

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

М.Сс. Михаило П. Милановић

**ТЕРМОМЕХАНИЧКИ АСПЕКТИ ПРОЦЕСА
СУШЕЊА ОСТАКА ИЗ ПРОИЗВОДЊЕ
СОКОВА**

Докторска Дисертација

Београд, 2021

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

M.Sc. Mihailo P. Milanović

**THERMOMECHANICAL ASPECTS OF THE
DRYING PROCESS OF JUICE INDUSTRY
RESIDUES**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2021

Комисија за преглед и одбрану:

Ментор:

др Мирко Коматина, редовни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

Чланови комисије:

др Милош Бањац, редовни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет
др Иван Златановић, ванредни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет
др Небојша Манић, ванредни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет
др Бранко Бугарски, редовни професор
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

Датум одбране:

ЗАХВАЛНИЦА

Желео бих да искажем изузетну захвалност свима који су допринели реализацији ове докторске дисертације. Овде пре свега мислим на свог ментора, професора Мирка Коматину, који ме је од почетка до краја дисертације водио уз неизмерно стрпљење и предусетљивост. Професор Коматина ми је највише од свих помогао у обиковању теме, као и реализацији свих корака у току израде, све до завршетка дисертације. Без његове непосредне помоћи и ангажовања ова дисертација не би била реализовала у обиму и са квалитетом у којем је данас. Такође, желео бих да се захвалим професору Ивану Златановићу на огромној помоћи при осмишљавању и реализацији експерименталне сушаре, као и конкретним сугестијама и помоћи у вези са експерименталним истраживањима и тумачењем резултата током израде доктората. Професору Небојши Манићу се захваљујем на несебичној помоћи приликом решавања техничких изазова током експерименталних истраживања, као и на стручним саветима у вези са деловима дисертације. Професору Милошу Бањцу и професору Бранку Бугарском се захваљујем на корисним сугестијама и саветима, који су значајно допринели квалитету ове докторске дисертације.

Поред свог ментора и уважених чланова комисије, такође желим да се захвалим колегиницама и колегама који су ми олакшали израду дисертације и пружили неопходну помоћ у правом тренутку. Професорки Драгослави Стојиљковић се захваљујем на дозволи за коришћење опреме и просторија Лабораторије за горива и сагоревање Машинског факултета у Београду. Професору Владимиру Јовановићу се захваљујем на изузетно корисним сугестијама и помоћи у вези са дисертацијом. Зорани Станковић и Милошу Радојевићу се захваљујем на свесрдној помоћи око експерименталних истраживања која су вршена на Машинском факултету. Колегама са Пољопривредног факултета у Земуну желим да се захвалим на указаној помоћи, подршци и другарству током израде дисертације.

На крају бих желео да се захвалим својој породици на подршци и разумевању за све време трајања израде докторске дисертације. Израдити и одбранити докторску дисертацију подразумева поседовање одређеног нивоа зрелости, стрпљења и издржљивости, уз подношење велике жртве у виду времена и енергије. Надам да резултати ове докторске дисертације оправдавају уложен труд и рад.

ТЕРМОМЕХАНИЧКИ АСПЕКТИ ПРОЦЕСА СУШЕЊА ОСТАКА ИЗ ПРОИЗВОДЊЕ СОКОВА

Сажетак:

Научни циљ истраживања ове докторске дисертације обухвата испитивање процеса сушења остатака из производње сокова комбинованом кондуктивно-конвективном методом као и додатна испитивања термомеханичких особина овог материјала. Воћни троп настаје као отпад из производње воћних сокова, који се осушен може користити у енергетске сврхе, али такође као извор хранљивих материја или као сировина за производњу кондиторских производа, пића, амабалаже и у друге намене. Испитивања су спроведена на одговарајућој експерименталној опреми, укључујући експерименталну сушару која је осмишљена и конструисана за потребе експеримента, па се на основу добијених експерименталних резултата, развијеног сопственог математичког модела и одговарајућег софтверског пакета извршена детаљна анализа процеса сушења остатака из производње сокова, термомеханичких особина, као и анализа потрошње енергије приликом сушења кондуктивно-конвективном методом. У циљу верификације математичког модела, он је упоређен са експерименталним резултатима, као и са експерименталним резултатима других аутора.

Воћни троп показује различите особине приликом процеса сушења у односу на свеже воће и поврће. Структура материјала условљава квалитативно и квантитативно различите механизме преношења влаге унутар материјала, а узевши у обзир специфичност кондуктивно – конвективног довођења топлотног протока материјалу, као и нехомогеност воћног тропа, описивање процеса сушења представља захтеван задатак. У раду је детаљно анализирана кинетика процеса сушења воћног тропа нектарине и јабуке, израчуната вредност ефективног коефицијента дифузије влаге, измерена вредност ефективне топлотне проводљивости, одређена топлотна моћ, урађена анализа потрошње енергије за сушење, измерена температура на површини материјала у току процеса сушења, анализа изотермског издвајања влаге у току одређеног временског периода, као и термогравиметријска анализа.

На основу урађених теоријских и експерименталних истраживања постављене су основе за оптимизацију утицајних параметара процеса сушења у циљу подизања енергетске ефикасности и бољег разумевања механизма преношења влаге кроз материјал.

Кључне речи: сушење, воћни троп, остатак из производње сокова, конвекција, кондукција, потрошња енергије

Научна област: Машинство

Ужа научна област: Термомеханика

УДК класификација: 66.047.41-942(043.3)

66.047.41-944(043.3)

THE THERMOMECHANICAL ASPECTS OF THE DRYING PROCESS OF JUICE PRODUCTION RESIDUES

Abstract:

The scientific goal of the research of this doctoral dissertation include the examination of the drying process of residues from the production of juices by the combined conductive-convective method, as well as additional investigations of the thermomechanical properties of the material. Fruit pomace is reusable material obtained after industrial juice production, which, after drying, can be used for energetic purposes, but also as a source of nutrients or as a raw material for the production of confectionery, beverages, packaging and other purposes. The experiments were performed on suitable experimental installation, including experimental dryer, which is constructed and built for the experimental purposes. Based on the obtained experimental results, developed mathematical model and appropriate software package, a detailed analysis of the drying process kinetics, thermomechanical properties, as well as analysis of energy consumption during conductive-convective drying of juice production residues was performed. In order to verify the mathematical model, it was compared with the experimental results as well as with the experimental results of other authors.

The fruit pomace shows different properties during the drying process in relation to fresh fruits and vegetables. The structure of the material leads to qualitatively and quantitatively different mechanisms of moisture transfer within the material. Taking into account the specificity of combined conductive - convective heat flow to the material, as well as the inhomogeneity of the material, description of the drying process of fruit pomace presents a demanding task. The dissertation presents the analysis of kinetics of the drying process of nectarine and apple pomace, calculated value of the effective coefficient of diffusion of moisture, measured value of effective thermal conductivity, determined heating value, analysis of energy consumption for drying, measured surface temperature during drying, analysis of isothermal moisture release during certain period of time, and thermogravimetric analysis.

Based on the theoretical and experimental research, the basis for optimizing the influential parameters of the drying process have been laid in order to raise energy efficiency and better understand the mechanisms of moisture transfer through the material.

Key words: drying, fruit pomace, juice production residue, convection, conduction, energy consumption

Scientific field: Mechanical engineering

Scientific subfield: Thermomechanics

UDC classification: 66.047.41-942(043.3)

66.047.41-944(043.3)

САДРЖАЈ

1. УВОД.....	1
2. ОСНОВНИ ПОЈМОВИ И ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ ИЗ ОБЛАСТИ СУШЕЊА ПРЕХРАМБЕНИХ МАТЕРИЈАЛА	4
2.1. ОСНОВНИ ПОЈМОВИ И ФАЗЕ ПРОЦЕСА СУШЕЊА	4
2.2. ПРЕГЛЕД СИСТЕМА ЗА СУШЕЊЕ.....	9
2.3. ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ ИЗ ОБЛАСТИ ПОТРОШЊЕ ЕНЕРГИЈЕ ЗА СУШЕЊЕ ПРЕХРАМБЕНИХ МАТЕРИЈАЛА	15
2.4. МОГУЋНОСТИ КОРИШЋЕЊА И МЕТОДЕ СУШЕЊА ТРОПА ЈАБУКЕ И НЕКТАРИНЕ.....	17
2.4.1. КАРАКТЕРИСТИКЕ, УПОТРЕБА И ПРЕГЛЕД МЕТОДА СУШЕЊА ЈАБУЧНОГ ТРОПА	17
2.4.2. КАРАКТЕРИСТИКЕ, УПОТРЕБА И ПРЕГЛЕД МЕТОДА СУШЕЊА ТРОПА НЕКТАРИНЕ.....	24
3. ВРСТЕ ВЛАГЕ У ПРЕХРАМБЕНИМ МАТЕРИЈАЛИМА.....	28
3.1. КЛАСИФИКАЦИЈА ВЛАГЕ У ПРЕХРАМБЕНИМ МАТЕРИЈАЛИМА	28
3.2. МЕХАНИЗМИ ПРЕНОШЕЊА ВЛАГЕ У ПРЕХРАМБЕНИМ МАТЕРИЈАЛИМА ТОКОМ ПРОЦЕСА СУШЕЊА.....	31
4. ПРОСТОРНО-ВРЕМЕНСКИ МОДЕЛ ПРОЦЕСА СУШЕЊА КАПИЛАРНО-ПОРОЗНИХ МАТЕРИЈАЛА.....	36
4.1. ОПШТИ МОДЕЛ ПРОЦЕСА СУШЕЊА КАПИЛАРНО ПОРОЗНИХ МАТЕРИЈАЛА ПРЕМА ЛИКОВЉЕВОЈ ТЕОРИЈИ СУШЕЊА	36
4.2. ПРИМЕНА ОПШТЕГ МОДЕЛА ПРОЦЕСА СУШЕЊА КАПИЛАРНО-ПОРОЗНИХ МАТЕРИЈАЛА НА КОНКРЕТАН СЛУЧАЈ СУШЕЊА ВОЋНОГ ТРОПА	40
4.3. ПОЧЕТНИ И ГРАНИЧНИ УСЛОВИ ПРИ КОМБИНОВАНОМ КОНДУКТИВНО - КОНВЕКТИВНОМ СУШЕЊУ ПРЕХРАМБЕНИХ МАТЕРИЈАЛА У ТАНКОМ СЛОЈУ	41
5. МОДЕЛИ ПРОЦЕСА СУШЕЊА ПРЕХРАМБЕНИХ МАТЕРИЈАЛА	44
5.1. ПРЕГЛЕД И ПОДЕЛА ПОСТОЈЕЋИХ МОДЕЛА СУШЕЊА	44
5.2. ПРОСТОРНО – ВРЕМЕНСКИ МОДЕЛИ СУШЕЊА	46
5.3. ВРЕМЕНСКИ МОДЕЛИ СУШЕЊА (LUMPED MODELS).....	48
5.4. СОПСТВЕНИ ЕМПИРИЈСКИ МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛ	53
6. НЕКА ТЕРМОМЕХАНИЧКА СВОЈСТВА ПРЕХРАМБЕНИХ МАТЕРИЈАЛА	54
6.1. ГУСТИНА	54
6.2. ЕФЕКТИВНИ КОЕФИЦИЈЕНТ ДИФУЗИЈЕ ВЛАГЕ	56
6.3. ЕФЕКТИВНА ТОПЛОТНА ПРОВОДЉИВОСТ	58
6.4. ТОПЛОТНА МОЋ	61
7. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА.....	62
7.1. ОПИС ЛАБОРАТОРИЈСКЕ ОПРЕМЕ КОРИШЋЕНЕ ПРИ ИСПИТИВАЊИМА	62
7.1.1. ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛНЕ ЛАБОРАТОРИЈСКЕ СУШАРЕ.....	62
7.1.2. ОСТАЛА КОРИШЋЕНА ЛАБОРАТОРИЈСКА ОПРЕМА	68

7.2.	ОПИС ПРИПРЕМЕ УЗОРАКА ЗА ИСПИТИВАЊА	71
7.3.	МЕТОДОЛОГИЈА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ИСПИТИВАЊА	73
7.3.1.	ИСПИТИВАЊЕ КИНЕТИКЕ ПРОЦЕСА СУШЕЊА ВОЊНОГ ТРОПА У ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОЈ СУШАРИ	73
7.3.2.	МЕРЕЊЕ ПОТРОШЊЕ ЕНЕРГИЈЕ ЗА СУШЕЊЕ	74
7.3.3.	МЕРЕЊЕ ТОПЛОТНЕ ПРОВОДЉИВОСТИ МАТЕРИЈАЛА	77
7.3.4.	МЕРЕЊЕ ТЕМПЕРАТУРЕ ПОВРШИНЕ МАТЕРИЈАЛА У ТОКУ ПРОЦЕСА СУШЕЊА	78
7.3.5.	МЕРЕЊЕ ИЗДВАЈАЊА ВЛАГЕ ИЗ МАТЕРИЈАЛА ПРИ ИЗОТЕРМСКОМ СУШЕЊУ	79
7.3.6.	МЕРЕЊЕ ТОПЛОТНЕ МОЋИ ВОЊНОГ ТРОПА	79
7.3.7.	ТЕРМОГРАВИМЕТРИЈСКА АНАЛИЗА	79
8.	АНАЛИЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ РЕЗУЛТАТА	82
8.1.	ПОЧЕТНИ И РАВНОТЕЖНИ САДРЖАЈ ВЛАГЕ	83
8.2.	ВРЕМЕ СУШЕЊА	84
8.3.	КИНЕТИКА ПРОЦЕСА СУШЕЊА ВОЊНОГ ТРОПА	86
8.4.	ЕФЕКТИВНИ КОЕФИЦИЈЕНТ ДИФУЗИЈЕ ВЛАГЕ	90
8.5.	ОДРЕЂИВАЊЕ ПАРАМЕТАРА СОПСТВЕНОГ МАТЕМАТИЧКОГ МОДЕЛА	93
8.6.	ПОТРОШЊА ЕНЕРГИЈЕ ЗА СУШЕЊЕ	96
8.6.1.	ПОТРОШЊА ЕНЕРГИЈЕ ЗА ЗАГРЕВАЊЕ ВАЗДУХА	96
8.6.2.	ПОТРОШЊА ЕНЕРГИЈЕ СА ГРЕЈНЕ ПОДЛОГЕ	102
8.6.3.	УКУПНА ПОТРОШЊА ЕНЕРГИЈЕ	108
8.7.	ТОПЛОТНА ПРОВОДЉИВОСТ	112
8.8.	ТЕМПЕРАТУРА ПОВРШИНЕ МАТЕРИЈАЛА У ТОКУ СУШЕЊА	120
8.9.	ИЗДВАЈАЊЕ ВЛАГЕ ПРИ КОНСТАНТНОЈ ТЕМПЕРАТУРИ ВАЗДУХА	126
8.10.	ТОПЛОТНА МОЋ ОСУШЕНОГ ВОЊНОГ ТРОПА	128
8.11.	ТЕРМОГРАВИМЕТРИЈСКА АНАЛИЗА	129
9.	ПОРЕЂЕЊЕ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ РЕЗУЛТАТА СА СОПСТВЕНИМ МОДЕЛОМ И ЕКСПЕРИМЕНТИМА И МОДЕЛИМА ДРУГИХ АУТОРА	134
9.1.	ПОРЕЂЕЊЕ СОПСТВЕНОГ МАТЕМАТИЧКОГ МОДЕЛА СА СОПСТВЕНИМ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИМ РЕЗУЛТАТИМА	134
9.2.	ПОРЕЂЕЊЕ СОПСТВЕНОГ МАТЕМАТИЧКОГ МОДЕЛА СА МОДЕЛИМА ДРУГИХ АУТОРА	136
9.3.	ПОРЕЂЕЊЕ СОПСТВЕНИХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ РЕЗУЛТАТА СА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИМ РЕЗУЛТАТИМА ДРУГИХ АУТОРА	138
9.4.	АНАЛИЗА ГРЕШАКА МЕРЕЊА	141
10.	ЗАКЉУЧАК	143
11.	ЛИТЕРАТУРА	149
12.	ПРИЛОЗИ	156
12.1.	Прилог 1 – Средњи почетни садржај влаге неких врста воћа и поврћа	156
12.2.	Прилог 2 - Коefицијенти уз Ликовљеве једначине	158

12.3.	Прилог 3 – Вредност апсолутне влажности ваздуха на излазу из коморе и експериментално утврђена маса издвојене влаге	159
12.4.	Прилог 4 – Максимално могућа издвојена влага	160
	Биографија аутора	161

Списак ознака

Ознака	Јединица	Значење
A	m^2	Површина
A_1, A_2	-	Геометријски фактори у једначинама модела сушења
$a, b, c, d, e, ..$	-	Коефицијенти у једначинама
b	-	Показатељ испуњености капилара у капиларно-порозним телима
c	J/kgK	Специфични топлотни капацитет влажног материјала
c_p	J/kgK	Специфични топлотни капацитет ваздуха при константном притиску
C_m	kg/m ³	Масена концентрација
D_E	m ² /s	Коефицијент ефузије влаге кроз материјал
D_p	m ² /s	Конвективни филтрациони коефицијент дифузије
D_m	m ² /s	Коефицијент дифузије влаге кроз материјал
D_m^T	m ² /Ks	Термоградијентни коефицијент дифузије влаге
D_{eff}	m ² /s	Ефективни коефицијент дифузије
$D_{E,eff}$	m ² /s	Ефективни коефицијент ефузије
D_e	m ² /s	Еквивалентни коефицијент дифузије у капиларно порозним материјалима
DR	kg _w /s	Брзина сушења
f_K	-	Дистрибутивни фактор
g	kg/kg	Масени удео
H	%	Масени проценат водоника у гориву
H_d	kJ/kg	Доња топлотна моћ
H_g	kJ/kg	Горња топлотна моћ
h	J/kgK	Енталпија
J	kg/m ³ s	Извори или понори i -те фазе у материјалу узроковане фазним променама
j	kg/m ² s	Интензитет флукса масе
\vec{j}	kg/m ² s	Флукс влаге
\vec{j}_{en}	J/m ² s	Флукс енергије
K	1/s	Константа сушења
$k, k_1, k_2, k_3, ...$	1/s	Експериментално добијена константа сушења
k_c	kg·s/m ³	Капиларна кондуктивност
k_p	s	Коефицијент моларног преношења влаге филтрацијом
k_f	-	Коефицијент кретања филма течности у колоидним телима
k_f^T	-	Термоградијентни коефицијент кретања филма течности у колоидним телима

L	m	Дебљина сушеног материјала
m	kg	Маса
\dot{m}	kg/s	Масени проток
M	kg _w /kg _{sm}	Средњи садржај влаге у произвољном временском тренутку
MR	-	Средња влажност у бездимензионом облику
n	-	Цео број
p	Pa	Апсолутни притисак
p_s	Pa	Парцијални притисак zasiћења
Q	J	Количина топлоте
Q_m	J/mol	Количина енергије потребна за уклањање 1 mol-а влаге из материјала
q	J/kg	Специфична количина топлоте
\dot{q}	J/kg s	Специфични топлотни проток
R	J/molK	Универзална гасна константа (8,314 J/molK)
r	J/kg	Латентна топлота
R	m	Полупречник поре
R^2	-	Коефицијент детерминације
$RMSE$	-	Стандардна грешка регресије
T	K	Температура по сувом термометру
t	°C	Температура по сувом термометру
v	m/s	Брзина
\dot{V}	m ³ /s	Запремински проток
W	%	Масени проценат влаге у гориву
X	m ³ /m ³	Запремински удео
x	kg _w /kg _{sv}	Апсолутна влажност ваздуха
x, y, z		Координате Декартовог правоуглог координатног система

Индекси

Ознака	Значење
i ($i = 0 \div 4$)	Ознака одређене фазе у саставу влажног материјала
0	Почетно стање (Поглавље 2 и 4); Суви скелет материјала (Поглавље 4); Стање ваздуха 0 (Поглавље 7)
1	Парна фаза (Поглавље 4); Стање ваздуха 1 (Поглавље 7)
2	Течна фаза (Поглавље 4); Стање ваздуха 2 (Поглавље 7)
3	Чврста фаза
4	Инертни гас
vo	Влажна основа
so	Сува основа
e	Стање равнотеже
kr	Крајње стање
dif	дифузионо
cap	капиларно
k	колоидно
par	паралелни
ser	серијски

<i>sv</i>	Суви ваздух
<i>vv</i>	Влажан ваздух
<i>V</i>	ваздух
<i>w</i>	Влага, вода
<i>vm</i>	Влажан материјал
<i>sm</i>	Сува материја, потпуно сув материјал
<i>teor</i>	теоријски
<i>kor</i>	Корисно
<i>uz</i>	Узорак
<i>uk</i>	Укупно
<i>eksp</i>	Експериментално
<i>max</i>	максимално
<i>gp</i>	Грејна подлога
<i>en</i>	Енергија
<i>s</i>	Сатурација

Грчке ознаке

Ознака	Јединица	Значење
α	m^2/s	Топлотна дифузивност
δ	1/К	Коефицијент термовлагопроводности
δ_p	-	Бездимензиони коефицијент филтрационог кретања влаге
ε	-	Коефицијент фазне трансформације течности у пару
η	Pa·s	Динамичка вискозност
θ	rad	угао квашења капиларе
λ	W/mK	Топлотна проводљивост влажног материјала
Π	m^3/m^3	Порозност
ρ	kg/m^3	Густина
σ	N/m	Површински напон
τ	s	време
τ_0	s	Почетни временски тренутак
τ_{kr}	s	Крајњи временски тренутак
φ	-	Релативна влажност ваздуха
ψ	m^2/s^2	Капиларни потенцијал

1. УВОД

Остатак из процеса производње сокова (троп, кљук, комовина) је влажан материјал који преостаје након цеђења воћа или поврћа. Састоји се од коре, семенки, петелки и везивног ткива биљака. У свету и код нас воћни троп се користи као сточна храна, али се може користити и у моге друге сврхе, на пример, за добијање пектина и антиоксиданаса екстракцијом. Такође, користи се као сировина за производњу јаких алкохолних пића, воћног јогурта, воћног брашна, као додаток кондиторским производима, затим као ђубриво, супстрат за узгајање гљива, па чак и као сировина за производњу амбалаже. Остатак из производње сокова се такође може користити као сировина за производњу биогорива и супстрат за ензимске процесе [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7]. Воћни троп садржи значајну количину хранљивих материја као што су угљени хидрати, биљна влакна, фенолне киселине и флавоноиди, пектин, целулоза, као и мање количине протеина и масти. Због тога се воћни троп сматра вредним извором антиоксиданаса, који утичу повољно на здравље људи и имају значајну улогу у превенцији разних болести. При индустријском цеђењу сокова, поготову код мањих произвођача воћних сокова, овај остатак се баца или користи за исхрану домаћих животиња. У свету и код нас се велика количина остатка из производње сокова, уколико није искоришћена као сточна храна, одлаже на поља и њиве, што може да има негативне последице по животну средину. Услед неадекватног одлагања велике количине остатка из производње сокова на њиве и у природу, може доћи до загађења ваздуха и земљишта. Разлог томе је чињеница да је за аеробну разградњу воћног тропа потребна значајна количина кисеоника, при чему се такође у атмосферу емитује гас метан, који је један од гасова са ефектом стаклене баште. Према досадашњим истраживањима, производња концентрата од биљних влакана и екстракција пектина су тренутно комерцијално најисплативије употребе овог отпадног материјала. Употребу остатка из производње сокова можемо сврстати на следећи начин:

- Употреба у пољопривреди као ђубриво за земљиште
- Храна за домаће животиње
- Прехрамбени производи – прављење џемова сосева, брашна, алкохолних пића, итд.
- Екстракција пектина и полифенола
- Екстракција биљних влакана
- Екстракција уља (из семенки)
- Гасификација за производњу метана или биогаса
- Производња амбалаже и друго

Дисертација обрађује термомеханичке аспекте процеса сушења остатака из производње сокова две врсте воћног остатка - јабуке и нектарине. Ови материјали су изабрани због своје распрострањености и широке употребе у Србији, а такође и због доступности материјала за експериментално истраживање.

Воћни троп је органски материјал који поседује велику количину влаге (и преко 85%), што га чини изузетно кварљивим. Процес сушења је један од најподогнијих и најчешће примењиваних третмана овог материјала. Сушењем се смањује садржај влаге у воћном тропу и успорава или потпуно спречава развој микроорганизама. Сушењем се такође смањује запремина коју материјал заузима, па се тиме омогућава једноставније складиштење ове сировине и смањење транспортних трошкова.

