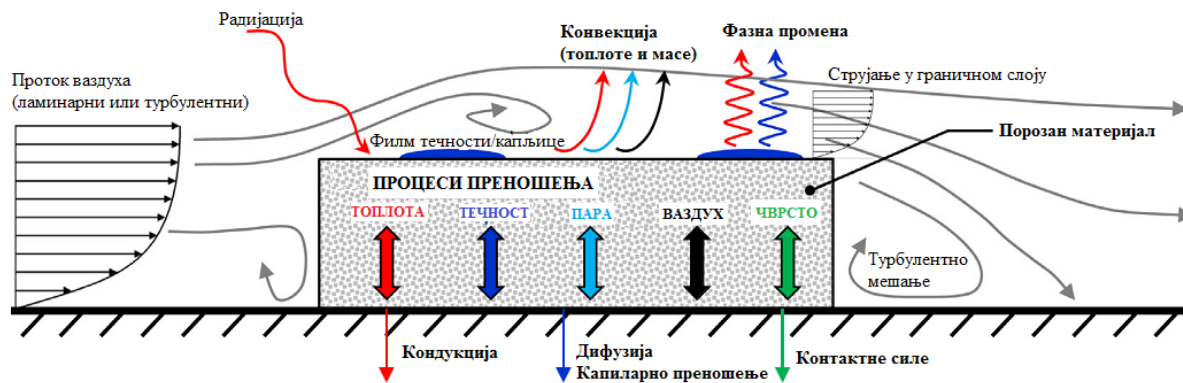
4: Аквапорини, који се називају још и водени канали, су протеини који формирају поре у мембрани биолошких ћелија, углавном олакшавајући транспорт воде између ћелија.

Табела 4.1: Поређење различитих теорија сушења порозних материјала заснованих на принципима теорије континуума.[30]

Теорија	Научник	Стање влаге	Узрок кретања
Теорија дифузије	W.K.Lewis	Течност	Градијент концентрације
Капиларна теорија	E.Buckingham	Течност	Капиларне силе
Теорија испаравања-кондензације	P.S.H.Herry	Течност Пара	Градијент притиска Градијент температуре
Теорија Ликова	A.V.Luikov	Пара, Течност Пара, Течност Пара, Течност	Градијент концентрације Градијент температуре Градијент притиска
Теорија Филипа и Де Вриеса	J.R.Philip, D.A.De Vries	Пара Пара Течност	Градијент концентрације Градијент температуре Капиларне силе
Теорија Кришера, Бергера и Пеија	O.Krischer, D.Berger, D.C.T.Pei	Течност Течност Пара Пара	Градијент концентрације Градијент притиска Градијент концентрације Капиларне силе



Слика 4.2: Илустрација вишеразмерности у посматрању процеса сушења јабуке [31]



Преношена величина	Топлота	Маса течност	Маса пара	Маса ваздух	Маса чврсто
Механизам преношења	Дифузија (Фурје, дифузија масе, Дуфоров ефекат) Конвекција (маса)	Дифузија (капиларна, осмотска, површинска, термо) Конвекција (Дарси)	Дифузија (Фик, Кнудсен, Сорет) Конвекција (Дарси)	Дифузија (Фик, Кнудсен, Сорет) Конвекција (Дарси)	Механичка деформација
Запремински извор/ понор	Промена фазе (Топлота испаравања, топлота десорпције) Електромагнетна радијација (нпр. микроталаси) Хемијско везивање/ ослобађање енергије	Промена фазе (испаравање, десорпција) Хемијско везивање/ ослобађање воде Гравитација	Промена фазе (испаравање, десорпција)		Гравитација
Погонска сила	Температура Концентрација (гаса)	Капиларни притисак (површински напон) Притисак гаса/ течности Концентрација (раствора) Температура	Притисак гаса Концентрација (паре) Температура	Притисак гаса Концентрација (сувог ваздуха) Температура	Садржај воде Температура
Механизми размене	Конвекција Радијација (соларна, инфрацрвена) Промена фазе (латентна топлота испаравања) Кондукција (контактна)	Промена фазе (испаравање) Дифузија (нпр. осмотска) Капиларне силе	Конвекција	Конвекција	Контактне силе

Слика 4.3: Процеси преношења енергије, масе и количине кретања унутар порозних материјала, као и процеси размене истих између површи материјала и његове околине. [31]

Мултидисциплинарности физичких појава потиче из истовременог преношења енергије, масе и количине кретања унутар материјала, и такође процеса размене истих између површи материјала и његове околине (Слика 4.3). Процеси преношења и размене су изазвани примењеном техником сушења и особинама коришћених материјала. Поред свих физичких процеса који се јављају током сушења (Слика 4.4), могу се појавити и биохемијски и биолошки процеси. Типични примери су процеси разградње који доводе до смањења задржавања хранљивих материја и ензима, промене у ароми или боји, оксидације масти или микробиолошких активности. Стога, веома је тешко издвојити и посматрати процес сушења независно од свих осталих процеса који се паралелно њему дешавају у материјалу. Главни разлог за изоловано посматрање/таргетирање самог процеса сушења порозног прехранбеног материјала је то што је његово разумевање кључни аспект за процену и оптимизацију процеса сушења, јер утиче на квалитет производа, губитке производа и са тим у вези потрошњу енергије, енергетску ефикасност и могућу рекулперацију отпадне топлоте из процеса.

4.1 Теорије сушења засноване на постојању градијената потенцијала преношења

Теорија дифузионог преношења влаге (енг. *Diffusion theory*) заступа становиште да је дифузија влаге основни механизам протока влаге кроз порозан материјал. Дифузија се дешава унутар fine структуре материјала коју чине капиларе, поре и мале шупљине испуњене паром. Влага дифундује ка спољашњој средини и са површине материјала одлази у околни агенс који га опструјава. Нажалост, дифузиона теорија не узима у обзир контракцију (скупљање) материјала, стварање чврсте покорице нити постојање сорпционих изотерми. Сви начини дифузије влаге кроз порозан материјал су истовремено обухваћени једним коефицијентом дифузије који се назива *ефективни коефицијент дифузије*⁵, а који фигурише у формалном облику Фиковог закона дифузије (1.87). Овај приступ први је предложио американац Ворен Луис,⁶ за описивање процеса сушења танког слоја порозних хигроскопних материјала током периода опадајуће брзине сушења при непроменљивим особинама агенса/ваздуха. По њему се најједноставнији приступ описивању процеса сушења се базира на описивању процеса сушења капиларно-порозних материјала низом једначина од (3.11) до (3.16) (страница 88).



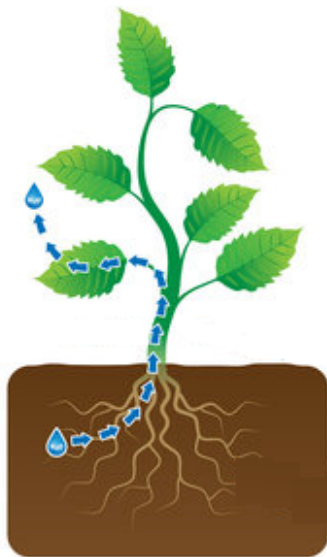
Слика 4.4: Илустрација мултидисциплинарности физичких појава. [32]

T - температура,
 RH - релативна влажност (енг. *relative humidity*),
 w - брзина.

5: О ефективном коефицијенту дифузије је већ било речи у претходним поглављима (страница 43), где је описан једначинама (1.87) и (1.88). Такође, начин одређивања ефективног коефицијента дифузије приказан је на страни 120.

6: *Warren K. Lewis* (1882-1975) је амерички професор МИТ Универзитета, који се сматра оснивачем модерног хемијског инжењерства. Први је увео концепт технолошких операција у описивању фаза и поступака неког технолошког процеса.

7: *Joseph Böhm* (1831-1893) је аустријски ботаничар. Истраживао је како вода и минерали путују на великим растојањима, тј. од корена биљке кроз њено стабло до горњих делова биљке (Слика 4.5), супротстављајући се дејству силе гравитације. [33]



Слика 4.5: Илустрација капиларног кретања воде кроз биљку.

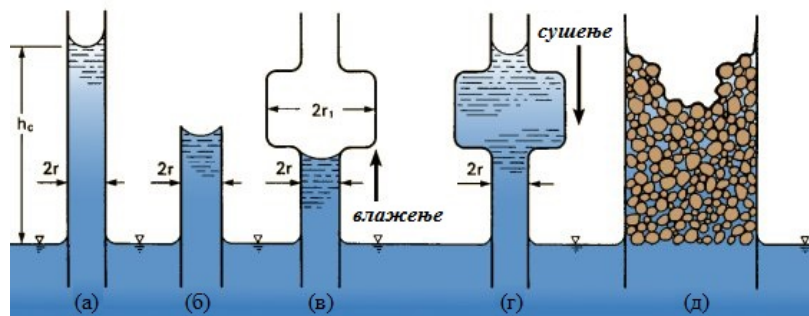
8: *Edgar Buckingham* (1867-1940) је амерички физичар. Бавио се истраживањем кретања влаге кроз земљиште комбинујући теорије преношења влаге и енергије у физици земљишта.

Слика 4.6: Феномени капиларног преношења течности у капиларним цевима различитог пречника. [14]

(а) капилара висине $h_c < h_{max}$,
 (б) капилара висине $h_c = h_{max}$,
 (в), (г) капиларе са проширењем,
 (д) порозан материјал у улози капиларног проводника течности.
 r и r_1 - полупречници капиларе,
 h_c - висина стуба течности у капилари.

Теорија капиларног преношења влаге (енг. *Capillary theory*) описује проток течне влаге кроз материјал услед постојања капиларних сила и феномена, а процеси који се при том дешавају убрајају се у кључне механизме преношења влаге у течном стању кроз посматрани материјал. Идеја о постојању капиларних сила у цевима и каналићима малих пречника и димензија заслужним за унутрашњи транспорт воде припада Јозефу Бему.⁷ Капиларне силе се сматрају главним силама одговорним за колапс структуре материјала, а противтежа овим силама изазива стварање пора и отежава скупљање материјала. Такође, капиларне силе су повезане са засићеношћу капиларно-порозне структуре матрице материјала водом.

Кључни појмови, од значаја за капиларно преношење течности, јесу *порозност* и *пермеабилност* материјала који се суши. Капиларно кретање течности (тзв. капиларни проток влаге) дешава се у порозној средини, а узрок овог кретања се може приписати интермолекуларним силама између течне и чврсте фазе, које су јаче од интермолекуларних сила унутар течне фазе, чиме се и објашњава зашто течна фаза мигрира у порозној структури. Овај ток течности је пропорционалан градијентима капиларног притиска и може се назвати *капиларним пошеницијалом* према Е. Бакингеу.⁸ Пошто је капиларни притисак функција и садржаја влаге и температуре, капиларни проток течности може се разложити као збир масеног тока пропорционалног температурном градијенту и масеног тока пропорционалног градијенту концентрације влаге. Принципи на којима се теорија капиларног преношења влаге заснива искоришћени су за описивање процеса кретања влаге кроз материјал током његовог сушења. Према општеприхваћеној теорији, током *периода константне брзине сушења*, влага се креће из унутрашњих слојева материјала ка површинским слојевима управо захваљујући капиларним својствима преношења влаге (Слика 4.6). Капиларни проток влаге је током овог периода уравнотежен са интезитетом испаравања влаге са површи материјала.

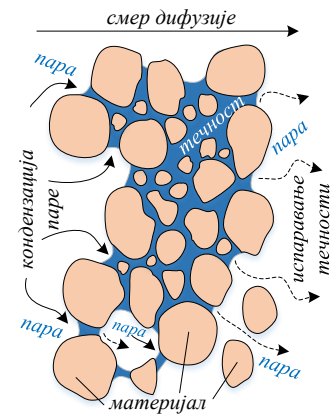


Теорија испаравања-кондензације у порозним материјалима (енг. *Evaporation-condensation theory*) заснива се на појави да се водена пара при напуштању централних слојева материјала поново кондензује (рекондензује) у слојевима материјала блиским спољашњој површи материјала (Слика 4.7). Претпоставља се да је интензитет кондензације једнак интензитету испаравања воде са површи материјала, и да не постоји акумулација воде у порама близу спољашње површи. Теорија узима у обзир истовремено преношење топлоте и масе кроз непрекидну повезаност пора унутар материјала који се суши. Феномени преношења су описани једначинама преношења масе (1.89) и топлоте (1.90) на страни 44. У том контексту, *модификован Луисов број* (Le_m) (4.1), користи се код одређивања величине утицаја преношења топлоте на процес сушења, односно код оправданости занемаривања топлотних утицаја. При вредностима модификованог Луисовог броја $Le_m > 60$ оправдано је занемарити топлотне утицаје на процес сушења, тј. једначину (1.90).

$$Le_m = \frac{\lambda_{sm} \left[\epsilon + (1 - \epsilon)\rho_{sm}\beta \right]}{D_{ik}(1 - \epsilon) \cdot \rho_{sm}(c_{sm} + c_w M_w + r_0\gamma)} \quad (4.1)$$

где је: Le_m - модификован Луисов број; λ_{sm} - топлотна проводљивост сувог материјала; ϵ - порозност материјала; β и γ - константе; D_{ik} - унутрашњи коефицијент дифузије који се јавља услед испаравања и рекондензације влаге унутар материјала; ρ_{sm} - густина сувог материјала; c_{sm} - специфични топлотни капацитет сувог материјала; c_w - специфични топлотни капацитет воде; r_0 - латентна топлота испаравања воде; M_w - моларна маса воде. За разлику од Луисовог броја (1.98), модификовани Луисов број узима у обзир порозност материјала, и разлике у особинама сувог скелета материјала и влаге у материјалу, преко одговарајућих коефицијената и физичких константи. При вредностима $Le_m < 60$, једначине преношења масе и топлоте се морају решавати истовремено како би се прецизно предвидело понашање материјала током сушења. Према великом броју истраживања утврђено је да за већину биолошких материјала важи $Le_m > 60$, односно да унутрашњи отпори контролишу преношење масе током процеса сушења.

Теорија Ликова (енг. *Luikov drying theory*) базира се на идеји да се поједини механизми преношења влаге и топлоте не проучавају засебно већ да се пажња посвећује само укупним ефектима изазваним градијентима одговарајућих потенцијала преношења који се јављају током сушења. Идеја потиче од руског научника А. В. Ликова⁹, а базира се на принципима



Слика 4.7: Илустрација испаравања-кондензације влаге при кретању кроз материјал.

⁹ Алексеј Василевич Ликов (1910-1974) је руски (белоруски) научник који се бавио феноменима преношења масе и топлоте [34] и теоријом сушења [35]. У његову част Институт Националне Белоруске академије наука у Минску (Белорусија), носи његово име "A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute".

неповратних термодинамичких процеса.

Теорија сушења по Ликову се у основи базира на математичком моделу представљеном системом парцијалних диференцијалних једначина преношења масе (4.2), енергије (4.3) и количине кретања (импулса) (4.4) које представљају полазну основу за даљу анализу.

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = k_{11} \nabla^2 u + k_{12} \nabla^2 T + k_{13} \nabla^2 P \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = k_{21} \nabla^2 u + k_{22} \nabla^2 T + k_{23} \nabla^2 P \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = k_{31} \nabla^2 u + k_{32} \nabla^2 T + k_{33} \nabla^2 P \quad (4.4)$$

Табела 4.2: Одређивање феноменолошких коефицијената према Ликову.[35]

$k_{i,j}$	Начин одређивања
k_{11}	$= D_m$
k_{12}	$= D_m S_o = D_{td}$
k_{13}	$= \frac{\beta_p}{\rho_m} = D_p c_p$
k_{21}	$= \varepsilon \frac{r_0}{c_m} D_m$
k_{22}	$= a + \varepsilon \frac{r_0}{c_m} D_{td}$
k_{23}	$= \varepsilon \frac{r_0}{c_m} D_p c_p$
k_{31}	$= -\frac{\varepsilon}{c_p} D_m$
k_{32}	$= -\frac{\varepsilon}{c_p} D_{td}$
k_{33}	$= D_p (1 - \varepsilon)$

D_m - Коефицијент молекулар. дифузије,
 D_{td} - Коефицијент термодифузије,
 S_o - Соретов број,
 $\beta_p = D_m \rho_{sm} \beta_{rel}$ - Коефицијент конвективног преношења паре,
 β_{rel} - Релативни коефицијент конвективног преношења паре,
 ρ_m - Густина материјала,
 $D_p = \beta_p / (c_p \rho_{sm})$ - Коефицијент конвективне дифузије,
 c_p - Специфичан топлотни капацитет паре,
 ε - Коефицијент фазног прелаза,
 r_0 - Топлота испаравања влаге,
 c_m - Специфичан топлотни капацитет материјала,
 $a = \lambda / (c_p \rho_{sm})$ - температурна дифузивност.

Феноменолошки коефицијенти $k_{i,j} = 1, 2, 3$ зависе од међусобне повезаности величина влажности материјала, температуре и притиска (Табела 4.2). За решавање наведеног система једначина потребно је дефинисати почетне и граничне услове који важе за раније поменуте карактеристичне периоде процеса сушења: период загревања материјала, период константне брзине сушења и период опадајуће брзине сушења. У зависности од конкретног случаја могуће је изоставити из разматрања (занемарити) поједине феноменолошке коефицијенте или целе једначине, чиме ће се поједноставити решавање система једначина.

Постојање градијента притиска ($\nabla P \neq 0$) у материјалу изазива конвективно преношење влаге у материјалу. Ово се по правилу дешава на температурама блиским и већим од температуре кључања течности на посматраном притиску. Код конвективног сушења прехранбених материјала притисци су најчешће једнаки нормалном атмосферском притиску (или занемарљиво мало одступају од њега), док су температуре сушења углавном ниже од температуре кључања воде, а најчешће се крећу у опсегу $40 \div 80^\circ\text{C}$. У литератури је уобичајен приступ да се конвективно преношење влаге занемарује на температурама сушења $< 85^\circ\text{C}$ при атмосферском притиску околине. Последица овог занемаривања ($\nabla P = 0$) је упрошћење система једначина (4.2-4.3-4.4), при чему се елиминацијом једначине преношења импулса (4.4), као и одговарајућих чланова једначина (4.2) и (4.3), систем своди на једначине (4.5) и (4.6).

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = D_m \nabla^2 u + D_{td} \nabla^2 T \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \varepsilon \frac{r_0}{c_m} D_m \nabla^2 u + \left(a + \varepsilon \frac{r_0}{c_m} D_{td} \right) \nabla^2 T \quad (4.6)$$

У класичној теорији сушења уобичајена је претпоставка о непроменљивости термодинамичких особина влажног материјала током процеса сушења. Изглед једначина којима се описују/задају почетни и гранични услови током процеса, остаје непромењен у односу на систем са варијабилним коефицијентима, а термодинамички коефицијенти могу се сматрати независним од температуре и влажности материјала у појединим специјалним случајевима. У складу са тим, једначине (4.5-4.6) могу се написати у облику (4.7-4.8)

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_m \frac{\partial u}{\partial x} + D_{td} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (4.7)$$

$$c_m \rho_m \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \varepsilon r_0 \rho_m \frac{\partial u}{\partial \tau} \quad (4.8)$$

односно, у облику (4.9-4.10).

$$D_m \rho_{sm} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_g + D_{td} \rho_{sm} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_g + j_g = 0 \quad (4.9)$$

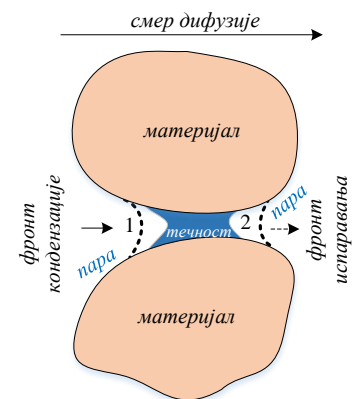
$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_g + q_g - r_0 (1 - \varepsilon) j_g = 0 \quad (4.10)$$

Коефицијент фазног прелаза влаге (ε) је у општем случају функција облика $\varepsilon = f(u, T)$, може имати вредности у опсегу $0 \leq \varepsilon \leq 1$, и показује колики је удео влаге која се кроз материјал преноси у парном облику.¹⁰

У случају сушења материјала у танком слоју (енг. *thin layer drying*) може се сматрати да је материјал који се суши довољно танко исечен/уситњен/насут да се у тако танком слоју може занемарити постојање градијента температуре у правцу кретања влаге. У наведеним случајевима може се сматрати да је вредност градијента температуре у материјалу $\nabla T \approx 0$, односно да нема преношења влаге термодифузиром $D_{td} = 0$, чиме се једначина (4.5) може трансформисати у облик (1.87), што практично представља Фиков закон дифузије влаге (страна 43). Ова претпоставка може се поставити и код сушења материјала где се период загревања материјала може занемарити.

Теорија Филипса и Де Вриеса (енг. *The Philip and De Vries theory*) претпоставља преношење паре кроз порозан чврсти скелет материјала тако да се на појединим местима у материјалу пара кондензује и потом поново испарава (Слика 4.8) на фронтима 1 и 2 следствено, при чему се између фронтова краткотрајно јавља капиларни проток течности. Теорија узима у обзир вредности активности воде у материјалу тако

10: Уколико је $\varepsilon = 0$ влага се кроз материјал преноси у потпуно течном стању (нема промене фазе), што је случај током **перриода константне брзине сушења**. У општем случају може се десити да је $0 \leq \varepsilon \leq 1$, и тада се ради о **перриоду оштрајуће брзине сушења**. Коначно, током **перриода успостављања хидротермичке равнотеже** може се сматрати да је $\varepsilon = 1$ и да се влага кроз материјал креће у парном стању.



Слика 4.8: Илустрација фронтва кондензације и испаравања влаге.

што прелазном вредношћу активности воде сматра вредност активности воде $a_w = 0,6$. Теорија претпоставља да се на тој вредности дешава прелаз из физичке адсорпције у капиларну кондензацију течности, односно да за $a_w < 0,6$ доминира физичка адсорпција, као форма везивања влаге за структуру материјала, односно за $a_w > 0,6$ доминирају капиларне силе. Под одређеним условима се једначине Ликовљеве теорије могу свести на једначине теорије Филипа и Де Вриеса. Процесе преношења масе и топлоте, услед постојања градијената концентрације и температуре као покретачких потенцијала у порозном материјалу, Филип и Де Вриес описују системом једначина које описују проток масе (4.11) и проток топлоте кроз порозан материјал (4.12),

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \nabla \cdot (D_{ef} \nabla u) + \nabla \cdot (a_{ef} \nabla T) + \frac{\partial k}{\partial z} \quad (4.11)$$

где је: $a_{ef} = a_p + a_t$ - укупна (ефективна) дифузивност која обједињује дифузивност парне (a_p) и течне фазе (a_t) воде; k - коефицијент пермеабилности флуида према (1.36); и

$$\rho_{sm} c_{sm} \frac{\partial T}{\partial \tau} = r_0 \nabla \cdot (D_p \nabla u) + \nabla \cdot (\lambda_{ekv} \nabla T) \quad (4.12)$$

где је: D_p - коефицијент конвективне дифузије према (1.96); λ_{ekv} - еквивалентна топлотна проводљивост материјала према 1.29). Теорија Филипа и Де Вриеса узима у обзир физичка својстава материјала, те је тачнија од теорије дифузије у теоријском смислу. Међутим, у практичном смислу је непрецизнија јер је та иста физичка својства материјала веома тешко експериментално измерити у стварности.

Теорија Кришера (енг. *Krischer theory*) обједињује претходна истраживања преношења масе и топлоте приликом процеса сушења порозних материјала. Истраживања Кришера¹¹ представљају основе на којима се развила *ойишша теорија сушења*. Основна претпоставка на којима се теорија заснива јесте да је пренос влаге контролисан комбинованим утицајем капиларног протока течности и дифузионог преношења паре кроз порозну структуру материјала. Ова истраживања се надовезују на теорију испаравања и кондензације влаге у порозним материјалима. Проток течности кроз порозан материјал одређује се из Дарсијевог закона (1.36), а проток паре једначинама налик једначини Ликова (1.86). Главне потешкоће јављају се приликом експерименталног одређивања брзине сушења, због које је неопходно прецизно дефинисати почетне и граничне услове, као и равнотежне вредности појединих коефицијената и променљивих на почетку процеса сушења. Услед ограничења по питању научно-технолошког

11: *Otto Krischer* (1899-1976) је немачки научник и професор на Универзитету Карлсрух (данас *Karlsruhe Institute of Technology*), познат по свом раду на научним основама технологија сушења публикованом у књизи "*Trocknungstechnik*" [36]. Крива промене брзине сушења у функцији влажности материјала (Слика 3.4) назива се Кришерово крива.

нивоа експерименталне опреме, у време постављања Кришерове теорије нису постојала сазнања о унутрашњој структури скелета материјала која држи воду, односно разматрања проблема на микро-нивоу, што је учинило да теоријска истраживања о сушењу порозне средине споро напредују.

Теорија Бергера и Пеија (енг. *Berger and Pei theory*) надвезује са на теорију Кришера и представља покушај да се ова теорија употпуни. Бергер и Пеи су додатно узели у разматрање емпиријске једначине сорпционе изотерме и заједно их са корелационим једначинама преношења масе (течна и парна фаза воде) и преношења топлоте укључили у модел сушења. Теорија Бергера и Пеија базира се на следећим претпоставкама:

- ▶ течност се у материјалу креће услед постојања капиларног протока и градијента концентрације;
- ▶ дифузија паре се дешава услед постојања градијента притиска;
- ▶ топлота се кроз скелет материјала преноси кондукцијом;
- ▶ садржај влаге, парцијални притисак паре и температура влаге су у стању равнотеже у свакој тачки материјала;
- ▶ све топлотне и физичке особине су непроменљиве у времену;
- ▶ важе поставке Фиковог закона дифузије;
- ▶ притисак испаравања воде је једнак притиску засићене водене паре при максималним вредностима сорпције;
- ▶ Клаузијус-Клапејронова једначина¹² (енг. *Clausius-Clapeyron equation*) има емпиријски облик (4.13);

$$\rho_p = \left(\frac{1}{R_{gw} T} \right) \exp \left(58,7395 - \frac{6847,36}{T} - 5,62 \ln T \right) \quad (4.13)$$

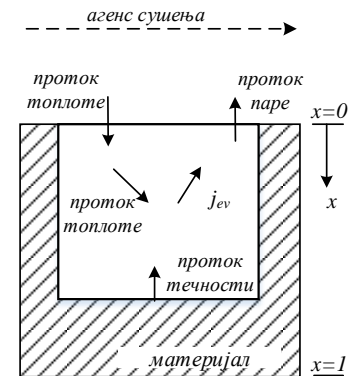
где је: ρ_p - густина водене паре; $R_{gw} = 461,52 \text{ J}/(\text{kg K})$ - гасна константа водене паре; T - температура у К.

- ▶ максимални сорпциони равнотежни садржај влаге је функција температуре према $m_{e,max} = f(T)$;¹³

Теоријски модел који Бергер и Пеи користе у својој теорији (Слика 4.9), представљен је системом диференцијалних једначина који се састоји од једначина преношења влаге и топлоте. Једначина преношења влаге у течном стању има облик (4.14),

$$\lambda_t \rho_t \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - j_{ev} = \rho_t \frac{\partial u}{\partial \tau} \quad (4.14)$$

а једначина преношења влаге у парном стању има облик



Слика 4.9: Теоријски модел коришћен у Теорији Бергера и Пеија.[37]

x - координата, растојање мерено од површи материјала ка унутрашњости;

j_{ev} - интензитет испаравања (евапорације) влаге унутар материјала који се суши.

12: Клаузијус-Клапејронова једначина приказује квантитативни однос између притиска паре супстанце и температуре супстанце, односно предвиђа брзину којом се притисак паре повећава по јединици повећања температуре. Названа је по научницима Рудолфу Клаузијусу и Емилу Клапејрону.

Rudolf Julius Emanuel Clausius (1822-1888) био је немачки физичар и математичар. Сматра се једним од оснивача науке о термодинамици. Својим преправљањем принципа Сади Карноа, познатог као Карноов циклус, пружио је темељнију основу за теорију топлоте. Његов најважнији рад је „О покретној сили топлоте“ (1850). Први је објавио други закон термодинамике. Он је увео концепт ентропије 1865. и теорему о топлоти 1870. године.

Benoit Paul Emile Clapeyron (1799-1864) је француски физичар и инжењер, и један од оснивача термодинамике. Радио је као професор и инжењер у Санкт Петербургу у Русији. Био је члан Француске академије наука.

13: О овоме је већ било речи у поглављу 2.2 на страници 74.

(4.15),

$$a_p \frac{\partial}{\partial x} \left[(\epsilon - u) \frac{\partial \rho_p}{\partial x} \right] + j_{ev} = \frac{\partial}{\partial \tau} \left[(\epsilon - u) \rho_p \right] \quad (4.15)$$

где је: λ_t - коефицијент провођења топлоте течности; ρ_t - густина течности; j_{ev} - интензитет испаравања (евапорације) влаге унутар материјала који се суши; a_p - температурна дифузивност паре; ρ_p - густина паре; ϵ - порозност материјала; u - влажност материјала. Укупно преношење влаге може се одредити сабирањем једначина (4.14) и (4.15). Једначина преношења топлоте има облик (4.16),

$$a_{sm} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{r_0}{\rho_{sm} c_{sm}} \left\{ a_p \left[(\epsilon - u) \left(\frac{\partial^2 \rho_t}{\partial x^2} \right) - \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial \rho_t}{\partial x} \right) \right] + \rho_t \frac{\partial u}{\partial \tau} - (\epsilon - u) \frac{\partial \rho_p}{\partial \tau} \right\} = \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (4.16)$$

где је: a_{sm} - температурна дифузивност материјала; ρ_{sm} - густина материјала; c_{sm} - специфична топлота материјала.

Теорија Виџакера (енг. *Whitaker theory*) представљена је системом једначина којима се истовремено описују преношење топлоте, масе и количине кретања у порозном материјалу. У складу са законима одржања ових величина, теорија узима у обзир и обједињује све механизме преношења масе и топлоте: капиларни проток течности, конвекцију и дифузију течности и паре, као и унутрашње испаравање влаге и пренос топлоте конвекцијом, дифузијом и кондукцијом.

14: *Stephen Whitaker* (1928-) је амерички научник и професор емеритус Универзитета Дејвис (*University of California, Davis*), познат по свом раду у области феномена преношења топлоте и масе у порозним срединама. [38, 39]

Витакеровим¹⁴ приступом се по први пут у теорији сушења процеси преношења масе и топлоте проучавају на макро и микро нивоу, применом технике осредњавања запремине (Слика 4.10) за извођење једначина код вишефазних система. То значи да се једначине које важе у оквиру истог фазног стања супстанце могу просторно изгладити (енг. *smoothing*) како би се добиле једначине које су свуда важеће. Витакерове једначине се могу решити нумерички и формирати модел за нумеричку симулацију процеса сушења којим се истовремено могу симулирати процеси преношења масе и топлоте заједно са фазном променом (испаравањем).

Прва једначина модела (4.17) се односи на одржање масе влаге у стању течности, влажне паре и парном (гасовитом) стању током процеса сушења, има облик

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho_t u + \rho_p \epsilon) + \nabla \cdot (\rho_t w_t + \rho_p w_{gf}) = \nabla \cdot \left[\rho_{gf} D_{ef} \cdot \nabla \left(\frac{\rho_p}{\rho_{gf}} \right) \right] \quad (4.17)$$

где је: ρ - густина; w - брзина; ϵ - порозност материјала; u - влажност материјала; D_{ef} - ефективни коефицијент дифузије; ознаке у индексу: t , p и gf - редом течност, пара и гасовита¹⁵ фаза воде.

Друга једначина модела (4.18) се односи на одржање масе сувог ваздуха (агенса сушења) у гасовитом стању, има облик

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho_a \epsilon) + \nabla \cdot (\rho_a w_{gf}) = \nabla \cdot \left[\rho_{gf} D_{ef} \cdot \nabla \left(\frac{\rho_a}{\rho_{gf}} \right) \right] \quad (4.18)$$

где је: ознака у индексу a - гасовита фаза агенса.

Трећа једначина модела се односи на одржање енергије и има облик

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \tau} (\epsilon_{sm} \rho_{sm} h_{sm} + u \rho_t h_t + \epsilon \rho_p h_p + \epsilon \rho_a h_a) \\ & + \nabla \cdot \left[\rho_t h_t w_t + (\rho_p h_p + \rho_a h_a) w_{gf} \right] \\ & = \nabla \cdot \left[\rho_{gf} h_a D_{ef} \cdot \nabla \left(\frac{\rho_a}{\rho_{gf}} \right) \right] + \nabla \cdot \left[\rho_{gf} h_p D_{ef} \cdot \nabla \left(\frac{\rho_p}{\rho_{gf}} \right) \right] \\ & + \nabla \cdot (\lambda_{ef} \nabla T) \end{aligned} \quad (4.19)$$

где је: ϵ_{sm} - запремински удео суве материје; h - енталпија; ознака у индексу sm - суви материјал.

У Витакеровом моделу (систем једначина (4.17 - 4.18 - 4.19), брзина кретања течности се може израчунати из једначине (4.20),

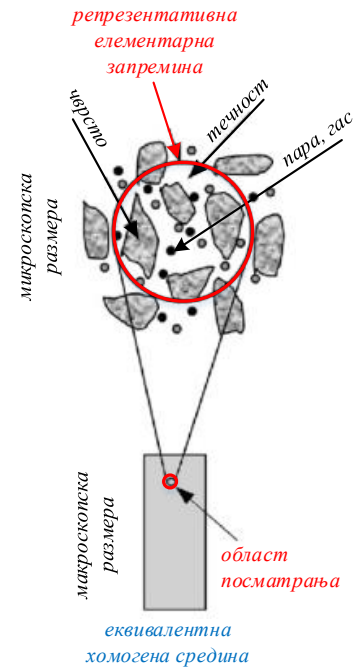
$$w_t = - \frac{k_t K}{\mu_t} \nabla p_t \quad (4.20)$$

а брзина кретања ваздуха (агенса сушења) се може израчунати из једначине кретања гасовите фазе (4.21),

$$w_{gf} = - \frac{k_{gf} K}{\mu_{gf}} \nabla p_{gf} \quad (4.21)$$

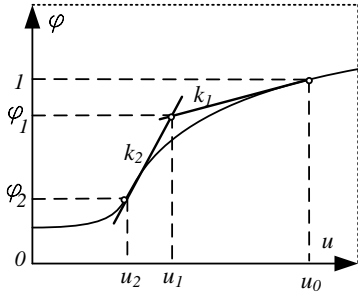
где је: K - тензор апсолутне пермеабилности; k - коефицијент пермеабилности; μ - динамичка вискозност; p - притисак; ознаке у индексу t - течност и gf - гасовита фаза. Предност теорије Витакера је у томе што нуди веома добар опис физичких појава које се дешавају у порозном материјалу током сушења. Међутим, проблем на који се наилази је повезан са потешкоћама у одређивању различитих коефицијената и константи, као што су ефективна дифузивност, пермеабилност, особине структуре материјала, разни параметри садржаја влаге, и слично. Такође, нумеричко решавање предложеног система једначина је услед постојања нелинеарности веома компликовано.

15: Термодинамички посматрано и пара и гасовита фаза воде припадају области прегрејане водене паре. Међутим, ове две области разликују се међусобно у односу на положај критичне тачке (КТ) (Слика 3.1), те у том смислу постоји потреба да се њихови називи термилошки разликују. Прегрејану пару која се налази на $t < t_{KT}$ називамо **паром**, а уколико је $t > t_{KT}$ називамо је **гасовиом фазом**.



Слика 4.10: Приказ репрезентативне елементарне запремине у техници осредњавања запремине.[40]

16: Модел су поставили *Vladimir Strongin* и *Irene Borde* 1987. године у свом раду који се бави теоријским предвиђањем преношења влаге током конвективног сушења за модел равне плоче. [41]



Слика 4.11: Сорпциона изотерма и њене апроксимације. [41]

φ - релативна влажност ваздуха (дефинисана једначином (2.1) на страни 74),

k_1 и k_2 - коефицијенти праваца тангенти k_1 и k_2 ,

$k_1 = (1 - \varphi_1)/(u_0 - u_1)$,

$k_2 = (\varphi_1 - \varphi_2)/(u_1 - u_2)$,

u_0 - максимална влажност материјала (почетна),

u_1 - влажност материјала у тачки пресека тангенти k_1 и k_2 ,

u_2 - влажност материјала при условима када је влага везана за скелет мононуклеарним слојем.

Модел Сџронџин-Боргеа (енг. *Strongin-Borde model*)¹⁶ састављен је од система диференцијалних једначина који се користи за одређивање кривих брзине сушења капиларно порозних материјала, према (4.22) и (4.23),

$$\rho_{sm} \frac{\partial u}{\partial \tau} = \rho \nabla (D_m \nabla u) - I \quad (4.22)$$

$$\frac{\partial (\rho_p \psi_p)}{\partial \tau} = \nabla (D_p \nabla \rho_p) + I \quad (4.23)$$

где је: ψ_p - запремински удео водене паре по јединици запремине материјала; I - запремински капацитет локалног испаравања. Густина водене паре одерђује се као $\rho_p = \rho_{sm} \varphi_p$, где је φ_p релативна влажност ваздуха. Основне претпоставке на којима се модел заснива су следеће:

- ▶ током сушења нема промене густине материјала, нити се узима у обзир контракција материјала;
- ▶ постоји мали градијент притиска унутар материјала, али је довољно мали да је кретање влаге услед дифузије и даље доминантан начин кретања влаге у материјалу;
- ▶ током процеса преношења влаге температура материјала се сматра константном, тј. важи претпоставка изотермности;
- ▶ веза између течности и паре апроксимира се на основу изотерме сорпције (Слика 4.11), уз претпоставку да су течна и парна фаза влаге у стању термодинамичке равнотеже, тако да је:

$$\varphi_p(u) = 1 \quad u > u_0$$

$$\varphi_p(u) = \varphi_1 + k_1(u - u_1) \quad u_0 \geq u \geq u_1$$

$$\varphi_p(u) = \varphi_1 - k_2(u_1 - u) \quad u_1 \geq u \geq u_2.$$

Теорија регуларног режима (енг. *Regular regime theory*) предлаже коришћење модификованог облика Биотовог броја за утврђивање да ли је процес сушења контролисан *екстерно* доминацијом спољашњих отпора (тако што се активност воде на површима смањује сходно сорпционој изотерми) или *интерно* доминацијом унутрашњих отпора (тако што количина површинске влаге опада интензитетом који контролишу унутрашњи дифузиони процеси у материјалу који и одређују брзину сушења). Предложени модификовани Биотов број дефинисан је према (4.24),

$$Bi = \frac{\beta L \rho'_p}{D_{ef} \rho_{sm} u_c} \quad (4.24)$$

где је: β - коефицијент преношења масе; L - карактеристична

димензија честице; ρ'_p - густина засићене водене паре; D_{ef} - ефективни коефицијент дифузије; ρ_{sm} - густина суве материје; u_c - критична влажност материјала. Сматра се да за вредности модификованог Биотовог броја $Bi > 1$ доминирају унутрашњи отпори, односно за $Bi < 1$ доминирају спољашњи отпори. Вилијам Шобер¹⁷ је развио методу регуларног режима за одређивање коефицијента дифузије зависног од концентрације, за системе у којима се дифузивност влаге смањује са смањењем садржаја влаге испод критичне вредности садржаја влаге или за случајеве где је брзина сушења регулисана унутрашњим отпорима преношењу влаге. Методу је усавршио Пиет Керкхоф¹⁸, стварајући тако погодан начин за представљање криве сушења увођењем параметра флукса влаге као функције садржаја влаге материјала, према (4.25),

$$F = j_p R_{sm} \quad (4.25)$$

где је: F - параметра флукса влаге; j_p - интензитет дифузије паре; R_{sm} - дебљина сувог материјала или полупречник. У случају да материјал има облик равне плоче, R_{sm} је дебљина скупљеног материјала на крају процеса сушења, док у случају сферног облика материјала R_{sm} је полупречник сфере. У општем случају, дебљина R_{sm} слоја се може одредити према (4.26),

$$R_{sm} = \frac{L_0}{\left(1 + u_0 \frac{v_{sm}}{v_w}\right)} \quad (4.26)$$

где је: L_0 - почетна вредност карактеристичне дужине; u_0 - почетна вредност садржаја влаге; v_{sm} - специфична густина сувог материјала; v_w - специфична густина влаге. Време сушења се може одредити према (4.27).

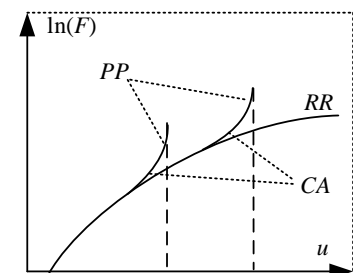
$$\tau = v_{sm} R_{sm}^2 \int_u^{u_0} \frac{du}{F} \quad (4.27)$$

На дијаграму зависности $F = f(u)$, могу се разликовати три карактеристична периода сушења (Слика 4.12):

- *Период константне активности* (енг. *Constant Activity - CA*) је предодређен спољашњим условима и почетним садржајем влаге. Флукс влаге је уравнотежен током овог периода.
- *Период периода продирања* (енг. *Penetration Period - PP*) је карактеристичан за криве сушења у случају задате почетне влажности материјала при великим почетним вредностима параметра флукса влаге.
- *Период регуларног режима* (енг. *Regular Regime - RR*) је главни крива за посматрани материјал из које се све

17: *Willem J.A.H Schoeber* (Scopus: 7801683347) је професор Универзитета у Ајндховену (енг. *Eindhoven University of Technology*) у Холандији, стручњак у области инжењерства, хемијског инжењерства и хемије. [42]

18: *Piet J.A.M Kerkhof* (Scopus: 7006811630) професор Универзитета у Ајндховену (енг. *Eindhoven University of Technology*) у Холандији, 1994. године у свом раду који се бави теоријским и математичким моделовањем. [43]



Слика 4.12: Криве сушења $F = f(u)$. [43]
RR - крива регуларног режима;
PP - крива периода продирања;
CA - крива константне активности.

остале криве издвајају.

4.2 Теорије сушења засноване на микроскопском посматрању структуре материјала

У претходном поглављу говорило се о теоријама сушења и моделима сушења заснованим на принципима механике континуума. На основу тих принципа били су изведени модели сушења којима се описивао цео или делимично посматрани домен материјала. Уколико се процеси посматрају на микро-нивоу, када је геометријска скала довољно мала, на посматраним микроструктурама претпоставке механике континуума неће више важити. Под таквим условима посматрања, закони одржања масе, енергије и количине кретања могу указати на различите карактеристике појава од конвенционалних (нпр. дисконтинуитете термо-физичких величина, неравнотежне појаве и моделе, и слично). Такође, посматрања на микро-нивоу могу довести до примене транспортних једначина које се базирају на принципима *мезоскопске физике*¹⁹, као и до откривања параметара структуре пора материјалу (радијус пора, величина порозности, расподела пречника пора, и слично). Макро-мезоскопске факторе утицаја (нпр. капиларно деловање, адсорпција, површински напон, и друго) на процес сушења тешко је анализирати конвенционалним моделима механике континуума. Савремена истраживања заснована на микроскопском посматрању структуре материјала довела су до појаве неких новијих метода у научним истраживањима процеса сушења и нових теорија сушења.

Теорија мреже пора (енг. *Pore-Network Modelling - PNM, pore-scale, channel network*) има за циљ да порозну средину материјала представи мрежом геометријски сличних пора (каналнића), при чему се феномени преношења моделују директно у размери величине пора (Слика 4.13). Овакво моделирање је потпуно дискретно²⁰ и њиме се може обухватити и размотрити микрокосмички²¹ утицај осушене супстанце у моделу. Оно омогућава симулацију релативно великих порозних структура узимајући у обзир већину њихових микроскопских својстава. *PNM* се може применити при проучавању разних феномена преношења (нпр. трења или преношења топлоте, утицаја структуре пора на понашање при сушењу и влажењу порозних материјала) и може повезати размеру пора са величином процеса. Мреже пора узимају само појаве у празном простору, али могу бити допуњене и другим методама за холистички²² опис процеса. У Теорији мрежа

19: *Мезоскопска физика* је дисциплина физике кондензованих супстанци, која се бави материјалима величине између нано-размера и микро-размера, односно грубо у опсегу 100÷1000 nm. На нивоу микрометра се налазе насути материјали, док се на нивоу нано-размера налазе молекули (атоми) супстанце. Механичка, хемијска и електронска својства материјала мењају се како се њихова величина приближава наноскали. Мезоскопска физика је уско повезана са научним областима названим *нанофабрикација* и *наноинженерологија*.

20: *Дискретна математика* је проучавање математичких структура које су фундаментално дискретне, у смислу да не захтевају континуираност. Већина објеката проучаваних у дискретној математици су пребројиви скупови, коначни графици и формални језици. Дискретна математика укључује: логику, теорију скупова, теорију бројева, комбинаторику, алгоритмику, дигиталну геометрију, итд.)

21: *Микрокосмички* утицај је утицај који се може приметити на малим размерима.

22: *Холистичким* приступом се појава посматра у ширем контексту, а не као проста сума више делова.

пора стварне структуре пора су моделиране помоћу *PNM* на мање-више сличан и адекватан начин. Због тога се развијају методе за процену адекватности мрежног приказа и алати за моделовање.

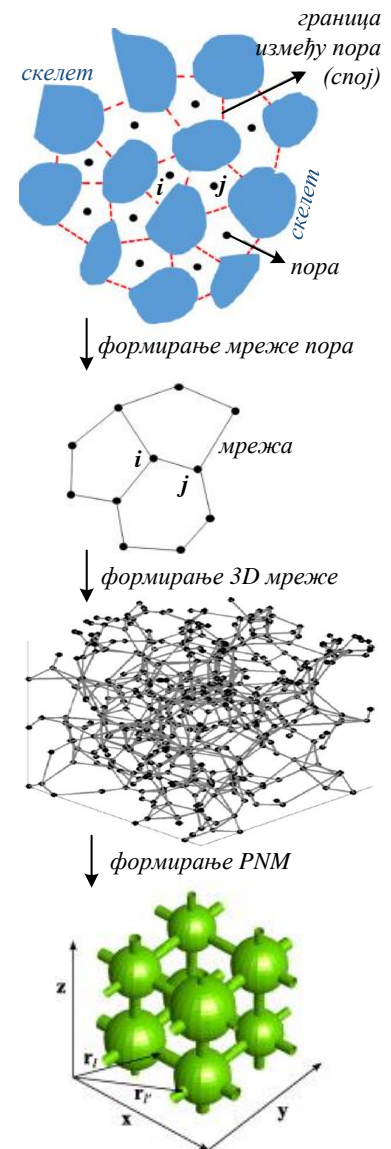
Савремена теоријска истраживања процеса сушења базирана на *PNM* крећу се у правцу истраживања мреже пора на нивоу:

- ▶ посматране репрезентативне елементарне запремине (скр. од *Representative Elementary Volume - REV*) и
- ▶ *PNM* мреже канала.

Истраживања на нивоу посматране *REV*, подразумевају дефинисање *REV* која би била глобално репрезентативна за посматрани материјал, а базирају се на Теорији Витакера. Овако дефинисаној *REV* се придружују макроскопски одређени параметри и у вези са тим неопходне карактеристике посматране континуалне средине. Тако ће *REV* имати јасно дефинисану унутрашњу порозну структуру, кроз коју ће се влага и гасови преносити тако да укупни ефекти преношења буду еквивалентни реалном моделу. Након успостављања мреже *REV*, модела преношења влаге (течност, пара, гасна фаза) и положаја менискуса у каналима током процеса сушења (што ће дефинисати положај фронта испаравања) могуће је израчунати остале жељене параметре сушења. Поступак формирања *PNM* мреже канала завршава се моделирањем геометријског облика поре, начином квашења унутрашњих зидова карактеристичних облика пора и слично, као и моделирањем граничних спојева/веза између пора (*eng. pore-throat*).

Истраживањима процеса сушења на нивоу *PNM* мреже канала, долази се до специфичних и карактеристичних података о динамичкој дистрибуцији фаза супстанце у порама порозног материјала, тренутној брзини сушења и критичним вредностима периода сушења, утицају параметара каналске структуре на брзину сушења. Услед комплексности порозног материјала, често се уводе претпоставке о крутости материјала, занемарују се многе микроструктуре и адсорпција, занемарује се појава деформација и друге сличне појаве како би се модел упростио. Тренутни *PNM* мреже канала није у могућности да да опис процеса сушења, али и поред тога има значајан развојни потенцијал и развија се стално у више праваца:

- ▶ развијају се нове методе формирања мрежа пора;
- ▶ увећава се количина информација о мрежама канала, чиме се тачност модела повећава и даје резултате приближније реалном процесу;
- ▶ истражују се боље методе екстракције информација.



Слика 4.13: Илустрација добијања *PNM* мреже канала на основу познате структуре порозног материјала.[44–46]

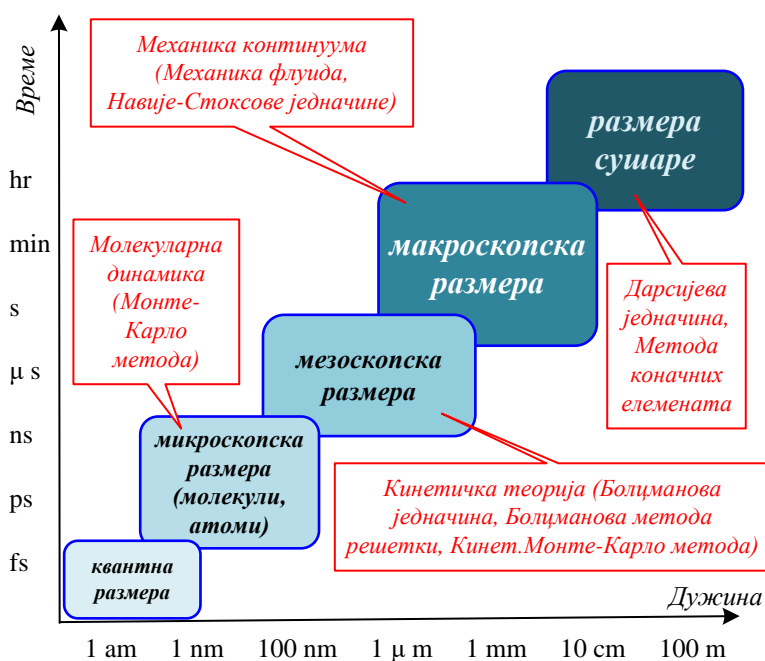
i, j - означене произвољне поре;
PNM - *Pore-Network Modelling*.

23: Вишеразмерни системи су системи различитих просторних и временских размера, између којих је могуће установити одговарајућу хијерархију па сходно томе и применити одговарајуће математичке моделе од мањих ка већим размерама и обрнуто. Овим системима се бави тзв. *математика вишеразмерних система* у оквиру које се проучавају и развијају различите методе *вишеразмерног моделирања*. Ове методе налазе широку примену приликом решавања разних проблема у вези са проучавањем процеса (флуиди, чврсте супстанце, полимери, протеини и нуклеинске киселине и др.), као и различитих физичких и хемијских феномена (адсорпција, хемијске реакције и слично).

Техника вишеразмерног моделирања (енг. *Multi-scale method*) се развила из *Теорије вишеразмерних система*.²³

Техника се примењује код сушених порозних средина како би се: у складу са карактеристикама просторне геометријске размере средине (капиларни канали и гравитациони канали) установила величина простора подсистема; у складу са Фиковим законом и Фуријеовим законом установили концентрациони и температурни параметри подсистема; и потом подсистем анализирао унутрашњим корелацијама. Резултати који се добију на крају могу се применити на цео систем и тичу се целог система (нпр. ефикасност процеса сушења, итд.). Ова техника може обухватити све појаве које се јављају током сушења. Оваквим приступом у моделирању постиже се међусобна повезаност модела од мањих до већих размера. С тим у вези, процеси преношења повезани са сушењем могу се проучавати на мањој размери и добијена информација се може пренети на већу размеру.

Суштина идеја технике вишеразмерног моделирања представљена је поступком којим се прво установи размера у којој ће се подсистем посматрати (Слика 4.14), а потом се приступи примени одговарајућег модела у зависности од одабране размере. Техником се у највећој мери обухватају макроскопске, мезоскопске и микроскопске размере. Код проучавања макроскопских појава користе се модели и једначине који су засновани на хипотезама механике континуума, као што су *Навије-Стоксове једначине*²⁴ (енг. *Navier-Stokes equations*)



Слика 4.14: Приказ опсега размера у просторно-временском координатном систему. [47]

(4.28),

$$\underbrace{\rho \frac{\partial w_z}{\partial \tau}} + \underbrace{\rho \left(w_x \frac{\partial w_z}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_z}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_z}{\partial z} \right)} = \underbrace{-\frac{\partial P}{\partial z}} + \dots$$

$$\dots + \underbrace{\mu \left(\frac{\partial^2 w_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} \right)} + \underbrace{\rho g z}$$
(4.28)

где означени чланови у једначинама представљају редом: *члан одговоран за нестационарности процеса* + *члан који узима у обзир утицај инерцијалних сила* = *члан који узима у обзир постојање поља притиска* + *члан вискозности* + *гравитациони члан*. Иако се код ових једначина занемарују поједине карактеристике процеса, оне су ипак прилично ефикасне за проучавање порозног медијума на већим размерама у многим случајевима.

Модели који се код микроскопских и мезоскопских размера најчешће користе су *Монте-Карло модел* и *Болцманов модел решетки*.

Монте-Карло модел (енг. *Monte-Carlo model*)²⁵ се ослања на групу рачунарских алгоритама који се ослањају на понављање случајних покушаја са циљем добијања нумеричких резултата. Метода је веома корисна код симулације система са више степена слободe (флуиди, раствори, ћелијске структуре и слично). Монте-Карло метода се непрекидно развијала и усавршавала од свог настанка, али сви новонастали модели теже да испрате одређени образац:

1. Дефинисање домена улаза. Употреба Монте Карло методе захтева велику количину бројева, што је у рачунарству проузроковало формирање и коришћење генератора псеудобројева чијом употребом је прорачунавање олакшано.
2. Генерисање низа случајних улаза помоћу *расподеле вероватноће*²⁶.
3. Спровођење *детерминистичко*²⁷ приступа.
4. Сажимање резултата.

У оквиру технике вишеразног моделирања Монте-Карло метод се користи код микро и мезо размера. У зависности од посматране размере варирају вредности Кнудсеновог броја, што даље утиче на решења Болцманове једначине у динамици флуида (посебно динамици гасова). У контексту теорије сушења Монте-Карло метода се користи да опише почетни садржај влаге и брзину сушења функцијама случајне расподеле вредности ових величина.

24: *Claude-Louis Navier* (1785-1836) је француски машински инжењер и физичар који се бавио механиком континуума. Похађао је чувену француску школу *École polytechnique* и био члан Француске академије наука. *George Gabriel Stokes* (1819-1903) је ирско-енглески физичар и математичар, познат по свом истраживачком раду у областима механике флуида и оптике. Био је члан Британског краљевског друштва.

25: *Монте-Карло метод* је формулисао крајем 1940-тих година Станислав Улам (*Stanislaw Ulam*) (1909-1984) пољско-амерички математичар, током свог рада на Менхетн пројекту и развоју термонуклеарног оружја и пулног нуклеарног погона. Назив методе „Монте-Карло” потиче од чувеног Монте-Карло казина у Монаку који је био у власништву Уламовог стрица, и представља тајношифровано име због трке у наоружању која се у то време дешавала између великих светских сила.

26: *Расподела вероватноће* је математичка функција која даје вероватноћу појаве различитих могућих исхода у експерименту.

27: *Детерминизам* је филозофско учење по којем је све што постоји повезано каузалним, узрочно-последичним везама, материјалне или нематеријалне природе. Према овој доктрини, нема случајности, произвољности, нити слободног чина у универзуму, већ је све унапред одређено претходном историјом збивања. Супротност детерминизму се назива *недетерминизам* или *случајност*.

28: *Computational Fluid Dynamics - CFD* је грана механике флуида која користи нумеричку анализу и структуре података за анализу и решавање проблема који укључују токове флуида. Основна основа скоро свих *CFD* проблема су Навије-Стоксове једначине, које дефинишу многе једнофазне (гасне или течне, али не и једно и друго) протоке флуида.

29: *Ludwig Boltzmann* (1844-1906) је аустријски физичар. Главна тема његовог истраживачког рада била је свођење термодинамике на механику због чега је било потребно да се објасни противуречност између реверзибилности механичких и иреверзибилности термодинамичких процеса. Болцман је био истакнути поборник атомске теорије. Његова истраживања су темељ за постављање квантне теорије у формулацији Макса Планка, 1900. године и у проширеном Ајнштајновом тумачењу из 1905. године.

Болцманов метод решетки (енг. *Lattice Boltzmann method - LBM*) се користи при мезоскопским размерама. Модел представља један од начина за симулацију²⁸ кретања флуида којим се, уместо директног решавања Навије-Стоксових једначина, густина флуида у просторној решетки симулира процесом кретања и сударања честица. У *LBM*, кретање флуида се описује низом *функција расподеле честица* (енг. *Particle Distribution Function - PDF*), а које помажу квантификацији броја честица са одређеном брзином кретања на некој локацији у простору. Општим обликом Болцманове једначине (4.29) приказана је промена *PDF* у времену,

$$\frac{\partial f}{\partial \tau} = \left(\frac{\partial f}{\partial \tau} \right)_F + \left(\frac{\partial f}{\partial \tau} \right)_D + \left(\frac{\partial f}{\partial \tau} \right)_S \quad (4.29)$$

где је: f - функција расподеле честица; ознаке у индексу F , D , S - редом су за кретање честица услед екстерне силе (поља сила), дифузије и судара са другим честицама. Болцманова²⁹ једначина се може користити да се одреди на који начин се мењају физичке величине, као што су енергија и количина кретања, када је флуид у покрету. Такође, могу се одредити и друга својства карактеристична за течности, као што су вискозност, топлотна проводљивост и електрична проводљивост. Једначина (4.29) се увођењем Батнагар-Грос-Крук оператора судара (енг. *Bhatnagar-Gross-Krook - BGK*) може средити и упростити према (4.30),

$$\frac{\partial f_i}{\partial \tau} + w_i \frac{\partial f_i}{\partial x} = \Omega_i(f) + F_i \quad (4.30)$$

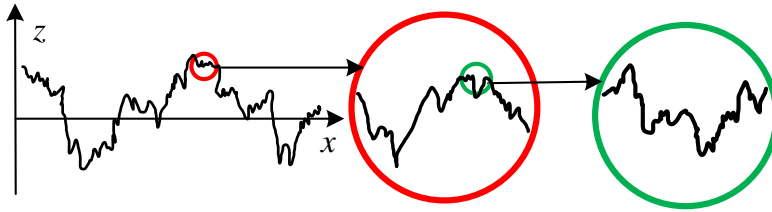
где је: f_i - функција расподеле честица у i -том правцу; w_i - дискретна брзина у i -том правцу; F_i - екстерна сила (утицај) која није последица судара са другим честицама; $\Omega_i(f)$ - *BGK* фактор/ оператор судара између честица. *BGK* оператор је дефинисан једначином (4.31),

$$\Omega_i(f) = -\frac{1}{\tau} (f_i - f_i^{eq}) \quad (4.31)$$

где је: τ - време релаксације; ознака у индексу eq - равнотежно стање, према Максвел-Болцмановој расподелу.

Примена фракталне теорије у моделирању сушења порозних материјала (енг. *Fractal theory model*) погодује највише описивању структура и облика порозних материјала са различитим фракталним особинама (агенси сушења, катализатори, седиментни материјали, метаморфне стене, гелови и слично).

Фрактална теорија се заснива на принципима *фракталне геометрије*. Фрактална геометрија је релативно млада мате-



Слика 4.15: Квалитативна илустрација особине самосличности површи неког материјала. [48]

матичка теорија. Фракталном геометријом је могуће описати неправилне објекте који се традиционалном Еуклидовом геометријом не могу анализирати. Овакве објекте називамо фракталима. Фрактал је груб или фрагментиран геометријски облик који се може поделити у делове од којих је сваки (барем приближно) умањена копија оригинала. Фрактале је могуће увећавати бесконачно много пута, а да се при сваком новом повећању виде неки детаљи који пре повећања нису били видљиви, и да количина нових детаља увек буде приближно једнака. Ова особина се назива *самосличност* (Слика 4.15). Математички фрактал је заснован на једначини која пролази кроз итерацију.

Проучавање сушења порозних материјала базирано на принципима фракталне геометрије састоји се из више аспеката, као што су:

- ▶ описивање физичких особина порозне средине: густина, дистрибуција пора по величинама, површинска порозност, дистрибуција честица по величини, дефинисање структуре и облика (Слика 4.17), и слично;
- ▶ спровођење квантитативних истраживања просторне варијабилности порозне средине;
- ▶ симулирање физичких процеса у порозној средини: истицање, преношење влаге услед разлике притисака, преношење топлоте, апсорпција, дифузија, дробљење и слично.

У области истраживања процеса преношења масе и топлоте у порозним срединама, фрактална геометрија се користи за описивање геометријске структуре средине користећи стварну слику порозног материјала, као и за одређивање укупне димензије површине пресека и формирања модела топлотне проводљивости материјала.³⁰ Теоријски модели за максималну величину пора у порозним материјалима могу бити изведени применом фракталне геометрије. Ови модели се могу довести у везу са макроскопским параметрима који се могу добити из експерименталних података (пермеабилност, коефицијент имбибиције³¹ и особина влаге у материјалу) и карактеристика пора.

30: Фракталном анализом топлотне проводљивости материјала установљено је да се топлотна проводљивост мења са променом *фракталне димензије* и порозности скелета материјала. Фрактална димензија се рачуна према једначини (1.9), на страни 9.

31: *Имбибиција* је посебна врста дифузије која се дешава када воду апсорбују чврсте материје изазивајући повећање запремине. Постојање градијента концентрације између апсорбента и течности је неопходно за имбибицију.

32: У теорији вероватноће, *фракционо Брауново кретање* представља генерализовано Брауново кретање, за разлику од ког степени функције не морају бити међусобно независни.

Robert Brown (1773-1858) је шкотски биолог-ботаничар, који је посматрајући под микроскопом кретање малих биолошких честица поставио хипотезу о начину кретања истих.

33: *Benoit B. Mandelbrot* (1924-2010) је пољско-амерички математичар познат по свом доприносу у развоју фракталне геометрије, као и теорије о храпавости и самосличности материјала и облика. Своја запажања објавио је у књизи *The Fractal Geometry of Nature* [49]

Непогодност конвенционалних статистичких метода за описивање неправилних облика и гометрија довела је да потребе за карактеризацијама површи независно од размере у којима се посматрају. Вишеразмерну природу храпавости површи материјала и својство самосличност истих могуће је описати фракталном геометријом. У циљу проучавања механизма и феномена у вези са храпавошћу површи, неопходно је дефинисати фракталне особине храпаве површи и њихову структуру у више размера. Методологије које се у ту сврху користе повезане су тесно са *Теоријом фрактала и фракционим Брауновим кретањем* (енг. *Fractional Brownian motion - fBm*).³² Поменути методологије се користе за формирање *Гаусових површи*, без обзира на то што су у општем случају храпаве површи не-Гаусове и произвољне су оријентације.

Описивање профила површи и њихову карактеризацију по особинама континуалности, недиференцијабилности и самосличности, методологијом фракталне геометрије, први је урадио Беноа Манделброт.³³ Ове особине се могу математички описати реалним делом *Вејерсџрас-Манделбројшовом функцијом* (енг. *Weierstrass-Mandelbrot function - W-M*), према (4.32),

$$z(x) = G^{(FD-1)} \sum_{n=n_1}^{\infty} \frac{\cos 2\pi\gamma^n x}{\gamma^{(2-FD)n}} \quad (4.32)$$

чија се спектрална снага $W - M$ функције може одредити према (4.33),

$$P(\omega) = \frac{G^{2(FD-1)}}{2 \ln \gamma} \frac{1}{\omega^{(5-2FD)}} \quad (4.33)$$

где су: FD - фрактална димензија профила површи; G - параметар размере; $\omega = \gamma^n$ - фреквенца; γ - параметар који зависи од карактеристичне дужине материјала $\gamma^{n_1} \approx 1/L$, $\gamma > 1$; n_1 - параметар који одговара нижем опсегу фреквенција профила површи. Параметри G и FD се могу одредити графички, цртањем спектралне снаге фракталне површине, при чему је FD нагиб, а G пресек са вертикалном осом. Фрактална димензија је бездимензиона величина која варира у опсегу $1 < FD < 2$, док параметар размере G није оганичен на одређени опсег и носи димензију дужине. Уколико је параметар размере G мањи, површ је мање храпава (Слика 4.16).

$W - M$ функција се такође понаша по једначини (4.34).

$$z(\gamma, x) = \gamma^{(2-D)} z(x) \quad (4.34)$$

Једначине (4.33) и (4.34) показују да је $W - M$ функција са особинама само-афинитета и задовољава *fBm* захтеве. Једначина (4.32) указује на то да је храпава површа састављена од великог броја суперпонираних неравнина које се међусоб-

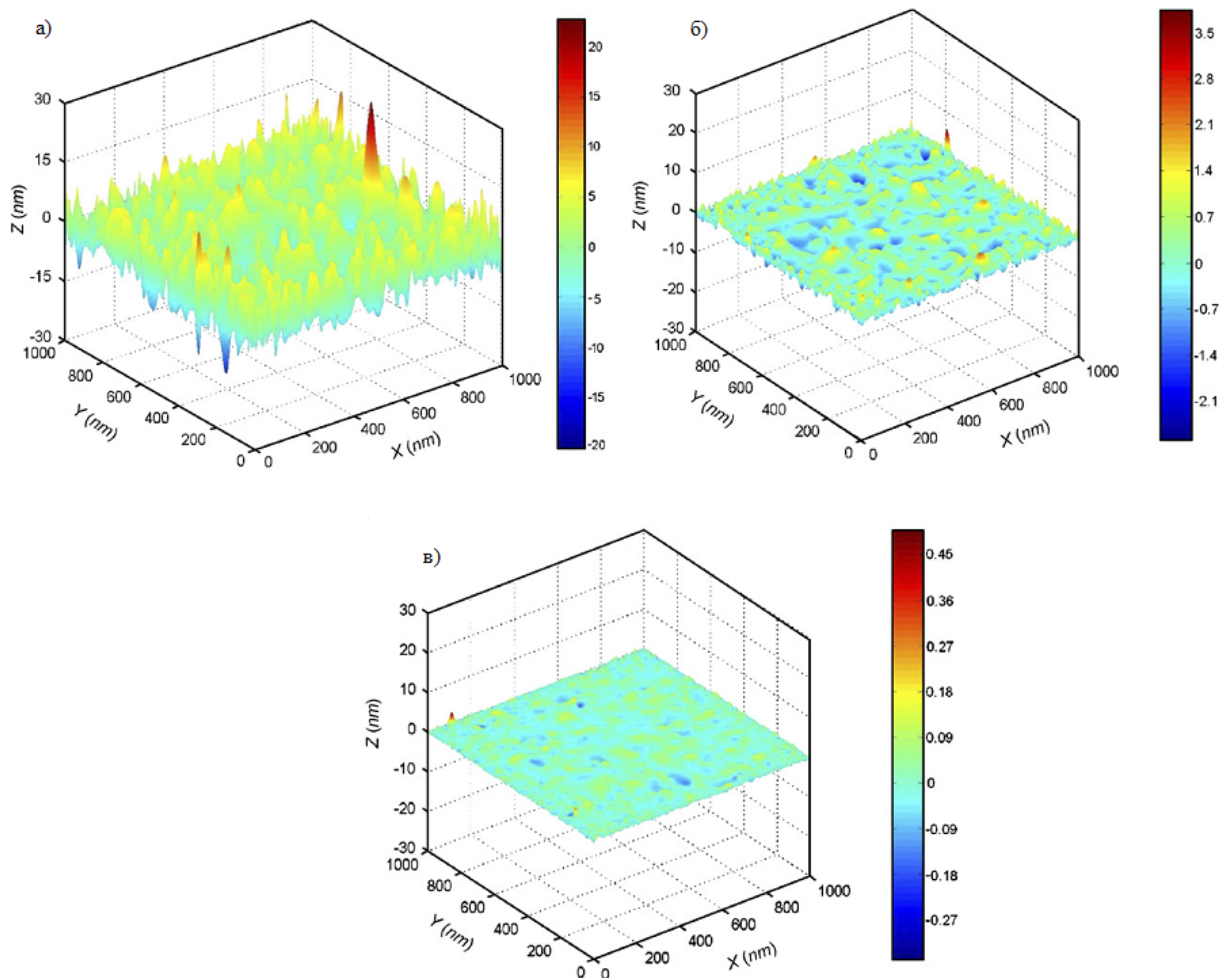
но надовезују, обезбеђујући структуру на било којој размери облика $l_i = 1/\omega$. Веза између вертикалне и бочне димензије представљена је према (4.35),

$$z(l_i) = G^{(D-1)} \cdot l_i^{(2-D)} \quad (4.35)$$

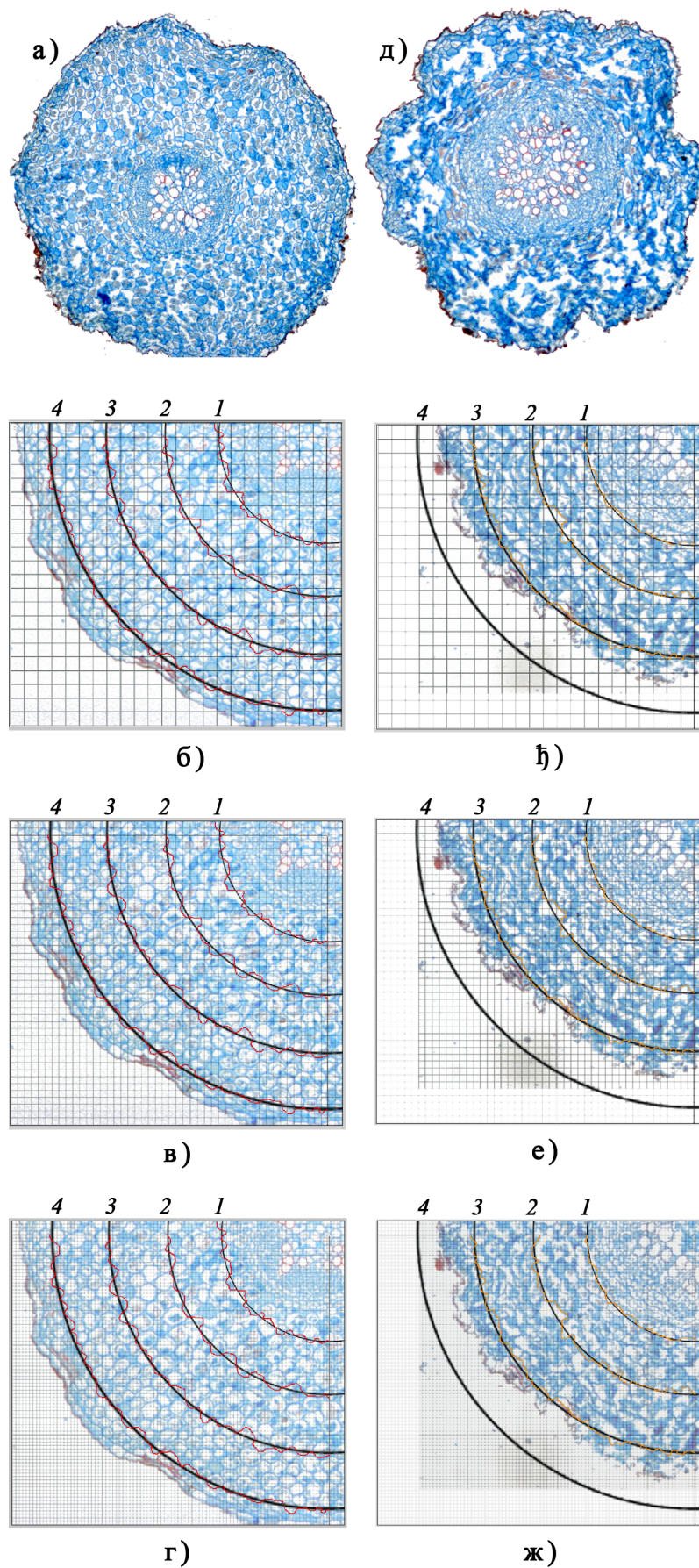
Амплитуда храпавости (неравнина) може се одредити према (4.36),

$$h_i = G^{(FD-1)} \cdot l_i^{(2-FD)} + \sum_{m=1}^{i-1} h_m \quad (4.36)$$

где је: h_i - амплитуда неравнине; l_i - бочна дужина у посматраној размери.