Сушење је један од основних индустријских процеса, који има огроман практичан значај у хемијској и фармацеутској индустрији, пољопривреди и преради хране, индустрији папира, дрвета и минерала, као и у процесу припреме горива као што су биомаса и угаљ. Ретки су индустријски процеси у којима бар једна фаза није процес сушења. Сушење подразумева процес спрегнутог преношења количине топлоте и супстанције у циљу уклањања влаге (у

највећем броју случајева воде) из материјала који могу бити чврсте материје, течности, гелови и др. Осим у случају лиофилизације, где се влага из материјала уклања сублимацијом под вакуумом, сушење је процес за који је потребно довести одређену количину топлоте материјалу (термално условљен процес), чиме се постиже испаравање влаге из сушеног материјала. Довођењем топлотног протока материјалу који се суши, материјал се загрева, што поспешује раскидање веза влаге и чврстог скелета материјала. Потребна количина топлоте се најчешће доводи конвекцијом преко агенса сушења, који такође односи издвојену влагу из материјала. Међутим постоје и други начини довођења топлотног протока сушеном материјалу, као што су кондукција и зрачење (микроталасно или инфрацрвено), као и комбиноване методе довођења топлотног протока. У овој дисертацији је обрађено конвективно и комбиновано кондуктивно-конвективно довођење топлотног протока материјалу.

Са енергетског становишта, сушење је један од најзахтевнијих процеса у индустрији. Индустријске сушаре троше око 12% укупне енергије која се користи у производним процесима [8]. У САД укупна енергија која се троши за сушење износи $1600 \cdot 10^9$ МЈ годишње. У Северној Америци, на пример, приближно 15% потрошене енергије отпада на сушење. У Великој Британији и Француској годишња потрошња енергије за сушење износи $128 \cdot 10^9$ МЈ и $168 \cdot 10^9$ МЈ, респективно. На сектор хране и пољопривредних производа се, поред сушења папира, у ове две земље троши највише енергије и потрошња износи $46,3 \cdot 10^9$ МЈ у Француској и $35 \cdot 10^9$ МЈ у Великој Британији, тј. око 12% укупне енергије у процесу прераде хране. У Шведској хемијској индустрији 15% укупне енергије се користи на сушење. Из наведених података намеће се закључак да су основни захтеви процеса сушења да се он учини ефикаснијим, исплативим, одрживим и мање оптерећујућим за животну средину. Због тога је за оптимизацију процеса сушења од суштинске важности разумевање процеса и феномена који се одвијају, као и карактеристика материјала. То значи разумевање аналитичких метода термодинамике, преношења масе и супстанције, психрометрију, карактеристике материјала, итд. Понекад се у току сушења јављају процеси као што су кристализација, промена облика и запремине материјала, промена текстуре материјала, порозности итд. Битан параметар који утиче на ефикасност је време сушења. У зависности од врсте материјала који се суши (величине, порозности, итд.) и услова, процес сушења може да траје од неколико милисекунди до неколико месеци. [9]

Тренутна количина произведеног воћног тропа указује на велики потенцијал употребе овог материјала. Процењује се да на светском нивоу само остатак од јабука износи око 1,4 милиона тона свежег отпада. Сматра се да се у Француској, где се годишње произведе око 1,8 милиона тона јабука, трећина јабука користи за производњу сокова или сајдера, што резултује добијањем око 150000 тона воћног отпада (тропа). У Индији се, на пример, производи 1 милион тона јабучног отпада, од чега се користи само 10000 тона (тј. око 1%), и то као сточна храна [10] [11].

Потенцијали употребе остатака из производње сокова у Србији су значајни. Према подацима Републичког завода за статистику [12], производња воћних сокова у 2019. години дата је у Табели 1.1:

Табела 1.1: Производња воћних сокова у Србији

Врста сока	Остварена производња (hl)	Залихе на крају године (hl)	Продаја (hl)
Сок од парадајза	8800	1367	8600
Сок од поморанце	200954	19883	199070
Сок од грејпфрута	1995	276	1981
Сок од јабука	346681	26705	342182

Мешани сок од воћа и поврћа, неферментисан, без додатка алкохола	392420	30754	389287
Неконцентровани сок осталих појединачних врста воћа и поврћа, неферментисан и без додатог алкохола (искључујући поморанцу, грејпфрут, грожђе и јабуку)	257906	17820	255441
Остали сокови од воћа и поврћа, на другом месту непоменути	263562	25064	267707
Укупно	1472318	121869	1464268

Укупна производња безалкохолних пића у Србији износила је 2019. године 7105 хиљада хектолитара, од чега је количина произведених сокова износила 1472 хиљада хектолитара. Узевши у обзир да се у технологији производње сокова 75% масе воћа претвара у сок, а 25% представља остатак из процеса производње сокова, и уколико се усвоји претпоставка да је специфична густина свежег остатка између 935 kg/m^3 [13] и 1120 kg/m^3 [14], укупна маса произведеног отпада из индустрије сокова у Србији 2019. године износила је око 147232 тона свежег воћног остатка. Приликом сушења воћног остатка, одстрањује се око 80% масе, што даје око 29447 тона осушеног воћног остатка спремног за употребу. Може се усвојити да горња топлотна моћ воћног остатка износи $17,5 \text{ MJ/kg}$, што је готово идентична вредност као и горња топлотна моћ дрвета. Примера ради, просечном домаћинству у Србији потребно је око 4 тоне дрвета за грејање за зимску сезону. То би значило да би директним ложењем, преко 7360 домаћинстава у Србији могло да се греје на осушени воћни остатак уместо на дрва.

Циљ и предмет истраживања ове дисертације је испитавање одређених термомеханичких аспеката остатка из процеса производње сокова који су неопходни за суштинско разумевање процеса сушења ове врсте материјала. У сврху испитивања коришћена је различита опрема укључујући експерименталну сушару која подржава комбиновано кондуктивно и конвективно довођење топлотног протока материјалу, затим TGA Analyzer - уређај за термогравиметријску анализу, затим лабораторијска пећ, TSi уређај за испитивање топлотне проводљивости материјала, уређај за мерење температуре површине материјала и калориметар са бомбом.

У току дисертације коришћене су методе научних области Термодинамике, Преношења количине топлоте и супстанције, Механике флуида и Математичке анализе.

Полазна хипотеза дисертације је да је комбиновано кондуктивно-конвективно довођење топлотног протока материјалу квалитативно и квантитативно различито од чисто конвективног довођења топлотног протока, као и да може да се пронађе оптимални режим сушења у односу на време сушења и потрошњу енергије потребне за сушење ове врсте материјала.

У оквиру дисертације су поред полазних хипотеза разматрани и други термомеханички аспекти остатка из процеса производње сокова (воћног тропа), који су битни за процес сушења, а методологија и закључци истраживања јасно презентовани.

2. ОСНОВНИ ПОЈМОВИ И ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ ИЗ ОБЛАСТИ СУШЕЊА ПРЕХРАМБЕНИХ МАТЕРИЈАЛА

У овом поглављу је дат преглед постојећих система и уређаја за сушење прехранбених производа, основни појмови и фазе процеса сушења, као и потрошња енергије за сушење прехранбених производа. Такође, дат је преглед о могућностима коришћења и методама сушења тропа јабуке и нектарине.

2.1. ОСНОВНИ ПОЈМОВИ И ФАЗЕ ПРОЦЕСА СУШЕЊА

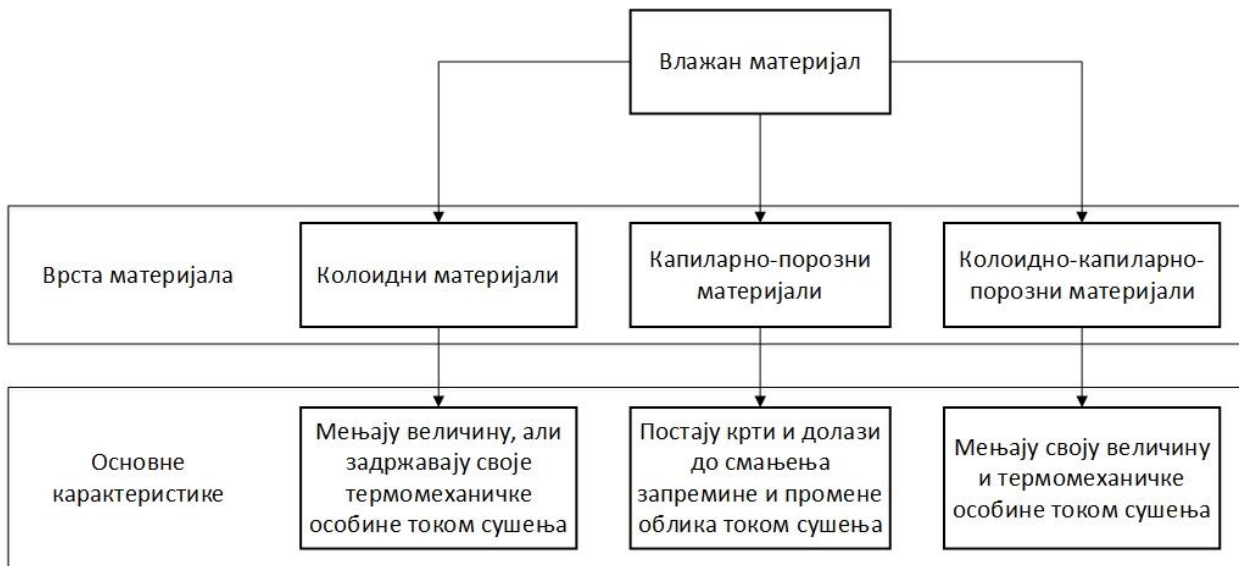
Влага у прехранбеним материјалима представља течност у материјалу која се у процесу сушења мора делимично или потпуно одстранити. [15]

Влажни материјали се могу класификовати у три категорије у односу на то како се понашају у току процеса сушења [16]:

- Колоидни материјали
- Капиларно-порозни материјали
- Колоидно-капиларно-порозни материјали

Колоидни материјали приликом процеса сушења мењају своју величину али задржавају своје еластичне особине (примери су желатин или агар-агар). **Капиларно-порозни** материјали постају у току сушења крти и могуће их је после сушења самлети (песак, кафа, дрвени угаљ, итд.). Особина порозних тела је постојање празног простора, тј. шупљина испуњених ваздухом, које се називају капиларе или поре, а могу да имају различите облике и димензије. Материјали код којих је величина пора мања од 10^{-7}m [9] могу се сматрати капиларно-порозним материјалима. Код ових материјала влага се налази у капиларама и везана је за материјал површинским напоном. Ако је величина пора већа од 10^{-7}m , тада уз капиларне силе, такође и гравитационе силе играју значајну улогу, и у том случају се ови материјали називају **порозни**. **Колоидно-капиларно-порозни** материјали имају особине и колоидних и капиларно-порозних материјала. Зидови капилара су еластични и могу да мењају облик и величину у току процеса сушења. Неки типични примери колоидно-капиларно-порозних материјала су прехранбени производи, дрво, папир, кожа, тресет и глина. Ови материјали су капиларно-порозни са аспекта своје структуре јер упијају течност независно од хемијског састава течности, а колоидни због своје особине да мењају запремину приликом сушења [9].

На слици 2.1. је приказана подела влажних материјала у току процеса сушења.



Слика 2.1: Подела влажних материјала [9]

Средња влажност материјала може се дефинисати на два начина: средња влажност по влажној и сувој основи. Средња влажност по влажној основи се још назива и *релативна влажност материјала*, а влажност по сувој основи се назива *апсолутна влажност материјала*.

Средња влажност по влажној основи (релативна влажност материјала) дефинише се као однос масе воде присутне у материјалу и укупне масе влажног материјала:

$$M_{vo} = \frac{m_w}{m_{vm}} = \frac{m_w}{m_w + m_{sm}} \left[\frac{\text{kg}_w}{\text{kg}_{vm}} \right] \quad (2.1)$$

где је индексом *vm* означен влажан материјал, индексом *w* означена вода, а индексом *sm* означена сува материја. Како средњи садржај воде по влажној основи представља однос масе воде према укупној маси влажног материјала, њена вредност може да се креће између 0 и 1, тј. 0 за потпуно сув материјал и 1 за чисту воду.

Средња влажност по сувој основи (апсолутна влажност материјала) дефинише се као:

$$M_{so} = \frac{m_w}{m_{sm}} = \frac{m_{vm} - m_{sm}}{m_{sm}} = \frac{m_{vm}}{m_{sm}} - 1 \left[\frac{\text{kg}_w}{\text{kg}_{sm}} \right] \quad (2.2)$$

Садржај воде по сувој основи представља однос масе воде у материјалу према маси суве материје и може имати вредности од 0 па навише.

Веза између садржаја воде по сувој и влажној основи дата је изразима:

$$M_{so} = \frac{M_{vo}}{(1 - M_{vo})} \left[\frac{\text{kg}_w}{\text{kg}_{sm}} \right] \quad (2.3)$$

$$M_{vo} = \frac{M_{so}}{(1 + M_{so})} \left[\frac{\text{kg}_w}{\text{kg}_{vm}} \right] \quad (2.4)$$

У процесу сушења, садржај воде се најчешће приказује као садржај воде по сувој основи - M_{sm} [9]. Код материјала са високим садржајем воде, што је случај код прехранбених производа, M_{sm} може да има вредност већу од 1.

Средња почетна влажност (M_0) представља количину влаге у материјалу на почетку процеса сушења. Може да буде изражен преко суве и влажне основе. У процесима сушења се углавном изражава преко суве основе, тј.

$$M_0 = \frac{m_w(\tau_0)}{m_{sm}} \left[\frac{\text{kg}_w}{\text{kg}_{sm}} \right] \quad (2.5)$$

Прехрамбени материјали имају углавном средњу почетну влажност већу од 1. Тако, на пример, за целер ова вредност износи 20,6 а за банану 2,8 [17], [18]. Детаљније вредности средње почетне влажности неких врста воћа и поврћа налазе се у **Прилогу 12.1**.

Средња равнотежна влажност (M_e) представља количину влаге у материјалу која се налази у стању равнотеже са агенсом сушења при одређеној температури и влажности агенса сушења. Мења се са температуром и влажношћу агенса сушења.

$$M_e = \frac{m_w(\tau_k)}{m_{sm}} = \frac{m_e - m_{sm}}{m_{sm}} = \frac{m_e}{m_{sm}} - 1 \left[\frac{\text{kg}_w}{\text{kg}_{sm}} \right] \quad (2.6)$$

Ово је такође минимални садржај влаге који материјал може да достигне при одређеним условима сушења. Средња равнотежна влажност зависи, поред параметара агенса сушења, и од природе материјала који се суши. За нехигроскопне материјале, равнотежни садржај влаге је практично 0 за све вредности температуре и влажности агенса сушења. За хигроскопне материјале (материјали који упијају влагу као што су дрво, прехрамбени материјали, папир, сапун и др.) вредност средње равнотежне влажности варира за широк опсег температура и влажности.

Средња влажност у бездимензионом облику (MR) се дефинише изразом:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} [-] \quad (2.7)$$

У изразу (2.7), M представља средњу влажност материјала по сувој основи у произвољном тренутку времена. MR је показатељ до које мере је материјал осушен при одређеним условима сушења. Вредност MR се креће од 0 до 1, при чему се $MR=1$ односи на почетак процеса сушења када материјал поседује почетну влажност M_0 , а $MR=0$ на крај процеса сушења, када материјал достиже равнотежну влажност M_e .

Брзина сушења представља брзину издвајања влаге из материјала током процеса сушења и може се исказати формулом:

$$DR = \frac{dM}{d\tau} = -j \cdot A \left[\frac{\text{kg}_w}{\text{kg}_{sm} \text{s}} \right] \quad (2.8)$$

Где j [$\text{kg}_w/\text{m}^2\text{s}$] представља вредност флукса влаге који се издваја из материјала, а A [m^2] површину са које се влага издваја.

Температура тачке росе се дефинише као температура на којој долази до кондензације водене паре при хлађењу ваздуха на константној температури.

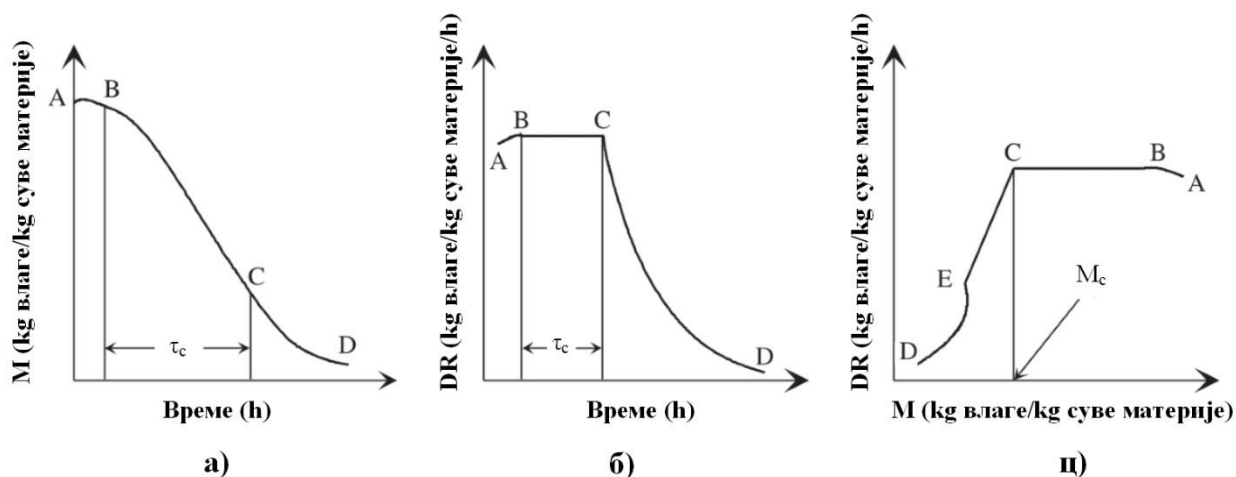
Температура по сувом термометру је температура влажног ваздуха коју читавамо директно са мерног уређаја.

Температура по влажном термометру је температура потпуно оквашене површине са које вода испарава у незасићен влажан ваздух, тј. ово је температура која одговара температури сатурације при парцијалном водене паре у влажном ваздуху.

Приликом теоријског разматрања процеса сушења, разликују се три области проучавања: статика, кинетика и динамика процеса сушења.

Статика процеса сушења разматра узајамно дејство влажног материјала са агенсом сушења (најчешће ваздухом), тј. проучава параметре материјала и агенса (температура и влажност материјала и ваздуха) при којима су материјал и околни агенс сушења у равнотежи. Равнотежно стање подразумева да не постоји размена влаге између материјала и ваздуха. Стање равнотеже се може достићи тако што материјал упија влагу из ваздуха (сорпција) или уколико влага испарава из материјала у ваздух (десорпција). Равнотежно стање се најчешће представља преко дијаграма где се за одређену равнотежну температуру на апсциси представља садржај влаге у материјалу (kg влаге / kg суве материје), док се на ординати уцртава релативна влажност ваздуха. Тако се добијају сорпционе и десорпционе криве које се у општем случају не поклапају, већ се јавља хистерезис [15] [19].

Кинетика процеса сушења описује промену најбитнијих параметара сушења (као што је средња влажност и температура материјала) у времену. Кинетика сушења омогућава одређивање количине испареле влаге из материјала, време сушења, ефективни коефицијент дифузије, итд. Ове величине зависе у великој мери од карактеристика материјала који се суши, али такође зависе и од спољашњих услова процеса, као што су брзина агенса (ваздуха), температура, релативна влажност ваздуха, начина довођења топлоте, итд. Постоји неколико типова дијаграма чијом се анализом добија потпунија слика одвијања кинетике процеса сушења. Типични дијаграми су: промена садржаја влаге по сувом остатку у времену сушења, промена брзине сушења у времену сушења, као и промена брзине сушења у односу на садржај влаге материјала (Слика 2.2). Током сушења влажног чврстог материјала топлим ваздухом, ваздух, поред тога што доводи неопходну количину топлоте материјалу потребну за сушење, такође служи и као медијум за одношење влаге у виду паре са површине материјала.



Слика 2.2: Фазе процеса сушења [9]

На дијаграму на Слици 2.2 а), први део процеса, означен као А-В представља **период загревања материјала** током кога површина материјала долази у равнотежу са агенсом сушења. У току ове фазе сушења целокупна површина материјала је засићена влагом. У зависности од параметара агенса сушења и материјала, током овог периода сушења, влажан материјал може да губи или прима влагу из околног ваздуха, што зависи од температуре и влажности агенса сушења и материјала. Са аспекта потрошње енергије и времена сушења, период А-В углавном представља занемарљив део укупне потрошње енергије и времена потребног за процес сушења. Период загревања материјала траје док површина материјала не дође у температурску равнотжу са агенсом сушења, тј. док се не успоставе услови такви да влага почне да континуирано испарава из сушеног материјала.

У току периода **константне брзине сушења** означеног као В-С на дијаграму на слици 2.2 б), долази до приближно линеарног смањења садржаја влаге у материјалу у времену. Ово је период сушења током кога је брзина уклањања влаге из материјала, тј. брзина сушења (DR) приближно константна, па се зато и назива период константне брзине сушења. У току периода константне брзине сушења, унутрашњи отпори преношења влаге из унутрашњости ка површини материјала су истог реда величине као и отпори преношењу влаге са површине материјала у агенс сушења. Брзина сушења је условљена спољашњим параметрима сушења (као што је температура, релативна влажност, брзина струјања), тј. доведеним топлотним протоком материјалу. У овом периоду је брзина уклањања влаге са површине материјала истог реда величине као брзина којом се влага креће кроз материјал ка површини материјала, и због тога у овом периоду површина материјала изложена агенсу сушења остаје засићена влагом.

Тачка С, у којој се завршава период константне брзине сушења, назива се критични садржај влаге. Након ове тачке следи период **опадајуће брзине сушења**, означеног као С – D на дијаграму на слици 2.2 ц). У току овог периода сушења на површини материјала изложеној агенсу сушења долази до постепеног смањења садржаја влаге, тј. површина материјала постаје незасићена влагом. Влага се из унутрашњости материјала до површине преноси различитим механизмима (најчешће дифузијом влаге или капиларним силама) до површине материјала, а затим се са површине уклања прелазом влаге у агенс сушења. Од тачке С па надаље, температура површине материјала почиње да расте приближавајући се температури тачке росе ваздуха како материјал постаје потпуно сув. Период опадајуће брзине сушења се састоји у општем случају из два периода. У току **првог периода опадајуће брзине сушења** долази до појаве сувих делова на површини материјала, и ова фаза се завршава када површина материјала изложена агенсу сушења постане потпуно сува – тачка Е на дијаграму 2.2 ц). У првом периоду опадајуће брзине сушења на брзину сушења поред спољашњих услова, тј. параметара агенса сушења утичу и унутрашњи отпори преношењу влаге до површине материјала. У тачки Е почиње **период друге опадајуће брзине сушења**, где је целокушна површина изложена околном ваздуху потпуно сува. У овом периоду на брзину сушења доминантан утицај имају унутрашњи отпори провођењу влаге до површине материјала. Током овог периода влага које се испаравање влаге не врши на површини материјала, већ се фронт испаравања повлачи у унутрашњост материјала. Брзина сушења је одређена углавном брзином кретања влаге кроз материјал, а како сушење одмиче, спољашни ефекти као што су брзина ваздуха постају мање значајни. Период опадајуће брзине сушења углавном представља већи део времена сушења. [9]

Иако органски материјали, као што су пољопривредни и прехранбени производи, имају висок почетни садржај влаге, током сушења оваквих производа генерално се не јавља период константне брзине сушења, већ се целокупан процес сушења одвија у периоду опадајуће брзине сушења. Неки пољопривредни производи, као што су коштуњави и бобичасти плодови суше се само у другом периоду опадајуће брзине сушења.

Динамика процеса сушења разматра промену температурског поља и садржаја влаге у унутрашњости сушеног материјала у зависности од просторних координата и времена, узимајући у обзир све битне термомеханичке особине материјала и агенса сушења, почетне и граничне услове (начин довођења топлотног протока материјалу, иницијалну расподелу влаге у материјалу, итд.).