Слика 4.16: Илустрација утицаја вредности параметра размере на изглед топографије површи. [48]
 На слици су приказани модели површ са фракталном димензијом $FD = 1,44$ и параметрима размере:
 (а) $G = 9,46 \cdot 10^{-13}m$, (б) $G = 9,46 \cdot 10^{-15}m$ и (в) $G = 9,46 \cdot 10^{-17}m$.



Слика 4.17: Илустрација примене концепта фракталне геометрије ради одређивања фракталне димензије свежег и осушеног материјала. У овом случају користе се снимци попречног пресека корена Валеријане снимљени помоћу оптичког микроскопа увеличања X50.

Легенда:

- (а, б, в, г) свеж узорак,
- (д, ђ, е, ж) осушен узорак,
- (б, ђ) мрежа $\square 10 \mu\text{m}$,
- (в, е) мрежа $\square 5 \mu\text{m}$,
- (г, ж) мрежа $\square 2,5 \mu\text{m}$.

На потезу од унутрашњих слојева материјала до површи обележени су прстенови 1, 2, 3 и 4, на чијим позицијама ће се спровести пребројавање у складу са димензијама мрежа које се користе. Добијене су следеће фракталне димензије узорака:

Свеж узорак:

- Прстен 1: $FD = 1,12$,
- Прстен 2: $FD = 0,93$,
- Прстен 3: $FD = 0,97$,
- Прстен 4: $FD = 0,92$,

Осушен узорак:

- Прстен 1: $FD = 0,92$,
- Прстен 2: $FD = 0,98$,
- Прстен 3: $FD = 0,93$.

Напомена:

Фрактална димензија осушеног узорка на позицији прстена 4 не постоји јер се материјал током сушења скупио и мањег је пречника од посматраног прстена.

Моделирање процеса сушења

5

Моделирање процеса и појава у вези са сушењем ради се са циљем креирања модела који ће се користити у прорачунима при пројектовању и изради нових система, оптимизацији процеса сушења и описивању целокупног понашања при сушењу, обављајући и комбиновани микроскопски и макроскопски начин посматрања агенса и материјала у процесима преношења масе и топлоте. Услови сушења, тип сушаре и све карактеристике материјала који се суши утичу на кинетику сушења. Стога, модели сушења су важни у одлучивању о идеалним условима сушења и о томе који су параметри сушења од значаја за дизајн опреме, оптимизацију процеса и побољшање квалитета процеса.

Постојећи модели сушења капиларно-порозних материјала претежно се фокусирају на физику процеса сушења и веома ретко се користе за описивање процеса са другачијих аспеката: енергетске ефикасности, потрошње и рекулерације енергије, губитака у квалитету хране, биохемијских и органолептичких аспеката квалитета хране (нпр. нутритивног садржаја хране, боје) и слично. Иако је сушење област у којој се већ дуго времена врше истраживања, постоји још много питања на које треба дати одговоре. Због тога су истраживања и развој од суштинског значаја у многим аспектима сушења. Главни приоритети истраживања у области сушења су:

1. *Побољшање кинетичке сушења* - Сушење је процес који релативно дуго траје, осим код неких савременијих метода сушења.
2. *Смањење потрошње енергије* - Сушење је енергетски захтеван и интензиван процес, који је енергетски гледано неефикасан процес уклањања воде.
3. *Очување квалитета производа* - Многи материјали осетљиви на топлоту, укључујући прехранбене и фармацеутске производе, сушењем губе на квалитету.

*Математички модели*¹ сушења базирани су на теоријским основама физике, биологије, хемије, науке о материјалима, а за решавање користе концепте математике и информатике. У зависности од тога да ли процес могу описати одговарајућом једначином или системом једначина, као и од сложености процеса који моделирају, математички модели се могу решавати аналитичким или нумеричким методама.

5.1 Емпиријски модели	119
5.2 Једнофазни дифузиони модел	125
5.3 Вишефазни порозни модел	129
5.4 Моделирање у микро-размери	134
5.5 CFD моделирање	142
5.6 Моделирање са деформацијом материјала	146
5.7 Вишеразмерно моделирање	149
5.8 Моделирање на принципима машинског учења и вештачке интелигенције	152

1: *Математички модел* подразумева математички запис - једначину понашања и/или особина посматраног физичког система. Уколико је познат математички модел, значи да у потпуности познајемо понашање и особине физичког система. Ради упрошћења математичког модела често се приступа одређеним апроксимацијама и занемаривањима мало утицајних особина или утицаја. У наукама које се ослањају на физику, класичан математички модел садржи све или неке од следећих елемената:

1. Основне једначине модела;
2. Допунске једначине модела (једначине дефиниција и корелација величина);
3. Претпоставке и ограничења (почетни и гранични услови, класична ограничења, кинетичке једначине).

2: *Аналитички израз* је математички израз састављен од добро познатих операција које се лако могу израчунати. То је израз за твореног облика који користи коначан број стандардних операција и може садржати константе, променљиве, основне операције и функције.

3: *Нумеричка анализа* је грана нумеричке математике која се бави проналажењем и унапређењем алгоритама за нумеричко израчунавање вредности везаних за математичку анализу. Нумеричке методе се често користе за одређивање решења математичких проблема који би због своје величине, стандардним поступком решавања, предуго трајали (нпр. систем од 10000 једначина са 10000 непознатих), као и код решавања проблема метода коначних елемената и слично.

4: Појам *вишеразмерно моделирање* (енг. *Multiscale modelling*) се односи на начин моделирања у којем се више модела у различитој размери користи истовремено за описивање система. Ови модели понекад потичу из физичких закона различите природе, те се у том случају се говори о тзв. *мултидисциплинарном моделирању*. Предмет вишеразног моделирања се састоји од три уско повезане компоненте:

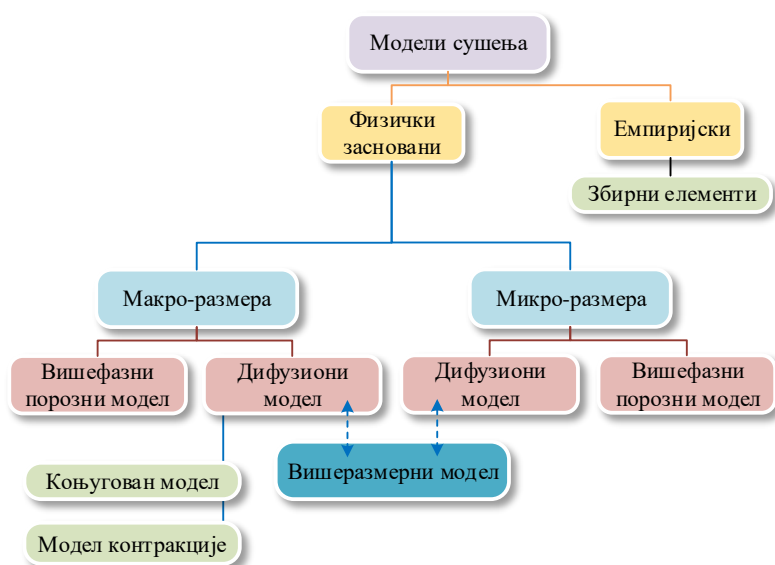
- ▶ *вишеразмерна анализа* (омогућава разумевање односа између модела различитих величина),
- ▶ *вишеразмерни модел* (омогућава разумевање односа између модела) и
- ▶ *вишеразмерни алгоритам* (омогућава коришћење вишеразноности за дизајнирање рачунарских алгоритама, од размере честице до размере сушаре).

*Аналитичко решење*² проблема подразумева решавање парцијалних диференцијалних једначина, узимајући у обзир почетне и граничне услове. Овакво решење може обезбедити резултат по питању вредности параметара процеса, међутим, захтева укупну временску и просторну расподелу различитих величина. Практични проблеми углавном подразумевају постојање компликованих неправилних домена, сложених граничних услова и великог броја параметара у процесима преношења. Аналитичко решавање је овом сложеношћу значајно отежано и практично немогуће. У том случају, коришћењем савремених рачунарских алата, прибегава се *нумеричком решавању*³ проблема. Параметарска анализа даје велику предност нумеричком решавању једначина модела. Она је од суштинског значаја за проверу оптималних услова рада пројектованог система сушења. Модификовањем параметара или креирањем база параметара могуће је постићи шири распон вредности параметара нумеричког модела. Оваква анализа није могућа код аналитичког решавања једначина модела и не може пружити мултидисциплинарни поглед на посматрани проблем. Са друге стране, нумеричка анализа даје резултате приближније реалним условима сушења уз уважавање мултидисциплинарности проблема.

Процес сушења се може посматрати као *вишеразмерни*⁴ феномен и анализирати на различитим нивоима величина - размерама (Слика 4.14). Моделирање процеса преношења масе, топлоте и количине кретања током сушења зависи од размере у којој посматрамо физичке процесе који ће бити моделирани. За моделе креиране у размери сушаре и макроразмерама кажемо да су *макроскопски* и креирају се на претпоставкама механике континуума. Код макроскопских модела се свака тачка у материјалу може сматрати центром *REV*.⁵ Основне једначине макроскопских модела добијају се најчешће из: феноменолошког приступа и механичког приступа заснованом на законима одржања у посматраној *REV*, а нарочито на позицији фронта испаравања влаге. За решавање ових једначина најчешће се користе методе коначних елемената, коначних запремина или коначних разлика. На нижим размерама, мезо- и микро-размере, микроструктура порозног материјала је експлицитно моделована, најчешће као мрежа међусобно повезаних пора. На овим размерама примећује се утицај микроструктуре пора на транспорт влаге у њима, што може одступити од принципа механике континуума. Моделирање на још нижим размерама ретко се изводи у оквиру процеса индустријског сушења. Међутим, оно је веома важно због разумевања процеса влажења/сушења материјала у различитим истраживачким областима.

Већина истраживања моделирања и развоја софтвера о сушењу се изводи у размери сушара и на макро-размерама. Разлог за то је што су ове размере директно релевантне за индустрију и за одговарајућа експериментална истраживања на пилот постројењима, блиска и истраживачима и инжењерима. Моделирање у размери једне честице (нпр. зрно пшенице), капљице (нпр. код спреј сушара) или посматране *REV* погодна је за описивање унутрашњих процеса преношења масе и топлоте, као и могућности трансформације модела у циљу описивања квалитета сушења. На овим размерама постоји велики број једначина које описују процеса сушења али је одређивање коефицијената преношења топлоте и масе веома тешко. То значи да се унутрашњи биланс топлоте и масе у великој мери ослања на непознате коефицијенте. Ове једначине захтевају почетне и граничне једначине/услове да би описали интеракцију са околним окружењем. Посматрање у овим размерама се класично назива моделирање сушења материјала у *шанком слоју* (*шанкослојно сушење*). Следећи корак у моделирању је интеграција модела у нижим размерама у просторни модел у размери сушаре и праћење релевантних промена у времену. Чак и ако се сушара посматра независно од временске координате, сви процеси и величине који се дешавају у њој мењају се у времену. Нумеричка интеграција мерења добијених у експериментима са танким слојем материјала тешко се трансформише у разматрања сушења дебелог слоја материјала.

Најчешће коришћени модели за описивање кинетике сушења материјала (Слика 5.1) могу се сврстати у три категорије: *теоријски*, *полутеоријски* и *емпиријски модели*.



5: *Репрезентативна елементарна зајремина REV* је довољно велика да обухвати све што је од значаја за репрезентативно усредњавање материјала, а уједно и довољно мала да се избегну варијације величина унутар ње због постојања макроскопских градијената и неравнотежних услова на микро нивоу. Сматра се да се фазе супстанце унутар *REV* надовезују једна на другу.

Слика 5.1: Шема различитих модела сушења. [8]

6: Теорије развијају истраживачи да би објаснили феномене, повукли везе и дали предвиђања у вези са одређеним процесима и појавама. Теоријски модел се по праву развија из теорија које подржавају одговарајуће истраживање, али уједно и уважавајући критике истих и опречна мишљења у вези са разматраним проблемом.

7: *Емпирија* или *практично искуство* је знање, засновано на научним чињеницама, прикупљеним искуственим посматрањем. Појам потиче из грчког језика и преводи се као „наука о искуству”.

8: Дистрибутиван значи разделан, размештен, распоређен, у смислу да се разматрани/а појам/појава односи на сваког члана посматраног скупа.

*Теоријски модели*⁶ се често базирају на великом броју претпоставки које најчешће доводе до ограничења у примени оваквих модела у пракси. Теоријски модели узимају у обзир и унутрашње и спољашње отпоре преношењу влаге. Решење Другог Фиковог закона дифузије се примењује као теоријски модел у танкослојном сушењу прехранбених материјала. Теоријски модели узимају у обзир само унутрашњи отпор у преношењу влаге, док се за друге две категорије сматра да проучавају и спољашњи отпор преношења влаге између агенса (ваздуха) и производа.

*Емпиријски модели*⁷ пружају директну везу између просечног садржаја влаге и времена сушења. Емпиријски модели помажу да се разуме карактер експерименталних/процесних променљивих и зависних и независних. Ови типови модела су изведени из експерименталних података, ослањају се на експериментална мерења и истраживања и обично им недостаје свеобухватна физичка интерпретација. Они у великој мери зависе од експерименталних података и да пружају ограничене информације о преносу топлоте и масе током процеса сушења. Међутим, испоставило се да су овакви модели од великог практичног значаја за инжењере и дизајнере сушара.

Полућеоријски (или полуемпиријски) модели нису у потпуности засновани на експерименталним подацима, иако модели засновани на параметрима поседују одређену физичку димензију. Ови модели такође зависе од експерименталних резултата за неке одређене параметре. Полуемпиријски модели су углавном засновани на Њутновом закону хлађења и Фиковом закону дифузије (Табела 5.1).

Елементи модела могу бити *размешћени* или *збирни*.

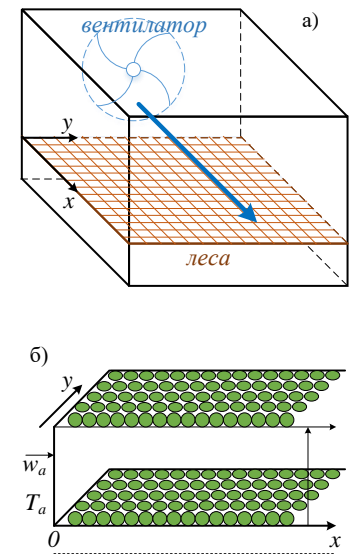
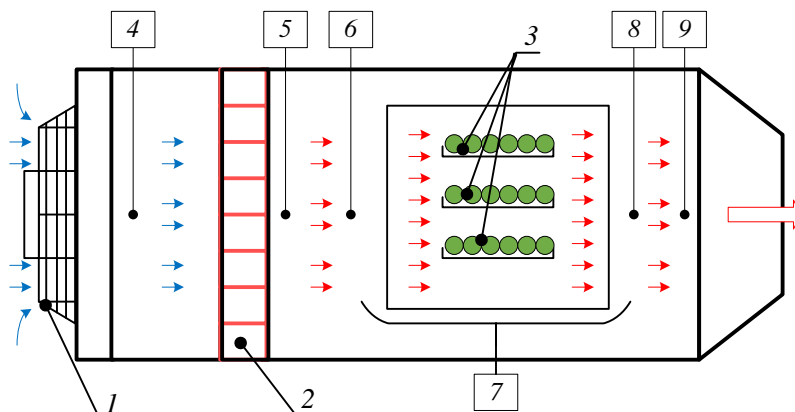
Модели са размешћеним елементима (енг. *Distributed⁸ element model*) се заснивају на интеракцији између времена и једне или више просторних променљивих за све остале зависне променљиве модела. Сматра се да се преношење масе и топлоте дешава истовремено, као и то да је утицај притиска занемарљив у односу на утицај температуре и садржај влаге.

Модели са збирним елементима (енг. *Lumped element model*) разматрају ефекат изолованог утицаја времена на неку зависну променљиву, занемарујући промену температуре материјала и претпостављајући да је материјал униформно изложен струјању агенса сушења.

5.1 Емпиријски модели

Сушење материјала у танком слоју је веома коришћена емпиријска метода за одређивање кинетике сушења воћа и поврћа која обухвата истовремено праћење процеса преношења масе и топлоте. *Концепт танког слоја* подразумева да се величина материјала своди на димензије које ће омогућити равномерну дистрибуцију агенса преко материјала (Слика 5.2). Најважнији аспекти сушења у танком слоју су математичко моделирање процеса сушења и селекција опреме која ће омогућити потребне услове и режиме рада сушаре. Ова метода се ослања на обраду експерименталних података како би се дошло до побољшања и оптимизације процеса сушења и уштеде енергије. Пракса је показала да не постоји универзалан модел сушења у танком слоју који би обухватио "све" или огромну већину производа воћа и поврћа. Ово је зато што модел зависи од великог броја фактора укључујући и начин сушења и особине материјала који се суши.

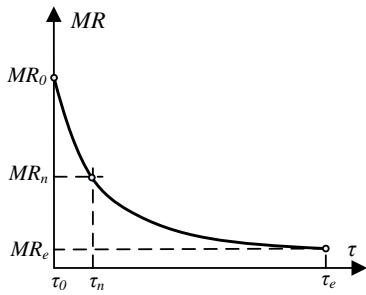
Општеприхваћена метода испитивања подразумева да се материјал у танком слоју поређа на лесу и постави у комору за сушење (Слика 5.3) где бива изложен агенсу сушења (најчешће топлом ваздуху) познатих параметара температуре, релативне влажности и брзине струјања. Током сушења мери се промена масе материјала која служи за одређивање тренутног садржаја воде у материјалу. Највећи утицај на сушење воћа и поврћа имају температура сушења и дебљина материјала. Температура материјала се може сматрати униформном по читавом танком слоју. Индустријско сушење често подразумева режиме излагања агенсу високе температуре и брзине струјања. Брзина струјања агенса има значајан утицај на процесе преношења масе и топлоте. Величина и облик су важни параметри код сушења воћа и поврћа. Често се у моделе интегришу величине попут *фактора облика*, како би се умањио утицај облика материјала на процес сушења.



Слика 5.2: Илустрација а) коморе сушаре са лесом и б) танких слојева материјала на лесу. [50] Према ANSI/ASAE стандардима (енг. *American Natl. Standards Inst. / the American Society of Assoc. Executives*) танким слојем се може сматрати сваки слој који не прелази дебљину од три слоја честица/комада материјала.

Слика 5.3: Илустрација концепта универзалне лабораторијске сушаре за једностепено сушење материјала на лесу у танком слоју. [51]

- 1 - вентилатор,
- 2 - секција грејача,
- 3 - лесе са материјалом,
- 4, 6 и 8 - сензори температуре релативне влажности ваздуха,
- 5 - сензор температуре ваздуха,
- 7 - сензор за мерење тренутне масе материјала на лесу,
- 9 - сензор брзине струјања ваздуха.



Слика 5.4: Промена бездимензионе влажности материјала у времену $MR = f(\tau)$.

Позната геометрија материјала је обавезан елемент методе сушења у танком слоју. Релативна влажност ваздуха често бива неконтролисан параметар сушења препуштен случају. Међутим, приликом сушења биосензитивних и ароматичних материјала, где је очување ароме и мириса током сушења од велике важности за квалитет финалног производа, релативна влажност агенса који доспева на материјал мора бити контролисани параметар сушења.

Промена *бездимензионе влажности материјала* у времену $MR = f(\tau)$ (енг. *Moisture Ratio - MR*) (Слика 5.4) може се одредити на основу промене влажности материјала у времену (Слика 5.5), према (5.4),

$$MR = \frac{u(\tau) - u_e}{u_0 - u_e} \tag{5.4}$$

где је: $u(\tau)$ - влажност материјала у произвољном тренутку времена према (5.1); u_0 - влажност материјала на почетку према (5.2); u_e - равнотежна влажност материјала према (5.3).

Брзина сушења $DR = f(u)$ (енг. *Drying Ratio - DR*) (Слика 3.4) може се одредити на основу измерених вредности влажности материјала у два суседна тренутка времена, према (5.5).

$$DR = \frac{\Delta u}{\Delta \tau} = \frac{u_{n+1} - u_n}{\tau_n - \tau_{n+1}} \approx \text{tg } \alpha \tag{5.5}$$

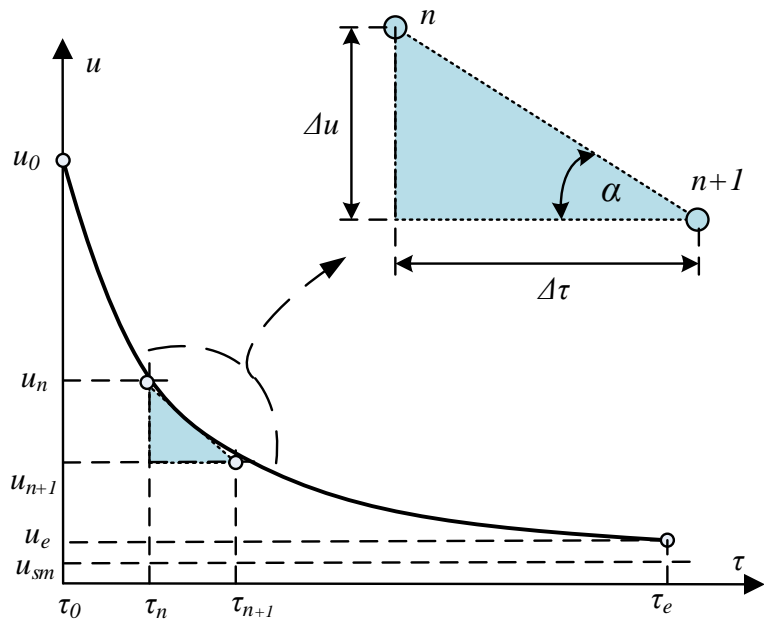
Слика 5.5: Промена влажности материјала у времену $u = f(\tau)$.

$$u(\tau) = \frac{m(\tau)}{m_{sm}} \tag{5.1}$$

$$u_0 = \frac{m_0}{m_{sm}} \tag{5.2}$$

$$u_e = \frac{m_e}{m_{sm}} \tag{5.3}$$

где је: m_0 - маса материјала на почетку сушења; $m(\tau)$ - маса материјала у произвољном временском тренутку током трајања процеса сушења; m_e - маса материјала на крају процеса сушења, односно у стању хигротермалне равнотеже; m_{sm} - маса потпуно сувог материјала која је одређена неком од метода за одређивања масе сувог материјала (нпр. помоћу методе сушења 24 часа на температури 105°C).



Табела 5.1: Модели сушења воћа и поврћа у танком слоју.

(MR - бездимензиони садржај влаге, τ - време, T - температура, φ - релативна влажност, D - пречник, w_a - брзина струјања агенса, II, III - модификације оригиналног модела, $a, b, c, d, e, f, g, k_{0,1,2,\dots}, K_{1,2,\dots}, m, n, \dots$ - параметри у једначинама модела)

Број	Назив модела	Модел
<i>Полушеоријски модели</i>		
1*	Newton	$MR = \exp(-k\tau)$
2*	Page	$MR = \exp(-k\tau^n)$
3*	Page II	$MR = \exp[-(k\tau)^n]$
4*	Page III	$MR = a \exp[-k(\tau/d^2)^n]$
5**	Henderson & Pabis	$MR = a \exp(-k\tau)$
6**	Henderson & Pabis II [52]	$MR = a \exp(-k\tau) + b \exp(-g\tau) + c \exp(-h\tau)$
7**	Logarithmic	$MR = a \exp(-k\tau) + c$
8**	Midilli et al.	$MR = a \exp(-k\tau^n) + b\tau$
9**	Midilli et al. II	$MR = a \exp(-k\tau^n) + b$
10**	Two-term	$MR = a \exp(-K_1\tau) + b \exp(-K_2\tau)$
11**	Two-term exponential	$MR = a \exp(-k_0\tau) + (1 - a) \exp(-ak_1\tau)$
12**	Hii et al.	$MR = a \exp(-k_1\tau^n) + b \exp(-k_2\tau^n)$
13**	Demir et al.	$MR = a \exp(-K\tau)^n + b$
14**	Verma et al.	$MR = a \exp(-k_1\tau) + (1 - a) \exp(-k_2\tau)$
15**	Approximate diffusion	$MR = a \exp(-k_1\tau) + (1 - a) \exp(-bk_2\tau)$
<i>Емпиријски модели</i>		
16	Aghbashlo et al.	$MR = a \exp(\frac{K_1/\tau}{1+K_2\tau})$
17	Wang & Singh	$MR = 1 + a\tau + b\tau^2$
18	Singh et al.	$MR = \exp(-k\tau) - ak\tau$
19	Diamante et al.	$\ln(-\ln MR) = a + b(\ln \tau) + c(\ln \tau)^2$
20	Weibull	$MR = \alpha - b \exp(-k\tau^n)$
21	Thompson	$\tau = a \ln(MR) + b[\ln(MR)]^2$
22	Da Silva et al.	$MR = \exp(-a\tau - b\sqrt{\tau})$
23	Peleg	$MR = 1 - \frac{\tau}{a+b\tau}$
24	Vega-Lemus	$MR = (a + k\tau)^2$
<i>Емпиријски вишепараметарски модели</i>		
25***	Aktas et al. [53]	$k = a + bT + c\varphi$
26***	Zlatanovic [54]	$k = a + bT^m + c\varphi^n$
27****	Henderson & Pabis	$k = k_0 \exp(-\frac{k_1}{T})$
28*****	Kiranoudis et al.	$k = k_0 D^{k_1} T^{k_2} w_a^{k_3} \varphi^{k_4}$

* - Једначине изведене из Њутновог закона хлађења;

** - Једначине изведене из Другог Фиковог закона дифузије;

*** - Моделирање константе k у једначинама 1, 2, 3, 4 и 5 користећи температуру T и релативну влажност φ ;

**** - Једначина која моделира константу k у једначини модела 1 користећи температуру T ;

***** - Једначина која моделира константу k у једначини модела 1 користећи пречник D , температуру T , брзину струјања агенса w_a и релативну влажност φ ;

1* - *Њутонов модел* је у литератури још познат и као *Луисов модел* (енг. *Lewis model*) или *експоненцијални модел* и сматра се најједноставнијим моделом због само једног параметра у једначини модела.

2* - *Пејвов модел* је усвојен према ANSI/ASAE стандардима као модел који је најпогоднији за описивање танкослојног сушења воћа и поврћа.

На оваквом приступу се базирају емпиријски модели сушења, чије се једначине добијају управо на основу експерименталних података (Табела 5.1). За разлику од емпиријских модела, једначине полутеоријских модела имају утемељење у законима одржања, док се параметри у једначинама одређују на основу експерименталних мерења.

Статистички показатељи су математичке величине које се могу користити за процењивање модела танкослојног сушења и помоћу којих се модели могу међусобно поредити.

Квалитет модела најчешће се оцењује неким од статистичких показатеља приказаних у Табели 5.2.

Анализа варијансе је оквир којим се долази до сазнања о нивоима варијабилности у оквиру регресионог модела. Анализа варијансе је слична линеарној регресији. Међутим, главна разлика између ове две анализе је та што се линеарна регресија користи за предвиђање континуираног исхода на основу једне или више континуално предвиђених променљивих (непрекидних), док за разлику од ње, анализа варијанси се користи за предвиђање континуираног исхода на основу једне или више категоричких предвиђених променљивих.⁹ У анализи варијансе се полази од одређивања карактеристичних статистичких показатеља (Слика 5.6).

9: Основне разлике између категоричке и континуалне променљиве су следеће:

► *Категоричка променљива* се користи за груписање и омогућава формирање категорија са низом података. Она омогућава нумеричке прорачуне, а остале не. Кориснија је за спознавање квалитативних информација, односно одређеног квалитета података.

► *Континуална променљива* се користи за бројање и даје нумеричке информације. Она пружа квантитативне податке, односно количине и вредности представљене бројевима.

Табела 5.2: Статистички показатељи.

Број	Назив	Једначина
1	Збир квадрата грешака	$SSE = \sum_{i=1}^n (MR_{ex,i} - MR_{p,i})^2$
2	Збир квадрата тотала	$SST = \sum_{i=1}^n (MR_{ex,i} - \overline{MR}_{ex})^2$
3	Збир квадрата регресије	$SSR = \sum_{i=1}^n (MR_{p,i} - \overline{MR}_{ex})^2$
4	Коефицијент детерминације	$r^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{ex,i} - MR_{p,i})^2}{\sum_{i=1}^n (MR_{ex,i} - \overline{MR}_{ex})^2}$
5	Средња квадратна грешка	$MSE = \frac{1}{N} SSE$
6	Корен средње квадратне грешке	$RMSE = \sqrt{MSE}$
7	Релативни корен средње квадратне грешке	$RRMSE = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (MR_{p,i} - MR_{ex,i})^2}{\sum_{i=1}^n (MR_{p,i})^2}}$
8	Коефицијент корелације	$r = \frac{N(\sum_{i=1}^n MR_{p,i} MR_{ex,i}) - (\sum_{i=1}^n MR_{p,i})(\sum_{i=1}^n MR_{ex,i})}{\sqrt{(N \sum_{i=1}^n MR_{p,i}^2 - (\sum_{i=1}^n MR_{p,i})^2)(N \sum_{i=1}^n MR_{ex,i}^2 - (\sum_{i=1}^n MR_{ex,i})^2)}}$
9	χ^2 расподела	$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(MR_{ex,i} - MR_{p,i})^2}{MR_{p,i}}$
10	Средња грешка пристрасности	$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (MR_{p,i} - MR_{ex,i})$
11	Средња процентуална грешка	$MPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left(\frac{MR_{ex,i} - MR_{p,i}}{MR_{ex,i}} \right) \cdot 100\%$

(p - предвиђена вредност, ex - експериментална вредност, $N = n$ - укупан број запажања/опсервација;

$\overline{MR}_{ex} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n MR_{ex,i}$ - средња аритметичка вредност експерименталних вредности.)

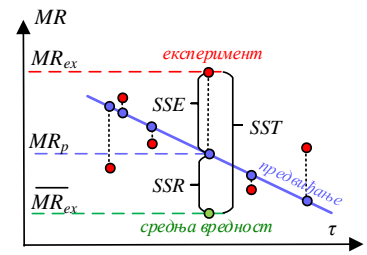
Коефицијент детерминације (енг. *Coefficient of determination*), r^2 или R^2 , је статистички показатељ који представља пропорционални део укупног варијабилитета предвиђене (зависне) величине објашњен утицајем експерименталне (независна) величине. Рачуна се квадрирањем коефицијента корелације и описује тачност уклапања модела линеарне регресије. Веће вредности r^2 значе боље уклапање у емпиријски модел сушења материјала. Међутим, мале вредности r^2 не значе нужно лоше уклапање у свакој ситуацији. Вредност коефицијента детерминације се може кретати у распону $0 < r^2 < 1$. Емпиријски модел који даје вредност $r^2 \approx 1$ може се оценити као добар модел.

Средња квадратна грешка (енг. *Mean square error - MSE*) је статистички показатељ који представља просечну вредност збира квадрата грешака између експерименталних и предвиђених вредности, тако да је вредност $MSE \geq 0$. Вредност $MSE \approx 0$ представљаће бољи квалитет предвиђања, док ће предвиђена величина бити савршена уколико је $MSE = 0$. Сличност између MSE и r^2 је у томе што се обе величине користе за процену перформанси регресионих модела, посебно статистичког модела као што је модел линеарне регресије. Разлика је у томе што се MSE примењује у зависности од тога да ли су подаци срезмерно увећани/ умањени или не.

Корен средње квадратне грешке (енг. *Root mean square error - RMSE*) је статистички показатељ која представља меру одступања емпиријских података од једначине регресије. Квадратним кореновањем вредности MSE , добија се $RMSE$. Што је стандардна грешка регресије мања регресиони модел боље описује зависност посматраних обележја. $RMSE$ је често коришћена мера разлика између вредности предвиђених моделом и експерименталних вредности. $RMSE$ је увек позитивна вредност, а вредност $RMSE = 0$ (скоро никада постигнута у пракси) би указивала на савршено уклапање у податке.

Релативни корен средње квадратне грешке (енг. *Relative root Mean square error - RRMSE*) је показатељ сличан $RMSE$, али за разлику од њега представља меру релативног одступања предвиђених од експерименталних података.

Коефицијент корелације (енг. *Correlation coefficient*), r или R , је статистички показатељ који означава ниво тачности модела као и зависност зависних променљивих од независне променљиве. Када се говори о коефицијенту корелације најчешће се мисли на Пирсонов коефицијент¹⁰ корелације (енг. *Pearson¹¹ coefficient*). Вредности се крећу између



Слика 5.6: Карактеристични статистички показатељи анализе варијансе: SSE , SST и SSR :

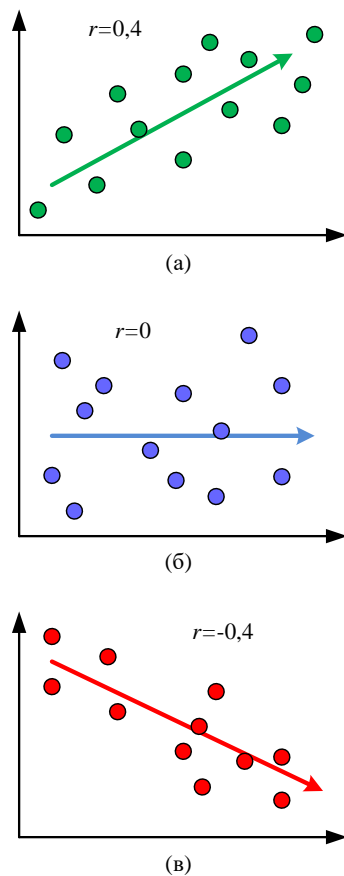
► Збир квадрата грешака/ одступања (енг. *Sum of Squared Error - SSE*) је збир квадрата разлике између посматране зависне променљиве и предвиђене вредности. Може се користити као мера варијације унутар посматраног скупа. Ако су сви случајеви унутар скупа идентични значи $SSE = 0$. Најниже вредности $SSE \approx 0$ близу нуле сматрају се оптималним. У сушењу, многи емпиријски модели нуде ниске вредности SSE , близу 0,001.

► Збир квадрата точала/ експерименталних (енг. *Sum of Squared Total - SST*) је збир квадрата разлике између посматране зависне променљиве и њене просечне вредности (средње вредности).

► Збир квадрата регресије/ предвиђања (енг. *Sum of Squared Regression - SSR*) је збир квадрата разлике између предвиђене вредности и средње вредности зависне променљиве.

10: Пирсонов коефицијент корелације је статистичка величина којом се описује статистичка веза, или повезаност, између две континуиране променљиве величине. Он пружа информацију о величини корелације, као и о правцу односа. Корелација је концепт линеарне везе између две променљиве, док је коефицијент корелације мера која мери линеарни однос између две променљиве.

11: *Karl Pearson* (1857-1936) је енглески математичар и биостатистичар. Заслужан је за успостављање математичке статистике као математичке дисциплине. Основао је први светски одсек за универзитетску статистику на Универзитетском колеџу у Лондону 1911. године и дао значајан допринос у области биометрије и метеорологије.



Слика 5.7: Коефицијент корелације.

- (а) позитивна корелација;
- (б) без корелације и
- (в) негативна корелација.

$-1,0 < r < 1,0$. Позитивна вредност коефицијента корелације $r > 0$ односи се на пропорционални утицај независних променљивих на зависну променљиву, док негативна вредност $r < 0$ указује на инверзне односе (Слика 5.7). Уколико је израчунати коефицијент $r > 1,0$ или $r < -1,0$ значи да је дошло до грешке у мерењу корелације. Веће вредности r указују на боље поклапање предвиђених и експерименталних података.

Хи-квадратна расподела или χ^2 -расподела (енг. *Reduced chi square*) са n степена слободe је дистрибуција суме квадрата n независних стандардно нормалних случајних променљивих. χ^2 расподела је специјални случај гама расподеле и једна је од од најшире коришћених расподела вероватноће у статистици, нарочито у тестирању хипотеза или у конструкцији интервала поузданости. χ^2 тестом упоређује се међусобна корелација две променљиве да би се уочило да ли су оне међусобно повезане. Ниже вредности χ^2 које се приближавају нули сматрају се оптималним и могу указати на избор најбољег модела. Различити емпиријски модели показују различите вредности χ^2 за исти узорак материјала који се суши. Ова варијација је узрокована бројем променљивих величина и параметара емпиријских модела. Слично, χ^2 може варирати и код различитих узорака истог појединачног модела.

Средња грешка њприсњрасносњи (енг. *Mean bias error - MBE*) је показатељ који се користи при статистичком оцењивању непознатих величина основног скупа. Оцена параметра скупа на основу статистике узорка сматра се непристрасном ако је њено математичко очекивање једнако параметру скупа чија се вредност оцењује. Разлика између математичког очекивања оцене и вредности оцењиваног параметра назива се *њприсњрасносњи* или *биас оцене*. Средња грешка пристрасности се првенствено користи за процену просечне пристрасности у моделу и за одлучивање да ли је потребно предузети било какве кораке да се исправи пристрасност модела. Средња грешка пристрасности обухвата просечну пристрасност у предвиђању.

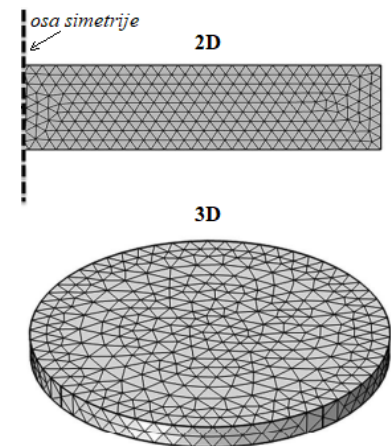
Средња њпроценњуална грешка (енг. *Mean percent error - MPE*) је просечна процентуална вредност *МБЕ* за које се предвиђања модела разликују од стварних вредности количине која се предвиђа. Грешка се дефинише разликом експерименталне вредности и предвиђене вредности. Пошто је *МРЕ* мера грешке, велике вредности се сматрају лошим, а мале добрим. Вредности $MPE < 10\%$ сматрају се одличним, у опсегу $10 < MPE < 20\%$ врло добрим, у опсегу $20 < MPE < 50\%$ задовољавајућим и $MPE > 50\%$ лошим.

5.2 Једнофазни дифузиони модел

Једнофазни модел посматра узорак третираног материјала као једнофазан материјал, што се посебно односи и на воду која се креће кроз материјал, третирајући је као једнофазну супстанцу. Доминантни начин унутрашњег преноса влаге у овом моделу је дифузија, тако да се због тога често назива *једнофазни дифузиони модел*. Једнофазни дифузиони модел (скр. ЈДМ) је најједноставнији облик међу теоријским моделима, заснован је на Фиковом закону дифузије и цео узорак се третира као објекат једне фазе. ЈДМ пружа прелиминарно теоријско разумевање дистрибуције температуре и влаге у узорку током сушења. Имајући у виду да узима у обзир само дифузиони механизам преношења масе и занемарује друге облике унутрашњих механизма преношења масе, ЈДМ-ом не може се постићи потпуни увид у важне феномене као што су проток под притиском и промена фазе течност-гас. Превлађање дистрибуције температуре и влаге је оваквим моделирањем мање тачно као резултат занемаривања других феномена преноса масе вишефазне природе.

Геометрија модела може бити дефинисана у дводимензионом (2D) или тродимензионом (3D) простору. 2D геометрија ангажује мање рачунарских ресурса у прорачунима и извршава их за краће време него 3D. Такође, постојање неке врсте симетрије код геометрије модела може допринети додатним упрошћењима. Пре израчунавања нумеричког модела у методи коначних елемената, коначних разлика или коначне запремине, потребно је извршити *формирање мреже или конвергенцију мреже* (енг. *meshing*). Формирање мреже узима у обзир облик, величину и број елемената домена модела (Слика 5.8). Већи број елемената одређеног домена модела (ситнија мрежа) даје већу прецизност симулације уз значајно веће време и трошкове рачунања.

Једначине ЈДМ потичу из Фиковог закона, односно једначине (1.87) коју је аналитички решио Џон Кранк¹² уз претпоставке да је материјал кроз који влага дифундује изотропан, као и да је интензитет дифузије влаге кроз посматрани попречни пресек материјала пропорционалан градијенту концентрације измереном у правцу нормале на површ попречног пресека. Користећи услове симетрије, као и одговарајуће почетне и граничне услове, дошло се до решења једначине и за поједине карактеристичне геометријске облике материјала који се често јављају и примењују при обради и обликовању прехранбених материјала за процес сушења. Решења једначина подразумевају познавање корелационих једначина између *бездимензионог садржаја влаге у материјалу и ефектив-*



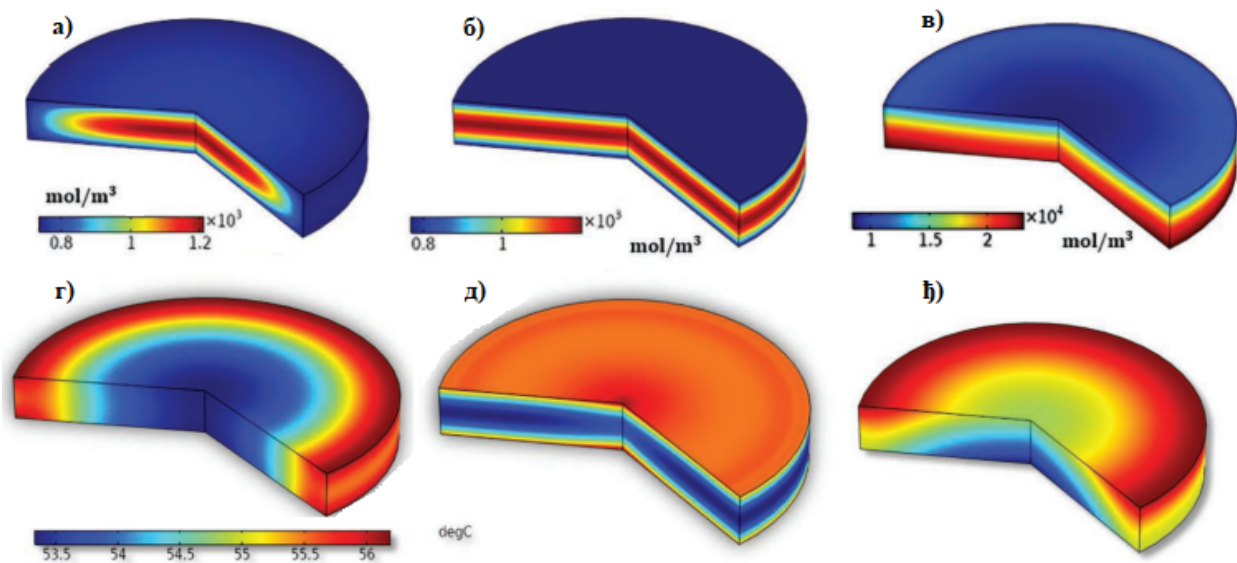
Слика 5.8: Изглед 2D и 3D мреже. [8]

12: *John Crank* (1916-2006) је британски математичар, највише познат по свом раду на нумеричком решавању парцијалних диференцијалних једначина. [55]

них коефицијената дифузије у појединим правцима кретања влаге на путу од центра материјала до спољних површина материјала.

О одређивању *ефективног коефицијента дифузије* већ је раније било речи када се говорило о *ефективној дифузији* (стр. 43). Ефективни коефицијент дифузије зависи од температуре и влажности материјала и представља важну особину која осликава преношење влаге у материјалу. Имајући у виду да се ради о величини која обухвата велики број процеса и појава, постоји потреба за њеним упрошћавањем ради лакшег израчунавања. Поједностављење ЈДМ изводи се увођењем одређених претпоставки које ће истовремено учинити једначине модела лакшим за решавање али и мање тачним. Уобичајене су следеће претпоставке:

- ▶ Узорак материјала се може сматрати термо-механички хомогеним на почетку процеса. Почетна температура и саржај влаге су исти у свим тачкама узорка, који током процеса задржава константне термо-механичке особине (густину, топлотну проводљивост, итд.).
- ▶ Термо-механичке особине се мењају са променом садржаја влаге у материјалу и температуре током сушења.
- ▶ Конвективно преношење топлоте са површи материјала у околину је доминантан механизам преношења топлоте. Вредности коефицијената преношења топлоте и масе са површи материјала је константан током времена на свим деловима површи.
- ▶ Влага се из унутрашњих ка спољашњим слојевима ма-



Слика 5.9: Дистрибуција влаге и температуре у материјалу у зависности од различитих граничних услова. [8] (а,б,в) влага; (г,д,ђ) температура; (а,г) граница са свих страна; (б,д) граница са горње и доње стране; (в,ђ) граница са горње стране.

теријала преноси дифузијом.

- ▶ Преносење топлоте кроз унутрашње слојеве материјала је искључиво кондуктивно.
- ▶ У материјалу не постоји никакав унутрашњи извор топлоте нити се на било који начин генерише топлота.
- ▶ Преносење топлоте зрачењем на површи материјала се занемарује.
- ▶ Деформација/ контракција материјала се занемарује.

Типични резултати оваквог начина моделирања подразумевају поређење прорачунате ефективне дифузивности са експериментално одређеним вредностима исте. Просечан садржај воде и вредности температуре у појединим зонама/ слојевима материјала зависи од постављених граничних услова (Слика 5.9).

Коцка, равна плоча, цилиндар и сфера су геометријска тела која се најчешће користе у пракси (Слика 5.10).

- ▶ Декартови правоугли координатни систем

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = D_{ef} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (5.6)$$

- Коцка

$$MR = \frac{8^3}{\pi^6} \exp \left(- \frac{3\pi^2 D_{ef} \tau}{z^2} \right) \quad (5.7)$$

- Равна плоча

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp \left(- \frac{\pi^2 D_{ef} \tau}{4z^2} \right) \quad (5.8)$$

- ▶ Цилиндрични координатни систем

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \left(\frac{D_r}{r} \right) \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \left(\frac{D_\varphi}{r^2} \right) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} \right) + D_z \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (5.9)$$

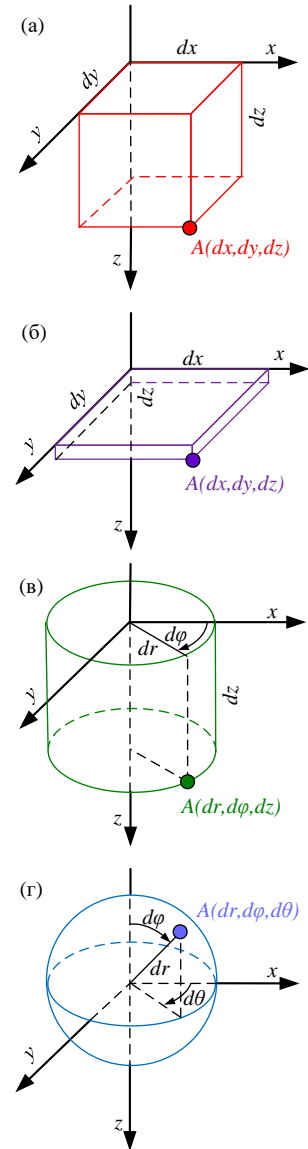
- Цилиндар

$$MR = \left[\frac{4\pi}{\alpha_n^2} \exp \left(- \frac{\alpha_n^2 D_r \tau}{r^2} \right) \right] \left[\frac{8}{\pi^2} \exp \left(- \frac{\pi^2 D_z \tau}{4z^2} \right) \right] \quad (5.10)$$

$$\alpha_n = 2, 4, 3, 13(n-1) \quad (5.11)$$

- ▶ Сферни координатни систем

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = D_R \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (5.12)$$



Слика 5.10: Геометријски облици материјала:

(а) коцка (5.7),
 (б) равна плоча (5.8),
 (в) цилиндар (5.10) и
 (г) сфера (5.13),
 приказане у одговарајућим координатним системима.

x, y, z - координате Декартовог правоуглог координатног система (5.6),

r, φ, z - координате цилиндричног координатног система (5.9),

r, φ, θ - координате сферног координатног система (5.12).

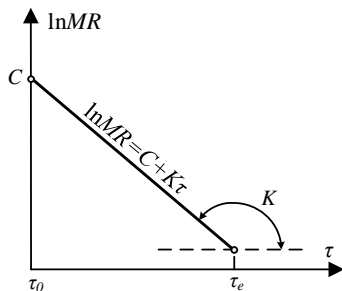
• Сфера

13: Беселовим функцијама назива се сет једначина $y(x)$ које се добијају као решења беселових параметарских диференцијалних једначина n -тог реда, облика:

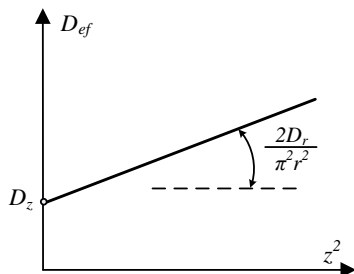
$$x^2 \frac{d^2 y}{dx^2} + x \frac{dy}{dx} + (x^2 - \alpha_n^2) y = 0$$

Број α је произвољан реалан и комплексан број који представља „ред“ Беселове функције. Најинтересантније су оне Беселове функције код којих је α цео број n . Ове једначине налазе широку примену у свим гранама физике, нарочито код процеса и појава таласне природе. Познате су још и под именима *цилиндричне функције* или *цилиндрични хармоници*, јер их налазимо у решењу Лапласових једначина у цилиндричним координатама.

Једначине је први дефинисао *Daniel Bernoulli* (1700-1782) швајцарски лекар, физичар и математичар, а решио их је *Friedrich Bessel* (1784-1846) немачки математичар, астроном и систематичар.



Слика 5.11: Логаритамска промена бездимензионог садржаја влаге у посматраном тренутку времена.



Слика 5.12: Графички приказ међусобне повезаности коефицијентне дифузије влаге у радијалном и аксијалном правцу за случај цилиндричног облика материјала.

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{ef} \tau}{R^2}\right) \quad (5.13)$$

где је: α_n - позитивни корени Беселових функција¹³ које се као међукораци јављају приликом решавања једначина; D_{ef} - ефективни коефицијент дифузије; D_r , D_φ , D_z - ефективни коефицијенти дифузије у попречном, радијалном и вертикалном правцу следствено. У сферном координатном систему посматрана је дифузија D_R само у радијалном правцу. Решења многих проблема који се у сферном систему дешавају у радијално правцу могу се по аналогији представити одговарајућим једнодимензионим моделом, обзиром на то да се прати промена само по једној димензији.

Одређивање *ефективног коефицијента дифузије* се даље изводи графо-аналитичким поступком коме претходи логаритмовање једначина (5.7), (5.8), (5.10) и (5.13). Овим поступком се добијају линеарне функције облика (5.14),

$$\ln MR_n = C + K \cdot \tau_n \quad (5.14)$$

где је: C - константа линеарне функције; K - коефицијент правца праве (Слика 5.11). Ефективни коефицијент дифузије се може одредити у зависности од геометријског облика материјала и претходно одређеног коефицијента правца праве (једначине (5.15), (5.16), (5.17) и (5.18)).

► Коцка

$$D_{ef} = \frac{z^2}{3\pi^2} K \quad (5.15)$$

► Равна плоча

$$D_{ef} = \frac{4z^2}{\pi^2} K \quad (5.16)$$

► Цилиндар

$$D_{ef} = D_z + \left(\frac{2D_r}{\pi^2 r^2}\right) z^2 \quad (5.17)$$

► Сфера

$$D_{ef} = \frac{R^2}{\pi^2} K \quad (5.18)$$

У случају када се облик материјала апроксимира геометријом цилиндра, у зависности од карактеристичних димензија узорка, дифузија влаге може постојати у аксијалном и/или радијалном правцу (Слика 5.12). Уколико су аксијална и радијална димензија приближно исте онда се може претпоставити да ће постојати дифузија у оба правца, мада ово не може бити правило из разлога што структура материјала и контракције које се јављају током процеса сушења могу

битно утицати на интензитет, правац и смер дифузије влаге (оријентација влакана, деформација материјала и слично).

5.3 Вишефазни порозни модел

Сушење је процес који подразумева истовремено преношење топлоте и масе кроз материјале који су најчешће сложене унутрашње структуре. Стога, за тачније описивање овог процеса неопходно је прецизније узети у обзир и његову мултифазност и структурну сложеност. За разлику од ЈДМ, који представља крајње упрошћен начин моделирања, *вишефазни порозни модел* (енг. *Multiphase porous model*) (скр. ВПМ) узима у обзир преношење воде у материјалу у течном и гасовитом стању, као и сложену порозну структуру материјала. Основна идеја модела лежи у претпоставци да су у посматраном порозном материјалу истовремено присутне чврсте, течне и гасовите супстанце, и понашају се у складу са принципима механике континуума и у свим тачкама материјала налазе се у топлотној равнотежи.¹⁴ Чврста фаза се првенствено односи на матрицу порозног материјала, док се течна и гасовита односе на присутну влагу.

Сложеност структуре материјала у ВПМ узима се у обзир преко особина *порозносћи*, *тортиуозносћи* и *хигроскопносћи* материјала.

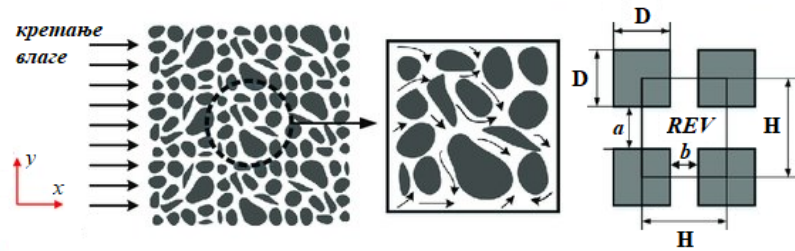
Порозносћ материјала указује на запремину ваздушног простора присутног у прехрамбеном материјалу. Моделирање порозности материјала изводи се најчешће у зависности од садржаја влаге у материјалу. Теоријски модели порозности су изграђени на основу разумевања фундаменталних феномена и механизма који могу бити укључени у формирање пора. Емпиријски модели порозности настају моделирањем експериментално прикупљених података. Већина прехрамбених материјала може се сматрати *порозним*. Поре материјала могу бити испуњене течном и гасовитом фазом воде. Порозност доста утиче на *пермеабилносћ* влаге током сушења материјала. Веома је тешко разликовати порозан од непорозног материјала.¹⁵ Већина пора у материјалу је неуниформног облика и димензија. *Тортиуозносћ*¹⁶ се користи да опише структуру порозног материјала кроз описивање путање кретања влаге у материјалу. Влага се у материјалу креће завојним путањама, често пратећи линију мањег отпора, чиме је њен пут неколико пута дужи од најкраћег могућег растојања. Тортиуозност доста утиче на пермеабилност и дифузивност влаге кроз порозан материјал. За материјал се може рећи да је

14: За систем се каже да је у *топлотној равнотежи* са самим собом уколико је температура унутар система просторно уједначена и временски константна. Два система су у топлотној равнотежи ако између њих нема топлотног протока када су повезани везом која преноси топлоту. Топлотна равнотежа је подређена *нултом закону термодинамике*, који каже да ако су два термодинамичка система у топлотној равнотежи са трећим системом, онда су и они међусобно у топлотној равнотежи.

15: Непорозним материјалом се сматра материјал са порозношћу $\epsilon < 0,25$, средњепорозним са $0,25 < \epsilon < 0,4$, и високопорозним са $\epsilon > 0,4$. [56]

16: *Тортиуозан* значи завојит, кривудава, вијугав, замршен, неразумљив, и слично.

Слика 5.13: Илустрација кретања влаге кроз порозан материјал и пример формирања *REV*. [57]
 D - димензија чврстог материјала;
 H - димензија *REV*;
 a - димензија веза пора;
 b - димензија веза пора.



хигроскопан уколико садржи велику количину физички везане воде. Вредности притисака течне и гасовите фазе воде у хигроскопном материјалу повезане су са активношћу воде у материјалу.

Поступак формирање једначина ВПМ се значајно разликује од поступка примењеног код формирања ЈДМ, скоро у сваком кораку моделирања, почев од геометрије модела па све до основних једначина модела. У случају ВПМ геометрија модела се не посматра збирно, већ као *REV* (Слика 5.13). Погонске силе процеса, које изазивају кретање и преношење влаге кроз материјал, потичу од постојања градијента концентрације који покреће *капиларну дифузију* течности, *дифузију* влаге у течном стању и *бинарну дифузију*¹⁷ мешавине ваздуха и воде у гасовитом стању. У случају када је присутан и градијент притиска, јавиће се истовремено кретање течне и гасовите фазе воде кроз материјал. ВПМ је изведен из једначина основних закона одржања масе, количине кретања и енергије. Закон одржања масе важи за сва агрегатна стања и све фазне промене које се дешавају током сушења. Закони одржања масе и енергије обухватају конвекцију, дифузију и испаравање влаге. Закон одржања количине кретања базира се на Дарсијевим једначинама (1.36).

17: Назив „бинарна” потиче од тога што се посматра двокомпонентна мешавина ваздуха и гасовите фазе воде, односно, дифузија обе компоненте мешавине истовремено. Уколико је у питању мешавина само два гаса, често се користи назив *бинарни гас*.

Основне претпоставке на којима се заснива ВПМ су следеће:

- ▶ Систем материјал-влага је у топлотној равнотежи.
- ▶ Деформација материјала се занемарује.
- ▶ Гасовита фаза влаге се може сматрати идеалним гасом.
- ▶ Материјал је изложен стационарним условима агенса који је непроменљиве температуре и релативне влажности.
- ▶ Стање влаге у материјалу се сматра незасићеним, порозна матрица је делимично испуњена влагом, а остатак је испуњен ваздухом.
- ▶ Утицај гравитације на капиларну дифузију се занемарује.
- ▶ Занемарују се све хемијске реакције унутар материјала.

- Испаравање влаге са површи материјала сматра се неравнотежним процесом.
- Код симетричних система/ домена пренос топлоте и масе се дешава на свим границама осим на границама симетрије.

На бази концепта (Слика 5.14), може се дефинисати математички модел који би се састојао од једначина проистеклих из свих закона одржања, примењених на све транспортване фазе супстанци и механизме преношења о којима је било речи.¹⁸

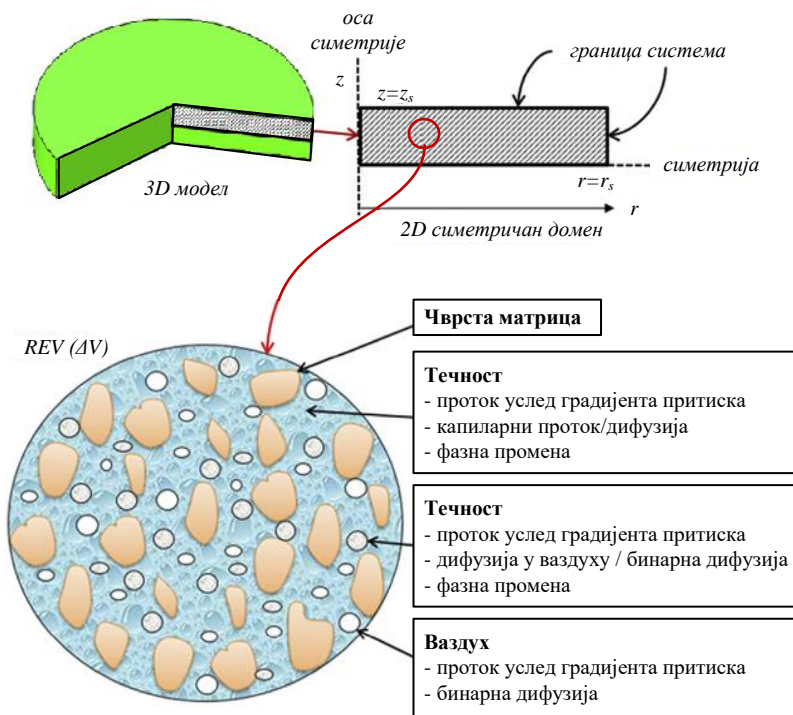
Репрезентативна елементарна запремина ΔV може се одредити као збир запремина свих присутних фаза у њој (чврсте, течне и гасовите), према (5.19).

$$\Delta V = \Delta V_{sm} + \Delta V_t + \Delta V_g \quad (5.19)$$

где је: ΔV - запремина REV у m^3 ; ΔV_i - запремина компоненте у оквиру REV у m^3 .

Порозност REV (ϵ) се може одредити из количника запремине коју заузимају течна и гасовита фаза и укупне запремине REV , према(5.20),

$$\epsilon = \frac{\Delta V_t + \Delta V_g}{\Delta V} \quad (5.20)$$

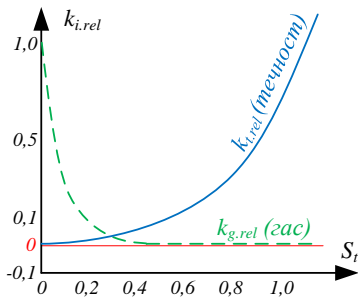


18: Математички модел ВПМ, приказан у наставку, је преузет од [58] и односи се на материјал: јабуку. Улазне вредности параметара модела приказане су у Табели 5.3. Уз адекватну корекцију улазних података и граничних услова, овај модел се у начелу може прилагодити и применити код великог броја порозних прехранбених материјала, нарочито воћа и поврћа.

У представљеном математиком моделу користиће се следеће ознаке у индексима величина:

- sm - чврста материја, сув материјал, чврста матрица материјала,
- t - течна фаза воде,
- p - парна фаза воде;
- a - ваздух (агенс),
- g - укупна гасовита фаза у материјалу (вода + ваздух),
- un - унутрашње,
- rel - релативно,
- ef - ефективно,
- ev - евапорација (испаравање),
- 0 - почетно (иницијално),
- s - симетрије (Слика 5.14),
- rel - релативно,
- amb - амбијентално,
- eq - равнотежно.

Слика 5.14: Шематски приказ 3D модела узорка, 2D симетричног домена и REV са механизмима преношења у појединим фазама. [58]
 ΔV - математичка ознака за репрезентативну елементарну запремину - REV .



Слика 5.15: Релативна пермеабилност течне и гасовите фаза воде материјала јабуке представљена у зависности од засићености материјала течном. [59]

19: Коэффициент укупне пермеабилности флуида у случају постојања вишефазности може се за посматрану i -ту фазу одредити као производ унутрашње и релативне пермеабилности $k = k_i k_{i,rel}$.

Унутрашња (или апсолутна) пермеабилност k_i [m²] узима у обзир вискозност флуида и дебљину слоја материјала и може се одредити изразом (1.36).

Релативна пермеабилност $k_{i,rel}$ [бездимензиона величина] је однос пермеабилности посматране течности у присуству других флуида (у овом случају гасне фазе воде и ваздуха) и апсолутне пермеабилности. Релативна пермеабилност зависи не само од укупне засићености материјала течном (Слика 5.15), већ и од геометрије простора који заузимају поре и геометрије флуида распоређених унутар простора пора. [60]

Засићеност материјала течном (S_t) и гасовитом (S_g) фазом може се одредити према (5.21) и (5.22) следствено,

$$S_t = \frac{\Delta V_t}{\Delta V_t + \Delta V_g} = \frac{\Delta V_t}{\epsilon \Delta V} \quad (5.21)$$

$$S_g = \frac{\Delta V_g}{\Delta V_t + \Delta V_g} = \frac{\Delta V_g}{\epsilon \Delta V} = 1 - S_t \quad (5.22)$$

Концентрација воде у течном фази, воде у парној фази и ваздуха може се одредити из једначина (5.23), (5.24) и (5.25) следствено,

$$C_t = \rho_t \epsilon S_t \quad (5.23)$$

$$C_p = \frac{p_{p,p} M_p}{RT} \epsilon S_g \quad (5.24)$$

$$C_a = \frac{p_{p,a} M_a}{RT} \epsilon S_g \quad (5.25)$$

где је: C - концентрација у kg/m³; ρ - густина; p_p - парцијални притисак у Pa; M - моларна маса у kg/mol; R - универзална гасна константа у J/(molK); T - апсолутна температура у K.

Једначина одржања масе воде у течном фази може се изразити према (5.26),

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\epsilon S_t \rho_t) + \nabla \cdot \left(-\rho_t \frac{k_t k_{t,rel}}{\mu_t} \nabla P - D_k \nabla C_t - D_{td} \nabla T \right) = -R_{ev} \quad (5.26)$$

односно одржања масе воде у гасовитој фази према (5.27),

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\epsilon S_g \rho_g x_p) + \nabla \cdot \left(-\rho_g x_p \frac{k_g k_{g,rel}}{\mu_g} \nabla P - \epsilon S_g \rho_g D_g \nabla x_p \right) = R_{ev} \quad (5.27)$$

где је: x_p - масени удео парне фазе воде (при чему је $x_a + x_p = 1$); $k_i k_{i,rel}$ - коэффициент укупне пермеабилности¹⁹ у m²; μ - динамичка вискозност у Pa·s; P - апсолутни притисак у Pa; T - апсолутна температура у K; D_k - коэффициент капиларне дифузије у m²/s; D_{td} - коэффициент термодифузије у m²/s; D_g - коэффициент бинарне дифузије гасовитих фаза у m²/s; R_{ev} - брзина испаравања (евапорације) влаге унутар материјала у kg/(m³s). У једначини (5.26) члан $D_{td} \nabla T$, који се односи на термодифузију течности, често се занемарује због свог далеко мањег утицаја од капиларне дифузије.

Једначина одржања количине кретања користи се за изражавање притиска гасовите фазе супстанци у материјалу коју чини идеална мешавина воде у парном стању и ваздух. При-

тисак гаса се може изразити из једначине укупног биланса количине кретања, према (5.28),

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\epsilon S_g \rho_g) + \nabla \cdot \left(-\rho_g \frac{k_g k_{g.rel}}{\mu_g} \nabla P \right) = R_{ev} \quad (5.28)$$

где се густина гасовите фазе може одредити према (5.29),

$$\rho_g = \frac{P M_g}{RT} \quad (5.29)$$

где је: M_g - моларна маса гасовите фазе у kg/mol.

Уз претпоставку да се све присутне фазе супстанци у материјалу налазе у стању топлотне равнотеже, једначина одржања енергије се може изразити према (5.30),

$$\begin{aligned} \rho_{ef} c_{p,ef} \frac{\partial T}{\partial \tau} + \nabla \cdot \left[\left(-\rho_g \frac{k_g k_{g.rel}}{\mu_g} \nabla P \right) h_g + \left(-\rho_t \frac{k_t k_{t.rel}}{\mu_t} \nabla P \dots \right. \right. \\ \left. \left. \dots - D_k \nabla C_t - D_{td} \nabla T \right) h_t \right] = \nabla \cdot (\lambda_{ef} \nabla T) - r_0 R_{ev} \end{aligned} \quad (5.30)$$

где је: T - апсолутна температура свих фаза у К; h - енталпија у Ј; c_p - специфични топлотни капацитет при $p = const.$ у Ј/(kgK); λ - топлотна проводљивост у W/(mK); r_0 - латентна топлота испаравања у Ј/kg. Једначина (5.30) узима у обзир преношење енергије конвекцијом и кондукцијом, као и изворе/поноре топлоте услед испаравања/кондензације.