2.2. ПРЕГЛЕД СИСТЕМА ЗА СУШЕЊЕ

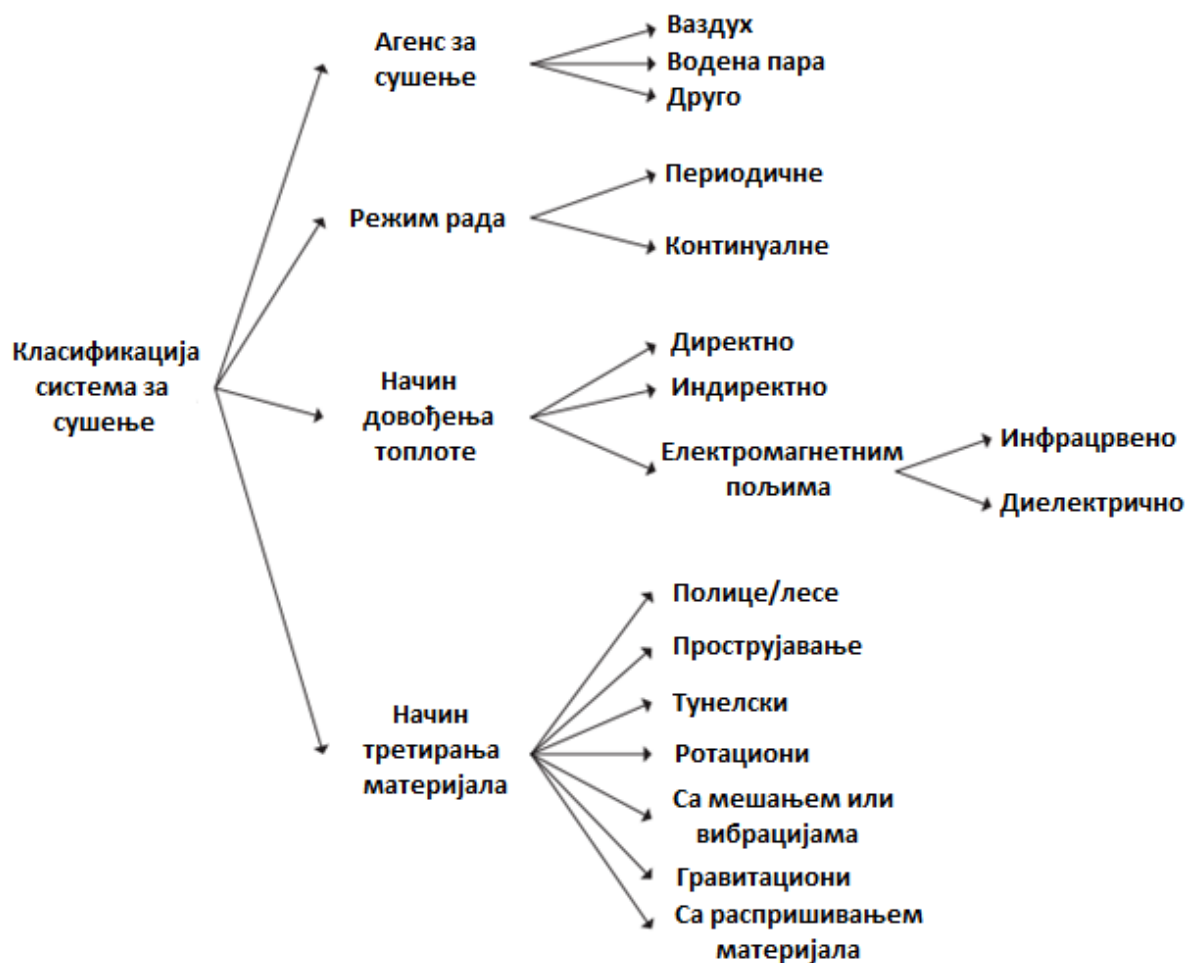
Постоји више типова опреме и система који се користе за сушење производа у прехранбеној индустрији. Да би процес сушења био што ефикаснији, опрема за сушење мора бити осмишљена, пројектована и изведена тако да су процеси преношења количине топлоте и супстанције оптимизовани, а параметри и агенс сушења добро изабрани.

Током процеса пројектовања система сушења, многи аспекти захтевају пажљиву анализу, као што су избор методе и агенса сушења у зависности од материјала и захтева финалног производа. Системи за сушење треба да буду пројектовани тако да процеси преношења влаге унутар материјала и преношење влаге са површине материјала у околни агенс (најчешће ваздух) буду избалансирани. Основни циљ сваке технологије сушења је да побољша квалитет производа са што мањим утрошком енергије и што већом продуктивношћу. Такође, важни захтеви пројектовања су да утицај на животну средину буде минималан, а систем исплатив.

Поделу система за сушење можемо извршити према неколико основних критеријума [9]:

- Врсти гаса који се користи као агенс за сушење
- Режиму рада (периодичне или континуалне)
- Начину третирања материјала у току сушења
- Начину довођења топлоте

На слици 2.3 приказана је класификација процеса сушења на основу горепомнутих критеријума.



Слика 2.3: Класификација система сушења [9]

Основни *агенс сушења* у већини процеса је ваздух, али то може такође бити водена пара или димни гасови, као и угљендиоксид и др.

Према *режиму рада* сушаре се могу поделити на периодичне и континуалне. Периодичне сушаре суше одређену количину материјала до жељених параметара, а затим се сушара празни и припрема за нову туру материјала. Кроз континуалне сушаре, са друге стране, присутан је стални проток материјал, тако да са једне стране сушаре улази влажан материјал, а на другој страни излази осушен материјал.

Према *начину довођења топлоте материјалу*, сушаре се деле на директне (конвективне) и индиректне (контактне).

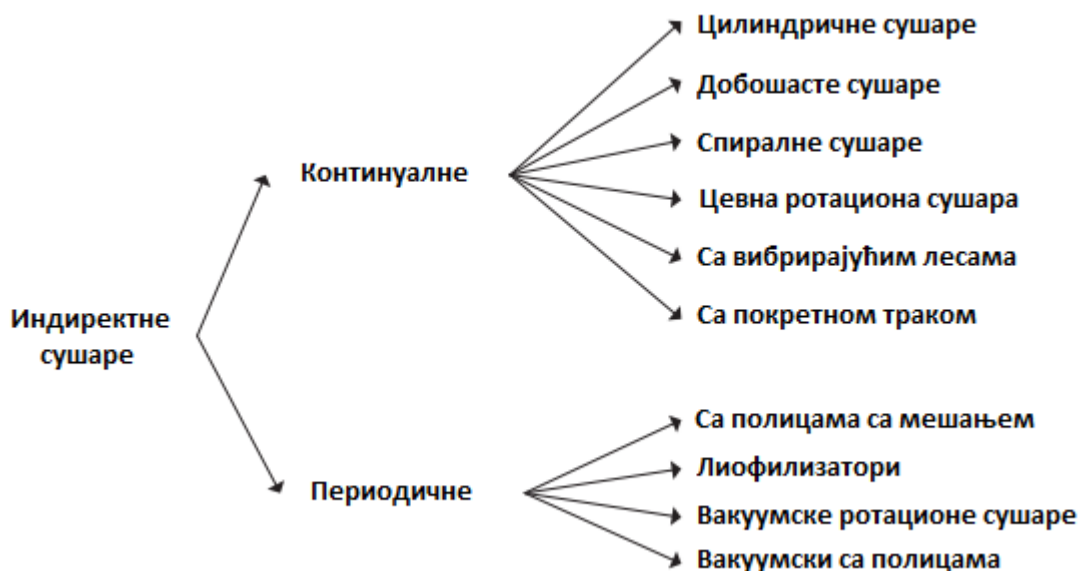
У тзв. конвективним или директним сушарама, влажан материјал и агенс сушења су у директном контакту, па се и пренос топлоте између агенса сушења и сушеног материјала врши прелазом количине топлоте са агенса сушења на материјал, а агенс сушења истовремено служи као медијум за одношење влаге из материјала. На слици 2.4 дата је класификација директних, тј. конвективних сушара. Захваљујући директној размени топлотног протока прелазом топлоте са топлог флуида на влажан материјал, температуре материјала могу да достигну високе вредности (до 1000К), што може бити од значаја за одређене процесе.



Слика 2.4: Класификација директних (конвективних) сушара [9].

У контактним (кондуктивним или индиректним) сушарама, материјал и извор топлотног протока су физички одвојени, тј. постоји зид (најчешће од метала) између њих. Са једне стране зида се налази влажан материјал, док се са друге стране доводи количина топлоте потребна за сушење материјала. Извор топлоте могу да буду издувни гасови из неког процеса, водена пара, уље, или неки други флуид, а такође се као извор топлоте може користити електрична енергија.

У индиректним типовима сушара, количина топлоте потребна за процес сушења доводи се преко слоја материјала који се налази између сушеног материјала и извора топлоте. Из овог разлога, максимална температура сушеног материјала у индиректним сушарама је нижа за око 200К у односу на директне сушаре [9]. Ови типови сушара се користе за сушење веома влажних материјала или за сушење материјала у веома танком слоју. За температурски осетљиве материјале често се пројектују са могућношћу сушења у вакууму. Због непостојања губитака енталпије, као код конвективних сушара, кондуктивне сушаре имају већу термичку ефикасност [20]. Са индиректним сушарама се може постићи боља контрола процесних параметара. Такође, индиректне сушаре су можда и најбоље решење када се суше осетљиви материјали коришћењем инертних гасова, где постоји и могућности рецикулације агенаса сушења. Како се количина топлоте влажном материјалу предаје кондукцијом преко контакта са топлим подлогом, називају се још кондуктивне или контактне сушаре. У случајевима када се контактне сушаре изводе као континуалне, материјал који се суши се је у контакту са топлим површином приликом проласка кроз сушару, као што је на пример случај приликом сушења папира на ваљкастим или цилиндричним сушарама. На Слици 2.5. дата је класификација индиректних, тј. контактних сушара.



Слика 2.5: Класификација индиректних сушара [9]

Температуре површина за размену топлоте у индиректним типовима сушара крећу се између -40°C (у случају лиофилизације) до 300°C (у случају индиректних сушара које се греју продукцима сагоревања). Како се довођење топлоте материјалу не врши агенсом сушења, за одстрањивање влаге из материјала потребан је много мањи проток агенса (гаса) у односу на конвективне типове сушара. Кондуктивне сушаре имају већу енергетску ефикасност од директних сушара јер је губитак кроз издувне гасове значајно смањен. Типична специфична потрошња енергије за контактне сушаре креће се од $2800 - 3600 \text{ kJ/kg}$ издвојене влаге, док та бројка код директних сушара износи $4000-6000 \text{ kJ/kg}$ издвојене влаге. Поређења ради, теоријска количина топлотне енергије која је потребна за испаравање 1 килограма влаге из материјала при стандардним условима је $2200 - 2700 \text{ kJ}$ [21].

Ефикасност сушара се може повећати комбиновањем предности конвективног и кондуктивног довођења топлотног протока, као што је, на пример, сушара са флуидизованим слојем у који су урођени грејачи. Такве сушаре могу бити знатно мањих димензија од конвективних сушара са флуидизованим слојем за исти капацитет.

Што се тиче **начина третирања материјала** у току сушења, сушаре можемо поделити као што је приказано у Табели 2.1:

Табела 2.1: Типови сушара у односу на начин третирања влажног материјала [9]

Начин третирања материјала	Тип сушаре и опис
Сушење на полицама	Коморне сушаре са полицама: Одређена количина материјала се поставља на лесе у комору и опструјавају се агенсом сушења – топлим ваздухом.
Прострујавање материјала	Овај тип сушаре је сличан стандардној сушари са лесема, с том разликом да топао ваздух пролази кроз материјал уместо преко њега.
Тунелско сушење	Тунелске сушаре се могу описати као велике коморне сушаре кроз коју лагано пролазе међусобно повезани вагонети са материјалом који се суши.

Сушење у ротирајућим добошима	Ротациона сушара: Ротациона сушара се састоји од ротирајућег добоша у коме се налази материјал. Кроз добош струји агенс сушења, а материјал се приликом ротације добоша додатно меша.
Сушење са механичким мешањем	Материјал се у току процеса сушења меша помоћу механичких мешача чиме се побољшава процес преношења топлоте на материјал. Често се контактне сушаре изводе са механичким мешањем.
Сушење на вибрационој траци	Вибрациона трака са директним довођењем топлоте: Комбинацијом механичких и пнеуматских сила врши се флуидизација материјала који се суши топлим ваздухом
Сушење слободним падом	Гравитационе сушаре: Материјал који се суши (честице, грануле, пелети или брикети) падају под дејством силе гравитације кроз посуду и суше се у контакту са топлим гасом.
Сушење у гасној фази	Дисперзионе сушаре: Материјал који се суши се распршује у гасну фазу и у контакту са њом се суши.

У Табели 2.2. дат је преглед главних типова конвективних и кондуктивних сушара према врсти материјала за које су погодне.

Табела 2.2: Одабир сушаре у односу на врсту сушеног материјала [21]

Тип сушаре	Врста материјала										
	Течности			Талози		Чврсте честице					
	Раствори	Каше	Пасте	Центрифугални	Са филтера	Прах	Грануле	Ломљиви кристали	Пелет	Влакна	Чврста тела
Конвективне сушаре											
Са покретном траком							+	+	+	+	+
Са пнеуматским транспортом				+	+	+	+			+	
Са флуидизованим слојем	+	+		+	+	+	+		+		
Са ротирајућим добошем				+	+	+	+		+	+	
Са распршивањем	+	+	+								
Коморна сушара				+	+	+	+	+	+	+	+
Тунелска (континуална)				+	+	+	+	+	+	+	
Кондуктивне сушаре											
Добошасте сушаре	+	+	+								
Дупликаторске ротационе сушаре				+	+	+	+		+	+	
Цевне ротационе сушаре				+	+	+	+		+	+	
Коморне сушара				+	+	+	+	+	+	+	+
Тунелске (континуалне)				+	+	+	+	+	+	+	
Контактне за сушење у танком слоју материјала		+	+	+	+	+	+		+	+	
Конусне				+	+	+	+		+		

Један од најбитнијих параметара приликом одабира одговарајућег система сушења је време сушења, које је за неке типове сушара дата у Табели 2.3.

Табела 2.3: Време сушења материјала за типове контактних сушара [21]

	Време сушења				
	0-10s	10-30s	5-10min	10-60 min	1-6 h
Тип сушаре					
Конвективне сушаре					
Тракаста сушара				+	
Пнеуматске сушаре	+				
У флуидизованом слоју				+	
Ротационе сушаре				+	
Са распршивањем		+			
Коморна сушара					+
Тунелска (континуална)				+	
Кондуктивне сушаре					
Контактна за сушење у танком слоју материјала	+	+	+		
Конусни				+	
Добошасти		+			
Ротационе са парним дупликатором				+	
Коморна са лесама					+
Тунелска са лесама				+	

2.3. ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ ИЗ ОБЛАСТИ ПОТРОШЊЕ ЕНЕРГИЈЕ ЗА СУШЕЊЕ ПРЕХРАМБЕНИХ МАТЕРИЈАЛА

Потрошња енергије за сушење прехранбених материјала зависи од врсте материјала, почетног садржаја влаге, жељеног крајњег садржаја влаге, специфичног топлотног капацитета, топлоте промене фазе, нето масе, облика и величине материјала, као и од биолошких карактеристика као што су текстура површине, порозност, дозвољене температуре сушења, као и ефикасности опреме за сушење. [22]. Енергија потребна за сушење подразумева уложену енергију потребну да се обезбеде жељени услови сушења. У општем случају енергија за сушење представља збир енергије потребне за загревање материјала, затим енергије потребне за раскидање веза влаге и сувог остатка материјала и испаравање влаге са површине материјала, као и све додатне утрошке - енергија за покретање вентилатора, енергија потребна за рад вакуум пумпи (код лиофилизације нпр.), итд. У наставку текста дат је преглед одабраних радова из области потрошње енергије за сушење прехранбених материјала.

У раду [22] наводи се да минимална специфична потрошња енергије за сушење прехранбених производа као што су парадајз, јабука, шаргарепа, манго, краставац и др., износи између 4,22 и 24,99 MJ по килограму издвојене влаге. Наведено је да просечна теоријска потрошња енергије за конвективно сушење воћа и проврћа износи око 1,5 MJ по килограму издвојене влаге при сушењу температуром од 50°C. У раду се такође наводи да специфична потрошња енергије опада са порастом температуре сушења, а расте са брзином ваздуха сушења.

У раду [23] испитивана је потрошња енергије при сушењу зрневља нара различитим методама, као што су сушење топлим ваздухом, микроталасно сушење, сушење под вакуумом и сушење инфрацрвеном светлошћу. Укупна енергија потребна за сушење зрневља нара конвективном методом износила је између 2 и 11 kWh. Специфична потрошња енергије потребна за сушења зрневља нара конвективном методом износила је 50,78 kWh/kg (182,8 MJ/kg) и 252,33 kWh/kg (908,4MJ/kg). Такође је закључено да коришћење комбинованог микроталасног третмана смањује потрошњу енергије потребну за конвективно сушење топлим ваздухом. Повећање температуре сушења смањује, а брзина повећава енергију и специфичну енергију потребну за конвективно сушење.

У раду [24] обрађена је енергетска ефикасност кондуктивног сушења комадића јабуке укупне приближне масе 0,5kg ваздухом температуре 50 до 70°C. Испитиван је утицај температуре сушења, као и брзине ваздуха на потрошњу енергије за сушење. Потрошња енергије за конвективно сушење износила је од максималних 23,94kWh за сушење температуром од 50°C и брзином ваздуха 2 m/s, до минималних 13,89kWh за сушење температуром 70°C и брзином ваздуха од 1 m/s. Такође је закључено да повећање температуре ваздуха повећава енергетску ефикасност, а да повећање брзине ваздуха утиче на смањење енергетске ефикасности.

У раду [25] урађена је анализа утицаја степеног смањења температуре током сушења ораха топлим ваздухом на потрошњу енергије за сушење. Температуре ваздуха у току сушења износиле су 43, 55, 65 и 75°C при брзини ваздуха од 0,7 m/s. Приликом константног изотермског режима сушења, највећа специфична потрошња енергије забележена је за температуру 43°C и износила је 12,69 MJ по килограму издвојене влаге, док је најмања специфична потрошња измерена за температуру топлог ваздуха од 55°C и износила је 9,83 MJ по килограму издвојене влаге. Закључено је да се степеним смањењем температуре у току сушења могу остварити уштеде енергије за сушење до 24%.

У раду [26] испитан је утицај неколико метода сушења Ружичастог бушина (*Cistus creticus*) на потрошњу енергије за сушење као и друге биолошке особине материјала. Материјал је сушен конвективно, микроталасном методом и помоћу вакуума. Максимална специфична потрошња енергије при конвективном сушењу износила је 134,61MJ по килограму издвојене влаге, при

сушењу температуром 40°C, а минимална 54,81 MJ по килограму издвојене влаге за сушење температуром од 60°C.

У раду [27] упоређена је потрошња енергије за сушење масе 100kg малина конвективном методом и лиофилизацијом. Закључено је да за конвективно сушење температуром ваздуха 50°C и брзине 1 m/s специфична потрошња енергије износи 5500 kJ по килограму издвојене влаге, док за лиофилизацију специфична потрошња енергије износи око 11000 kJ по килограму издвојене влаге уз знатно дуже време сушења.

У раду [28] је истраживан утицај различитих метода сушења Црног дуда на потрошњу енергије за сушење. Црни дуд почетног садржаја влаге 78% је сушен конвективном методом, вакуумом и инфрацрвеним таласима, као и комбинацијом ових метода. Температура ваздуха при кондуктивној методи износила је 40, 50 и 60°C, док је брзина ваздуха била 0,3, 0,7 и 1 m/s. Минимална специфична потрошња енергије при кондуктивном сушењу износила је 132,8 kWh по килограму свежег узорка, при температури сушења од 60°C и брзини ваздуха 0,3m/s, док је максимална специфична потрошња износила 424,79 kWh по килограму свежег узорка, при температури сушења од 40°C и брзини ваздуха 1m/s. Закључено је да специфична потрошња енергије опада са порастом температуре ваздуха и расте са порастом брзине сушења.

У раду [29] испитан је утицај неколико метода сушења нектарине на потрошњу енергије за сушење, боју и друге параметре сушења. Почетни садржај влаге нектарине износио је 84%, а експерименти су спровођени са комадићима нектарине масе 50g и димензија 30x20x5mm. Сушење нектарина је вршено топлим ваздухом, микро- и инфрацрвеним таласима, као и сунчевим зрачењем. Температура при сушењу топлим ваздухом износила је 50°C и брзином сушења 1m/s. Укупна потрошња енергије за конвективно сушење износила је 1,78kWh, при сушењу до садржаја влаге 0,07kg влаге по килограму суве материје, што је знатно већа потрошња у поређењу са инфрацрвеним и микроталасним сушењем.

У раду [30] је испитиван утицај различитих метода сушења комадића парадајза на специфичну потрошњу енергије, као и на неке физичке карактеристике. Комадићи парадајза су сушени помоћу три методе: конвективно, инфрацрвеним зрачењем и микроталасним зрачењем. Приликом сушењем конвективном методом, комадићи парадајза су сушени температуром ваздуха од 60°C и брзином 1m/s. Почетна влажност комадића парадајза је варирала између 19,8 и 14,79 kg влаге по kg суве материје. Специфична потрошња енергије за сушење комадића парадајза је била највиша за конвективно сушење и износила је око 50MJ по килограму издвојене влаге, док је најнижа била за микроталасно сушење, где је износила испод 10MJ по килограму издвојене влаге.

У раду [31] је испитана специфична потрошња енергије приликом различитих метода сушења комадића печурака. Методе сушења су биле: конвективно сушење, микроталасно, вакуум, инфрацрвено, као и комбинација наведених метода. Приликом конвективног сушења комадића печурака, ваздух је био температура 40, 50 и 60°C, док је брзина ваздуха била 0,5, 0,7 и 1 m/s. Специфична потрошња енергије за сушење комадића печурака конвективним сушењем износила је од 47,88 kWh по килограму свежег материјала при температури од 60°C и брзини ваздуха од 0,7m/s до максималних 93,45 kWh по килограму свежег материјала при температури од 40°C и брзини ваздуха од 1m/s (172,4 до 336,42 MJ/kg). За комбиновано конвективно-инфрацрвено сушење специфична потрошња енергије за сушење печурака износила је од 15,04kWh до 71,10 kWh по килограму свежег материјала (тј. од 54,14 до 256 MJ по килограму свежег материјала). Печурке су имале почетни садржај влаге од 13,29% по сувој основи, а крајња влажност материјала је била 6-7% по влажној основи.

2.4. МОГУЋНОСТИ КОРИШЋЕЊА И МЕТОДЕ СУШЕЊА ТРОПА ЈАБУКЕ И НЕКТАРИНЕ

Употреба воћног тропа је разноврсна, али се и поред тога данас најчешће употребљава за ђубрење земљишта као замена хемијским ђубривима. Бенефит ђубрења земљишта остацима из производње сокова је тај што релативно добро могу заменити хемијска ђубрива, а притом су неупоредиво мање штетна по животну средину. [7] Поред тога воћни троп се користи се као сточна храна, за добијање пектина (средство за згушњавање, стабилизатор и извор дијететских влакана), производњу пића, воћног брашна, за амбалажу, као супстрат за раст одређених организама и у друге сврхе. У руралним срединама се остаци из производње воћних сокова по правилу традиционално користе као додатак исхрани стоке због великог броја хранљивих материја, али такође и из практичних разлога. Наиме, свеж воћни троп поседује висок садржај воде и због тога је подложен кварењу, па је самим тим опсег употребе свежег тропа значајно смањен [32]. Уколико се не користи, уобичајен третман је директно одлагање на депонију [33]. Ово представља проблем за животну средину, јер разградња тропа захтева велику количину кисеоника, а такође се приликом разградње ослобађа значајна количина метана у атмосферу. Остатак из производње сокова садржи многа вредна једињења која су се показала корисним у људској исхрани, као што су угљени хидрати, пектин, сирова биљна влакна и минерали.

2.4.1. КАРАКТЕРИСТИКЕ, УПОТРЕБА И ПРЕГЛЕД МЕТОДА СУШЕЊА ЈАБУЧНОГ ТРОПА

Јабукe су, после банана, воће са највећом производњом у свету. Према подацима за 2016. годину, у свету је произведено око 82 милиона тона јабука од чега се 70 милиона тона користило директно за људску исхрану, 5,8 милиона тона је прерађено, 7 милиона тона је бачено, а 0,66 милиона тона искоришћено као сточна храна. Главни произвођачи јабука у свету су Кина, САД, Турска, Иран и Пољска. Како се у процесу производње сокова око 75% масе јабука конвертује у сок, а 25% представља остатак – јабучни троп (ЈТ), процењено је да 2016. године у свету било произведено 1,4 милиона тона свежег ЈТ. [11]

У 2017. светска годишња производња јабука износила је око 84,6 милиона тона [34]. Од ове количине се око 13% конвертује у концентрат сока од јабуке [32]. У производњи сока, приликом цеђења се око 75% масе јабука конвертује у сок, док је остатак, који чини око 25% отпадног производа и састоји се од јабучне коре, семенки и петелки, у литератури познат као воћни остатак (троп) од јабуке [35] [36] [32]. Огромна количина произведеног сока има за последицу и значајну количину отпада. Конкретно, од производње сока од јабуке настаје и до 12 милиона тона (Mt) воћног отпада годишње. Одлагање ове врсте отпада представља велики еколошки изазов, али и економски проблем. Један од најбољих начина за решавање проблема одлагања воћног тропа је свакако поновно коришћење овог материјала. Према бројним истраживањима [32], [33], [37], воћни остатак јабуке садржи значајну количину хранљивих састојака, попут пектина, антиоксиданаса и витамина. Екстракцијом дела хранљивих састојака, не само да се троп може искористити, већ се тиме решава и други важан проблем - његово одлагање. Према [32] одлагање јабучног тропа представља велики еколошки проблем, јер процес разлагања захтева око 250-300g биохемијског кисеоника по 1 килограму тропа. Са друге стране, уколико се троп неадекватно одлаже, долази до емисије гасова са ефектом стаклене баште [35], који су познати по штетном утицају на атмосферу. Свеж јабучни троп садржи значајну количину воде, због чега је подложен кварењу и на тај начин отежава поступак складиштења на дужи период. Један од најбољих начина за очување јабучног тропа од кварења је сушење, што уз исправан одабир технологије сушења помаже очувању вредних

храњивих материја [32]. Сушење јабучног тропа економски је оправдан третман, јер се тиме драстично смањује запремина тропа, што значи ниже транспортне трошкове [38], [39].

Састав воћног тропа има великог утицаја на његову намену. Воћни троп се састоји од воде, угљених хидрата, масти, протеина и пепела. Угљене хидрате у прехранбеним производима сачињавају дијететска влакна, скроб и прости шећери. Дијететска влакна се деле на нерастворљива, у које спада целулоза, лигнин и неке хемицелулозе и растворљива, у које спада пектин и неке хемицелулозе [40]. У више радова је анализиран хемијски састав свежег и осушеног ЈТ.

У раду [38] наведено је да се свеж ЈТ састоји из пулпе и епидермиса (95,5%), семенки (4,1%) и петелки (1,1%), при чему је масени удео влаге 76,3%, а суве материје 23,7%. Дијететска влакна су присутна са масеним уделом 11,6 – 44,5%, а сачињавају их целулоза, лигнин, пектин и хемицелулоза. Дијететска влакна (35,8%) и шећери (54,4%) чине 91,2% ЈТ, док су остале компоненте протеини, масти и пепео.

У раду [41] наводи се да се осушени јабучни троп састоји из 10,8% влаге, 2,06% протеина и 51,1% дијететских влакана (од чега су 36,5% нерастворљива, а 14,6% растворљива), као и од масти 2,7% и пепела 0,5%.

У раду [33] је објављен следећи састав осушеног праха јабучног тропа: влага 7,9%, пепео 1,1%, масти 2,3%, протеини 3,3%, шећери 77,6% (од чега дијететска влакна 42,1%, скроб 7,8%).

У раду [37] дат је хемијски састав и анализа растворљивих и нерастворљивих влакана праха осушеног ЈТ добијеног од три врсте јабука (*Royal Gala*, *Granny Smith* и *Liberty*). Закључено је да је масени удео укупних дијететских влакана у ове три врсте ЈТ износио 78,2%, 60,7% и 89,8%. Масени удео нерастворљивих влакана износио је 63,9%, 56,5% и 81,6%, а растворљивих 14,33%, 4,14% и 8,2%, следствено. Однос нерастворљивих према растворљивим влакнима износио је 4,5:1, 12,9:1 и 9,9:1. Садржај протеина је био између 3,12 и 3,68 g/g_{sm}, садржај липида 1,57-4,46 g/g_{sm}, пепела 0,56-1,88 g/g_{sm}, а масени удео влаге 2,00-2,5%.

У раду [14] анализиран је хемијски састав осушеног праха ЈТ, добијеног сушењем помоћу три методе сушења. Масени удео укупних дијететских влакана био је између 74,69% и 66,56%. Однос нерастворљивих према растворљивим дијететским влакнима био је између 3,37:1 и 4,55:1.

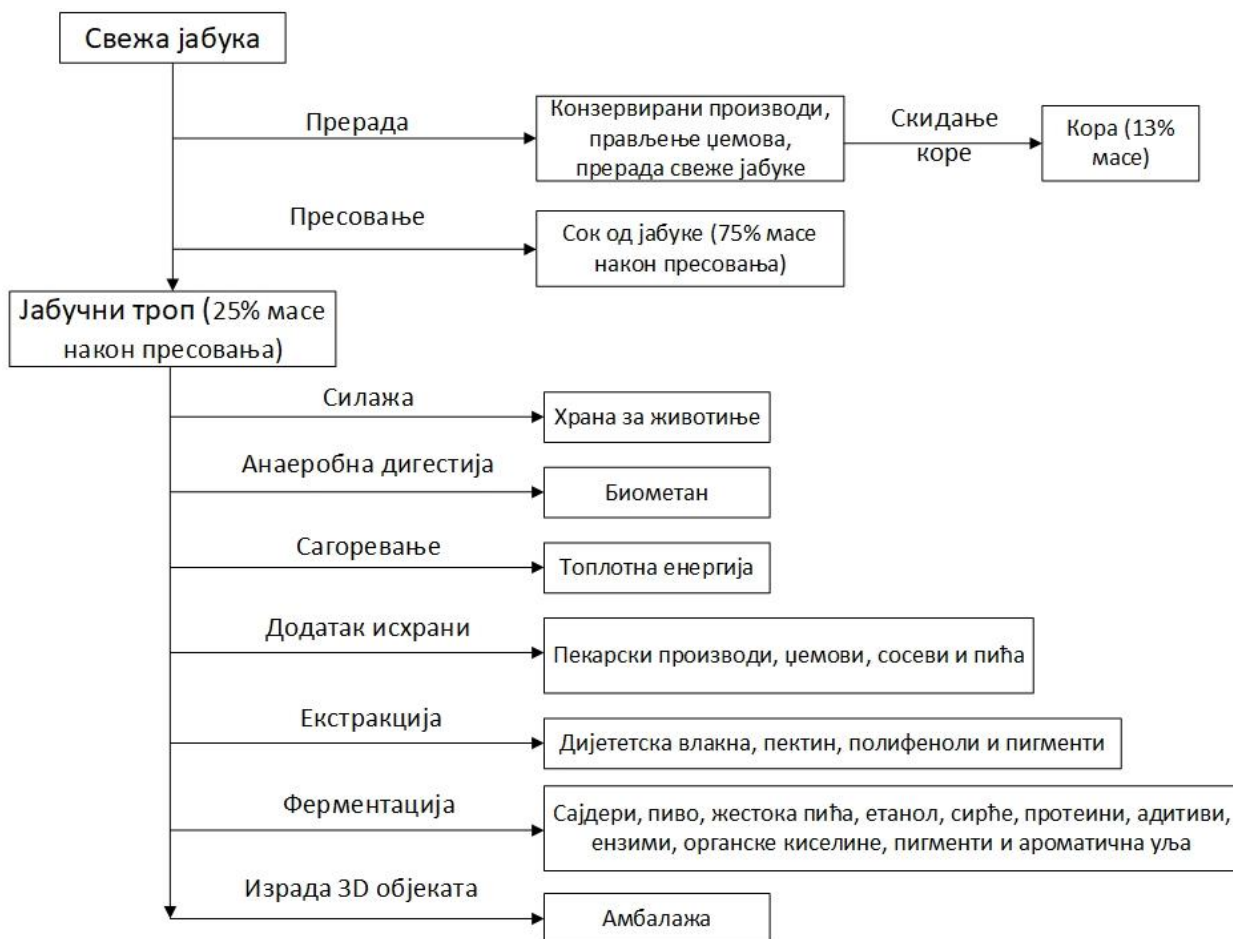
У прегледном раду [42] дата је систематизација вредности хемијског састава ЈТ. Масени удео растворљивих влакана се креће у границама 4,1-14,3%, док 56,5-81,6% чине нерастворљива влакна, протеини 3,1-3,7%, масти 1,6-4,5% и пепео 0,6-1,9%.

У раду [43] је дата систематизација хемијског састава осушеног ЈТ: 1,2-10,8% влаге, 0,5-1,9% пепела, 2,4-7,3% протеина, 1,6-4,5% масти и 51,1-89,8% дијететских влакана. Такође је одређен састав осушеног праха ЈТ сопствених узорака: 6,4 g/g_{sm} протеини, 5,4 g/g_{sm} масти, пепео 1,4 g/g_{sm}, угљени хидрати 86,8 g/g_{sm}, при чему дијететска влакна 83,3 g/g_{sm}, од којих 63,3 g/g_{sm} нерастворљива, а 20 g/g_{sm} растворљива.

У раду [44] дат је састав осушеног ЈТ: влага 9%, масти 2,27%, протеин 2,37%, пепео 1,6% и угљени хидрати 84,76%, од чега укупна дијететска влакна 30,15%.

УПОТРЕБА ЈАБУЧНОГ ТРОПА (ЈТ)

Третман свеже јабуке и врсте нуспроизвода из процеса прераде јабуке дате су на Слици 2.6.



Слика 2.6: Прерада јабуке и употреба јабучног тропа [42], [45]

У прегледу [35] наведено је да се ЈТ до сада користио у бројне сврхе: производњу биогорива, супстрата за ензимске процесе, екстракцију антиоксиданаса, за чишћење отпадних вода, и др. [37] и [41] разматрали су ЈТ као извор биљних влакана и полифенола. Још једна значајна примена ЈТ је за производњу алкохолних пића [46]. ЈП је такође испитиван у [47] као сировина за припремање кркера без глутена. Према [42], производња концентрата влакана и пектина из ЈП тренутно је економски најоправданији процес који се може комерцијализовати. У [48] дискутован је процес прераде ЈТ за добијање биоактивних молекула као што су дијететска влакна и пектин. Аутор је навео да расте употреба ЈТ за екстракцију хранљивих материја. Према досадашњим истраживањима, употреба ЈТ се може поделити на 4 области: прехранбени производи, екстракција пектина, извор биљних влакана и амбалажа.

Прехранбени производи. У прегледу [32] неколико аутора је објавило добијање прехранбених производа од ЈТ, укључујући џемове, сосове и каше. У истом прегледу се такође помиње да је развијена технологија за припрему брашна од ЈТ, као и употреба осушене ЈТ у пекарским производима. Такође су од ЈТ припремани напици који су били задовољавајућег квалитета, док су неки аутори објавили да су припремали колаче мешањем различитих количина (10–50% масених) ЈТ брашна са пшеничним брашном. [46] направили су од сувих комадића ЈТ алкохолна пића користећи одабране сојеве квасаца. Од недавно се брашно ЈТ производи у Аустрији [49]. ЈТ се пресује, меље и пакује и веома је погодан за употребу у пекарским производима. [41] припремили су мешавину фино млевеног ЈТ и мешали га са пшеничним брашном са 5%, 10% и 15% мас, а затим су испитивали реолошке карактеристике мешавине. На крају су припремили колач од мешавине пшеничног брашна са додатком 0–30% брашна ЈТ. ЈТ је такође проучаван у [47] за формулацију кркера без глутена. Аутори су проучавали најбољу рецептуру кркера без глутена на основу две врсте брашна од смеђег пиринча и ЈТ. Процент ЈТ у брашну је био 0%, 3%, 6% и 9%.

У раду [39] анализира се ЈТ као могући извор биоактивних једињења са антиоксидантним дејством. ЈТ је осушен и самлевен у брашно, а затим су му анализирани хемијске карактеристике. Закључено је да се брашно ЈТ може користити као ефикасан стабилизатор који може да надокнади дефицит дијететских влакана и фитохемикалије у савременој људској исхрани.

У раду [5] ЈТ је коришћен као додаток јогурту. ЈТ је осушен поступком лиофилизације, а затим самлевен у брашно и додаван јогурту у различитим размерама. Резултати показују да ЈТ мења структуру јогурта, чинећи га гушћим и повећавајући му вискозност. Студија је показала да ЈТ има потенцијал као природни стабилизатор и као извор дијететских влакана у јогурту.

Екстракција пектина. Екстракција пектина из ЈТ је добро познат поступак о коме се много дискутовало у последњих неколико деценија [32]. Пектин се користи у храни као средство за гелирање и згушњавање, емулгатор и стабилизатор. Производња пектина сматра се најприхватљивијим начином употребе ЈТ-а како са економског тако и са еколошког становишта, као и једним од најпрактичнијих приступа [38], [48]. Још од прве комерцијалне производње течног пектина из ЈТ, 1908. године у Немачкој, његова производња константно расте. Данас највећи део комерцијално доступног пектина потиче од коре цитруса (85,5%), затим екстракцијом из ЈТ (14%) и мали проценат из тропе репе (0,5%). [50]

У раду [38] једанаест одабраних сорти јабука помешано је и испитивано како би се истражиле карактеристике сваке појединачне мешавине. Анализом су мерена ефикасност фенолних једињења, антиоксидативни капацитет, укупна влакна и шећери како би се утврдила најбоља мешавина сорти за екстракцију биоактивних једињења. Узорци одабраних сорти јабука били су масе по 10kg. Метода се састојала од екстракције сока у вертикалној преси, затим је ЈТ испиран водом и центрифугиран до потпуног исушивања. Испрани ЈТ је затим распоређен у танком слоју на лабораторијске лесе и осушен ваздухом температуре 60°C. Следила је екстракција пектина. Укупни садржај полифенола у овој студији износио је 4620 mg kg⁻¹, а просечна антиоксидативна активност била је 36,69 mMol g⁻¹. Један од закључака овог рада је да је садржај полифенолних једињења у ЈТ у корелацији са антиоксидативном активношћу.

У [51] описан је поступак комбинованог издвајања пектинских и фенолних једињења из ЈТ. Процес укључује екстракцију осушеног ЈТ са разблаженом минералном киселином и адсорпцију фенолних састојака. Екстракти ЈТ и осушене семенке јабуке држани су смрзнути на -20°C до употребе, а непосредно пре екстракције узорак је загрејан на 60°C. Аутори су закључили да су семенке јабуке обећавајући извор хранљивих једињења која се могу користити као здрава храна.

У [52], пектин је екстрахован из осушене јабучне тропе у раствору азотне киселине. У раду је испитиван утицај температуре сушења ЈТ на особине пектина. Након екстракције, раствор пектина је филтриран и концентрован под вакуумом (60°C). Закључено је да температура сушења ЈТ највише утиче на тачку гелирања.

Извор биљних влакана. Према [42], многа истраживања указују на оправданост индустријског издвајања дијеталних влакана.

У [47], растворљиви, нерастворљиви и укупни садржај дијететских влакана у узорцима је измерен. Растворљива и нерастворљива дијетална влакна су одвојена филтрацијом. Филтрат је исталожен етанолом и филтриран да би се добила растворљива дијетална влакна, а талог затим осушен. Укупна дијетална влакна су затим израчуната као комбинована вредност растворљивих и нерастворљивих дијететских влакана.

[37] оцењивали су функционална својства концентрата влакана из остатака воћа од јабука и агрума, како би их користили као потенцијалне изворе влакана у обогаћивању хране. Остаци од екстракције сока од грејпфрута, лимуна, поморанце и јабуке коришћени су као извор

vlakana. Влакнасти концентрати анализирани су на садржај воде, липида, протеина и пепела, калоријску вредност, састав дијететских vlakana и функционална својства (капацитет задржавања воде, капацитет бубрења, капацитет адсорпције масти и текстура). Закључак је био да су сви концентрати vlakana имали висок садржај дијететских vlakana (између 44,2 и 89,2 g / 100 g суве материје). Садржај протеина се кретао између 3,12 и 8,42, а садржај липида у границама између 0,89 и 4,46 g / 100 g суве материје. Калоријске вредности концентрата биле су ниске (213–901 kJ/ 100g). Утврђено је да текстура снажно зависи од величине честица и да се повећава термичком обрадом.

Амбалажа

У раду [3] говори се о новом, за животну средину прихватљивом, приступу прозиводњи одрживих биоматеријала од ЈТ. Развијени су био-филмови и тродимензионални објекти користећи ЈТ као сировину, уз помоћ две методе при којима се осушени и самлевени ЈТ меша са глицеролом.

У раду [2] говори се о развијању био-амбалаже коришћењем брашна маслиновог тропа. Различите концентрације брашна маслиновог тропа су додаване хитозину, а затим су испитивана механичка, оптичка и друга својства добијених биофилмова.

У раду [4] дат је преглед утицаја додавања екстракта воћа, лишћа, тропа и семенки на физичке, механичке, функционалне и друге особине биоразградивим филмовима. Посебан акценат је на биоразградивој амбалажи коришћењем екстракта биљног порекла.

У раду [1] говори се о воћном тропу као потенцијалном извору биљних vlakana као замена традиционално коришћеној целулози добијеној из новинске хартије за производњу картона за паковање. Различите концентрације тропа боровнице, бруснице и јабуке су додаване новинској хартији, а затим су испитивана механичка и друга својства добијених материјала.

ПРЕГЛЕД ПРОЦЕСА СУШЕЊА ТРОПА ЈАБУКЕ

У [53] јабучни троп (ЈТ) је сушен помоћу три различита поступка: лиофилизацијом, конвективним сушењем на полицама и у добошастој сушарои. Циљ експеримената је био да се утврди утицај три поменута поступка сушења на боју, антиоксидансе и фенолна једињења. Узорци су припремљени различито за сваку врсту сушења.

За добошасто сушење узорци од 1,6kg ЈТ мешани су са водом (у односу 1:2), а затим је суспензија била изливана на добош. Сушење је трајало 15 минута на температури површине добоша од 140°C.

Приликом сушења топлим ваздухом узорци су сушени на различитим температурама ваздуха на 60°C, 80°C или 100°C. Време сушења је било 25, 20 и 15 минута, а релативна влажност ваздуха је била 30,7%, 35,3% и 39%, респективно. Након сушења садржај воде у ЈТ износио је 3,0%, 3,0% и 3,2%. У перфорираној посуди се налазило око 150g материјала за све режиме сушења. Брзина ваздуха износила је 15,2 m/s.

Леофилизација ЈТ је извршена апаратом Virtis Genesis (25L Genesis SQ Super XL-70, 2010). Температура посуде је била -30°C. Температура у кондензатору је била -60°C, а вакуум пумпа је била укључена док није постигла скоро потпуни вакуум, приближно 50 mTorr. Затим је укључен грејач за загревање узорака на око 20°C. Узорци су сушени 3 дана под датим условима, све док се вредност притиска у леофилизатору није стабилизовала на 10 mTorr. Узорци су уклоњени и чувани замрзнути у полиетиленским кесама тамне боје на -20°C.

Резултати ове студије показали су да је лиофилизација најбољи метод за обраду ЈТ што се тиче задржавања хранљивих састојака. Следећа најбоља метода било је сушење топлим ваздухом на нижим температурама и коначно добошасто сушење. Иако је добошасто сушење показало највише штетног утицаја на боју, фенолне киселине и антиоксиданте, са техничког аспекта има значајно нижу цену и већу брзину сушења.

У студији [54] одређивана је кинетика и карактеристике сушења ЈТ конвективним сушењем топлим ваздухом.

Циљеви студије су били:

1. Да се проучи понашање сушења влажног ЈТ у условима сушења у танком слоју у односу на температуру ваздуха за сушење, брзину ваздуха и дебљину слоја.
2. Одредити равнотежни садржај влаге ЈТ.
3. Тестирати математичке моделе за предвиђање брзине сушења за влажни ЈТ.
4. Сензорна процена осушеног и самлевог ЈТ за различитим температуре сушења и дебљине слоја.
5. Оптимизовање температуре ваздуха за сушење и дебљине слоја на основу сензорне процене.

Влажни ЈТ различите дебљине слоја (2, 4 и 6 mm) био је сушен топлим ваздухом температурама 50°C, 60°C и 70°C при константној брзини ваздуха од 1,5 m/s. Такође је урађен експеримент при различитим брзинама ваздуха 1,5, 2 и 2,5 m/s при фиксној температури од 70°C и фиксној дебљини слоја од 2 mm. Понашање ЈТ током процеса сушења математички је анализирано поређењем експерименталних резултата са одабраним моделима. Испитиван је и утицај температуре ваздуха, брзине ваздуха и дебљине слоја на боју. Такође је извршена оцена укупне прихватљивости осушеног ЈТ праха како би се оптимизовали услови сушења. На основу експерименталних резултата и анализа података, аутор је закључио следеће:

1. Сушење ЈТ се одвија у периоду опадајуће брзине сушења.
2. Укупна брзина сушења линеарно се повећава с повећањем температуре и опада са повећањем дебљине слоја.
3. Равнотежни садржај влаге ЈТ се смањује са повећањем температуре сушења.
4. ЈТ треба сушити на 60°C са 4 mm дебљине слоја при брзини ваздуха 1,5 m/s или већој, јер су ови услови сушења резултирали најбољим квалитетом производа (сушени ЈТ прах) на основу опште прихватљивости производа.

У раду [52] утврђен је утицај температуре ваздуха за сушење ЈТ на карактеристике пектина, укључујући хемијски састав, боју и температуру тачке гела. ЈТ је добијен од комерцијалних јабука *Granny Smith*. Јабуке су опране и сок исцеђен пресовањем. Сок је екстрахован у хидрауличној преси (180 kPa притиска у трајању од 10 минута), а троп се потом сушио у континуалној ротационој сушари. Услови сушења су били: брзина ротације 17 min⁻¹, брзина ваздуха 1,5 m/s, почетна маса материјала 2,3 kg; Сушење је вршено при четири вредности температуре ваздуха (60°C, 70°C, 80°C и 105°C) мерене на излазу у сушару. Почетни садржај влаге у тропу био је приближно 80 %. Просечно време експеримента било је 6–8 h да би се достигао садржај влаге који одговара односу коначног и почетног садржаја влаге (M/M_0) < 0,07.

У [47] јабуке су исечене на мале комаде и уситњене у миксеру за сок. Сок се потпуно исцеди из тропа, а ЈТ се осуши у сушари на лесема на температури ваздуха 40°C, а затим је уситњена млином и просевена у ситан прах. Брашно ЈТ је касније коришћено за прављење колача без глутена.

У [37] ЈТ је сушен топлим ваздухом на 60°C током 30 min у тунелској сушари, а затим се млела до величине честица 500–600 μm. Закључено је да се сушењем на температурама испод 65°C избегавају промене функционалних својстава и садржаја полифенола, танина и протеина.

[55] су за своје истраживање – коришћење ЈТ за производњу јаких алкохолних пића користили јабучни троп добијен из индустријских хидрауличних преса са радним притиском од 15000 kg. Коришћени ЈТ добијен је из две узастопне бербе (2010 и 2011). Од сваке жетве узето је девет узорака од по 50 kg, које су сушене у сушари са топлим ваздухом на 60°C током 48 сати.

У раду [51] предложен је нови процес за добијање пектина и фенолних једињења из ЈТ добијене из процеса индустријске производње сока. У току испитивања влажни ЈТ (25–30% суве материје) сушен је индустријски у тростепеној добошастој сушари 5–8 min врелим ваздухом температуре 300 до 700°C. Температура ЈТ у току сушења није прелазила 50–60°C.

У раду [56] извршено је математичко моделирање и испитивање сушења ЈТ топлим ваздухом температуре 75 до 105°C уз константну брзину ваздуха од 1,2 m/s. Испитивања су извршена у лабораторијској инсталацији. Вредности ефективног коефицијента дифузије ЈТ износиле су од $1,9082 \cdot 10^{-9}$ до $3,9346 \cdot 10^{-9}$ m²/s. Закључено је да Logarithmic модел из литературе најбоље описује кинетику сушења ЈТ, и да се целокупан процес сушења ЈТ одвија у периоду опадајуће брзине сушења, при чему су идентификовани први и други период опадајуће брзине сушења.