Ефективна топлотна проводљивост и густина материјала могу се израчунати запреминско-масеним осредњавањем за различите фазе према (5.31) и (5.32) следствено.

$$\lambda_{ef} = \epsilon (S_g \lambda_g + S_t \lambda_t) + (1 - \epsilon) \lambda_{sm} \quad (5.31)$$

$$\rho_{ef} = \epsilon (S_g \rho_g + S_t \rho_t) + (1 - \epsilon) \rho_{sm} \quad (5.32)$$

$$c_{p,ef} = m_g (x_p c_{p,g} + x_a c_{p,a}) + m_t c_{p,t} + m_{sm} c_{p,sm} \quad (5.33)$$

Ефективни специфични топлотни капацитет материјала може се израчунати аритметичким просеком сразмерно специфичним топлотним капацитетима и масеним уделитема компонената, према (5.33).

Брзина испаравања (евапорације) влаге унутар материјала може се израчунати једначином (5.34) узимајући у обзир не-

Табела 5.3: Вредности улазних параметара модела на примеру цилиндричног облика (пречника d , висине z) узорка материјала Јабучке. [58]

Параметри	материјала
d	40 mm
z	10 mm
ϵ_0	0,922
$S_{t,0}$	0,794
$S_{p,0}$	0,15
$S_{g,0}$	0,19
T_0	303 K
$x_{p,0}$	0,026
Константе	
K_{ev}	1000
T_a	333 K
R	8,31 J/(molK)
r_0	$2,26 \cdot 10^6$ J/kg
P_{amb}	101325 Pa
M_t	18,016 g/mol
M_p	18,016 g/mol
M_a	28,966 g/mol
Термичке особине	
$c_{p,sm}$	3734 J/(kgK)
$c_{p,t}$	4183 J/(kgK)
$c_{p,p}$	1900 J/(kgK)
$c_{p,a}$	1005 J/(kgK)
λ_{sm}	0,46 W/(mK)
λ_g	0,026 W/(mK)
λ_t	0,644 W/(mK)
ρ_{sm}	1419 kg/m ³
Почетни услови	
$c_{t,0}$	$\epsilon S_{t,0} \rho_t$
$x_{p,0}$	0,026
P_0	101325 Pa
T_0	303 K

равнотежност процеса.

$$R_{ev} = K_{ev} \frac{M_p}{RT} (P_{p,eq} - P_p) \quad (5.34)$$

за $0 \leq r < r_s$ и $0 \leq z < z_s$; где је: K_{ev} - константа испаравања у $1/s$; P_p - притисак паре у Ра.

Притисак влаге у парној фази се може одредити према (5.35),

$$P_p = x_{mol,p} P \quad (5.35)$$

где је: $x_{mol,p}$ - моларни удео паре у гасовитој фази (пара+ваздух) Ра; P_p - укупан притисак гасовите фазе у Ра.

Моларни удео влаге у гасовитој фази може се одредити према (5.36).

$$x_{mol,p} = \frac{x_p M_a}{x_p M_a + x_a M_p} \quad (5.36)$$

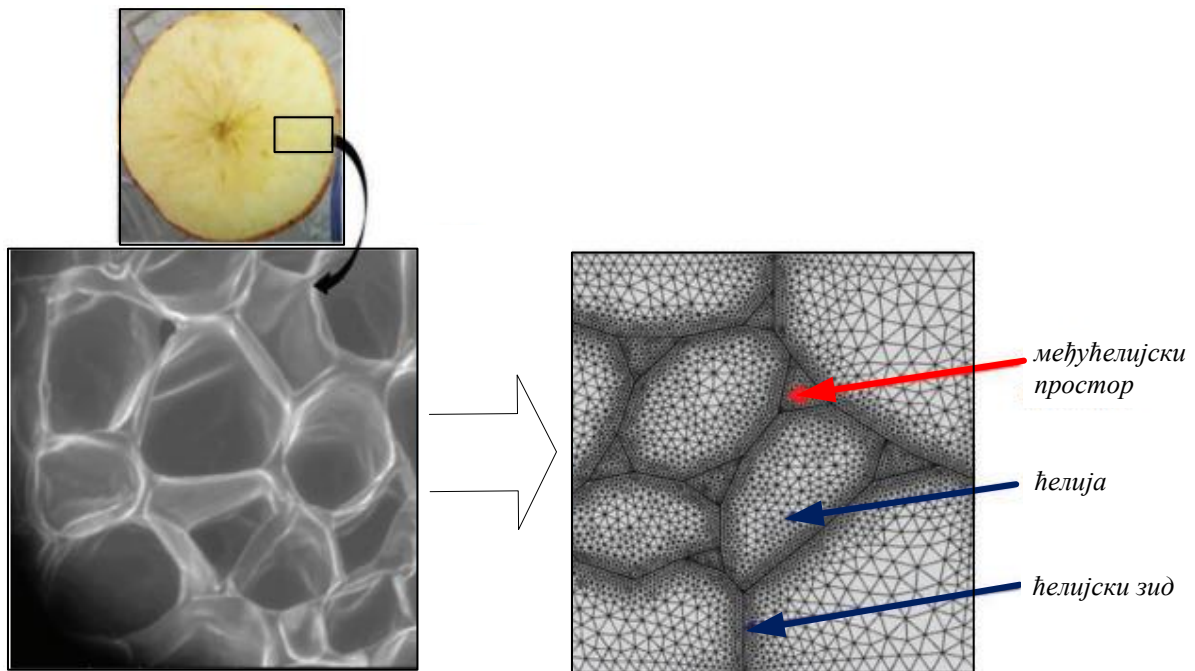
Константа испаравања K_{ev} зависи од особина материјала и процеса, а представља реципрочну вредност времена потребног за достизање уравнотеженог стања $K_{ev} = 1/\tau_{eq}$. Вредност τ_{eq} је зависи од односа запремине гасовитих фаза у порама материјала кроз које пара мора да дифундује и површине расположиве за испаравање.²⁰

20: У случају да су поре најједноставнијег цилиндричног облика процењено време τ_{eq} потребно за достизање уравнотеженог стања је $\tau_{eq} = 10^{-14}$ s. Анализа временске скале према [61] показује да су сва времена преношења већа од времена потребног за достизање уравнотеженог стања за прехранбене материјале са максималном величином пора мањом од $25 \mu m$ (нпр. кромпир, месо, итд.) и имају вредности $\tau_{eq} \leq 10^{-3}$ s.

Када се влага преноси кроз порозни материјал јављају се промене у микроструктури материјала које доводе до његове контракције и скупљања, чиме се величина пора у материјалу мења. Стога, може се рећи да је порозност променљива особина деформабилних материјала. Моделирање тренутне деформације није једноставно и зато већина постојећих ВПМ разматра порозност као непроменљиву особину. Међутим, без разматрања променљиве порозности у ВПМ, засићења различитих фаза биће погрешно предвиђена. ВПМ захтева познавање више термо-физичких особина материјала, а особине варирају у зависности од врсте узорака. Порозност, дифузивност течне воде, пропустљивост гаса, капиларни притисак и ефективна дифузивност гаса су подаци неопходни за ВПМ, али често непознати код већине порозних материјала. Посебну отежавајућу околност представља чињеница да већина ових особина доста зависи од садржаја влаге у материјалу и температуре материјала.

5.4 Моделирање у микро-размери

Моделирање у микро-размери (енг. *Micro-scale modeling*) омогућава посматрање истовременог преношења топлоте и масе



Слика 5.16: Домен и геометрија у микро-размери. [62]

на нижем функционалном нивоу, као што су ћелије прехранбених материјала биљног порекла. У општем случају под посматрањем модела у микро-размери подразумева се разматрање хетерогене структуре материјала и различитих феномена преношења на различитим размерама које ће олакшати моделирање на микро и макро нивоу. Микро модел се значајно разликује у многим аспектима у поређењу са моделом на макро скали. Разлика је присутна од геометријског облика микро модела па све до физичких законитости којима се описују појаве и процеси на микро нивоу. Другим речима, процеси посматрани у микро-размерама могу да се разликују од одговарајућег еквивалентног процеса у макро-размери у смислу транспортних особина, граничних услова, па чак и физичког тумачења. На пример, расподела влаге и температуре значајно варирају на микро нивоу у односу на макроскопски идентификоване вредности. Међутим, овај приступ моделирању није одговарајући за материјале који не показују другачије особине преношења од својих еквивалената у макро-размери.

Микро-структурне особине материјала битно утичу на преношење топлоте и масе током сушења. Дефинисање микро-размере је сложен задатак, нарочито код хетерогених материјала који показују различите особине у различитим размерама. Одређивање микро-размере увелико зависи од природе и величине²¹ пора у материјалу. Узорак биљног материјала на

21: Нано-пора 0,1-2 nm,
Микро-пора 2-50 nm,
Микро-капилара 50-2000 nm,
Капилара 2-50 μm ,
Макро-капилара >50 μm .

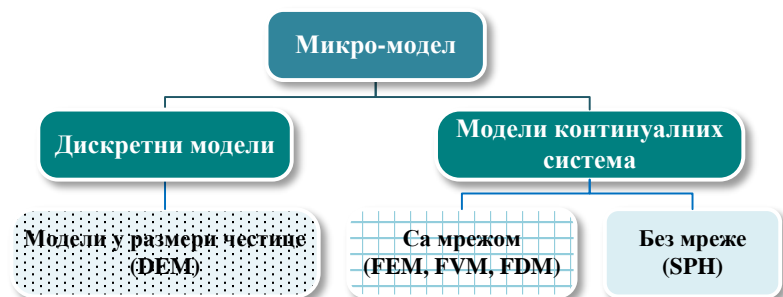
нивоу ћелије може се третирати као модел у микро-размери (Слика 5.16). За ћелијске материјале прехранбених материјала, феномени преношења који се одвијају кроз поре, ћелије и ћелијске зидове материјала могу се категорисати као феномени микро-размера. Структурни параметри на ћелијском нивоу као што су пречник, дебљина зида, облик и организација ћелија утичу на особине материјала на нивоу ткива. Геометријска својства микро-размере, укључујући пречник пора и дистрибуцију пречника пора, значајно утичу на особине преношења на макро-размери. У микро-моделу, различити делови пора се разликују у смислу положаја, облика и оријентације.

На преношење влаге у великој мери утичу расположива величина пора и својства пропусног слоја. Димензија и расподела пора су најважнији геометријски параметри пермеабилности влаге. Моделирање преношења топлоте и масе током сушења хране остаје непотпуно уколико се моделом не обухвате и механизми преношења у посматраној микро-размери.²²

За решавање модела сушења на микро-размери доступно је неколико напредних нумеричких метода (Слика 5.17):

1. **Дискретни модели** су погодни за моделирање неконтинуалних система. *Метода дискретних елемената* (енг. *Discrete element method - DEM*) је пример дискретног модела који показује феноменолошку природу посматране средине. *DEM* се генерално користи за проучавање интеракције појединачних честица уместо за проучавање целог система. Дискретни модели су веома прилагодљиви описивању појаве деформација материјала које се дешавају током сушења. Пошто се ради о посматрању система као скупа честица, симулација максималног броја честица је ограничена рачунарским ресурсима. У случају дискретних модела, формирање мрежа се уопште не разматра.
2. **Модели континуалних система** се примењују за моделирање материјала чија се структура може сматрати континуалном средином. Због природе континуума

22: На пример, у посматраном домену и одабраној микро-размери, могу се догодити различити облици дифузионог преношења масе, као што су: дифузија течности, дифузија паре, молекуларна дифузија и Кнудсенова дифузија. Наравно, поменути облици дифузије се у посматраном домену могу или не морају јавити истовремено.

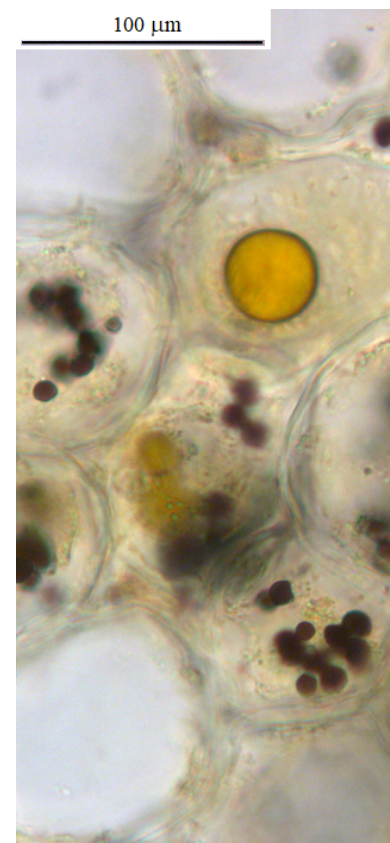


Слика 5.17: Шема рачунарског приступа нумеричком решавању микро-модела.

чврстих материјала на микро и макро нивоу, овакво моделирање се најчешће може успешно применити. У случају да је домен посматрања флуидна средина, континуални приступ функционише са прихватљивом прецизношћу. Модели континуалних система могу бити модели са мрежом и модели без мреже.

- ▶ *Модели са мрежом* имају домен подељен на бројне мање поддомене. Сваки поддомен се третира као запремина, елемент или разлика у методи коначних елемената (енг. *Finite element method - FEM*), методи коначних запремина (енг. *Finite volume method - FVM*) и методи коначних разлика (енг. *Finite difference method - FDM*) следствено. Елементи су у посматраном домену међусобно повезани у одређеном броју чворних тачака, чиме се и формира мрежа домена. *FVM* процењује тачне изразе за просечну вредност решења у одређеној запремини и користи ове податке за конструисање апроксимација решења унутар ћелија. За разлику од њих, *FEM* је креирала локалне апроксимације решења користећи локалне податке, конструишући глобалну апроксимацију спајајући их заједно. Односно, *FDM* апроксимира деривате користећи вредности чворова.
- ▶ *Модели без мреже* се не примењују тако често као модели са мрежом, али могу се примењивати код формирања микро-модела биљних ћелија. У области нумеричке анализе, модели без мреже не захтевају везу између чворова симулационог домена, односно мреже, већ се заснивају на интеракцији сваког чвора са свим његовим суседима. Као последица тога, оригинална екстензивна својства као што су маса или кинетичка енергија више се не додељују елементима мреже, већ појединачним чворовима. *Хидродинамички модел глатких честица* (енг. *Smoothed particle hydrodynamics - SPH*) је пример модела без мреже, а који је погодан је за моделирање анизотропних материјала. *SPH* и други модели без мреже су у потпуности развијени за континуалну механику чврстог материјала и проблеме везане за флуид.

Описивање феномена преношења топлоте и масе на месту где се додирују/ спајају ћелије, ћелијски зидови и међућелијски простор захтева формулисање почетних и граничних услова у једначинама. Ови услови се разликују код микро и макро начина посматрања. На пример, у посматраној



Слика 5.18: Попречни пресек корена валеријане снимљен оптичким микроскопом модел Leica DMLS/DC300, увећања X40, третиран Луголовим раствором (тамноцрвени раствор који садржи 5% јода у 10% раствору калијумјодида, што чини концентрацију јода од око 130 mg/ml).

микро-размери ћелија може бити окружена другим ћелијама или празним простором. Улазне величине најчешће обухватају податке о димензијама домена и особинама преношења. Код микро-модела ће присутне величине бити реда величине ћелије. Најчешће посматрани параметри у микро-размери су:

- ▶ *Димензија домена* није егзактан параметар јер зависи од размере у којој се домен посматра. За одређивање димензија се често користе оптичка (Слика 5.18) или електронска микроскопија.
- ▶ *Термичке особине* се не посматрају на нивоу *REV* као што је то случај код макро-размера, већ се за њихово одређивање користе специјални мерни инструменти. На пример, код одређивања специфичне топлоте користи се метода *калориметрије диференцијалног скенирања*²³ или код топлотне проводљивости *3 ω -метода*²⁴.
- ▶ *Особине преношења влаге* на микро-нивоу значајно се разликују од оних на макро нивоу због различитих структурних карактеристика одговарајућих домена. На пример, пропустљивост воде кроз ћелијски зид се разликује од пропустљивости ткива. Особине преношења на ћелијском нивоу могу се одредити експериментално коришћењем *нуклеарне магнетичне резонанце* (енг. *Nuclear magnetic resonance - NMR*) и *рендгенске томографије* (енг. *X-ray micro-computed tomography - μ CT*).

23: Диференцијална скенирајуће калориметрија (енг. *Differential scanning calorimetry - DSC*) је термоаналитичка техника у којој се разлика у количини топлоте потребне за повећање температуре узорка и референтне вредности мери као функција температуре. Узорак и референца се током мерења одржавају на истој температури.

24: *3 ω -метода* је мерна метода за одређивање топлотне проводљивости расутог материјала (чврстог или течног) и танких слојева. Узорак се периодично загрева металним грејачем, изазивајући осцилације температуре које се потом мере.

Нумеричко анализирање процеса и појава у вези са процесом сушења и материјала (Слика 5.19) који се суши базира се на креирању нумеричких модела решења једначина преношења масе, топлоте и количине кретања. Напретком рачунарске технике и софтверских алата, више различитих рачунарских метода се примењивало у моделирању сушења порозних материјала. Може се са сигурношћу рећи да у овом тренутку не постоји универзални рачунарски софтвер који



Слика 5.19: Кључни кораци у математичком моделирању.

може са сигурношћу и прецизно симулирати све процесе и појаве који се јављају при сушењу прехранбених материјала. Са друге стране, постоји више појединачних софтвера који са довољном прецизношћу могу да помогну у решавању и описивању појединачних проблема у вези са сушењем.²⁵

У претходном делу поменуто је неколико нумеричких метода за решавање дискретних модела и модела континуалних система, о којима ће нешто више бити речено у наставку.

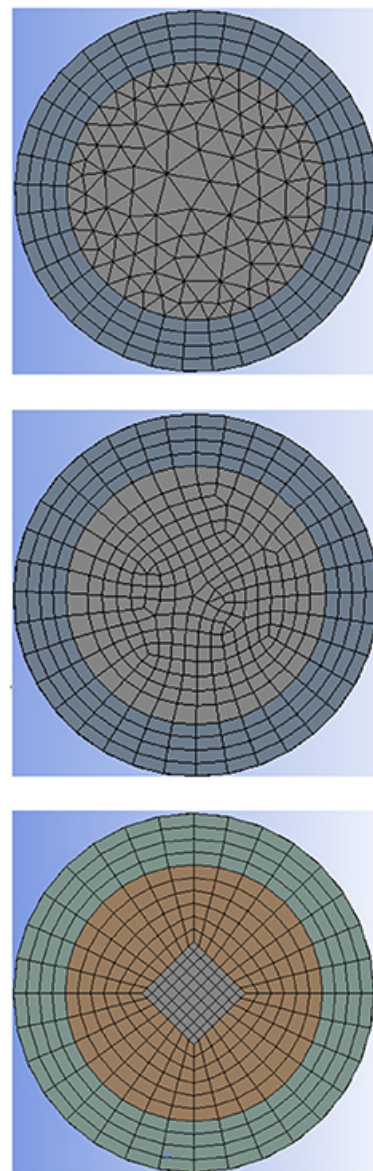
Метод дискретних елемената (енг. *Discrete element method - DEM*) су један од првих принципа физике који систем разматрају као домен који се састоји од бројних честица. *DEM* је намењен за моделовање догађаја у којима велики број дискретних честица додирује једна другу, првенствено за израчунавање кретања и ефекта великог броја малих честица. Честица не мора бити најмања јединица узорка, већ се група мањих јединица такође може третирати као крупна зрнаста честица. Честице нису физички међусобно повезане у целом узорку. Типично, свака *DEM* честица представља засебно зрно, таблету, капсулу, итд.

DEM је интуитивна метода у којој се дискретне честице сударају једна са другом и са другим површинама током експлицитне динамичке симулације. *DEM*-симулација почиње тако што се прво генерише модел којим ће се просторно оријентисати свака честица и доделити јој се почетна брзине. Силе које делују на сваку честицу израчунате су из почетних података и релевантних физичких закона и контактних модела. Симулација се најчешће састоји од три дела: иницијализације, експлицитног прорачунавања у задатом временском кораку и накнадне обраде података. Временски корак је обично дефинисан тако да се умањи број могућих прорачунских циклуса и умање рачунски захтеви, а често се своди само и на периоде од интереса. Овај метод је повољан за вискозне и вискоеластичне материјале и често се користи за симулацију хидродинамичких проблема. Почетна својства честица представљају почетно стање домена које еволуира током времена. Штавише, честице могу да реагују као одговор на дате силе примењене током сушења. *DEM* не може да пружи информације о просеку запремине елемената континуума. Комбиновани модел *DEM* и *FEM/FVM* може да обезбеди одговарајућу деформацију домена током сушења.

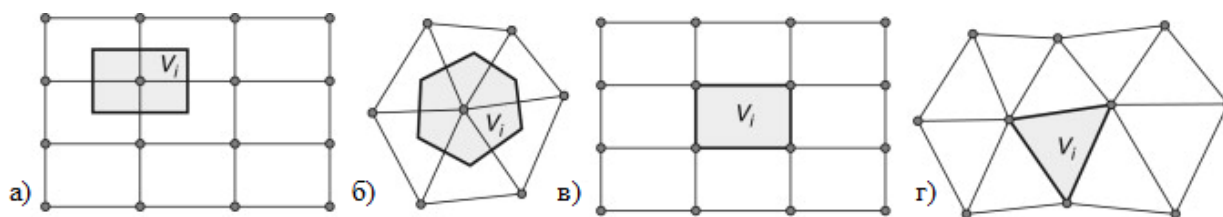
Метода коначних елемената (енг. *Finite element method - FEM*) метода за нумеричко решавање диференцијалних једначина које настају у инжењерском и математичком моделовању, а која је вероватно најмоћнији метод познат за нумеричко решавање граничних и почетних задатака које карак-

25: *Мали софтвери* за влажан ваздух и водена пара (нпр. LINRIC, PSYCHRO, CoolPACK, ...) понекад укључују корисне алате за дизајн или подешавање сушара, али не и прави свестрани софтвер посвећен свим врстама сушара за храну.

Велики софтверски пакети (нпр. PROSIM, ASPEN, ...) посвећени су дизајну, подешавању и оптимизацији хемијских процеса који се уз доста труда могу прилагодити за решавање неких проблема сушења хране.

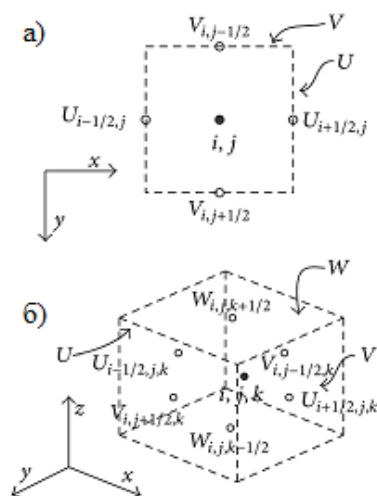


Слика 5.20: Илустрација различитих начина креирања *FEM* мреже.



Слика 5.21: Илустрација различитих начина дискретизације домена *FVM*.

теришу парцијалне диференцијалне једначине (скр. ПДЈ). *FEM* дели велики систем на мање, једноставније делове који се називају коначни елементи. Систем се може поделити на бесконачан број елемената уколико се посматра као континуум. *FEM* поступак моделирања почиње конструкцијом мреже нумеричког домена са коначним бројем елемената (Слика 5.20). Величина елемента и облик су кључни у посматрању расподеле температуре и влаге унутар узорка. Неодговарајућа величина елемента може довести до изостављања одређених физичких појава из разматрања на посматраном нивоу. Поступак се даље наставља систематским рекомбиновањем свих скупова једначина елемената у глобални систем једначина коначног прорачуна. Овај систем једначина користи почетне и граничне услове како би био решив.



Слика 5.22: Илустрација дискретизације контролне запремине: а) 2D домен, б) 3D домен.

26: Дивергенција у векторској анализи представља векторски диференцијални оператор, који мери интензитет извора или понора векторскога поља у одређеној тачки и за резултат има скаларно поље.

Дивергенција векторскога поља $\mathbf{F} = U\mathbf{i} + V\mathbf{j} + W\mathbf{k}$ означава се као: $\text{div } \mathbf{F} = \nabla \cdot \mathbf{F}$ и рачуна се као $\nabla \cdot \mathbf{F} = \frac{\partial U}{\partial i} + \frac{\partial V}{\partial j} + \frac{\partial W}{\partial k}$

Метода коначних запремина (енг. *Finite volume method - FVM*) је нумерички метода који се користи процену елиптичких, параболичких или хиперболичких ПДЈ у облику алгебарских једначина, на основу закона одржања. *FVM* је метода дискретизације за апроксимацију једне или система ПДЈ које изражавају очување, или равнотежу, једне или више величина. Ове ПДЈ се често називају законима одржања и могу бити различите природе. Они описују односе између парцијалних извода непознатих поља као што су температура, концентрација, притисак, моларни удео, густина електрона или функција густине вероватноће, с обзиром на променљиве унутар домена (простор, време,...) који се разматра. Као и у методи коначних елемената, и у *FVM* се конструише мрежа која се састоји од партиције домена у коме фигурише просторна променљива. Елементи мреже се називају контролним запреминама. Дискретизација домена на контролне запремине V_i (Слика 5.22) може се извршити усвајањем једног од два приступа: први приступ подразумева да је сваки чвор мреже центар коначног волумена, чије се границе добијају повезивањем центара сваког елемента (Слика 5.21а,б), док се код другог приступа контролне запремине поклапају са елементима (Слика 5.21в,г).

Код оваквог приступа моделирању, феномени преношења су вођени концептима *дивергенције*²⁶ величина, контролне за-

премине и границе. Дивергенција масе кроз контролну запремину и фуксе масе на граничном слоју су главни концепти *FVM*.

Метода коначних разлика (енг. *Finite difference method* - *FDM*) је нумеричка техника за решавање диференцијалних једначина апроксимацијом извода са коначним разликама на равномерно распоређеним тачкама мреже. Овом методом, и просторни домен и временски интервал (ако је применљиво) су дискретизовани, или подељени на коначан број корака. На овај начин диференцијална једначина се трансформише у систем алгебарских једначина које треба решити.

У *FDM*, изводи се у диференцијалној једначини апроксимирају помоћу формула коначних разлика. Интервал од $[a, b]$ можемо поделити на n једнаких подинтервала дужине h (Слика 5.23). Уобичајен приступ подразумева коришћење једначина централне разлике у *FDM* због веће тачности. Диференцијална једначина се примењује само на тачкама мреже, а први и други извод се могу написати према (5.37) и (5.38) следствено.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2h} \quad (5.37)$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{y_{i-1} - 2y_i + y_{i+1}}{h^2} \quad (5.38)$$

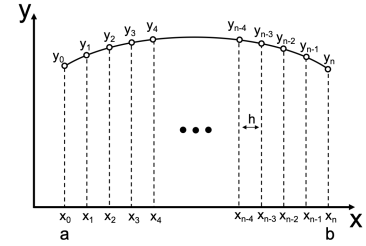
FDM се може успешно користити за решавање проблема везаних за структурну анализу и преношење топлоте и масе.

Хидродинамика глатких честица (енг. *Smoothed particle hydrodynamics* - *SPH*) једна је од најстаријих метода, без мреже, која се користи се за симулације у области механике чврстих тела и токова флуида у континуалним срединама. Овом методом се тачке података третирају као физичке честице (флуидни делићи) са масом и густином које се могу кретати током времена и које поседују неку сопствену вредност B_i . *SPH* методом се дефинише вредност $B(x, \tau_n)$, на позицији x_i у тренутку времена τ_n , према (5.39).

$$B(x, \tau_n) = \sum_i m_i \frac{B_i^n}{\rho_i} W(|x - x_i|) \quad (5.39)$$

где је: m_i - маса честице; ρ_i - густина честице; W - функција расподеле вероватноћа; B - вредност посматране величине. У случају постојања линеарности, парцијални извод се може записати као (5.40).

$$\frac{\partial B}{\partial x} = \sum_i m_i \frac{B_i^n}{\rho_i} \frac{\partial W}{\partial x}(|x - x_i|) \quad (5.40)$$



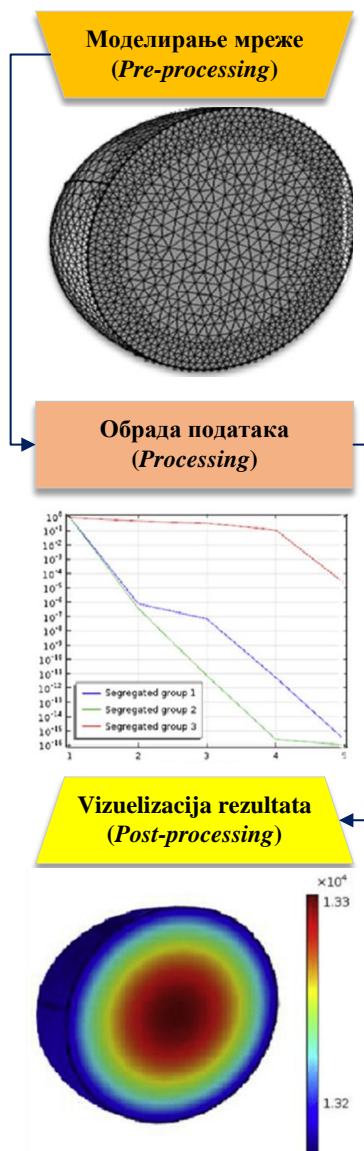
Слика 5.23: Илустрација формирања коначних разлика.[63]

У физичком смислу, оваквим начином представљања у диференцијалном облику, може се, на пример, израчунавати сила између честица, а затим и интеграција ових сила током времена да би се одредило кретање честица. Потребни рачунарски ресурси за извођење *SPH* симулација по броју честица су знатно мањи од трошкова симулација заснованих на мрежи по броју ћелија када су величине које фигуришу у моделу повезане са густином течности.

5.5 CFD моделирање

Рачунарска динамика флуида (енг. *Computational Fluid Dynamics - CFD*) је приступ моделирању који се широко примењује у моделирању различитих технолошких операција, нарочито код процеса који укључују истовремено преношење топлоте и масе и протока течности. Разумевање процеса *CFD* моделирања је од виталног значаја за сушење, а дефинисање прецизних почетних и граничних услова је основни предуслов за успешно моделирање флуида (Слика 5.24). Неке од главних предности примене *CFD* модела сушења су могућност квантификације просторног и временског посматрања процеса и посматрање утицаја параметара сушења на целокупан процес. Такође, применом *CFD* могуће је моделирање процеса сушења који укључује проток течности као што је сушење распршивањем и конвективно сушење.

Поступак *CFD* моделирања зависи од ситуације и информација које се желе добити у посматраном проблему. У општем случају, постоје два различита приступа *CFD* моделирању којима се добијају коњуговани (обједињени) (енг. *Conjugated drying models*) и некоњуговани модели. У оквиру некоњугованог моделирања проучава се преношење топлоте и масе у течном или чврстом стању материјала са променљивим или константним термофизичким својствима. Међутим, уколико се чврсти или течни прехранбени материјал моделује заједно са околним медијима (гас или течност), такво моделирање је коњуговано (обједињено). Параметри сушења, као што су температура, проток агенса, влажност и притисак, битно утичу на истовремено преношење топлоте и масе у материјалу. Узимајући ово у обзир, обједињено посматрање протока флуида у моделу и истовременог преношења топлоте и масе чини модел сушења реалистичнијим (Слика 5.25). Оваквим моделом симулира се расподела температуре и влаге и у домену узорка и у околини узорка. Овај модел се креира на основама гране механике флуида која се базира на рачунарском



Слика 5.24: Главна шема *CFD* анализе. [64]

моделовању појава и процеса у вези са флуидима, односно *рачунарскај динамици флуида*.

Постоји више начина како се може приступити решавању проблема у вези са струјањем флуида. Генерални приступ се базира на Навије-Стоксовим једначинама (скр. НСЈ) (4.28) и хипотезама механике континуума. НСЈ се не могу егзактно решити због своје сложености и свеобухватност, али могу се одговарајућим претпоставкама поједноставити. Претпоставке у вези са вискозношћу течности и моделом турбуленције највише утичу на сложеност модела.

Основне претпоставке у поставци *CFD* модела сушења су:

- ▶ Почетна температура и влажност материјала су униформни у посматраном домену и материјала и околине.
- ▶ Домен посматрања је релативно мањи од целог система за сушење и не изазва турбуленцију.
- ▶ Површина материјала је правилног облика и ефекат површинског трења се може занемарити.
- ▶ Влажан ваздух се може сматрати нестишљивим и има својства која зависе од температуре.
- ▶ Дисипација топлоте из ваздуха трењем се занемарује.
- ▶ Деформација материјала се занемарује.

Основни кораци CFD анализе су:

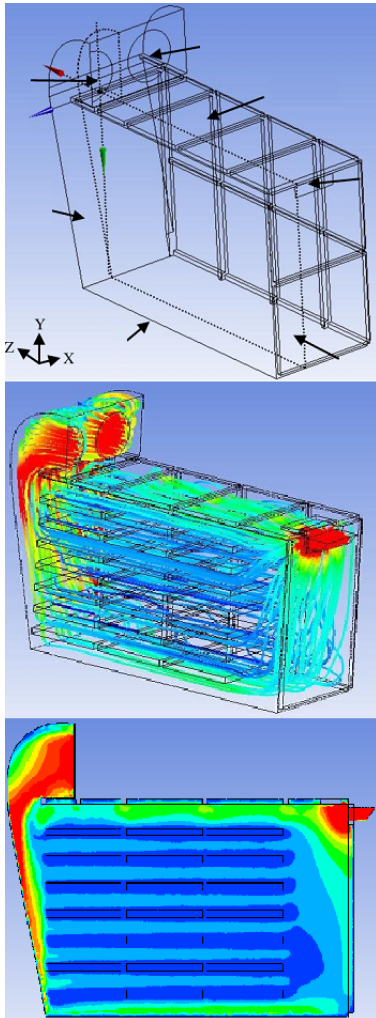
1. Дефинисање проблема.
2. Дефинисање почетних и граничних услова. Гранични услови који су уобичајени за креирање *CFD* модела су следећи:
 - ▶ Брзина струјања флуида који је у додиру са чврстом површином (зидом) једнака је нули, тј. не постоји клизање честица флуида које су у додиру са зидом.
 - ▶ Улазни гранични услови постављају се на местима где флуид улази у систем/ контролну запремину и обухватају податке о брзини струјања, притиску, температури, турбуленцији и слично.
 - ▶ Излазни гранични услови постављају се на местима где флуид напушта систем/ контролну запремину.
3. Избор референтног оквира посматрања у вишефазном систему подразумева опредељивање за неки од приступа за представљање основних једначина. У проучавању поља струјања флуида најчешће се користе Ојлеров²⁷ и Лагранжов²⁸ приступ. *Ојлеров њрисџуи* подразумева праћење промена физичких величина кроз време



Слика 5.25: Концепт обједињеног моделирања.

27: *Leonhard Euler* (1707-1783) је швајцарски математичар, физичар и инжењер. Бавио се разним областима математике као што су аналитичка теорија бројева, комплексна анализа и прорачунима у домену механике континуума. Приписују му се велике заслуге за допринос у механици флуида.

28: *Joseph-Louis Lagrange* (1736-1813) је италијанско-француски математичар и астроном, који је дао важан допринос на свим пољима анализе и теорије бројева, класичне и небеске механике. Сматра се највећим математичарем 18. века.



Слика 5.26: Илустрација примене CFD за анализу униформности струјања ваздуха у конвективној сушари са лесема. [65]

29: У математици, *Кронекерова делта* (δ_{ij}) је функција две променљиве, обично два цела броја, која узима вредност 1 уколико су бројеви исти, а вредност 0 (нула) у супротном. Тако, на пример, $\delta_{12} = 0$, а $\delta_{33} = 1$. Више се користи као нотацијска скраћеница, него као функција.

Leopold Kronecker (1823-1891) је немачки математичар и логичар који сматрао да аритметика и анализа морају бити засноване на целим бројевима.

у унапред задатим фиксним тачкама добијених дискретизацијом посматраног домена. Овај приступ захтева унапред дефинисан распоред тачака, односно формирану рачунску мрежу. *Лагранжов приступ* подразумева праћење истих промена у ограниченом броју флуидних делића и не захтева дефинисање рачунске мреже. У том случају сваки флуидни делић мора бити носилац различитих променљивих величина (маса, брзина, положај и слично). Приступ двофазног струјања са међуфазном површином (енг. *Volume of fluid method - VOF*) је метода почива на претпоставци да се струјање дешава у потпуно засићеној средини и да нема међусобног продора фаза у двофазном струјању.

4. Примена основних једначина одржања:

► *Закон одржања масе (једначина континуитетна)* указује на то да постоји тачна равнотежа између долазног и одлазног тока масе у посматраном флуидном делићу, према (5.41),

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho w_i) = 0 \quad (5.41)$$

где је: ρ - густина у kg/m^3 ; τ - време у s ; x - растојање у m ; w - брзина у m/s ; i - индекс Декартове координатне осе (i, j, k за x, y, z осу следствено).

► *Закон одржања количине кретања (импулса)* указује на то да постоји равнотежа између промене брзине линеарног кретања и збира спољашњих сила које делују на флуидни делић, према (5.42),

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau} (\rho w_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho w_i w_j) = \dots \\ \dots = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-P \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial w_i}{\partial x_j} + \frac{\partial w_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i \end{aligned} \quad (5.42)$$

где је: δ - Кронекерова делта²⁹; μ - динамичка вискозност у $\text{Pa}\cdot\text{s}$; g - убрзање силе Земљине теже у m/s^2 .

► *Закон одржања енергије* указује на постојање једнакости између брзине промене енергије флуидног делића и размењене количине топлоте или рада са околиним, према (5.43),

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho c T) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho w_j c T) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = \dot{Q}_{gen} \quad (5.43)$$

где је: c - специфични топлотни капацитет у $\text{W}/(\text{kgK})$; T - апсолутна температура у K ; λ - топлотна проводљивост у $\text{W}/(\text{mK})$; \dot{Q}_{gen} - генерисани топлотни проток (извор или понор) у W/m^3 .

5. Имплементација допунских једначина преношења често

се примењује за описивање турбуленције, протока честица, таложења честица и преношења топлоте. Као допунска једначина којом ће се објаснити преношење влаге користи се Фиков закон дифузије, док се за одређивање размењене топлоте у изотропном чврстом материјалу користи се Фуријеова једначина. У случају постојања турбулентног струјања флуида, поред НСЈ потребне су и допунске једначине које ће описати карактер присутних турбулентних процеса. Најчешће примењивани модели за описивање турбулентности су $k - \epsilon$ и $k - \omega$ модели.³⁰

6. Опредељивање за 2D или 3D домен посматрања уз упрошћивање сложености модела.
7. Формирање мреже модела.³¹
8. Дискретизација ПДЈ применом неке од метода коначних елемената, запремине или разлика.
9. Решавање резултујућих алгебарских једначина.
10. Провера квалитета формиране мреже на основу добијених резултата.
11. Провера грешака у резултатима прорачуна и евентуална корекција мреже ради постизања конвергенције у прорачуну.
12. Резултат *CFD* модела представљен је визуелизацијом протока флуида и преношења топлоте и масе (Слика 5.26 и Слика 5.27). Визуелизација добијених резултата симулације за притисак, векторе брзине, дистрибуцију температуре и концентрацију супстанце (у облику течности или чврсте) током термичких процеса, коришћењем атрактивних фигура у боји и анимација, може помоћи у тумачењу физичких феномена који се дешавају, чиме се унапређује целокупни процес и квалитет производа.

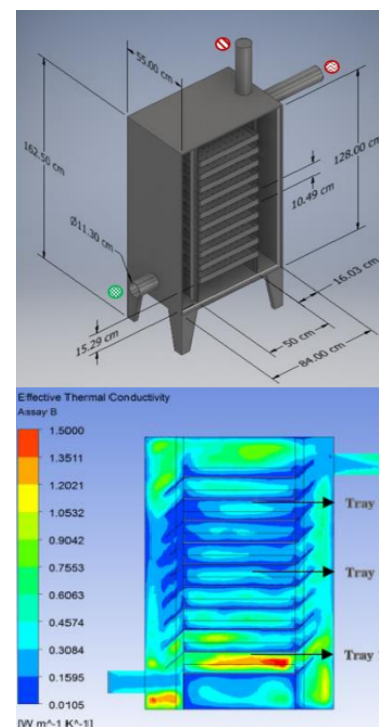
Упркос бројним истраживачким напорима усмереним ка детаљнијим валидацијама *CFD* симулација, (апсолутна) тачност *CFD* симулације се и даље често критикује сматра превише ограниченом за практичну употребу у области сушења [67]. Један од недостатака овог модела је немогућност праћења детаља о физичко-хемијским особинама и њиховим променама у посматраној средини. Потреба за прецизнијим *CFD* методама довела је до формулисања и примене у области сушења приступа *симулације прилагодљиве размере* (енг. *Scale-adaptive simulation - SAS*), којим се област примене класичног *CFD* модела базираног на НСЈ значајно проширује.

CFD се широко примењује за моделирање сушења влажних честица (грануларног материјала) или капљица са чврстим материјалом унутра (суспензије или раствори), чиме се сти-

30: $k - \epsilon$ модел узима у обзир два турбулентна члана k и ϵ . У овом моделу, k члан описује укупну енергију присутну у флуиду, док ϵ члан описује брзину дисипације ове енергије услед присутне турбулентности.

$k - \omega$ модел за предвиђање турбулентности користи две ПДЈ за две променљиве величине k (кинетичка енергија) и ω (специфична брзина дисипације и претварања кинетичке енергије у унутрашњу енергију).

31: Неки од рачунарских софтвера који се користе за моделовање су: Griden, CFD-GEOM, ANSYS ICEM CFD, TGrid, и слично.



Слика 5.27: Илустрација примене *CFD* за анализу топлотне проводљивости ваздуха у кабинет сушари. [66]

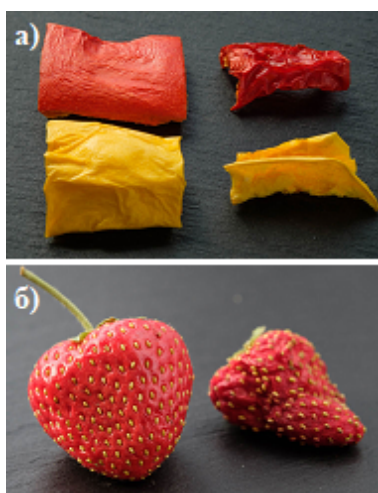
че добар увид у токове и путање честица, брзину дисперзије, време сушења честица, време задржавања, места таложења честица и утицај услова сушења и дизајн коморе на процес сушења честица. Такође, *CFD* методе се често комбинују и повезују са другим техникама моделрања, као што су реакциони инжењерски приступ (тзб. био-процесно инжењерство), метода дискретних елемената, модели кинетике сушења и слично, како би се дошло до резултата у вези са утрошеном енергијом у процесу сушења, временом сушења и квалитетом осушеног производа.

5.6 Моделирање са деформацијом материјала

Деформација је физичка промена која подразумева скупљање или ширење материјала током процеса сушења. Ова промена утиче на процесе преношења масе и топлоте, као и на многе друге особине квалитета осушеног производа. Проучавање процеса сушења у спреси са проучавањем утицаја појаве деформација у материјалу представља мултифизичан приступ који се базира на принципима *хиџро-механике*.³² Код меких материјала, као што су то прехранбени, процес дехидратације дешава се истовремено са структурним променама у порозној матрици/ скелету. Губитак влаге изазива деформацију скупљања или савијања, ширење пора, очвршћавање површинских слојева стварањем љуске или покорице, и коначно, пуцање и лом материјала. Ово често има негативан утицај на рехидратационе особине материјала и органолептичке особине, доводећи до одбијања оваквог производа од стране потрошача. Такође, појава деформационих промена у току трајања процеса сушења може утицати на кинетику сушења и време трајања процеса (Слика 5.28).

Структурне промене порозних материјала и њихов утицај на процес сушења пожељно је моделирати како би се обухватили и предвидели најрелевантнији физички процеси који утичу на појаву и врсту деформација. При повишеном садржају влаге и малим деформацијама, меки материјали најчешће показују вискоеластично и гумено понашање. Тада се губитак влаге компензује смањењем запремине материјала углавном линеарном зависношћу (тзв. слободно скупљање). При малом садржају влаге и већим деформацијама, меки материјали се понашају често чвршће (стакласто), јер порозна матрица показује одређену отпорност смањивању запремине. Тада се повећава унутрашња порозност а самим тим и јавља нелинеарност између садржаја воде и контракције (тзв. неслободно

32: *Хиџро-механика* се бави проучавањем интеракције између флуида и чврсте матрице материјала, укључујући и проблеме пороеластичности, ерозије, ликвифакције, фриксионе нестабилности и слично.



Слика 5.28: Илустрација деформације материјала, изглед пре и после сушења: а) паприка и б) јагода.

(извор: *elea-technology.com*)

скупљање).

Вишефазни порозни модели који узимају у обзир хигро-механичке деформације материјала потичу од обичних вишефазних порозних модела који су проширени како би узели у обзир и контракцију материјала. Веза између преношења влаге и деформације материјала може бити:

- ▶ *једносипрука*, када преношење влаге изазива механичку деформацију материјала, а тако изазвана деформација не утиче повратно на преношење влаге; и
- ▶ *двосипрука*, када преношење влаге и изазвана деформација материјала утичу међусобно једно на друго.

У циљу моделирања хигро-механичких деформација (Слика 5.29) примењују се два суштински различита приступа (Табела 5.4). *Први приступ* подразумева да се однос између скупљања материјала и садржаја влаге у њему одређује емпиријски на основу експериментално прикупљених података. Емпиријски модели омогућавају једноставно предвиђање деформације помоћу алгебарских једначина. *Други приступ* је фундаменталнији и на основу физичког сагледавања материјала као система покушава да предвиди геометријске промене користећи законе одржања масе и запремине и принципе механике чврстог тела. Скупљање чврсте матрице се у овом случају експлицитно моделује решавањем једначина равнотеже сила које на њу делују (закон одржања количине кретања). Овај приступ је сложенији и захтева решавање ПДЈ и одређивање релевантних механичких особина материјала. Најчешће се примењује код моделовања малих деформација уз претпоставке постојања линеарности и вискоеластичности. Ово не погодује описивању деформација меких прехранбених материјала (намирница) због тога што се оне деформишу у великој мери ($>1\div 2\%$) и нелинеарно.

Чврсте или получврсте намирнице су веома хетерогени материјали који се могу сматрати саграђеним од тродимензионалне чврсте матрице/ мреже и велике количине течне фазе. Структура материјала и механичке карактеристике његових елемената у стању равнотеже, дефинисаће запремину, величину и облик материјала.

Фактори који утичу на величину скупљања/ контракције материјала су:

- ▶ *Запремина уклоњене воде, начин крећања и дистрибуција у материјалу*. Скупљање прехранбених материјала је утолико веће уколико је већа запремина воде која је уклоњена. У неким случајевима сушења, механичка равнотежа се постиже онда када је скупљање

Табела 5.4: Примери неких од модела за предвиђање скупљања материјала током процеса сушења. [68]

Емпиријски модели	
- линеарни	
$D_R = k_1 u + k_2$	
$D_R = 1 + \beta u$	
$D_R = 1 + \left[k_1 \exp\left(\frac{-E_d}{RT}\right) \right] u$	
$\Delta D_R = k_1 + (k_2 + k_3 \varphi + k_4 T) \Delta u$	
- нелинеарни	
$D_R = k_1 + k_2 u + k_3 u^2 + k_4 u^3$	
$D_R = k_1 + k_2 \left(\frac{u}{u_0}\right) + k_3 \left(\frac{u}{u_0}\right)^2$	
$D_R = k_1 \exp\left(k_2 \frac{u}{u_0}\right)$	
Фундаментални модели	
- линеарни	
$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{u+0,8}{u_0+0,8}\right) = \left(\frac{A}{A_0}\right)^{(3/2)}$	
$\frac{V}{V_0} = p_1 + p_2 \frac{u}{u_0}$	
* $p_1 = \frac{1}{u_0(\rho_{sm}/\rho_t)+1}$	
* $p_2 = \frac{u_0(\rho_{sm}/\rho_t)}{u_0(\rho_{sm}\rho_t+1)}$	
- нелинеарни	
$\frac{V}{V_0} = p_3 u + p_4 = \left(\frac{A}{A_0}\right)^{(3/2)}$	
* $p_3 = \frac{1-p_5}{u_0-u_e-p_6(p_5 u_0-u_e+p_5-1)}$	
* $p_4 = \frac{p_5 u_0-u_e-p_6(p_5 u_0-u_e+p_5-1)}{(u_0-u_e-p_6(p_5 u_0-u_e+p_5-1))}$	
* $p_5 = \frac{(u_e+1)\rho_0}{(u_0+1)\rho_e}$	
* $p_6 = \frac{\rho_e-(1-u)\rho_e}{\rho_0}$	
- са порозношћу	
* $D_R = \frac{\rho_e-(1-u)\rho_e}{\rho_0}$	

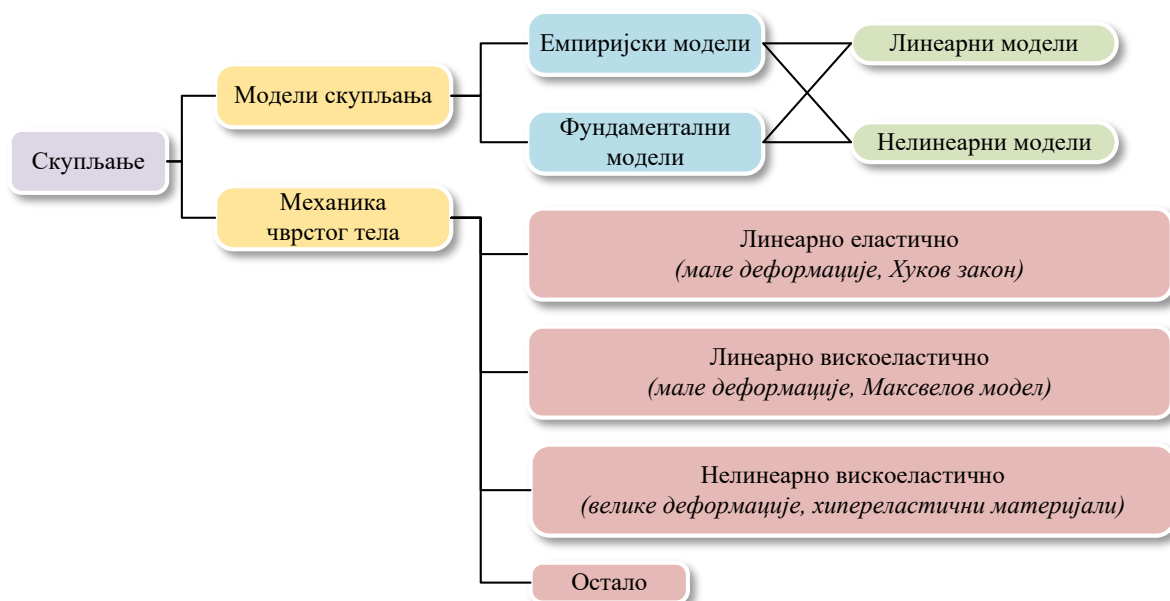
(D_R - карактеристична димензија скупљања: запремина, површина или дебљина; u - садржај влаге у материјалу $\text{kg}_{\text{w}}/\text{kg}_{\text{sm}}$ (0-почетно, e -равнотежно); k_i и p_i - параметри у једначинама; β - коефицијент контракције.)

33: Основна разлика између *скупљања* и *колапса* чврстог скелета материјала је у томе што скупљање подразумева и могућност повратног процеса (ширења), док колапс подразумева потпун лом материјала без могућности повратка на старо.

34: *Температура транзиције* (eng. *glass-transition temperature*) се дефинише као температура на којој аморфни систем мења своје стање од "стакластог" (чврста структура) ка "гумастом" стању (еластична структура), а зависи од влажности материјала и садржаја растворљивих супстанци у њему (нпр. шећера). На квалитет хране се битно може утицати излагањем температурама које су веће од температуре транзиције, што се може десити током процеса сушења. Скупљање или друге структурне промене материјала могу се избећи уколико се процес сушења дешава на температурама мањим од транзиционе.

материјала једнако запремини уклоњене воде. Овакво понашање се може објаснити смањеном покретљивошћу очврснеле матрице материјала при смањеном садржају влаге. Унутрашње преношење воде састоји се из транспорта везане воде, слободне воде и водене паре. Скупљање се прво јавља код простора у материјалу који је вода потпуно напустила. Већина емпиријских модела базира се управо на претпоставци да је геометријско смањење запремине материјала једнако запремини уклоњене воде.

- ▶ *Покретљивост чврсте матрице/ скелета материјала* уско је повезана са њеним физичким особинама. Већа покретљивост одговара вискоеластичном понашању типичном за гумасто стање, док ниска покретљивост одговара еластичном понашању типичном за стакласто стање. Уклањањем воде настаје неравнотежа притисака између унутрашње и спољашње средине, јављају се контракције које доводе до скупљања или колапса структуре материјала.³³
- ▶ *Брзина сушења*. У случајевима примене режима сушења који доводе до велике брзине сушења и интензивног издвајања влаге из материјала, градијенти садржаја влаге у појединим слојевима материјала су видљивији. Низак садржај влаге на спољашњој површи може изазвати транзицију³⁴ структуре из гумасте (еластичне) у стакласту (чврсту) и формирање спољашњег порозног крутог слоја налик покорици који ће фиксирати запремину и спречити накнадно скупљање унутрашњо-



Слика 5.29: Шема различитих приступа у моделирању деформације материјала током процеса сушења. [31]

сти материјала. Уколико је брзина сушења мала, брзина преношења влаге кроз материјал је уједначена са њеним одавањем са површи материјала, тако да се материјал уједначено скупља.

- *Параметри процеса сушења.* Утицај параметара сушења на скупљање материјала често бива нејасан из разлога што су резултати истраживања на ову тему често опречни и веома зависе од конкретног појединачног случаја. На пример, утицај температуре на скупљање материјала може се разликовати од случаја до случаја до те мере да у једном случају потпуно утиче, а у другом нема утицаја. Слично је и са релативном влажношћу ваздуха и брзином струјања ваздуха. Међутим, генерално гледано, одговарајућом комбинацијом процесних услова може се утицати на формирање покорице на површини материјала у почетним фазама сушења, а тиме и олакшати скупљање материјала.

5.7 Вишеразмерно моделирање

Већина материјала, нарочито хетерогених материјала, по својој природи се могу посматрати у различитим размерама.³⁵ Увећање/ умањење материјала омогућава посматрање карактеристика материјала које нису доступне у видљивом опсегу. На пример, биљни материјали посматрани у микроразмери могу се описати као скуп електрона, док се на макроразмери описују геометријском димензијом. На сличан начин се може манипулисати и са временском скалом, односно, успоравањем или убрзавањем одређених процеса можда се може доћи до информација и сазнања које се не могу приметити при нормалној брзини дешавања истих. Због свега поменутог, процес сушења се може третирати као проблем "вишеструких" размера. Приступ вишеразног моделирања користи се дуго у многим гранама науке и инжењерства, међутим његова примена у области сушења тек је на зачетку.

Вишеразно моделовање (енг. *Multi-scale modeling*) подразумева начин моделирања у којем се више модела на различитим размерама користи за истовремено описивање система и његовог понашања. Различити модели се обично фокусирају на различите размере. Целокупна идеја оваквог начина моделирања своди се на то да се својства материјала или понашање система у једној размери моделирају користећи информације или моделе добијене из других размера, при чему се на сваком нивоу посматрања користе посебни приступи својствени за тај ниво посматрања. Потреба за вишеразмерним

35: У математици, *размера* представља однос величина два броја, тј. колико пута се одређени број састоји у једном или више понављања другог броја. У техничком цртању, *размера* представља однос између дужине неке дужи представљене на цртежу и њој одговарајуће дужине у природи која је на цртежу хоризонтално пројектована.

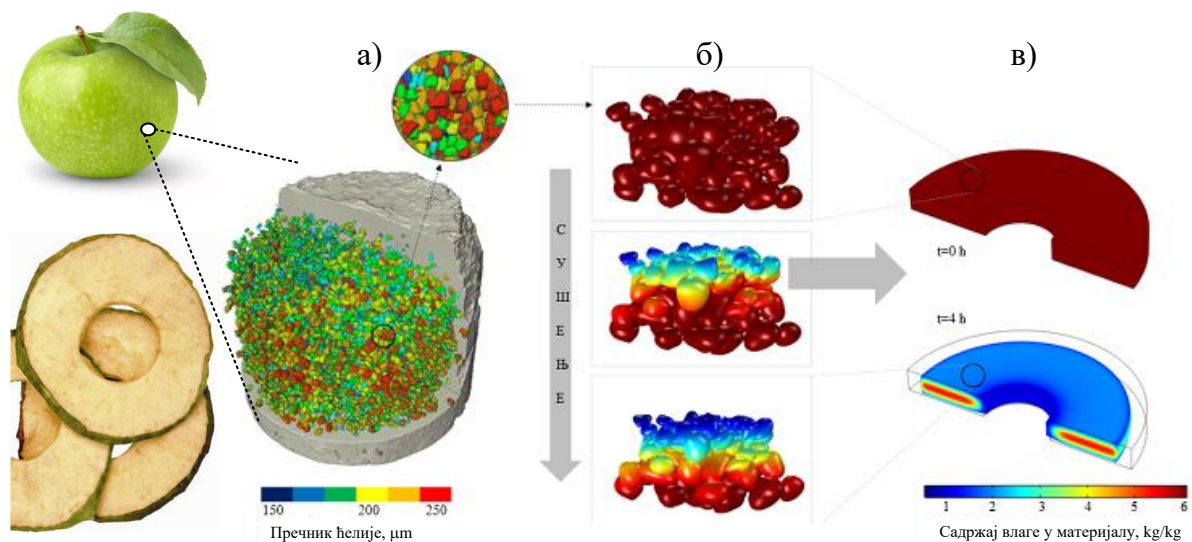
У области сушења, под *размером* у којој посматрамо материјал мисли се на величину увећања/ умањења материјала приликом посматрања (Слика 4.14).

моделирањем произилази из чињенице да доступни макроскопски модели нису довољно тачни, а микроскопски модели нису довољно ефикасни и/или нуде превише информација. Комбиновањем оба начина долази се до разумног компромиса између тачности и ефикасности. Тако се до бољег разумевања сушења на нивоу макроразмере долази узимањем у обзир феномена преношења на нивоу микроразмера, наравно до прихватљивог степена сложености.

Вишеразмерном моделирању се може приступити на два начина. *Први* приступ подразумева симултано израчунавање кроз више размера и захтева значајне рачунарске ресурсе, тако да се и ређе примењује. *Други* приступ подразумева формирање подмодела који ће се фокусирати само на описивање одређеног дела простора у посматраној размери и времена. Често се сваки од ових подмодела заснива на различитим принципима моделирања, техникама, па чак и софтверу. Као таква, косимулација³⁶ се често примењује за вишеразмерно моделирање, тј. спајање два или више различитих софтвера, уместо интеграције свих модела у једно софтверско окружење.

Спајање подмодела и размена информација између њих представљају суштину вишеразмерног моделирања (Слика 5.30).

36: Обједињавање мултидисциплинарних симулацијских модела и симулација тако добијеног јединственог модела назива се *косимулација* (скр. од *корпоративна симулација*) и омогућује употребу појединачно развијених модела посебним симулационим алатима и њихову интеграцију у јединствену рачунарску симулацију.



Слика 5.30: Илустрација поступка вишеразмерног моделирања. [69]

Приказани начин вишефазног моделирања састоји се из неколико корака: (а) прво се појединачне ћелије узорка Јабучке снимају методом рендгенске томографије; (б) потом се бележе ефекти утицаја процеса сушења на појединачне ћелије посматране у микро-размери, као и укупни квалитет узорка хране након сушења. Модел у микро-размери показује да се током процеса сушења пермеабилност ћелијске мембране може проментити. Поред тога, показује како би се око ћелије могла формирати сува покорница која спречава даљу дехидратацију унутрашњих слојева и колапс чврсте матрице. и (в) особине са нивоа микро-размере појединачних ћелија скалирају се до макроразмере модела, тј. до величине посматраног узорка, да би се показало како слични процеси утичу на веће узорке.

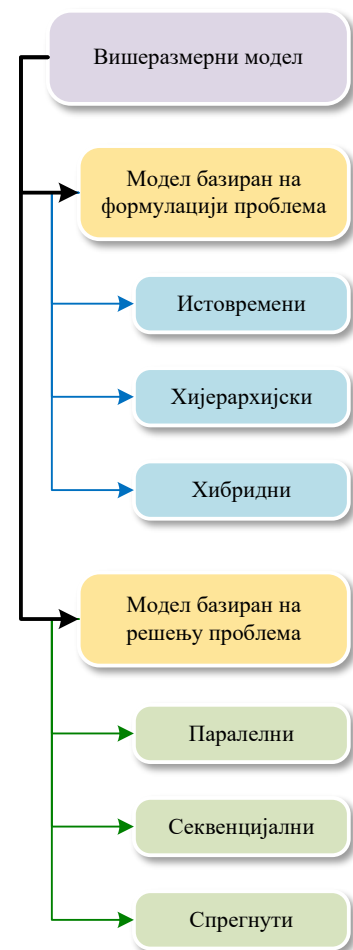
Перформансе и тачност вишеразмерног модела у великој мери се ослањају на одговарајућу спрегу подмодела. Моделирање обавезно прати и формирање одговарајуће шеме повезивања модела одговарајућих размера. Главни изазови у вишеразмерном моделирању су идентификовање корелација између модела на различитим размерама. У контексту смера корелације могућа су повезивања приступом преношења особина „ка већој” (енг. *up scaling*) или „ка мањој” (енг. *down scaling*) размери.³⁷

Приступ вишефазном моделирању се може класификовати:

- ▶ Према приступу *формулисању проблема* вишеразмерни модели могу бити *истовремени*, *хијерархијски* и *хибридни* (Слика 5.31). *Истовремени* приступ подразумева да се код формулације модела истовремено користи више различитих размера. Овакав приступ захтева значајно бављење граничним условима у посматраној размери, као и поштовањем принципа механике континуума у посматраној размери. *Хијерархијски* приступ подразумева хијерархијско повезивање размера. Симулације се у појединачним размерама изводе одвојено и прослеђују као излаз у модел више/ниже размере. Хијерархијски приступ је погоднији за пренос информација током хомогенизације, док је мање ефикасан у локализацији. *Хибридни* приступ се заснива на истовременој примени континуалних и дискретних модела.
- ▶ Према приступу *решавању проблема* вишеразмерни модели могу бити *паралелни*, *секвенцијални* и *спрегнути*. Решење модела варира у зависности од природе решења повезаних са појединачним моделима. *Паралелни* приступ подразумева истовремено одвојено израчунавање решења модела у различитим размерама. *Секвенцијални* приступ користи претходно обрађене параметре на једној размери за карактеризацију модела на другој размери. Секвенцијално спајање је отежано када међусобно повезани модели зависе од већег броја променљивих. *Спрегнути* приступ узима у обзир мултидисциплинарност процеса сушења. Овакви вишеразмерни модели обухватају истовремено механизме преношења топлоте и масе, као и фазне промене материје, што модел чини компликованијим.

Правилан избор размере која ће се користити у моделирању важан је за тачност моделирања, али и за брзину прорачуна. Избором малог димензионог нивоа (микро, нано, итд.) моделом описана својства довешће до веће прецизности процеса сушења, али истовремено ће повећати време прорачуна и потребне рачунарске ресурсе и трошкове. Из тог разлога

37: Преношење особина ка већој размери другачије се назива *хомогенизацијом* или *укрућивањем*, док се преношење особина на мању размеру назива *локализацијом* или *уситњавањем*.



Слика 5.31: Класификација приступа мултиразмерног моделирања.

потребно је оптимизирати избор размере у којој ће се моделирање радити. Још један од узрока који може утицати на време и ресурсе потребне за извођење прорачуна јесте праћење стварних структурних промена материјала на различитим размерама у реалном времену, као и симултано праћење преношења топлоте и масе кроз материјал уз узимање у обзир деформацију материјала током процеса сушења. Вишеразмерно моделирање спрегнутих мултифизичких процеса који се дешавају током сушења представља један од највећих изазова у овој научној области.

5.8 Моделирање на принципима машинског учења и вештачке интелигенције

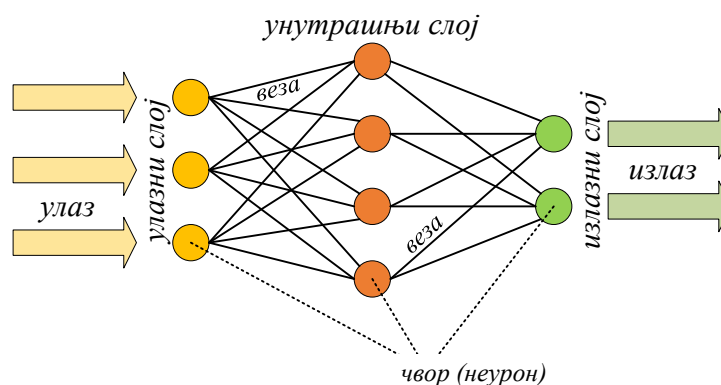
Релативно нови и савремени концепти управљања подацима применом машинског учења представљају моћне технике за спрежање вишемоделних и вишеразмерних података и успостављање односа између мултифизичних феномена, међу којима се налази и сушење прехранбених материјала.

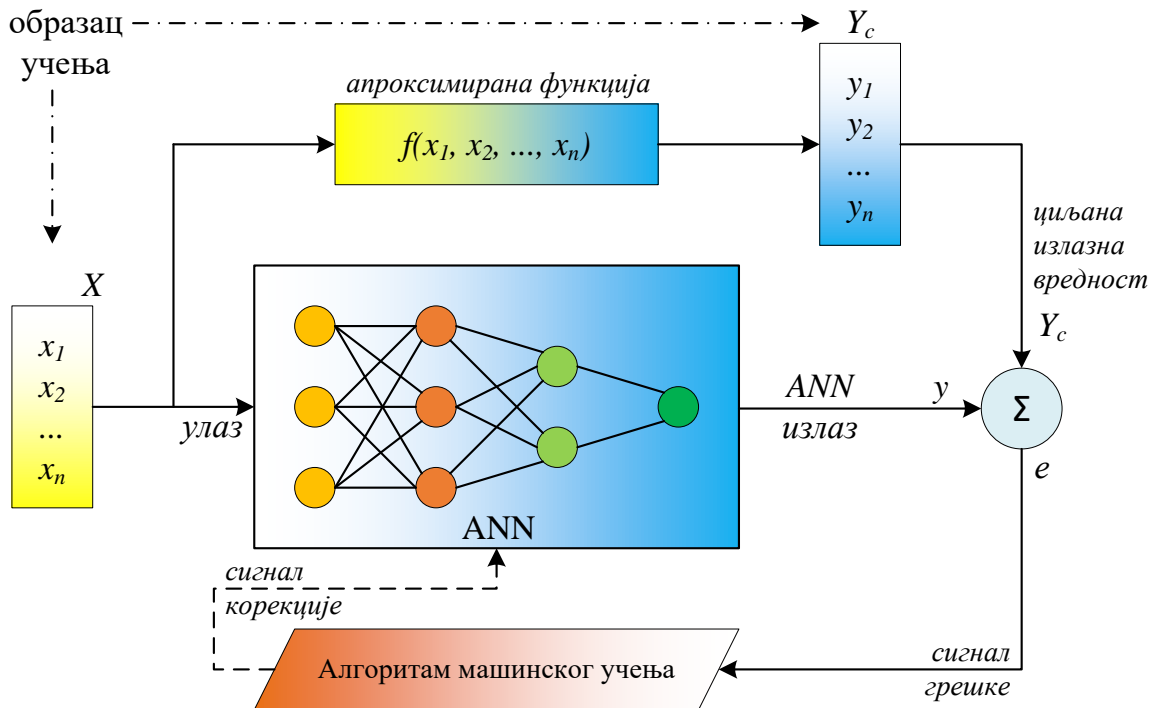
Вештачка интелигенција (енг. *Artificial intelligence - AI*) је подобласт рачунарства која за циљ има стварање рачунарског програма (софтвера) који ће рачунарима омогућити начин рада који би се могао окарактерисати интелигентним. У ширем смислу, вештачка интелигенција означава капацитет неке вештачке творевине за реализовање функција које су карактеристика људског размишљања. Област вештачке интелигенције се првенствено фокусира на следеће компоненте интелигенције: учење, размишљање, решавање проблема, перцепција и разумевање природног језика.



Слика 5.32: Концепт моделирања на принципима вештачке интелигенције.

Слика 5.33: Илустрација тро-слојног ANN модела. [70, 71] ANN модел сачињавају улазни, унутрашњи (или скривени) и излазни слојеви чворова (неурона) који су међусобно повезани неуронским везама. Улазни подаци се уносе у први слој, док последњи слој даје излазне податке. Између улазног и излазног слоја може постојати један или више унутрашњих скривених слојева. Различити слојеви могу изводити различите врсте трансформација на својим улазима. Најмањи елементарна мрежа је чвор (неурон). Сваки чвор прима/ предаје сигнал преко везе.





Слика 5.34: Општа шема модела вештачке неуронске мреже и репрезентативни приказ технике машинског учења. [72]

Улазни подаци се истовремено обрађују моделом вештачке неуронске мреже и упоређују са резултатима апроксимираних функција. Одступање излазне вредности ANN модела од циљане функције представља сигнал грешке који се алгоритмом машинског учења коригује и у виду сигнала враћа у прорачун ANN модела. Процес машинског учења доводи до тога да је сигнал грешке све мањи током времена.

Машинско учење (енг. *Machine learning - ML*) је део области вештачке интелигенције чији је циљ креирање алгоритама и рачунарских система који су способни да се адаптирају на аналогне нове ситуације и уче на бази искуства. Технике машинског учења могу управљати информацијама из добијених слика/ података различитих размера. Машинско учење примењује технику *дубоког учења* (енг. *deep learning*) као алат за обуку машина да класификују и анализирају необрађене и измешане податке (Слика 5.32). Интеграцијом овако конципираних машина у системе за сушење може се обезбедити моделирање и валидација потребних података у реалном времену на више размера/ нивоа посматрања. Између великог броја приступа моделирању за обуку машина за машинско учење, истичу се следећи модели:

- *Вештачке неуронске мреже* (енг. *Artificial neural network - ANN*) су математички модели за прикупљање и каталогизацију информација добијених са сензора или сонди. Ови модели налазе се у срцу алгорита дубоког учења (Слика 5.34). Њихово име и структура су ин-

38: Неки од примера примене ANN модела у сушењу су:

- предвиђање промена влажности материјала у реалном времену;
- описивање кинетике сушења у микроталасним сушарама;
- контрола процеса сушења у конвективним сушарама;
- предвиђање промене боје материјала у реалном времену;
- карактеризација антиоксидативних активности и кинетике разградње материјала под различитим условима сушења и слично.

39: *Фази логика или расцлинућа логика* развијена је из *Теорије расцлинућих скупова*.

Расцлинући скуп је уопштење класичног скупа коме елементи могу припадати мером која обухвата континуални прелаз од не-припадања до потпуног припадања. Расцлинути скуп се може употребити за изражавање континуалног прелазу између два стања.

спирисани људским мозгом, опонашајући начин на који биолошки неурони међусобно преносе сигнал. Огроман број неурона заједно са огромним бројем веза између њих налазе се у основи развоја ANN модела (Слика 5.33). ANN су препознате као добар алат за динамичко моделирање процеса сушења³⁸, првенствено зато што не захтевају параметре физичког модела и имају могућност учења из експерименталних података.

- ▶ *Генетски алгорита* (енг. *Genetic algorithm - GA*) је једна од техника претраге, која се користи за одређивање оптималне вредности сложене циљне функције симулацијом елемената биолошког еволуционог процеса (репродукција, наслеђивање, мутација и селекција). Овај алгорита је погодан за примену код моделирања сушења, пре свега код проналажења оптималних параметара сушења, јер не захтева детаљно познавање самог процеса и способан је да пронађе оптималне услове и онда када је простор за претрагу веома велики.
- ▶ *Фрактална анализа* (енг. *Fractal analysis*) је концепт креирања модела базиран на принципима фракталне геометрије. Овакав концепт је претежно геометријски и може се применити на објекте чија је геометрија „иста“ у различитим размерама посматрања. Такође, може се користити за представљање информација о структурним својствима и пружа квантитативне податке из анализе тек прикупљених несређених података.
- ▶ *Фази логика*³⁹ (енг. *Fuzzy logic*) може се употребити у контексту описивања различитих квалитета у микроструктури хране у реалном времену. Предност примене ове методе дубоког учења је у коришћењу једноставних математичких релација које се могу извршити комерцијалним алатима. Овакав приступ се примењује код регулисања процеса сушења на основу тренутног уочавања одређеног атрибута квалитета хране, нпр. електронским носем, рачунарским видом, хиперспектралним фотографијама, нуклеарном магнетном резонанцом и слично [73]. Различити атрибути квалитета хране мењају се током процеса сушења, а прикупљени подаци о променама посматрају се фазилогичким принципима.

Техника и технологије сушења

6

Сушење представља најстарији начин конзервације хране и подразумева уклањање воде из прехранбених материјала ради спречавања развоја микроорганизама. Технологије сушења су се временом развијале и еволуирале од једноставних метода сушења намирница на Сунцу до савремених метода које укључују, између осталог, сушење у затвореним коморама, сушење на лесама, тунелске сушаре, сушаре са распршивањем материјала, добошасте сушаре, лиофилизацију, осмотску дехидратацију, екструдирање, флуидизацију и примену микроталаса, радиоталаса и других савремених технологија.

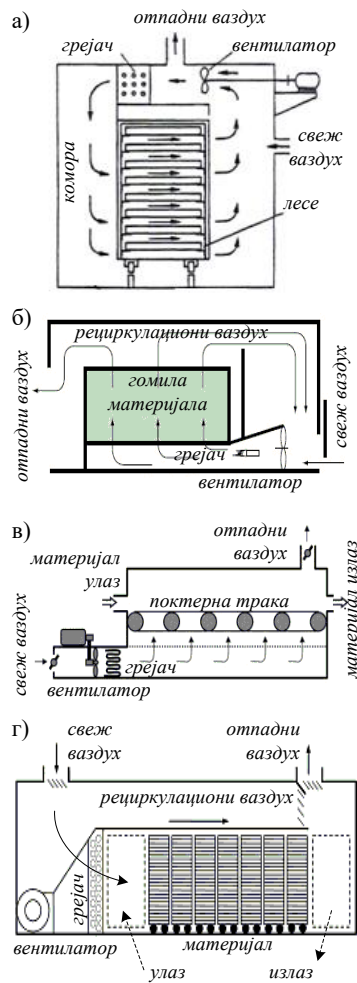
Развој метода сушења се може поделити у четири генерације метода [16]:

Прва генерација метода обухвата технологије сушења које подразумевају постојање протока врућег агенса преко материјала и уклањање воде са његове површи. Погодне су за сушење чврстих материјала као што су: сецкано воће и поврће, зрнасти, бобичасти или уситњени материјали. Основна конфигурација оваквих сушара подразумева да у свом склопу поседује компоненте система за:

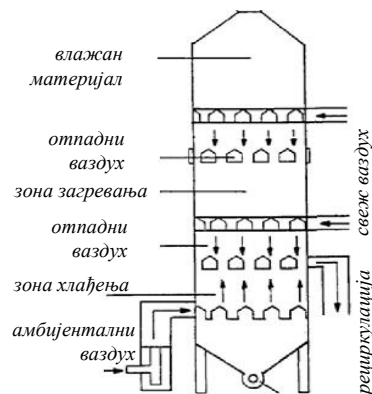
- ▶ смештај/ задржавање материјала (комора, бункер и слично) у коме се дешава процес сушења,
- ▶ дозирање и транспорт материјала који доспева у сушару,
- ▶ загревање, дистрибуцију агенса сушења кроз комору сушаре преко материјала,
- ▶ прихватање осушеног материјала,
- ▶ прихватање и третман отпадног ваздуха.

Системи сушења овог типа су најчешће модуларни, тако да производ на свом путу кроз систем пролази кроз модуле (компоненте система) у којима се појединачно реализују различите фазе процеса и третмани материјала. Овакав модуларни приступ примењује се ради оптимизације процеса, повећања ефикасности сушења, постижања прецизније контроле температуре, умањења времена инсталације система и пружања могућности једноставније надоградње и унапређења. Загревање материјала најчешће је конвективно и/или кондуктивно. У

6.1 Коморна сушара . . .	159
6.2 Тунелска сушара . . .	163
6.3 Сушара са транспортером	164
6.4 Шахтна сушара . . .	166
6.5 Ротациона сушара .	168
6.6 Сушара са флуидизованим слојем	171
6.7 Пнеуматска сушара	175
6.8 Сушара са распршивањем материјала	176
6.9 Добошаста сушара .	180
6.10 Леофилизациона сушара	182
6.11 Сушаре за осмотско сушење	187
6.12 Соларна сушара . . .	192
6.13 Сушара са интегрисаном топлотном пумпом	201
6.14 Сушара са микроталасним или диелектричним загревањем	207
6.15 Сушара са инфрацрвеним загревањем	211
6.16 Сушаре за месо и рибу	213
6.17 Млазна сушара . . .	216
6.18 Сушара за екструдирану храну	218
6.19 Сушара са ултразвучним вибрацијама	220
6.20 Сушара са технологијом Refractance Window®	224
6.21 Хибридне сушаре . .	227



Слика 6.1: Илустрација сушара за сушење материјала у непокретном слоју: а) коморна сушара са лесема, б) коморна сушара са материјалом у гомили, в) тракаста сушара и г) тунелска сушара.



Слика 6.2: Илустрација шахтне сушаре.

зависности од начина манипулације материјалом током процеса сушења, разликујемо следеће методе:

- ▶ Сушење непокретног слоја материјала (енг. *fixed bed drying*) подразумева да је материјал који се суши непокретан/ фиксиран у слоју. Предност сушења материјала који се налази у непокретном слоју је у олакшаној контроли сушења производа и прилагођавање параметара сушења одговарајућим зонама сушења. Овакву методу примењују следеће сушаре (Слика 6.1):

- коморна (енг. *cabinet dryer*),
 - * материјал у гомили (енг. *batch dryer*),
 - * материјал на лесема (енг. *tray dryer*),
- са транспортером (енг. *conveyor dryer*), и
- тунелска (енг. *tunnel dryer*).

Коморне сушаре су системи са периодичним радом, док су траксте и тунелске системи који могу сушити у континуалном раду. У свим поменутим сушарама је пожељно и могуће рекуперисати одређену количину топлоте, најчешће рецикулацијом ваздуха. Овим се постиже уштеда у количини утрошене енергије у сушари.

- ▶ Сушење материјала у покретном слоју (енг. *moving bed drying*) подразумева да се честице материјала који се суши померају хаотично унутар целог слоја. Померање се може дешавати услед гравитационих сила, услед струјања агенса - флуидизација или механичким путем помоћу специјалних ексцентара за стварање вибрације - виброфлуидизација. Овакву методу примењују следеће сушаре (Слика 6.2 и Слика 6.3):

- шахтна (енг. *tower dryer*),
- ротациона (енг. *rotary dryer*),
- са флуидизованим слојем (енг. *fluidized bed dryer*),
- са вибро-флуидизованим слојем (енг. *vibro-fluidized bed dryer*),
- пнеуматска (енг. *pneumatic dryer*), и
- фонтанска (енг. *spouted bed dryer*).

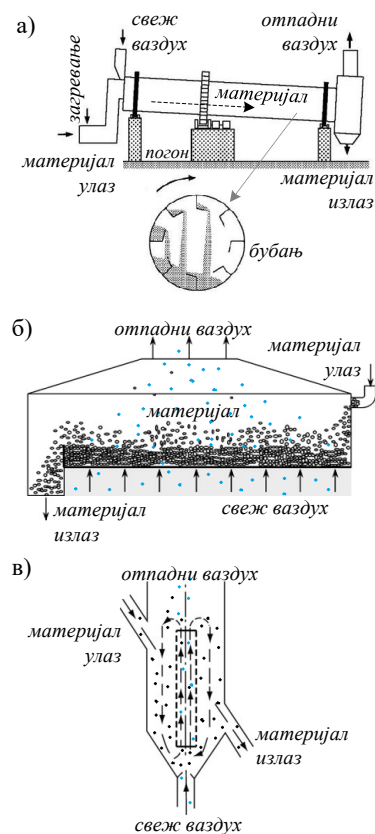
Шахтна сушара има облик вертикалне коморе у којој се под утицајем силе Земљине теже креће материјал који се суши, док се истовремено кроз тај материјал продувава топао агенс сушења. Флуидизовани слој се може дефинисати као прелазни режим између непокретног слоја и пнеуматског транспорта. Предност ове методе је у потпуном опстру-

јавању честице материјала са свих страна. Конвенционални начин формирања флуидизованог слоја врши се проласком струје врућег агенса кроз отворе на подлози, у смеру од подлоге навише. На тај начин се материјал подиже са подлоге и формира флуидизовани слој непосредно изнад подлоге, којим се уједно и преноси ка излазу из простора за сушење. Сушење материјала у флуидизованом слоју може се применити код свих материјала које је могуће транспортовати у флуидизованом слоју. Ту најчешће спадају материјали у форми влажних пудера, честица или гранула (величине честице од $50 \div 2000 \mu\text{m}$), а у специјални случајевима каше, пасте и суспензије које је могуће флуидизовати.

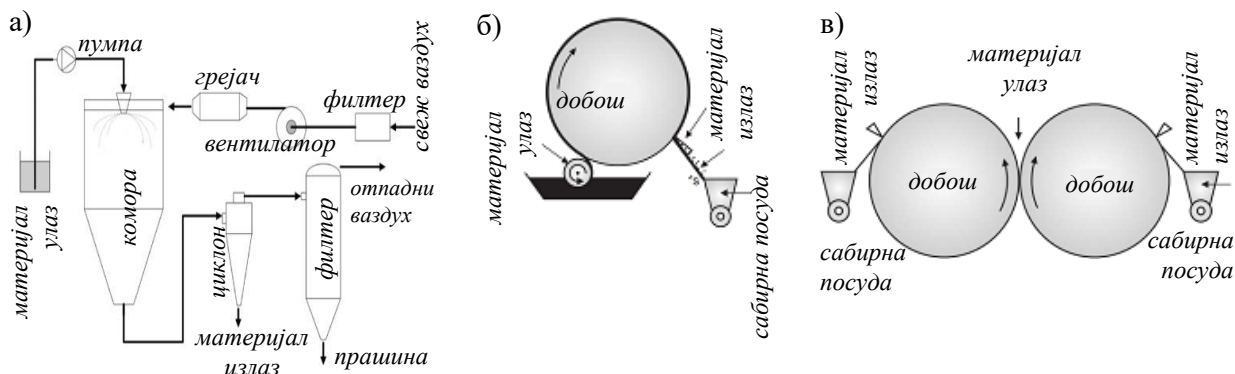
Друга генерација метода намењена је сушењу кашастих материјала, пиреа, прашкастих материјала и добијању дехидрираних пахуљица. Овакву методу примењују следеће сушаре (Слика 6.4):

- са *распршивањем материјала или спреј сушара* (енг. *spray dryer*), и
- *добошаста* (енг. *drum dryer*).

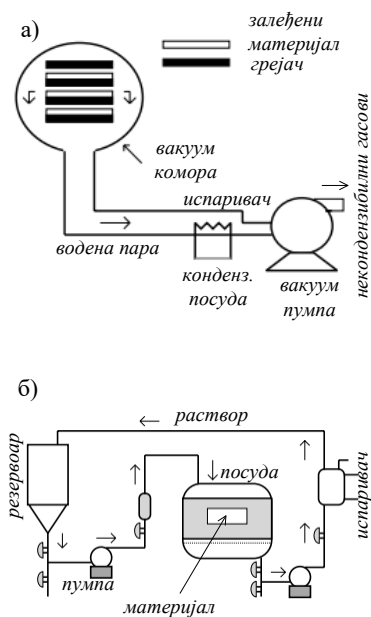
Особине материјала на улазу у спреј сушару и сушару са флуидизованим слојем, битно се разликују. Време задржавања материјала током проласка кроз сушару је: - спреј сушара $5 \div 100 \text{ s}$, - флуидизован слој $1 \div 300 \text{ min}$, а величина честице је: - спреј сушара $10 \div 500 \mu\text{m}$, - флуидизован слој $10 \div 3000 \mu\text{m}$. Добошасте сушаре се истичу по својој економичноати и ефикасности, а највише се користе у пекарској, млекарској индустрији, производњи пахуљица и гранула, индустрији пића, за сушење кашастих материјала, пиреа и паста.



Слика 6.3: Илустрација сушара за сушење материјала у покретном слоју: а) ротациона сушара, б) сушара са флуидизованим слојем материјала и в) фонтанска сушара.



Слика 6.4: Илустрација сушара за сушење материјала: а) сушара са распршивањем материјала, б) добошаста сушара са једним добошем и в) добошаста сушара са два добоша.



Слика 6.5: Илустрација сушара за сушење материјала: а) лиофилизациона сушара, б) сушара са осмотском дехидратацијом.

Трећа генерација метода развијена је са намером да се превазиђу проблеми структурног оштећења и минимизирају губици укуса и ароме прехранбених материјала, излагањем материјала ниским температурама или њиховим потапањем у хипертоничне растворе (шећерни сируп, слани раствор, глицерол и слично). Овакве методе примењују следеће сушаре (Слика 6.5):

- лиофилизациона (енг. *freeze dryer*), и
- са осмотском дехидратацијом (енг. *osmotic dehydration system*).

Процес лиофилизације се спроводи кроз два корака: дубоко замрзавање материјала и сублимација залеђеног материјала у дубоком вакууму. Процес се првобитно користио у медицини и фармацији, да би се касније пренео и у друге области укључујући и област производње и прераде хране. Осмотска дехидратација представља концентрисање намирнице њеним потапањем у хипертонички раствор, при чему молекули воде у намирници бивају замењени молекулима раствора. Цео процес може бити интензивирањем уколико се изводи у вакууму. Систем за осмотску дехидратацију углавном се састоји од резервоара са раствором, пумпним системом и посуде за извођење осмотске дехидратације у коју се смешта материјал.

Четврта генерација метода сушења користи савремене технологије у циљу постизања високог квалитета осушеног производа са једне стране и енергетски ефикасног система сушења са друге стране. Овакве методе примењују следеће сушаре:

- соларна (енг. *solar dryer*),
- са тогришком топлоћине пумпе (енг. *heat pump dryer*),
- са микроталасним или диелектричним загревањем (енг. *microwave and dielectric dryer*),
- са инфрацрвеним загревањем (енг. *infrared dryer*),
- млазна (енг. *jet-impingement dryer*),
- екструдираних хране (енг. *extruded food dryer*),
- са ултразвучним вибрацијама (енг. *ultrasonic dryer*),
- са технологијом *Refractance Window®*, и
- хибридна (енг. *hybrid drying*).

Системи четврте генерације метода поседују висок степен аутоматизације процеса сушења и управљања процесом. Квалитет материјала прати се у реалном времену (промена боје, динамика издвајања влаге и слично).

6.1 Коморна сушара

Коморна сушара је систем који поседује посебно издвојен простор - *комору* у којој се дешава процес сушења. Пуњење и пражњење коморне сушаре материјалом се најчешће изводи кроз врата/ отворе са једне стране сушаре, помоћу колица, вагонета, кука итд. Материјал је поређан на подлози у односу на коју се не помера. Подлога (леса, полица, перфорирани под или подлога и сл.) може бити преносна ради лакше манипулације материјалом у комори. Сушење се дешава током преструјавања топлог агенса сушења (ваздуха) преко непокретног материјала, те се због тога често назива *конвективним сушењем*. Време трајања процеса је неколико десетина сати. Загревање материјала изводи се конвективно топлим агенсом, а могуће је и додатно загревати материјал кондуктивно загревањем подлоге на којој се налази или користити неку од напреднијих технологија загревања. Током рада сушаре контролишу се температура, влажност ваздуха и брзина струјања преко материјала. Ове величине дефинишу режим сушења и директно утичу на кинетику сушења. Компоненте и конструкција сушаре морају бити конципиране тако да омогуће дистрибуцију ваздуха у сушари подједнако до сваког комадића/ зрна материјала, тако да свуда доспе ваздух истих параметара.

Кретање материјала кроз комору сушаре може се изводити *шаржно* или *континуално*. *Шаржно сушење* подразумева сушење одређене количине материјала, који се на почетку сушења у целини (шаржа/ пакет) смести у сушару, односно, по завршетку сушења у целини извади из коморе за сушење и замени новом шаржом уз понављање поступка (Слика 6.6). *Континуално сушење* подразумева континуални проток материјала кроз комору за сушење. Ово се може извести применом различитих транспортера (тракастих, пужних, и слично), конвејера, пнеуматским транспортом, или транспортом у флуидизованом слоју.

Материјал се шаржно може сушити у танком или дебелом слоју. Сушење материјала у танком слоју изводи се најчешће на лесема (Слика 6.7). Лесе су израђене од рамова (нерђајући челик, дрво, пластика) са жичаном подлогом (нерђајући челик, тефлон), односно од материјала који не могу контаминирати намирницу са којом су у непосредном контакту. Лесе представљају битну ставку у укупној цени сушаре (30÷50%). Код сушења материјала у танком слоју (Слика 6.8), ваздух се посебним усмеривачима тера да струји тачно преко материјала, а у унутрашњости коморе лесе су тесно напаковане како би простор био максимално искоришћен.



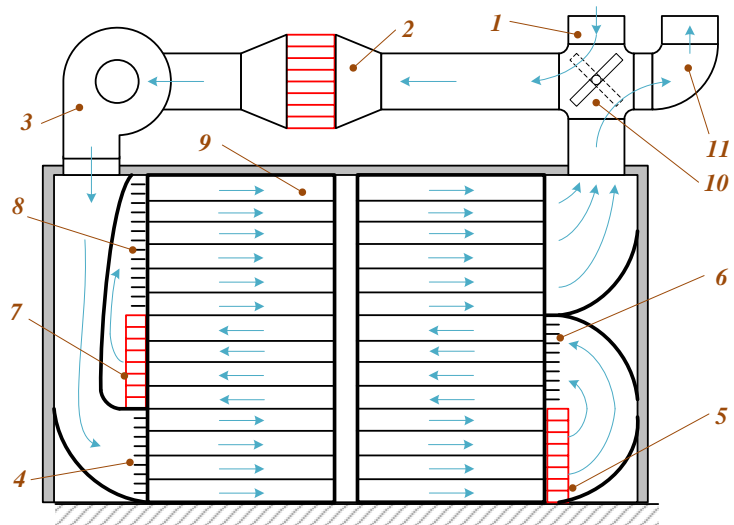
Слика 6.6: Илустрација мале коморне сушаре са лесема поређаним на двоје колица.



Слика 6.7: Илустрација материјала поређаног на лесема за сушење у танком слоју: очишћени ченови белог лука на горњој и исецкани црни лук на доњој леси.

Слика 6.8: Функционална шема компонента коморне сушаре са лесема распоређеним у двоја колица.

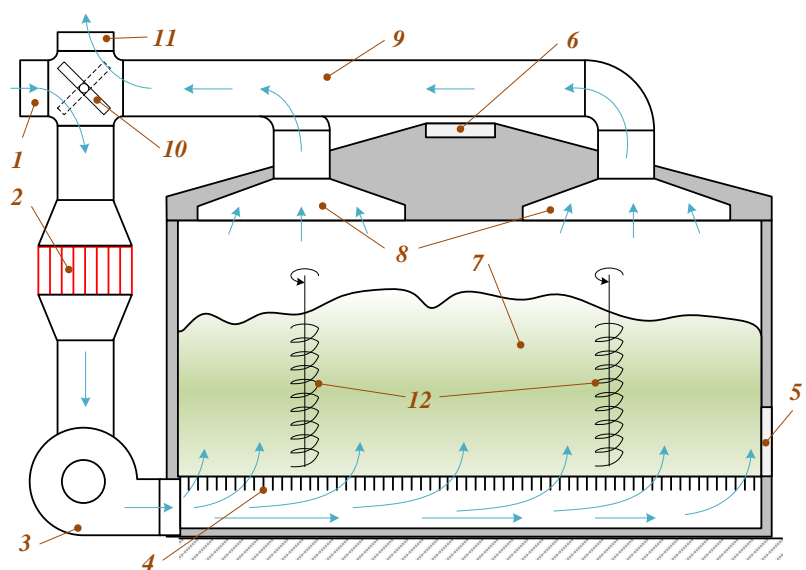
1 - улаз свежег ваздуха; 2 - грејач; 3 - вентилатор; 4, 6 и 8 - усмеривачи ваздуха; 5 и 7 - допунски грејачи за догревање; 9 - комора са материјалом постављеним на лесе; 10 - мешна комора; и 11 - излаз отпадног ваздуха.



Код сушење материјала у гомили (Слика 6.9), насипна густина, порозност и пермеабилност насутог материјала су особине које битно утичу на процес сушења. Материјал се „продувава” топлим агенсом најчешће у смеру од подлоге навише, али могу се срести и друга техничка решења овог проблема (нпр. ваздух се може довести у центар гомиле и усмеравати да дува радијално кроз гомилу материјала). Предност овакве сушаре је велики капацитет сушења. Нека уобичајена величина овакве сушаре подразумева да комора прима $1 \div 2t$ зрнастог материјала, насутог у слоју дебљине $0,6 \div 1,2$ m. Обзиром на то да се брже суше они слојеви материјала који су ближи перфорираним преградама кроз које ваздух доспева, у овим системима су често присутне компоненте за мешање материјала (Слика 6.10) ради равномернијег сушења.

Слика 6.9: Функционална шема компонента коморне сушаре са насутим материјалом.

1 - улаз свежег ваздуха; 2 - грејач; 3 - вентилатор; 4 - усмеривачи ваздуха; 5 и 6 - отвори за уклањање/убацивање материјала; 7 - материјал у гомили/дебелом слоју; 8 - хаубе за извлачење отпадног ваздуха; 9 - главни канал за извлачење отпадног ваздуха; 10 - мешна комора; 11 - излаз отпадног ваздуха; и 12 - мешалица.



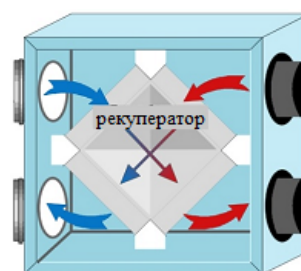
Коморне сушаре најчешће поседују могућност делимичне или потпуне рецикулације ваздуха како би се енергија уштедела. Регулација рецикулације ваздуха може бити *континуална* (ПИД регулација - *скраћено од пропорционално-интегрално-диференцијална регулација*) или *повремена* (*ON-OFF*).

Континуална регулација се изводи компонентом система која део отпадног ваздуха преусмерава и враћа поново у сушару, а све то ради у реалном времену у зависности од неког од параметара сушења. У ову сврху најчешће се користе мешне коморе и рекуператори топлоте. Мешна комора је компонента смештена на ваздушној страни система за дистрибуцију ваздуха, а поседује клапну којом се отпадни ваздух делимично преусмерава и укршта са струјом свежег ваздуха, вршећи тако рекулацију и топлоте и влаге. Пракса показује да се рецикулацијом 70÷80% отпадног ваздуха значајно повећава енергетска ефикасност сушаре. Рекуператори топлоте су сложенији уређаји код којих се рекулација топлоте врши укрштањем ваздушних струја свежег и отпадног ваздуха, који на тај начин размењују топлоту индиректно размењивачем топлоте типа ваздух-ваздух (Слика 6.11). Рекуператор најчешће поседује и сопствене вентилаторе ради бољег управљања процесом рекулације.

ON-OFF регулација подразумева да сушара константно ради са потпуном рецикулацијом ваздуха, а у тренуцима када сензори детектују повећану вредност релативне влажности ваздуха (или неког другог параметра сушења којим ће се управљати процесом) у сушари, рецикулација се гаси и сушара ради потпуно са свежим ваздухом све док вредност управљаног параметра не постигне тражену вредност.



Слика 6.10: Илустрација мешања гомиле зрнастог материјала унутар коморе. [74]



Слика 6.11: Илустрација рекуператора топлоте.

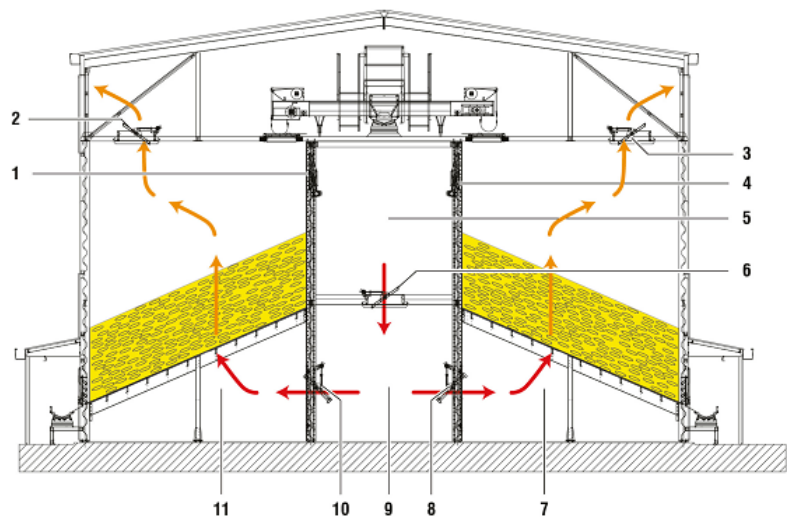
Намирница	Температура, °C	Тип сушаре
Јабука		
- кришке	60-93	тракаста
- прстенови	60-93	тракаста
- коцкице	60-93	тракаста
- половине	60-70	тунелска
Крушка (1/2, 1/4)	60-70	тунелска
Банана (колотови)	60-82	тунелска
Трешња	60-98	тракаста, тунелска
Кокос пахуљице	65-93	тракаста
Брусница	82-93	тракаста
Лешник	65-232	тракаста
Кикирики	65-232	тракаста
Бадем	65-232	тракаста
Пистаћи	65-232	тракаста
Ананас	65-93	тракаста, тунелска

Табела 6.1: Типичне температуре сушења воћа у коморним, тракастим и тунелским сушарама. [75]

Коморне сушаре се често користе за сушење комадних материјала, као што је на пример кукуруз у клипу, кртоласти и коренасти производи и слично. Због великих количина материјала, ови системи сушења су великих димензија и представљају праве објекте. Очишћени клип кукуруза се суши са почетном влажношћу материјала коју је имао непосредно после жетве. Постоје два карактеристична начина изведби оваквих објеката. Прва изведба (Слика 6.12) подразумева да су све коморе међусобно повезане централним системом ваздушних канала. Ваздух се припрема централно у котларници, а дистрибуира помоћу великих вентилатора. Код друге изведбе (Слика 6.13), свака комора за сушење, у повратном процесу са једним пролазом, опремљена је гориоником и вентилатором, и може да се користи помоћу горњег или доњег улаза што омогућава лагано и прецизно сушење. Влажан ваздух се одбацује напоље након једног пролаза. Овакав начин дизајн омогућава тачну и независну контролу процеса сушења за сваку појединачну комору за сушење.

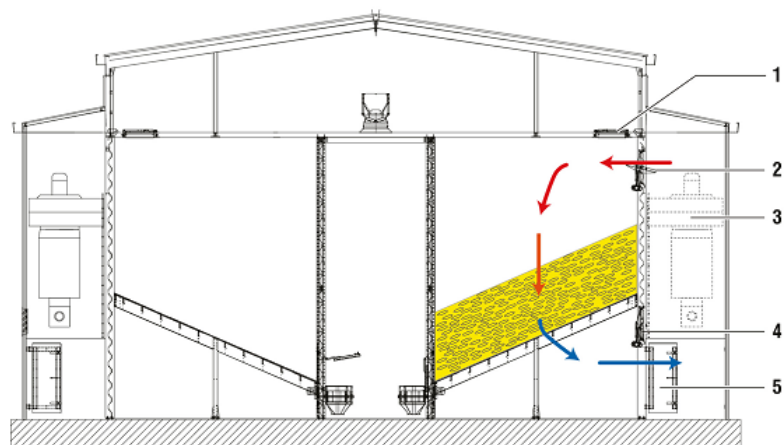
Слика 6.12: Функционална шема коморне сушаре за кукуруз у клипу и централном припремом ваздуха. [76]

1 - горњи улаз за ваздух; 2 - отвор за уклањање отпадног ваздуха; 3 - отвор за уклањање отпадног ваздуха; 4 - горњи улаз за ваздух; 5 - горњи канал за ваздух; 6 - престојни отвор; 7 - комора; 8 - доњи улаз за ваздух; 9 - доњи канал за ваздух; 10 - доњи улаз за ваздух; и 11 - комора.



Слика 6.13: Функционална шема коморне сушаре за кукуруз у клипу и појединачном припремом ваздуха. [76]

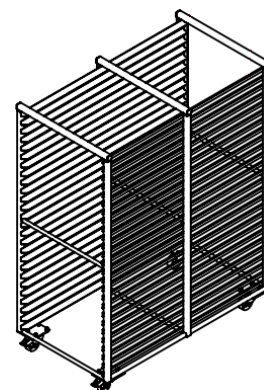
1 - отвор за пуњење материјала; 2 - горњи улаз за ваздух; 3 - вентилатор/горионик; 4 - доњи улаз за ваздух; 5 - отвори за уклањање отпадног ваздуха.



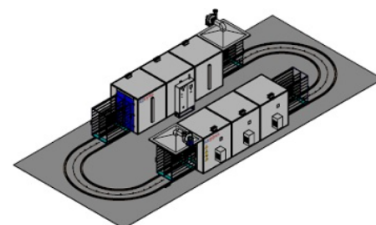
6.2 Тунелска сушара

Тунелска сушара је систем у коме се контејнер или колица са материјалом крећу кроз тунелску комору у којој се суше. Тунелска комора је издужена (најчешће 10÷60 m) у односу на свој мали попречни пресек (најчешће 2×2 m, мада иде и до 6 m). Колица или контејнери (Слика 6.14) се кроз комору крећу по шинама, помоћу специјалног механизма за повлачење, брзином која је довољна да се материјал на њима потпуно осуши за време проведено у комори (Слика 6.15). Ваздух улази на једном а излази на другом крају тунела. Сушење се врши континуално топлим ваздухом који преструјава преко материјала на колицима, а струјање ваздуха у односу на правац кретања материјала може бити истосмерно или супротносмерно. Код истосмерног струјања, ваздушна струја се креће у истом смеру као и материјал. У том случају највлажнији и најхладнији материјал доспева у контакт са најтоплијим и најсувљим ваздухом. Код супротносмерног струјања, ваздушна струја се креће супротно од смера кретања материјала. Циркулација ваздуха је најчешће принудна, са рециркулацијом и међузагревањем. Загревање материјала у савременијим тунелским сушарама је често микроталасним, радиофреквентним или инфрацрвеним електромагнетним зрачењем.

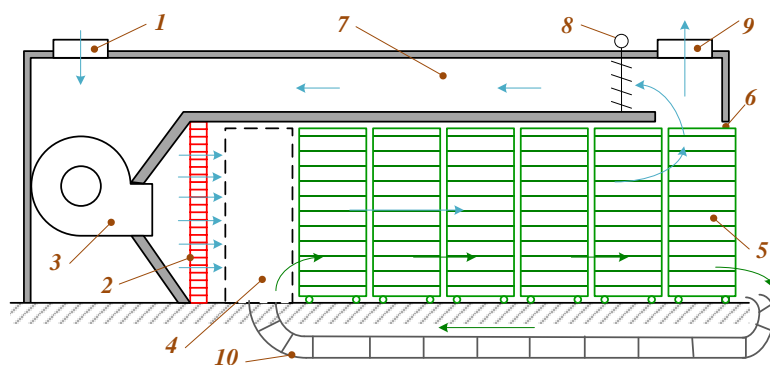
Компоненте тунелске сушаре су сличне компонентама коморних сушара (Слика 6.16). Простор унутар коморе је често подељен на више зона између којих се врши догревање ваздуха. Због велике површине омотача тунела сушара мора бити добро изолована како би се елиминисали губици топлоте у околину. Један од проблема који се могу јавити током сушења у тунелу јесте неравномерно загревање материјала по висини колица, што се може регулисати различитим усмеривачима ваздуха или преградама кроз које ће се колица провлачити при кретању кроз тунел. У тунелској сушари је могуће сушити већину воћа и поврћа, као и лиснату масу биљака (Табела 6.1).



Слика 6.14: Илустрација колица за пренос леса.



Слика 6.15: Илустрација кретања колица унутар/изван тунелске сушаре.[77]



Слика 6.16: Функционална шема компонента тунелске сушаре са колицима.

1 - улаз свежег ваздуха; 2 - грејач; 3 - вентилатор; 4 - улаз за колица; 5 - колица са лесема унутар коморе; 6 - излаз за колица; 7 - рециркулациони канал; 8 - регулатор протока рециркулисаног ваздуха; 9 - излаз отпадног ваздуха; и 10 - шине за превоз колица унутар и изван тунела.

6.3 Сушара са транспортером



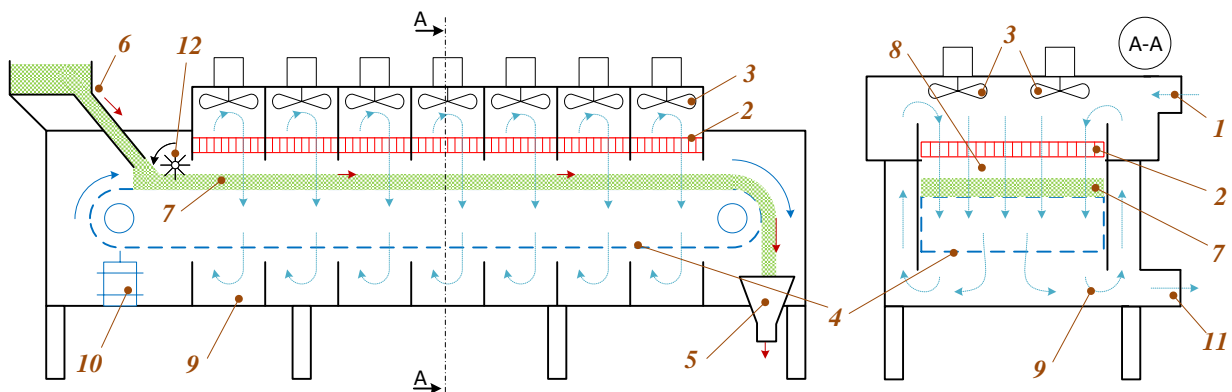
Слика 6.17: Илустрација тракасте сушаре. [78]



Слика 6.18: Илустрација сушења лековитог биља на тракастој сушари са једном траком.

Сушара са транспортером представља систем за сушење у коме се материјал који се суши транспортује кроз сушару *покретном траком* или *уужним транспортером*. Материјал у сушари се не помера у односу на подлогу, већ се помера заједно са подлогом, чија је брзина кретања варијабилна и може се подесити тако да материјал буде задржан у комори неопходно време ($\approx 2 \text{ min} \div 1 \text{ h}$). Може се десити да се материјал промеша током просипања на покретну траку, при преласку са траке на траку или ускомеша при окретању пужног транспортера.

Сушара са *тракастим транспортером* (или *тракаста сушара*) у свом склопу има покретну траку која је најчешће у облику металне мреже, решеткастих сегмената, перфорираног челичног лима, шупљикавих пластичних материјала и слично. Шупљикавост траке мора бити довољна да омогући довољну пропустљивост ваздуха који ће продувати материјал. Конфигурација тракасте сушаре (Слика 6.17) подразумева пролазак траке са материјалом кроз комору где је изложен топлој ваздушној струји (Слика 6.18) која обезбеђује топлоту потребну за загревање материјала и испаравање воде из њега. Ваздушна струја ($\approx 3 \div 10 \text{ m/s}$) директно пролази кроз слој материјала и траку најчешће у смеру на доле, али могући су и други смерови струјања. Током сушења материјал стоји непомично на траци. У зависности од концепције сушаре могућа су два различита сценарија кретања материјала и ваздуха у комори: *попречно кретање* ваздуха у односу на кретање материјала и *паралелно кретање* (истосмерно или супротносмерно).



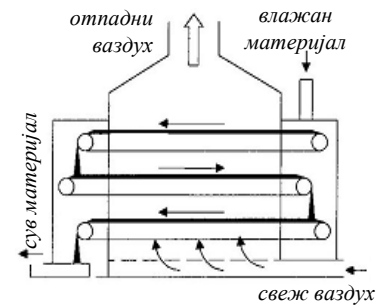
Слика 6.19: Функционална шема компонента тракасте сушаре.

1 - улаз свежег ваздуха; 2 - грејач; 3 - вентилатор; 4 - покретна трака; 5 - левак за прикупљање осушеног материјала; 6 - уређај за дозирање свежег материјала; 7 - слој материјала на покретној траци; 8 - простор коморе; 9 - простор за циркулацију ваздуха; 10 - електро мотор за погон покретне траке; 11 - излаз отпадног ваздуха; и 12 - мешач.

Поједини типови тракастих сушара, ради што дужег задржавања у комори за сушење, поседују више трака, при чему се материјал преноси са траке на траку и тиме истовремено промеша. У пракси се најчешће срећу сушаре са једним (Слика 6.19), два или три пролаза (Слика 6.20). Да би се побољшао квалитет сушења контролише се брзина преношења материјала са једне траке на другу, чиме се утиче на дебљину слоја на наредној траци. Дебљина слоја на првој траци је најмања, а онда се на свакој наредној помало повећава јер је материјал све сувљи. Равномерно насипање материјала на траку важно је за уједначеност сушења. Брзина ваздуха има директан утицај на брзину сушења и обрнуто је пропорционална дебљини насутог слоја. Уобичајен начин подразумева насипање материјала на средину траке, а потом његово дистрибуирање по целој ширини траке мешачима или вибрационо. У већим сушарама, са више трака, равномерније загревање материјала могуће је обезбедити уградњом грејача између покретних трака како би се извршило догревање ваздуха. Такође, довођење ваздуха на материјал може се реализовати централно за целу комору или помоћу секција које ће обухватити само одређене зоне коморе.

Један од недостатака тракастих сушара је цурење ваздуха у околину. Ваздух мора бити провучен кроз слој материјала и не сме се дозволити да цури са стране или излази неконтролисано из сушаре. Заптивање се врши помоћу различитих врста вођица и панела монтираних на структуру сушаре, које могу или не морају бити у контакту са покретном траком, а које спречавају ваздух да заобиђе производ усмеравајући га. Тракасте сушаре су често конструисане тако да раде на или испод атмосферског притиска како би се осигурало да испарења или прашина не излазе у околну средину (Слика 6.21). Подпритисак ће умањити цурење ваздуха у околину.

Сушара са пужним транспортером (или *пужна сушара*) омогућује пренос материјала хоризонтално, вертикално или под нагибом, кроз затворени простор у коме се истовремено дешава процес сушења (Слика 6.22). Загревање материјала могуће је остварити ваздушном струјом и/или загревањем зидова коморе топлим флуидом (Слика 6.23). Предности овакве сушаре су: заузимање мањег простора, ефикасна контрола протока материјала, разноврсност сушених материјала, иниформно загревање материјала, једноставна уградња и одржавање, итд. Недостаци пужне сушаре су: немогућност сушења кртих, ломљивих, абразивних и лепљивих материјала, као и осетљивост на варијацију угла под којим је транспортер нагнут.



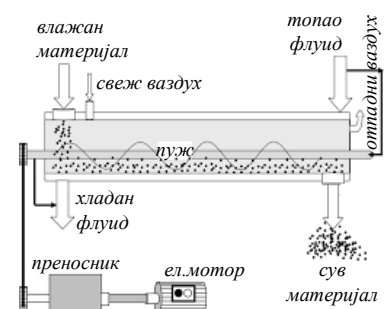
Слика 6.20: Илустрација тракасте сушаре са више трака.



Слика 6.21: Илустрација сушаре са тракастим транспортером у више пролаза у затвореној комори. [79]



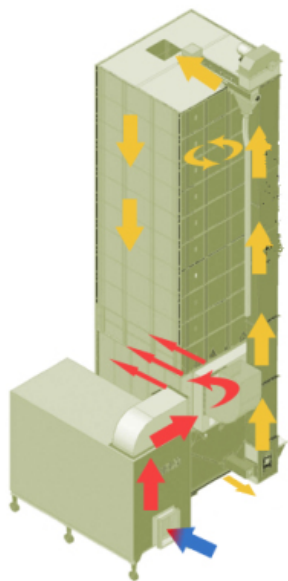
Слика 6.22: Илустрација сушаре са пужним транспортером. [80]



Слика 6.23: Шема сушаре са пужним транспортером.

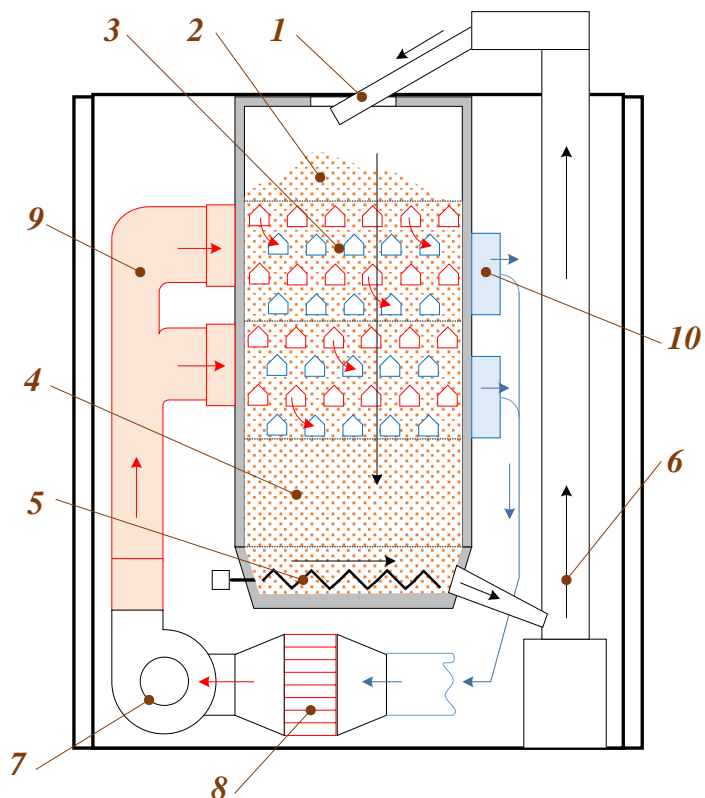
6.4 Шахтна сушара

Шахтна сушара је систем са континуалним радом, намењен за сушење зрнастог, грануластог, бобичастог и других дисперзних материјала, у вертикалној комори (шахту) у којој се материјал креће под дејством силе Земљине теже и током кретања продувава топлим агенсом (Слика 6.24). У оваквим сушарама се изузетно ефикасно суше соја, сунцокрет, пшеница, пиринач и кукуруз. У унутрашњости сушаре налазе се зоне предгревања, главног загревања и хлађења. Такође, сушара може садржати и систем за рецикулацију материјала, којим се материјал враћа на поновно сушење.



Слика 6.24: Шема циркулације ваздуха (црвено) и материјала (жуто) кроз систем шахтне сушаре. [81]

Принцип рада сушара за зрно је да токови загрејаног ваздуха пролазе кроз слој производа (Слика 6.25). Прецизним избором режима рада система могуће је створити праве услове да се обезбеди континуирано и равномерно кретање производа по целој висини коморе за сушење. Сва зрна материјала добијају агенс у свим правцима како би допринели хомогености сушења на крају процеса. Брзина сушења условљена је брзином којом влага из унутрашњости зрна доспева до површи зрна, одакле испарава у околину. При сувише великој брзини сушења, брзина испаравања влаге са површи зрна је већа од брзине којом влага доспева из средине зрна. То доводи до



Слика 6.25: Шема система шахтне сушаре.

1 - улаз материјала; 2 - зона предгревања; 3 - зона загревања материјала; 4 - зона хлађења материјала; 5 - зона прикупљања осушеног материјала; 6 - лифт за рецикулацију материјала; 7 - вентилатор; 8 - грејач; 9 - довод топлог ваздуха; 10 - одвод одпадног ваздуха.

Напомена: на шеми није приказан део каналске мреже за рецикулацију ваздуха из разлога што је она слична као на претходним шемама.

пресушивања површи зрна, затварања пора и отежавања сушења, уз могућу нагорелост зрна. Зато се зрно пре почетка процеса сушења мора загрејати да би се смањила и уравнотежила брзина његовог сушења. Кретање материјала унутар коморе сушаре изводи се слободним падом кроз шахт. Шахт је увек испуњен материјалом. Висина шахта може бити и до 60 m (Слика 6.26). Како би се материјал успорио користе се елементи (лимови, преграде, препреке, и слично) различитих облика. Величине и облици преграда бирају се на основу величине зрна материјала који се суши.

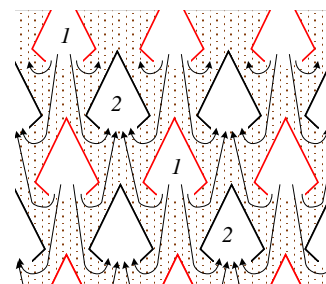
Циклус сушења започиње мировањем зрна, које након пуњења или изузимања материјала заузима своје место унутар шахта сушаре. Након таложења прашине, изазваног кретањем зрна, укључују се вентилатори, успоставља струјање агенса и покреће систем за загревање агенса. Брзина кретања материјала се регулише изузимањем материјала са дна коморе, најчешће пужним механизмом. Брзина струјања агенса кроз материјал креће се у опсегу $0,2 \div 0,8$ m/s. Време сушења у шахтним сушарама са успоравањем кретања материјала износи неколико часова. Време сушења зависи од снаге сушаре и почетног садржаја воде улазне сировине. Испаравање воде најчешће није равномерно, интензивније је при високим садржајима воде и временом успорава како се материјал ближи равнотежном садржају воде. Време трајања циклуса ће зависити од температуре и промене влажности зрна. Трајање сушења зависи и од спољашњих климатских услова, тако да се у ситуацијама екстремних температура (врло топло и суво) може преполовити, односно, продужити уколико су услови околине хладни и влажни.

Унутар сушаре су уметнути канали за довод и одвод агенса, који су профилисани тако да праве што мањи отпор кретању масе материјала (Слика 6.27). Такође, распоред канала је такав да омогућује сушење материјала по слојевима - зонама, поређаним по вертикали. Захваљујући усмеравању кретања зрна и каналсању протока агенса, могуће је постићи хомогено сушење за целу шаржу унутар коморе сушаре.

Према начину загревања материјала, шахтне сушаре могу бити са *индиректним* или *директним* загревањем. Код директног загревања агенс сушења је загрејани ваздух, док се код директног загревања као агенс користи мешавина ваздуха и продуката сагоревања, насталих сагоревањем чврстог горива у ложиштима или течног горива у горионцима. Индиректно загревање захтева $10 \div 25\%$ више топлотне енергије од директног загревања. Овај губитак је директно повезан са губицима топлотне енергије која се са продуктима сагоревања предаје околини кроз димњак. Индиректно загревање



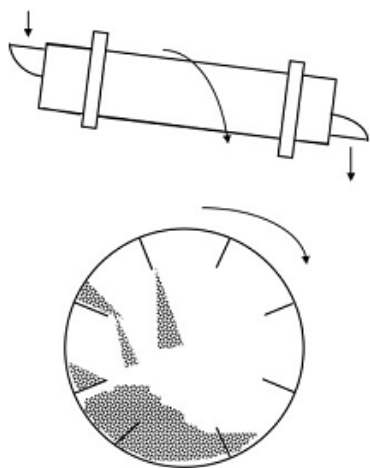
Слика 6.26: Изглед шахтне сушаре Strahl 17000 FAV/12. [82]
Капацитет сушења:
Кукуруз 70,0 t/h
(28%-14% влажност);
Соја 92,9 t/h
(18%-13% влажност);
Пшеница 129,0 t/h
(20%-14% влажност).



Слика 6.27: Шема циркулације ваздуха кроз каналски систем уметнут у масу материјала.

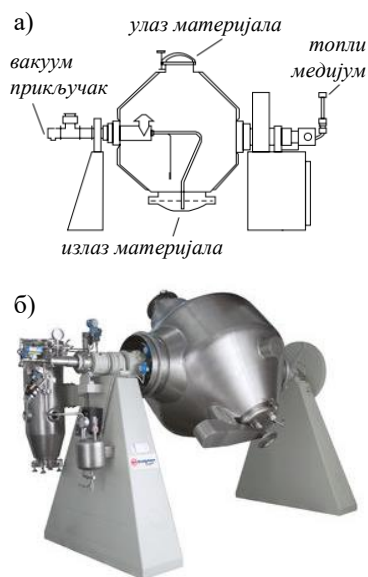
не утиче на квалитет осушеног производа јер нема директног контакта између продукта сагоревања и материјала.

6.5 Ротациона сушара



Слика 6.28: Принципијелна шема рада ротационе сушаре са дугачким бубњем и континуалним протоком материјала. [83]

Ротациона сушара (још позната и под називом *сушара са преврћањем материјала* или *сушара са бубњем*) је систем који влажан материјал доводи у директан контакт са загрејаним агенсом унутар дугачког ротирајућег бубња (Слика 6.28) или унутар цилиндричне шкољке у облику двоструког конуса (Слика 6.29), опремљених унутрашњим лопатицама или подизачима. Конструкција бубња може бити разнолика, од једноставног облика у виду једне цеви, до сложенијих облика више цеви различитих пречника концентрично уметнутих у бубањ. Материјал који се суши, креће се уз константно истовремено превртање, кроз бубањ који полако ротира. Померање материјала је последица комбинованог ефекта нагиба лопатица према хоризонталу, брзине унутрашњег механичког окретања и брзине струјања агенса. Материјал и агенс сушења се могу кретати истосмерно или супротно-смерно. Предности сушења материјала у ротационој сушари су: мања осетљивост на величину честица материјала, могућност коришћења најразличитијих агенаса, економичност и велики капацитет сушења. Недостатак ових сушара огледа се у могућим губицима материјала који бива однешен гасном струјом агенса, посебно ако материјал садржи изузетно фине честице. У индустрији прераде хране, најчешћа примена ротационих сушара је за сушење отпадних материја (коре од цитруса, украси од поврћа) и сточне хране (луцерка).



Слика 6.29: Шаржна ротациона вакуумска сушара у облику двоструког конуса. а) [84], б) [85]

Ротационе сушаре према начину кретања материјала могу бити *шаржне* или *континуалне*, а према начину загревања сушаре са *директним* или *индиректним* загревањем.

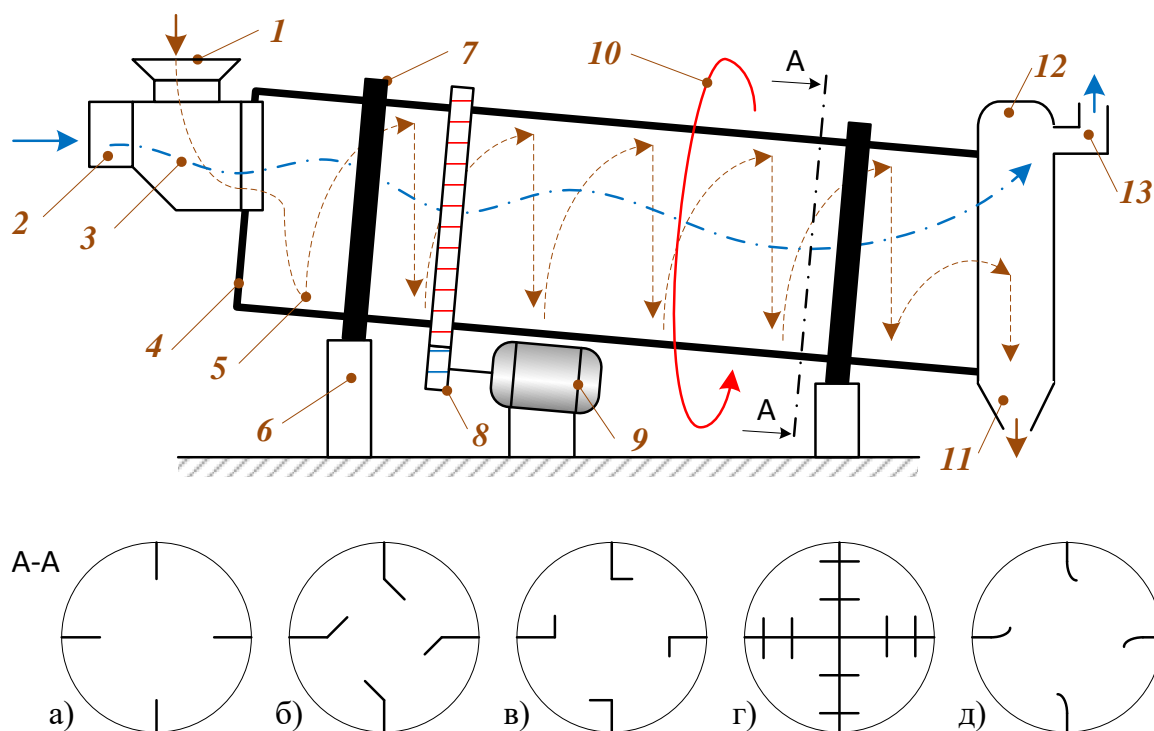
Шаржна ротациона сушара или *ротациона сушара са двоструким конусом* је систем који се често спреже са вакуумским сушењем. Оваква сушара се широко користи за сушење прашкастих, грануластих и кристаластих материјала. Због благог превртања, овакав тип сушаре није погодан за сушење материјала који се могу залепити за зидове или згрудвати. Уколико су материјали који се суше топлотно осетљиви или уколико се жели избећи њихова оксидација, комора сушаре се вакуумира и истовремено загрева. Комора током процеса сушења полако ротира (најчешће $5 \div 30$ о/min) око хоризонталне осе, чиме се материјал унутар коморе стално преврће. Загревање материјала изводи се тако што се топлота преноси са загрејаних унутрашњих зидова коморе на материјал који

је у директном контакту са зидом. Загревање се може извести грејачима или топлим медијумом који струји кроз зид. У завршним фазама сушења, топли медијум се може заменити хладним ради хлађења материјала. Главни недостатак ове врсте сушара је неефикасност у преношењу топлоте између зидова коморе и материјала. Овакав недостатак се решава додавањем ламела са унутрашње стране зида коморе, али ово знатно отежава чишћење сушаре. Проблем приликом постојања мале лепљивости материјала може се ублажити спорим или повременим ротирањем коморе, али уколико се ради о јако лепљивим материјалима, онда се сушење у оваквој сушари не препоручује.

Ротиациона сушара са директним загревањем материјала је систем којим се у ротирајућем бубњу материјал и агенс доводе међусобно у директан контакт (Слика 6.31), уколико нема штетности по квалитет материјала. Пречник ротирајућег бубња може се наћи у распону $0,3 \div 4$ m. Крајеви бубња су повезани са дистрибутивним коморама намењеним за пуњење и пражњење материјала (Слика 6.30). Ове сушаре су са

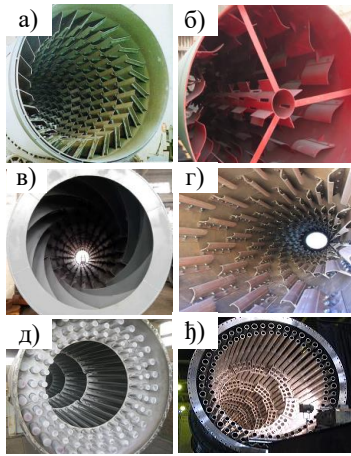


Слика 6.30: Ротиациона сушара са директним загревањем материјала. [86]



Слика 6.31: Илустрација ротиционе сушаре са директним загревањем и истосмерним кретањем материјала и агенса. Неки од могућих типова конструкција лопатица у пресеку А-А: а) праве, б) закошене 45° , в) правоугла 90° , г) за веома дисперзне материјале, и д) закривљене.

1 - улаз материјала, 2 - улаз агенса, 3 - путања агенса, 4 - бубањ, 5 - путања материјала, 6 - ослонац прстена, 7 - прстен, 8 - згупчasti преносник, 9 - електро-мотор, 10 - смер ротације, 11 - излаз материјала, 12 - циклонски колектор, 13 - излаз агенса.



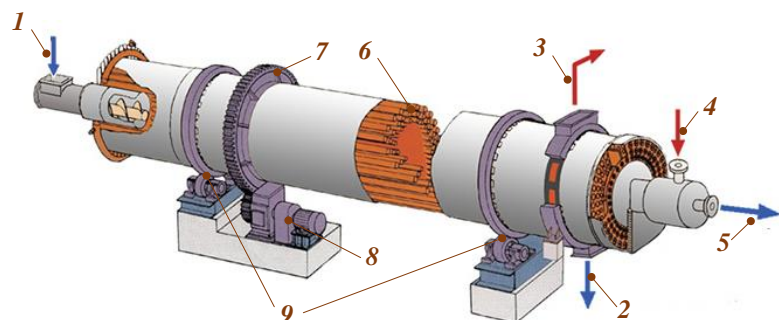
Слика 6.32: Илустрација изгледа лопатица/ подизача различитих типова ротационих сушара са директним загревањем: а) сушара са директним загревањем [87], б) сушара за песак [88], в) сушара за вештачка ђубрива, биомасу и слично [89] и г) вишенаменска сушара [86]; и изглед унутрашњости ротационе сушаре са индиректним загревањем: д) индиректно загревање прегрејаном паром [87] и е) индиректно загревање, изглед спопа цеви са држачима [90].

унутрашње стране бубња опремљене ротирајућим лопатицама које подижу материјал, преврћу га и полако преносе дуж бубња (Слика 6.32).

Код супротносмерног кретања материјала и агенса кретање материјала се може регулисати спиралним обликом лопатица или нагибом бубња. Оптимална напуњеност бубња зависи од количине чврсте материје која може бити задржана у лопатицама. Уколико су лопатице недовољно попуњене, сушара ће радити неефикасно и испод свог капацитета. Са друге стране, препуњеност ће довести до тога да материјал није у добром контакту са агенсом, што ће уједно продужити време трајања процеса сушења. Ротациона сушара са директним загревањем материјала показала се добро код индустријског сушења расутих пољопривредних материјала као што су сточна храна, разно биље, кртоласте биљке, житарице и слично. Међутим, уколико материјал у свом саставу садржи изузетно fine честице, могући су прекомерни губици уколико струја агенса поседује потенцијал да понесе ове честице са собом и изнесе их из сушаре. Ово се може спречити постављањем циклонских колектора на крају сушаре, којима се уклања прашина захваћена излазном гасном струјом. Такође, могуће је користити и вреће за сакупљање у случају сушења скупих материјала.

Ротациона сушара са индиректним-контактним загревањем материјала је систем који се састоји од цилиндричног омотача, нагнутог према хоризонталној равни ($\angle 18 \div 58^\circ$) како би се олакшао транспорт материјала, а у коме је симетрично по обиму (у један или више концентричних редова) постављено више цеви кроз које студи прегрејана водена пара ($4 \div 10 \text{ bar}$) и које ротирају с њим. Поред водене паре користе се топла вода, уље, топао ваздух или електрични грејачи. Влажан материјал улази на једном крају бубња, преврће се око врелих цеви и суши се. Влага се одводи агенсом, чији проток мора бити довољан за њено уклањање влаге или за формирање посебне гасне атмосфере и искључење спољашњег ваздуха. При руковању са лепљивим материјалом пожељно је имати

Слика 6.33: Изглед ротационе сушаре са индиректним-контактним загревањем материјала. [88]
1 - улаз материјала; 2 - излаз материјала; 3 - излаз испарене влаге; 4 - улаз прегрејане паре; 5 - излаз кондензата; 6 - цеви за прегрејану водену пару; 7 - зупчasti преносник; 8 - електро-мотор; 9 - ослонци ротирајућих прстена.



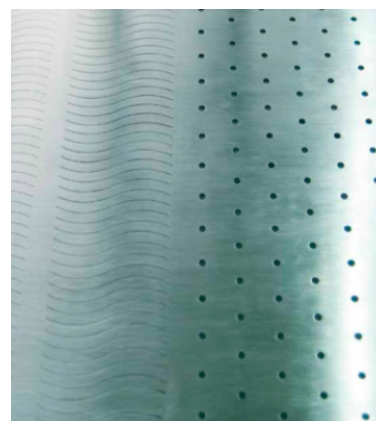
само један ред цеви. Елементи за мешање налазе се иза цеви као би се олакшало мешање материјала. Индиректне сушаре се користе само онда када није могуће користити сушаре са директним загревањем. Ова врста сушара се често користи за континуално сушење или загревање зрнастих или прашкастих материјала (житарице, пулпа и сл.)

6.6 Сушара са флуидизованим слојем

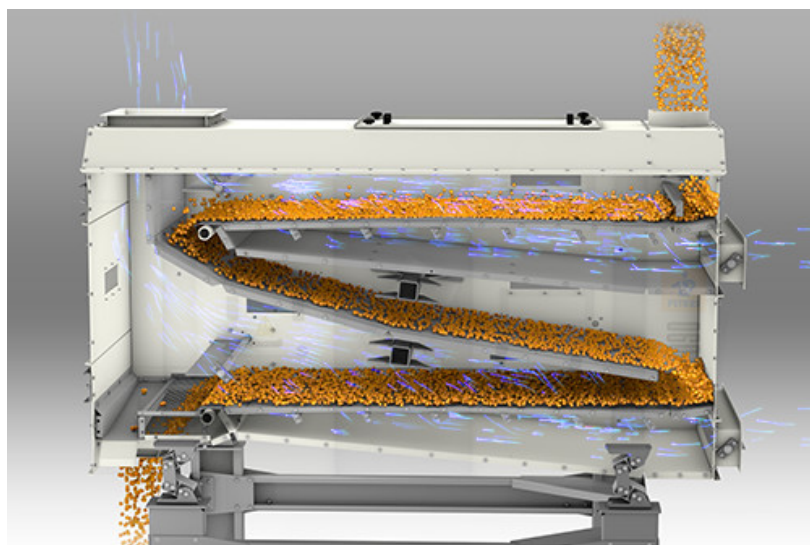
Сушара са флуидизованим слојем материјала је систем који флуидизацију влажног материјала остварује топлим агенсом (влажан ваздух, инертни гасови или димни гасови) уз помоћ перфориране подлоге (отвори $1 \div 5 \text{ mm}$) кроз коју се агенс дистрибуира ка честицама материјала (пречника $50 \div 2000 \text{ }\mu\text{m}$) (Слика 6.34). Префорирана подлога формира дно призматичног корита (Слика 6.35). Материјал се под дејством струје агенса издиже и лебди у флуидизованом слоју који се формира непосредно изнад подлоге и уједно преноси дуж корита од улаза ка излазу из сушаре. Агенс се може аплицирати континуалним или пулсирајућом струјањем. Непрекидност у кретању честица дуж корита обезбеђује се нагибом корита и ширином корита. Процес сушења се дешава великом брзином. У зависности од величине честица, температурног режима и брзине кретања материјала, оквирни капацитет сушења за 1 m^2 перфориране подлоге износи $500 \div 3000 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{h})$. Уз реализацију процеса сушења, у сушарама овог типа, могуће је истовремено реализовати и друге процесе у другим зонама сушаре, попут печења, гранулације, млевења и слично. Поред зрнастих, семенастих, бобичастих и грануластих материјала, у сушарама са флуидизованим слојем могуће је сушити не-



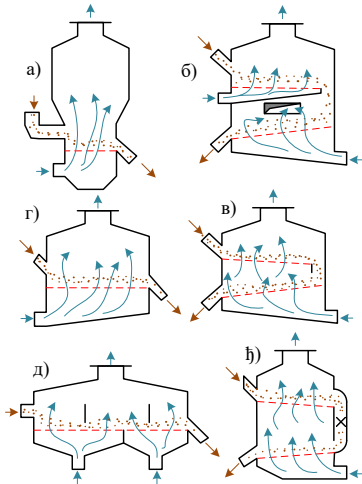
Слика 6.34: Изглед сушаре са флуидизованим слојем материјала. [91]



Слика 6.35: Изглед перфориране подлоге.



Слика 6.36: Шема једнокоморне сушаре са флуидизованим слојем и „диз-цак” кретањем материјала, који се у у два пролаза загрева агенсом истих особина. [76]

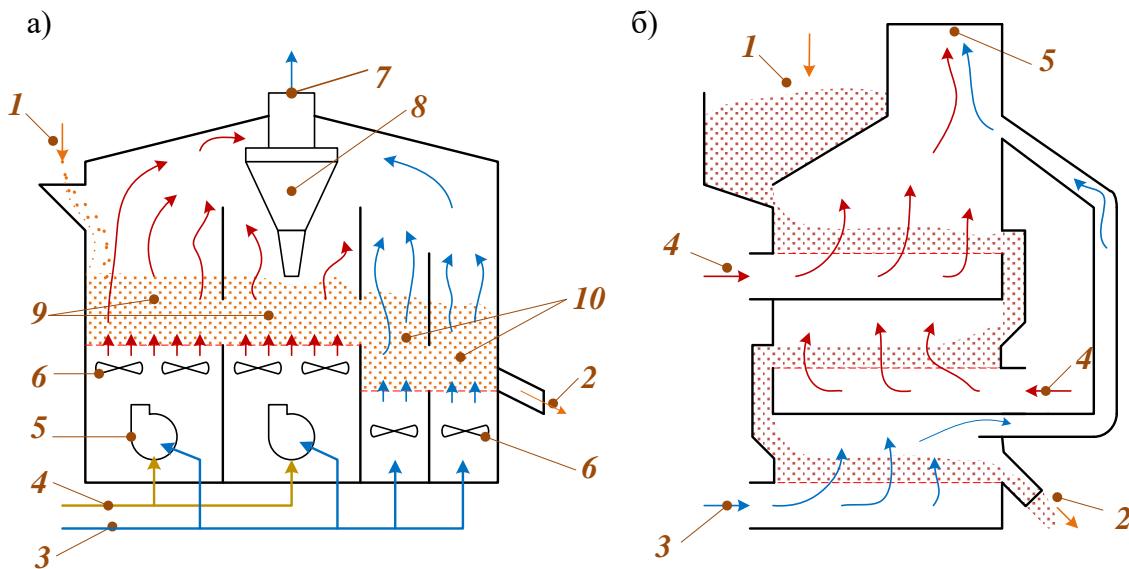


Слика 6.37: Шеми различитих конфигурација сушара са флуидизованим слојем. а) једнозонска округла, б) вишезонска са усмереним кретањем материјала и једнократним загревањем, в) једнозонска са вишеструким загревањем, г) једнозонска правоугаона са усметеним кретањем материјала, д) вишезонска са једноструким загревањем, и е) вишезонска цилиндрична са вишеструким загревањем.

слепљиве пасте, суспензије и растворене материјале. Раствори и суспензије морају бити дехидрирани на флуидизованој инертној млазници, а из сушаре излазе у облику fine прашице. Ова метода сушења погодна је сушењу материјала осетљивих на излагање повишеним температурама. Овом методом постижу се велике вредности брзина преношења топлоте и масе, али током процеса сушења може доћи до прегревања материјала и повећане потрошње енергије.

Сушаре са флуидизованим слојем су разноврсне у погледу дизајна, хидродинамичког и термичког третмана (Слика 6.37), тако да се могу класификовати на различите начине: по броју комора (*једнокоморне* и *вишекоморне*), по режиму рада (*периодичне*, *полу-континуалне* и *континуалне*), по конфигурацији коморе (*округле*, *правоугаоне*, *издужене у висину или ширину*), по хидродинамичком режиму рада (*флуидизационе*, *фонтанске* или *вихорне*), итд.