У раду [57] испитиван је ефективни коефицијент дифузије и математичко моделирање кривих сушења ЈТ. Почетна влажност узорака била је 69,32%. Сушење је рађено у лабораторијској сушари. Утврђено је да је приликом сушења јабучног тропа дебљине 8mm топлим ваздухом на температурама од 50 до 80°C са кораком 10°C и брзином ваздуха од 2m/s, вредности ефективног коефицијента дифузије биле у границама од $1,73 \cdot 10^{-10}$ до $4,40 \cdot 10^{-10}$ m²/s. Закључено је да Midilli модел најбоље описује сушење ЈТ.

У раду [58] извршено је математичко моделирање и испитивање сушења ЈТ микроталасима са и без предтретмана топлим ваздухом. Свеж ЈТ почетне влажности 80,2±0,5% (тј. у другом случају претходно третиран топлим ваздухом влажности 40±2%) сушен је микроталасима снаге 150, 300, 450 и 600W и добијене вредности ефективног коефицијента дифузије су биле између $2,9920 \cdot 10^{-8}$ до $9,1537 \cdot 10^{-8}$ за претходно третирану ЈТ, односно $1,0465 \cdot 10^{-8}$ до $3,6854 \cdot 10^{-8}$ m²/s за свеж ЈТ.

У раду [59] извршена је карактеризација сушења ЈТ инфрацрвеним таласима са и без предтретмана топлим ваздухом. Узорци масе 10g, дебљине 10mm третирану су инфрацрвеним зрачењем на температурама 55, 65 и 75°C. Израчуната је вредност ефективног коефицијента дифузије јабучног тропа и установљено је да је ефективни коефицијент дифузије био у границама $4,551 \cdot 10^{-9}$ до $8,808 \cdot 10^{-9}$ m²/s за ЈТ са предтретманом, односно $3,477 \cdot 10^{-9}$ до $6,476 \cdot 10^{-9}$ m²/s без предтретмана.

У раду [24] истраживан је утицај температуре сушења и брзине ваздуха на енергетске параметре сушења и карактер сушења комада јабуке. Комадићи јабуке су испитивани приликом кондуктивног сушења на температурама ваздуха од 50 до 70°C и брзине ваздуха од 1 до 2 m/s. Вредности ефективног коефицијента дифузије комада јабуке биле су између $6,75 \cdot 10^{-10}$ до $1,28 \cdot 10^{-9}$ m²/s.

У табели 2.4. дат је кратак преглед метода и неколико параметара сушења јабучног тропа (ЈТ).

Табела 2.4: Методе и параметри сушења ЈТ

Метод сушења	Температура [°C]	Време сушења	Брзина ваздуха [m/s]	Извор
Добошаста сушара	140	15 min	/	[53]
Топлим ваздухом	60	25 min	15,2	

	80	20 min		
	100	15 min		
Лиофилизација	-30	3 дана	/	
Топлим ваздухом	50	/	1,5	[54]
	60		2	
	70		2,5	
Ротациона сушара	60	6-8h	1,5	[52]
	70			
	80			
	105			
На лесама	40	/	/	[47]
У ваздушном тунелу	60	30 min	/	[37]
Пећ са циркулацијом	60	48h	/	[55]
Добошаста сушара	300-700	5-8 min	/	[51]

2.4.2. КАРАКТЕРИСТИКЕ, УПОТРЕБА И ПРЕГЛЕД МЕТОДА СУШЕЊА ТРОПА НЕКТАРИНЕ

Нектарине и брескве припадају истој породици и по свом саставу и особинама су врло сличне. Нектарина (*Promus Persica* (L.) Batsch, var. *nectarina*) је, у ствари, бресква са глатком кором из породице *Rosaceae*. Приликом индустријске производње сока од брескве и нектарине, настаје нуспроизвод, тј. воћни отпад – троп, који представља извор угљених хидрата и минерала, који се може се користити као додатак воћним дезертима, колачићима и осталим кондиторским производима [7].

Годишња производња брескве и нектарине у свету током 2017. године износила је 24,67 милиона тона (МТ) у поређењу са 11 милиона тона у 2005. години, што показује тренд раста производње нектарина [34]. Кина је водећи произвођач брескве и нектарина са 14,3 милиона тона (МТ) произведеним у 2017. години, док је Европска унија (ЕУ) произвела 4086 тона исте године. Највећи произвођачи брескве и нектарине у ЕУ-28 су Шпанија, Италија, Грчка и Француска. 2017. године Србија је произвела 0,0806 милиона тона (МТ) брескве и нектарине и држи 5. место у Европи по производњи. Иако се већина брескве и нектарина и даље конзумира у свежем стању, укупна потрошња сока од брескве и нектарине у ЕУ чини 3,5% укупне потрошње [60], [61]. У индустрији сокова, већина воћне масе се претвара у сок, док је остатак отпадни производ који се састоји од коре и петелки, који је у литератури познат као воћни троп [62], [60], [35], [36], [32]. Овај троп обично се углавном не користи рационално, одлаже се неправилно што може да изазове негативне последице по животну средину. Много је обећавајућих начина на које се троп може користити, на пример, као храна за животиње, пића, брашно, прерада храњивих материја или чак биоразградива паковања [3].

Што се тиче хемијског састава тропа нектарине и брескве, у литератури има врло мало података. Пронађен је рад [63] у коме је је напоменуто да свежи троп од брескве има 85,2% влаге, 13,06% угљених хидрата, 2,6% растворљивих и 5,25% нерастворљивих влакана, као и мању количину протеина, масти и пепела.

УПОТРЕБА ТРОПА НЕКТАРИНЕ

Што се тиче употребе тропа нектарине, у литератури је ова област веома слабо покривена. Пронађен је рад [7] у коме је урађена анализа употребе тропе нектарине као супстрат за раст печурака. Закључено је да троп нектарине помешан са сламом може да послужи као потенцијални супстрат за гајење печурака.

Бресква је близак сродник нектарина који се разликује од нектарине само по једном гену који регулише раст длачица на површини коре плода. Структура тропа брескве и нектарине је због тога врло слична, па ће се извршити преглед литературе тропа брескве (ТБ).

У раду [63] је истраживана могућност за коришћење тропа брескве (ТБ) као извора растворљивих дијететских влакана. У раду је брашно од ТБ самлевено и помешано са брашном од пиринча и екструдирано, а затим су испитиване физичко-механичке особине и текстура узорака из екструдера. Закључено је да бресква има 85,2% влаге, 13,06% угљених хидрата, 2,6% растворљивих и 5,25% нерастворљивих влакана, као и мању количину протеина, масти и пепела (Табела 2.5). Закључак ове студије је да се воћни нуспроизводи могу користити за производњу екстудираних прехранбених производа без негативног утицаја на њихове физичко-механичке особине и текстуру. Додавање ТБ у брашно од пиринча пружа могућност производње прехранбених производа са високим садржајем растворљивих влакана и пожељном текстуром.

Табела 2.5: Садржај свежег воћног остатка тропа брескве (дат у %mas) [63]

Влага	Протеини	Масти	Пепео	Угљени хидрати	Укупна влакна	Растворљива влакна	Нерастворљива влакна
85,2	0,964	0,37	0,399	13,06	7,85	2,6	5,25

У раду [64] проучавана је екстракција пектина из тропа брескве при различитим условима и температурама (40°C, 60°C и 80°C). Утврђен је садржај растворљивих и нерастворљивих влакана.

У раду [65] рађена је екстракција пектина из тропа брескве који је био складиштен 10 месеци на температури 3°C и 95% релативне влажности. Испитивана је кинетика процеса екстракције пектина из свеже и складиштене тропе. Закључено је да је могуће више пектина издвојити из складиштеног тропа брескве, али нижег квалитета.

У раду [6] је оцењена нутритивна вредност сока од брескве и брашна од тропа брескве, као и употреба ТБ у кексу као хранљиви додатак и закључено је да бресквина тропа може да послужи као задовољавајући додатак за слатке пекарске производе.

У раду [66] испитиван је утицај сушења ТБ у пећи, у циљу оптимизације процеса одстрањивања влаге. Сушење је вршено на температурама 40, 55 и 70°C. Крајњи циљ је био добијање што више каротеноида из ТБ на крају процеса сушења. Показано је да је време сушења на температури од 70°C до крајњег садржаја влаге од 24% износило 496 минута, али да је истовремено могуће издвојити 63% каротеноида мање него из свежег ТБ.

ПРЕГЛЕД ПРОЦЕСА СУШЕЊА ТРОПА НЕКТАРИНЕ

У доступној литератури је пронађен само један рад који се бави пробелматиком сушења тропа нектарине [67]. У овом раду је обрађена кинетика сушења тропа нектарине при кондуктивном и комбинованом кондуктивно-конвективном довођењу топлотног протока материјалу. Такође је одређена средња почетна влажност материјала, средња равнотежна влажност материјала, као и ефективни коефицијент дифузије. Вредности ефективног коефицијента дифузије се кретао у распону $2,79 - 3,151 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$.

Како није пронађено довољно радова о сушењу тропа нектарине, дат је преглед литературе из области сушења нектарине.

Објављено је више истраживања која се баве проблематиком сушења нектарина [62] [68] [69] [70] [71] [72] [73]. Тежиште ових студија било је сушење нектарина различитим методама, као што су сушење микро- и инфрацрвеним таласима, топлим ваздухом, као и комбинацијом ових метода.

У раду [62] су сушене кришке нектарина, коришћењем три различите методе: микроталасна, инфрацрвена и комбинована микроталасна и инфрацрвена. Почетни садржај воде у свезим нектаринама био је $84,0 \pm 0,1\%$. Претретман је укључивао потапање у Е330 (Лимунску киселину) (Citric acid), која смањује промену боје током сушења. Модел „Aghbashlo et al.“ је пронађен као најбољи модел за сушење нектарина микроталасном, као и инфрацрвеном методом.

У раду [68] су сушене кришке нектарина дебљине 2,8mm и пречника 28mm и масе сваког узорка $45 \pm 2\text{g}$ комбинованим инфрацрвеним и вакуум сушењем. Максималне вредности брзина сушења биле су $0,014 - 0,047 \text{ g}_w/\text{g}_{so}\text{min}$. Ефективна дифузивност воде је била у границама $2,46 \cdot 10^{-10}$ до $6,48 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$. Енергија активације је израчуната да је између 31,28 и 35,23 kJ/mol. Потрошња енергије је била у границама 0,129 до 0,247 kWh. Узорци су грејани сијалицом са жицом од волфрама (100W), при чему је таласна дужина овакве сијалице близу инфрацрвеног спектра. Сијалица је загревала комору где се налази узорак, па је температура ваздуха у комори била 50, 60 и 70°C, а апсолутни притисак 20,40 и 60 kPa.

У раду [69] је истраживана кинетика сушења нектарине у првом случају узимајући, а у другом не узимајући у обзир скупљање материјала на температурама 40 и 60°C и при брзини ваздуха од 2,1 m/s. Ефективна дифузивност воде је била у границама $9,12 \cdot 10^{-10}$ до $13,6 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ када се скупљање материјала није узимало у обзир и у границама $0,7 \cdot 10^{-10}$ до $1,77 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ када се скупљање материјала узимало у обзир.

У раду [70] је описан утицај осмотског претретмана на и кинетику конвективног сушења полутки нектарине. Почетна влажност нектарина по сувој основи била је $4,51 \pm 0,13$, а маса узорака $113,51 \pm 15,66\text{g}$. Температура ваздуха је била 40 и 60°C, а брзина 1 и 1,5 m/s. Време сушења је било 23h.

У раду [71] је испитивано сушење кришки нектарине топлим ваздухом и хибридном методом топлим ваздухом и микроталасним сушењем при константној температури и брзини ваздуха (50°C и 0,5m/s). Хибридни метод смањује време сушења значајно и даје производ бољег квалитета. Ефективна дифузивност воде је била у оквиру $8,15 \cdot 10^{-8}$ до $2,83 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ за хибридно сушење, и $1,27 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ за сушење топлим ваздухом.

У раду [72] истраживао се утицај хибридног микроталасног и конвективног сушења кришака нектарине на квалитет боје и потрошњу енергије. Снага микроталасне пећи била је 90,180,360 и 600 W, док је температура ваздуха била 50 и 70 °C, при брзини ваздуха од 2 m/s. Оптималан режим у односу на оптимално време сушења, потрошњу енергије и параметре боје је 180W снага микроталасне пећнице и температура ваздуха 70°C.

У раду [73] истраживан је утицај осмотског претретмана на нектарине са раствором глукозног сирупа и сорбитола на кинетику сушења топлим ваздухом температуре 60, 70 и 80 °С. Дебљина кришки била је 1,59 mm, а просечна тежина 3,2 g. Почетни садржај влаге нектарина био је $4,602 \pm 0,177 \text{ g}_w/\text{g}_{so}$, а почетна активност воде била је $0,971 \pm 0,009$. Брзина ваздуха је била $0,92 \pm 0,03 \text{ m/s}$. Логаритамски модел и Мидилли модели најбоље описују сушење при датим условима. Ефективна дифузивност влаге је била у оквиру $4,96 \cdot 10^{-9}$ до $2,43 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$.

3. ВРСТЕ ВЛАГЕ У ПРЕХРАМБЕНИМ МАТЕРИЈАЛИМА

У овом поглављу се говори о вези влаге са скелетом чврстог материјала. Дата је подела влажних материјала према начину понашања у току процесу сушења. Такође су објашњени механизми којим се влага креће кроз влажан материјал.

3.1. КЛАСИФИКАЦИЈА ВЛАГЕ У ПРЕХРАМБЕНИМ МАТЕРИЈАЛИМА

Процес сушења је, у суштини, процес уклањања влаге из тела, па самим тим и механизам издвајања влаге зависи од везе влаге и чврстог скелета материјала који се суши. Због тога је неопходно, пре испитивања статике, кинетике и динамике процеса сушења, прво утврдити карактеристике везе влаге и чврстог скелета тела.

У литератури постоји више подела влаге према начину на који су материјал и влага повезани, а једна од највише коришћених је подела на слободну влагу и везану влагу. Оваква подела је урађена према енергији потребној да се раскине веза влаге и чврстог скелета материјала [74].

Слободна влага је влага у материјалу чија вредност парцијаног притиска паре одговара вредности притиска засићења паре на истој температури и условима околног ваздуха. Јавља се у облику површинске влаге која захваљујући површинским напону формира филм течности на материјалу. Слободна влага је карактеристична за почетне фазе сушења, када је површина материјала обложена влагом, као и за материјале чији чврсти скелет не упија течност (нехигроскопне материјале) где је сва влага која се налази у оваквим материјалима слободна влага. У хигроскопним материјалима (материјали чији чврсти скелет упија течност) слободна влага се налази у капиларама и порама. Слободна влага у капиларно-порозним материјалима може да буде у облику фуникуларне влаге – влага у порама је повезана, и пендуларне влаге – влага у порама се налази у облику засебних делова течности, па је самим тим механизам капиларног преношења влаге онемогућен [9].

Везана (хигроскопска) влага је влага чији је парцијални притисак паре мањи од оног који има чиста течност на датој температури и условима ваздуха. У зависности од вредности и природе енергије везе, разликује се три типа везе воде и хигроскопног чврстог материјала [16]:

1. *Хемијски везана влага*
 - *Јонски везана*
 - *Молекуларно везана (у облику једињења)*
2. *Физичко-хемијски везана влага*
 - *Адсорпционо везана*
 - *Осмотски везана влага*
3. *Физичко-механички везана влага*
 - *Структурно везана*
 - *У микрокапиларама*
 - *У макрокапиларама*
 - *Везана површинским притиском*

Хемијски везана влага налази се у виду хидроксилних јона или молекуларних једињења као што су кристални хидрати. У биоматеријалима ова влага се налази у ћелијским зидовима и влакнима и веома ју је тешко одстранити сушењем. Хемијски везана влага се не издваја ни при загревању тела преко 120-150°C, па је самим тим за процес сушења воћа и остатака из производње сокова који се суши на знатно нижим температурама битније испитати физичко-хемијски и физичко-механички везану влагу [74]. *Физичко-хемијски везана влага* може да буде

адсорпционо везана вода која представља слој воде величине реда молекула на унутрашњим и спољашњим површинама капиларно-порозног тела, осмотски везана влага, као и влага везана slabим везама са протеинима, угљеним хидратима и минералима [75]. *Физичко-механички везана* влага је капиларно везана влага „заробљена“ у капиларама (порама) материјала услед величине и облика пора, а јачина везе ове врсте зависи од количине воде у капиларама и структуре материјала.

Према томе, влага у материјалу може да буде хемијски везана у виду одређених једињења или јона, физички и хемијски адсорбована на површини материјала, „заробљена“ у малим капиларама, садржана у ћелијским зидовима и влакнима, или диспергована као раствор свуда по материјалу.

Користан податак за класификацију типа везе течности у материјалу је вредност потребне енергије за уклањање 1 mol влаге из материјала. Везана влага се може класификовати према енергији везе, тј. слободној енергији процеса дехидратације. Ред величине вредности енергије везе за одстрањивање хемијски везане влаге је 5000 J/mol, физичко-хемијски везане влаге 3000 J/mol, а за физичко-механички везану влагу ова вредност износи око 100 J/mol [9].

Физичко-механички везана влага је веома значајна у процесу сушења и може се класификовати у:

- Структурно везану влагу (гелови са око 1% суве материје) која може бити одстрањена испаравањем влаге или механичким путем,
- Капиларно везана влага (капиларно-порозна тела) која може бити одстрањена испаравањем влаге из капилара у агенс сушења, и
- Влага везана површинским притиском (код непорозних хидрофилних тела) која може бити одстрањена површинским испаравањем у агенс сушења.

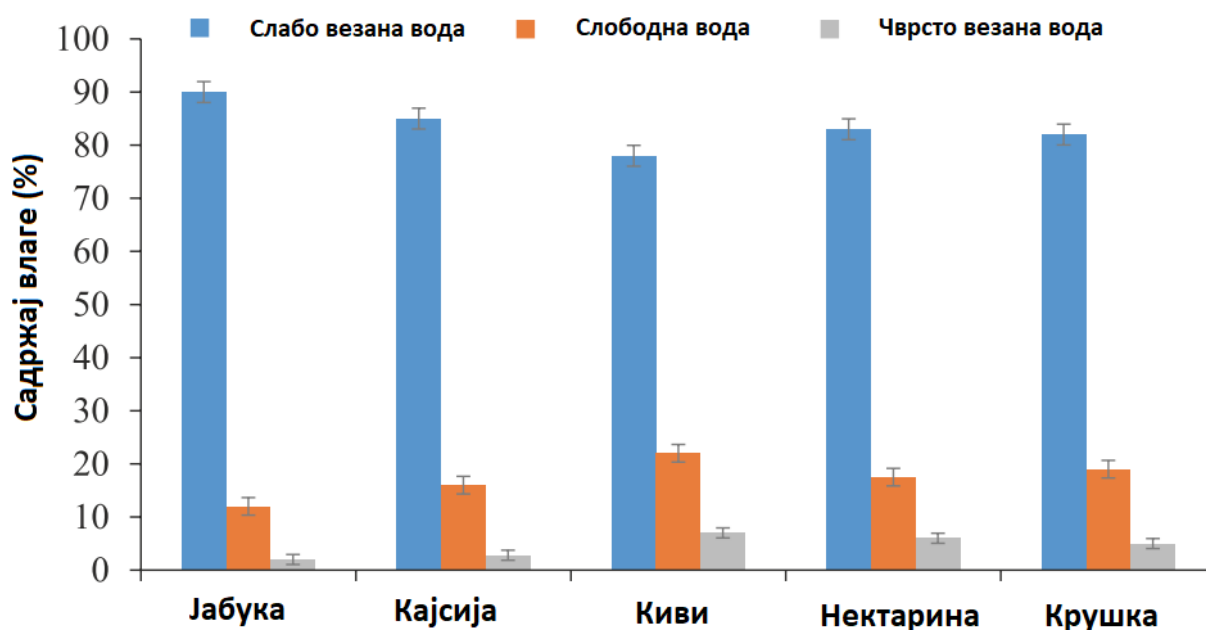
Влажни материјали се према начину везе са чврстим скелетом тела и у зависности од тога који тип влаге поседују (слободну или везану) могу поделити на *нехигроскопне*, *делимично хигроскопне* и *хигроскопне*.

Нехигроскопни материјали не садрже везану влагу, већ се сва влага унутар ових материјала налази као слободна влага. У ове материјале се убрајају непорозна тела или порозна тела са порама радијуса већих од 10^{-7} m. **Делимично хигроскопни** материјали су тела са макропорама, која поседују влагу везану за материјал. Водена пара на површини ових материјала има парцијални притисак који је незнатно нижи од притиска водене паре изнад слободне површине воде при истим условима околног ваздуха. **Хигроскопни** материјали садрже везану влагу. Ови материјали су углавном тела са микропорама у којима водена пара на површини материјала остварује притисак који је значајно нижи од оног изнад слободне површине воде при истим условима околног ваздуха. Уколико одређени хигроскопни материјал садржи, поред везане, и слободну влагу, онда се он понаша као нехигроскопни док се сва слободна влага сушењем не уклони, а затим се понаша као хигроскопни.

РАСПОДЕЛА ВЛАГЕ У БИЉНИМ ТКИВИМА

Вода се у свежем воћу и поврћу налази у ћелијама и ћелијским органелама (интрацелуларна вода), у међућелијском простору (интерцелуларна вода), као и у зидовима ћелија. Интерцелуларна вода се налази у капиларама и порама између ћелија. У међућелијском простору се поред воде налази и ваздух и други раствори (шећер нпр.). Интерцелуларна вода (5-15% укупне воде) [75] је по природи слободна вода, која се лако уклања у току процеса сушења. Интрацелуларна вода је везана вода и чини 78-95% укупне воде у свежим прехранбеним биоматеријалима. Преостала вода (2-5%) се налази у ћелијским зидовима и њу

је тешко издвојити у процесу сушења (физичко-хемијска везана влага) [76]. На слици 3.1. је приказан садржај воде у неким врстама свежег воћа.



Слика 3.1: Слободна и везана вода у неким свежим врстама воћа [75]

У прехранбеним производима и биоматеријалима влага се грубо може поделити на слободну и везану воду, при чему се слободна вода налази у међућелијском простору (тзв. Интерцелуларна вода), док се везана вода налази као чврсто везана вода (у ћелијским зидовима) и слабо везана вода (у самим ћелијама – Интрацелуларна вода). Да би се ослободила чврсто везана вода из ћелијских зидова, она треба да прође кроз интермикрофибрилне шупљине које су реда величине 10nm у пречнику, па је самим тим за издвајање ове воде потребна већа количина енергије у поређењу са слободном и слабо везаном водом.

РАСПОДЕЛА ВЛАГЕ У ВОЋНОМ ТРОПУ

Да би се што прецизније квалитативно описао процес сушења остатака из производње сокова, неопходно је што боље познавати састав и особине сушеног материјала. За разлику од свежег воћа и поврћа, чија је структура описана у претходном потпоглављу, воћни троп након процеса цеђења сока, има значајно другачију структуру. Циљ индустрије сокова је издвајање што веће количине воде из свежег воћа, а највећа количина воде (78-95%) у воћу се налази унутар ћелија, тј. као интрацелуларна вода, па приликом процеса екстракције сокова долази до руптуре (пуцања) биљних ћелија. Може се дакле сматрати да се сва преостала вода у воћном тропу налази као интерцелуларна вода и вода у влакнима који су саставни део ћелијских зидова воћа, поврћа и житарица. Влага која се налази у капиларама и порама је везана физичко-механичким везама, а она у влакнима физичко-хемијским везама [16].

На почетку сушења вода у воћном тропу се налази у капиларама и у растворљивим дијететским влакнима. У капиларама вода може да се налази као слободна, уколико ју је лако уклонити, тј. ако се налази у већим и отвореним капиларама, и као физичко-механички везана у затвореним и мањим капиларама. У влакнима се вода налази као физичко-хемијски везана. На почетку сушења се издваја слободна влага, па затим физичко-механички везана из већих и мањих капилара. Како сушење одмиче, вода нестаје из капилара и сва преостала вода се налази као физичко-хемијски везана влага која се налази у растворљивим влакнима. Између трећине и четвртине свих влакана су растворљива, тј. упијају воду, па се влага из њих одстрањује осмозом који је генерално спорији процес од течне дифузије.

3.2. МЕХАНИЗМИ ПРЕНОШЕЊА ВЛАГЕ У ПРЕХРАМБЕНИМ МАТЕРИЈАЛИМА ТОКОМ ПРОЦЕСА СУШЕЊА

Структура чврстог тела и веза тела са супстанцом која се креће кроз њега имају кључан утицај на механизам преношења и брзину кретања влаге у току процеса сушења [77]. Постоји мноштво механизма преношења влаге кроз материјал, а доминантни механизам преношења влаге зависи од садржаја влаге у материјалу и структуре прехранбеног материјала, што одређује и брзину сушења. [78]

Иако је опште прихваћено да је за процес сушења прехранбених производа од кључног значаја унутрашње преношење влаге у материјалу, не постоји једнозначно одређен систем којим се одређују механизми преношења који су укључени [79]. Међутим, сви механизми преношења влаге кроз унутрашњост материјала могу се сврстати у четири главна модела [9]:

- Капиларно преношење влаге кроз мале међупросторе (поре и капиларе)
- Дифузија влаге услед градијената концентрације
- Дифузија парне влаге услед постојања градијента парцијалног притиска
- Дифузија у слојевима течности адсорбоване на унутрашњим површинама материјала

Као што се закључује из наведених главних модела, два главна механизма преношења влаге кроз материјал су капиларно преношење и дифузија. Док је капиларно преношење влаге кроз материјал највише примењиво на сушење грануластих материјала и материјала порозне структуре, дифузија течности је доминантни механизам преношења влаге у једнофазним материјалима са колоидном или геластом структуром. У многим случајевима су у току процеса сушења одређеног материјала заступљена оба механизма преношења влаге, у смислу да на почетку процеса сушења доминантну улогу има капиларни транспорт, док у каснијим фазама сушења доминантну улогу преузима дифузија течности, а затим дифузија паре.

Капиларно преношење влаге је доминантан механизам преношења течности код порозних материјала чије су капиларе спојене и потпуно испуњене течношћу. Тада се дејством површинског напона и Дарсијевог закона врши кретање и редистрибуција течности у капиларама. Када систем капилара није потпуно испуњен течношћу долази до прекида филма течности и капиларно преношење течности се зауставља. Тада на снагу ступају дифузиони механизми преношења влаге.

Дифузионо преношење влаге кроз материјал се у колоидно-капиларно-порозним телима остварује услед градијената садржаја влаге и температуре и овај начин преношења влаге се назива молекуларно преносење. Молекуларно преношење влаге се може се изразити помоћу једначина типа II Фиковог закона дифузије. Ово је најчешћи механизам преношења влаге у прехранбеним производима.

У случају постојања градијента притиска у материјалу, долази до моларног (конвективног) преношења влаге које се назива још и филтрација и која може да се јави као филтрационо кретање парно-ваздушасте смеше (конвективна филтрација), или као филтрација течности услед градијента хидростатичког притиска [16].

Приликом процеса сушења материјала (осим у случају лиофилизације када је температура материјала нижа од тачке мржњења течности) влага се у материјалу налази у облику течне и парне фазе. У почетку процеса сушења, влага се у капиларно-порозним телима налази у микро- и макропорама у облику течне влаге, док се у каснијим фазама сушења влага налази у парној фази. Самим тим се влага се из унутрашњости влажног материјала до површине са које испарава може преносити у течној и парној фази, па је значајно направити поделу механизма преношења влаге у течној и парној фази. У тексту који следи, биће објашњени неки најбитнији механизми преношења влаге кроз материјал у течној и парној фази.

3.2.1. МЕХАНИЗМИ ПРЕНОШЕЊА ВЛАГЕ У ТЕЧНОЈ ФАЗИ

Преношење влаге молекуларном дифузијом подразумева да течност дифундује кроз влажан материјал до слободне површине материјала. У овом случају, флуks течне фазе пропорционалан је градијенту концентрације влаге унутар материјала и има облик I Фиковог закона дифузије:

$$\vec{j} = -D_{m,2} \vec{\nabla} C_m \left[\frac{kg}{m^2s} \right] \quad (3.1)$$

Где је \vec{j} флуks влаге (kg/m^2s), $D_{m,2}$ (m^2/s) коефицијент дифузије течне влаге кроз материјал, C_m (kg/m^3) је масена концентрација течности која дифундује. Овај тип дифузије се јавља у случају да је температура влажног материјала нижа од тачке кључања течности [80]. Молекуларна дифузија се јавља у периоду опадајуће брзине сушења и представља лимитирајући механизам током почетних фаза процеса сушења прехранбених производа [75]. Приликом сушења биљних производа одиграва у капиларама, тј. међућелијском простору. Влага која се налази у остацима из производње сокова – воћном тропу, у форми је воденог раствора шећера и других једињења. У току процеса сушења из раствора испарава само вода, док остала једињења у раствору не испаравају. Због тога у воденом раствору на површини материјала долази до смањења садржаја воде, тј. до стварања градијента концентрације раствора на површини материјала и у унутрашњости [81]. У складу са I Фиковим законом дифузије у капилари која садржи водени раствор долази до молекуларног кретања воде ка површини материјала.

Термодифузија (Соретов ефекат) је феномен дифузног флуksа који се јавља уколико постоји градијент температуре у материјалу (и супротног је смера од концентрацијске дифузије) [82] [83]. Откривен је крајем 19. века када ја примећено да се хомогена гасна смеша раздваја (ствара се градијент концентрације) ако постоји температурски градијент, тако да се гас са мањом густином концентрише у подручје са вишом температуром, а гас са већом густином у део са нижом температуром. Флуks влаге у материјалу који је изазван *термодифузијом* може се представити следећом једначином:

$$\vec{j} = -D_{m,2} \delta \rho_0 \vec{\nabla} T \left[\frac{kg}{m^2s} \right] \quad (3.2)$$

Где је ρ_0 густина сувог скелета материјала (kg_{so}/m^3), δ [1/K] термоградијентни коефицијент (коефицијент термовлагопроводности), $D_{m,2}$ коефицијент дифузије течне влаге кроз материјал, а $\vec{\nabla} T$ [K/m] градијент температуре. Из једначине се види да је кретање влаге супротног смера од градијента температуре, тј. да се кретање влаге (у облику течности) врши у смеру од више температуре ка нижој.

Коефицијент термовлагопроводности се може изразити као:

$$\delta = \left(\frac{\Delta M}{\Delta T} \right)_{j=0} \quad (3.3)$$

где је M [kg_w/kg_{sm}] садржај влаге у материјалу. Укупан коефицијент термодифузије (термодифузивност) се може дефинисати као производ коефицијента дифузије течне влаге и коефицијента термовлагопроводности:

$$D_{m,2}^T = D_{m,2} \delta \quad (3.4)$$

Термоградијентни коефицијент капиларно-порозних тела се повећава са садржајем влаге, достиже максималну вредност, а затим опада. Он зависи од структуре капиларно-порозног материјала, као и расподеле капиларне влаге унутар материјала. Када се у телу налази

максималан садржај влаге, као што је случај на почетку процеса сушења, термоградијентни коефицијент је нула, јер су све поре и капиларе испуњене течношћу. За тела колоидне структуре са високим садржајем влаге, термоградијентни коефицијент се може сматрати 0. Како сушење одмиче, поре и капиларе постају делимично испуњене течношћу, а делимично ваздухом који заузима место течности. „Заробљени“ ваздух се у подручју више температуре порозног материјала шири и потискује течну влагу у правцу ниже температуре. Када садржај влаге у материјалу значајно опадне, слаби интеракција течне влаге и ваздуха и термоградијентни коефицијент опада. Овај вид преношења течне влаге кроз материјал се такође назива и филтрационо кретање течне влаге [16].

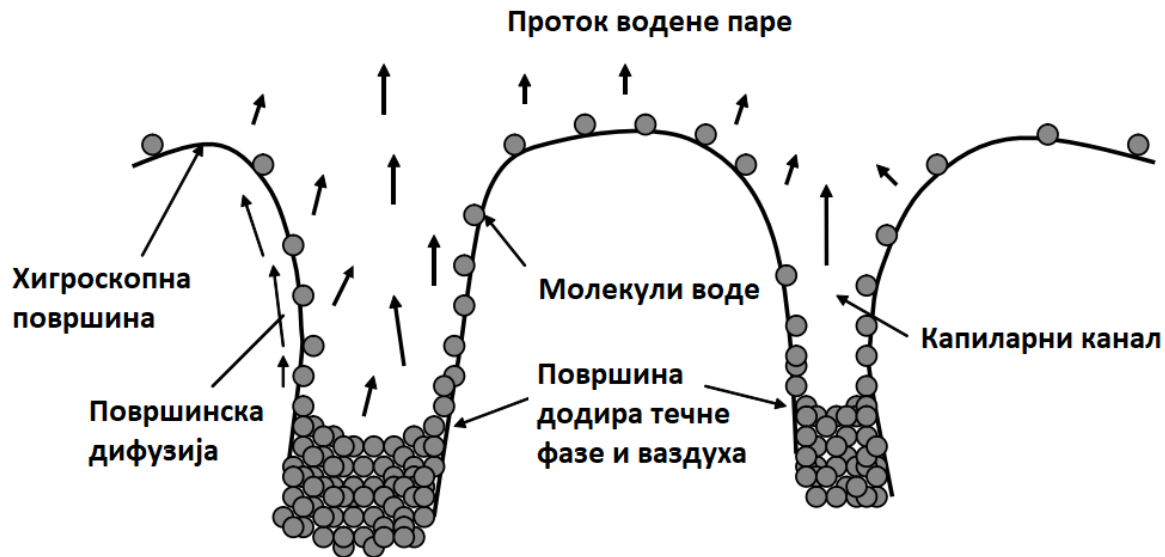
Преношење влаге услед дејства капиларних сила. За тела која имају структуру са повезаним капиларама и порама, јавља се преношење течности које је изазвано површинским напоном. Овај тзв. *капиларни транспорт* јавља се услед површинских напона између воде и чврстог скелета материјала [80]. Преношење влаге је изазвано привлачним молекуларним силама између чврстог скелета и течности, чиме се течност креће међућелијским простором, повезаним порама и капиларама. Ово су углавном адхезионе силе које покрећу течност кроз канале из подручја више у подручје ниже концентрације влаге. Кретање течности кроз фитиљ, као и кретање воде кроз стабло дрвета су типични примери ове врсте преношења влаге [75]. Ако су капиларе међусобно повезане, разлика у капиларним притисцима доводи до континуалне прерасподеле влаге из већих капилара у мање [9]. Дарсијев закон може послужити за описивање процеса сушења услед капиларног преношења влаге у порозним прехрамбеним производима чије су капиларе испуњене течношћу. Капиларно преношење течности се одвија под утицајем градијента капиларног потенцијала који је функција садржаја влаге и температуре:

$$\vec{j} = k_c \vec{\nabla} \psi \left[\frac{kg}{m^2 s} \right] \quad (3.5)$$

Где је k_c [$kg \cdot s / m^3$] капиларна кондуктивност, а ψ [m^2 / s^2] капиларни потенцијал [16]. Када садржај влаге у материјалу опадне до те мере да вода у капиларама више није више повезана, већ се налази у виду засебних „острваца“ валге, преношење течне влаге капиларним силама губи на утицају и на снагу ступају други механизми преношења влаге.

Преношење влаге услед осмотског притиска. Ћелије воћа и поврћа, као и међућелијски простор испуњени су водом, тј. воденим раствором. Уколико је концентрација воде у ћелији виша у односу на међућелијски простор, долази до појаве разлике притисака који се назива *тургор*. Услед тургора долази до преношења молекула воде кроз полупропустљиве ћелијске мембране и овај вид преношења се назива осмоза. Осмотско преношење влаге може да се одвија из једне ћелије у суседну преко ћелијских зидова и тада се назива апопластично преношење, или из ћелије у међућелијски простор, и тада се назива симпластично преношење [80]. Макроскопски посматрано, осмотски преношење воде је функција садржаја влаге у материјалу, па се може описати помоћу Фиковог закона дифузије. Међутим, како се влага преноси кроз зидове ћелија, а не кроз поре и капиларе, што је случај код капиларног кретања и течне дифузије, овај вид преношења влаге је доста спорији.

Преношење влаге површинском дифузијом. У порозним материјалима, влага може да се преноси дуж површине капилара и пора хигроскопних материјала. Како су прехрамбени материјали хигроскопни, феномен површинске дифузије је један од значајних механизма преношења влаге, а изводи се као што је приказано на Слици 3.2. Површинска дифузија се јавља када материјал није потпуно испуњен течношћу.



Слика 3.2: Принцип површинске дифузије [19]

3.2.2. МЕХАНИЗМИ ПРЕНОШЕЊА ВЛАГЕ У ПАРНОЈ ФАЗИ

Преношење влаге парном дифузијом. Ово је главни механизам преношења влаге кроз материјал у парној фази. Јавља се у материјалима где је карактеристичан пречник ваздушних шупљина у материјалу већи од 10^{-7}m [9]. Квалитативно се овај вид транспорта влаге може описати Фиковом једначином дифузије, користећи уместо кинематског коефицијента дифузије парне влаге (D_{10}) ефективни коефицијент дифузије ($D_{E,eff}$) у капиларно-порозним материјалима.

$$\vec{j} = -D_{eff} \vec{\nabla} C_m \left[\frac{kg}{m^2s} \right] \quad (3.6)$$

$$D_{eff} = D_e D_{10} \quad (3.7)$$

где је D_e еквивалентни коефицијент дифузије у капиларно-порозним материјалима [9]. Овај вид преношења влаге се јавља уколико влага испарава унутар материјала [80] што је случај у каснијм фазама сушења прехранбених производа (конкретно друга фаза опадајуће брзине сушења).

Преношење влаге ефузијом (Кнудсенова дифузија). У пракси се најчешће јавља при сушењу на веома ниским температурама и притисцима, тј. приликом лиофилизације. Овај вид преношења парне влаге је присутан уколико је карактеристична димензија празног простора унутар капиларно-порозног материјала мања од 10^{-7}m , тј. код материјала колоидне структуре. Флукс водене паре може да се напише у облику:

$$\vec{j} = -D_{E,eff} \vec{\nabla} C_m \quad (3.8)$$

Где је $D_{E,eff}$ (m^2/s) ефективни коефицијент ефузије.

Преношење парне влаге филтрацијом у капиларно-порозним телима се јавља услед постојања градијента притиска унутар материјала. Градијент притиска настаје услед локалног

испаривања течности и/или локалне кондензације паре. Ово је моларно кретање парно-ваздушне смеше (конвективна филтрација) у правцу супротном градијенту притиска. Флукс парне фазе услед филтрације може се описати Дарсијевим (Darcy's) законом [16] и изразити као:

$$\vec{j} = -k_p \vec{\nabla} p \quad (3.9)$$

Где је $k_p[s]$ коефицијент моларног преношења парне влаге, који је функција фактора пенетрације и густине парно-ваздушне смеше.

Поред наведених начина преношења влаге, масени транспорт може такође да буде узрокован скупљањем материјала или другим спољашњим или унутрашњим факторима.

Хигроскопни материјали се у најопштијем случају суше у периоду константне брзине сушења, затим у периоду опадајуће брзине сушења, а процес се завршава када је достигнута равнотежна влажност материјала. У периоду константне брзине сушења, спољашњи услови, као што су температура, брзина ваздуха и релативна влажност су од кључне важности, а главни механизам издвајања влаге из материјала је површинска дифузија [78]. На крају периода константне брзине сушења, када се достигне критичан садржај влаге, почиње први период опадајуће брзине сушења. Влага доспева из унутрашњости на површину материјала капиларним кретањем, а површински филм течности постепено нестаје и на површини материјала почињу да се појављују сува подручја. У овом периоду сушења доминантан механизам преноса влаге је дифузија течности условљена градијентом концентрације влаге, а унутрашњи параметри материјала, као што су садржај влаге, температура и структура материјала, добијају на важности. Када филм течности са површине материјала потпуно испари, почиње други период опадајуће брзине сушења. У овом периоду доминантан механизам преношења влаге је парна дифузија условљена градијентом концентрације влаге. Унутрашњи параметри материјала су доминантни, док спољашњи параметри губе на значају.

4. ПРОСТОРНО-ВРЕМЕНСКИ МОДЕЛ ПРОЦЕСА СУШЕЊА КАПИЛАРНО-ПОРОЗНИХ МАТЕРИЈАЛА

У овом поглављу је приказан општи модел процеса сушења капиларно порозних материјала према Ликовљевој теорији сушења. На основу приказаног општег модела развијен је сопствени модел за конкретан случај сушења воћног тропа, а затим су приказани почетни и гранични услови при комбинованом конвективно-кондуктивном сушењу прехранбених материјала у танком слоју.

4.1. ОПШТИ МОДЕЛ ПРОЦЕСА СУШЕЊА КАПИЛАРНО ПОРОЗНИХ МАТЕРИЈАЛА ПРЕМА ЛИКОВЉЕВОЈ ТЕОРИЈИ СУШЕЊА

У влажним капиларно-порозним телима, преношење енергије се врши преношењем топлотне енергије, као и преношењем енергије услед преношења влаге, па се израз за енергетски флуks може написати као [84]:

$$\vec{j}_e = -\lambda \vec{\nabla} T + \sum_{i=1}^4 h_i \vec{j}_i \left[\frac{J}{m^2 s} \right] \quad (4.1)$$

где се индекс i односи на фазу у којој се влага налази у материјалу: 1-пара, 2-течност, 3- лед, 4-ваздух, h_i (J/kg) је специфична енталпија i -те фазе, \vec{j}_i (kg/m²s) је флуks масе i -те фазе, а λ (W/mK) топлотна проводљивост влажног материјала.

Густина флуksа масе је пропорционална градијенту одговарајућег потенцијала преноса. Из једначине (4.1) се добија енергетски флуks за све заступљене механизме преношења влаге кроз материјал.

Ликовљев систем једначина преношења влаге и количине топлоте је изведен из закона одржања масе и енергије, уз претпоставку да се скупљање материјала приликом сушења може занемарити. Систем једначина гласи:

$$\rho_0 \frac{\partial M_i}{\partial \tau} = -\text{div}(\vec{j}_{i,dif} + \Pi \rho_i b_i \vec{v}_i) + J_i \left[\frac{\text{kg}}{m^3 s} \right] \quad (4.2)$$

$$c \rho_0 \frac{\partial T}{\partial \tau} = \text{div}(\lambda \vec{\nabla} T) + \sum_{i=1}^4 h_i J_i - \sum_{i=1}^4 (\vec{j}_{i,dif} + \Pi \rho_i b_i \vec{v}_i) \cdot c_i \vec{\nabla} T \left[\frac{J}{m^3 s} \right] \quad (4.3)$$

Једначина (4.2) представља закон промене масе у времену, а једначина (4.3) закон промене енергије у времену, при чему су обе једначине сведене на јединицу запремине. Члан са леве стране једначине (4.2) означава промену садржаја влаге по запремини материјала у времену. Први члан са десне стране једначине представља промену количине влаге у јединици времена и запремине услед кретања влаге кроз материјал, при чему се први члан у загради односи на дифузионо (молекуларно), а други на моларно (конвективно) преношење влаге. Трећи члан једначине (4.2) представља извор или повор i -те фазе унутар запремине материјала у зависности од фазних прелаза.

У једначини (4.3), први члан са десне стране представља молекуларно преношење топлоте по запремини материјала, које се састоји од чисто кондуктивног преношења топлоте кроз чврст скелет материјала, као и преношења топлоте услед дифузије влаге. Други члан једначине

представља преношење топлоте услед постојања фазних прелаза у материјалу. Трећи члан са десне стране једначине (4.3) представља преношење топлоте услед моларног филтрационог и дифузионог кретања влаге.

Да бисмо разумели физичко значење коначних облика једначина, морамо да одредимо значење појединачних чланова. Флукс влаге кроз материјал се може остварити помоћу више механизма у зависности од фазе у којој се влага преноси, као и у зависности од карактеристика сушеног материјала, тј. од тога да ли је сушени материјал колоидан, капиларно-порозан или колоидно-капиларно-порозан. Усвојено је да се влага кроз материјал може кретати у облику течне и парне фазе. У најопштијем случају материјал је колоидно капиларно-порозан, па су у таквом материјалу заступљени сви механизми преношења влаге. У тексту који следи биће објашњени изрази за дифузионо (молекуларно) кретање влаге кроз колоидно-капиларно-порозне материјале.

Флукс течне влаге у *капиларно-порозним* телима дат је изразом:

$$\vec{J}_{2cap} = -D_{2cap}\rho_0\vec{\nabla}M - D_{2cap}^T\rho_0\vec{\nabla}T \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}} \right] \quad (4.4)$$

Где је D_{2cap} (m^2/s) ефективни коефицијент дифузије течне влаге у капиларно-порозним телима, D_{2cap}^T (m^2/s) је термоградијентни коефицијент дифузије, који се дефинише као:

$$D_i^T = \delta D_i \quad (4.5)$$

Где је δ ($1/\text{K}$) коефицијент термовлагопроводности, који је описан у [84].

Флукс течне влаге у *колоидним* телима гласи:

$$\vec{J}_{2k} = -(D_{2k} + k_f)\rho_0\vec{\nabla}M - k_f^T\rho_0\vec{\nabla}T \quad (4.6)$$

Где су D_{2k} ефективни коефицијент дифузије течне влаге у колоидним телима, k_f и k_f^T коефицијенти кретања филма течности у колоидним телима и дати су у [84].

Флукс парне влаге у *капиларно-порозним* телима дат је:

$$\vec{J}_{1cap} = -D_{1cap}\rho_0\vec{\nabla}M - D_{1cap}^T\rho_0\vec{\nabla}T \quad (4.7)$$

Флукс парне влаге у *колоидним* телима гласи:

$$\vec{J}_{1k} = -D_{E,1}\rho_0\vec{\nabla}M - D_{E,1}^T\rho_0\vec{\nabla}T \quad (4.8)$$

D_{1cap} је ефективни коефицијент дифузије парне влаге, $D_{E,1}$ коефицијент ефузије парне влаге, а $D_{cap,1}^T$ и $D_{E,1}^T$ су термоградијентни коефицијенти дифузије и ефузије парне влаге у капиларно-порозним и колоидним телима, респективно.

У најопштијем случају сушени материјал је колоидно капиларно-порозно тело, па је укупан флукс влаге кроз материјал збир свих флуксева влаге у течној и парној фази:

$$\vec{J} = \vec{J}_{1cap} + \vec{J}_{1k} + \vec{J}_{2cap} + \vec{J}_{2k} \quad (4.9)$$

После замене израза (4.4) и (4.6 - 4.8) у (4.9) добијамо:

$$\vec{j} = -D_{1cap}\rho_0\vec{\nabla}M - D_{1cap}^T\rho_0\vec{\nabla}T - D_{1e}\rho_0\vec{\nabla}u - D_{1e}^T\rho_0\vec{\nabla}T - D_{2cap}\rho_0\vec{\nabla}M - D_{2cap}^T\rho_0\vec{\nabla}T - (D_{2k} + k_f)\rho_0\vec{\nabla}M - k_f^T\rho_0\vec{\nabla}T \quad (4.10)$$

Ако групишемо чланове уз одговарајуће градијенте потенцијала преноса, добићемо:

$$\vec{j} = -(D_{1cap} + D_{1e} + D_{2cap} + D_{2k} + k_f)\rho_0\vec{\nabla}M - (D_{1cap}^T + D_{1e}^T + D_{2cap}^T + k_f^T)\rho_0\vec{\nabla}T \quad (4.11)$$

Тј.

$$\vec{j} = -(D_{mcap} + D_{mk})\rho_0\vec{\nabla}M - (D_{mcap}^T + D_{mk}^T)\rho_0\vec{\nabla}T \quad (4.12)$$

Где је

$$\begin{aligned} D_{mcap} &= D_{1cap} + D_{2cap}; & D_{mk} &= D_{1e} + D_{2k} + k_f \\ D_{mcap}^T &= D_{1cap}^T + D_{2cap}^T; & D_{mk}^T &= D_{1e}^T + k_f^T \\ D_{mcap} + D_{mk} &= D_m; & D_{mcap}^T + D_{mk}^T &= D_m^T \end{aligned} \quad (4.13)$$

Из израза (4.12) и (4.13) можемо да напишемо уопштени израз за флуks масе кроз колоидно-капиларно-порозна тела током процеса сушења као најопштији случај:

$$\vec{j} = -D_m\rho_0\vec{\nabla}M - D_m\delta\rho_0\vec{\nabla}T = -D_m\rho_0\vec{\nabla}M - D_m^T\rho_0\vec{\nabla}T \quad (4.14)$$

Појединачно за колоидне и капиларно-порозне материјале једначине гласе:

$$\vec{j}_k = -(D_{2k} + D_{1e} + k_f)\rho_0\vec{\nabla}M - (D_{1e}^T + k_f^T)\rho_0\vec{\nabla}T \quad (4.15)$$

$$\vec{j}_{cap} = -(D_{1cap} + D_{2cap})\rho_0\vec{\nabla}M - (D_{1cap}^T + D_{2cap}^T)\rho_0\vec{\nabla}T \quad (4.16)$$

Уколико одговарајућу једначину флуksа влаге уврстимо у једначину одржања масе (4.2), (познајући додатно и моларно кретање влаге), добијамо флуks влаге у материјалу за било који механизам преноса који је укључен у процесу сушења.