Једнокоморне сушаре са флуидизованим слојем се због свог једноставног дизајна, економичности и једноставне аутоматизације, највише користе у прехранбеној индустрији (Слика 6.36). Основна карактеристика ових сушара је постојање једне коморе унутар које се дешава процес сушења, а у којој простор за сушење штеди начином кретања материјала



Слика 6.38: Шеми вишекоморних сушара са флуидизованим слојем:

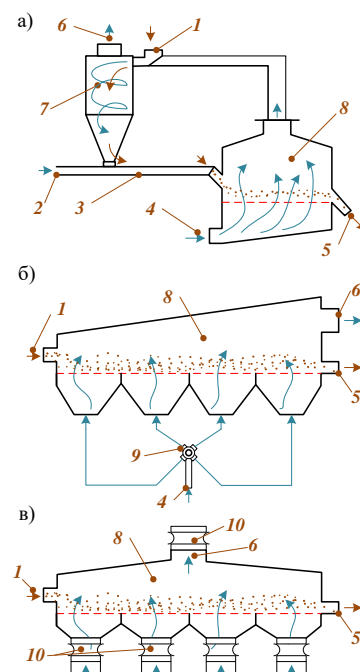
а) хоризонтална изведба (1 - улаз материјала; 2 - излаз материјала; 3 - довод ваздуха; 4 - довод горива; 5 - горионик; 6 - вентилатор; 7 - излаз отпадног ваздуха; 8 - циклон; 9 - коморе за загревање и сушење; 10 - коморе за расхлађивање.),
 б) вертикална изведба (1 - улаз материјала; 2 - излаз материјала; 3 - улаз ваздуха за расхлађивање материјала; 4 - улаз топлог ваздуха за загревање и сушење; 5 - излаз отпадног ваздуха.).

(„дик-цак”, кружно, и слично). Начин кретања материјала доста утиче на брзину и начин пуњења сушаре. *Вишекоморне сушаре са флуидизованим слојем* користе се када је потребно постићи различите режиме у различитим фазама процеса. Овакви системи поседују више комора, а често се последња комора у низу користи за расхлађивање производа (Слика 6.38). Такође, брзину кретања материјала кроз сваку од комора могуће је прилагођавати према потреби.

За сушење материјала у флуидизованом слоју неопходно је постићи непрекидно мешање честица материјала. Флуидизацију великих честица материјала могуће је поспешити механичким мешањем (лопатицама), пулсирањем ваздушне струје дуж целог тока или периодично, вибрацијом подлоге и слично. Повремена флуидизација може умањити проблеме механичког оштећења честица материјала услед међусобног сударања. Код материјала са великим унутрашњим отпорима кретању влаге, као што су зрнасти материјали, брзина сушења опада са повећањем висине флуидизованог слоја.

Модификацијом сушаре са флуидизованим слојем материјала добијају се различите варијанте овог система којима се заобилазе мане конвенцијалног система. У модификоване системе сушења у флуидизованом слоју спадају:

- ▶ *Хибридна сушара са флуидизованим слојем* је систем замишљен тако да се процес сушења дешава у две фазе. Прва фаза се дешава у вихорној (или циклонској) комори у коме се брзо уклања површинска влага са материјала. Унутар вихорне коморе материјал је ношен спиралном струјом агенса (вртложно струјање), оствареној тангенцијалним убацивањем агенса у цилиндрично-конусну комору. У другој фази, делимично исушен материјал се пнеуматски транспортује у комору где се суши у флуидизованом слоју у једном пролазу (Слика 6.39а).
- ▶ *Сушара са пулсирајућим флуидизованим слојем* примењује се како би се избегли проблеми неуједначеног сушења материјала настали услед неједнаке расподеле величина честица у маси материјала, гранулација и слично. Цео слој или део слоја подвргава се променљивој флуидизацији која се остварује контролисаним променом/ осцилацијом брзине струјања агенса (Слика 6.39б). Овакав начин флуидизације се у пракси показао ефектан и енергетски ефикасан, без утицаја на квалитет флуидизације или капиталне трошкове.
- ▶ *Сушара са вибро-флуидизованим слојем* истовремено са флуидизацијом материјала примењује истовремено и ви-



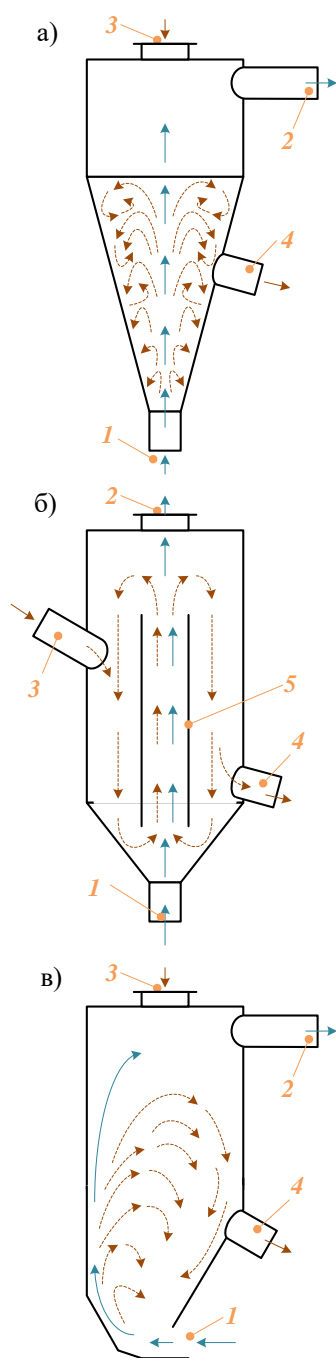
Слика 6.39: Шеме различитих конфигурација модификованих сушара са флуидизованим слојем.

а) хибридна сушара са флуидизованим слојем, б) сушара са пулсирајућим флуидизованим слојем, и в) сушара са вибро-флуидизованим слојем.

1 - улаз материјала, 2 - довод ваздуха, 3 - пнеуматски транспорт материјала, 4 - довод топлог агенса, 5 - излаз материјала, 6 - отпадни агенс, 7 - вихорна или циклонска комора, 8 - комора, 9 - разводник агенса, и 10 - флексибилна спојница.



Слика 6.40: Изглед сушаре са вибро-флуидизованим слојем материјала. [92]



Слика 6.41: Шеме различитих конфигурација сушара:

а) фонтанска сушара, б) фонтанска сушара са узгонском цевом, и в) вихорна сушара.

1 - довод ваздуха, 2 - отпадни ваздух, 3 - улаз материјала, 4 - излаз материјала, и 5 - узгонска цев.

брацију подлоге остварујући тако процес који се назива *псеудофлуидизација* („лажна“ флуидизација) (Слика 6.39в). У том случају је брзина ваздуха потребног за флуидизацију знатно мања од минималне брзине флуидизације. Током процеса псеудофлуидизације, осипање материјала услед међусобног сударања честица или сударања са подлогом је смањено, тако да се примена оваквих сушара може проширити на крте, абразивне и материјале осетљиве на излагање повишеним температурама (Слика 6.40). Код полудисперзионих материјала, флуидизација ће покретати финије честице материјала док ће се крупније честице покретати помоћу вибрације. Кретање чврстих честица у флуидизованом слоју веома је слично кретању течности. Вибрирајући флуидизовани слојеви су мале дебљине због утицаја вибрација, чији утицај слаби удаљавањем од подлоге. Недостатак ових система може представљати појава буке услед вибрација.

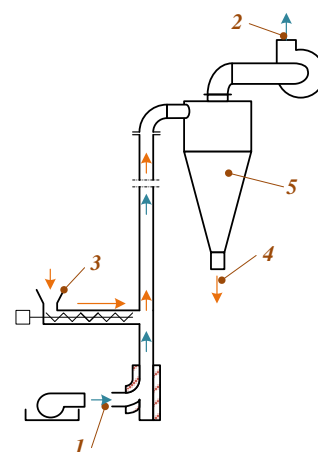
- *Фонтанска сушара* је систем којим се елиминише стагнација честица материјала у појединим зонама коморе. Код фонтанских сушара (Слика 6.41а) агенс се у комору уводи на дну сушаре, са млазом усмереним навише, за разлику од *вихорних комора* (Слика 6.41в), где се агенс доводи тангенцијално. Струја агенса транспортује честице од дна слоја, кроз средину слоја и до површине слоја. Након што су изгубиле замах кретања, честице падају на површину слоја, померају се у страну и пропадају уз зид коморе поново до дна слоја, чиме се процес понавља. Фонтанско сушење се може реализовати са или без узгонске цеви у комори сушаре (Слика 6.41б), која у неким изведбама може бити перфорирана. Унутар узгонске цеви, честице се крећу у истом смеру као и агенс, а кретање се изводи по принципу пнеуматског транспорта. У ануларном простору, честице се крећу у супротном смеру у односу на гас под дејством силе гравитације. Основна карактеристика фонтанског сушења је интензивна циркулација и мешање честица, што доводи до ефикасног преношења масе топлоте током процеса. Овом методом могуће је сушити и честице материјала >5 mm, које није могуће нормално флуидизовати. Метода је првенствено осмишљена за сушење пшеничног зрна, али се показала као ефикасна и код сушења прашкастих и грануластих материјала, као и пасти, каша, раствора и суспензија.

Остале модификације сушења са флуидизованим слојем материјала углавном представљају комбинације већ наведених

техничких решења, која су унапређена увођењем различитих начина рецикулације материјала и агенса, додатних начина загревања честица материјала током процеса флуидизације (контактног или безконтактног), применом различитих млазница за удување агенса у материјал, применом прегрејане водене паре као топлог медијума, рекуперацијом топлоте применом топлотних пумпи и слично.

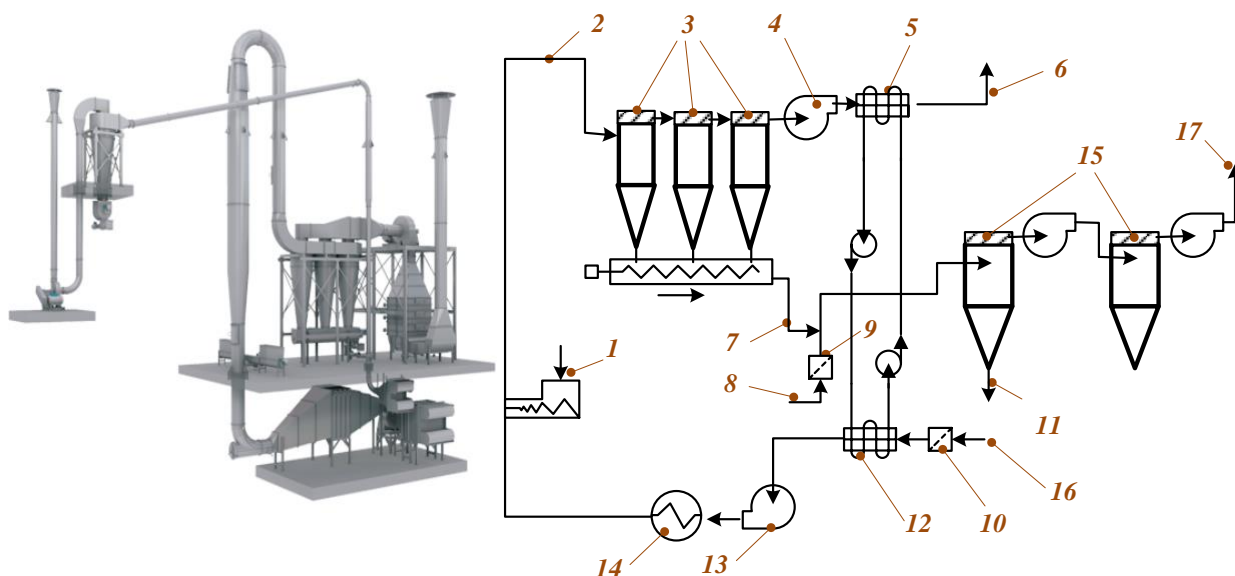
6.7 Пнеуматска сушара

Пнеуматска сушара је систем којим се влажан материјал истовремено суши и транспортује уз помоћ агенса сушења. Процес сушења се изводи унутар цевовода кроз који се материјал пнеуматски транспортује, односно преноси помоћу струје топлог агенса (ваздух или димни гасови) која је носилац топлотне енергије и кретања (Слика 6.42). Загревање агенса изводи се у посебном енергетском блоку постројења на почетку процеса. Материјал се контролисано убацује у струју агенса посебним уређајем за дозирање материјала. Пнеуматско сушење се најчешће изводи у једној дугачкој пнеуматској цеви, међутим, уколико за то постоји потреба, процес се може изводити и у више узастопних цеви мањих дужина (Слика 6.43). Током процеса сушења је путања честице најче-



Слика 6.42: Шема функционисања пнеуматске сушаре.

1 - улаз топлог ваздуха; 2 - отпадни ваздух; 3 - улаз материјала; 4 - излаз материјала; 5 - циклонски сепаратор.



Слика 6.43: Изглед и шема пнеуматске сушаре за сушење скроба и влакнастих материјала. [93]

1 - улаз материјала; 2 - пнеуматска цев; 3 - циклони; 4 - вентилатор; 5 - размењивач топлоте; 6 - отпадни ваздух; 7 - транспорт материјала ка зони расхлађивања; 8 - ваздух за расхлађивање; 9 - филтер ваздуха; 10 - филтер ваздуха; 11 - улаз свежег ваздуха; 12 - размењивач топлоте; 13 - вентилатор; 14 - грејач ваздуха; 15 - циклони; 16 - излаз материјала; 17 - отпадни ваздух.

шће дужа од дужине цеви кроз коју се транспотрује, што се дешава услед међусобног сударања честица као и сударања честица са унутрашњим зидовима цевовода. Као последица учесталих судара могућа је појава статичког наелектрисања влажног материјала, чиме се јавља потреба за уземљењем инсталације. Брзина струјања агенса мора бити што нижа, али довољна да понесе и најтежу честицу материјала, без обзира на положај цевовода. На крају процеса, честице материјала се издвајају из струје агенса, најчешће циклонским сепаратором. Време задржавања материјала у пнеуматским сушарама најчешће је кратко јер се у њима првенствено уклања површинска влага са материјала. Међутим, уколико је ово примарни начин сушења, системи поседују и компоненте за рецикулацију материјала ради што дужег задржавања честица материјала. Температура агенса треба бити што виша, али без прекорачења дозвољених вредности температура за третирали материјал. Пнеуматским сушарама се суше зрнасти, грануларни, пастасти, кристални, прашкасти или пахуљични материјали. Материјали који се лако и ефикасно могу пнеуматски транспортовати истовремено се и ефикасно суше. Неке од предности пнеуматских сушара су могућност непрекидност и поузданост у раду, једноставно одржавање, модуларност система и друге.

6.8 Сушара са распршивањем материјала



Слика 6.44: Илустрација млазнице за распршивање течног материјала у раду. [94]

Сушара са распршивањем материјала или спреј сушара је систем којим се течни материјали распршују у топлу у гасовиту струју агенса и тако суше све до постизања стања праха. Материјал доспева у комору сушаре у течном стању, трансформишући се распршивањем у капљице (пречника $10 \div 500 \mu\text{m}$), које се потом континуално убацују у струју врућег агенса (најчешће $< 200^\circ\text{C}$). Распршивањем материјала у топлу струју агенса влага испарава, а параметри процеса се подешавају према циљаној вредности финалне влажности материјала. Истовремено са процесом сушења, дешава се формирање честице осушеног материјала. Време задржавања материјала у спреј сушари је $5 \div 100 \text{ s}$. По завршетку сушења осушени материјал (прах) се издваја из струје агенса. Предности спреј сушења су: постизање хомогености осушеног производа, велики степен аутоматизације процеса, могућност сушења материјала осетљивих на повишену температуру или осетљивих на корозију.

Сушаре са распршивањем материјала могу бити системи *отворено-*

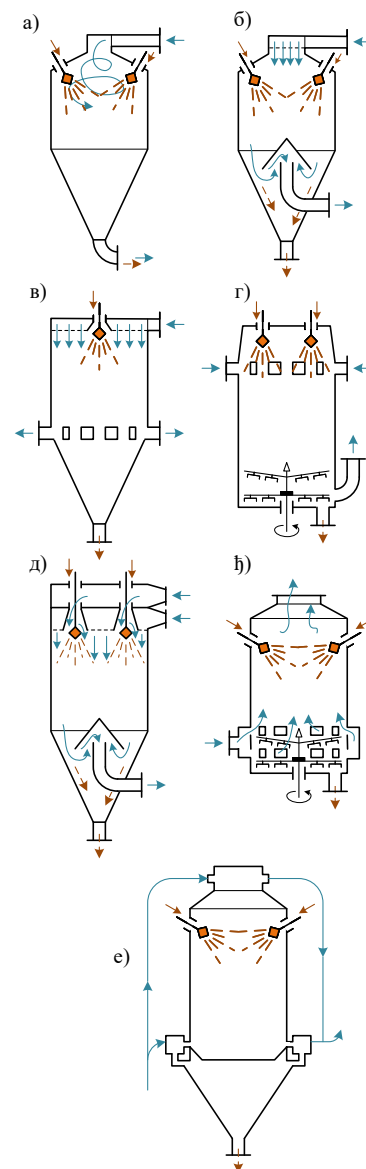
реног и затвореног типа. Системи отвореног типа континуално узимају свеж ваздух из околине, а на крају процеса отпадни ваздух избацују назад у околину. Системи затвореног типа рециркулишу једну исту количину агенса који се наизменично загрева, влажи, чисти и суши током процеса. Енергетска ефикасност отворених система је мања од ефикасности затворених система јер се део енергије губи са отпадним ваздухом. Затворени системи су еколошки прихватљивији јер је једини излаз из њих практично „само” осушени материјал. Извесна количина микрочестица наталожених на филтерима постоји као излаз из система, али се због мале количине може занемарити.

Квалитет извођења процеса сушења у спреј сушари зависи од начина извођења две карактеристичне операције: *формирање капљице* и *довођење капљице у контакти са агенсом*.

Формирање капљице је најважнија операција у процесу сушења распршивањем и њен квалитет је дефинисан начином распршивања материјала. Распршивањем течног материјала на ситније капљице повећава се контактна површина између капљица и агенса. Процес формирања капљице дешава се у три корака: (1) интензивно испаравање течности из капљице уз истовремено умањивање капљице; (2) формирање љуске (коре) на површи капљице и отежано испаравање влаге, и (3) формирање мехура ваздуха унутар љуске и потпуно нестајање течне фазе. Величина формиране капљице обрнуто је сразмерна количини енергије утрошене на њено формирање, тако да избор млазнице може доста утицати на утрошак енергије у овој операцији, на дизајн коморе и карактер струјања материјала. Капљица се састоји од воде и честица чврсте материје, а удео ових компонената може доста варирати од материјала до материјала. *Довођење капљице у контакти са агенсом* препознатљив је по интензивирању процеса преношења топлоте и масе између материјала и агенса. Када капљица дође у контакт са топлим агенсом почиње да губи воду у облику паре, чиме се започиње са процесом формирања чврсте честице материјала/праха. Интензитет испаравања влаге из капљице смањује се са повећањем количине чврстих честица које су у њој садржане/растворене. Динамика процеса сушења зависи од тога да ли је температура агенса већа/мања од температуре на којој ће капљица прокључати.

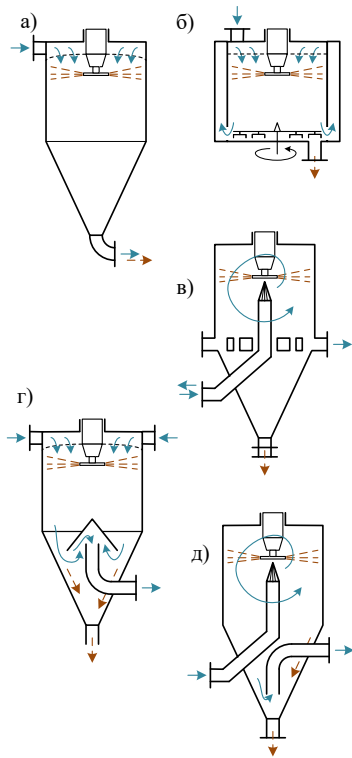
Постоје три начина за распршивање влажног материјала:

- *Распршивање механичким млазницама* изводи се при притисцима $< 300 \text{ bar}$, млазницама које су једноставног



Слика 6.45: Шема функционисања сушаре са распршивањем материјала млазницама.

а) централно вихорно довођење агенса и истосмерно струјање; б) са посебним одводом за отпадни агенс; в) са равномерним довођењем и радијалним одвођењем агенса по ободу коморе; г) са радијалним довођењем агенса и централним одвођењем; д) са локалним довођењем агенса до млазнице; е) са централним и периферним довођењем агенса; е) са истосмерним и супротносмерним током агенса према потреби.



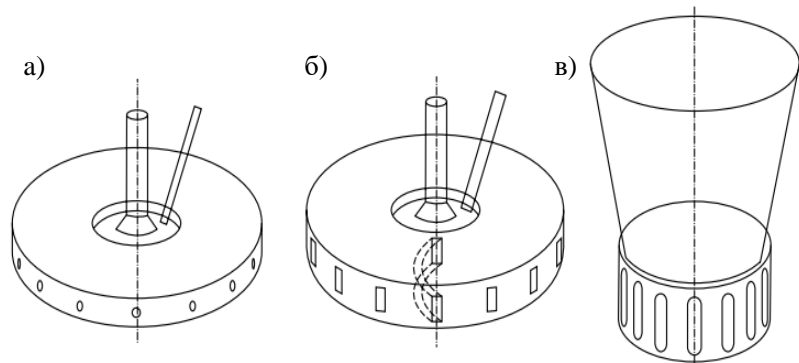
Слика 6.46: Шема функционисања сушаре са распршивањем материјала ротирајућим дисковима.

а) са равномерним довођењем агенса непосредно изнад диска и истосмерним струјањем; б) са равномерним довођењем агенса непосредно изнад диска и рецикулацијом агенса; в) са централним довођењем агенса и радијалним одвођењем агенса по ободу коморе; г) са равномерним довођењем агенса и централним одвођењем; д) са централним довођењем агенса и централним одвођењем.

облика, али за које је регулација нешто сложенија. Млазнице су малих димензије, те често долази до њиховог зачепљења током рада, нарочито при распршивању суспензија. Овакав начин распршивања се примењује код добијања прашкова чије су честице величине $120 \div 300 \mu\text{m}$. Индустрijски системи са механичким млазницама поседују више млазница како би се увећао капацитет сушења (Слика 6.45).

- *Распршивање њеуматjским млазницама* или *њеуматjско распршивање* изводи се помоћу компримованог ваздуха ($5 \div 6 \text{ bar}$), воденом паром ($4 \div 6 \text{ bar}$) или инертним гасом (само у затвореним системима). За распршивање 1 kg течног материјала приближно је потребно око $0,5 \text{ m}^3$ компримованог агенса. У млазницама долази до унутрашњег или спољашњег мешања носиоца и материјала, услед повећаног трења између агенса и течности. Капацитет млазнице најчешће не прелази 1000 kg/h течности. На квалитет распршивања утичу површински напон, густина и вискозност течног материјала.
- *Распршивање ротирајућим дисковима* изводи се кроз посебну разводну кутију или перфорирану цев која се налази на благом надпритиску (Слика 6.46), при чему се материјал доводи на брзоротирајући диск и на тај начин центрифугално распршује у хоризонталној равни (Слика 6.47). За рад овог система нису потребни високи притисци као што је то случај са претходна два начина. Дисперзност раствореног материјала зависи од периферне брзине ротације диска и физичких својстава раствора који се распршује. Главне предности распршивања помоћу диска су већи капацитет прскања, могућност прскања грубих суспензија, распршивање вискознијих раствора и течних паста.

Правац струјања и уједначеност поља брзине агенса по целом попречном пресеку коморе утичу на квалитет финалног производа. Дистрибиција агенса мора бити таква да спре-



Слика 6.47: Различити изгледи дискова за распршивање [84]:

а) са кружним радијалним отворима, б) са правоугаоним закривљеним отворима, и в) са овалним обликом.

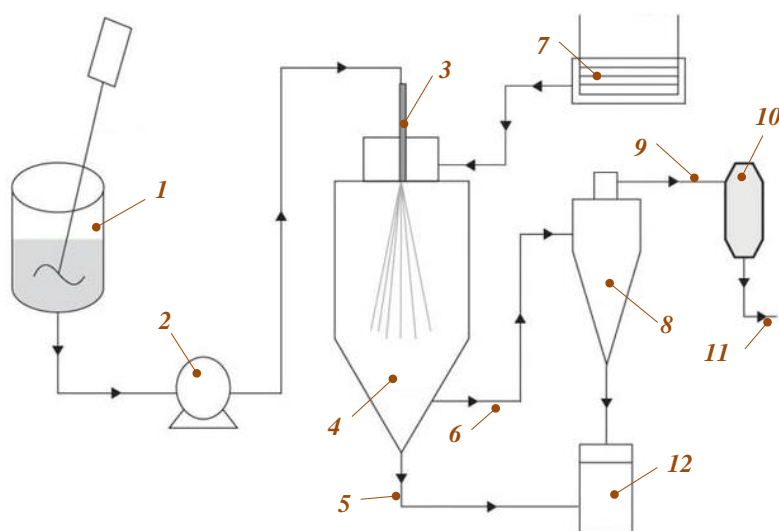
чи локално прегревање материјала и обезбеди да се честице осуше пре него стигну до зида коморе. Температура зидова коморе мора бити нижа од температуре тачке топљења материјала како би се спречило да се материјал испече. У зависности од технолошког захтева, сушење се може изводити *испосмерним*, *сујројносмерним* и *мешовитим* међусобним кретањем материјала и агенса.

Испосмерно кретање материјала јавља се када се капљице у комори крећу у истом смеру у коме струји агенс. Овакав начин кретања обезбеђује интензивнији режим сушења, чак и при нижим температурама агенса, и примењује се код већине сушара. Оваква могућност погодује сушењу материјала осетљивих на излагање повишеним температурама. Температура праха на излазу из коморе је нижа од температуре отпадног агенса. *Сујројносмерно* кретање материјала постиже се када се капљице течности крећу супротно смеру струјања агенса, и ретко се користи, првенствено због мале ефикасности у преношењу топлоте између агенса и материјала. *Супротносмерно* кретање се примењује уколико су материјали осетљиви на повишену температуру или имају велику запреминску густину. Температура праха на излазу из коморе је већа од температуре отпадног агенса. *Мешовито* кретање материјала представља комбинацију претходна два случаја и примењује се у случајевима када је потребно повећати време задржавања материјала у зони сушења, односно када је величина коморе ограничена. Овакав начин кретања материјала и агенса у комори економичан је код сушења материјала који у осушеном облику (прах) могу бити изложени повишеним температурама.

Примена методе сушења са распршивањем материјала ори-

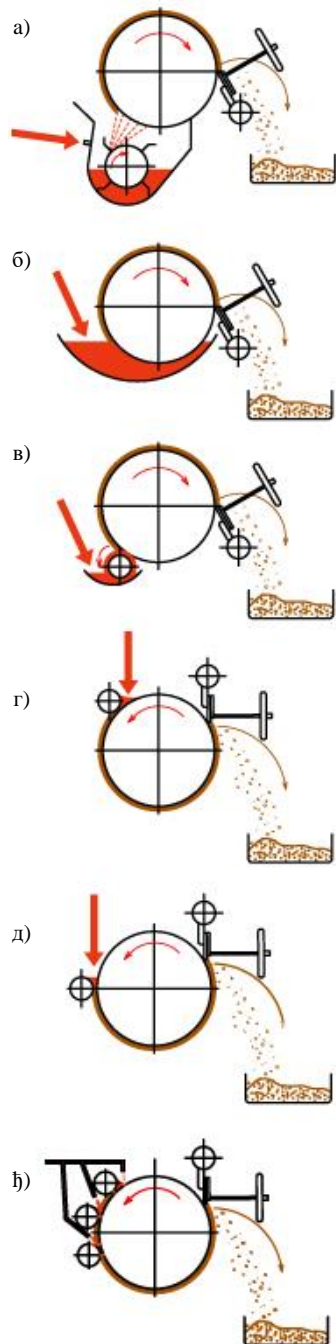


Слика 6.48: Илустрација спреј сушаре. [95]



Слика 6.49: Шематски приказ инсталације за сушење са распршивањем материјала [96]:

1 - резервоар за течни материјал, 2 - пумпа, 3 - млазница, 4 - комора, 5 - излаз осушеног материјала, 6 - излаз ваздуха, 7 - грејач ваздуха, 8 - циклонски сепаратор, 9 - отпадни ваздух који у себи садржи још увек ситне честице материјала, 10 - филтер, 11 - отпадни ваздух, и 12 - простор за складиштење осушеног материјала.



Слика 6.50: Шема функционисања добошасте сушаре са једним добошем. [97]

Наношење материјала на добош изводи се: а) прскањем, б) урањањем добоша, в) урањањем добоша са ваљком, г) ваљком на врху, д) бочним ваљком, и е) помоћу више ваљака.

јентисана је претежно на сушење течних намирница са релативно великим садржајем суве материје (Слика 6.48). Код сушења воћа и поврћа ограничена је на сушење воћних ђусева, пулпе и пасти које се могу распршивати уз додатак адитива. Посебна пажња код ових система посвећује се операцијама после сушења, као што су манипулација прахом и паковање. Овом методом могу се сушити парадајз, банана, и у ограниченој мери цитрусно воће, брескве и кајсије. Пулпа парадајза је пример материјала којег је веома тешко распршивати због своје лепљивости. Овом методом успешно се суше млеко, јаја, кафа, чај, ензими и млечни протеини.

6.9 Добошаста сушара

Добошаста сушара спада у групу контактних сушара и ради на принципу индиректног кондуктивног загревања материјала кроз чврст зид добоша који ротира ($2\div 30$ о/min) око хоризонталне осе. Течни или пастасти материјал се разлива у танком слоју ($0,5\div 2$ mm) по спољашњој површи цилиндра добоша ($100\div 155^\circ\text{C}$) при чему се угао обухватања материјала креће од $\angle 245\div 280^\circ$. Цилиндар (пречника $0,5\div 6$ m, дужине $1\div 6$ m) се загрева са унутрашње стране прегрејаном воденом паром или неким другим медијумом. На крају процеса се материјал уклања са добоша посебним компонентама - стругачима.

Сушење материјала у добошастој сушари је континуално и веома уједначеног квалитета. Време сушења је кратко, што погодује сушењу материјала који су осетљиви на повишене температуре. Овом методом могу се сушити прерађевине од воћа и поврћа, паста од парадајза, производи који садрже квасац, кромпир пире и слично. Материјали који су осетљиви на повишене температуре могу се сушити у вакуумским добош сушарама.

Добошасте сушаре могу бити у изведби са *једним или два добоша*.

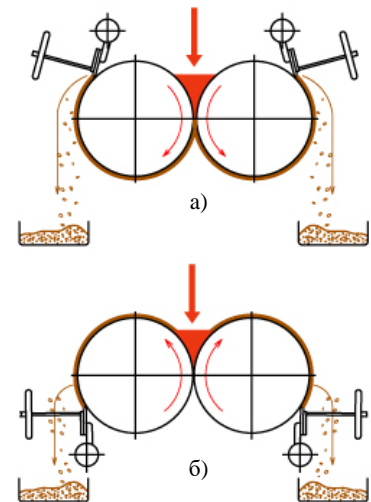
Добошаста сушара са једним добошем може бити са више начина наношења материјала (Слика 6.50): прскањем на добош, урањањем добоша или помоћу ваљака. Прскање се изводи посебним уређајем који захвата материјал из резервоара и наноси по спољној површини добоша. Дебљина нанетог слоја зависи од режима рада уређаја за прскање. Код наношења материјала урањањем добоша, добош је при ротацији потопљен у резервоар. Дебљина слоја је у овом случају

регулисана брзином окретања бубња или уградњом механичких додатака који ће уклањати вишак материјала са добоша. Наношење материјала једним или више ваљака представља најпрецизнији начин наношења. Материјал се допрема у простор између ваљка и добоша, а дебљина слоја се регулише размаком између ваљка и добоша.

Добошаста сушара са два добоша контролише дебљину слоја материјала размаком између добоша који се може подешавати и током рајања процеса. У зависности од смера ротације добоша зависи и начин разливања материјала по површима добоша (Слика 6.51). Добоши ротирају синхронизовано и без проклизавања. Један смер ротације подразумева провлачење материјала на доле између ваљака, док други подразумева навлачење материјала на горњу страну добоша. Наношење материјала на добоше се изводи на сличан начин како и код сушаре са једним добошем. Примена ваљака за наношење материјала могућа је код оба поменутог смера ротације добоша, и погодује при наношењу вискозних и лепљивих материјала. Коришћење више ваљака доприноси повећању дебљине слоја, а тиме и капацитету сушаре. Брзина ротирања ваљака не мора бити иста као и брзина ротације добоша. Код ротације добоша на горе, простор између два добоша може се користити за наливање материјала (млеко и сурутка), а оваквим начином се постиже веома униформна дистрибуција материјала по површи ваљака. За разлику од сушара са једним ваљком, потапање ваљака се, као начин наношења материјала на добоше, не користи тако често у сушарама са два добоша. Са друге стране, наношење материјала прскањем се често примењује, нарочито код материјала који се брзо таложе. Имајући у виду све претходно речено може се закључити да је избор начина наношења материјала на добоше веома битна одлука у процесу пројектовања овог система (Слика 6.53).

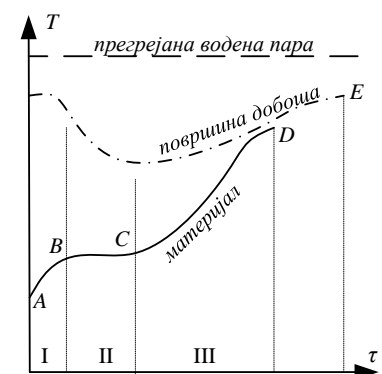
Током процеса сушења у добошастој сушари кроз добош струји прегрејана водена пара. Топлота се од паре проводи кроз зид добоша и предаје нанетом материјалу. У току процеса сушења материјал пролази кроз три катактеристична периода (Слика 6.52):

1. *Период њочейног загревања* материјала (А-В) почиње непосредно након наношења материјала у танком слоју на површину добоша (А и Е). Период почетног загревања одликује се интензивним преношењем топлоте са површине добоша на слој насутог материјала, услед велике температурне разлике на почетку процеса. Температура производа се брзо повећава до температуре на којој ће слободна влага у материјалу почети да кључа.



Слика 6.51: Шема функционисања добошасте сушаре са два добоша у зависности од смера ротације добоша. [97]

Наношење материјала на добош изводи се: а) на доле, провлачењем материјала између добоша, б) на горе, навлачењем материјала на горњу страну добоша.



Слика 6.52: Дијаграм промене температуре материјала и површине добоша током једног окрета добоша за сушење у три периода сушења.

А - тренутак наношења материјала на добош, В - почетак другог периода, С - почетак трећег периода, Д - крај процеса сушења и уклањање материјала са добоша, Е - наношење новог слоја материјала.



Слика 6.53: Илустрација добошасте сушаре са два добоша. [98]



Слика 6.54: Илустрација скидања/стругања материјала са добоша сушаре. [99]



Слика 6.55: Илустрација постављеног материјала у лиофилизационој сушари.



Слика 6.56: Илустрација лиофилизационе сушаре са кондензатором. [100]

2. *Период константне температуре* материјала (B-C) следи након достизања температуре кључања слободне воде. Током овог периода испарава велика количина воде, док се температура материјала не мења. Међутим, температура површине добоша се током овог периода смањује услед интензивног хлађења.
3. *Период повећања температуре* материјала (C-D) наступа после уклањања већине слободне воде испаравањем. Топлота која долази са површине добоша премашује количину топлоте потребну за испаравање преостале влаге, те температура материјала постепено почиње да расте. На процес сушења већи утицај почиње да има везана влага. Температура материјала ће се у наставку процеса сушења повећавати све до тренутка (D) када ће га нож стругача уклонити са површине добоша (Слика 6.54).

Неке од предности сушења у добошастим сушарама су: задржавање добре порозности материјала што утиче касније на његову рехидратацију; могућност сушења веома вискозних материјала, као што су пасте, желатинасте масе, куване намирнице, и слично; енергетски ефикасно сушење; једноставно руковање и чишћење; променљив и прилагодљив капацитет сушења величини сушаре.

Непогодности које се јављају приликом сушења овом методом су: деликатан поступак успостављања равнотеже између брзине насипања материјала, дебљине насутог слоја и температуре добоша; задржавање некондензибилних гасова у добошу које утиче на варијације температуре дуж добоша и уједначеност сушења; немогућност формирања танког слоја/филма код неких материјала; отежано стругање материјала са повишеним садржајем шећера; велика цена ремонта добоша због прецизног налагања и малих толеранција; немогућност сушења сланих и других корозивних материјала због хабања добоша.

6.10 Леофилизациона сушара

Леофилизациона сушара базира свој рад на дехидратацији залеђеног материјала сублимацијом леда (Слика 3.1). Леофилизација је технички назив за „сушење замрзавањем”. Процес леофилизације започиње постављањем залеђеног материјала у вакуумску комору (Слика 6.55). У индустријским леофилизационим сушарама постоји могућност да се у комору унесе и замрзне свеж материјал, док у мањим сушарама

често нема опције замрзавања у самој комори, већ се материјал негде претходно замрзава и замрзнут унесе у комору. Комора се потом вакумира, односно, притисак у комори се смањује до вредности које омогућују сублимацију формираних кристала леда, односно вредности мањих од тројне тачке воде ($p_{TT} = 611,2 \text{ Pa}$ и $t_{TT} = 0,01^\circ\text{C}$). Сублимација је директан прелазак воде из чврстог у гасовито стање без топљења. Влага која напусти материјал у гасовитом стању, хвата се у виду иња на испаривачима унутар коморе, одакле ће се касније кондензовати и избацити из система (Слика 6.56).

Процес лиофилизације се састоји из три карактеристична процеса (Слика 3.2): *замрзавање*, *сублимација* и *десорпција*.

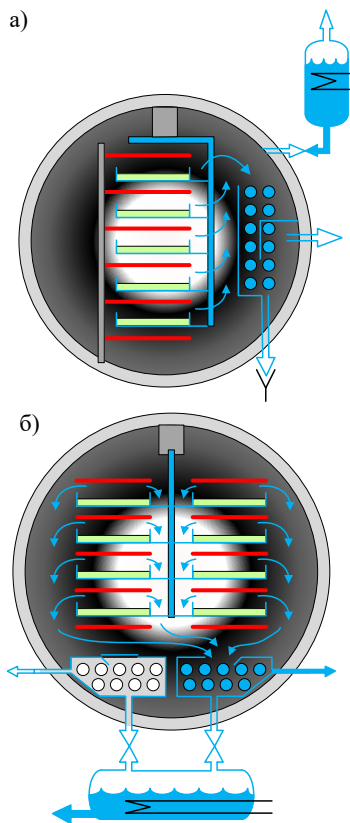
Замрзавање је операција која се мора извести брзо, како би материјал формирао веома мале кристале леда и задржао аморфно стање. Температура замрзавања ($<-10^\circ\text{C}$) чисте воде остаје константна све док се и последња капљица течности не заледи. Међутим, у случају замрзавања намирница, ова температура је нижа због примеса у води. Температура и време замрзавања намирница су функција растворених материја у води коју садрже. Пошто растворене супстанце постају више концентрисане у незалеђеном делу мешавине, температура тачке замрзавања се континуирано смањује све док се сав раствор не заледи. На крају процеса замрзавања, цела маса постаје крута и састоји се од кристала леда и компоненти намирнице. Током процеса замрзавања тежи се постизању еутектичког¹ стања материјала. Еутектичко стање омогућава уклањање воде само сублимацијом, а не комбинацијом сублимације и испаравања. Неадекватно замрзавање може довести до топљења материјала и тиме омогућити стварање пенастих и гумених структура у финалном производу. На пропустљивост смрзнутог површинског слоја може утицати кретање растворљивих компоненти током процеса замрзавања. Међутим, уклањање танког површинског слоја замрзнутог производа или замрзавање под условима који поспешују одвајање концентрисане чврсте материје, доприносе постизању веће брзине сушења.

Примарни процес сушења се изводи *процесом сублимације*, када у вакууму из материјала сублимира слободна влага. Сублимација се дешава брзо и за собом оставља порозније слојеве материјала. Кондензација воде која је сублимирала у гасовито стање, јавља се на хладној површини испаривача постављеном у кондензационој комори. Кондензована влага веома брзо постаје иње на површини испаривача. Покретачка сила за сублимацију је у суштини разлика у притиску између

1: *Еутектичка тачка* је тачка у којој течна фаза прелази директно у чврсту фазу, што представља минималну температуру топљења за било коју могућу смешу. Температура, која одговара овој тачки, назива се *еутектичка температура*.

Табела 6.2: Вредности топлотних проводљивост (λ), температура сублимације (t_{sub}) и коефицијента пермеабилности (k) неких лиофилизованих намирница. [101]

Материјал	$\lambda, \text{ W}/(\text{mK})$
Говедина	0,035÷0,038
Печурке	0,010
Бресква	0,016
Јабука	0,016÷0,035
Екстракт кафе 25%	0,033
Млеко	0,022
Желатин	0,016
Туретина	0,014
Материјал	$t_{sub}, ^\circ\text{C}$
Пилетина	-21
Шкампи	-18
Лосос	-29
Говедина	-14
Цело јаје	-17
Јабука	-7
Кафа	-23
Шаргарепа	-25
Материјал	$k, \frac{10^{-9} \cdot \text{Kg}}{\text{m} \cdot \text{s} \cdot \mu\text{mHg}}$
Млеко	2,7÷5,3
Јабука	3,3÷6,0
Шаргарепа	2,0÷5,6
Кромпир	1,3
Банана	1,1
Говедина	0,7÷4,4
Кафа 20% с.м.	4,0÷8,6
Кафа 30% с.м.	3,0
Риба	8,7



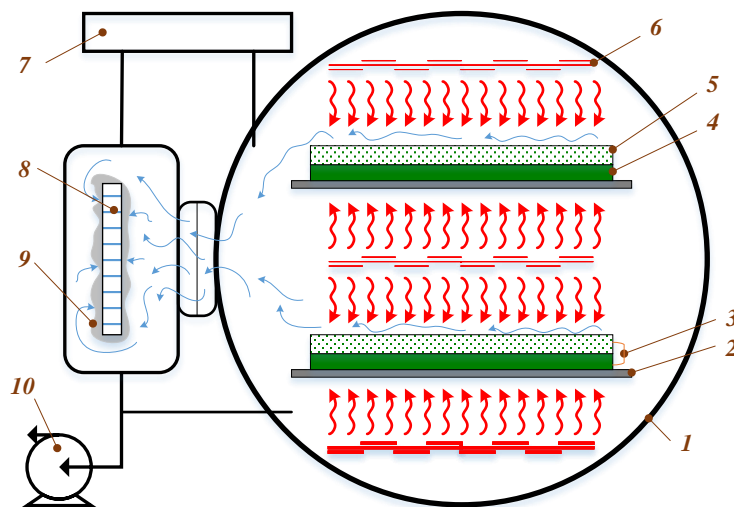
Слика 6.57: Шема функционисања кондензационих елемената лиофилизационе сушаре: а) периодична кондензација подразумева испирање накупљеног леда у кондензационој комори топлом водом на крају сваког процеса сушења, б) континуална кондензација подразумева стално уклањање накупљеног леда, најчешће помоћу 2 кондензационе коморе које се наизменично смењују у раду, док једна акумулира лед друга се испира.

парцијалног притиска сублимиране водене паре и парцијалног притиска водене паре у комори за сушење. Топлота која се током сублимације доводи материјалу назива се латентна топлоте сублимације (2840 kJ/kg леда). Током процеса сублимације материјал се загрева најчешће кондукцијом, радијацијом или микроталасно. Примарним процесом сушења уклања се око 95% воде присутне у материјалу.

Секундарним процесом сушења - *десорпцијом*, из материјала се уклања везана влага, од које је већи део незалеђен (течан). Секундарни процес почиње када више нема леда (формираних из слободне воде) у производу и када влага долази из делимично везане воде материјала. Током сушења материјал минимално мења своју запремину зато што чврсто стање воде штити структуру материјала од деформације. Везана вода се уклања загревањем материјала у вакууму, и то до температуре $10 \div 35^\circ\text{C}$ за материјале осетљиве на излагање повишеним температурама, или до 50°C за оне који нису осетљиви. Током овог процеса брзина загревања мора да се успори како би се одржала температура производа испод $30 \div 50^\circ\text{C}$, чиме се спречава колапс материјала. Ако чврст скелет материјала постане превише врућ, њена структура ће се урушавати, што ће умањити брзину сублимације са фронта леда унутар производа. Време трајања секундарног процеса сушења може износити до трећине укупног времена сушења да би се уклонила влага са унутрашњих површи пора осушеног производа.

Посматрано са енергетског аспекта, лиофилизационо сушење се састоји из четири главне операције: *замрзавање*, *вакуумирање*, *сублимација* и *кондензација*. Сублимација обухвата око 45% укупне енергије свих операција, док вакуумирање и кондензација представљају по око 25% укупне потрошње

Слика 6.58: Шема функционисања лиофилизационе сушаре са кондензационом комором. [102] 1 - комора, 2 - лед, 3 - замрзнути материјал, 4 - замрзнути слој материјала, 5 - сув слој материјала, 6 - извор топлоте зрачењем, 7 - расхладни уређај, 8 - испаривач унутар кондензационе коморе, 9 - ине, 10 - вакуум пумпа.



енергије. Главни недостатак сушења лиофилизацијом је велика цена, због велике потрошње енергије и високих трошкова за рад и одржавање. Енергија потребна за сушење лиофилизацијом је скоро двоструко већа од оне потребне за конвенционално сушење на ваздуху.

Индустријске лиофилизационе сушаре могу се пронаћи у неколико изведби:

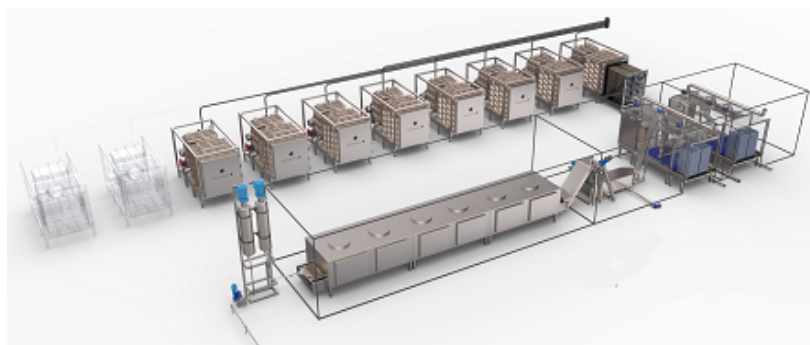
1. *Лиофилизационе сушаре са лесема и фармацевтски лиофилизатори* одликују се шаржним сушењем материјала, а разликују се у зависности од начина кондензовања сублимиране влаге. Код лиофилизатора са лесема (Слика 6.59), кондензациона опрема је у истој комори где су и лесе са материјалом и постављена је уз лесе (Слика 6.57а). Код фармацевтских лиофилизатора кондензационе коморе су одвојене од коморе за сушење (Слика 6.58) због постизања бољих услова стерилности процеса и међусобно спојене каналом или цевоводом који поседује зауставну клапну или вентил (Слика 6.60).
2. *Вишекоморне лиофилизационе сушаре* су повезане на централни систем и могу радити истовремено или засебно, или са делимичним преклапањем појединачних процеса (Слика 6.61). Овакав систем пружа флексибилност у раду и већу могућност искоришћења система. Процес сушења се индивидуално контролише за сваку комору засебно са посебног контролног панела. Повећање учинка је видно боље чак и код најједноставнијих система са само две коморе. Велики број индустријских постројења ради у оваквој изведби.
3. *Тунелске лиофилизационе сушаре* поседују велике коморе у којима се вагони/ колица крећу као и у класичним тунелским сушарама. На крајевима тунела се налазе посебне вакуумске предкоморе којима се притисак приликом уласка/ изласка колица доводи на атмосферски.
4. *Лиофилизационе сушаре са распршивањем материјала* својом конструкцијом подсећају на класичне спреј сушаре. Течност се распршује у струју хладног агенса чи-



Слика 6.59: Илустрација лиофилизационе сушаре са лесема. [103]



Слика 6.60: Илустрација фармацевтске лиофилизационе сушаре са издвојеном комором за кондензацију и прикључном рампом за посуде које ће се вакуумирати. [104]



Слика 6.61: Илустрација вишекоморног система за лиофилизационо сушење. [105]



Слика 6.62: Илустрација узорака лиофилизоване јагоде.



Слика 6.63: Илустрација прашкова и пудера добијених лиофилизирањем воћа и поврћа.

ме се дешава поступак евапоративног замрзавања. Потом се дешава поступак вакуумског сушења у вакуумској комори, током којег материјал пада на дно коморе у облику осушеног праха.

5. *Континуалне лиофилизационе сушаре* раде са континуалним протоком материјала током процеса сушења. Материјал се кроз ове сушаре креће помоћу различитих транспортера (најчешће тракастих) или се транспортује у расутом стању (флуидизован слој или пнеуматски транспорт). Кондензација влаге се изводи континуално (Слика 6.576).

Намирнице се углавном веома добро суше лиофилизацијом, али овакав поступак није баш погодан за сваку намирницу. Лиофилизација се обично користи за кафу, воће (Слика 6.62), сокове, поврће, зачинско биље, ароме за храну, рибу, морске плодове, јаја и млечне производе (Табела 6.2). Такође, могу се сушити јела са више састојака, као што су чорбе или супе. Намирнице веће величине (као што је воће или месо) треба исећи на мање комаде пре сушења. Месо и морски плодови захтевају кување пре лиофилизирања.

Лиофилизиран материјал обично садржи између 1% и 4% воде, а након сушења финални производ се затвара азотом и пакује у полиетиленске кесе или лименке. Може се чувати између 6 месеци и 3 године у полиетиленским врећама и 25 година или дуже у лименкама. Лиофилизиране намирнице имају супериорни квалитет у поређењу са намирницама деhidрираним другим методама. Процес сушења се дешава без присуства ваздуха и на ниским температурама, што спречава оксидацију и хемијску модификацију материјала. Сушење се дешава на температурама нижим од амбијенталних температура, што погодује сушењу материјала који су осетљиви на излагање повишеним температурама због промене структуре, текстуре, изгледа, укуса и сличног. Висок квалитет постиже се због одсуства течне фазе воде, као и због ниске температуре процеса. Намирница чува укус, боју и изглед, а минимизира термичко оштећење хранљивих материја осетљивих на топлоту. Поред тога, текстура је добро очувана због процеса који се одвија у чврстом стању. Лиофилизирани производи су обично хрскавији и имају однос рехидратације четири до шест пута већи од конвенционалне хране сушене на ваздуху. Друге кључне предности сушења лиофилизацијом укључују очување испарљивих материја, задржавање структуре и површине, висок капацитет, дуг век трајања и смањену тежину за складиштење, транспорт и руковање (Слика 6.63).

6.11 Сушаре за осмотско сушење

У претходним поглављима је већ било речи о активности воде у намирницама и њеном утицају микробиолошку активност. Генерално је прихваћен концепт да је термодинамичко стање воде одговорно за стабилност намирнице и њену текстуру. Термодинамичко стање намирнице се описује активношћу воде ($0 < a_w < 1$), где се вредност 0 односи на потпуно сув материјал, а вредност 1 на чисту воду. Умањивање активности воде може се извршити на два начина: *додавањем хумектаната*² или *уклањањем воде*. Додавање хумектаната храни ограничено је променом нутритивног састава и токсиколошког састава намирнице. Уклањање воде је енергетски захтевније и скупле.

Осмотско сушење подразумева смањивање активности воде у намирницама поступком *осмозе* или *осмотске дехидратације*. Током осмотског третмана, површински слојеви намирнице натапају се осмоактивном супстанцом/ раствором. Ћелијски зидови намирнице се понашају као полупропустљиве мембране, које добро пропуштају ситне молекуле воде и истовремено лоше пропуштају крупније молекуле осмотског раствора. Вода напушта ћелију без промене фазе, крећући се услед термодинамичке неравнотеже величина стања са супротних страна мембране (притиска, температуре и концентрације). Притисак који је потребно савладати да се постигне равнотежно стање са обе стране мембране назива се *осмотски притисак*.³ Кретање кроз мембрану изазвано је разликом осмотских притисака са супротних страна мембране (Слика 6.64). Погонска сила за осмотску дехидратацију је концентрациони градијент успостављен на супротним странама мембране. Пошто је присутна концентрациона разлика, како воде, тако и растворених материја (растворка), јавља се обострана тежња за дифузијом кроз полупропустљиву ћелијску мембрану, те се током осмотске дехидратације истовремено дешавају два супротносмерна преношења масе: вода из потољеног ткива дифундује у околни раствор, док растворак из осмотског раствора продире у површинске слојеве намирнице. С обзиром да ћелијска мембрана није савршено селективна, током процеса се дешава и треће преношење масе које подразумева дифузију материје (шећера, киселина, минерала, витамина) из биљног ткива у околни раствор које, иако квантитативно занемарљиво, утиче на сензорске, нутритивне и функционалне карактеристике финалног производа (Слика 6.65).

На крају процеса осмотске дехидратације, активност воде у материјалу је умањена али недовољно да би се потпуно за-

2: *Хумектанти* су адитиви који се додају намирницама у току процеса производње или прераде. То су хигроскопне супстанце које се користе за регулисање влажности у намирницама, поседују малу влажност и везују влагу за себе, заустављајући на тај начин процес дехидратације. Хумектанти вежу воду за себе и самим тим је има мање на располагању за развој микроорганизама. Неки од најкоришћенијих хумектаната су глицерол, сорбитол, хијалуронска киселина, натријум лактат и мед.

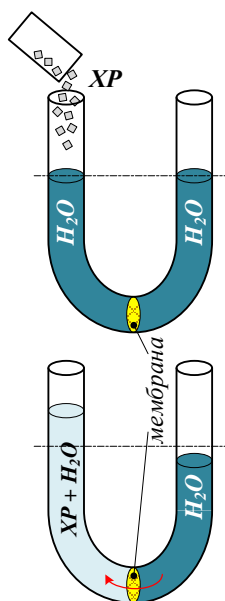
3: Сваки раствор на одређеној температури има одређен осмотски притисак. Када би се два раствора исте супстанце, али различите концентрације одвојила полупропустљивом мембраном, молекули воде ће кроз мембрану пролазити до изједначења концентрација. Та сила која их покреће назива се осмотски притисак и израчунава се на следећи начин:

$$p_{osm} = c_m \cdot R \cdot T$$

где су: p_{osm} - осмотски притисак у Па; c_m - моларна концентрација у mol/m³; $R=8,314$ J/(mol K) - универзална гасна константа; T - температура у К.

Мера ефективног градијента осмотског притиска назива се *шоничност*.

Хипертонични раствори имају већу концентрацију непропусних честица, тако да осмотски притисак има тенденцију да покреће воду (са друге стране мембране) ка хипертоничном раствору.



Слика 6.64: Илустрација изједначавања осмотских притисака у U-цеви са полупроустрљивом мембраном у дну цеви. (XP - хипертонични раствор)

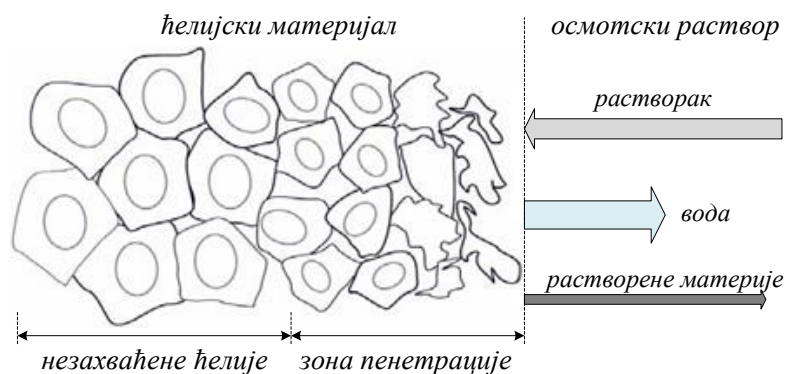
уоставила микробиолошка активност. Овим поступком се постиже само делимична конзервација намирнице. То значи да је њен век трајања продужен, али да она не може бити трајно сачувана, те је потребно додатно применити неки од поступака конзервације хране попут замрзавања, пастеризације и слично.

У најважније предности осмотског сушења у односу на друге третмане сушења убрајају се:

- ▶ очување и/или побољшање нутритивних (садржај минерала, витамина и сл.) и сензорских карактеристика (боја, укус и текстура) третираног материјала;
- ▶ побољшање одрживости осмотски дехидрираних производа – смањење активности воде повећава микробиолошку стабилност и успорава биохемијске реакције које узрокују кварење намирница;
- ▶ током осмотског третмана материјал је константно потопљен у осмотски раствор тако да биљно ткиво није изложено дејству кисеоника, па није потребна заштита од оксидативних и ензиматских промена;
- ▶ смањењем садржаја воде редукује се маса и запремина производа чиме се умањују трошкови транспорта, паковања и складиштења;
- ▶ енергетски оправдан поступак – уклањање воде се одвија без фазне промене и процес се одвија на нижим температурама, што умањује трошкове енергената;
- ▶ еколошки прихватљив поступак – уколико се правилно управља заосталим раствором нема споредних, нити отпадних продуката након процеса.

Недостатак процеса осмотског сушења првенствено се огледа у великим количинама осмотског раствора заосталог након процеса, што зна представљати еколошки проблем са једне стране и смањење исплативост процеса са друге стране.

Осмотски раствор у највећој мери утиче на преношење масе током третмана, одређујући на тај начин финалне особине и



Слика 6.65: Преношење масе кроз ткиво намирнице током осмотског сушења. [106]

квалитет осушеног материјала. Који ће се осмотски раствор користити зависи од жељеног губитка воде, прираштаја суве материје, текстуре и органолептичких особина финалног производа (Табела 6.3). Раствори шећера (сахарозе, глукозе, фруктозе и кукурузни сируп) најчешће се користе за осмотску дехидратацију воћа, док се раствори соли (NaCl и CaCl_2) користе за дехидратацију поврћа, меса и рибе. Користе се и други осмотски раствори, као што су лактоза, малтодекстрин, етанол, глукоза и глицерин. Да би процес осмотског сушења био економичнији често се и споредни производи из других технологија користе као хипертонични раствори (нпр. сурутка за дехидратацију паприке, меласа шећерне репе за воће, поврће и месо, итд.). Да би се избегло значајније разблажавање осмотског раствора услед издвајања воде из материјала, које утиче на смањење погонске силе за дехидратацију, веома често се користе велики односи раствор/материјал (10:1, 20:1 или 30:1).

Квалитет осмотски осушене намирнице зависи од пуно фактора. Са једне стране, то су карактеристике свежег материјала (зрелост, величина, облик), а са друге параметри процеса сушења (температура процеса, врста и концентрација осмотског раствора и време трајања процеса).

Табела 6.3: Неки материјали са начинима осмотских третмана.[106, 107]

Намирница	Осмотски третман	Опис
Јабука	Сахароза 50,60,70°Brix; 30,40,50°C; 1÷5 h; 4:1 Сахароза 70°Brix; 30°C Сахароза 60°Brix; 23°C Сахароза 60°Brix; 30°C	ољуштено 2×1 cm дебели дискови 3÷4 mm дебели комади 2×2 cm дебели дискови
Ананас	Сахароза 50,60,70°Brix; 30,40,50°C; 1÷5 h; 4:1	ољуштено
Банана	Сахароза 40,50,60,70°Brix; 25÷45°C; 1 h; 20:1	ољуштен, колутови пречника 25 mm, де- бљина 45 mm
Бресква	50% кукурузни сируп/ Сахароза 70°Brix; 25°C	2 cm дебљина
Трешња	50% кукурузни сируп/ Сахароза 70°Brix; 25°C	1,8 cm дебљина
Кајсија	Сахароза 70°Brix; 25°C Фруктоза + Глукоза + Сахароза 65,2°Brix; 25°C	1 cm дебеле половине 1 cm дебеле половине
Диња	Сахароза 45,55°Brix; 40,50°C; 1÷2 h; 20:1	очишћена, избушена
Кестен	Глукоза 40,50,56,6°Brix; 25,35,45°C; 8 h; 10:1	ољуштен
Крушка	Сахароза 55°Brix; 40°C; 2h;	1 cm коцкице
Парадајз Чери	10,25% NaCl; NaCl-Сахароза (3:2); 25°C; 0,5÷3h; 10:1	покорица перфорирана иглама
Печурка	10,15% NaCl; 20,45°C; 10,30,50,70,110 min; 5:1	половине
Говеђе месо	150 mM CaCl ₂ ; 0°C; 3 h; 2:1	без масноћа
Бакалар	NaCl раствор; 25°C; 23,47 h;	филети



Слика 6.66: Илустрација осмотске сушаре са отвореним кадама.[108]

Са повећањем димензије комадића материјала интензитет осмотског сушења опада. Уобичајени облици узорака материјала који се осмотски суше су цилиндри, коцке, дискови, прстенови, сфере итд. Примена третмана као што су бланширање, смрзавање, сулфатација или кишелење сировине пре осмотске дехидратације, може се негативно одразити на квалитет осмотски дехидрираног производа. Процес уклањања воде најитезивнији у току првог сата осмотске дехидратације, а након трећег сата постепено успорава. Постизање равнотежног стања у процесу осмотског сушења постиже се одприлике након 20 h, али се интензитет преношења масе битно не мења након 4 h процеса. Највећа брзина сушења се јавља на почетку процеса, а након постизања структурне и хемијске равнотеже, маса и запремина се поново повећавају и долази

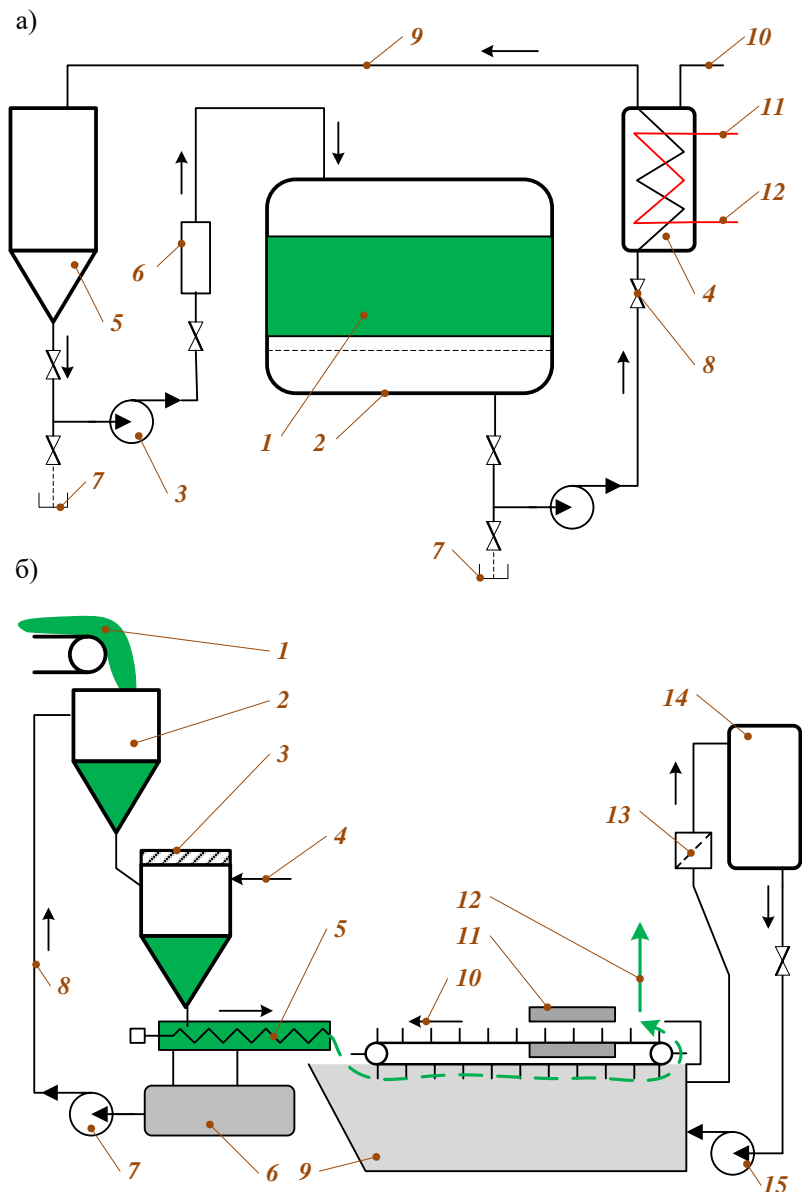
Слика 6.67: Шема функционисања система за осмотско сушење материјала. [75]

а) периодично сушење

(1 - материјал, 2 - комора за осмотску дехидратацију, 3 - циркулациона пумпа, 4 - размењивач топлоте, 5 - резервоар за осмотски раствор, 6 - ротаметар, 7 - дренажа, 8 - вентил, 9 - цевовод за осмотски раствор, 10 - водена пара, 11 - излаз прегрејане паре, 12 - улаз прегрејане паре);

б) континуално сушење

(1 - материјал, 2 - резервоар за мешање материјала и осмотског раствора, 3 - резервоар под притиском, 4 - довод ваздуха, 5 - пужни транспортер, 6 - резервоар за осмотски раствор, 7 - пумпа, 8 - цевовод за осмотски раствор, 9 - када за потапање материјала, 10 - тракасти транспортер, 11 - опрема за испирање тракастог транспортера, 12 - излаз материјала, 13 - филтер, 14 - вертикални размењивач топлоте за концентрисање раствора, 15 - пумпа).



до упијања воде (Слика 6.68). Температура осмотског раствора је параметар процеса који највише утиче на кинетику преношења масе током осмотског третмана. Више температуре смањују вискозност осмотског раствора и тиме убрзавају издвајање воде кроз ћелијске мембране, убрзавају дифузију воде унутар биљног ткива и обезбеђују бољи пренос масе на површини третираног материјала. Ако температура достигне своју критичну вредност, ћелијска мембрана почиње да губи своју пермеабилну функцију.

Систем за периодично сушење осмотском дехидратацијом материјала (Слика 6.67а) састоји се од резервоара у коме се припрема осмотски раствор, циркулационе пумпе и протокомера, како би се контролисао масени проток осмотског раствора кроз комору са материјалом. Материјал је смештен у кади кроз коју осмотски раствор пролази са константним протоком (Слика 6.66). Искоришћени осмотски раствор се посебном циркулационом пумпом тера да струји кроз размењивач топлоте у коме се загрева прегрејаном воденом паром и поново концентрише и враћа у резервоар. Сличан концепт примењен је и на индустријском систему за континуално осмотско сушење материјала (Слика 6.67б), где се материјал у неколико фаза на различите начине меша са осмотским раствором.

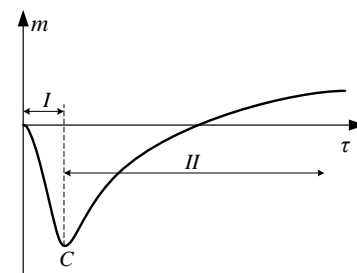
Избор компонената система за осмотско сушење изводи се на основу неколико критеријума:

- ▶ према примењеном принципу сушења: периодично или континуално,
- ▶ на основу отпорности намирнице да трпи одређено механичко оштећивање,
- ▶ према облику материјала који се третира: цео плод или сечен на комаде,
- ▶ на основу понашања намирнице у контакту са ваздухом,
- ▶ према начину кретања чврстих и течних материја,
- ▶ у складу са могућношћу контроле параметара процеса,
- ▶ према величини инвестиционих и оперативних трошкови сушења.

Три основна начина осмотског сушења подразумевају:

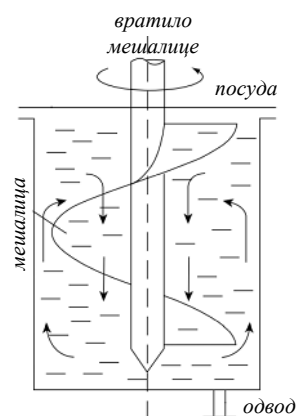
1. *пошајање* материјала у осмотски раствор,
2. *прскање* осмотског раствора по материјалу и
3. примену *чврстих осмотских сушанаца*.

Пошајање материјала у осмотски раствор је најједноставнији начин довођења материјала и раствора у контакт (Слика 6.69). Преношење масе је споро и већина параметара процеса

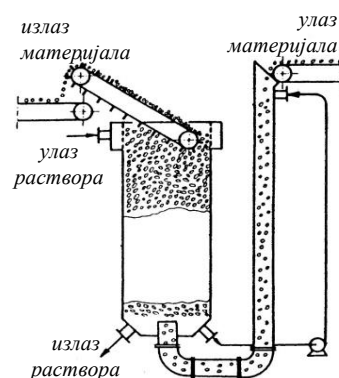


Слика 6.68: Промена масе материјала током дужег временског периода извођења процеса сушења.[106]

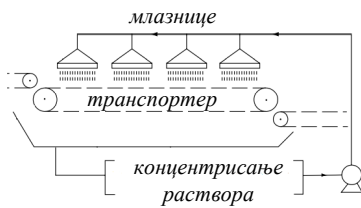
I - период сушења, II - период релаксације, C - тренутак када је постигнута структурна и хемијска равнотежа.



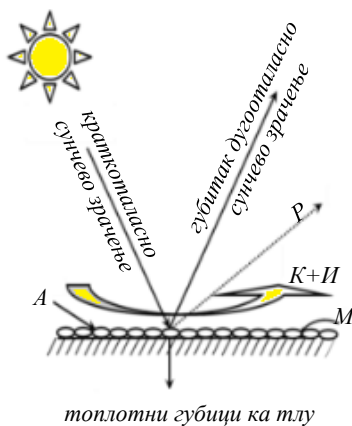
Слика 6.69: Илустрација осмотске сушаре са мешањем потопљеног материјала.[84]



Слика 6.70: Илустрација осмотске сушаре са супротносмерним кретањем материјала и осмотског раствора.[84]

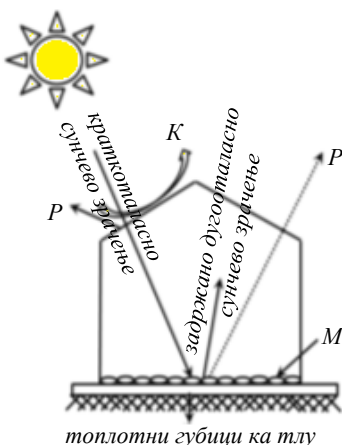


Слика 6.71: Илустрација осмотске сушаре са прскањем осмотског раствора по матријалу.[84]



Слика 6.72: Илустрација соларног сушења на директном сунцу. [109]

(А - апсорбовано зрачење, Р - рефлектовано зрачење, К - конвекција, И - испаравање, М - материјал.)



Слика 6.73: Илустрација соларног сушења у заштићеном простору. [109]

(Р - рефлектовано зрачење, К - конвекција, М - материјал.)

се не контролише. Однос количине раствора и материјала већи је у прилог раствора. Овакав начин се често примењује за осмотско сушење меког воћа. Кретање материјала у односу на раствор може се остварити или лаганом циркулацијом раствора (циркулациона пумпа) или спорим кретањем материјала (вибрационо или помоћу транспортера) (Слика 6.70).

Прскање осмотског раствора по материјалу изводи се тако што се комадићи материјала крећу по перфорираној покретној траци и успут се прскају осмотским раствором (Слика 6.71). Однос количине раствора и материјала већи је у прилог материјала. Овакав начин захтева да материјал буде расут по транспортеру у једном слоју како би равномерно био захваћен капљицама раствора током прскања. Непогодност овакве методе је потребна велика површина транспортера у случајевима већих капацитета сушења.

Најмањи однос количине раствора и материјала добија се када чврста осмотска супстанца долази у контакт са храном. Ово се изводи тако што се мешају кристали шећера или мешавина шећера и соли са комадима материјала у одговарајућој пропорцији и преврћу у споро ротирајућим цилиндричним резервоарима. Износ употребљене осмотске супстанце треба да буде такав да вода која је уклоњена из материјала не формира раствор у резервоару. На крају процеса сушења, влажна али чврста осмотска супстанца се одваја од хране на вибрирајућој подлози. Недостатак оваквог поступка је што се поједини кристали осмотске супстанце могу залепити за површину хране и пренети у паковање или даљу прераду материјала.

6.12 Соларна сушара

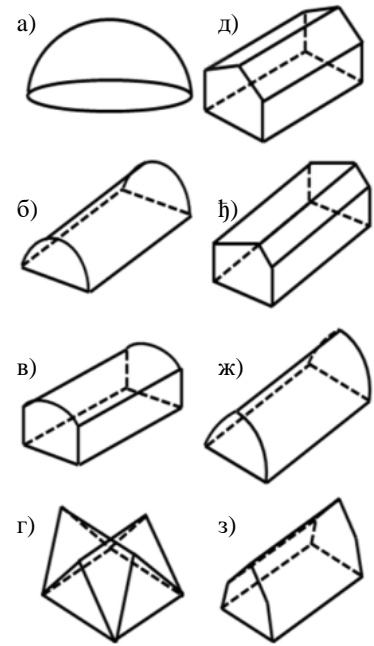
Соларно сушење је сушење коришћењем енергије приспеле са Сунца, односно енергије сунчевог зрачења или соларне енергије. Ово је једна од најстаријих метода сушења која је употребом нових материјала и ефикасних пријемника сунчевог зрачења доспела у групу савремених метода сушења, са тенденцијом постизања све веће енергетске ефикасности процеса. Соларна енергија је обновљив извор енергије који не може бити монополизован. Неке од предности соларног сушења су бесплатна енергија, незагађивање околине, обновљивост и слично. Међутим, соларно сушење има неколико недостатака који ограничавају његову примену у већем обиму. То су потреба за великим површинама простора и великим инпутима рада, потешкоће у контроли брзине сушења, и слично.

Упркос наведеном, соларно сушење је примаран начин сушења у земљама у развоју.

Најстарији и традиционалан начин сушења помоћу сунчеве енергије јесте директно излагање материјала сунчевом зрачењу (Слика 6.72), при чему се материјал најчешће распростире по тлу или поставља да виси у ваздуху. Сунчево зрачење које директно доспева на материјал, делимично се рефлектује и апсорбује. Апсорбовано зрачење и околни ваздух загревају материјал, а део топлоте се губи у околину конвекцијом и испаравањем влаге, односно предаје тлу. Материјал је често потребно оставити да се суши на Сунцу и више од 5-6 дана. Овакав начин сушења има велике губитке услед незаштићености материјала од прашине, прљавштине, инсекта и микроорганизама, штеточина и слично. Губици у материјалу услед наведених штетности могу износити и до 30%.

За разлику од традиционалног начина сушења, соларна сушара је систем који се најчешће састоји од следећих компонената:

- ▶ *Простор за сушење* је део система у коме се смешта материјал и где се дешава процес сушења. Простор у коме се налази материјал може се штитити одговарајућом прекривком која ће формирати заштићени простор око материјала (Слика 6.73). Под прекривком се подразумева омотач заштићеног простора који је најчешће израђен од транспарентног материјала (стакло, полиетилен, итд.) који би пропустио сунчево зрачење, а сам простор може бити разноврсних геометријских облика (Слика 6.74). Материјал се унутар заштићеног простора налази на лесама или столовима, а испарена влага се одводи природним или принудним проветравањем простора. Величина заштићеног простора може бити велика, налик на пластенике или стакленике (Слика 6.75), или мањих димензија, налик на регале или коморе.
- ▶ *Колектор или пријемник сунчевог зрачења* је компонента којом ће се прихватити енергија сунчевог зрачења и претворити у топлотну енергију радне материје (течност, гас, пара) која ће се користити у систему.
- ▶ *Допунски извор топлоте* (опционо) је компонента система којом ће се обезбедити неопходна количина топлоте у периоду када нема соларне енергије на располагању. Веома често се у пољопривредној производњи користе секундарне сировине (биомаса, биогорива, разне врсте отпада и остатака) чијим се сагоревањем обезбеђује ова допунска количина топлоте.
- ▶ *Размењивачи топлоте* су компоненте које ће топлоту пренети агенсу сушења (ваздуху) или материјалу.



Слика 6.74: Илустрација различитих облика омотача заштићеног простора [109]:

а) сферни, б) цилиндрична купола, в) комбинација цилиндричне куполе и вертикалних зидова, г) хиперболични параболоид, д) равна симетрична кров и вертикални зидови, е) равна асиметрична кров и вертикални зидови, ж) готски лук, з) мансардни кров.



Слика 6.75: Илустрација соларног сушења у заштићеном простору. [110]



Слика 6.76: Класификација различитих типова заштићених простора који се користе при соларном сушењу. [109]

- ▶ *Вентилатори* су компоненте за принудно струјање ваздуха који могу користити електричну енергију произведену из обновљивих или необновљивих извора енергије.
- ▶ *Акумулатори топлоте* (опционо) су компоненте система које акумулирају (складиште) топлоту у периоду када соларне енергије има довољно на располагању (чак и више) и чувају за касније коришћење у периодима када је нема довољно.
- ▶ Мерна и регулациона опрема (опционо).
- ▶ Канали, цевоводи и остала опрема.

Конструкција соларне сушаре прилагођена је количини, особинама и намени материјала који се суши, као и коришћеним изворима енергије (Слика 6.76). На основу коришћених извора енергије, соларне сушаре се могу класификовати у три групе:

1. *Потпуно соларне сушаре* користе сунчево зрачење као једини извор енергије. У оквиру ове групе разликујемо:
 - а) *Пасивне соларне сушаре* користе само сунчево зрачење за загревање материјала и природну циркулацију ваздуха која се јавља услед термодифузије ваздуха у сушари. Уобичајено је да у ову сушару свеж ваздух из околине доспева у нижим зонама сушаре кроз преструјне решетке (отворе), а отпадни ваздух избацује се из виших зона сушаре кроз отворе на крову или димњаке. Струјање ваздуха је потпуно природно, а може се успорити постављањем одговарајућих механичких клапни на отворе.
 - б) *Активне соларне сушаре* користе сунчево зрачење за загревање материјала и принудну циркулацију ваздуха у сушари која је остварена вентилатором који троши електричну енергију конвертовану из



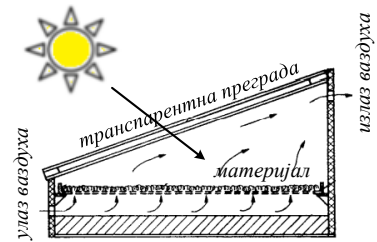
Слика 6.77: Илустрација различитих модела соларних кабинет сушара. [111]

сунчеве енергије помоћу фотонапонских соларних ћелија или малим ветрогенератором.

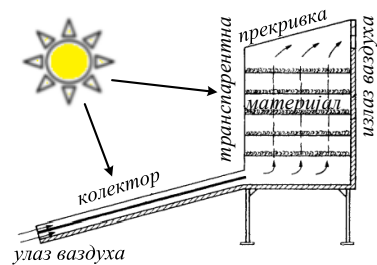
2. *Делимично соларне сушаре* користе сунчево зрачење као једини извор енергије за загревање агенса и материјала, док се принудно струјање остварује вентилатором који троши електричну енергију из конвенционалне електродистрибутивне мреже.
3. *Сушаре са њодришком соларног система* раде као конвенционалне сушаре које поред неког примарног извора енергије користе соларну енергију само као допунски секундарни извор енергије. Примарни извор енергије у овим сушарама може или не мора бити обновљиве природе.

Кабинет соларна сушара (енг. *solar cabinet dryer*) је најједноставнији тип соларне сушаре и спада у групу потпуно соларних сушара (Слика 6.77). Велики број различитих изведби кабинет сушара принципијелно се могу сврстати у две групе техничких решења. Прва група обухвата решења код којих директно сунчево зрачење доспева у кабинет сушару кроз транспарентну (стаклену или пластичну) јужно оријентисану преграду и тако обезбеђује потребну топлоту за загревање материјала на који зраци падају директно (Слика 6.78). Код друге групе решења, сушара помоћу соларног колектора загрева ваздух који као агенс сушења преструјава преко влажног материјала (Слика 6.79). У оба наведена случаја могуће је имплементирати компоненте за принудно струјање ваздуха које могу (или не морају) за свој рад користити енергију добијену из обновљивих извора енергије.

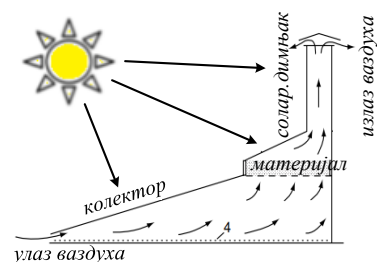
Постојањем компонената, које поспешују проток ваздуха преко материјала који се суши, омогућава се сушење већих количина материјала. Један од начина остваривања интензивније циркулације ваздуха у сушари је применом *соларних димњака* (Слика 6.80). Соларни димњак комбинује неколико природних процеса: соларно загревање ваздуха, термодифузионо кретање и ефекат димњака. Ваздух се у соларном димњаку загрева помоћу сунчевог зрачења, долази до његовог природног подизања у вис, услед појаве термодифузије, изазивајући на тај начин ефекат димњака. Висина соларног димњака достиже и до 5 m, а брзина струјања ваздуха сразмерна је трећем степену висине димњака. Велика предност коришћења соларног димњака је та што за његов рад није потребно никакво допунско напајање, што сушари даје аутономност у раду и независност од електродистрибутивне мреже. Недостатак може представљати то што је висина соларног димњака ограничена евентуалним оптерећењем од налета ветра, имајући у виду његову лагану конструкцију. Изградња до-



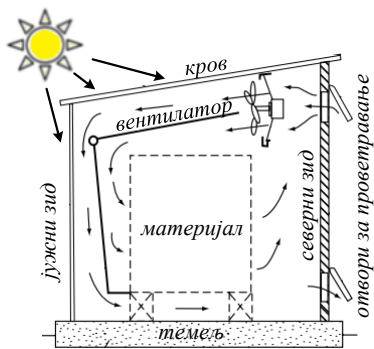
Слика 6.78: Илустрација пресека пасивне соларне кабинет сушаре. [112]



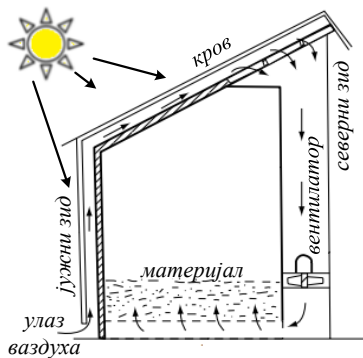
Слика 6.79: Илустрација пресека пасивне соларне кабинет сушаре са соларним колектором и лесема. [113]



Слика 6.80: Илустрација пресека пасивне соларне кабинет сушаре са соларним димњаком. [112]



Слика 6.81: Илустрација пресека коморне соларне сушаре са принудним струјањем ваздуха и рециркулацијом. [114]



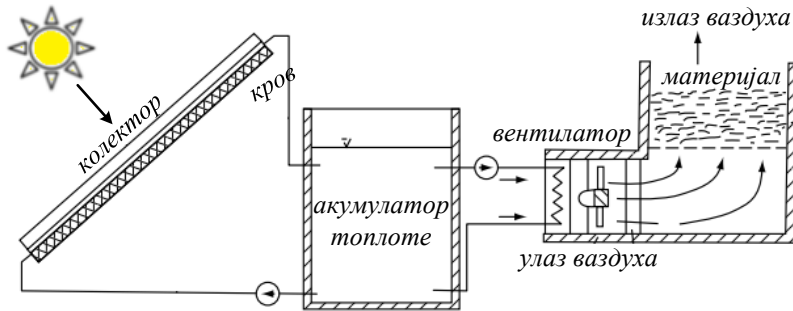
Слика 6.82: Илустрација пресека коморне соларне сушаре са принудним струјањем ваздуха и без рециркулације. [115]

пунских учвршћивача или темеља, који ће допринети стабилности димњака, повећава трошкове инвестиције. Још један недостатак соларног димњака јесте ограниченост у извођењу рециркулације ваздуха у сушари, за шта би се ипак морао уградити вентилатор.

Коморна соларна сушара (енг. *solar room dryer*) је тип сушаре која веома често долази у изведби делимично соларне сушаре. Сушара је објекат изграђен на јаким бетонским темељима са једним носећим зидом изграђеним од чврстог материјала (бетон, цигла, дрво и слично), добро топлотно изолованим и окренутим ка северу. Кров сушаре, бочни зидови и јужно оријентисан зид су израђени од транспарентног чврстог материјала. Принудно струјање унутар коморе је успостављено аксијалним вентилатором, а количина свежег/ рециркулисаног ваздуха контролисана је регулационим елементима на отворима за проветравање коморе (Слика 6.81). У зависности од величине коморе могуће је применити и више вентилатора.

У коморној соларној сушари могуће је сушити и материјал у дебелом слоју. У том случају тежи се бољем загревању ваздуха и проветравању коморе (Слика 6.82). Материјал се поставља на перфорирану подлогу кроз коју се доводи топао ваздух. Недостатак сушења дебелог слоја материјала у коморним соларним сушарама је немогућност постизања већих температура сушења (без допунског загревања), које у обичајеним околностима износе максимално $50 \pm 60^\circ\text{C}$. Такође, доњи слојеви гомиле материјала се суше брже од горњих слојева, што се може делимично избећи смањивањем дебљине слоја односно повећањем површине подлоге. Сушење материјала у дебелом слоју најчешће траје дуже од периода дана када је сунчево зрачење на располагању. Како би се избегли прекиди у сушењу у сушари се интегришу *акумулатори топлоте* као компоненте система. Као радни медијум у акумулатору топлоте примењују се природни (вода, шљунак, камен и сл.) или вештачки (раствори соли, парафини, адсорбенти и сл.) материјали. Загревање материјала који се суши може се извести *директно* или *индиректно*.

Директно загревање подразумева да се топлота са колектора користи за загревање материјала у сушари, док се истовремено део те топлоте складишти у акумулатору топлоте, где ће бити на располагању за враћање у систем онда када за то буде било потребе. *Индиректно загревање* подразумева да се топлота преноси од колектора до акумулатора топлоте (фаза 1), а потом од акумулатора топлоте до материјала (фаза 2), с тим да ови топлотни протоци нису једнаки (Слика 6.83). У сушарама се често комбинују ова два начина загревања у

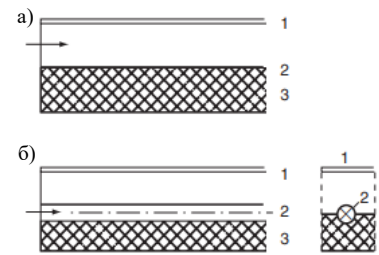


Слика 6.83: Функционална шема коморне соларне сушаре са воденим акумулатором топлоте, где се вода загрева директно, а материјал у сушари индиректно. [84]

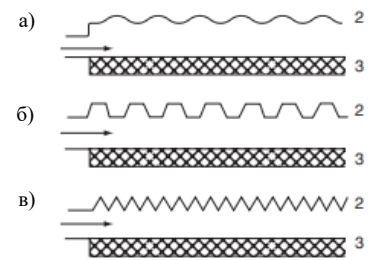
зависности од расположиве количине сунчевог зрачења (Слика 6.86). Предности примене акумулатора топлоте у склопу система соларне сушаре су: могућност сушења материјала у континуитету, чак и по престанку деловања сунчевог зрачења, неосетљивост система на појаву пикова у сунчевом зрачењу и могућност контроле температуре агенса, сушења чиме се избегава прегревање материјала.

Имајући у виду све што је претходно речено, може се приметити да су два кључна елемента сваке соларне сушаре ефикасности соларног колектора и акумулатора топлоте.

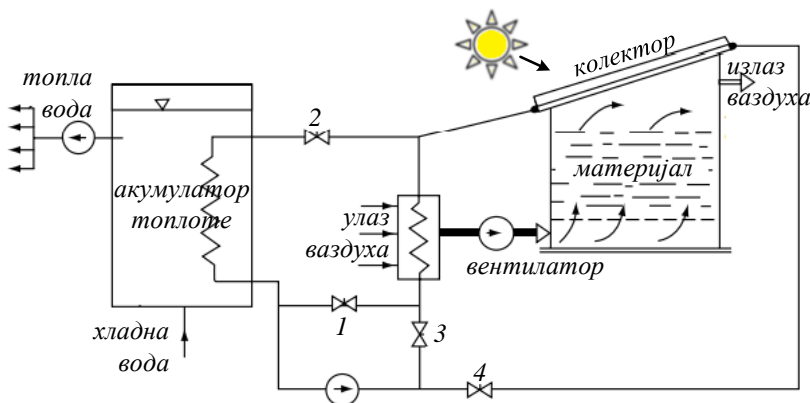
Соларни колектор је компонента сушаре која има улогу топлотног извора у систему. Колектор конвертује енергију директног и дифузионог сунчевог зрачења у топлоту коју преноси радној материји. Ова конверзија енергије се дешава у апсорберу колектора. Апсорбер је направљен од материјала високог коефицијента апсорпције сунчевог зрачења или има премаз којим постиже сличне особине. Апсорбовано зрачење чини да температура апсорбера расте. У сушарама са директним загревањем радна материја је ваздух којим се истовремено суши материјал. Код система са индиректним загревањем радна материја је одговарајућа течност (дестилована вода, флуид са ниском тачком замрзавања, уље или неке неводене течности). Преношење топлоте са апсорбера на радну материју изводи се конвекцијом, уз изузетак веома мале количине



Слика 6.84: Изглед равног колектора: а) ваздух, б) вода. 1 - прекривка; 2 - апсорбер; 3 - термоизолација.

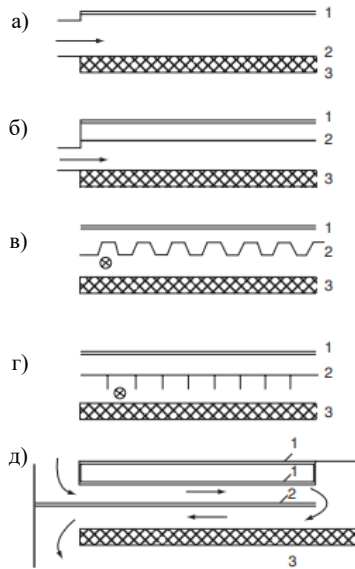


Слика 6.85: Изглед равног колектора без прекривке, са ваздухом као радном материјом: а) таласаста, б) трапезоидна, в) троугласта плоча. 2 - апсорбер; 3 - термоизолација.

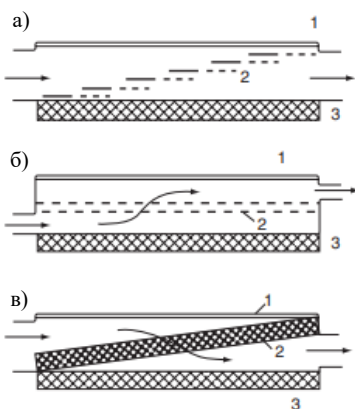


Слика 6.86: Функционална шема коморне соларне сушаре са воденим акумулатором топлоте, где се вода загрева индиректно, а материјал се може загревати директно или индиректно. [84]

Директно загревање - вентили 2 и 3 су затворени; Акумулирање топлоте - вентили 1 и 3 затворени; Индиректно загревање - вентили 1 и 4 су затворени.



Слика 6.87: Изглед равних колектора са прекривком, са ваздухом као радном материјом: а) равни апсорбер, проток изнад апсорбера, б) равни апсорбер, проток испод апсорбера (управо на равни цртежа), в) апсорбер са трапезоидним апсорбером, г) оребрени апсорбер са протоком испод (управо на равни цртежа), д) равни апсорбер, проток изнад и испод апсорбера. 1 - прекривка; 2 - апсорбер; 3 - термоизолација.



Слика 6.88: Изглед равних колектора са прекривком, са ваздухом као радном материјом и подељеном површином апсорбера: а) степенаст апсорбер од подељених плоча, б) перфорирани апсорбер са преклопљеним плочама, в) матрични апсорбер. 1 - прекривка; 2 - апсорбер; 3 - термоизолација.

топлоте приспеле радијацијом. Део прикупљене енергије зрачења, који изазива повећање енталпије радне материје која протиче кроз колектор, сматра се *искоришћеном топлотом*, док је све остало *губитак топлоте*. Ефикасност колектора је већа уколико је његова рефлексија зрачења у околину мања. Ово се постиже покривањем колектора провидним материјалима који ће пропустити сунчево зрачење из околине, а задржати зрачење рефлектовано од апсорбера.

Већина соларних сушара високих перформанси је опремљена *равним колекторима*. Равни колектори могу бити [84]: са ваздухом или водом као радном материјом (Слика 6.84), са прекривком или без прекривке (Слика 6.85), са струјањем ваздуха изнад или испод апсорбера (Слика 6.87), са подељеном и вишеслојном површином апсорбера (Слика 6.88), са интегрисаним акумулатором топлоте или хибридног типа (са две радне материје) (Слика 6.90).

Поред једноставније конструкције, предност употребе колектора са ваздухом као радном материјом је та што се приликом цурења радне материје не јављају озбиљније последице у систему. Непогодности се огледају у немогућности прецизније контроле протока ваздуха без вентилатора као компоненте система, што утиче на инвестиционе и оперативне трошкове. Колектори са водом као радном материјом углавном се користе код сушара са индиректним загревањем које у систему поседују размењивач топлоте вода-ваздух и акумулатор топлоте са водом. Непогодности коришћења воде као радне материје су опасности од цурења и замрзавања воде, што се може избећи коришћењем антифриза у току зиме. Прегревање система је могуће у периодима стагнације и може се избећи применом аутоматских система за испуштање воде из колектора. Стагнација је мања код великих система који имају у свом саставу акумулатор топлоте или већи број потрошача који се могу сматрати топлотним понором који је константно у функцији.

Соларни колектори који користе воду као радну материју (Слика 6.89), користе се често у соларним сушарама, а њихови апсорбери се израђују од *пластике* или *метала*.

У *апсорберима израђеним од пластике*, канали за воду су утопљени унутар пластичне структуре која заузима скоро целу површину колектора. Дуготрајност пластичног апсорбера постиже се употребом пластике која је отпорна на ултраљубичасто зрачење. Непогодност примене пластике се огледа у њеној осетљивости на излагање високим температурама, нарочито преко 100°C. Већина колектора који користе воду као радну материју, имају *апсорбер израђен од метала* и са

металним цевима. Метали који се користе за израду оваквих колектора су бакар, алуминијум или челик. Алуминијумски апсорбери су најлакши, док бакарни најбоље проводе топлоту. Међутим, приликом димензионисања колектора, првенствено се полази од техничко-технолошких захтева компонентна система, а тек после тога следи избор адекватног материјала.

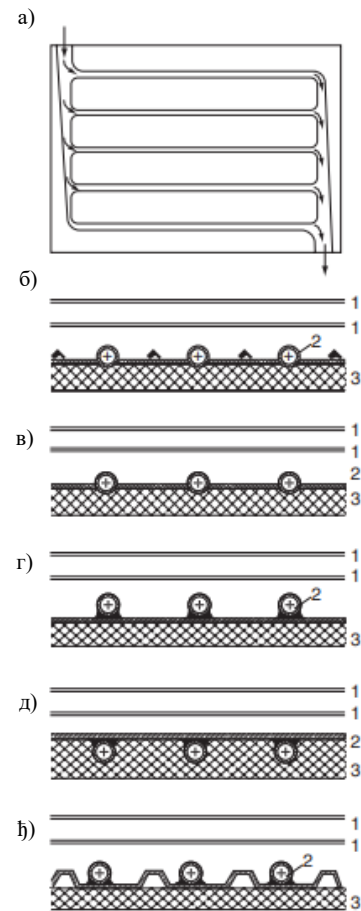
Акумулатори топлоте се у зависности од начина загревања, могу класификовати у две категорије:

1. директно озрачени акумулатори топлоте (температура складиштења директно озраченог акумулатора није ограничена температуром радне материје на излазу из колектора), и
2. акумулатори топлоте испуњени радном материјом која се у истом облику користи у соларном колектору (температура радне материје не прелази температуру на излазу из колектора).

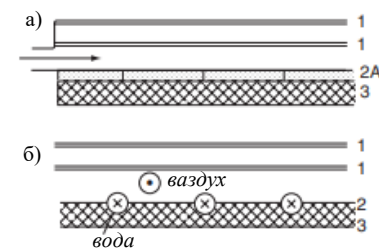
Циљ складиштења топлоте је складиштење вишка енергије који се појављује у периодима јаког сунчевог зрачења, као и складиштење довољно енергије за сушење током ноћи. Приликом одређивања површине колектора потребно је узети у обзир и количину енергије која се жели складиштити.

Директно озрачени акумулатори топлоте могу се користити у системима директног загревања у којима се као радна материја користи ваздух. У том случају се за акумулацију топлоте користи фазно променљиви материјал смештен у сањастом кућишту, које уједно игра и улогу апсорбера (Слика 6.90). Топлотни капацитет фазно променљивог материјала је доминантан у односу на све остале материјале од којих је колектор сачињен. Често улогу акумулатора топлоте игра сама конструкција сушаре, односно њен масивнији део који се директно загрева сунчевим зрачењем (нпр. бетонски зид или бетонски део конструкције сушаре). Примарна функција директно озрачених акумулатора је да умањи осцилације у загревању ваздуха током облачних периода дана, односно да „испеглају” осцилације у топлотном оптерећењу система.

Код *аккумулатора топлоте који се загревају радном материјом* која истовремено пролази и кроз апсорбер колектора, температура складиштења не може бити већа од температуре радне материје на излазу из колектора. Радна материја по изласку из колектора одлази у акумулатор топлоте где загрева материјал за складиштење топлоте (различити чврсти материјали, вода, фазно-променљиви материјали, разне хемикалије, итд).

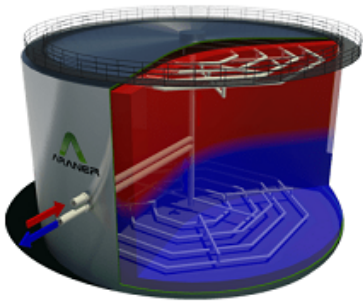


Слика 6.89: Изглед равних колектора са водом као радном материјом: а) апсорбер израђен од пресованих плоча, б) оребрен апсорбер, в, г, д, њ) различите изведбе полагања цеви и изгледа прекривки. 1 - прекривка; 2 - апсорбер; 3 - термоизолација.



Слика 6.90: Изглед интегрисаних равних колектора: а) са акумулатором топлоте као апсорбером, б) хибридни са две радне материје (ваздух и вода).

1 - прекривка; 2А - апсорбер са латентним акумулатором топлоте; 3 - термоизолација.



Слика 6.91: Илустрација слојевитог акумулатора топлоте са водом. [116]

У случају употребе воде као материјала за складиштење топлоте, њено загревање може се извести директно (Слика 6.83) или индиректно (Слика 6.86). У слојевитом акумулатору топлоте са водом (Слика 6.91), топла вода из колектора улази у резервоар близу врха резервоара, док се вода која се враћа назад у колектор узима са дна резервоара помоћу пумпе. На тај начин постиже се да је у горњим слојевима резервоара увек смештена топла вода, док је у доњим слојевима резервоара вода хладна. Предност ове методе је у томе што у колектор доспева хладна вода све док постоји хладан слој воде при дну резервоара, те сходно томе колектор ради са приближно константном ефикасношћу. Уколико у резервоару има доброг мешања воде, неће доћи до температурног раслојавања воде, односно, температура воде је скоро идентична у свим деловима резервоара. Како ће се током времена температура воде у резервоару повећавати, тако ће и ефикасност колектора опадати током времена.

Складиштење топлоте могуће је остварити употребом *фазно-променљивих материјала* (енг. *Phase-Change Materials - PCM*) који ће се загревати радном материјом која пролази и кроз колектор. Предност оваквог начина складиштења топлоте је већа количина складиштене енергије по јединици запремине материјала. Довођењем топлоте *PCM*-у, температура материјала се не мења, а сва доведена топлота троши се на фазну промену материјала, најчешће топљење. Доведена количина топлоте назива се *латентна топлота топљења*, односно *латентна топлота испаравања* (уколико је у питању фазна промена испаравања). Два главна типа *PCM* који се користе у грађевинарству су неорганске соли (хидрати) и органски парафин или масне киселине (Табела 6.4).

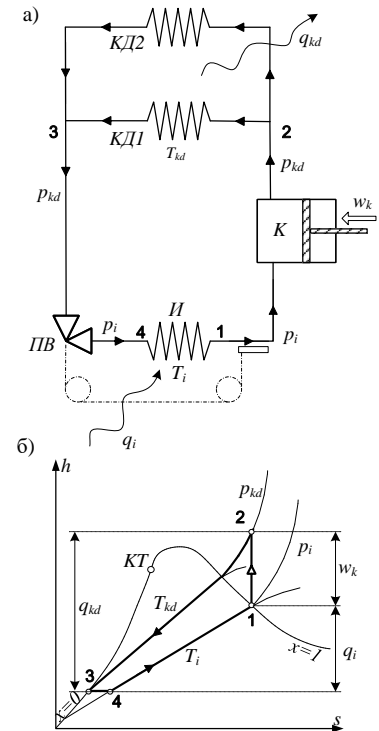
Табела 6.4: Особине неких фазно-променљивих материјала за употребу у акумулаторима топлоте соларних сушара.[117] (Pw - фазно-променљиви материјал парафин восак (енг. *Paraffin wax*), HS - неорганске соли)

Материјал	Температура, °C	Латентна топлота топљења, kJ/kg	Топлотни капацитет (течно/чврсто), kJ/(kgK)	Коефицијент прелажења топлоте, W/(mK)	Густина (течно/чврсто), kg/m ³
Pw	41÷55	176	2,8 / -	0,21	835 / -
Pw 5,2 kg	49	173	n.a. / -	0,167	790 / -
Pw 60 kg	35÷54	196,1	2,44 / 2,35	-	786,1 / 833,6
Pw RT-42	42	165	2 / -	0,2	880 / -
Pw 59,5 kg	55	220	2,38 / 1,85	0,15	778 / 861
CaCl ₂ · 6H ₂ O	30	250	2,1 / 1,4	1	1400 / -
HS-58	30	140	- / -	-	1290 / -
Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	32	251	- / -	-	- / -

6.13 Сушара са интегрисаном топлотном пумпом

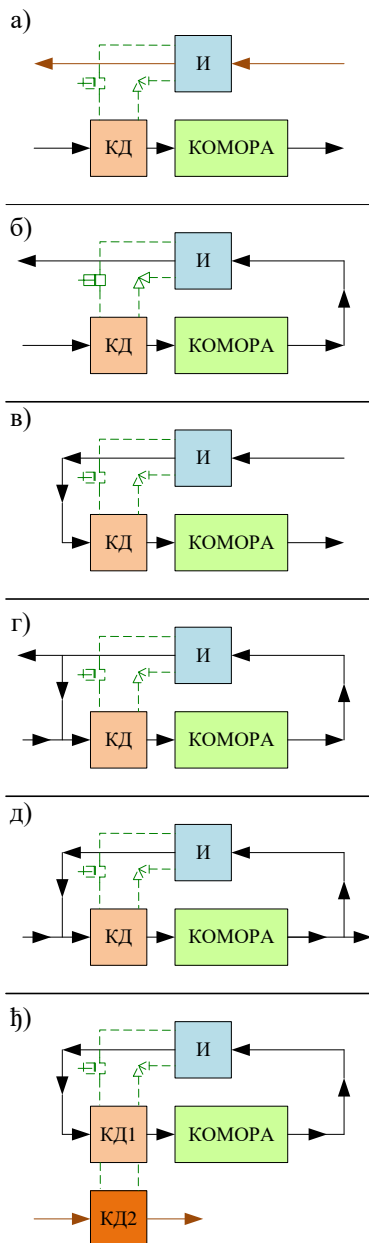
Током процеса конвективног сушења влага која напушта влажан материјал доспева у агенс који опструјава материјал. У случају када се током процеса сушења параметари сушења контролишу, поред брзине и температуре агенса, важно је контролисати и влажност агенса који доспева на материјал. Уколико се агенс делимично или потпуно рециркулише кроз комору за сушење, може се јавити потреба за његовим сушењем пре него што поново доспе на материјал. Стога, може се приметити да се у оваквим системима јавља потреба за две врсте сушења. Прва се тиче издвајања влаге из материјала који желимо осушити, а друга је издвајање влаге из агенса сушења који се изнова враћа на материјал. У ту сврху, постојање подсистема *топлоћинне пумпе* у склопу система сушења показало се као веома корисно и ефикасно и увелико се користи у различитим техничким изведбама сушара које раде уз подршку топлотне пумпе.

Топлоћина пумпа се у системима сушења најчешће користи као рекуператор топлоте и као систем за издвајање влаге из агенса у системима са делимичном или потпуном рецикулацијом агенса. Систем топлотне пумпе је концепцијски гледано, независан подсистем уметнут у склоп система сушаре (енг. *Heat Pump Drying system - HPD*). Овакав подсистем се може интегрисати скоро унутар сваког система конвективног сушења. Топлотна пумпа је технички систем који ради по левокретном кружном процесу (компресиони расхладни уређај) при чему се у фокусу коришћења овог система налази кондензатор, који агенсу сушења предаје топлоту и загрева га (Слика 6.92). Испаривач топлотне пумпе се може користити као компонента за издвајање влаге из агенса сушења, при чему ће се влага на испаривачу кондензовати или хватати у виду иња услед ниске температуре површине испаривача. Овакав начин уклањања влаге у течном стању, омогућује постизање потпуне рецикулације агенса у систему и сушење материјала на нижим температурама сушења. Уколико се истовремено нађу у струји агенса, кондензатор и испаривач топлотне пумпе могу остварити рекулацију топлоте уз истовремено уклањање влаге из агенса сушења, чиме се ефикасност процеса сушења битно увећава. Топлотном пумпом се уз утрошак енергије може обезбедити преношење топлоте са тела ниже на тело више температуре, односно када је температура топлотног извора мања од температуре топлотног понора. Као топлотни извор, могу се користити расположиви потенцијали околине у којој је систем смештен (ваздух,



Слика 6.92: Топлотна пумпа са два паралелно везана кондензатора: а) шема деловања (К - компресор; КД1, КД2 - кондензатори, ПВ - пригушни вентил, И - испаривач), б) $h - s$ дијаграм (p_{kd} - притисак кондензације, T_{kd} - температура кондензације, q_{kd} - специфична количина топлоте одведена кондензатору, w_k - специфичан технички рад доведен компресору, p_i - притисак испаравања, T_i - температура испаравања, q_i - специфична количина топлоте доведена испаривачу).

Напомена: Топлотна пумпа са два паралелно везана кондензатора се најчешће примењује као подршка системима сушења са рецикулисаним ваздухом као агенсом сушења. Оваква изведба омогућује избалансирано истовремено загревање и хлађење ваздушне струје уз издвајање влаге на испаривачу, при чему се вишак топлоте пребацује на други кондензатор и баца у околину.



Слика 6.93: Најчешће примењиване конфигурације система сушења са интегрисаном топлотном пумпом:

а, б, в) без рецикулације;

г, д) са делимичном рецикулацијом;

ђ) са потпуном рецикулацијом.

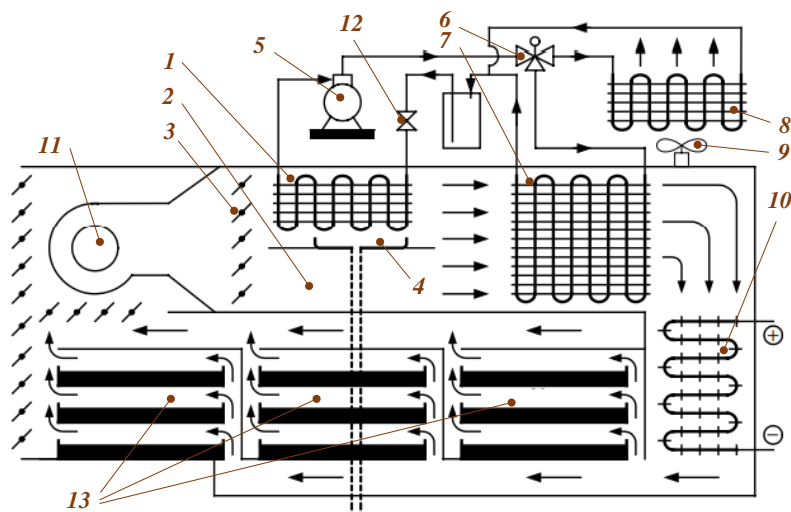
(К - компресор; КД1, КД2 - кондензатори, И - испаривач)

вода, Земљино тло) или секундарни ресурси (отпадна топлота из разних процеса и отпада, хемијске реакције, отпадни ваздух или вода, и слично).

Начин интеграције компонента подсистема топлотне пумпе унутар система сушења зависи од конкретних захтева и расположивих ресурса по питању извора топлоте за рад топлотне пумпе (Слика 6.93). Кондензатор топлотне пумпе, као компонента која загрева агенс, најчешће се налази непосредно испред коморе за сушење да би губици топлоте у околину били што мањи. За разлику од кондензатора, испаривач топлотне пумпе може заузимати различите позиције у систему сушења или се налазити измештен ван система сушења. Топлотна пумпа се може користити само за загревање агенса и у том случају испаривач може бити постављен изван система сушаре и користити неки од расположивих топлотних извора (Слика 6.93а). Уколико нема расположивог извора топлоте, испаривач се може поставити на излазу из коморе и користити отпадну топлоту избаченог агенса (Слика 6.93б). Потреба да се агенс суши пре него доспе у комору, рецимо услед повећане влажности ваздуха из околине, упутила би на постављање испаривача топлотне пумпе негде испред коморе за сушење (Слика 6.93в). *HPD* системи сушења могу ефикасно радити у системима без рецикулације и са рецикулацијом ваздуха. У почетној фази сушења када је садржај влаге у материјалу још увек велики, испаравање влаге велико и специфична влажност атмосферског ваздуха ниска, систем би ефикасније радио у систему без рецикулације ваздуха. Конфигурације *без рецикулације* ваздуха, оправдано је користити у случајевима када за рад испаривача на располагању постоји издашан нискотемпературни извор топлоте.

У системима у којима постоји *делимична рецикулација* ваздуха, испаривач се најчешће налази иза коморе за сушење (Слика 6.93г) или у струји рециркулисаног агенса (Слика 6.93д), чиме доприноси рекулацији топлоте и контроли параметара влажности рециркулисаног агенса.

Најспецифичнији случај примене топлотне пумпе у склопу система сушења је у случају *потпуне рецикулације* агенса сушења (Слика 6.93ђ). У овим системима нема тзв. проветравања коморе, већ се од почетка до краја процеса користи једна иста количина агенса „заробљеног” унутар система сушаре. Агенс наизменично прима и отпушта влагу, рециркулишући унутар система. Агенс прима влагу у комори за сушење у парном стању, а потом отпушта влагу приликом преласка преко површине испаривача топлотне пумпе, кондензацијом на површи испаривача, у течном стању. Због постизања укупног масеног и енергетског биланса у систему, у

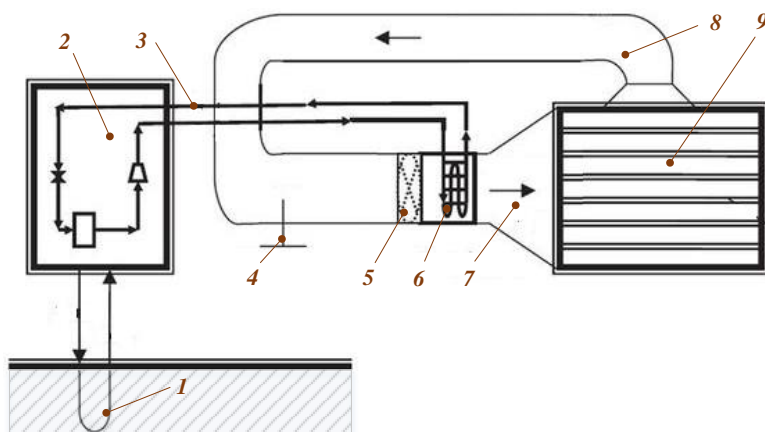


Слика 6.94: Функционална шема ваздушног *HPD* система са могућношћу контроле рецикулације ваздуха. [118]

1 - испаривач, 2 - претструјни канал, 3 - регулатор протока, 4 - кадица за прикупљање кондензата, 5 - компресор, 6 - трокраки вентил за преусмеравање расхладног флуида у спољашњи кондензатор, 7 - унутрашњи кондензатор, 8 - спољашњи кондензатор, 9 - вентилатор, 10 - допунско загревање, 11 - вентилатор сушаре, 12 - пригушни вентил.

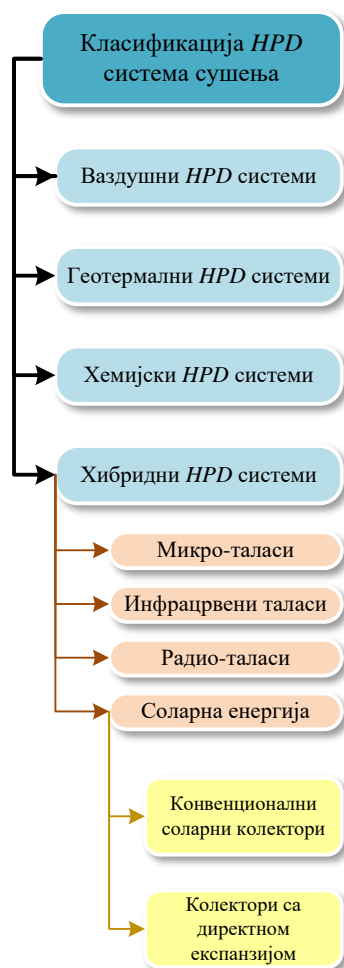
склопу овакве конфигурације система сушења неопходно је постојање још једног екстерног кондензатора који преузима вишак топлоте током времена и предаје је околини. Сушење са потпуном рецикулацијом агенса примењује се у случајевима сушења материјала који би са постојањем измена ваздуха у сушари изгубили на квалитету (нпр. лековито и ароматично биље) или уколико се жели сушити агенсом мање температуре ($30\div 60^{\circ}\text{C}$) и мање релативне влажности ($<20\%$).

Производи који су осетљиви на излагање повишеним температурама агенса, ефикасније се суше у системима са рецикулисаним агенсом сушења. Оксидација ензима током сушења доводи до потамњивања намирнице, што је нарочито изражено код сушења воћа и поврћа. За ефикасну контролу оксидационих реакција, ниво кисеоника у агенсу сушења треба да буде $<1\%$ а остатак може бити инертан гас. Сушење инертним гасом као агенсом сушења (нпр. азот N_2) лако је оствариво у *HPD* системима са потпуном рецикулацијом агенса.



Слика 6.95: Функционална шема геотермалног *HPD* система са рецикулацијом ваздуха. [119]

1 - геотермални размењивач топлоте, 2 - агрегат топлотне пумпе, 3 - цевоводи са расхладним флуидом, 4 - довод свежег ваздуха, 5 - вентилатор, 6 - кондензатор топлотне пумпе, 7 - улаз ваздуха у комору, 8 - излаз ваздуха из коморе, 9 - комора са лесема.



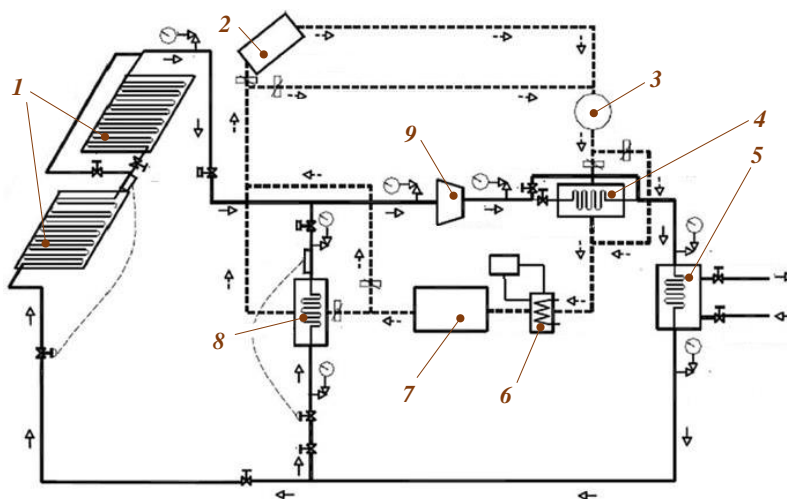
Слика 6.96: Класификација HPD система. [120]

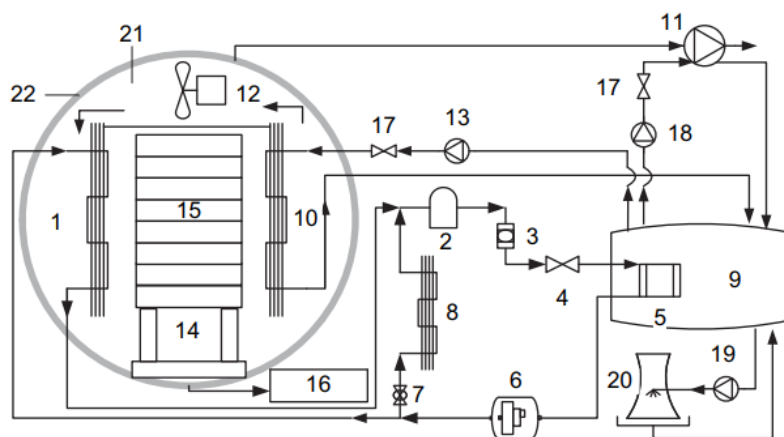
У зависности од извора топлоте која се користи за рад испаривача топлотне пумпе, системи сушења који раде уз подршку подсистема топлотне пумпе могу бити (Слика 6.96):

1. *Ваздушни HPD системи* користе ваздух као извор топлоте, без обзира да ли је то ваздух из околине или отпадни ваздух из процеса сушења (Слика 6.94). То значи да се у испаривачима који се користе у систему расхладни флуид загрева ваздушном струјом у којој је испаривач смештен.
2. *Геотермални HPD системи* користе топлоту Земљиног тла као извор топлоте за загревање испаривача (Слика 6.95). Овакви системи се најчешће састоје из три целине: геотермалног циркулационог круга (од геотермалног размењивача топлоте до испаривача топлотне пумпе), агрегата топлотне пумпе (испаривач, компресор и регулациона опрема) и циркулационог круга ка комори за сушење.
3. *Хемијски HPD системи* као извор топлоте користе топлоту ослобођену различитим егзо-ендотермним реакцијама из хемијских акумулатора топлоте, а која је у њима складиштена из разних расположивих извора као што су отпадна топлота из продуката сагоревања у сушари, соларна енергија, геотермална енергија, и сл.
4. *Хибридни HPD системи* поред топлоте коју обезбеђује кондензатор топлотне пумпе користе још неки други начин загревања материјала, као што су микроталасно, инфрацрвено, радио-таласно, соларно (Слика 6.97) или конвенционално загревање (електрични грејачи и слично). Такође у хибридне системе спадају и системи који поред топлотне пумпе користе још неку методу сушења, нпр. у комбинацији са вакуумским сушењем (Слика 6.98).

Слика 6.97: Функционална шема геотермалног HPD система са рецикулацијом ваздуха. [121]

1 - колектор-испаривач са директном експанзијом (изван система сушаре), 2 - ваздушни колектор, 3 - вентилатор, 4 - ваздухом хлађени кондензатор топлотне пумпе, 5 - водом хлађени кондензатор топлотне пумпе (изван система сушаре), 6 - допунско загревање, 7 - комора за сушење, 8 - испаривач, 9 - компресор топлотне пумпе.





Слика 6.98: Хибридни *HPD* систем са вакуумском комором. [122]
 1 - унутрашњи кондензатор, 2 - ресивер, 3 - филтер-сушач, 4 - пригушни вентил, 5 - испаривач, 6 - компресор, 7 - соленоидни вентил, 8 - спољашњи кондензатор, 9 - резервоар за воду, 10 - уклањач влаге, 11 - вакуум пумпа, 12 - вентилатор, 13 - водена пумпа, 14 - вага, 15 - лесе, 16 - посуда за прикупљање кондензата, 17 - вентил, 18 - водена пумпа, 19 - водена пумпа, 20 - расхладна кула, 21 - вакуумска комора за сушење, 22 - термоизолација.

Способност *HPD* система да топлотном пумпом претворе латентну топлоту кондензације влаге на испаривачу у сензибилну топлоту која ће се искористити код загревања агенса кондензатором, чини их јединственим уређајима за рекулацију топлоте у системима сушења.

Ефикасност рада *HPD* система може се пратити и проценити помоћу неколико показатеља (Табела 6.6).

Термодинамички степен корисности је величина којом се описује ефикасност рада компресионе расхладне машине. У контексту расхладне машине ово би био *фактор хлађења* (енг. *Coefficient Of Performance - COP*) (6.1), односно, *кофицијент грејања* (енг. *Coefficient Of Performance Heat Pump - COP_{HP}*) уколико се ради о топлотној пумпи (6.2). Приликом анализирања рада *HPD* система уобичајена је пракса коришћења, тзв. *кофицијента грејања топлотне пумпе проширеног на читав систем сушења (COP_{HPD})*, при чему се уз снагу компресора урачунава и снага вентилатора сушаре према (6.3).

Табела 6.5: Поређење *HPD* система сушења са осталим методама сушења.[123]

Показатељ	<i>HPD</i> систем	Конвективно сушење	Вакуумско сушење	Лиофилизационо сушење
<i>SMER</i> , kg/kWh	1,0÷4,0	0,1÷0,3	0,7÷1,2	< 0,4
Опсег температура, °C	-10÷80	40<	30÷60	-30÷>50
Опсег релативне влажности, %	10÷80	$f(T)$	мала	мала
Ефикасност сушења, %	<95	35÷40	<75	веома мала
Брзина сушења	велика	просечна	веома мала	веома мала
Трошак инвестиције	средњи	мали	велики	веома велики
Опративни трошак	мали	велики	веома велики	веома велики
Управљање процесом	врло добро	средње	добро	добро

Табела 6.6: Показатељи ефикасности *HPD* система.*COP*, бездимензиона величина

$$COP = \frac{q_i}{w_k} \quad (6.1)$$

$$COP_{HP} = \frac{q_{kd}}{w_k} = \frac{q_i}{w_k} + 1 = COP + 1 \quad (6.2)$$

$$COP_{HPD} = \frac{P_{kd}}{P_k + P_{vent}} \quad (6.3)$$

SMER, kg/kWh

$$SMER_{HP} = \frac{m_w}{P_k \cdot \Delta\tau_h} \quad (6.4)$$

$$SMER_{HPD} = \frac{m_w}{(P_k + P_{vent}) \cdot \Delta\tau_h} \quad (6.5)$$

SEC, MJ/kg

$$SEC = \frac{1}{3,6} \cdot \frac{1}{SMER_{HP}} \quad (6.6)$$

HPDE, MJ/kg

$$HPDE = \frac{1}{3,6} \cdot \frac{1}{SMER_{HPD}} \quad (6.7)$$

MER, kWh/kg

$$MER = \frac{(P_k + P_{vent}) \cdot \Delta\tau_h}{m_w + m_{sm}} \quad (6.8)$$

(P_{kd} - снага кондензатора топлотне пумпе у W; P_k - снага компресора топлотне пумпе у W; P_{vent} - снага вентилатора сушаре у W.)

Специфична брзина испаравања влаге (енг. *Specific Moisture Evaporation Rate - SMER*) представља однос укупне масе влаге уклоњене из материјала и енергије утрошене на рад компресора топлотне пумпе (приказане у јединицама киловатчас *kWh*), према (6.4). У *HPD* системима који раде у нискотемпературним режимима, препоручује се узимање у обзир и енергије утрошене на рад вентилатора сушаре, која у том случају није занемарљива, према (6.5). У поређењу са другим системима *HPD* системи имају веће *SMER* вредности (Табела 6.5), што може умањити оперативне трошкове рада и скратити период отплате инвестиције.

Специфична потрошња енергије (енг. *Specific Energy Consumption - SEC*) представља однос укупне утрошене енергије на рад компресора топлотне пумпе (приказане у јединицама MJ/kg) и укупне масе влаге која је уклоњена из материјала, према (6.6). *SEC* је величина која има реципрочну вредност у односу на *SMER* (при чему је 1 kWh=3,6 MJ/kg) и често се користи при поређењу разноличитих типова сушара.

Уколико се енергија утрошена на рад вентилатора сушаре не занемарује, *SEC* замењује величина *HPDE* (енг. *Heat Pump Dryer Efficiency - HPDE*), која се одређује према (6.7).

Брзина екстракције влаге (енг. *Moisture Extraction Rate - MER*) представља однос укупне утрошене енергије у процесу сушења и укупне масе влажног материјала на почетку процеса сушења, према (6.8).

Основне предности коришћења *HPD* система огледају се у:

- ▶ постизању високих *SMER* вредности (1,0÷4,0 kg/kWh) имајући у виду да се *HPD* системима може постићи рекулерација и топлоте и влаге из влажног ваздуха;
- ▶ могућности сушења материјала на нижим температурама и нижој релативној влажности, чиме се може битно побољшати квалитет осушеног производа;
- ▶ постизању параметара сушења широког опсега: температура агенса: -20÷100°C, уз примену допунског загревања, и релативна влажност агенса 15÷80%, уз примену овлаживача ваздуха;
- ▶ могућности изbacивања влаге из система у њеном течном агрегатном стању, чиме се омогућује сушење у потпуно рециркулисаној струји агенса сушења;
- ▶ одличној контроли амбијенталних услова за производе високе вредности и смањена потрошња електричне енергије за производе мале вредности.

Недостаци који се могу јавити током коришћења *HPD* система огледају се у: еколошким проблемима који се могу јави-

ти услед примене неких расхладних флуида (хлоро-флуорокарбоната), а тичу се штетности по озонски омотач. Расхладни флуиди који су штетни по озонски омотач (R12, R22, R502, итд.) постепено се избацују из употребе у индустрији прераде хране и замењују се алтернативним и еколошки прихватљивим расхладним флуидима (R134A, R409A, R404A, R409A, R507, итд.); редовном сервисирању компонената топлотне пумпе, компресора и филтера, као и допуњавању система услед цурења; већим инвестиционим трошковима.

6.14 Сушара са микроталасним или диелектричним загревањем

Микроталасно или диелектрично загревање веома често се примењују у комбинацији са другим методама сушења због тога што позитивно утиче на повећање ефикасности у издвајању влаге из материјала. Механизми загревања материјала *микроталасном и диелектричном енергијом*⁴ у потпуности се разликују од конвенционалних начина загревања. Електромагнетни таласи доводе до запреминског загревања материјала, што подразумева успостављање градијента притиска водене паре у материјалу услед појаве интензивног испаравања влаге по читавој запремини материјала. Уколико је на почетку процеса материјал веома влажан, може се десити да притисак водене паре у средишту материјала веома брзо порасте. Услед оваквог начина загревања материјал је могуће сушити веома брзо, али ово истовремено може бити веома деструктивно по материјал. Из тог разлога практикује се комбиновање са конвективним сушењем материјала.

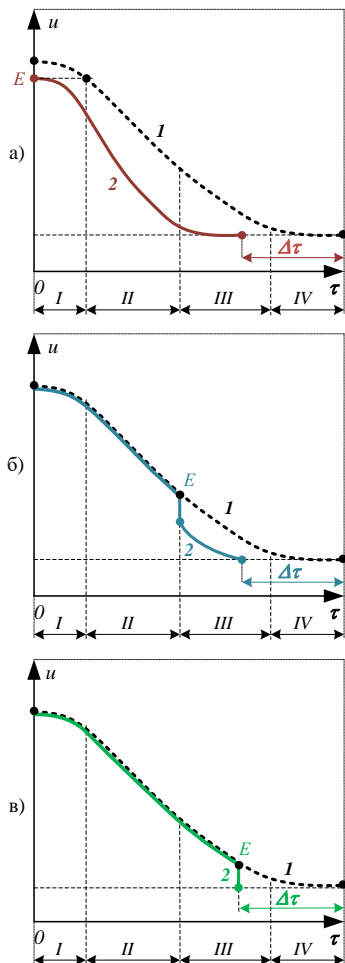
Према начину на који ће реаговати са електромагнетним пољем, материјале можемо класификовати у неколико различитих група.

1. *Проводници* су материјали са слободним електронима (нпр. метали) који рефлектују електромагнетне таласе (исто као што огледало рефлектује светлост), а користе се да задрже или преусмере електромагнетни талас.
2. *Изолатори* су материјали који не проводе електромагнетне таласе (нпр. стакло, керамика, ваздух), рефлектују и апсорбују електромагнетне таласе у занемарљивој количини и првенствено их преносе. Користе се да подрже или обухвате материјале који се загревају електромагнетним пољем и могу имати облик транспотера, леса, посуда и слично.
3. *Диелектрици* су материјали са својствима која се крећу од проводника до изолатора (нпр. вода, уље, дрво,

4: Микроталаси и диелектрици су електромагнетни таласи, односно облици енергије које се манифестују у виду топлоте при проласку кроз материјал са којим интерагују. Постоји више механизма за овакву конверзију енергије од којих се могу издвојити: *биоларна ројација*, *јонска кондукција*, *поляризација*, *електрострикција*, *пијезоелектрицитет*, *нуклеарна магнетна резонанца*, *феро-магнетна резонанца* и слично.

Јонска кондукција је кретање јона услед њихове интеракције са електричним пољем у коме се налазе. Имајући у виду да је електрично поље електромагнетног таласа променљиво, кретање јона ће такође бити променљиво, те убрзања која се при томе јављају доводе до загревања материјала.

Биоларна ројација се јавља услед асиметричности молекула воде (или неких других) који интензивно мењају поларитет када се нађу у променљивом електричном пољу, што доводи до загревања материјала.



Слика 6.99: Типичне криве сушења за сушење у микроталасним и диелектричним системима сушења.

1 - конвенционално сушење,

2 - микроталасно и диелектрично сушење,

E - тренутак примене микроталасног или диелектричног загревања,

$\Delta\tau$ - време скраћивања процеса сушења у односу на конвенционалан начин сушења.

5: Магнетрон је вакуумска цев велике снаге у којој се генеришу микроталаси користећи интеракцију струје електрона са магнетним пољем. Електрони у магнетрону пролазе поред низа резонаторских шупљина и изазивају осцилацију микроталаса у унутрашњости цеви (слично као што се у звиждаљци производи тон). Магнетрон искључиво служи као осцилатор.

намирнице, и слично). У ову групу материјала спадају тзв. „диелектрици са губићком”, који имају способност да апсорбују електромагнетну енергију и претворе је у топлотну.

4. Магнетници су материјали који интерагују са магнетном компонентом електромагнетног таласа и на тај начин се загревају. Често се користе за израду кућишта или преграда које ће спречити цурење/продирање електромагнетне енергије из/у неки простор.

Постоје три начина на која се микроталасна и диелектрична енергија могу комбиновати са конвенционалним методама сушења: *предгревање*, *крајкокрајно интензивно загревање* и *загревање у последњим фазама сушења*. Примена електромагнетних таласа код *предгревања* материјала дешава се на улазу материјала у сушару, када се материјал загрева до температуре сушења, чиме процес сушења у комори започиње одмах на највишој траженој температури (Слика 6.99а). На овај начин се битно скрађује период загревања материјала (I). *Крајкокрајно интензивно загревање* материјала примењује се на почетку периода опадајуће брзине сушења (II) (Слика 6.99б), чиме се интензитет сушења пропорционално повећава (у односу 6:1 или 8:1) у смислу повећања капацитета сушења за сваку додату јединицу електромагнетне енергије. Овакав начин загревања је нарочито ефикасан код сушења дебелих материјала који се тешко загревају. Најмање ефикасан период сушења је онај при крају процеса (III и IV), када се практично две трећине укупног времена сушења троше на уклањање последње трећине воде из материјала (Слика 6.99в). *Загревање у последњим фазама сушења* помоћу електромагнетне енергије може убрзати процес сушења и тако повећати ефикасност процеса.

Основни концепт сушаре са микроталасним и диелектричним загревањем подразумева постојање две главне компоненте: *генератора* и *апликатора*.

Генератор је компонента која конвертује наизменичну струју (50 или 60 Hz) у високофреквентну струју. Ова конверзија је различита за микроталасне и диелектричне системе. Микроталасни системи раде на тачно дефинисаним фреквенцијама (915 и 2450 MHz) и простор у коме се емитује микроталасна енергија мора бити затворен посебним кућиштем како би се спречило просипање електромагнетних таласа у околину због његове штетности по људе. Микроталасни генератор се састоји од извора напајања ја једносмерном струјом и цеви магнетрона⁵ или клистрона⁶, које обезбеђују константну излазну снагу. Диелектрични системи раде у ширем опсегу

фреквенција ($3 \div 150$ MHz) и такође су заштићени одговарајућим кућиштима ради спречавања дисипације електромагнетних таласа у околину. О начину диелектричног загревања и електродама као основним компонентама било је речи у претходним поглављима (страна 32).

Апликаџор је компонента система којом се микроталасна или диелектрична енергија доводи до материјала. Микроталасна енергија се може транспортовати кроз слободан простор и мора бити фокусирана/усмерена на материјал. Са друге стране, диелектрична енергија се испоручује материјалу помоћу електрода које стварају електромагнетно поље унутар кога се налази материјал (Слика 1.35).

Предности примене микроталасног и диелектричног начина загревања материјала у сушарама огледају се у ефикасности рада система, која је већа него код система са конвенционалним начином загревања (Табела 6.7). Сушење се може изводити при нижим амбијенталним температурама и без потребе за повишеном температуром површина на којима се материјал простире, чиме се избегава лепљење и преношење материјала на исте. Време сушења се у неким случајевима може скратити и $>50\%$. Материјал се суши прилично униформно. Примена тунелских сушара са тракастим транспортером умањује потрбну површину за простирање материјала и манипулативне послове. Имајући у виду концепцију ове методе сушења, ово се може сматрати недостатком. Међутим, ова метода сушења због своје изузетне ефикасности, по инвестиционим и оперативним трошковима може парирати осталим методама сушења. Микроталасно загревање се вео-

6: *Клиџрон* је специјална електронска цев која служи као осцилатор, појачивач и умножавач фреквенција, а чији се рад заснива на брзинској модулацији електрона.

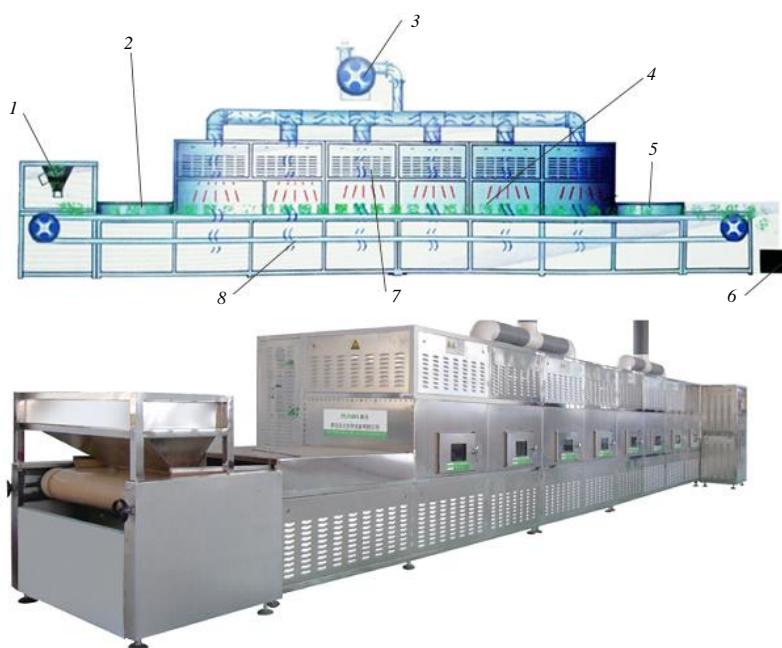
Табела 6.7: Примери намирница које се најчешће суше помоћу микроталасног и диелектричног загревања.

Диелектрично загревање

разне врсте пахуљица,
крекери,
кексови,
бисквити,
грануле за животиње

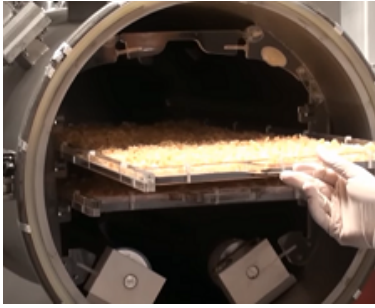
Микроталасно загревање

паста и макарони,
лук,
морске алге,
кромпир чипс.

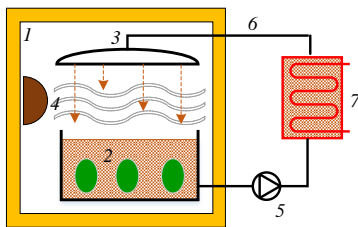


Слика 6.100: Изглед тунелске сушаре са микроталасним загревањем и тракастим транспортером материјала. [124]

1 - улаз материјала, 2 - заштита од дисипације зрачења у околину, 3 - вентилатор за отпадни ваздух, 4 - шупљине за микроталасе, 5 - заштита од дисипације зрачења у околину, 6 - излаз материјала, 7 - генератор, 8 - тракасти транспортер.



Слика 6.101: Илустрација интеграције микроталасног начина загревања и вакуумског сушења. [125]



Слика 6.102: Илустрација интеграције микроталасног начина загревања и осмотског сушења. 1 - микроталасна пећница, 2 - микроталасно-пропусна посуда са материјалом, 3 - компонента за прскање осмотског раствора по материјалу, 4 - компонента за микроталасно загревање, 5 - пумпа, 6 - цевовод за осмотски раствор, 7 - компонента за концентрисање раствора и могућношћу његовог расхлађивања.

ма често имплементира у остале системе сушења, што доприноси скраћењу времена сушења.

Микроталасно-конвективно сушење. Основна карактеристика ове спреге је комбинација запреминског загревања и површинског конвективног загревања материјала. Докле год је површина материјала влажна, може се сматрати да ће конвективно загревање бити довољно. Међутим, када се фронт влаге повуче у унутрашњост материјала, запреминско загревање ће допринети да се влага избаци из унутрашњости материјала. Истраживања показују да је најефикаснији тренутак за примену микроталасног загревања управо током периода опадајуће брзине сушења. Променом параметара агенса сушења може се додатно регулисати брзина процеса сушења. Имајући у виду да микроталасно загревање није само себи довољно да укони влагу из материјала, оваква комбинација се показала веома ефикасном (Табела 6.8) и често се користи у пракси (Слика 6.100).

Микроталасно-вакуумско сушење. Предност ове спреге је у могућности сушења материјала осетљивих на излагање повишеним температурама. Време сушења може бити умањено до 40%. Основна карактеристика је запреминско загревање материјала на притисцима нижим од атмосферског притиска, те је количина топлоте потребна за испаравање воде значајно мања него код конвенционалних метода. Истраживања показују да је на апсолутном притиску од 5,1 kPa, приликом сушења поврћа (Слика 6.101), довољна периодична апликација микроталасног загревања са густином топлотног протока од 0,4÷2 W/g доведеном материјалу у интервалима 90 s ON и 30 s OFF.

Микроталасно-осмотско сушење. Имајући у виду да се осмотским сушењем производ само делимично суши, оваква спрега доприноси ефикасности целокупног процеса сушења (Слика 6.102). У пракси се микроталасно загревање и осмотско сушење истовремено примењују најчешће у склопу предгретмана некој другој методи сушења.

Табела 6.8: Поређење само конвективне и комбиноване микроталасно-конвективне методе сушења. [126]

Метода	Температура ваздуха, °C	Масени проток ваздуха, kg/s	Време сушења, h	Специфична потрошња енергије, MJ/kg _w
Конвективно	50	0,0210	23,66	90,35
	60	0,0204	16,75	81,15
Микроталасно-конвективно	50	0,0210	5,58	21,86
	60	0,0204	3,86	19,08

6.15 Сушара са инфрацрвеним загревањем

Електромагнетни таласи, чије се таласне дужине крећу у опсегу $0,78 \div 1000 \mu\text{m}$, називају се *инфрацрвеним зрачењем* (скр. ИЦЗ). Већина прехранбених материјала добро апсорбује средње-таласно и дуго-таласно⁷ ИЦЗ, што је особина која се користи за загревање материјала приликом сушења. Захваљујући високој ефикасности, многи индустријски производни процеси користе ИЦЗ за сушење, претходно загревање, спаљивање, итд.