Узимајући у обзир да се у материјалу налази влага у течној и парној фази, као и да моларно (конвективно) преношење влаге и градијент притиска можемо занемарити, једначина преноса влаге приликом процеса сушења добија облик:

$$\frac{\partial M}{\partial \tau} = \text{div}(D_m\vec{\nabla}M + D_m^T\vec{\nabla}T) \quad (4.17)$$

Уколико током процеса сушења по запремини материјала нема генерисања масе влаге, онда важи :

$$\sum_{i=1}^4 J_i = 0 \quad (4.18)$$

Уз претходно наведене диференцијалне једначине флукса влаге, у случају да не постоји градијент притиска у материјалу, када се занемари филтрационо кретање влаге и постојање фазних прелаза влаге унутар материјала, једначине (4.2) и (4.3) могу да се сведу на [84]:

$$\frac{\partial M}{\partial \tau} = D_m \vec{\nabla}^2 M + \delta D_m \vec{\nabla}^2 T \quad (4.19)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = D_{m1} \frac{r_{12}}{c} \vec{\nabla}^2 M + \left(\alpha + D_m^T \frac{r_{12}}{c} \right) \vec{\nabla}^2 T \quad (4.20)$$

Где је r_{12} – топлота промене фазе, α – топлотна дифузивност, c - специфични топлотни капацитет влажног материјала дефинисан као $c = c_0 + c_1 M_1 + c_2 M_2$.

Уколико се уведе коефицијент фазне трансформације, кога је дефинисао Ликов [85], једначине (4.19) и (4.20) постају:

$$\frac{\partial M}{\partial \tau} = D_{m2} \vec{\nabla}^2 M + \delta D_{m2} \vec{\nabla}^2 T + \varepsilon \frac{\partial M}{\partial \tau} \quad (4.21)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \vec{\nabla}^2 T + \varepsilon \frac{r_{21}}{c} \frac{\partial M}{\partial \tau} \quad (4.22)$$

При чему важи следеће: $\varepsilon = 0$ сва влага се налази у течној фази, $\varepsilon = 1$ сва влага се налази у парној фази.

У најопштијем случају, када се разматра пренос масе кроз колоидно капиларно – порозно тело, при чему су заступљени сви механизми преноса влаге, Ликовљеве једначине гласе:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = K_{11} \Delta M + K_{12} \Delta T + K_{13} \Delta p \quad (4.23)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K_{21} \Delta M + K_{22} \Delta T + K_{23} \Delta p \quad (4.24)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = K_{31} \Delta M + K_{32} \Delta T + K_{33} \Delta p \quad (4.25)$$

При чему су коефицијенти који стоје уз градијенте потенцијала преноса дати у **Прилогу 12.2**.

4.2. ПРИМЕНА ОПШТЕГ МОДЕЛА ПРОЦЕСА СУШЕЊА КАПИЛАРНО-ПОРОЗНИХ МАТЕРИЈАЛА НА КОНКРЕТАН СЛУЧАЈ СУШЕЊА ВОЋНОГ ТРОПА

При сушењу воћног тропа се може занемарити филтрационо кретање влаге јер се занемарује градијент притиска у материјалу. Градијент притиска се ствара при интензивном испаравању и/или кондензацији влаге унутар материјала. Појава градијента се јавља на температурама изнад температуре кључања воде, тј. 100°C при сушењу на атмосферском притиску. Градијент притиска се може јавити и на температурама нижим од 100 °C, али је граница испод које се градијент притиска може занемарити 85 °C [85]. Како је у овом раду у току експерименталних истраживања на лабораторијској сушари (Поглавље 7.3.1) максимална температура којом је третиран узорак била 70°C, оправдано је занемарити градијент притиска у материјалу. Сушење воћног тропа се може поделити на две фазе: сушење у првој опадајућој брзини сушења, где су заступљени механизми преношења влаге у течной и парној фази, и сушење у другој опадајућој брзини сушења, где се влага преноси искључиво у парној фази. У том случају, једначине (4.21 и 4.22) се, користећи изразе (4.13) и изузимајући ефузију паре и дифузионо клизање из разматрања, за случај сушења воћног тропа свде на:

За прву фазу опадајуће брзине сушења, где важи $1 > \varepsilon > 0$, где се материјал сматра колоидно-капиларно-порозним, једначине гласе:

$$\frac{\partial M}{\partial \tau} = D_m \vec{\nabla}^2 M + D_m \delta \vec{\nabla}^2 T \quad (4.26)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \varepsilon \frac{r_{21}}{c} D_m \vec{\nabla}^2 M + \left(\alpha + \varepsilon \frac{r_{21}}{c} D_m \delta \right) \vec{\nabla}^2 T \quad (4.27)$$

При чему је:

$$D_m = D_{1cap} + D_{2cap} + D_{2k} + k_f \quad (4.28)$$

За другу фазу опадајуће брзине сушења, где важи $\varepsilon = 1$, и где се материјал сматра капиларно-порозним једначине гласе:

$$\frac{\partial M}{\partial \tau} = D_m \vec{\nabla}^2 M + D_m \delta \vec{\nabla}^2 T \quad (4.29)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{r_{21}}{c} D_m \vec{\nabla}^2 M + \left(\alpha + \frac{r_{21}}{c} D_m \delta \right) \vec{\nabla}^2 T \quad (4.30)$$

При чему је:

$$D_m = D_{m1} = D_{1cap} \quad (4.31)$$

Изрази за D_{1cap} , D_{2cap} , D_{2k} и k_f дати су у [84].

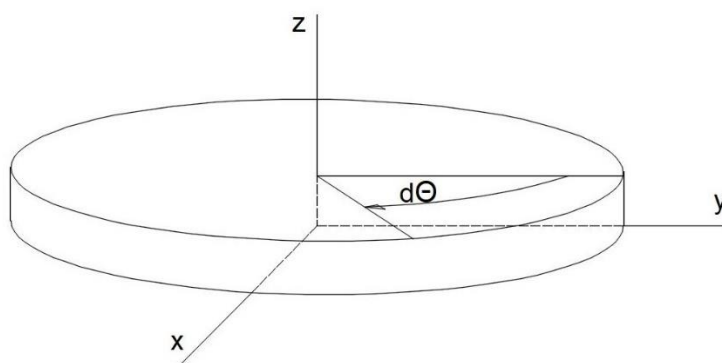
4.3. ПОЧЕТНИ И ГРАНИЧНИ УСЛОВИ ПРИ КОМБИНОВАНОМ КОНДУКТИВНО -КОНВЕКТИВНОМ СУШЕЊУ ПРЕХРАМБЕНИХ МАТЕРИЈАЛА У ТАНКОМ СЛОЈУ

Приликом кондуктивног загревања материјала, топлота потребна за раскидање веза влаге са чврстим телом доводи се индиректно, тј. преко грејне површине. Самим тим, услед разлика у граничним условима на површини тела, као и чињенице да се кондуктивним путем може довести већа количина топлоте у јединици времена, сушење са кондуктивним довођењем топлотног протока је квалитативно другачије од конвективног сушења.

Сви механизми преношења количине топлоте и материје унутар влажног колоидно-капиларно-порозног тела јављају се без обзира на начин довођења топлотног протока материјалу. Међутим, код сушења са кондуктивним довођењем топлотног протока, поједини механизми преношења знатно су интензивнији него код нпр. чисто конвективног сушења, а неки механизми преношења влаге који су били важни за конвективно сушење, при кондуктивном сушењу губе на значају, или су чак супротног смера него код конвективног сушења [85], [86], [87].

У анализи процеса преношења топлоте и материје током комбинованог кондуктивно-конвективног сушења влажног материјала, посматра се случај када се слој влажног материјала, дефинисаних термофизичких параметара и сталне дебљине налази на грејној површи сталне температуре, док са друге стране преко материјала струји гас (влажан ваздух) сталне температуре, који односи испарелу влагу са слободне површи влажног материјала. Топлотни проток се, дакле, материјалу доводи и конвективним путем са стране топлог ваздуха, као и кондукцијом преко грејне подлоге.

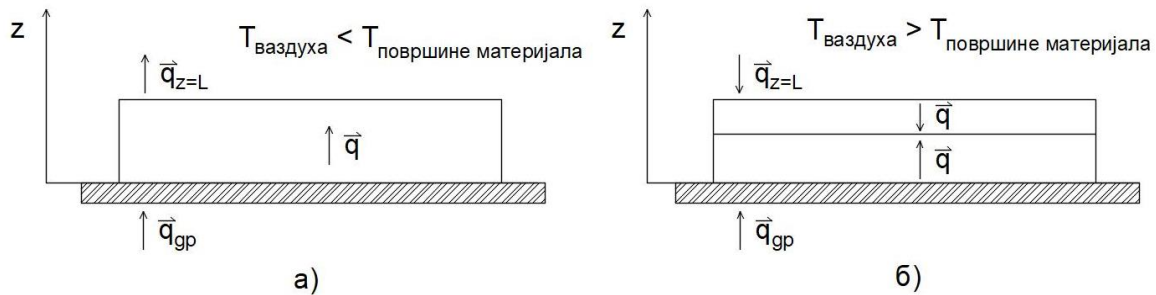
У случају сушења узорка тропа некатрине и јабуке, геометрија узорка је била у облику танког диска, при чему је дебљина материјала била вишеструко мања од пречника диска (најмање 10 пута). У овом случају се издвајање влаге у радијалном правцу може занемарити, те се сматра да је у току сушења кретање влаге било у правцу z осе [88], [89] (Слика 4.1). Како је у току процеса сушења узорак доњом страном у контакту са грејном површи, усвојено је да се издвајање влаге врши само са горње површине узорка изложеној струји топлог ваздуха, тј. проблем се може посматрати као једнодимензиони. Карактеристична димензија материјала је у овом случају дебљина узорка L .



Слика 4.1: Геометрија узорка: Танак диск. Због једноставности, може се сматрати да се све битне величине мењају у правцу дебљине материјала (z осе)

Са стране слободне површине материјала могуће су, у погледу смера предаје топлоте, две суштински различите ситуације, у зависности од вредности температура слободне површине материјала и околног ваздуха. Уколико је температура слободне површине материјала виша од температуре околног ваздуха, густине топлотних протока могу се шематски представити

као на слици 4.2 (а). Други случај је да се слој материјала додатно конвективно загрева топлим ваздухом и тада је температура околног ваздуха виша од температуре слободне површи материјала, а густине топлотних протока унутар слоја материјала изгледају као на слици 4.2 (б).



Слика 4.2: Густине топлотних протока када је температура слободне површине материјала а) виша од температуре ваздуха б) нижа од температуре ваздуха [85]

У случају кретања влаге током процеса сушења са кондуктивним довођењем топлотног протока када је температура грејне површи виша од температуре ваздуха, тј. уколико постоји градијент температуре у материјалу, може се сматрати да се течна влага у свим слојевима материјала креће супротно смеру градијента температуре, тј. у смеру топлотног протока. Због тога се може претпоставити да је механизам термодифузије битан механизам преношења влаге кроз материјал при кондуктивном и комбинованом кондуктивно-конвективном сушењу када у материјалу постоји градијент температуре.

На почетку процеса сушења, сматра се да су почетна температура и влажност материјала униформне по целој запремини материјала. Тада се почетни услови могу дефинисати као:

$$T(z, 0) = T_0 \quad (4.32)$$

$$M(z, 0) = M_0 \quad (4.33)$$

Уколико преко горње површине материјала струји топао ваздух, уобичајено је узети гранични услов 3. врсте. Међутим, према [85] је овај приступ непрактичан због непознавања великог броја параметара. Зато ће се користити гранични услови 2. врсте:

$$\dot{q}(L, \tau) = -\lambda(T, M) \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{z=L} - r(T, M) \cdot [1 - \varepsilon(T, M)] \cdot j(L, \tau) \quad (4.34)$$

$$j(L, \tau) = -D_m(T, M) \cdot \rho_0 \cdot \left(\frac{\partial M}{\partial z}\right)_{z=L} - \delta(T, M) \cdot D_m(T, M) \cdot \rho_0 \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{z=L} \quad (4.35)$$

Први члан једначине (4.34) представља густину топлотног протока која стиже до слободне површине провођењем количине топлоте кроз материјал, док други члан са десне стране представља густину топлотног протока потребну за испаравање течне влаге са слободне површине материјала. У једначини (4.35) први члан са десне стране представља густину протока влаге доспеле на површину материјала услед градијента влаге унутар материјала, док други члан са десне стране представља густину протока влаге доспеле на површину материјала услед градијента температуре унутар материјала [85].

Гранични услов на доњој површини материјала, тј. оној која је у контакту са грејном подлогом, дефинише се као гранични услов прве врсте, тј. сматра се да је површина контакта граничне површине између материјала и грејне подлоге константна током процеса сушења. Уколико се занемаре контактни отпори преношењу топлоте, гранични услов прве врсте гласи:

$$T(0, \tau) = T_{gr} = \text{const.} \quad (4.36)$$

$$j(0, \tau) = 0 \quad (4.37)$$

5. МОДЕЛИ ПРОЦЕСА СУШЕЊА ПРЕХРАМБЕНИХ МАТЕРИЈАЛА

У овом поглављу је дат преглед математичких модела за описивање процеса сушења, са посебним акцентом на моделима развијеним за прехранбене производе. Прво је приказан кратак преглед модела сушења, а затим опис и примена сваког од њих. Најзад, дат је и сопствени математички емпиријски модел за конкретан процес сушења тропа јабуке и нектарине.

5.1. ПРЕГЛЕД И ПОДЕЛА ПОСТОЈЕЋИХ МОДЕЛА СУШЕЊА

Сушење, као облик дехидратације производа користи се већ миленијумима. Међутим, захтеве за боље познавање процеса сушења поставила је индустрија, где на процес сушења отпада значајан удео енергије. Самим тим је јасно да познавање процеса који се одвијају у току сушења може довести до веће ефикасности и уштеда енергије.

Прву инжењерску анализу процеса сушења влажних чврстих тела је урадио *Lewis*, који је утврдио да се сушење састоји из два процеса: дифузије влаге из унутрашњости материјала ка површини, и испаравања влаге са површине материјала у околни агенс сушења (најчешће ваздух). При томе појам влага подразумева течну влагу, а дифузија механизам који је сличан молекуларној дифузији у вишекомпонентним системима. *Sherwood* је затим наставио истраживање почевши од *Lewis*-ових претпоставки, што је резултовало низом радова. Ова истраживања су била базирана на једначини „дифузије“, облика:

$$\frac{\partial M}{\partial \tau} = D_{eff} \left(\frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \right) \quad (5.1)$$

Где M представља садржај влаге, а D_m представља параметар који се утврђује експериментом и назива се ефектинви коефицијент дифузије. *Sherwood* је поред дифузије течне фазе такође разматрао могућност дифузије парне фазе и анализирао процес преношење топлоте у процесу сушења. [90]

У исто време, научници из других поља, као што су хемичари и геолози, установили су да се кретање влаге кроз влажан порозан материјал може објаснити механизмима површинског напона и капиларним силама. Ова сазнања су убрзо укључена у теорију сушења, па су *Sherwood* и *Comings* објавили да се кретање течне влаге одвија захваљујући капиларним силама, док се парна фаза креће молекуларном дифузијом, што је и потврђено низом експеримената.

Seaglske и *Hougen* су 1937. у свом раду о сушењу грануластих материјала закључили да брзина сушења грануластих производа није одређена дифузијом, него капиларним силама. Овим је показано да капиларне силе играју кључну улогу у кретању влаге у процесу сушења порозних тела (за овај случај гранула). Установљена је веза између садржаја влаге и капиларног притиска. Резултати су презентовани за сушење глине, сапуна, папира, папирне пулпе и у сваком случају дифузиона једначина са константним коефицијентом дифузије није показивала задовољавајуће поклапање са експерименталним резултатима. За дрво је, ипак, добијено добро слагање између експерименталних резултата и дифузионе једначине, али под условом да је садржај влаге испод тзв. тачке засићења влакана, тј. да је уклоњена сва слободна вода из дрвета и је преостала само везана влага.

Krischer је први који је увео у разматрање преношење енергије у процесу сушења. Пре тога је мало пажње обрађано на пренос топлоте приликом сушења.

Иако је теорија дифузије била донекле скрајнута после радова *Seaglske* и *Hougen-a*, било је неких очигледних доказа да дифузиона једначина може да буде коришћена за моделовање каснијих (поодмаклих) фаза сушења. Дошло се до претпоставке да у овој фази сушења, капиларе нису пуне течном влагом, већ се вода у капиларама налази у облику „острвца влаге“, тако да је кретање влаге капиларним силама знатно отежано, ако не и потпуно немогуће. Због тога су, у каснијим фазама сушења, конвекција и дифузија влаге у парној фази једини механизми преко којих се влага одстрањује из материјала. Ова чињеница је од посебног значаја у процесу сушења биолошких материјала до веома ниског садржаја влаге [90].

Phillip и *DeVries* су проширили претходне теорије сушења и укључили ефекте капиларног протока и парног протока влаге, а такође су уврстили и термичке једначине у сет конститутивних једначина које описују процес сушења. Транспорт влаге проузрокован капиларним силама је представљен је у облику градијената садржаја влаге и температуре, при чему је добијена једначина слична једначини дифузије. Сличне једначине за пренос масе и топлоте у капиларно-порозним телима је објавио и *Luikov* полазећи од теорије термодинамике неповратних процеса.

Упоредо са свеобухватним суштинским моделима који су се развијали, претходних деценија је изведено и доста емпиријских, полу-емпиријских и теоријских модела који се базирају на Фиковом закону дифузије или Њутоновом закону хлађења. Предност ових модела је једноставност и практична примена.

Према томе, процеси сушења се могу поделити на два основна приступа [78]:

1. Просторно-временски модели
2. Временски модели (Lumped models)

5.2. ПРОСТОРНО – ВРЕМЕНСКИ МОДЕЛИ СУШЕЊА

Дифузиони модел

Дифузиони модел полази од Фиковог закона дифузије и показао се прецизним када је у питању сушење материјала са ниским садржајем влаге, али је непрецизан када се користи за сушење материјала са високим садржајем влаге. Разлог је тај што капиларне силе имају велики утицај при високом садржају влаге у материјалу. Дифузиони модел може у неким случајевима да доведе до нетачних предикција и погрешних закључака, али се овај модел користи код моделирања сушења неких врста материјала јер је једноставан. [91]

Теорија фронта испаравања

Према овој теорији, на почетку периода опадајуће брзине сушења (после критичне тачке), фронт испаравања се постепено помера ка унутрашњости материјала. Фронт испаравања дели влажан материјал у две зоне: влажну и суву зону. У сувој зони, слободне воде нема и главни механизам преноса влаге је парном фазом, док у влажној зони важе механизми преношења влаге течном фазом. Мана ове теорије је што је компликована и постоје потешкоће у одређивању границе фронта испаравања и коефицијената преношења влаге и топлоте.

Ликовљева теорија

Независно од *Phillip* и *DeVries-a*, Ликов је истраживао пренос масе и топлоте у капиларно-порозним телима користећи принципе термодинамике неповратних процеса. У овој теорији, укупни проток влаге је условљен трима компонентама: градијентима садржаја влаге, температуре и укупног притиска. Ликовљеве једначине се под одређеним условима могу свести на сличне онима предложеним од стране *Phillip* и *DeVries-a*. Највећи проблем код коришћења Ликовљевог приступа је дефинисање коефицијената уз једначину. У пракси је често тешко доћи до ових параметара који су потребни да би се решио систем једначина. У сваком случају, Ликовљев модел представља поуздан и познат модел преноса топлоте и масе током процеса сушења [91].

Кришерова теорија

Киршер је међу првима истраживао улогу преноса топлоте и масе приликом процеса сушења у порозним срединама. У својој теорији, Киршер сматра да је преношење влаге контролисано комбинованим утицајем капиларног преношења течне фазе и дифузијом парне фазе. Масени флуks течности је израчунат помоћу Дарсијевог закона, а масени флуks парне фазе зависи од градијента парцијалних притиска. Главне потешкоће које се сусрећу при коришћењу Кришерове теорије сушења јесу оне у вези са граничним условима. Наиме, Киршер сматра да су све физичке величине на почетку сушења, на површини материјала који се суши, тренутно у равнотежи.

Whitaker-ов модел

У току 70 и 80-их, Витакер је представио сет једначина да би описао спрегнуто преношење топлоте, масе и момента у порозним материјалима. Засновано на законима одржања, модел који је предложио Витакер, садржи све механизме преноса масе и топлоте: флуks течне фазе услед капиларних сила, флуks паре и гаса (ваздуха) услед дифузије и конвекције, и унутрашње испаравање влаге и пренос топлоте конвекцијом, дифузијом и кондукцијом. Коришћењем методе осредњивања запремине, макроскопске диференцијалне једначине су дефинисане у зависности од просечних вредности поља физичких величина. Предности Витакеровог модела је да јако верно дочарава физички смисао феномена који се дешавају у току процеса сушења порозних материјала. Међутим, проблем који се јавља је одређивање компликованих транспортних коефицијената, као што су ефективна дифузивност и пермеабилност, који зависе

од карактеристика и структуре материјала. Такође, решавање система једначина захтева компликоване нумеричке методе.

У Табели 5.1 је дат је преглед најважнијих просторно-временских модела сушења порозних материјала.

Табела 5.1: Систематизација различитих теорија сушења према заступљеним механизмима преношења топлоте и супстанције

Феномени	Механизми преношења супстанције				Капиларне силе	Механизми преношења топлоте		
	Дифузија		Конвекција			Дифузија	Конвекција	Кондукција
	ваздух	пара	ваздух	пара				
Дифузиона теорија	-	+	-	-	-	-	-	-
Теорија фронта испаравања	-	+	-	+	-	-	-	+
Модел Phillip и DeVrie-a	-	+	-	+	+	+	-	+
Ликовљева теорија	-	+	-	+	+	+	+	+
Киршерова теорија	-	+	-	+	+	+	+	+
Витакеров модел	+	+	+	+	+	+	+	+

5.3. ВРЕМЕНСКИ МОДЕЛИ СУШЕЊА (LUMPED MODELS)

Временски модели не узимају у обзир градијент температуре у сушеном материјалу, већ претпостављају униформну расподелу температуре узорка, која је једнака температури ваздуха којом се узорак суши [78]. Под претпоставком да се градијент притиска и температуре у материјалу могу занемарити, као и да се сва влага на почетку процеса сушења налази у течnoj фази, Ликовљев систем једначина (4.23 - 4.25) може да се сведе на [78]:

$$\frac{\partial M}{\partial \tau} = D_{eff} \Delta M \quad (5.2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \Delta T \quad (5.3)$$

Где је D_{eff} (m^2/s) ефективни коефицијент дифузије, а α (m^2/s) топлотна дифузивност.

Претпоставка да је температура узорка униформна и једнака температури ваздуха којим се суши доводи до грешака. Међутим, ове грешке се јављају само на почетку процеса сушења и могу да се сведе на прихватљиву меру смањивањем дебљине узорка. Са овом претпоставком развијени су модели за сушење у танком слоју, који добијају на значају због своје једноставности у поређењу са просторно-временским моделима [78].

Сушење у танком слоју подразумева сушење једног слоја материјала, комада или равномерно распоређених комадића материјала типично до неколико центиметара дебљине. Због мале дебљине слоја, распоред температуре по узорку се може сматрати униформним. Због једноставности коришћења, као и потребе за одређивањем много мање података у односу на просторно-временске моделе, ови модели данас налазе широку примену.