Сушење са загревањем помоћу ИЦЗ подразумева пренос топлоте зрачењем између *емитера*⁸ и материјала на нижој температури који треба да се загреје и осуши. Топлотна енергија се зрачењем директно преноси са емитера на материјал, који се загрева без потребе за медијумом за преношење топлоте. Материјали ће апсорбовати, рефлектовати и дозволити да прође део зрачења из инфрацрвеног дела спектра (Табела 6.9). Спроведена истраживања указују на то да је ИЦЗ загревање флукса 10 W/m^2 еквивалентно конвективном загревању код којег би коефицијент прелажења топлоте износио $200 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Примена комбинованог ИЦЗ и конвенционалног конвективног загревања сматра се ефикаснијим од самог ИЦЗ или конвективног грејања уколико се примењују засебно ($1,5 \div 2,45$ пута већа ефикасност, до 43% краће време сушења, до 63% мања потрошња енергије).

Основне компоненте подсистема за ИЦ загревање су: *емитер, рефлектор и кућниште*. У системима сушења се као емитери најчешће користе *инфрацрвене електричне лампе* ($<150 \text{ kW/m}^2$) или *гасни емитери* ($>150 \text{ kW/m}^2$). Код *електричних емитера* ИЦЗ се добија пропуштањем електричне струје кроз елементе који су електро-отпорни (металне шипке, кварцне лампе и грејачи), приликом чега се повећава њихова температура (Слика 6.103). *Гасни емитери* се састоје од

7: Количина ИЦЗ, која доспева на било коју површину, има спектралну зависност, јер се састоји од зрачења различитих таласних дужина које доспевају са емитера. Удео зрачења у сваком опсегу зависи од температуре и емисивности емитера. Инфрацрвено зрачење се према Међународној комисији за расвету (franc. *Commission internationale de l'éclairage - CIE*) конвенционално дели у пет таласних подручја:

1. блиско $0,78 \div 1,4 \mu\text{m}$,
2. кратко-таласно $1,4 \div 3 \mu\text{m}$
3. средње-таласно $3 \div 8 \mu\text{m}$
4. дуго-таласно $8 \div 15 \mu\text{m}$
5. далеко $15 \div 1000 \mu\text{m}$.

8: *Емитер* је компонента која има улогу извора ИЦЗ. То је врућ елемент који рефлектује зрачење у инфрацрвеном делу спектра. Максимална таласна дужина зрачења зависи од температуре емитера. Емитер се мора одабрати у складу са производом да би апсорпцију зрачења, које ће се накнадно претворити у топлоту, била оптимизована.

Табела 6.9: Опсег таласних дужина ИЦЗ које апсорбују неке од хемијских група и одговарајуће намирнице.[127]

Хемијска група	Апсорбована таласна дужина, μm	Намирница
Хидроксилна (О-Н)	$2,7 \div 3,3$	Вода, шећери
Алифатична веза (C_nH_n)	$3,25 \div 3,7$	Липиди, шећери, протеини
Карбонилна ($\text{C}=\text{O}$) (естри)	$5,71 \div 5,76$	Липиди
Карбонилна ($\text{C}=\text{O}$) (амиди)	5,92	Протеини
Азот-водонична (-NH-)	$2,83 \div 3,33$	Протеини
Двострука угљенична ($\text{C}=\text{C}$)	$4,44 \div 4,76$	Незасићене масти



Слика 6.103: Илустрација примене електричних инфрацрвених емитера у ротационим сушарама. [128]

перфориране плоче (металне или ватросталне), која се загрева гасним пламеном на једној површи тако да плоча подиже своју температуру и емитује ИЦЗ (Слика 6.104). Порозност плоче одређује температуру друге површи како би се обезбедио безбедан процес. Температура плоче се најчешће налази у опсегу $1500 \div 1700^\circ\text{C}$, а зрачи на таласним дужинама $2,3 \div 2,7 \mu\text{m}$.

Предности примене ИЦЗ огледају се у томе што:

- ▶ нема директног контакта емитера са материјалом који се загрева или суши,
- ▶ је велика брзина сушења/загревања материјала,
- ▶ се ИЦЗ може фокусирати тамо где је потребно у дефинисаном времену,
- ▶ се ИЦ емитери се могу прецизно прилагодити својствима/геометрији материјала,
- ▶ постоје уштеде трошкова захваљујући високој укупној ефикасности и оптималном животном веку ИЦ грејача,
- ▶ постоји могућности повезивања ових система са секцијама за сушење ваздуха ради рекулперације енергије.

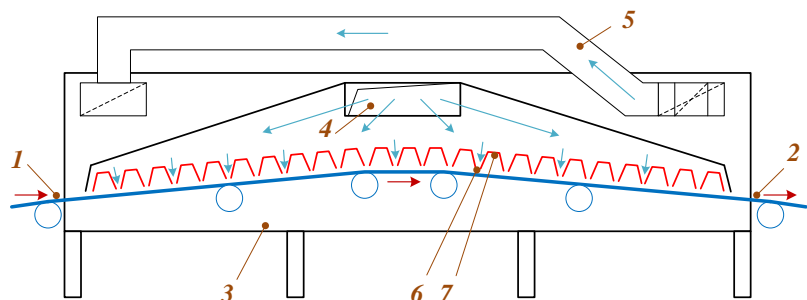


Слика 6.104: Илустрација примене гасних инфрацрвених грејача у сушарама са транспортером. [129]

Сушење са загревањем помоћу ИЦЗ најчешће се примењује за сушење намирница као што су житарице, брашно, поврће, тестенине, месо и риба, због ниских инвестиционих трошкова и могућности лаке монтаже у било какав облик коморе за сушење (Слика 6.105). Материјал који се суши мора поседовати особину ниске рефлексивности, како би се умањила снага потребна за његово загревање. Пожељно је да трансмисивност намирнице буде што већа како би се избегло њено прегревање. Апсорптивност и трансмисивност материјала најчешће су обрнуто сразмерне величине. Трансмисивност опада са повећањем дебљине слоја материјала, док истовремено апсорптивност расте. Веома је битно да се током избора компонената система води рачуна о усаглашености особина ИЦЗ и особина материјала, односно о зависности трансмитивности материјала, која се мења током времена јер се влажност материјала мења, и дебљине слоја материјала и таласне дужине ИЦЗ које доспева на материјал.

Слика 6.105: Шема функционисања конвективне сушаре са загревањем материјала инфрацрвеним грејачима. [84]

1 - улаз материјала, 2 - излаз материјала, 3 - носећа конструкција сушаре, 4 - улаз ваздуха, 5 - рецикулација/избацивање ваздуха, 6 - млазнице за ваздух, 7 - инфрацрвени грејачи.



6.16 Сушаре за месо и рибу

Сушење меса је поступак конзервације који се спроводи како би се продужио век трајања меса, али и као поступак у оквиру обимнијег производног процеса прераде меса. Овај поступак не подразумева примену јасно дефинисане технологије. Конвенционалне технике за сушење меса могу се користити у малој, полуиндустријској или индустријској производњи. Међу конвенционалним техникама најзаступљеније је конвективно сушење, засновано на загревању материјала соларном енергијом, микроталасно или диелектрично, и струјом топлог ваздуха. Сушење се веома често комбинује са другим третманима меса, као што су димљење, сољење, зачињавање и зрење. Избор оваквог комбинованог третмана углавном има за циљ побољшање органолептичких карактеристика (укус, текстура) и побољшање укуса крајњег производа, како би одговарао захтевима потрошача. Напредне технологије сушења меса подразумевају комбиновање различитих техника сушења.⁹

Сушење „на Сунцу” спада међу најстарије технике (Слика 6.106) које се користе за конзервацију меса. Без обзира на то да ли је сирово или зачињено, месо се сече на траке (Слика 6.107) или равне комаде (Слика 6.108). Код сушења меса на директном Сунцу, комади меса су изложени Сунчевом зрачењу тако што су положени на Земљу, подигнути на локално направљене лесе или окачени да висе. Постављање комада меса преко жице, ужади или грана дрвећа, никако се не препоручује. Главни недостатак је релативно лош квалитет финалног производа, због нехигијене и контаминације меса мушицама, инсектима, глодарима и прашином. Код соларног сушења у заштићеном простору примењују се соларне кабинети сушаре, у којима се избегава сваки нежељени спољашњи утицај и контаминација.

Конвективно сушење меса врућим ваздухом је успешна техника сушења којом се у великој мери елиминишу недостаци сушења на Сунцу. У ту сврху, користе се различити типови конвективних сушара са топлим ваздухом као агенсом, који функционишу и у шаржном и у континуалном режиму. Ове сушаре се углавном састоје од вентилиране коморе за сушење у којој су контролисани параметри ваздуха (температура, релативна влажност и брзина струјања). Просторије/ коморе за сушење могу бити дрвене, зидане или бетонске конструкције, стационарне или мобилне, са или без кровне прекривке. Комади меса постављају се у комору за сушење и излажу топлим ваздуху, у временском периоду потребном за постизање захтеваних карактеристика крајњег производа, потребног



Слика 6.106: Илустрација сушења меса „на Сунцу”.

9: На пример: сушење пилећег меса се често изводи у две фазе, прво применом прегрејане водене паре, а потом конвективним сушењем у сушарама са топлотном пумпом; осмотска дехидратација се често комбинује са вакуумским сушењем, и слично.

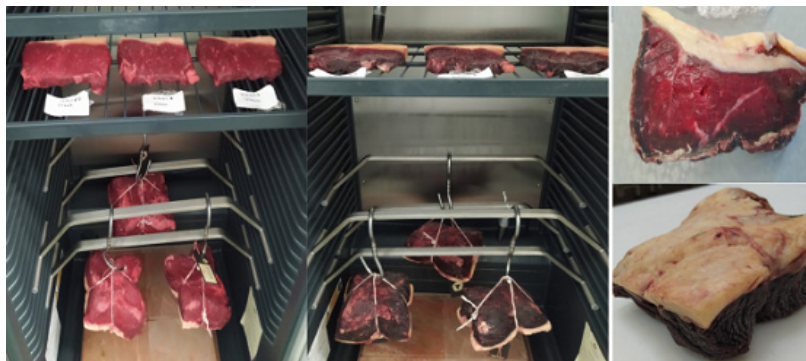


Слика 6.107: Илустрација сечења меса на траке.



Слика 6.108: Илустрација сечења меса на танке одреске.

Слика 6.109: Илустрација сушења говеђег меса у комадима у конвективној коморној сушари.



Слика 6.110: Илустрација постављања уситњеног меса на лесу (горе) и изглед осушеног производа (доле).



Слика 6.111: Илустрација индустријске коморе за димљење и сушење меса и рибе. [130]

санитарног квалитета и сензорних карактеристика. Траке и комади меса окачени су на куке, омчом или копчама, на хоризонтално постављене шипке, направљене од дрвета, метала или жице (Слика 6.109). Конвективно сушење меса топлим ваздухом (Слика 6.111) обједињује два процеса: преношење топлоте са топлог ваздуха на производ и преношење масе или воде у обрнутом смеру. Присуство масти у месним производима успорава брзину сушења меса. Што је већи садржај масти, то је мања брзина сушења меса.

Уситњено месо (енг. *chopped meat*) се може сушити у класичним конвективним сушарама са лесема, где се уситњено месо поставља на мреже лесе и излаже топлој ваздушној струји (Слика 6.110). Месо се за сушење припрема на тај начин што се исече на кришке, меље или сече на ситне коцкице. Уколико се жели избећи формирање већих комадића уситњеног меса, у месо се могу додати/ умешати хлебне мрвице (презла). Температура ваздуха у сушари износи $60\div 70^{\circ}\text{C}$. Месо је могуће сушити и у сушарама са флуидизованим слојем, при чему температура флуидизованаог слоја износи око 70°C . Овако добијени производ се углавном користи у производњи конзервираних јела и супа.

Сушењем се садржај воде у сировом месу ($70\div 80\%$) смањује на безбедну вредност. Садржај влаге у финалном производу износи $12\div 15\%$ када нема предтретмана, односно $28\div 50\%$ влаге уколико је сушено претходно усолјено месо. Губитак у маси производа током сушења може износити: код шунке $33\div 36\%$, код говедине $30\div 45\%$ и код рибе $60\div 65\%$. Активност воде меса током сушења опада од почетних вредности $0,65 < a_w < 0,9$, до безбедних вредности $0,5 < a_w < 0,6$. Већ при вредностима $a_w < 0,9$, месо је заштићено од већине бактерија, микробиолошке активности и хемијских реакција које би нарушиле укус меса. Међутим, тек при $a_w < 0,8$ престаје активност буђи и квасаца које могу представљати проблем. Процес се у случају складиштења крајњег производа у фрижидеру, дешава на умереним температурама (мањим од 35°C). Уколико се сушење користи као јединствен третман за очување

сировина, сушење се изводи на температурама $50\div 60^{\circ}\text{C}$. За сушено и ферментисано месо,¹⁰ сушење је повезано са сазревањем производа, а температуре сушења-зрења се крећу од $10\div 15^{\circ}\text{C}$. Релативна влажност ваздуха у сушари варира у опсегу $30\div 60\%$. У случају сушења рибе, препоручују се мање вредности из овог опсега, док се при сушењу шунке може ићи и на веће вредности у наведеном опсегу.

Конвективним сушењем у коморама могуће је сушити целу, исечену или уситњену рибу и морске плодове (Слика 6.112). Већи комади рибе најчешће се постављају да окачени висе у комори (Слика 6.113), док се уситњена риба и морски плодови распростиру на лесе. Температура топлог ваздуха у коморама за сушење рибе износи $70\div 80^{\circ}\text{C}$. Уобичајени третман код сушења рибе је димљење, које се често изводи у истом простору где се риба суши. За прављење дима за димљење рибе потребно је користити само тврдо дрво јавора, храста, брезе и дрво воћака. Дрво четинара оставља непријатан укус на риби. Никако није допустиво коришћење јеле, смрче, бора или кедра.

У индустријској производњи често се примењује лиофилизационо сушење рибе (Слика 6.114). Овакав начин сушења је веома скуп због велике потрошње енергије, а предност његове примене је могућност чувања производа на амбијенталним условима све док је паковање непропусно за воду. По уносу у вакуумску комору, влага из рибе нагло почиње да испарава и риба почиње да се хлади. Са замрзавањем рибе се започиње тек након што је 15% воде из рибе испарило. Уколико се риби не дозволи да се замрзне током процеса сушења (вакуумско сушење), она се неће скупити и осушиће се са отвореном порозном структуром. Ово ће допринети да се током рехидратације риба брзо реконституише и поврати изглед веома сличан свежеј риби. Поступак осмотске дехидратације рибе у индустријској производњи и конзервацији рибљих производа спроводи се помоћу различитих осмотских расвора, као што су сахароза, сируп од кукурузног скроба и/или кухињске соли (NaCl). Мешавина малтодекстрина¹¹ и кухињске соли (у размерама 40:5, 50:5 и 60:5) користи се као чврста осмотска супстанца за осмотску дехидратацију филета морске рибе. Осмотски третман продужава век трајања рибе, али сам као такав није довољан за дуготрајније очување производа. Осмотски поступак се често примењује у комбинацији са другим технологијама конзервације хране, као што су излагање повишеним хидростатичким притисцима, импулсима електричног поља високог интензитета или гама зрачењу, примени ултразвука или центрифугалне силе, пре или током осмотске дехидратације.

10: Ферментација је додатна операција у производњи усоленог сушеног меса. Ферментисаним месом називамо оне производе код којих су дејство ензима, бактерија или неке друге микробиолошке активности, на неки начин допринели постизању особина финалног производа.



Слика 6.112: Илустрација постављања уситњених рачића и шкампи на лесе.



Слика 6.113: Илустрација димљења и сушења целих комада рибе.



Слика 6.114: Илустрација лиофилованих филета рибе.

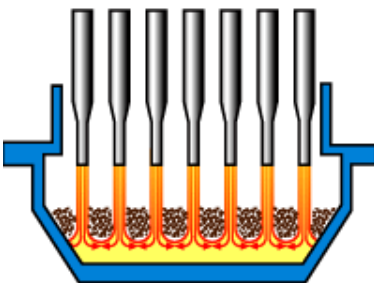
11: Малтодекстин је бела пудроста супстанца добијена од кукуруза, пиринча, кормпировог скроба или пшенице.

6.17 Млазна сушара

Млазна сушара (енг. *Impingement dryer*) суши влажан материјал помоћу млазница које на материјал великом брзином усмеравају агенс сушења. Агенс сушења најчешће је врућ ваздух или прегрејана водена пара. Технологија млазног сушења је стара метода сушења, која је тек у новије време примењена на сушење прехранбених материјала. Материјал се првенствено може сушити у танком слоју или насутом стању. Уколико је уклањање влаге контролисано унутрашњом дифузијом влаге кроз материјал, тј. када се суши дебели слој материјала, овакав начин сушења је тешко предвидети, моделирати и описати, тако да се у том случају прибегава коришћењу претходно експериментално утврђених података о брзини и начину апликације агенса. Млазне сушаре се успешно користе се за сушење намирница попут тортиља, чипса од кромпира, кора за пицу, пераца, крекера и кексева, као и грануларних производа (зрна кафе, какао зрна, пиринча, ораха и слично).



Слика 6.115: Илустрација распореда млазница изнад и испод материјала који се налази на перфорираној подлози. [131]



Слика 6.116: Илустрација распореда млазница у случају формирања псевдофлуидизованог слоја материјала. [131]

12: На температурама већим од критичне *температури* водене паре, дешава се директно прелазење из течног у гасовито стање, без промене фазе.

13: Под *инверзионом температуром* подразумева се критична вредност температуре испод које ће сваки реалан гас (неидеални гасови), који се шири при константној енталпији, доживети пад температуре, а изнад које ће температура порастати.

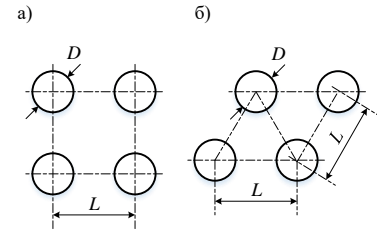
Млазно сушење се препоручује за уклањање површинске или неvezане влаге са танког слоја материјала (Слика 6.115). Код сушења насутих слојева, ваздух који под великом брзином излази из млазница, ствара слој ваздуха који подиже и преврће производе стварајући тако псевдофлуидизовани слој (Слика 6.116).

Примена прегрејане паре у млазним сушарама може утицати позитивно на текстуру осушених производа уколико се од њих захтева хрскавост. У поређењу са ваздухом, прегрејана водена пара је чистија, обезбеђује виши интензитет испаравања влаге из материјала, умањује величину оксидације материјала и умањује губитке нутритивних особина материјала током процеса сушења. Истраживања су показала да се грануласти материјали, посматрано под истим условима, брже суше применом прегрејане водене паре него топлим ваздухом. Једна од предности сушења воденом паром је та што испарена влага заврши у агенсу сушења и не мора се из њега накнадно уклањати. Такође, треба имати у виду да постоји могућност да се као агенс сушења користи мешавина влажног ваздуха и прегрејане водене паре, при чему се треба водити рачуна о *критичној температури*¹² водене паре и *инверзионој температури*¹³ за формирану мешавину. Генерално гледано, карактеристике процеса сушења се не мењају битно уколико се ваздух као агенс замени прегрејаном воденом паром. Основне разлике првенствено обухватају: појаву кондензације влаге на површини материјала и

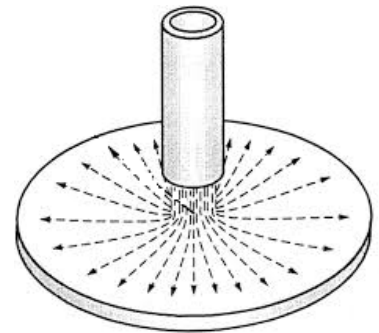
појаву повишене температуре површи материјала током периода константне брзине сушења. Брзина сушења, у случају коришћења прегрејане водене паре, може се увећати уколико се смањи појава кондензације на површи материјала и уколико је температура прегрејане водене паре већа од инверзионе температуре.

Млазнице испуштају млаз агенса у мирни амбијент, уједначеним профилем брзине на излазу из млазнице (Слика 6.118). Са повећањем удаљености од излаза млазнице, размена количине кретања између млаза и околине изазива ширење слободне границе млаза и сужавање потенцијалног језгра млаза. Низводно од потенцијалног језгра, профил брзине није уједначен по целом попречном пресеку млаза и максимална (централна) брзина опада са повећањем удаљености од излаза млазнице. Типичне зоне струјања млаза (Слика 6.119) су: зона слободног млаза, зона удара и зона утицаја подлоге након удара. Струјање агенса у зони слободног млаза одвија се без спољашњих утицаја, са градијентом брзине у смеру струјања. Зона удара млаза почиње онда када се слободна зона поремети утицајем препреке (материјал, подлога) на коју наилази. Бочна брзина струјања се брзо повећава када се млаз приближи подлози. Поље брзина садржи тачку стагнације у којој је брзина струјања једнака нули. Зона утицаја зида формира се након удара млаза, који тече паралелно са зидом, формирајући гранични слој струјања.

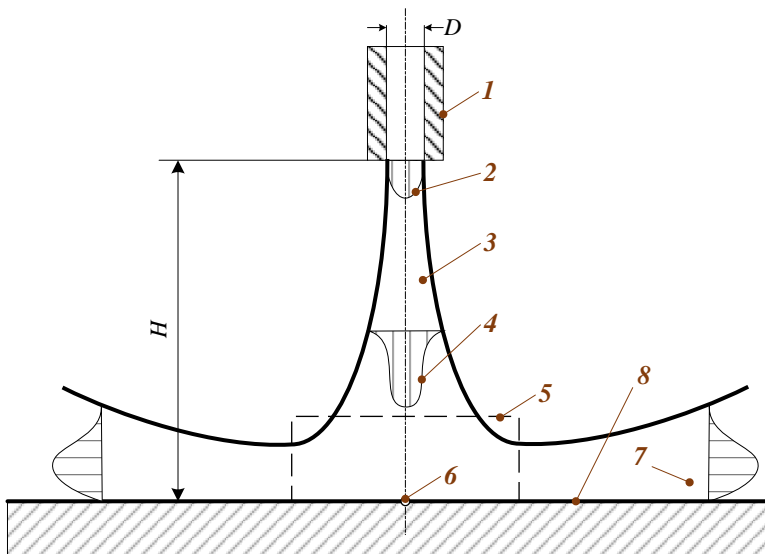
Млазнице су најчешће постављене у правилном распореду, на подједнаким растојањима и симетрично, и у тачно дефинисаном положају у односу на материјал који се суши (Слика 6.117). Приликом постављања млазница мора се водити



Слика 6.117: Илустрација конфигурација млазница у хоризонталној равни: а) квадратна, б) троугласта. D - унутрашњи пречник млазнице, L - хоризонтално растојање између две суседне млазнице.



Слика 6.118: Илустрација простирања млаза у 3D простору. [132]



Слика 6.119: Типичне зоне струјања млаза. [133]

1 - млазница (D - унутрашњи пречник, H - вертикално растојање од млазнице до подлоге), 2 - профил брзине на излазу из млазнице, 3 - зона слободног млаза, 4 - профил брзине са формираном језгром млаза, 5 - зона удара млаза у материјал, 6 - тачка стагнације, 7 - зона утицаја подлоге, 8 - подлога.



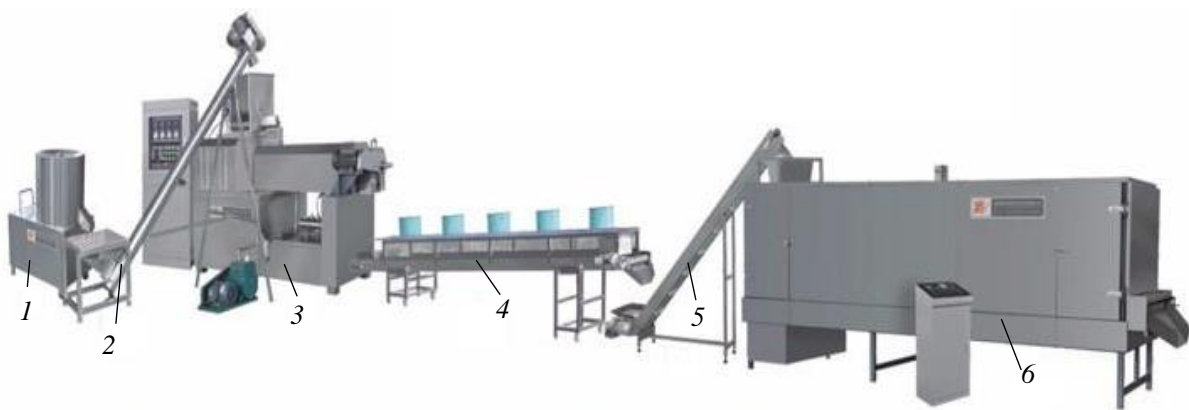
Слика 6.120: Илустрација различитих облика осушење тестенине.

рачуна о зони међусобног утицаја две млазнице, односно о преклапању млазева. Постоји велики избор млазница које се могу користити, а избор геометрије млазница и конфигурације више млазница имају важан утицај на инвестиционе и оперативне трошкове сушења и квалитет осушеног производа.

6.18 Сушара за екструдирану храну

Екструзија је механички процес у коме се прехранбени материјали, намењени за исхрану људи или животиња, сабијају и под притиском терају да пролазе кроз отворе калупа, чиме се ствара производ жељеног облика, величине и/или текстуре. *Сува екструзија* је поступак екструзије изведен без допунског загревања материјала, а топлота која се јавља у процесу екструзије потиче само од трења услед сабијања материјала. Уколико се током процеса сабијања материјал загрева, овакав процес се назива *екструзионо кување*. Због своје флексибилности у обради хране, екструдирани производи су изузетно присутни у индустрији житарица, млекарству, пекарској и кондиторској индустрији (Слика 6.120).

Након екструзије приступа се операцијама накнадне обраде хране где спадају: сечење, сушење, зачињавање, премазивање материјала и паковање (Слика 6.121). Од свих поменутих, сушење је енергетски најзахтевније и изводи се у прецизно контролисани условима (температура ваздуха, брзина кретања материјала и ваздуха, и тачно време задржавања у комори сушаре).



Слика 6.121: Изглед линије за припрему тестенине. [134]

1 - миксер за мешање сировина, 2 - пужни транспортер, 3 - екструдер, 4 - машина за сечење, 5 - тракасти транспортер, 6 - конвективна сушара са транспортером.

Репрезентативан пример екструдираних намирница су тестенине (паста) разних облика. За добијање потребног квалитета осушених тестенина, процес сушења мора бити контролисан. Ако се влага пребрзо повуче из материјала, тестенина може попуцати, чиме постаје безвредан производ. Стога, процес сушења се дели на више узастопних фаза. Тесто након припреме садржи око 30% влаге, и пролази кроз фазе: *прећходног сушења, главног сушења и стабилизације*. Тестенина се суши од споља ка унутра, а њен садржај влаге на крају процеса је већи унутра него споља. То резултира појавом напона у материјалу који се смањује у фази стабилизације, када резанци више да готово и не испуштају влагу. Након сушења, садржај влаге у тестенини је око 12%. Садржај влаге у крајњем производу игра битну улогу у квалитету финалног производа, а тачност мерења сензора влажности у комори током целокупног периода трајања процеса сушења је важан критеријум. Сушара може бити подељена у 4 до 10 узастопних зона сушења, при чему свака зона има своје сопствене параметре сушења (Слика 6.122).

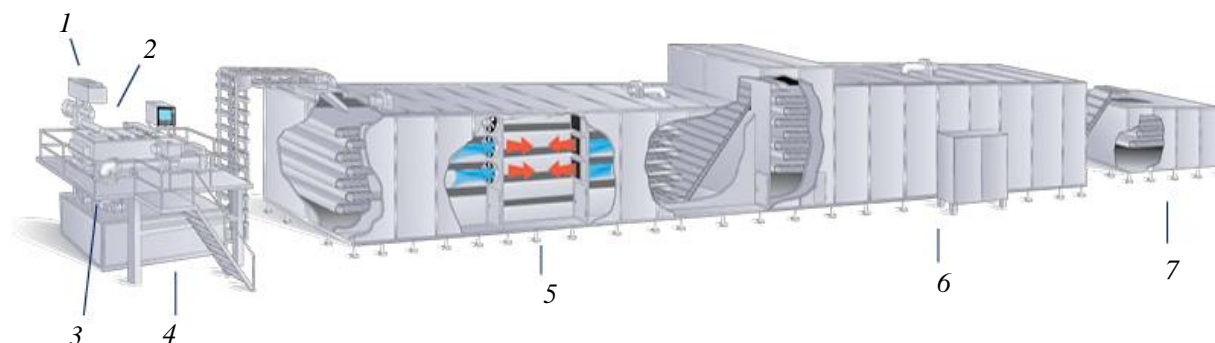


Слика 6.122: Илустрација вишезонске коморе и сонде за мерење влажности у комори. [135]

Екстудирана дугачка тестенина, као што су шпагети, током процеса сушења се шири преко хоризонтално оријентисаног сталка тако да материјал виси вертикално (Слика 6.123). Сушара преноси сталак са шпагетима кроз комору за сушење. Кратка тестенина, као што је пене, поставља се на дугачке хоризонталне транспортере који омогућавају проток ваздуха преко материјала, на пример, трака са решеткама или летвицама. За дуготрајну тестенину потребно је око 5÷9 сати да се осуши у зависности од температуре агенса, а краткотрајној тестенини око 3÷5 сати. Начин циркулације ваздуха у комори, довођење топлоте материјалу и промена влажности материјала у времену су кључни фактори за процес квалитетног сушења тестенине. Сушење се састоји из предпроцеса и главног процеса сушења (Слика 6.124).



Слика 6.123: Илустрација сталка за транспорт шпагета кроз сушару. [136]



Слика 6.124: Изглед линије за вишезонско сушење шпагета. [136]

1 - улаз сировине, 2 - мешач, 3 - екструдер, 4 - тресач, 5 - предсушара, 6 - главна сушара, 7 - секција за хлађење.

6.19 Сушара са ултразвучним вибрацијама

14: Дефиниција према Америчком националном институту за стандарде (енг. *American National Standards Institute - ANSI*)

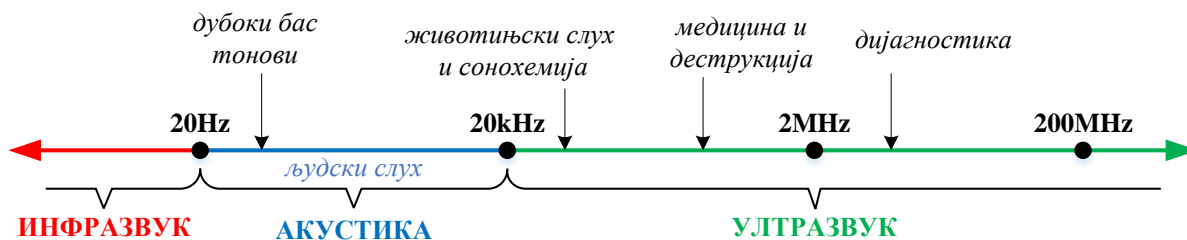
Табела 6.10: Карактеристичне вредности фреквенција и таласних дужина звука у области ултразвучних таласа у различитим срединама. (w_s - брзина звука, $f = w_s/\lambda$ - фреквенција, λ - таласна дужина.)

Средина	f , kHz	λ , cm
Ваздух, 20°C $w_s=343$ m/s	20 2000	1,715 0,017
Кисеоник $w_s=316$ m/s	20 2000	1,58 0,016
Хелијум $w_s=965$ m/s	20 2000	4,825 0,048
Вода, 20°C $w_s=1500$ m/s	20 2000	7,5 0,075
Морска вода $w_s=1530$ m/s	20 2000	7,65 0,076
Етанол $w_s=1207$ m/s	20 2000	6,035 0,06

Ултразвуком називамо звучни талас на фреквенцијама већим од 20 kHz.¹⁴ При простирању кроз ваздушну средину, при нормалном атмосферском притиску, ултразвучни таласи имају таласне дужине мање од 1,9 cm. Фреквенције ултразвука, које налазе техничку примену, крећу се у опсегу изнад звучног опсега људског слуха (20 Hz ÷ 20 kHz), а испод мега-соничног региона (>600 kHz) (Слика 6.125). Основни параметри ултразвучног таласа су снага ултразвука, време сонификације, фреквенција и амплитуда осцилација (Табела 6.10).

Енергија звучних таласа преноси се вибрацијом молекула у средини кроз коју се талас шири. У природи се ултразвук појављује уз звучне таласе, а вештачки се може произвести ултразвучним генераторима, односно претварачима других облика енергије (електричне, магнетне, кинетичке,...) у акустичну енергију ултразвучних таласа. За производњу ултразвучних таласа најчешће се користе методе: *пиезоелектрична, електрострикција, магнетострикција, механичким претварачима и електростатичким и електродинамичким претварачима.*

Систем за производњу ултразвучних таласа састоји се од три главне различите компоненте: *генератора, претварача и система за примену.* Најраспрострањенији начин генерисања ултразвучних таласа је *кварциним генератором*, који ради на принципу осциловања пиезоелектричних кристала кварца, када се нађу у наизменичном електричном пољу, при чему се генерише ултразвук одређене фреквенције. Други, веома чест начин генерисања ултразвучних таласа је методом *магнетострикције*. Метода магнетострикције заснована је на својству неких метала да деловањем магнетног поља мењају своје димензије (гвожђе, кобалт, никл, итд.). Уколико се лаки штап израђен од оваквих метала нађе у променљивом

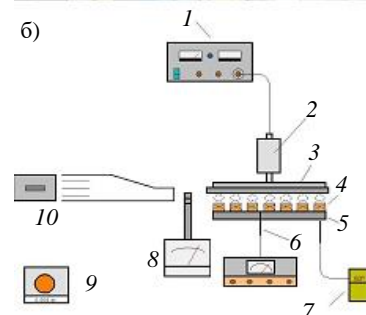
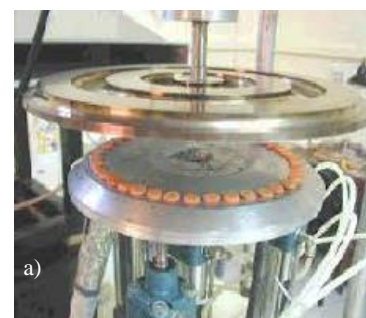


Слика 6.125: Илустрација скале са приближним распоном фреквенција звука.

магнетном пољу одговарајуће фреквенције, може се довести у стање резонантног подужног осциловања које ће генерисати ултразвучну вибрацију.

Примена ултразвучних таласа у контексту сушења прехранбених материјала дешава се у току предтретмана материјала за сушење и/или у току главног процеса сушења. *Ултразвучни предтретман* подразумева директно или индиректно излагање материјала ултразвучним вибрацијама пре процеса сушења. Ултразвук генерише низ ефеката који подразумевају низ брзих компресија и експанзија материјала, које утичу на унутрашњу и спољашњу отпорност материјала на преношење влаге. Директним ултразвучним предтретманом побољшава се процес сушења, интензивирањем преношења масе и топлоте и феномена микро струјања у структури материјала. Такође, повећава се ефективна дифузивност влаге током конвективног или осмотског сушења. *Сушење уз помоћ ултразвучних вибрација* може да изазове различите физичке и механичке ефекте укључујући варијације акустичног притиска, компресију и разређивање, појаву микроплазова и микрострујања на релацији гас/течност који могу да смање граничне слојеве дифузије, повећавајући преношење масе и убрзавајући брзину дифузије/дехидрације. Уобичајено је да се ултразвучни процес комбинује са другим одговарајућим методама сушења.

Ултразвучно-конвективно сушење представља комбинацију ултразвучних вибрација високог интензитета са конвективним сушењем (Табела 6.11). Предности ове спреге су смањено време сушења и нижа температура сушења, умањена потрошња енергије, очување боје и биоактивних једињења у осушеном производу. Ефекат примене ултразвука може се лако уочити при ниској температури сушења и малој брзини струјања ваздуха. Такође, примена ултразвука је ефикасни-

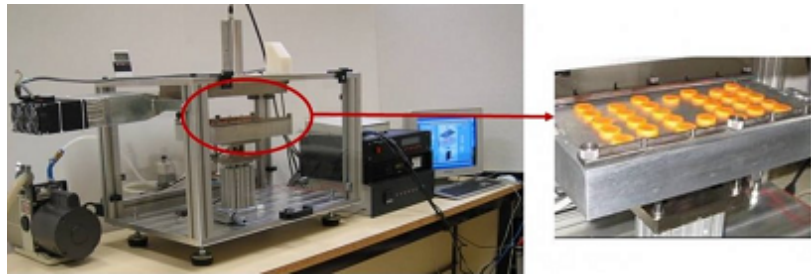


Слика 6.126: Ултразвучно-конвективно сушење са ултразвучним вибрацијама ваздуха око материјала [137]: а) детаљ вибрирајуће плоче (спирални облик) са материјалом поређаним на подлози, б) шема система. 1 - електрични генератор, 2 - претварач, 3 - вибрирајућа плоча, 4 - узорак материјала, 5 - подлога, 6 - термометар, 7 - микрофон, 8 - анемометар, 9 - аквизиција за мерење масе, 10 - јединица за припрему топлот ваздуха.

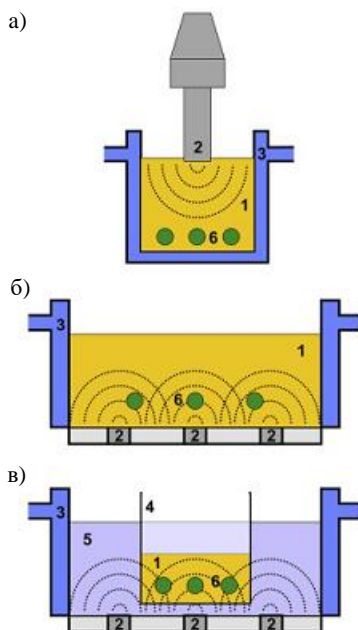
Табела 6.11: Примена ултразвука при конвективном сушењу неких намирница.[138]

Материјал	Параметри	Резултат
Јабука	40÷60°C, 0÷90 W, 1 m/s	46÷57% краће време сушења, 42÷54% умањена потрошња енергије
Црвена паприка	70°C, 42 W	23% краће време сушења
Плави парадајз	40°C, 0÷90 W	75% краће време сушења
Бакалар	10÷30°C, 0÷45 W	90% краће време сушења при 10°C, 32,2% при 20°C, 8,3% при 30°C
Першун лист	30°C, 300 W	29,8% краће време сушења, 33,6% умањена потрошња енергије
Мајчина душица	40÷80°C, 1÷3 m/s, 0÷18,5 kW/m ³	краће време сушења
Јагода	40÷70°C, 0÷60 W	13÷47% краће време сушења

Слика 6.127: Ултразвучно-конвективно сушење са ултразвучним вибрацијама подлоге на којој материјал стоји. [137]



15: Ултразвучна кавитација подразумева процес раста и колапса течних шупљих мехурића под дејством ултразвука, као и низ промена звучног притиска који их прате. Теоријске студије показују да се у локалном простору кавитета може створити високи притисак преко 105 МПа. Кавитација се обуставља при високом притиску, али се може подстаћи присуством раствореног гаса и нечистоћа у течности.



Слика 6.128: Ултразвучно-осмотско сушење са ултразвучним вибрацијама [139]: а) директна апликација са ултразвучном сондом, б) директна апликација са ултразвучним кадом, в) индиректна апликација са ултразвучним кадом.

1 - осмотски раствор, 2 - претварач, 3 - флуид за хлађење, 4 - посуда са материјалом, 5 - дестилована вода, 6 - материјал.

ја током почетног периода сушења. Постоји два начина за апликацију ултразвука код конвективног сушења. Први, који подразумева да је ваздух који опструјава материјал директно изложен ултразвучним вибрацијама (Слика 6.126), тако да је материјал окружен средином која ултразвучно вибрира. Без обзира на то да ли је ваздух топао или хладан, примена ултразвука убрзава процес сушења. Други начин подразумева да се материјал у конвективној сушари налази на подлози која ултразвучно вибрира (Слика 6.127), чиме се вибрације директно преносе и на материјал са којим је у непосредном контакту. Добро усклађивање акустичне импедансе између вибрирајуће плоче претварача и материјала, омогућиће ефикасније продирање енергије ултразвучног таласа и повећати ефикасност процеса.

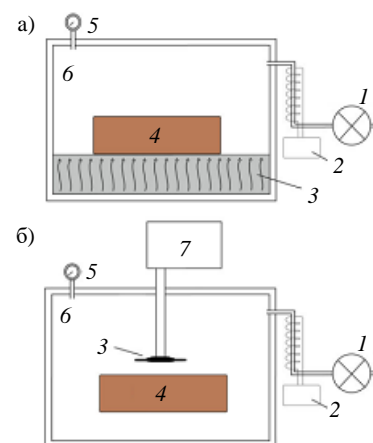
Ултразвучно-осмотско сушење је метода сушења током које је осмотски раствор изложен ултразвучним таласима. Ултразвук се у овом случају користи за побољшање преношења масе током осмотске дехидрације. Ултразвучни таласи ниске фреквенције (20÷100 kHz) изазивају појаву кавитације.¹⁵ Кавитација изазива серију брзих контракција и експанзија у ткиву хране, и утиче на физичко-хемијске и биохемијске особине хране (Табела 6.12). Као последица кавитације, у материјалу се креирају микроскопски канали или капиларе, чиме се побољшава проток осмотског раствора у међућелијски простор, попут све већег упијања воде код сунђера при стискању. Стога, овај ефекат се назива *ефектом сунђера* (енг. *sponge effect*). За разлику од конвенционалних метода сушења, осмотско сушење је операција течност-чврста материја, тако да је губитак енергије услед кретања ултразвучног таласа занемарљиво мали. Два уобичајена начина за апликацију ултразвука током процеса осмотског сушења су апликација ултразвучном сондом и апликација ултразвучном кадом (Слика 6.128). Директна апликација подразумева да је претварач у директним контактом са осмотским раствором. Индиректна апликација подразумева постојање посредника (најчешће неке течности) за пренос ултразвучних вибрација. Оба начина се могу користити за побољшање осмотске дехидратације током главног процеса сушења или као предтретман.

Табела 6.12: Примена ултразвука при осмотском сушењу неких намирница.[138]

Материјал	Параметри	Резултат
Јабука	40÷70°C, 50 kHz	14÷27% већа брзина сушења
Броколи	10÷40 min, 35°C, 40 kHz	већа брзина транзиције
Брусница	35 и 135 kHz	деградација боје, пуцање
Киви	10÷30 min, 35 kHz	позитиван ефекат на преношење масе
Јагода	2, 25 и 40 kHz	краће време сушења, више издвојене влага

Ултразвучно-вакуумско сушење је метода сушења која комбинује вакуумску дехидратацију и примену ултразвучних таласа (Табела 6.13). Ову методу одликује одлична рехидратација, очувана органолептичка својства и изглед осушеног материјала. Применом ултразвука током вакуумског сушења формира се велики број микроканала тако да се и слободна и везана вода лакше уклањају из материјала (Слика 6.129). Брзина сушења се на тај начин повећава без великог повећања температуре материјала. Кавитација која се формира може бити *пролазна* или *стабилна*. *Стабилна кавитација* се формира ултразвучним таласима снаге 1÷3 W/cm², док је за формирање *пролазне кавитације* потребан ултразвук снаге од око 10 W/cm². Стабилна кавитација, за разлику од пролазне, не оштећује структурна својства материјала, те је због тога пожељна током вакуумског сушења.

Ултразвучно-лиофилизационо сушење је метода сушења која представља комбинацију методе лиофилизационог сушења и примене ултразвука. Оваква спрега може се остварити током два карактеристична тренутка поступка лиофилизације: *замрзавања и сушења материјала*. *Ултразвучно помоћно замрзавање*, односи се на примену ултразвука током формирања кристала леда током замрзавања воде присутне у материјалу. Мали кристали леда, који се иницијално формирају унутар ћелијског материјала хране током замрзавања, настављају да расту и разбијају неке од ћелијских зидова, што доводи до делимичног уништења структуре материјала. Замрзавање уз истовремену апликацију ултразвука на материјал, обезбеђује брзо и равномерно замрзавање, уз формирање малих кристала леда једнаке величине. Оваквим



Слика 6.129: Ултразвучно-вакуумско сушење са ултразвучним вибрацијама [138]: а) директна апликација, б) индиректна апликација.

1 - вакуум пумпа, 2 - кондензатор влаге, 3 - претварач, 4 - материјал, 5 - вакууметар, 6 - вакуумска комора, 7 - генератор.

Табела 6.13: Примена ултразвука при вакуумском сушењу неких намирница.[138]

Материјал	Параметри	Резултат
Говедина	55÷75°C, 40 kHz, 590 W	8,3÷37,5% краће време сушења
Пилетина	55÷75°C, 40 kHz, 590 W	10,8÷46,2% краће време сушења
Лосос филети	55÷75°C, 40 kHz, 590 W	7,4÷25,7% краће време сушења
Пастрмка филети	55÷75°C, 40 kHz, 590 W	21,9÷27,4% краће време сушења

поступком значајно се смањује оштећење ћелија и чува интегритет производа, чак и при одмрзавању. *Примена ултразвуча шоком током употреба лиофилизације*, у тренутку када се дешава сублимација влаге из материјала, принципијелно се не разликује од примене код вакуумског сушења. Скраћивање времена сушења (за више од 40%) и умањена потрошња електричне енергије омогућавају брзу отплату инвестиције и могућност сушења веће количине хране уз очување максималног квалитета финалног производа.

6.20 Сушара са технологијом Refractance Window®

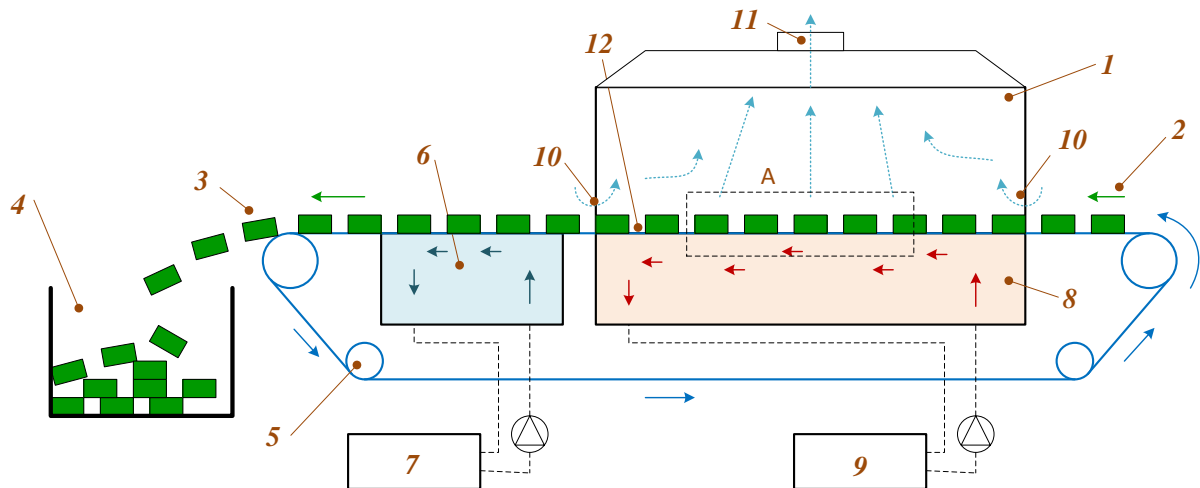
Технологија под називом „*refractance window*” је нова метода сушења за производњу висококвалитетних сувих производа или производа са веома малим садржајем воде у облику праха, пахулица или листова од воћа, поврћа или концентрата зачинског биља, на ефикасан начин у погледу времена и енергије. Ову технологију је 2000. године представила компанија *MCD Technologies* под поменутиим називом *Refractance Window*® - *RW* (Слика 6.130). Бројна истраживања су указала на то да се сушењем материјала *RW* технологијом постиже боље очување нутритивних, физичко-хемијских и органолептичких својстава у осушеном материјалу, у поређењу са другим методама сушења.

Основни концепт *RW* технологије подразумева коришћење воде, као радне материје за загревање материјала до температура испод тачке кључања и на атмосферском притиску, као и касније расхлађивање осушеног материјала (Слика 6.131). Танак слој материјала, најчешће кашастих материјала или воћних/поврћних пиреа, поставља се на транспарентну подлогу (акрилни филм) која је у контакту са површином топле воде, а која је саставни део (трака) тракастог транспортера. Подлога је релативно транспарентна за инфрацрвено зрачење.

Приликом загревања воде присутна су сва три механизма преношења топлоте: кондукција, конвекција и зрачење. Губитак топлоте или енергије из воде у њену околину настаје или кондукцијом или испаравањем, док су конвекција и зрачење унутрашњи процеси. Ако се на површину воде постави прозирни слој материјала онда се губитак енергије може десити само путем кондукције. Међутим, када се влажан материјал стави на површину пластичне мембране, вода у материјалу ствара „прозор” (енг. *window*) који омогућава пролаз инфрацрвеног зрачења кроз материјал (Слика 6.132а).



Слика 6.130: Илустрација изгледа и рада сушаре са *RW* технологијом.[140]

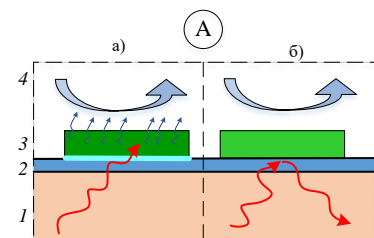


Слика 6.131: Шематски приказ рада сушаре са *RW* технологијом.

1 - комора, 2 - улаз материјала, 3 - излаз материјала, 4 - прикупљање материјала, 5 - механизам покретне траке, 6 - посуда са хладном водом, 7 - подсистем за припрему хладне воде, 8 - посуда са топом водом, 9 - подсистем за припрему топле воде, 10 - улаз ваздуха, 11 - отпадни ваздух, 12 - покретна трака (подлога).

Наиме, коефицијент рефлексије/преламања (енг. *refraction*) на додирној површини материјала и транспарентне подлоге има повољне вредности у смислу селективног пропуштања инфрацрвеног зрачења, све док је материјал довољно влажан. Топлота се понаша као да нема мембране и директно се преноси на воду која је остала у материјалу. У овом тренутку могу да се јаве све три методе преноса топлоте и то изазива веома брз пренос топлоте у производ и брзо испаравање влаге. Овај „прозор” се током времена полако затвара, како производ губи влагу, чиме се и пренос топлоте смањује. У тренутку када влаге у материјалу не буде довољно да „прозор” за пролаз инфрацрвеног зрачења буде „отворен”, инфрацрвени зраци се одбијају од пластичне подлоге (Слика 6.132б), преламају у враћају назад загрејани резервоар воде, не излажући материјал више топлоти. Имајући у виду то да је пластична подлога лош проводник топлоте, само мали део топлоте кондукцијом доспе до материјала, чиме се значајно умањује ризик од прегревања материјала. На крају процеса сушења, температура материјала се додатно обара преласком транспортера преко хладне површине воде, после чега се материјал механички уклања са подлоге (саструже).

Главни елемент сушаре са *RW* технологијом је транспарентна подлога израђена од *акрилних* или *полиестерских* материјала.¹⁶ Транспарентна подлога је истовремено и трака транспортера, која се креће додирујући површину топле воде, клизи по површини брзином од $0,6 \div 3$ m/min. Дебљина танког слоја материјала који се наноси на транспарентну подлогу износи $0,2 \div 1$ mm, док је дебљина транспарентне по-



Слика 6.132: Детал А означен на шеми (Слика 6.131) са приказаним слојевима: а) влажан материјал и отворен „прозор” за пролаз инфрацрвених зрака, б) сув материјал и инфрацрвени зраци се одбијају назад.

1 - вода, 2 - подлога, 3 - материјал, 4 - ваздух.

16: Једина сличност између ових материјала је да су оба вештачког порекла. *Акрилна влакна* су израђена на бази целулозе, док су *полиестерска влакна* направљена од петрохемијских сировина. Једна од специфичних разлика је у томе да је акрилни материјал бољи термоизолатор, док је полиестер отпорнији на температурне контракције али не и на високе температуре.



Слика 6.133: Илустрација лабораторијске инсталације за сушење материјала према концепту *RW* технологије. [141]

17: Аскорбинска киселина је органско једињење које се јавља у природи и поседује антиоксиданске особине. То је бела чврста материја која се добро раствара у води и једна је од компоненти витамина С. Спада у групу дијеталних микронутријената - витамина.

18: Антиоцијанини су пигменти који се налазе готово у свим тивима биљака, растворљиви су у води, без мириса и укуса. Поседују пробиотичка и антиоксиданска својства.

длоге најчешће $<0,2$ mm. У почетку, док је материјал још увек влажан, апсорбоваће инфрацрвено зрачење које је прошло кроз „прозор“, таласних дужина $3,0 \div 15,3$ μm . У већини случајева температура материјала не прелази 70°C , што се постиже са температуром воде која се налази на температурама нижим али блиским температури кључања.

На брзину сушења материјала може се утицати квалитативно, јер се на процес може утицати подешавањем више различитих параметара као што су: температура и брзина струјања топле воде у резервоару испод транспарентне подлоге, брзина струјања ваздуха изнад материјала, брзина кретања транспортера. Лабораторијске инсталације које користе ову технологију најчешће поседују и много више могућности за регулацију и испитивање ефикасности целокупног процеса сушења (Слика 6.133). Дебљина насутог слоја материјала и брзина сушења су параметри који највише утичу на коначни квалитет осушеног материјала.

Главна предност примене *RW* технологије сушења је задржавање битних биоактивних састојака у осушеном материјалу. Ове биоактивне супстанце су осетљиве на повишено излагање материјала температурама и применом других конвенционалних метода сушења могу се изгубити из материјала. Неке од таквих супстанци су: аскорбинска киселина,¹⁷ антиоцијанини,¹⁸ и каротиени.¹⁹

Квалитет осушених производа постигнут *RW* технологијом приближно је исти оном постигнутом лиофилизационим сушењем, али је трошак енергије неупоредиво нижи од лиофилизације (Табела 6.14). Ниски инвестициони и оперативни трошкови, чине *RW* технологију сушења погодном за примену у мање развијеним земљама, где би примена других ефикасних метода била неизводљива због велике цене. Цена инвестиционих трошкова *RW* технологије је приближно једнака $1/3$ цене система за лиофилизацију, док је цена оперативних трошкова мања и за више од 50%. Велика енергетска ефикасност процеса огледа се у могућности да се испарена

Табела 6.14: Поређење различитих конвенционалних типова сушења са *RW* технологијом.[142]

Метода сушења	Снага, kW	Капацитет, $\text{kg}_w/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$	Топлотна ефикасност, %
Конвективна	20÷35	0,3÷1,8	35÷40
Са распрскивањем	11÷33	1÷30	20÷51
Добошаста	2,11÷4,41	6÷20	35÷78
Леофилизациона	130,65	0,0027÷0,0037	30÷32
<i>RW</i> лабораторијска	11,5÷13,8	4÷8	52÷72
<i>RW</i> индустријска	15,81÷17,54	3,1÷4,6	33,3÷53,2

влага из материјала рекондезује и врати у процес мешајући се са радном материјом. Обзиром на малу потрошњу воде, услед рекулеријације влаге из материјала кроз систем припреме топле воде, овом технологијом сушења практично се и не ствара издувна прашина у околини сушаре (чест проблем код конвенционалних метода сушења), што доприноси очувању квалитета ваздуха око постројења за сушење. *RW* технологија сушења је еколошки прихватљива метода сушења.

19: *Каротиени* су незасићени угљоводоници које синтетишу биљке. Допринесе фотосинтези код биљка. Допринесе фотосинтези код биљка. У људској исхрани, после уношења у тело, претварају се у витамин А, који има антиоксиданске особине и игра јако битну улогу у људској исхрани.

6.21 Хибридне сушаре

Хибридне методе сушења обухватају процесе који користе више од једне коморе за сушење или више различитих начина преношења топлоте приликом загревања материјала, као и оне процесе током којих материјал пролази кроз две или више међусобно различитих фаза/степенa сушења, како би се постигла тражена финална влажност материјала, квалитет материјала, време сушења и производни капацитет (Слика 6.134). Комбиновање различитих метода и техника сушења може допринети ефикасном сушењу у смислу побољшаног квалитета осушеног материјала и смањене потрошње енергије, као примарних проблема који се јављају током сушења намирница. Хибридноста система сушења може се посматрати



Слика 6.134: Класификација хибридних сушара које се најчешће срећу у пракси.

Табела 6.15: Фактори који највише утичу на квалитет намирнице током процеса сушења.

<i>Микробиолошки фактори</i>
патогени, кварење, токсини.
<i>Хемијски фактори</i>
маилардова реакција, оксидација липида, губитак боје, нарушавање ароме, желатинизирање.
<i>Физички фактори</i>
рехидратација, растворљивост, текстура, губитак ароме, порозност, контракција, формирање покорице, деформација матрице.
<i>Нутритивни фактори</i>
губитак витамина, губитак протеина, губитак масних киселина, губитак функционалности, опстанак микробактерија.

и из перспективе комбиновања различитих извора енергије који се користе за погон сушаре, као што су соларна енергија, енергија биомасе, енергија ветра или енергија фосилних горива.

Хибридне сушаре поседују већу ефикасност сушења, већу енергетску ефикасност, ефикаснији процес уклањања влаге, бољи квалитет производа и веће задржавање нутритивних и биоактивних једињења у осушеној намирници у поређењу са конвенционалним сушарама. Хибридне сушаре су у стању да побољшају: кинетику сушења и квалитет производа оптимизацијом сваке примењене технике сушења засебно (у смислу преноса топлоте и масе), очување нутритивних и биоактивних једињења (нпр. витамина и антиоксиданаса) и производњу осушених намирница са одличним квалитетом.

Основна мотивација за развој и примену хибридних технологија сушења је да се минимизира деградација материјала током процеса сушења, уз истовремено добијање производа са жељеним садржајем влаге. Параметри квалитета осушене намирнице су најважнији али не и једини фактор приликом одређивања за примену различитих механизма сушења. Пројектовање хибридне сушаре и поступак њене употребе базира се на следећим аспектима:

1. *Квалитет производне* могуће је постићи прецизном контролом садржаја влаге у производу, што ће довести до тога да се на крају процеса сушења добије намирница код које су хемијска деградација и промене у структури и текстури сведене на минимум.
2. *Економичност процеса* хибридне сушаре огледа се у смањењу трошкова и побољшању капацитета по јединици количине опреме потребне за изградњу сушаре, развоју једноставне опреме за сушење која је поуздана и која захтева минималано опслуживање, и развоју стабилног процеса који је се континуирано спроводи.
3. *Еколошки аспекти* се огледају у тежњи да се смањи потрошња енергије током операције сушења и смањи утицај сушења на животну средину услед губитка производа у токовима отпада.

Да бисмо разумели како би примена хибридних технологија сушења побољшала квалитет производа, потребно је разумети процес деградације намирница. Квалитет многих прехранбених производа погоршава се током сушења на температурама већим од собне. Време излагања производа повишеној температури агенса сушења утиче на брзину деградације квалитета хранљивих материја (Табела 6.15). Губитак хранљивих материја може се посматрати као разлагање одређе-

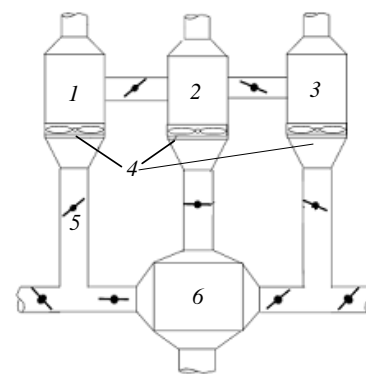
них хемијских једињења током процеса сушења. Ова разгадња зависи од температуре сушења. Дужи период константне брзине сушења повећава задржавање хранљивих материја у материјалу јер се материјал током овог периода налази на нижој температури због евапоративног хлађења своје површи. Код конвективног сушења деградација материјала се може умањити директном контролом параметара сушења (температуре, релативне влажности и брзине струјања ваздуха).

Разноврсност прехранбених материјала је увела многе методе сушења и типове сушара у прехранбену индустрију. Могућности примене новијих хибридних технологија за сушење намирница су практично неограничене.

Вишекоморно сушење је хибридна технологија сушења која подразумева пројектовање система сушења који ће истовремено опслуживати неколико комора за сушење разноврсног асортимана прехранбених материјала. Пример оваквог система је примена топлотне пумпе ниског капацитета за снабдевање ваздухом неколико различитих комора према унапред утврђеном распореду (Слика 6.135). Ово је могуће извести из разлога што многи прехранбени материјали имају дугачке периоде опадајуће брзине сушења. Постоји неколико предности због чега би сушара имала више комора:

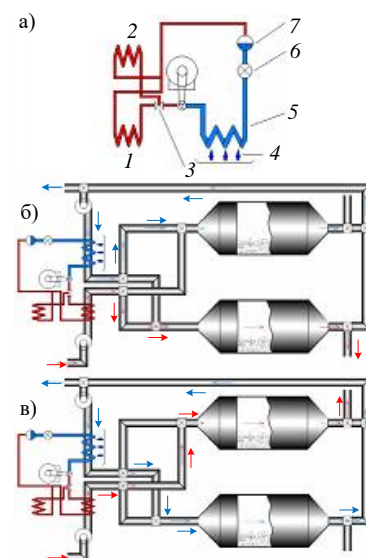
- ▶ побољшан квалитет осушеног материјала у смислу боје површине и тврдоће;
- ▶ побољшана енергетска ефикасност правилним снабдевањем комора ваздухом;
- ▶ смањени трошкови инвестиције и потребан простор;
- ▶ једноставно управљање температуром у коморама у зависности од врсте материјала који се суши.

У случајевима када је за сушење материјала потребна мала количина ваздуха, коморе могу радити у низу (редно повезане), при чему ће се ваздух из топлотне пумпе усмераваати узастопно у две или више комора (Слика 6.136), које могу сушити исте или различите производе. Топлотна пумпа овако може да ради у оптималном режиму скоро у сваком тренутку времена, а капацитет сушења се може удвостручити или утростручити применом допунског загревања помоћу инфрацрвеног зрачења, микроталасно или радиоталасно. Посматрано са економског становишта, најатрактивнији аспект вишекоморног сушења је смањење инвестиционих и оперативних трошкова, јер је један систем сушења способан да испуни задатак за који би иначе било неопходно поседовати два или више одвојених система сушења.



Слика 6.135: Илустрација вишекоморне сушаре са топлотном пумпом. [143]

1,2,3 - коморе, 4 - вентилатор, 5 - регулационе клапне, 6 - топлотна пумпа.



Слика 6.136: Илустрација двокоморне сушаре са топлотном пумпом и сушењем у флуидизованом слоју: а) шема топлотне пумпе, б) шема хибридног система у случају хлађења прве и загревања друге коморе, в) шема хибридног система у случају загревања прве и хлађења друге коморе. [144]

1 - екстерни кондензатор, 2 - кондензатор, 3 - трокраки вентил, 4 - кондензација и уклањање влаге из ваздуха, 5 - испаривач, 6 - пригушни вентил, 7 - рисивер.

Прилози

Ознаке и јединице

A

A.1 Грчка слова са начином изговора

Слово	Изговор	Слово	Изговор
A, α	алфа	N, ν	ни
B, β	бета	Ξ, ξ	кси
Γ, γ	гама	O, o	омикрон
Δ, δ	делта	Π, π	пи
E, ϵ, ε	епсилон	P, ρ, ϱ	ро
Z, ζ	зета	Σ, σ	сигма
H, η	ета	T, τ	тау
$\Theta, \theta, \vartheta$	тета	Υ, υ	ипсилон
I, ι	јота	Φ, ϕ, φ	фи
K, κ, \varkappa	капа	X, χ	хи
Λ, λ	ламбда	Ψ, ψ	пси
M, μ	ми	Ω, ω	омега

А.2 Међународни систем префикса мерних јединица

10^n	Префикс	Сим-бол	Име броја по краћој скали	Име броја по ду-жој скали	Децимални еквивалент
10^{24}	јота	Y	септилион	квадрилион	1.000.000.000.000.000.000.000.000
10^{21}	зета	Z	секстилион	трилијарда	1.000.000.000.000.000.000.000
10^{18}	екса	E	квинтилион	трилион	1.000.000.000.000.000.000
10^{15}	пета	P	квадрилион	билијарда	1.000.000.000.000.000
10^{12}	тера	T	трилион	билион	1.000.000.000.000
10^9	гига	G	билион	милијарда	1.000.000.000
10^6	мега	M		милион	1.000.000
10^3	кило	k		хиљада	1.000
10^2	хекто	h		сто	100
10^1	дека	da		десет	10
10^0				један	1
10^{-1}	деци	d		десети део	0,1
10^{-2}	центи	c		стоти део	0,01
10^{-3}	мили	m		хиљадити део	0,001
10^{-6}	микро	μ		милионити део	0,000001
10^{-9}	нано	n	билионити део	милијардити	0,000000001
10^{-12}	пико	p	трилионити	билионити део	0,000000000001
10^{-15}	фемто	f	квадрилионити	билијардити	0,000000000000001
10^{-18}	ато	a	квинтилионити	трилионити	0,000000000000000001
10^{-21}	зепто	z	секстилионити	трилијардити	0,000000000000000000001
10^{-24}	јокто	y	септилионити	квадралијардити	0,000000000000000000000001

Прехрамбени материјали

В

В.1 Особине материјала

Табела В.1: Влажност појединих намирница.

Категорија	Намирница	Влажност, % $kg_w/kg_{v.m.}$
Месо	Свињетина, свежа, немасно	53÷60
	Свињска сланина	50
	Свињска маст	39
	Говедина, свежа, малопродаја	50÷70
	Пилетина, свеже, без коже	74
	Риба, филети	65÷81
Воће	Бобице, Трешња, Крушка	80÷85
	Јабука, Бресква, Поморанца, Грејпфрут	90
	Јагоде, Парадајз	90÷95
Поврће	Авокадо, Банана, Грашак	74÷80
	Цвекла, Броколи, Шаргарепа, Кромпир	85÷90
	Аспарагус, Пасуљ, Купус, Карфиол, Зелена салата	90÷95
Морска храна	Хоботница, краци	80,35
	Шкампи	80,81
	Лигња	79÷83
	Туна	70
	Козице	75÷77
Масноће	Сипа	80÷87
	Путер	14÷15,5
Разно	Маргарин	9÷15
	Кокос, нарендан	1,1÷51,7
	Сир	79,5
	Јаје, беланце	87
	Јаје, жуманце	48
	Брашно	12÷13,5
	Печурка	10÷89
	Пистаћи	5÷25
	Кромпир пире	79,5
	Суво грозђе	24,5
	Пиринач	10,5÷13,5
	Соја	0÷38
	Шећер	13
Џем	13÷60	

Табела В.2: Порозност слоја неких свежих намирница.

Број	Намирница	Порозност, %
1	Ананас	16,5÷17,3
2	Кајсија	4,75÷5,40
3	Банана	11,9÷14,2
4	Вишња	1,2÷2,1÷1610
5	Трешња	1,6÷3,5
6	Лимун	4,2÷7,8
7	Јабука	20,7÷28,3
8	Парадајз	2,6÷4,5
9	Рибизла	4,3÷8,2
10	Мандарина	42,8
11	Ротквица	6,3
12	Шаргарепа	2÷10
13	Плави патлиџан	36÷50
14	Бресква	1,6÷5,2
15	Грожђе	0,1÷0,6
16	Краставац	14,8÷18,3
17	Кромпир	4÷9
18	Лук	18,6÷19,4

Табела В.3: Густина неких састојака хране и прехранбених материјала.

Број	Састојак/материјал	Густина, kg/m ³
1	Глукоза	1560
2	Сахароза	1590
3	Скроб	1500
4	Целулоза	1270÷1610
5	Протеини	1400
6	Масти	900÷950
7	Маслиново уље	900
8	Млеко	1028
9	Сир	1230
10	Кухињска со	2160
11	Лимунска киселина	1540
12	Вода	1000
13	Лед	920
14	Свеже воће	865÷1067
15	Свеже поврће	801÷1095
16	Свежа риба	967
17	Замрзнуто воће	625÷801
18	Замрзнуто поврће	561÷977
19	Замрзнута риба	1056
20	Желатин	1270
21	Етил алкохол	789

Табела В.4: Насипне густине појединих материјала.

Категорија	Материјал	Насипна густина, kg/m ³
Свежи материјали	Зелена крма	300÷400
	Зелена крма, сечена на 10cm, слој висок до 1,5m	225
	Ливадска трава, Зелена детелина	350
	Луцерка	340
	Клипови кукуруза	525
	Кромпир	550÷750
	Шећерна репа	650÷700
	Шаргарепа	705
	Лишће шећерне репе са одсеченим делом главе	360
	Јабукe	544÷608
	Грожђе	368
	Лимун	768
	Лук, црвени	640÷736
	Осушени материјали	Крмно биље, исечено
Крмно биље, млевено		300÷400
Крмно биље, пресовано		700÷750
Травно брашно		125
Брикети осушених материјала	Трава	420
	Детелина	352
	Луцерка	376÷572
	Црвена детелина	500÷540
	Грануле травног брашна	455÷560
Сено	дужине до 20mm	120÷140
	дужине до 40mm	100÷120
	дужине до 60mm	80÷100
Зрнасте културе	Пшеница, сува	765
	Раж, сува	730
	Јечам, сув	610
	Кукуруз, у клипу	340
	Кукуруз, крупно зрно	740
	Кукуруз, ситно зрно	790
	Кукуруз, кочанке, окласак	200
	Кафа, инстант	330
Прашкasti материјали	Кафа, пржена и млевена	330
	Какао	480
	Брашно	450
	Млеко	610
	Шећер, прах	480
	Коренaсто-кртоласте културе	Кромпир, брашно
Кромпир, грануле		564
Кромпир, сок		430÷450
Шећерна репа, сок		300÷390
Шећерна репа, грануле лишћа		765
Осушено лишће трава		300÷390

В.2 Параметри сушења

Табела В.5: Релативне влажности неких материјала на почетку и крају процеса сушења и максималне температуре сушења (део 1/2).[84, 109]

Број	Намирница	Почетна влажност, % $kg_w/kg_{v.m.}$	Крајња влажност, % $kg_w/kg_{v.m.}$	Температура агенса сушења, °C
1	Ананас	80	10	65
2	Банана	80	15	70
3	Бресква	85	18	65
4	Грашак	80	5	65
5	Грођже	80	15÷20	70
6	Гуава	80	7	65
7	Дуван	85	12	35÷70
8	Дуд	80	10	65
9	Ђумбир	80	10	-
10	Зелени пасуљ	70	5	75
11	Јабука	80	24	70
12	Јечам	18÷20	11÷13	40÷82
13	Кајсија	85	18	65
14	Кардамом	80	10	45÷50
15	Карфиол	80	6	65
16	Кафа	65	11	-
17	Кикирики	40÷55	8÷10	-
18	Кисељак	80	20	65
19	Кромпир	75÷85	7÷14	75
20	Кукуруз	24÷35	14÷15	60
21	Купус	80	4	55
22	Лековито биље	85	11	35÷50
23	Лук, бели	80	4	55
24	Лук, црни	80	4	55
25	Махунарке	20÷22	9÷10	40÷60
26	Мушкатни орах	80	20	65
27	Овас	20÷25	12÷13	43÷82
28	Памук	25÷35	5÷7	-
29	Паприка	80	10	55
30	Парадајз	96	10	60
31	Пиринач, парабол	30÷35	13	50
32	Пиринач, сиров	22÷24	11	50
33	Пшеница	18÷20	112÷16	43÷82
34	Раж	16÷20	11÷13	43÷82
35	Семе уљарица	20÷25	7÷9	40÷60
36	Сено	30÷60	12÷16	35÷45
37	Соја	20÷25	1	61÷67
38	Спанаћ	80	10	-
39	Цвекла	75÷85	10÷14	-
40	Чај	75	5	50

Табела В.6: Релативне влажности неких материјала на почетку и крају процеса сушења и максималне температуре сушења (део 2/2).[84, 109]

Број	Намирница	Почетна влажност, % $kg_w/kg_{v.m.}$	Крајња влажност, % $kg_w/kg_{v.m.}$	Мах. температура сушења, °C
40	Чај	75	5	50
41	Чили паприка	75÷90	13÷20	35÷45
42	Шаргарепа	70	5	75
43	Шљива	85	15	55

Табела В.7: Основни параметри конвективног сушења воћа и поврћа

Број	Намирница	Температура агенса суше- ња, °C	Време су- шења, h	Крајња влажност, $kg_w/kg_{v.m.}$	Однос вла- жног и сувог материјала, $kg_{v.m.}/kg_{s.m.}$
1	Боровница	45÷55	4÷6	12	7
2	Јабука	90÷65	6÷12	15	9
3	Крушка	90÷65	6÷8	16	7
4	Кајсија	45÷70	10÷36	18	8
5	Шљива	45÷65	10÷18	22	5
6	Шипурак	100÷65	2÷3	10	2
7	Смоква	50÷70	14÷18	25	3,5
8	Грожђе	50÷70	12÷20	17	44,5
14	Банана	45÷70	8÷10	-	-
14	Трешња	45÷70	24÷36	-	-
9	Кромпир	80÷65	3÷4	12	5,5
10	Грашак	80÷65	3÷5	9	4
11	Боранија	80÷65	3÷5	9	10
12	Шаргарепа	85÷65	3	8	16
13	Црни лук	70÷65	3÷9	8	9
14	Купус	85÷65	2÷3	8	12,5

Табела В.8: Смернице за припрему воћа за сушење

Намирница	Припрема	Предтретман	Тест осушености
Јабука	Ољуштити (опционо) и уконтити језгро. Исећи на комаде или прстенове дебљине до 6mm.	Без третмана, аскорбинском киселином, лимунском киселином, шећерни сируп, медни сируп, или сумпорене.	Суви унутрашњи слојеви, хрскава кора
Кајсија	Преполовити, уклонити коштицу, издубити. Нарезати на кришке или 1/4.	Аскорбинском киселином, лимунском киселином, шећерни сируп, медни сируп, или сумпорене.	Суви унутрашњи слојеви, еластична.
Банана	Ољуштити и исећи попречно или подужно на комаде дебљине 6-10mm.	Без, аскорбинском киселином, лимунском киселином.	Савитљиво до хрскаво.
Боровница	Уклонити стабљике.	Без, бланширање у води.	Смежуране и кожасте.
Трешња	Уклонити коштице. Исећи на пола или сушити целе без језгра.	Без, сумпорене.	Савитљива и кожаста.
Кокос	Оцедити млеко. Очистити браон кору, месо исећи на комадиће или нарендати.	Без.	Савитљиво до хрскаво.
Брусница	Уклонити стабљике.	Без, бланширање у води.	Смежуране.
Смоква	Исећи на половине. Сушити са кором окренутом на доле.	Без, бланширање у шећерном сирупу.	Кожаста, љушти се, суви унутрашњи слојеви.
Грожђе	Бирати бесемене сорте.	Бланширање у води 30 секунди како би пукла покорица. Оцедити.	Кожасто, савитљиво.
Киви	Ољуштити. Исећи на листове дебљине до 6mm.	Без.	Кожаст, савитљив.
Папаја	Ољуштена, исечена на половине или листове, уклонити семе.	Без, бланширање у шећерном сирупу.	Кожаста, не лепљива.
Бресква	Ољуштена, исечена.	Без третмана, аскорбинском киселином, лимунском киселином, шећерни сируп, медни сируп, или сумпорене.	Кожаста, не лепљива.
Крушка	Ољуштена, исечена на 1/2 или 1/4 подужно.	Без третмана, аскорбинском киселином, лимунском киселином, шећерни сируп, медни сируп, или сумпорене.	Кожаста, не лепљива.
Ананас	Ољуштена, исечена на комадиће дебљине до 6mm	Без, бланширање у шећерном сирупу.	Кожаста, не лепљива.
Шљива	Исећи на пола и уклонити језгро.	Без, сумпорене.	Кожасто, савитљиво.
Јагода	Уклонити стабљике.	Без.	Кожасто, савитљиво.

Табела В.9: Смернице за припрему поврћа за сушење

Намирница	Припрема	Предтретман	Тест осушености
Цвекла	Одабрати нежну цвеклу, добре боје, без дрвености. Скувати на пари или у врелој води. Охладити, исећи корен, круму и ољуштити. Исећи на траке или кришке дебеле до 6mm.	Бланширање на пари или води (25÷30min).	Чврста, крта.
Броколи	Скратити и исећи као за сервирање подужно на 1/4.	Бланширање у води (2÷3min) или на пари (3÷5min).	Хрскав.
Купус	Уклонити спољне листове и језгро. Исећи на резанце дебљине око 3mm.	Бланширати на пари (2÷3min).	Хрскав.
Шаргарепа	Одабрати нежне, крте плодове, без дрвености. Исећи на резанце или листове дебљине до 6mm.	Бланширати на пари (3÷4min).	Чврста, крта.
Карфиол	Раздвојити на цветове, дебље комаде исећи уздуж на половине.	Бланширање водом у које је додато мало сирћета (3÷4min).	Чврста, крта.
Целер	Уклонити лишће, исећи на комаде дебљине до 6mm	Бланширање на пари или води (30sec до 2min).	Хрскав.
Кукуруз	Одабрати нежан клип, ољуштити. Третирати паром очишћен клип 5 до 10 минута док се не примети кукурузно млеко. Исећи зрна са клипа.	Бланширање паром.	Крскаво, крто.
Боранија	Очистити и пресећи на пола.	Бланширање у води (2÷3min) или на пари (3÷4min).	Крт.
Печурке	Сушити целе уколико су ситне, или исећи уздужно на комаде.	Без.	Хрскаве, крте.
Црни лук	Уклонити спољне листове. Исећи на танке комаде или нарендати.	Без.	Крт.
Першун	Осушити цео жбун па потом уклонити стабљике.	Без.	Крт.
Грашак	Уклонити љуску.	Бланширање паром (2÷3min) одмах после укањања љуске.	Тврд, наборан.
Паприка	Исечена уздуж или попречно на комаде дебљине до 10mm. Уклоњено семе и петелка.	Без, бланширање у води (2÷3min) или на пари (3÷5min).	Чврста, крта.
Кромпир	Ољуштен, наредан или исечен на листове дебљине до 6mm.	Опран у хладној води, бланширање у води (5÷6min) или на пари (6÷8min).	Хрскав.
Бундева	Исечена на широке траке. Очишћена од семенки и унутрашњих влакана, ољуштена. Исечена на комаде дебеле до 3mm.	Бланширање у води (1min) или на пари (2÷3min).	Чврсто, неломљиво.
Спанаћ	Опран. Крупни листови су исецкани.	Бланширање на пари или у води.	Савитљив до кртог.
Парадајз	Попарен врелом водом или паром ради уклањања поторице, расхлађен и исечен на комаде дебљине до 20mm.	Без.	Свитљив до хрскав.

Табела В.10: Смернице за сушење делова биљака (део 1/2).

Намирница	Припрема
Ароматици	Ове биљке треба сушити по делу биљке, који треба да се користи, али се не смеју нагомилавати (један слој је најбољи) и сушење мора бити умерено; увек у сенци или унутра.
Кора	Већина кора се најбоље користи свежа, а ипак оне добро задржавају своја лековита својства и када су суве. За лако руковање и употребу, кору треба исећи у умерено мале делове пре сушења. Оне се могу сушити напољу на умереној сунчевој топлоти, положене на плоче, штапове, дашчице, итд. и по неколико центиметара размака, како би ваздух слободно циркулисао. Преко ноћи се морају увести унутра, у просторију са добром вентилацијом, са размаком између делова, због слободне циркулације ваздуха. Сувоћа коре се може тестирати благим савијањем и ако нема влаге оне ће одмах пући.
Пупољци	Сушити слично као и листове.
Луковице	Могу се сушити у сенци са добром циркулацијом ваздуха, или се могу окачити у торбе од мрежице.
Бобице	Морају се сушити у сенци, на умереној температури и никада пребрзо. На једној леси треба се налазити само један слој бобица, да не би дошло до буђања.
Израштаји	Додаци (чвор на дрвету, квржице, итд.) захтевају само неколико дана излагања ваздуху, на столу пре складиштења.
Цветови	Цветови се углавном користе свежи, али се могу чувати у форми сирупа (као на пример каранфилић или мак), у конзервама (јаглика) или сушени, иако се сушење мора обавити брзо и пажљиво. Цветови се суше различито – код неких се користе само петелке, неки се чувају са целом главом, код неких се задржавају листови око њих, док се код неких уклања цвет и користи само шипак. Цветове не треба излагати директној сунчевој светлости током сушења, а допуна у малој количини вештачке топлоте је најбоља да се убрза процес. Добар тест за цветове јесте да када изгубе боју и мирис, онда су изгубили и лековита својства.
Плодови	Суше се на различите начине и у већини случајева могу се сушити на Сунцу (плод треба исећи на релативно танке кришке, јер велики комади ће се брзо убуђати).
Смола	Њу не треба сушити када се чува у затвореним посудама или се може осушити и кристализовати (обе опције су добре).
Биљке	Уклонити мртву или трулу материју, танко раширити по површини за сушење или везати у веома мале гомиле и окачити на око 30 cm размака у линије, дуж добро проветрене просторије, док се потпуно не осуше.
Листови	Откинути са стабла (осим оних са листићима као тиммијан и чубар). Слободно раширити по површини за сушење, ван домашаја директног сунца (омогућавајући слободну циркулацију ваздуха изнад и испод) и померати да се избегне буђање.

Табела В.11: Смернице за сушење делова биљака (део 2/2).

Намирница	Припрема
Ризоми	Сушити исто као и корење.
Корење	<p>Већина корења се може осушити и сачувати одређено време, али одређено корење губи своја лековита својства сушењем (као што је винобојка) и мора се користити свежа или се чувати закопана у песку или покривена земљом како би се сачувала од кварења. Да би се корење сушило треба да се очисти (четка је одлична или се може употребити мало хладне воде) иструлела материја, влакна и мале жилице, са изузетком одређеног смолног корења. Црвљиво и нагрижено корење треба одбацити. Дебело и снажно корење треба поделити, исећи на мале комаде (док је корење јоше зелено и свеже), јер ће то убрзати процес сушења, опоравка и лакше ће се користити. Ако је корен покривен жилавом кором, свући је одмах, што дуже чекате, биће теже. Неароматично корење (које се углавном састоји од влакана или малог врха) може се сушити вештачки, температуром испод 38°C. Ароматично корење треба сушити честим струјањем хладног ваздуха. Увек је боље сушити корење у мрачној просторији, јер ће сунчева светлост претворити светлије нијансе у тамније. Пре складиштења корења у одговарајућу посуду, увек тестирати сувоћу – ако се преполове при благом савијању, онда су потпуно суви.</p> <p>Семење расте у штитастој цвасти. Махуне треба оставити на биљци до сазревања. Затим ставити раздвојене (као што је раније описано), раширене на стакла за сушење, сукна или на платно положено на под у топлој соби са добром вентилацијом, пет до шест дана. Након тога плеву треба уклонити (као што је раније описано) на благом поветарцу. Потом се семење поново рашири, на сукном покривеној стакленој површини за сушење, на додатних седам до десет дана, али их треба често окретати. Семење меснатог воћа, након што се одвоје од опне која их окружује и влажне материје, треба ставити на сто или неко суво место и повремено трљати током процеса сушења, тако да буде чисто када се осуши. Генерално, семење се сакупља када је потпуно зрело. Потребно је мало неге и после три до четири дана на чистом поду или жичаној мрежи (где постоји слободан простор за ваздух али без излагања сунцу) семење је спремно за складиштење.</p>
Семење	
Клице	Сушити исто као и листове и биљке, унутра и ван домашаја сунца.
Главно стабло	Сушити исто као и листове и гранчице.
Стабљике	Сушити исто као и кору, јер су жилаве врсте биљке.
Врхови	Сушити пажљиво, као и листове и цветове.
Луковица	Сушити слично као и корење.
Гранчице	Сушити исто као и листове, али мало дуже.
Дрвеће	Сушити исто као и кору, али на сунчевој светлости ће светлије дрво постати тамно.

Табела В.12: Рехидратација осушених намирница воћа и поврћа.
(За рехидратацију се користи: *вода на собној температури, **кључала вода.)

Намирница	Размера у којој се вода додаје по јединици запремине суве намирнице	Време рехидратације, min
<i>Воће*</i>		
Јабука	1:1,5	30
Крушка	1:1,75	75
Бресква	1:2	75
<i>Поврће**</i>		
Шпаргла	1:2,25	90
Пасуљ	1:2,5	90
Цвекла	1:2,75	90
Шаргарепа	1:2,25	60
Купус	1:3	60
Кукуруз	1:2,25	30
Црни лук	1:2	45
Грашак	1:2,5	30
Бундева	1:3	1
Спанаћ	1:1	30
Кромпир	1:1,5	30

С.1 Физичке и термо-механичке особине

Табела С.1: Вода и лед

Величина	Вредност			
Моларна маса, g/mol	18,0153			
Особине фазних прелаза				
Температура топљења, °C	0,000			
Температура кључања, °C	100,000			
Критична температура, °C	373,99			
Критични притисак, МПа	22,064			
Тројна тачка	0,1°C, 611,73Pa			
Енталпија топљења, kJ/mol	6,012 (при 0°C)			
Енталпија испаравања, kJ/mol	40,657 (при 100°C)			
Енталпија сублимације, kJ/mol	50,91 (при 0°C)			
Остала својства	Температура			
	20°C	0°C	0°C (лед)	-20°C (лед)
Густина, g/cm ³	0,99821	0,99984	0,9186	0,9193
Вискозност, Pa·s	1,002·10 ⁻³	1,793·10 ⁻³	-	-
Површински напон ка ваздуху, N/m	72,75·10 ⁻³	75,64·10 ⁻³	-	-
Притисак паре, kPa	2,3388	0,6113	0,6113	0,103
Спец.топлотни капацитет, kJ/(kgK)	4,1818	4,2176	2,1009	1,9544
Топлотна проводљивост, W/(mK)	0,5984	0,5610	2,240	2,433
Топлотна дифузивност, m ² /s	1,4·10 ⁻⁷	1,3·10 ⁻⁷	11,7·10 ⁻⁷	11,7·10 ⁻⁷
Диелектрична константа	80,20	87,90	-90	-98

Литература

- [1] Rahman M.S. и McCarthy O.J. ``A classification of food properties''. У: *International Journal of Food Properties* 2(2) (1999.), стр. 93–99 (цит. на стр. 4).
- [2] Kurzhals HA. *Lexikon Lebensmitteltechnik*. 1st.ed. Hamburg: Behr's GmbH, 2003., стр. 1276 (цит. на стр. 8).
- [3] B. Demir и др. ``Possible Use of Data Mining for Analysis and Prediction of Apple Physical Properties''. У: *Erwerbs-Obstbau* 60 (2017.), стр. 1–7 (цит. на стр. 9).
- [4] Choi Y. и Okos M.R. ``Effects of Temperature and Composition on the Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Some Food Components''. У: *Korean Journal of Food Science and Technology* 18.5 (1986.), стр. 357–363 (цит. на стр. 10, 16, 18).
- [5] Rizvi S.S.H Рао M.A. и Datta A.K. *Engineering properties of foods*. 3rd. Abingdon: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2005., стр. 761 (цит. на стр. 16, 78).
- [6] *Stable Micro Systems Ltd*. Преузето са веб сајта. Мар. 2021. url: stablemicrosystems.com (цит. на стр. 21).
- [7] Nielsen S. *Food Analysis*. 5th.ed. Switzerland: Springer International Publishing, 2017., стр. 649 (цит. на стр. 25).
- [8] Akram W. Joardder M.U.H. и Karim A. *Heat and mass transfer modelling during drying*. First Edition. New York: CRC Press Taylor и Francis Group, 2022., стр. 221 (цит. на стр. 27, 117, 125, 126).
- [9] Rajnish K.C. и др. ``Predictive equations for the dielectric properties of foods''. У: *International Journal of Food Science & Technology* 29.6 (1994.), стр. 699–713. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1994.tb02111.x> (цит. на стр. 33).
- [10] Траш B., Dede S. и Altay F. ``Dielectric Properties of Foods''. У: *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology* 7.11 (2019.), стр. 1805–1816. doi: <https://doi.org/10.24925/turjaf.v7i11.1805-1816.2650> (цит. на стр. 33).
- [11] I. Medvedev и R. Černý. ``Surface diffusion in porous media: A critical review''. У: *Microporous and Mesoporous Materials* 142 (2011.), стр. 405–422 (цит. на стр. 39).
- [12] *Diffusion mechanisms*. Преузето са веб сајта. Јун 2021. url: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/52/Cluster_diffusion_individual_mechanisms.png (цит. на стр. 39).
- [13] Hemond H.F. и Fechner E.J. *Chemical Fate and Transport in the Environment*. Third Edition. Boston: Academic Press, 2015., стр. 486 (цит. на стр. 40).
- [14] Fredlund D.G. и Rahardjo H. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. First Edition. New Jersey: Wiley-Interscience, 1993., стр. 544 (цит. на стр. 41, 96).
- [15] Jovan Mitrovic. ``Josef Stefan and his evaporation-diffusion tube - the Stefan diffusion problem''. У: *Chemical Engineering Science* 75 (2012.), стр. 279–281 (цит. на стр. 41).
- [16] Vega-Mercado H., Góngora-Nieto M.M. и Barbosa-Cánovas G.V. ``Advances in dehydration of foods''. У: *Journal of Food Engineering* 49.4 (2001.), стр. 271–289. doi: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00224-7](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00224-7) (цит. на стр. 52, 155).

- [17] Rebinder P.A. ``Selected works: Surface phenomena in dispersed systems''. У: *Colloid chemistry, Moscow: Nauka* (1978.) (цит. на стр. 71).
- [18] Figura L. и Eixteira A.A. *Food Physics - Physical properties - Measurement and Applications*. 1st.ed. Switzerland: Springer International Publishing, 2007., стр. 550 (цит. на стр. 72).
- [19] Posnov V.A. У: *Zh. Tekhn. Fiz.* 23 (1953.), стр. 865 (цит. на стр. 75).
- [20] Goudra P.G. et al. ``Rehydration characteristics of dehydrated different onion slices''. У: *Int.J.of Current Microbiology and Applied Sciences* 6(10) (2017.), стр. 2684–2692 (цит. на стр. 77).
- [21] Marinos-Kouris D. Krokida M.K. ``Rehydration kinetics of dehydrated products''. У: *Journal of Food Engineering* 57 (2003.), стр. 1–7 (цит. на стр. 77).
- [22] Bauman I. Bobic Z. и Curic D. ``Rehydration ratio of fluid bed-dried vegetables''. У: *Sadhana* 27(3) (2002.), стр. 365–374 (цит. на стр. 77).
- [23] Kessler H.G. *Food and bio process engineering: diary technology*. 5th ed. Munchen: eBook, 2002., стр. 694 (цит. на стр. 79).
- [24] Frede W. *Lebensmittel-Bedarfsgegenstande-Kosmetika-Furmittel*. 2nd ed. Berlin: Springer Verlag, 2005., стр. 1196 (цит. на стр. 79).
- [25] Labuza T.P. ``Kinetics of lipidoxidation in foods''. У: *Critical Review Food Technology* 2 (1971.), стр. 355 (цит. на стр. 79).
- [26] Beuchat L.R. ``Microbial stability as affected by water activity''. У: *Cereal Foods World* 26 (1981.), стр. 345–349 (цит. на стр. 80).
- [27] Samanian N. и Mohebbi M. ``Thermography, a new approach in food science studies: a review''. У: *MOJ Food Processing and Tecnology* 2(3) (2016.), стр. 110–119 (цит. на стр. 90).
- [28] Tucker G.S. *Food Biodeterioration and Preservation*. First Edition. Iowa, USA: Blackwell Publishing, 2008., стр. 257 (цит. на стр. 90).
- [29] *A Python package for performing pore network modeling of porous media*. Преузето са веб сајта. Окт. 2021. url: <https://pythonawesome.com/a-python-package-for-performing-pore-network-modeling-of-porous-media/> (цит. на стр. 92).
- [30] Yingjun Yu и др. ``Review and development of the drying theory of porous medium''. У: *Earth and Environmental Science* 012045 (2020.), стр. 568 (цит. на стр. 93).
- [31] Thijs Defraeye. ``Advanced computational modelling for drying processes – A review''. У: *Applied Energy* 131 (2014.), стр. 323–344 (цит. на стр. 93, 94, 148).
- [32] Henry T. Sabarez. *Thermal drying of foods*. First Edition. New York: Springer, 2018., стр. 181–210 (цит. на стр. 95).
- [33] Joseph Boehm. ``Capillaritat und Saftsteigen''. У: *Bericht der Deutschen Botanischen Gesellschaft* 11 (1809.), стр. 203–212 (цит. на стр. 96).
- [34] Luikov A.V. *Heat and mass transfer in capillary-porous bodies*. 1st Edition. Minsk, Russia: Pergamon, 1966., стр. 531 (цит. на стр. 97).
- [35] Luikov A.V. *Theory of Drying*. 2nd Edition. Moscow, Russia: Energy Publisher, 1968., стр. 472 (цит. на стр. 97, 98).

- [36] Otto Krischer und Werner Kast. *Trocknungstechnik*. Third Edition. Berlin: Springer, Berlin, Heidelberg, 1978., стр. 491 (цит. на стр. 100).
- [37] Berger D. и Pei D.C.T. ``Drying of hygroscopic capillary porous solids. A theoretical approach''. У: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 16 (1973.), стр. 293–302 (цит. на стр. 101).
- [38] Stephen Whitaker. *The Method of Volume Averaging*. 1st ed. USA: Springer Science и Business Media, 2013., стр. 210 (цит. на стр. 102).
- [39] Stephen Whitaker. ``Simultaneous heat, mass and momentum transfer in porous media: a theory of drying''. У: *Advances in Heat Transfer* 13 (1977.), стр. 119–203 (цит. на стр. 102).
- [40] Couture F. Porras G.O. и Roques M. ``A Convection-diffusion model for the convective drying of a shrinking medium composed of a binary liquid''. У: *Drying Technology an International Journal* 25(7) (2007.), стр. 1215–1227 (цит. на стр. 103).
- [41] Strongin V. и Borde I. *A mathematical model of convective drying incorporating sorption isotherms*. Vol.3. New York: Hemisphere Publishing, 1987. (цит. на стр. 104).
- [42] Schoeber W. ``Regular regimes in sorption processes: calculation of drying rates and determination of concentration dependent diffusion coefficients''. У: *Technische Hogeschool Eindhoven* (1976.) (цит. на стр. 105).
- [43] Kerkhof P. ``The role of theoretical and mathematical modeling in scale-up''. У: *Drying Technology* 12 (1994.), стр. 1–46 (цит. на стр. 105).
- [44] Celia M. Wu R. Qin C.Z. Guo B. ``Dynamic pore-network modeling of air-water flow through thin porous layers''. У: *Chemical Engineering Science* 202 (2019.), стр. 194–207 (цит. на стр. 107).
- [45] Reza M. ``A new approach for constructing pore network model of two phase flow in porous media''. У: *Materials Science* (2009.) (цит. на стр. 107).
- [46] Pierre M.A. Varloteaux C. Bekri S. ``Pore network modelling to determine the transport properties in presence of a reactive fluid: From pore to reservoir scale''. У: *Advanced in Water Resources* 53 (2013.), стр. 87–100 (цит. на стр. 107).
- [47] Wang M. Chen S. и Xia Z. ``Multiscale fluid mechanics and modeling''. У: *Procedia IUTAM - 23rd International Congress of Theoretical and Applied Mechanics* 10 (2014.), стр. 100–114 (цит. на стр. 108).
- [48] Feng Y. Zou M. Yu B. и Xu P. ``A Monte-Carlo method for simulating fractal surfaces''. У: *Physica A* 386 (2007.), стр. 176–186 (цит. на стр. 111, 113).
- [49] Mandelbrot B.B. *The fractal geometry of nature*. First Edition. USA: Henry Holt и Co., 1982., стр. 480 (цит. на стр. 112).
- [50] Onwude I. et al. ``Modeling the Thin-Layer Drying of Fruits and Vegetables: A Review''. У: *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 15 (2016.), стр. 599–618 (цит. на стр. 119).
- [51] Royen M.R. et al. ``Experimental Study and Mathematical Modeling of Convective Thin-Layer Drying of Apple Slices''. У: *Processes* 8(12) (2020.) (цит. на стр. 119).
- [52] Karathanos V.T. ``Determination of water content of dried fruits by drying kinetics''. У: *Journal of food engineering* 39 (1999.), стр. 337–344 (цит. на стр. 121).

- [53] Ceylan I. Aktas M. и Yilmaz S. ``Determination of drying characteristics of apples in a heat pump and solar dryer''. У: *Desalination* 239(1-3) (2009.), стр. 266–275 (цит. на стр. 121).
- [54] Komatina M. Zlatanovic I. и Antonijevic D. ``Low-temperature convective drying of apple cubes''. У: *Applied thermal engineering* 53(1) (2013.), стр. 114–123 (цит. на стр. 121).
- [55] Crank J. *The Mathematics Of Diffusion*. Second Edition. London: Oxford University Press, 1975., стр. 421 (цит. на стр. 125).
- [56] Kumar C. Joardder M.U.H. Karim A. и Brown R.J. *Porosity: Establishing the relationship between drying parameters and dried food quality*. First Edition. Switzerland: Springer, 2016. (цит. на стр. 129).
- [57] Mobedi M. Sabat S. Barisik M. и Beskok A. ``An extended KCK model for gas permeability in micro/нано-porous media''. У: *Phisic of fluids* 31 (2019.), стр. 112001–1120013 (цит. на стр. 130).
- [58] Kumar C. et al. ``A porous media transport model for apple drying''. У: *Biosystems Engineering* 176 (2018.), стр. 12–25 (цит. на стр. 131, 133).
- [59] H. Feng и др. ``Intrinsic and relative permeability for flow of humid air in unsaturated apple tissues''. У: *Journal of Food Engineering* 62.2 (2004.), стр. 185–192. doi: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00231-0](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00231-0) (цит. на стр. 132).
- [60] J. Bear. *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Dover Civil and Mechanical Engineering Series. Dover, 1988. (цит. на стр. 132).
- [61] Amit Halder, Ashish Dhall и Ashim K. Datta. ``Modeling Transport in Porous Media With Phase Change: Applications to Food Processing''. У: *Journal of Heat Transfer* 133.3 (ноя. 2010.). 031010. doi: [10.1115/1.4002463](https://doi.org/10.1115/1.4002463) (цит. на стр. 134).
- [62] Joardder M.U.H. Rahman M.M. и Karim A. ``Microscale geometrical model of fruit tissue for simulating cellular level changes during drying''. У: *The 20th International Drying Symposium (IDS 2016), Gifu, Japan, 7–10 August 2016* (2016.), стр. 1–6 (цит. на стр. 135).
- [63] Qingkai Kong, Timmy Siau и Alexandre M. Bayen. *Chapter 23 - Boundary-Value Problems for Ordinary Differential Equations (ODEs)*. Уредник Qingkai Kong, Timmy Siau и Alexandre M. Bayen. Academic Press, 2021., стр. 399–414 (цит. на стр. 141).
- [64] Narjes Malekjani и Seid Mahdi Jafari. ``Simulation of food drying processes by Computational Fluid Dynamics (CFD); recent advances and approaches''. У: *Trends in Food Science and Technology* 78 (2018.), стр. 206–223. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.06.006> (цит. на стр. 142).
- [65] Misha S. et al. ``The prediction of drying uniformity in tray dryer system using CFD simulation''. У: *International journal of Machine Learning and Computing* 3(5) (2013.) (цит. на стр. 144).
- [66] Esparza E.J. et al. ``Influence of the thermal conductivity of air on the moisture homogeneity of a tray dryer''. У: *International journal of Heat and Technology* 37(1) (2018.), стр. 322–326 (цит. на стр. 145).
- [67] Ray M.B. Jaladdine T.J. ``Application of CFD for simulation of drying processes: a review''. У: *Drying Technology* 28 (2010.), стр. 120–154 (цит. на стр. 145).

- [68] Mayor L. и Sereno A.M. ``Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review''. У: *Journal of Food Engineering* 61 (2004.), стр. 373–386 (цит. на стр. 147).
- [69] *Thijs Defraeye: Solar drying of soft cellular materials: a multiscale approach*. Преузето са веб сајта. Феб. 2022. url: <https://www.empa.ch/web/det/solar-drying> (цит. на стр. 150).
- [70] Movagharnjad K. и Nikzad M. ``Modeling of tomato drying using artificial neural network''. У: *Computer and Electronics in Agriculture* 59 (2007.), стр. 78–85 (цит. на стр. 152).
- [71] Bai Jun-Wen et al. ``Artificial neural network modeling of drying kinetics and color changes of Ginko Biloba seeds during microwave drying process''. У: *Journal of Food Quality* 2018 (2018.), стр. 8 (цит. на стр. 152).
- [72] Yadira Quinonez et al. *Autonomous robot navigation based on pattern recognition techniques and artificial neural networks*. Conference paper. 2015. url: [dx.doi.org/10.1007/978-3-319-18833-1_34](https://doi.org/10.1007/978-3-319-18833-1_34) (цит. на стр. 153).
- [73] Li Jing et al. ``Novel sensing technologies during the food drying process''. У: *Food engineering reviews* 12 (2020.), стр. 121–148 (цит. на стр. 154).
- [74] *Fastir Stirring Machine*. Преузето са веб сајта. Мар. 2022. url: <https://www.kbuildings.com/sukup-fastir-stirring-machine/> (цит. на стр. 161).
- [75] Barbosa-Canovas G.V. и Vega-Mercado H., уредници. *Dehydration of foods*. Springer, Boston, MA, 1996., стр. 330 (цит. на стр. 161, 190).
- [76] *PETKUS Technologie GmbH*. Преузето са веб сајта. Апр. 2022. url: <http://www.petkus.com/> (цит. на стр. 162, 171).
- [77] *Kerone Engineering Solutions Ltd*. Преузето са веб сајта. Мар. 2022. url: kerone.com/tunnel-dryer.php (цит. на стр. 163).
- [78] *ND2565 belt dryer*. Преузето са веб сајта. Мар. 2022. url: <https://ruidaprintingmachine.en.made-in-china.com/> (цит. на стр. 164).
- [79] *Hegatec dryer*. Преузето са веб сајта. Мар. 2022. url: <https://hegatec.com/vacuum-belt-dryer/> (цит. на стр. 165).
- [80] *Mesigo Eng Fab - Closed screw conveyer dryer*. Преузето са веб сајта. Мар. 2022. url: <https://hegatec.com/vacuum-belt-dryer/> (цит. на стр. 165).
- [81] *Muyang tower dryer*. Преузето са веб сајта. Мар. 2022. url: <http://www.machineryshops.com> (цит. на стр. 166).
- [82] *Strahlrus*. Преузето са веб сајта. Мар. 2022. url: <https://strahlrus.ru/> (цит. на стр. 167).
- [83] Zeki Berk, ур. *Chapter 22 - Dehydration*. Third Edition. Food Science and Technology. Academic Press, 2018., стр. 513–566 (цит. на стр. 168).
- [84] A.S. Mujumdar, ур. *Handbook of Industrial Drying*. CRC Press, 2006., стр. 1312 (цит. на стр. 168, 178, 191, 192, 197, 198, 212, 238, 239).
- [85] *DIRECT Industry - Italvacuum*. Преузето са веб сајта. Мар. 2022. url: https://img.directindustry.com/images_di/photo-m2/27975-15810626.jpg (цит. на стр. 168).
- [86] *FEECO International*. Преузето са веб сајта. Мар. 2022. url: <https://feeco.com/rotary-dryers/> (цит. на стр. 169, 170).

- [87] *IDRECO S.r.l.* Преузето са веб сајта. Мар. 2022. url: <https://www.idreco.com/direct-rotary-dryers/> (цит. на стр. 170).
- [88] *Zhengzhou Hengxing Heavy Equipment Co Ltd.* Преузето са веб сајта. Мар. 2022. url: <https://image.made-in-china.com/202f0j00TSAEeMgsfKzk/Small-Rotary-Dryer-for-Drying-Wet-Sand-Wet-Mineral-Concentrate.jpg> (цит. на стр. 170).
- [89] *AGICO.* Преузето са веб сајта. Мар. 2022. url: <https://cementplantsupplier.com/cement-manufacturing-equipment/rotary-dryer/> (цит. на стр. 170).
- [90] *Emde Bohrtechnik.* Преузето са веб сајта. Апр. 2022. url: <https://emde-bohrtechnik.de/> (цит. на стр. 170).
- [91] *Binder Co Austria.* Преузето са веб сајта. Апр. 2022. url: <https://www.directindustry.com/pt/prod/binder-co-ag/product-89747-939223.html> (цит. на стр. 171).
- [92] *Process HEATING.* Преузето са веб сајта. Апр. 2022. url: <https://www.process-heating.com/articles/93299-vibrating-fluid-bed-dryers-and-coolers> (цит. на стр. 173).
- [93] *LARSSON Sweden.* Преузето са веб сајта. Апр. 2022. url: <https://www.larssonsweden.com/product/flash-dryer/> (цит. на стр. 175).
- [94] *GEA Drying.* Преузето са веб сајта. Апр. 2022. url: <https://www.gea.com> (цит. на стр. 176).
- [95] *TetraPak - Tetra Laval.* Преузето са веб сајта. Апр. 2022. url: <https://www.directindustry.com/prod/tetra-pak/product-61931-758775.html> (цит. на стр. 179).
- [96] Daniel Santos и др. "Spray Drying: An Overview". У: *Biomaterials*. Уредник Rosario Pignatello и Teresa Musumeci. Rijeka: IntechOpen, 2018. Глава 2. doi: [10.5772/intechopen.72247](https://doi.org/10.5772/intechopen.72247) (цит. на стр. 179).
- [97] *TetraPak - Tetra Laval.* Преузето са веб сајта. Апр. 2022. url: <https://www.katsuragi.co.jp/> (цит. на стр. 180, 181).
- [98] *GESA - GOUDA T9-30.* Преузето са веб сајта. Апр. 2022. url: <https://gesaguilar.com/> (цит. на стр. 182).
- [99] *Ingetecsa.* Преузето са веб сајта. Апр. 2022. url: <https://www.ingetecsa.com/machines/drum-dryer/> (цит. на стр. 182).
- [100] Tara McHugh. "Freeze-Drying Fundamentals". У: *Food Technology Magazine* 72 (2018.) (цит. на стр. 182).
- [101] Schwartzberg H. "Freeze Drying - Lecture Notes". У: *Food Engineering Department, University of Massachusetts, Amherst, MA* (1982.) (цит. на стр. 183).
- [102] Garcia-Amezquita L.E. et al. "Freeze Drying: The Basic Process". У: *Encyclopedia of Food and Health* (2016.), стр. 104–109 (цит. на стр. 184).
- [103] *LTDG-Series Industrial freeze dryer.* Преузето са веб сајта. Апр. 2022. url: <http://www.ltpmchina.com> (цит. на стр. 185).
- [104] *Millrock Technology.* Преузето са веб сајта. Апр. 2022. url: <https://www.pharmaceuticalonline.com/doc/manifold-freeze-dryer-series-0002> (цит. на стр. 185).
- [105] *SiccaDania.* Преузето са веб сајта. Апр. 2022. url: <https://siccadania.com/technologies/dryers/freeze-dryers> (цит. на стр. 185).

- [106] Justyna Warczok. *Concentration of osmotic dehydration solutions using membrane separation processes*. Докторска дисертација, Universitat Rovira i Virgili. 2005. url: <https://www.tdx.cat/> (цит. на стр. 188, 189, 191).
- [107] Cristina Ratti. *Advances in food dehydration*. 1st ed. USA: Taylor и Francis Group, 2009., стр. 488 (цит. на стр. 189).
- [108] *Putten*. Преузето са веб сајта. Апр. 2022. url: <http://www.rinusfoodmachinery.com/product/23.html> (цит. на стр. 190).
- [109] Ravinder Kumar Sahdev. ``Open sun and greenhouse drying of agricultural and food products: A review''. У: *Int Journal of Engineering Research and Technology IJERT* 3(3) (2014.), стр. 1053–1066 (цит. на стр. 192–194, 238, 239).
- [110] *Focusun Energy Systems*. Преузето са веб сајта. Апр. 2022. url: <https://www.tradeindia.com/products/solar-tunnel-dryer-c6465760.html> (цит. на стр. 193).
- [111] *Feedback from the Field*. Преузето са веб сајта. Апр. 2022. url: https://d.facebook.com/Feedback-from-the-Field-169530259752510/?refid=13&__tn__=%2Cg (цит. на стр. 194).
- [112] Garg H.P. ``Proceedings of the Third International Symposium''. У: *Sunworld - special issue* 4 (1980.), стр. 179 (цит. на стр. 195).
- [113] Wibulswas P. и Niyomkarn C. ``Workshop on solar drying''. У: *CNED-UNESCO* (1980.), стр. 1 (цит. на стр. 195).
- [114] Yang K.C. ``Resume de l'etude en cours on CTB sur l'utilisation de l'energie solaire''. У: *Forest Product J* 30 (1978.), стр. 37 (цит. на стр. 196).
- [115] Wieneke W. ``Solar room dryer''. У: *Agricultural Mechanization in Asia* 11 (1980.) (цит. на стр. 196).
- [116] *ARANER Group*. Преузето са веб сајта. Мај 2022. url: <https://www.araner.com/> (цит. на стр. 200).
- [117] Van Vang Le et al. ``A review of solar dryer with phase change material as sensible heat storage mediums''. У: *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments* 44(7) (2021.), стр. 202–214 (цит. на стр. 200).
- [118] Chen X.D. и Mujumdar A.S. *Drying Technologies in Food Processing*. BlackwellPublishing Ltd., 2008., стр. 352 (цит. на стр. 203).
- [119] Yousaf K. et al. *An Introduction of Biomimetic System and Heat Pump Technology in Food Drying Industry*. IntechOpen, 2021., стр. 186 (цит. на стр. 203).
- [120] Daghigh R. et al. ``Review of solar assisted HPD systems for agricultural and marine products''. У: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14(9) (2010.), стр. 2564–2579 (цит. на стр. 204).
- [121] Hawlader MNA и Jahangeer KA. ``Solar HPD and water heating in the tropics''. У: *Solar Energy* 80(5) (2006.), стр. 492–499 (цит. на стр. 204).
- [122] Theerakulpisut S. Artnaseaw A. и Benjariyaporn C. ``Development of a vacuum heat pump dryer for chilli''. У: *Biosystems Engineering* 105 (2010.), стр. 130–138 (цит. на стр. 205).
- [123] Mujumdar A.S. и Jangam S.V. ``Energy issues and use of renewable source of energy for drying of foods''. У: *Proceedings of the International Workshop on Drying of Food and Biomaterials, Thailand* (2011.) (цит. на стр. 205).

- [124] *Conveyor belt microwave tunnel dryer*. Преузето са веб сајта. Мај 2022. url: <http://www.shengrunextruder.en.china.cn/> (цит. на стр. 209).
- [125] *Novel micro-wave assisted vacuum drying for heat sensitive foods*. Преузето са веб сајта. Мај 2022. url: <https://www.youtube.com/watch?v=tXC8VDrwuxA> (цит. на стр. 210).
- [126] Tulasidas T.N. et al. "Microwave drying of grapes in a single mode cavity at 2450MHz: Quality and energy aspects". У: *Drying Technology* 13 (1995.), стр. 1973–1992 (цит. на стр. 210).
- [127] Rosenthal L. *Electromagnetic radiations in food science*. 1. издање. Berlin: Springer-Verlag, 1992., стр. 105–114 (цит. на стр. 211).
- [128] *Rotary dryer with IR heating*. Преузето са веб сајта. Мај 2022. url: <https://www.bulksolids-portal.com/1img/news/5265-afb.jpg?> (цит. на стр. 212).
- [129] *Infrared Food Drying with gas IR heaters*. Преузето са веб сајта. Мај 2022. url: www.ppinfrared.com (цит. на стр. 212).
- [130] *Meat Smoking Machine Introduction*. Преузето са веб сајта. Септ. 2022. url: <https://www.food-machines.org/meat-processing-machinery> (цит. на стр. 214).
- [131] *Thermozone - Vertical air impingement drying*. Преузето са веб сајта. Мај 2022. url: http://www.arakawa-mfg.co.jp/english/products_thermozone_ai.html (цит. на стр. 216).
- [132] Leonard Ferdinand Gerard Geers. "Multiple impinging jet arrays. An experimental study on flow and heat transfer". У: (2004.) (цит. на стр. 217).
- [133] Roy G. Poitras G.J. Babineau A. и Brizzi L.-E. "Aerodynamic and heat transfer analysis of a impinging jet on concave surface". У: *International Journal of Thermal Sciences* 114 (2017.), стр. 184–195 (цит. на стр. 217).
- [134] *MT Machinery - Pasta processing line*. Преузето са веб сајта. Мај 2022. url: <http://ba.mtfoodmachine.com/macaroni-machine/pasta-making-machine/full-automatic-extruded-italian-pasta.html> (цит. на стр. 218).
- [135] *Rotronic measurement solutions*. Преузето са веб сајта. Мај 2022. url: <https://www.rotronic.com/> (цит. на стр. 219).
- [136] *Wikimedia*. Преузето са веб сајта. Мај 2022. url: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/78/Dry_pasta_lines.pdf (цит. на стр. 219).
- [137] *Pusonics*. Преузето са веб сајта. Мај 2022. url: <https://www.pusonics.es/dehydration-assisted-by-ultrasound> (цит. на стр. 221, 222).
- [138] Baslar M. et al. *Ultrasonic Applications for Food Dehydration*. 1. издање. Istanbul: Springer Science Business Media Singapore, 2015., стр. 24 (цит. на стр. 221, 223).
- [139] Miano A.C. et al. *Advances for Food Processing and preservation*. 1. издање. Academic Press, 2017., стр. 535 (цит. на стр. 222).
- [140] *GEM Machinery*. Преузето са веб сајта. Мај 2022. url: <https://gemalliedgroup.com/product-details/refractance-window-dryer/> (цит. на стр. 224).
- [141] Yuri M.L-R. et al. "Physicochemical Properties of Guava Snacks as Affected by Drying Technology". У: *Processes* 8 (2020.), стр. 106 (цит. на стр. 226).
- [142] Shende D.C. и Datta A. "Refractance window drying of fruits and vegetables: a review". У: *Journal of the Science of Food and Agriculture* 99(4) (2018.) (цит. на стр. 226).

- [143] Chou S.K. и Chua K.J. ``New hybrid drying technologies for heat sensitive foodstuffs''. У: *Trends in Food Science and Technology* 12 (2001.), стр. 359–369 (цит. на стр. 229).
- [144] Chung Lim Law, Wan Ramli Wan Daud и Luqman Chuah Abdullah. ``Design of Hybrid Heat Pump Dryer - Dehumidifier for Drying of Agricultural Products''. У: *Chemical engineering transactions* 12 (2007.), стр. 263–268 (цит. на стр. 229).
- [145] Rotstein E. Valentas K. и Singh R.P. *Handbook of Food Engineering Practice*. CRC Press, 1997., стр. 698.
- [146] Swanson M. и McCurdy S.M. *Drying Fruits and Vegetables*. University of Idaho, 2015., стр. 32.
- [147] Cai J. и Yu B. ``Prediction of maximum pore size of porous media based on fractal geometry''. У: *Fractals* 18(4) (2010.), стр. 417–423.
- [148] Oleg M. Braun. *Surface Diffusion*. Institute of Physics, Ukraine, 2021., стр. 37.
- [149] Rahman M.S. *Food Properties Handbook*. CRC Press, 2009., стр. 867.
- [150] Georg-Wilhelm Oetjen. *Freeze Drying*. Wiley-VCH, 1999., стр. 278.
- [151] Karel M. и Lund D.B. *Physical Principles of Food Preservation*. Marcel Dekker Inc., 2003., стр. 639.
- [152] Philip Richardson. *Thermal technologies in food processing*. CRC Press, 2001., стр. 311.
- [153] Saravacos G.D. и Maroulis Z.B. *Transport Properties of Food*. Marcel Dekker Inc., 2001., стр. 435.
- [154] Robberts T.C. *Food Plant Engineering Systems*. CRC Press, 2002., стр. 269.
- [155] Stefanović Z. i Radojković I. Blagojević R. Ranković G. *Tehnologija sušenja voća*. Kancelarija za program podrške u privatnom sektoru za podršku sektoru voćarstva i bobičastog voća u Južnoj Srbiji, 2016., стр. 30.
- [156] Cussler E.L. *Diffusion - Mass Transfer in Fluid Systems*. Cambridge University Press, 2007., стр. 655.
- [157] Yanniotis S. *Solving Problems in Food Engineering*. Springer, 2008., стр. 297.
- [158] Basmadjian D. *Mass Transfer - principles and applications*. CRC Press, 2005., стр. 416.
- [159] Topić R. *Osnove projektovanja, proračuna i konstruisanja sušara*. Naučna knjiga, 1988., стр. 193.
- [160] Valent V.J. *Sušenje u procesnoj industriji*. Tehnološko-metalurški fakultet u Beogradu, 2001., стр. 283.
- [161] Potke E Maltry W. и Schneider. *Drying Systems in Agriculture*. VEB Verlag Technik Berlin, 1975., стр. 526.
- [162] Markoski M. i Vujić S. *Inženjersko mašinski priručnik, deo 1, Poglavlje Termodinamika, Potpoglavlje Mešavine para i idealnih gasova i vlažan vazduh*. Zavod za udžbenike i nastavna sredstva Beograd, 1992., стр. 610.
- [163] Topić R. *Sušenje i higrotermički procesi*. Mašinski fakultet u Beogradu, 2013., стр. 193.
- [164] Topić R. *Osnove pojava prenošenja i tehnike sušenja*. Mašinski fakultet u Beogradu, 2013., стр. 193.
- [165] Mushtaev V.I. Planovski A.N. и Uljanov V.M. *Drying od disperse materials in chemical industry*. Himia Moscow, 1979., стр. 287.

- [166] Gojak M. i Rudonja N. *Solarni termički sistemi*. Mašinski fakultet u Beogradu, 2020., стр. 231.
- [167] Markoski M. *Rashladni Uredaji - deo 1*. Mašinski fakultet u Beogradu, 2006.
- [168] *Slika na prednjim koricama knjige*. Преузето са веб сајта. Јун 2022. url: <https://honestbeeth.files.wordpress.com/2017/04/>.

Индекс појмова

- Јачина струје, 20
Једначина
 Аренијус, 15, 43
 Болцман, 109, 110
 Вадел, 8
 Клаузијус-Клапејрон, 78, 101
 Ликов, 42
 Луис, 57
 Максвел, 21
 Максвел-Болцман, 110
 Навије-Стокс, 108, 110, 143
 Поснов, 75
 Стефан, 41
Јонска кондукција, 207
Јонска размена, 72
Ћелија, 136, 138
Џуд-Хантерова скала, 23
Абсорпција, 72
 нереактивна, 72
 реактивна, 72
 физичка, 72
 хемијска, 72
Адсорбат, 72
Адсорбент, 72
Адсорпциона изостера, 78
Адсорпција, 72
 физичка, 100
Адхезија, 36
Аквапорини, 93
Акрилна влакна, 225
Активност воде, 69, 78--80, 99, 130, 187
 тест, 79
Акумулатор топлоте, 196, 199
Акустична емисија, 22
Акустичне особине, 21
Амплитуда
 неравнина, 113
 храпавости, 113
Анализа
 нумеричка, 116
 параметарска, 116
Анализа варијансе, 122
Анизотропност, 137
Антоцијанини, 226
Апликатор, 209
Апсолутна влажност
 ваздуха, 51
 материјала, 13
 Апсорбер, 197, 198
 Арома, 24, 66
 Аскорбинска киселина, 226
 Атвотеров фактор, 25
 Бездимензиона влажност
 материјала, 120, 121, 125
 Бездимензиони број, 28, 46, 50
 Биотов, 48, 50, 84
 Грасхофов, 29
 Гухманов, 48, 50
 Капиларни, 35
 Кирпичев, 49, 50
 Кнудсенов, 36, 94, 109
 Косовичев, 49
 Ликовљев, 87
 Луисов, 46, 47
 модификован, 97
 Нуселтов, 29, 47, 50
 Пеклетов, 47, 50
 Прандтлов, 29, 46, 50
 Ребиндеров, 86
 Рејнолдсов, 28
 Соретов, 98
 Стентонов, 49, 50
 Шервудов, 47, 50
 Шмитов, 46, 50
Биас оцене, 124
Бинарна мешавина, 130
Биполарна ротација, 207
Бланширање, 66
Боја материјала, 23, 66
Брауново кретање, 44, 112
Брзина
 испаравања, 133
Брзина екстракције влаге, 206
Брзина сушења, 83, 84, 120
 квази-константна, 84
 константна, 84, 89, 96
 опадајућа, 85, 87
Вакумирање, 79, 82, 184
Вакуумско сушење, 82
Вежа
 молекулска, 72
 јонска, 72
Ветрење, 46, 56, 82
Визуелизација, 29
Вискоеластичност, 15
Вискозност, 14, 23
 динамичка, 15, 36
 кинематичка, 15, 16, 29, 46
Вихорна комора, 174
Вишеразмерни
 алгоритам, 116
 анализа, 116
 модел, 116
 систем, 108
 феномен, 116
Вишефазно, 92
Влага
 адсорпционо везана, 73
 везана, 78
 осмотски везана, 73
 слободна, 73, 78
 физичко-механички везана, 73
 физичко-хемијски везана, 73
 хемијски везана, 72
Влажан
 ваздух, 51
 Молијеров дијаграм, 54, 55
 ветрење, 56
 додавање влаге, 56
 загревање, 55
 засићен, 53
 исхлапљавање, 56
 мешавина, 56
 незасићен, 53
 презасићен, 53
 сушење, 55
 хлађење, 55
 материјал, 12
Влажан ваздух, 58
Водена пара, 60
Вучна тачка, 57
Гаусова површ, 112
Генератор, 208
 кварцни, 220
Гибс-Марангонијев ефекат, 68
Гравитација, 35, 96
Градијент
 концентрације, 38, 69, 100, 125
 површинског напона, 68
 потенцијала преношења, 97
 преношења, 19

- притиска, 38, 98
 температуре, 26, 38, 99,
 100
- Граница хлађења, 57
- Гранични услови, 34, 50
- Густина, 10, 54
 материјала, 133
 насипна, 11, 160
 смеше, 10
- Депектинизиран, 16
- Десорпција, 72, 74, 184
- Детерминизам, 109
- Дехидратација, 2
- Дивергенција, 140
 масе, 141
- Диелектрик, 21
- Диелектрична
 загревања, 207
 константа, 21, 34
 пермитивност, 21, 32
- Димни гасови, 59, 60
- Димљење, 59
- Динамика сушења, 91
- Директно сушење, 59
- Дискретизација, 140
- Дисперзија, 7
- Дисперзност, 7, 89, 178
- Дифузивност, 29
- Дифузионо преношење влаге,
 38
- Дифузија
 Кнудсенова, 36, 136
 бинарна, 130
 ефективна, 42
 имбибиција, 111
 капиларна, 35, 37, 42, 94,
 130
 молекуларна, 36, 38, 39,
 42, 136
 осмотска, 94
 површинска, 35, 39, 94
 површинскаа, 73
 са слободне површи
 течности, 40
 термодифузија, 35, 44, 94,
 99
 турбулентна, 38--40, 42
- Дијаграм влажан ваздух, 55
- Дуфоров ефекат, 44, 94
- Егзотермно, 73
- Еквивалентна топлотна
 проводљивост, 26
- Екструзионо кување, 218
- Екструзија, 218
- Електрична/ни
 импулс, 67
 отпор, 20
 отпорност, 20
- проводљивост, 20
- Електромагнетно
 загревање, 21
 зрачење, 20, 90
 поље, 21, 32, 67, 207
- Електрон, 26
- Електропермеабилзација,
 67
- Електропорација, 67
- Емитер, 211
- Емулзија, 7
- Енергија
 звучних таласа, 220
 обновљива, 192
 соларна, 192
 топлотна, 198
- Енергија активације, 15
- Енергијска вредност, 25
- Енталпија, 54
- Еутектичка тачка, 183
- Ефекат сунђера, 222
- Ефузивност, 18, 32
- Закон
 Њутнов, 121
 вискозности, 15
 преношења топлоте,
 28
- Далтонов, 46, 56
- Дарсијев, 19, 94
- Омов, 20
- Стефан-Болцманов, 31
- Фиков
 други, 40, 99, 121
 први, 38, 94, 99
- Фурије, 17, 26
- Хуков, 15
- одржања енергије, 36, 91,
 94, 144
- одржања количине
 кретања, 36, 91, 94,
 132, 144
- одржања масе, 36, 91, 94,
 144
- термодинамике
 нулти, 129
- Заобљеност, 8
- Запремина
 контролна, 140
 материјала, 5
 пора, 6
- Затворене поре, 12
- Заштићени простор, 193
- Збир квадрата грешака, 123
- Збир квадрата регресије,
 123
- Збир квадрата тотала, 123
- Зрачење
 инфрацрвено, 224
- преламање, 225
- рефлексија, 225
- топлоте, 31
- Изолатор, 21
- Имбибиција, 111
- Инертни гасови, 58
- Испаравање, 35, 82
 интензитет, 89
 фронт, 40
- Исхлађавање, 56
- Кавитација
 пролазна, 223
 стабилна, 223
- Калоричка вредност, 25
- Калорије, 25
- Калцинација, 73
- Капиларе, 12
- Капиларна
 дифузија, 37, 96
 кретања, 96
 потенцијал, 96
 преношења влаге, 35, 96,
 102
 преношења паре, 37
 притисак, 96
 проток, 96
 сила, 35, 96, 100
- Капиларно-порозна тела, 71
- Каротени, 227
- Квалитет, 3, 5, 66
- Кинетика сушења, 81, 119
- Класификација, 4
 према Ребиндеру, 71
- Клистрон, 209
- Коефицијент
 Луисов, 57
 Пирсонов, 123
 Соретов, 44, 94, 98
 ветрења, 57
 грејања, 205
 детерминације, 123
 ефективни дифузије, 43,
 95, 126, 128
 конвективне дифузије, 46,
 98
 паре, 98
 релативни, 98
 корелације, 123, 124
 молекуларне дифузије, 39,
 98
 пермеабилности, 19,
 103
 преношења масе, 46, 56
 релативни термодифузије,
 44, 98
 температурни, 86, 90
 бездимензиони, 90

- турбулентне дифузије, 40
- фазног прелаза, 98
- фазног прелаза влаге, 99
- феноменолошки, 98
- хлађења, 205
- Колоид, 71
- Колоидна
 - дисперзија, 71
 - капиларно-порозна тела, 71
 - тела, 71
- Конвекција, 28
 - термо-капиларна, 68
- Кондензација, 35
- Кондукција, 26
- Конзервација, 1
- Константа
 - испаравања, 134
- Контакт, 31
- Контактна размена топлоте, 31
- Континуалност, 112
- Континуум, 36, 136
- Контракција, 13, 73, 95
 - анизотропна, 14
 - запреминска, 14
 - изотропна, 14
 - контролисана, 14
 - линеарна, 13
 - привидна, 13
- Концентрација влаге, 13
- Корен средње квадратне грешке, 123
- Кохезија, 36
- Криве сушења, 83
- Критична тачка воде, 81
- Критично стање воде, 81
- Кронекерова делта, 144
- Ламинарност, 29, 91
- Лед, 55, 92
- Леса, 159
- Лиофилизација, 82, 182
- Луисов коефицијент, 46
- Луисов фактор, 57
- Магла, 55
- Магнетострикција, 220
- Магнетрон, 208
- Маилардова реакција, 25, 90
- Макро
 - размера, 135
- Макрокапилара, 38, 73
- Метода
 - 3ω , 138
 - Болцман решетка, 110
 - Монте-Карло, 109
 - вишеразмерна, 108
- динамичка, 79
- дискретних елемената, 136, 139
- диференцијална
 - скенирајућа
 - калориметрија, 138
- изопиестична, 79
- коначне запремине, 125
- коначних елемената, 125, 139
- коначних запремина, 140
- коначних разлика, 125, 141
- нуклеарне магнетне резонанце, 138
- нумеричка анализа, 110
- рендгенске томографије, 138
- термогравиметријска, 80
- хидродинамика глатких честица, 141
- Методе
 - Лагранжов приступ, 143
 - Ојлеров приступ, 143
 - двофазно струјање са међуфазном површином, 144
- Микро
 - модел, 135, 137
 - размера, 134, 135
- Микрокапилара, 36, 37, 73
- Микрокосмички, 106
- Микронутритијенти, 24
- Микроскопија, 137, 138
- Микроталаси, 21, 207
- Мирис, 24
- Млазница, 217
- Моделирање
 - аналитичко, 116
 - без мреже, 136, 137
 - вештачка интелигенција, 152
 - вишеразмерно, 108, 116, 149
 - вишефазно порозно, 129
 - деформације, 134
 - дискретни модел, 136
 - дискретно, 139
 - дифузиони
 - једнофазни, 125
 - емпиријско, 118, 119, 121
 - комбиновано, 139
- конвергенција мреже, 125
- континуалних система, 139
- континуалних средина, 136
- коњуговани модел, 142
- математичко, 115, 138
- машинско учење, 152
- микро-размера, 134
- мрежа, 125
- мултидисциплинарно, 116
- некоњуговани модел, 142
- нумеричко, 116
- обједињено, 142
- полутеоријско, 118
- рачунарска механика флуида, 142
- са деформацијом, 146
- са мрежом, 137
- сушења, 115
- теоријско, 117
- хидродинамички глатка честица, 137
- Молијер, 54
- Молијеров дијаграм, 55
- Мултидисциплинарност, 95
- Напон струје, 20
- Неповратни процес, 98
- Нумерика, 136, 138
- Нутритивни састав, 4, 66, 187, 228
- Оксидација, 58
- Оксидо-редукционе реакције, 58
- Оператор
 - Лапласов, 40
 - Набла, 38
 - Хамилтонов, 38
- Оператор судара, 110
- Органолептичка својства, 4
- Осмоза, 187
- Осмотски/о
 - везана влага, 45, 73
 - притисак, 2, 73, 187
 - раствор, 188
 - сушење, 2, 10, 69, 73, 81, 187
 - третман, 187
- Отворене поре, 12
- Отпор
 - екстерни, 84
 - интерни, 85
 - спољашњи, 84
 - унутрашњи, 85

- Парцијални притисак влажног
ваздуха, 52
- Пектин, 16
- Пермеабилност, 19, 67, 96, 129,
136, 160
- апсолутна, 132
- релативна, 132
- унутрашња, 132
- Пермеација, 19
- Површинска
- дифузија, 35, 42
- контракција, 13
- порозност, 12
- Површински напон, 35, 39, 68,
73
- Полиестарска влакна, 225
- Полупроводник, 21
- Пора, 135
- Поре, 12, 67, 95
- Порозност, 11, 96, 129, 160
- Поље
- векторско, 140
- скаларно, 140
- Прање, 65
- Предтретман, 66
- Преношење
- влаге, 35
- дифузионо, 38, 95
- испаривање/реконден-
зација, 43, 99
- капиларно, 35, 96
- конвективно, 45, 98
- потенцијал, 19
- укупно, 45
- филтрационо, 45
- енергије, 98
- количине кретања, 98,
102
- маса, 35, 47, 98, 102
- брзина, 89
- дифузионо, 38, 136
- пара
- капиларно, 37
- топлоте, 102
- конвекција, 28, 102
- кондукција, 102
- у променљивом
ел. маг. пољу, 32
- Пречник
- Мартинов, 8
- Феретов, 7
- ваљка, 6
- главни, 8
- еквивалентни, 7
- лопте, 6
- мениска, 35
- поре, 36
- торуса, 6
- хидраулички, 30
- цилиндра, 6
- Пристрасност, 124
- Притисак засићења, 52
- Провођење топлоте
- механизам, 26
- нестационарно, 28
- са малим унутрашњим
отпотом, 27
- стационарно, 27
- Променљива
- категоричка, 122
- континуална, 122
- Пропорционалност, 9
- Псеудобројеви, 109
- Псеудофлуидизација, 174
- Психрометар, 57, 58
- Равнотежна/ни
- влажност, 74
- садржај влаге, 74, 101
- Радиоталаси, 21
- Радијација, 31
- Размера, 92
- макро, 93, 108
- мезо, 108--110
- микро, 93, 108, 109
- нано, 93
- параметар, 112
- Расподела вероватноће, 109
- Растварач, 73
- Раствор, 73
- хипертонични, 187
- Регулација
- континуална, 161
- повремена, 161
- Редокс, 58
- Редукција, 58
- Рекондензација, 97
- Реконституција, 76
- Рекуператор, 161
- Релативна влажност
- ваздуха, 53
- материјала, 13
- Релативни корен средње
- квадратне грешке,
123
- Репрезентативна елементарна
запремина, 107
- Рефлектор, 211
- Рехидратација, 2
- време, 76
- дефиниција, 76
- капацитет, 76
- кофицијент, 76
- степен, 76
- Рециркулација, 161
- Рошење, 56
- Самосличност, 111, 112
- Силикагел, 60
- Силицијум-диоксид, 60
- Систем боја
- CIELab, 23
- HSV, 23
- RGB, 23
- Скелет, 12
- Складиштење топлоте, 199
- Скупљање, 13, 35
- Слободна површ, 41
- Слој
- атомски, 72
- дебео, 160
- молекуларни, 72
- на транспортеру, 165
- танак, 95, 99, 117, 119,
224, 225
- филм, 72
- Снага загревања, 55
- Снага хлађења, 55
- Соларни димњак, 195
- Соларни колектор, 197, 198
- Соретов ефекат, 44
- Сорпциона/ни
- изотерма, 74, 95
- хистерезис, 74
- Сорпција, 72, 74
- Софтвер, 138
- Спектрална снага, 112
- Специфична брзина
- испаривања влаге,
206
- Специфична потрошња
- енергије, 206
- Специфична/ни
- густина, 10
- запремина, 10
- капацитет преношења
- влаге, 19
- површина, 6, 86, 89
- топлотни капацитет, 16,
133
- Средња грешка
- квадратна, 123
- пристрасности, 124
- процентуална, 124
- Средњи слободни пут
- молекула, 36
- Стандард
- ANSI, 119
- ASAE, 119
- Статика сушења, 71
- Статистика, 122
- Статистички показатељи,
122
- Степен засићења, 53
- Стерилизација
- хладна, 68

- Стефаново кретање, 41
 Структура, 12
 Струјно поље, 29
 Сублимација, 82, 183, 184
 Сув
 ваздух, 51
 материјал, 12, 37
 Сушара
 Refractance Window, 158, 224
 бубањ, 168
 вибро-флуидизован слој, 156
 вишекоморна, 229
 диелектрична, 158, 207
 добошаста, 157, 180
 екструдирана храна, 218
 екструдиране хране, 158
 инфрацрвена, 158
 инфрацрвено зрачење, 211
 коморна, 156, 159
 лиофилизациона, 158, 182
 месо и риба, 213
 микроталасна, 158, 207
 микроталасно-вакуумско, 210
 микроталасно-конвективно, 210
 микроталасно-осмотско, 210
 млазна, 158, 216
 непокретан слој, 156
 осмотска, 158, 187
 пнеуматска, 156, 175
 покретан слој, 156
 превртање, 168
 пужна, 165
 распршивање, 176
 ротациона, 156, 168
 континуална, 168
 са директним загревањем, 168, 169
 са индиректним загревањем, 168, 170
 шаржна, 168
 соларна, 158, 192
 спреј, 157, 176
 топлотна пумпа, 158, 201
 тракаста, 164, 165
 транспортер, 156, 164
 тунелска, 156, 163
 ултразвучна, 158, 220
 флуидизован слој, 156, 171
 фонтанска, 156, 174
 хибридна, 158, 227
 шахтна, 156, 166
 Сушење
 вакуумско, 82
 зоне, 166, 167
 континуално, 159
 лиофилизација, 82
 осмотско, 2, 10
 сушаре, 155
 танак слој, 119
 ултразвук, 23, 221
 ултразвук-вакуумско, 223
 ултразвук-лиофилизација, 223
 ултразвук-осмотско, 222
 шаржно, 159
 Сферичност, 8
 Таласна функција, 22
 Тачка росе, 55
 Температура
 апсолутне нуле, 90
 влажног термометра, 57
 граничног слоја, 42
 инверзиона, 216
 контактна, 31
 површине течности, 42
 сувог термометра, 58
 транзиције, 90, 148
 Температуре
 критична, 216
 Температурна дифузивност, 18
 Теорија
 Бергера и Пеија, 101
 Витакера, 102
 Кришера, 100
 Кришера, 92
 Ликова, 92, 97
 Стронгин-Бордеа, 104
 Филипа и Де Вриеса, 92, 99
 више-размерних система, 108
 дифузије, 91, 95
 испаривања и кондензације, 92, 97
 капиларна, 96
 капиларнаа, 92
 мреже пора, 92, 106
 регуларног режима, 104
 сличности, 28, 30, 46, 50
 сушења, 91
 градијенти потенцијала, 95
 микроскопско посматрање, 106
 фрактална, 110, 112
 Термовизија, 90
 Термограмметрија, 80
 Термограм, 86
 Термомиграција, 44
 Термофореза, 44
 Токсичност, 4
 Тоничност, 187
 Топлота
 адсорпције, 78
 изостерна, 78
 латентна, 94, 98, 133
 Топлотна
 дифузивност, 98, 102
 ефузивност, 18
 инерција, 18
 проводљивост, 17, 111, 138
 еквивалентна, 17, 100
 ефектна, 133
 пумпа, 201
 ваздушна, 204
 геотермална, 204
 хемијска, 204
 хибридна, 204
 равнотежа, 129, 133
 Топографија површи, 113
 Тортуозност, 129
 Транспортер
 пужни, 164
 тракасти, 164
 Третман, 66
 Трење, 12
 Тројна тачка воде, 81, 183
 Турбуленција, 29
 Тургор, 68
 Тургорски притисак, 68
 Угао квашења, 36
 Укус, 24, 66
 Ултразвук, 22, 67, 220, 221
 Ултразвучна кавитација, 222
 Фазна промена, 81
 Фазно-променљиви материјал, 200
 Фактор
 диелектричног губитка, 21

облика, 119
Ферментисано месо, 215
Физисорпција, 72
Филм течности, 72, 73
Флуиди
 Њутновски, 15
 Нењутновски, 15
 динамика, 109
 механика, 110
Флуидизација, 171
Флуидизован слој, 171
Флуидни делић, 141
Флуидност, 15
Фономски, 26
Форме везивања влаге, 71
Формирање капљице, 177

Фрагментирано, 111
Фрактал, 111
Фрактална
 геометрија, 92, 110, 112
 димензија, 9, 92, 111,
 112
Фреквенца, 112
Функција
 Беселова, 128
 Вејерстрас-Манделброт,
 112
 расподела вероватноћа,
 141
 расподела честица, 110
 случајна расподела,
 109

Фурије, 94
Хемисорпција, 72
Хемијски потенцијал, 19
Хи-квадратна расподела,
 124
Хигроскопна/ни
 материјали, 74, 95
 садржај влаге, 75
 супстанца, 60, 187
 тачка, 75
Хигроскопност, 129, 130
Хигротермална равнотежа, 74,
 81, 85, 101
Хидролиза, 58
Хрскавост, 22, 216
Хумектанти, 187

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

66.047(075.8)

ЗЛАТАНОВИЋ, Иван, 1977-

Сушење у биотехничким системима / Иван Ј. Златановић. - 1. изд. - Београд :
Универзитет, Машински факултет, 2022 (Београд : Planeta print). - IX, 244 стр. :
илустр. ; 30 cm

Ауторова слика. - Тираж 100. - О аутору: стр. V. - Напомене и библиографске
референце уз текст. - Библиографија: стр. [247-256]. - Регистар.

ISBN 978-86-6060-141-6

а) Сушење б) Сушнице

COBISS.SR-ID 76790281