Модели сушења у танком слоју материјала могу да се поделе на:

1. Теоријске
2. Полу-емпиријске
3. Емпиријске

Теоријски узима у обзир само унутрашње отпоре провођењу влаге, док полу-емпиријски и емпиријски узимају у обзир само спољашње отпоре пролажењу влаге између узорка и ваздуха којим се узорак суши. Теоријски модели објашњавају релативно јасно процес сушења и могу бити коришћени за широк спектар параметра процеса. Најпознатији теоријски модели су изведени из Фиковог другог закона дифузије. Полу-емпиријски су изведени из Фиковог другог закона или из Њутновог закона хлађења користећи одређена упрошћења. Они су једноставнији за употребу и захтевају мање података због коришћења експерименталних података, али с друге стране, они важе за сличне материјале и услове коришћене током експеримената из којих су изведени. Емпиријски модели се базирају на експерименталним подацима, дају ограничене информације о процесима у материјалу током сушења и могу се применити само на идентичне материјале и услове сушења коришћене у експериментима.

5.3.1. ТЕОРИЈСКИ МОДЕЛИ

Како се може сматрати да је брзина преношења топлоте у материјалу два реда величине већа од брзине преношења влаге, може се усвојити да се сушење у танком слоју врши у

изотермалним условима, па је за описивање процеса сушења под уведеним претпоставкама довољна само једначина (5.2) [78], која у ствари представља облик 2. Фиковог закона дифузије. Једначину (5.2) је аналитички решио Кранк [92] користећи услов симетрије, при следећим почетним и граничним условима:

$$\tau = 0, \quad -L \leq z \leq L, \quad M = M_0 \quad (5.4)$$

$$\tau > 0, \quad z = 0, \quad dM/dz = 0 \quad (5.5)$$

$$\tau > 0, \quad z = 0, \quad M = M_e \quad (5.6)$$

$$\tau > 0, \quad -L \leq z \leq L, \quad T = T_V \quad (5.7)$$

Претпоставке:

- Материјал је хомоген и изотропан
- Карактеристике материјала су константне и промена облика и запремине материјала могу да се занемаре
- Градијент притиска у материјалу се занемарује
- Испаравање се одвија само на површини материјала
- Преношење количине топлоте унутар материјала је путем кондукције, а са ваздуха на материјал путем конвекције
- Ефективни коефицијет дифузије влаге не зависи од садржаја влаге у материјалу

Решења једначине (5.2) уз наведене претпоставке за танак бесконачни слој материјала гласи:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} \tau}{4L^2}\right) \quad (5.8)$$

при чему је MR бездимензиони садржај влаге у материјалу, дат једначином (2.7), а L (m) представља полу-дебљину узорка, уколико се узорак опструјава са обе стране, односно дебљину узорка, уколико се узорак опструјава само са једне стране [78]. Почевши од једначине (5.2) могу се за различите почетне и граничне услове извести и други теоријски модели.

5.3.2. ПОЛУЕМПИРИЈСКИ МОДЕЛИ

Ови модели могу да се класификују у две категорије, у зависности од начина извођења:

1. Њутнов закон хлађења

Ови модели су изведени према аналогiji са Њутновим законом хлађења. Могу се поделити на:

А) Lewis-ов (Newton-ов) модел

Б) Page-ов модел и његове модификације

2. Фиков други закон дифузије

Ови модели су полу-емпиријски модели који су изведени из 2. Фиковог закона дифузије. Могу се поделити у више подгрупа:

А) Модели који обухватају само први члан низа решења Фикове једначине

Б) Модели који обухватају прва два члана низа решења Фикове једначине

Ц) Модели који обухватају прва три члана низа решења Фикове једначине

5.3.2.1. Модели изведени из Њутновог закона хлађења

Lewis (Newton) модел

Овај модел је аналогија Newton-овом закону хлађења који тврди да је брзина промене температуре неког тела пропорционална разлици између температуре тела и температуре околине. Lewis је први предложио да је током сушења порозних хидроскопних материјала, промена садржаја влаге у материјалу у периоду опадајуће брзине сушења пропорционална разлици тренутног садржаја влаге у телу и садржаја влаге на крају процеса сушења, тј. када тело дође у равнотежу са ваздухом. Уз претпоставке да се сушење одвија у танком слоју, да је брзина ваздуха велика, а температура и влажност ваздуха константна током сушења, Lewis-ов модел је облика:

$$\frac{dM}{dt} = -K(M - M_e) \quad (5.9)$$

Где K (s^{-1}) представља константу сушења. Константа сушења узима у обзир механизме преношења влаге кроз материјал и термомеханичке карактеристике, као што су дифузивност влаге, топлотна проводљивост, итд. Уколико се сматра да је K независно од садржаја влаге добија се Lewis-ов модел:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-k\tau) \quad (5.10)$$

Где је k експериментално добијена константа сушења.

Page-ов модел

Page је модификовао Lewis-ов модел додавањем емпиријског фактора n .

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-k\tau^n) \quad (5.11)$$

Постоји више модификација Page-овог модела, који су добијени модификацијом једначине (5.11).

5.3.2.2. Модели изведени из II Фиковог закона

Henderson & Pabis су увели претпоставку да се за дуго време сушења у разматрање може узети само први члан низа једначине (5.8):

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = A_1 \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{A_2} \tau\right) \quad (5.12)$$

Уколико се сматра да је коеф. дифузије константан у току процеса сушења, добија се

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = a \exp(-k\tau) \quad (5.13)$$

Где је a индикатор облика и добија се из експерименталних резултата. Једначина (5.13) представља Henderson & Pabis модел.

Додавањем емпиријских чланова развијени су модификовани модели Henderson & Pabis-a.

Двочлани модел узима у обзир прва два члана низа решења Фикове једначине

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = a \exp(-k_1\tau) + b \exp(-k_2\tau) \quad (5.14)$$

Додавањем емпиријских чланова развијени су модификовани модели двочланог модела.

Трочлани модел узима у обзир прва три члана низа решења Фикове једначине

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = a \exp(-k_1\tau) + b \exp(-k_2\tau) + c \exp(-k_3\tau) \quad (5.15)$$

5.3.3. ЕМПИРИЈСКИ МОДЕЛИ

Ови модели развијени су на основу експерименталних истраживања за специфичне услове сушења одређене врсте материјала и могу се директно примењивати само за те исте услове.

Thompson-ов модел

Thompson и колеге су из експерименталних резултата развили модел за одређивање времена сушења зрна кукуруза у температурском опсегу 60-150°C.

$$\tau = a \ln(MR) + b [\ln(MR)]^2 \quad (5.16)$$

Wang & Singh су развили модел за сушење пиринча

$$MR = 1 + b\tau + a\tau^2 \quad (5.17)$$

Kaleemullah је развио модел за сушење љутих папричица

$$MR = \exp(-cT) + b\tau^{(pT+n)} \quad (5.18)$$

У Табели 5.2 дата је систематизација постојећих просторно-временских и временских модела сушења.

Табела 5.2: Систематизација постојећих модела сушења

Модели сушења		
Просторно-временски	Временски	
	Назив модела	Једначина
Ликовљев модел	Теоријски	
Витакеров модел	Кранкове једначине	$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} \tau}{4L^2}\right)$
Кришерев модел	Полу-емпиријски	
Модел Филип и де Вира	Изведени из Њутновог закона хлађења	
Модел фронта испаравања	Lewis (Њутнов) модел	$MR = \exp(-k\tau)$
	Page-ов модел	$MR = \exp(-k\tau^n)$
	Модификација Page I	$MR = \exp(-k\tau)^n$
	Модификација Page II	$MR = \exp(-(k\tau)^n)$
	Модификација Page III	$MR = \exp(-k(\tau/l^2)^n)$
	Изведени из другог Фиковог закона	
	Henderson & Pabis	$MR = a \exp(-k\tau)$
	Логаритамски модел	$MR = a \exp(-k\tau) + c$
	Мидили	$MR = a \exp(-k\tau) + b\tau$
	Мидили модификација	$MR = \exp(-k\tau) + b\tau$
	Demir et al.	$MR = a \exp[(-k\tau)]^n + b$
	Двочлани модел	$MR = a \exp(-k_1\tau) + b \exp(-k_2\tau)$
	Двочлани модел II	$MR = a \exp(-k\tau) + (1-a) \exp(-ka\tau)$
	Verma	$MR = a \exp(-k\tau) + (1-a) \exp(-g\tau)$
	Дифузиони модел	$MR = a \exp(-k\tau) + (1-a) \exp(-kb\tau)$
	Трочлани модел	$MR = a \exp(-k_1\tau) + b \exp(-k_2\tau) + c \exp(-k_3\tau)$
	Емпиријски модели	
	Thompson-ов модел	$\tau = a \ln(MR) + b [\ln(MR)]^2$
	Wang & Singh	$MR = 1 + b\tau + a\tau^2$
	Kaleemullah модел	$MR = \exp(-cT) + b\tau^{(pT+n)}$

5.4. СОПСТВЕНИ ЕМПИРИЈСКИ МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛ

Како је установљено у поглављу 4, математичко моделирање фундаменталним просторно-временским моделима, као што је Ликовљев модел захтевају одређивање значајног броја физичких величина, а њихово решавање је компликовано и врши се нумеричким алгоритмима. У пракси је због тога чешћи случај да се за процес сушења одређеног материјала развије полуемпиријски или емпиријски модел који би давао задовољавајуће резултате за услове и методе сушења примењене у експерименталним истраживањима. Предност ове методе је једноставност, али је недостатак могућност грешке приликом директне примене модела на друге услове сушења и на друге материјале. Другим речима, емпиријски и полуемпиријски модели ће давати задовољавајуће резултате само за описивање сушења одређене врсте материјала при одређеним условима (геометрија узорка, температура, брзина ваздуха, итд.).

Полу-емпиријски и емпиријски математички модели су облика $MR=f(\tau)$, при чему за прехранбене производе, већина има експоненцијални облик, као што се може видети у Табели 5.2. Приликом развијања математичког модела, треба водити рачуна да се добије највеће поклапање са експерименталним резултатима. У случају сушења воћног остатка, најбоље слагање са експерименталним резултатима дао је модел типа:

$$MR = a \cdot e^{\left(\frac{-\tau}{b}\right)} + c \cdot e^{\left(\frac{-\tau}{d}\right)} + e \quad (5.19)$$

Где су a,b,c и d корелациони параметри, који су дати у Поглављу 8.

6. НЕКА ТЕРМОМЕХАНИЧКА СВОЈСТВА ПРЕХРАМБЕНИХ МАТЕРИЈАЛА

Одређивање термомеханичких особина остатака из производње сока је сложен процес због нехомогене структуре материјала, као и због чињенице да у току процеса сушења материјала долази до промене структуре и текстуре материјала. Услед неравномерног издвајања влаге по запремини материјала, мерење термофизичких особина је додатно отежано. У овом поглављу ће бити дат преглед неколико значајних термомеханичких особина: густина, ефективни коефицијет дифузије, топлотна проводљивост и топлотна моћ. Ова својства су важни параметри при моделирању и оцењивању операција у преради хране које укључују преношење топлоте, потрошњу енергије и квалитет производа. У општем случају, термофизичке и транспортне особине материјала који се суши, као што су густина, специфична топлота, топлотна проводљивост и ефективна дифузивност влаге, функције су садржаја влаге и температуре, а њихове вредности мењају се по дебљини сушеног материјала [19].

6.1. ГУСТИНА

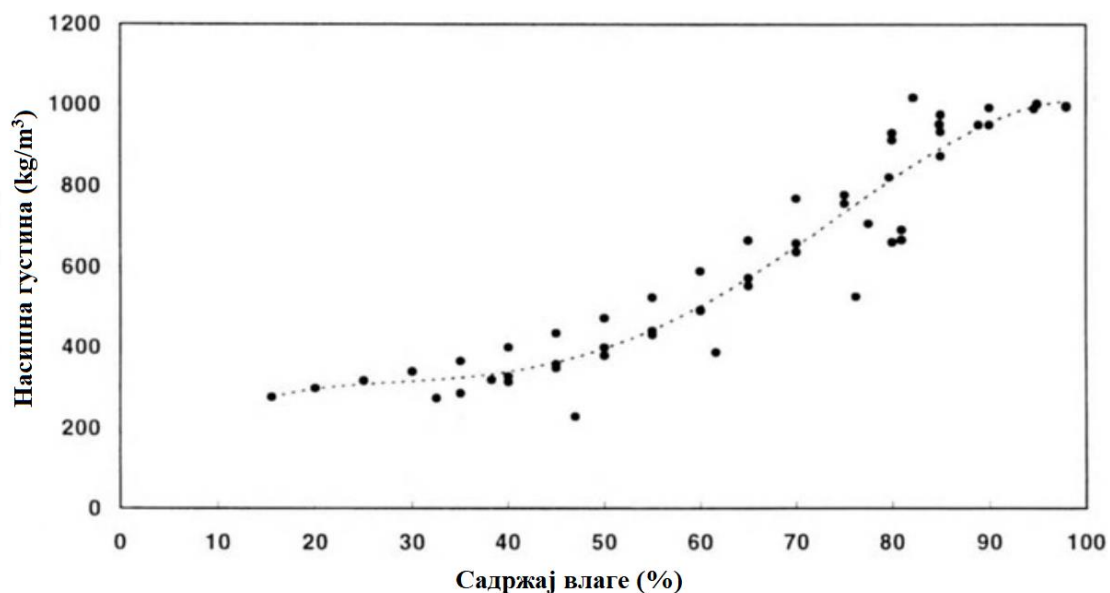
Густина је једна од основних физичких величина, а може се дефинисати на више начина у зависности од врсте материјала и потребе. Код прехранбених производа густина се најчешће изражава преко насипне густине и праве густине. Насипна густина се дефинише као однос масе материјала и запремине коју тај материјал заузима, укључујући влагу у материјалу, све унутрашње поре и празан простор. Права густина се рачуна на основу густина свих њених компонената придржавајући се закона одржања масе [93]. Насипне густине неких врста воћних тропова дате су у Табели 6.1:

Табела 6.1: Густина неких воћних тропова.

Врста материјала	Густина [kg/m^3]	Литературни извор
Троп грожђа	450-600	[94]
Троп јабуке	935	[13]
Рехидрирани прах тропа јабуке	1120	[14]
Осушен јабучни троп	550	[14]
Осушен јабучни троп	520	[41]
Осушен јабучни троп (сабијен)	710	[41]

Густина свежег воћног остатка варира у зависности од врсте воћа, начина екстракције сока, као и садржаја влаге у торпу после цеђења. За јабуку, свеж воћни остатак после цеђења има вредност насипне густине у границама од 400 kg/m^3 до 1000 kg/m^3 [11].

Са Сlike 6.1 може се видети карактер промене насипне густине остатака јабуке са садржајем влаге [13]. Види се да насипна густина свежег воћног остатка има вредност близу 1000 kg/m^3 , а осушена између $200\text{-}300 \text{ kg/m}^3$.



Слика 6.1: Карактер промене насипне густине воћног тропа са садржајем влаге [13]

За сопствене материјале, коришћене у истраживањима, троп нектарине и јабуке, израчунате су насипне густина свежих, као и осушених и у прах самлевених узорака. Резултати су дати у Табели 6.2.

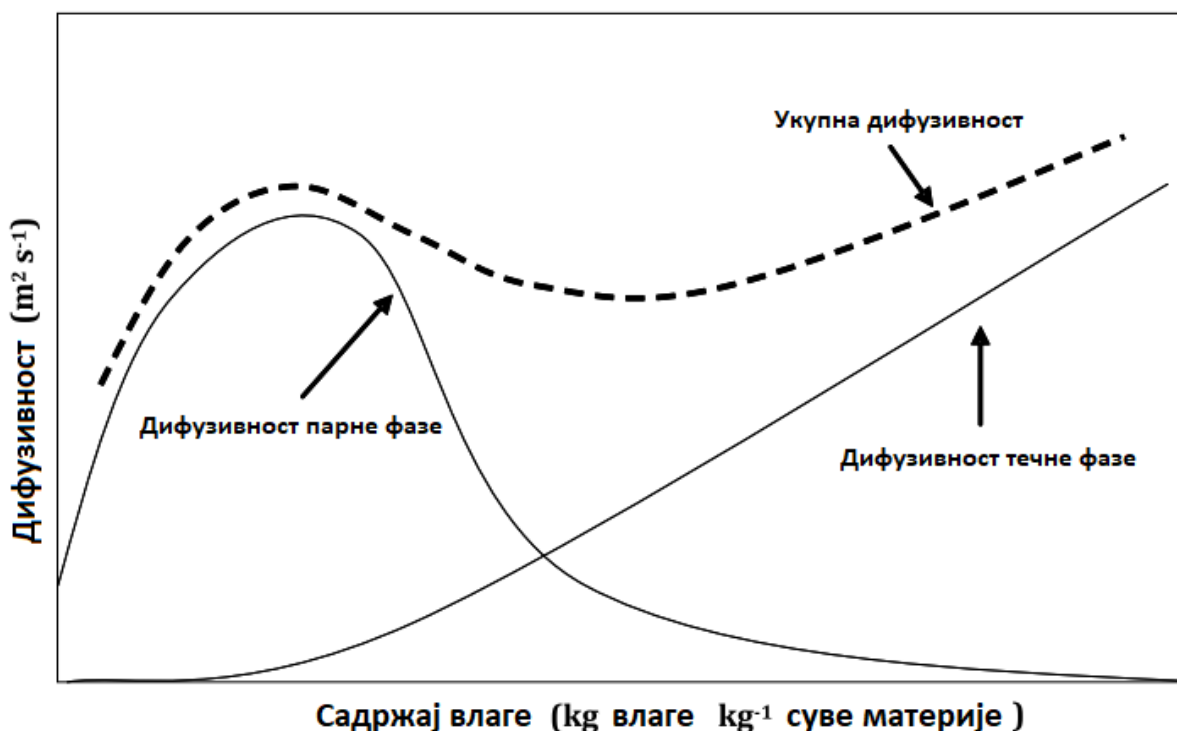
Табела 6.2: Вредности насипне густине тропа нектарине и јабуке (kg/m^3)

	Троп јабуке				Троп нектарине			
	Мерење				Мерење			
	I	II	III	Просек	I	II	III	Просек
Свеж узорак	969	1063	1107	1046	945	998,95	1172	1038
Осушен и самлевен узорак	736,6	/	/	736,6	705,57	/	/	705,57

При испитивању сопственог експерименталног материјала, густина свежег тропа јабуке и нектарине износила је 1046 и 1038kg/m^3 , респективно. Густина свежих узорака знатно варира због нехомогености материјала. Осушени узорци самлевени у прах и просејани, имали су густине $736,6$ и $705,57\text{ kg/m}^3$ за троп јабуке и нектарине.

6.2. ЕФЕКТИВНИ КОЕФИЦИЈЕНТ ДИФУЗИЈЕ ВЛАГЕ

Процес преношења влаге кроз материјал у току сушења је сложен и укључује један или више механизма преношења влаге описаних у Поглављу 3.2, као што су течна дифузија, парна дифузија, површинска дифузија, итд. Ефективни коефицијент дифузије (D_{eff}) дефинише се да би се описала брзина кретања влаге кроз материјал, без обзира на то који је механизам преноса влаге укључен [20], [80]. Због тога се ефективни коефицијент дифузије одређује експериментално коришћењем одређених математичких метода. Модели којима се одређује ефективни коефицијент дифузије се базирају углавном на другом Фиковом закону дифузије, али се користе и други модели, нпр. модели изведени из Њутновог закона хлађења. У овим моделима се ефективни коефицијент дифузије влаге сматра константним, иако то у реалности није тако, већ се мења са садржајем влаге, температуром и координатама у сушеном материјалу. У већини случајева је укупна дифузивност сума дифузивности парне и течне фазе, као што је приказано на Слици 6.2.



Слика 6.2: Промена укупне дифузивности влаге у зависности од садржаја влаге у материјалу [80]

Сушење прехранбених производа, укључујући троп нектарине и јабуке одиграва се у фази опадајуће брзине сушења, што значи да су унутрашњи отпори преношу влаге кроз материјал већег реда величине од отпора преношењу влаге са површине материјала у околни ваздух. Због тога је општеприхваћено да је дифузија влаге кроз материјал контролишући механизам преношења влаге приликом сушења прехранбених производа. Промена бездимензионог садржаја влаге у времену може се изразити једначином (5.8). Уколико се претпостави да је време сушења материјала дуго, једначина (5.8) се може упростити [67], па се добија:

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff} \tau}{4L^2}\right) \quad (6.1)$$

Да би се одредио ефективни коефицијент дифузије, приступа се графо-аналитичком методом. Наиме, конструише се дијаграм $\ln(MR) - \tau$, који представља праву линију. Из нагиба k_0 ове праве се може одредити ефективни коефицијент дифузије:

$$k_0 = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (6.2)$$

При високом садржају влаге у материјалу, течна дифузија је главни механизам преношења влаге, и обрнуто, при нижем садржају влаге у материјалу, парна дифузија постаје доминантан механизам. Дифузивност влаге зависи од врсте материјала, а расте са температуром. Уопштено говорећи, приликом процеса сушења, у највећем броју случајева (око 92%), вредност ефективног коефицијента дифузије влаге креће се у опсегу од 10^{-12} до 10^{-8} m^2/s [80]. За материјале са малом порозношћу вредност D_{eff} је врло блиска вредности дифузије течном течне фазе, док се приликом сушења грануларних и порозних материјала влага преноси углавном парном дифузијом кроз поре и капиларе.

6.3. ЕФЕКТИВНА ТОПЛОТНА ПРОВОДЉИВОСТ

Топлотна проводљивост материјала дефинише се као способност материјала да проводи одређену количину топлоте. Јединица у SI систему му је W/mK. [93]

Топлотна проводљивост прехранбених материјала који имају влакнасту структуру, као што су остаци из производње сокова, често показују анизотропне особине, тј. вредност топлотне проводљивости је разичита у зависности од правца мерења. У прехранбеним материјалима се топлотна проводљивост повећава са повећањем садржаја воде и њена вредност се налази између вредности топлотне проводљивости воде и ваздуха (нпр. на 27°C $\lambda_{\text{воде}} = 0,614 \text{ W/mK}$, а $\lambda_{\text{ваздуха}} = 0,026 \text{ W/mK}$), јер су то две компоненте прехранбених материјала са највећом и најмањом вредношћу топлотне проводљивости, респективно. Због тога су сува порозна тела веома лоши проводници топлоте јер су поре испуњене ваздухом. За порозне материјале, измерена топлотна проводљивост је привидна и назива се *ефективна топлотна проводљивост*. Ова величина узима у обзир провођење топлоте кроз све слојеве и компоненте материјала у мереном правцу.

Термофизичке особине прехранбених материјала зависе од температуре и састава материјала. Познавањем састава материјала (масени или запремински удео) могу се рачунски одредити термофизичке особине. Међутим, овако одређене вредности треба узети са резервом због нехомогености материјала. У већини случајева, топлотна проводљивост и специфични топлотни капацитет прехранбених материјала расту са порастом садржаја воде. Ово се објашњава тиме да вода има много веће вредности топлотне проводљивости и специфичног топлотног капацитета од других састојака хране као што су протеини, масти и угљени хидрати.

Рачунско одређивање топлотне проводљивости

У порозним чврстим материјалима, као што су прехранбени материјали, топлотна проводљивост зависи највише од састава материјала, али такође и од других фактора који утичу на кретање топлотног протока кроз материјал, као што су порозност, облик, величина и распоред шупљина, хомогеност, и др. [93] Да би се одредила топлотна проводљивост остатака из производње сокова јабуке и нектарина, потребно је познавати масене, тј. запреминске уделе сваке компоненте која чини овај материјал. Подаци за масене уделе саставних компоненти дати су у табели 6.3:

Табела 6.3: Масени удели компонената у процентима (по влажној основи) остатака из производње сокова

Компонента \ Материјал	Вода	Угљени хидрати	Протеини	Масти	Пепео	Литературни извор
Троп јабуке	76,3	16,5	3,8	2,6	0,8	[38]
Троп јабуке	72,55	23,89	1,83	0,69	0,69	[95]
Троп брескве	85,2	13,06	0,964	0,37	0,399	[63]

Из табеле се види да највећи део остатака из производње сокова (троп) сачињава влага, док потом следе угљени хидрати и остале компоненте.

Како би се израчунала вредност топлотне проводљивости материјала, морају се установити зависности топлотне проводљивости од температуре за све компоненте материјала. Због тога се користе модели који ефективну топлотну проводљивост рачунају на основу топлотне проводљивости сваке компоненте и удела те компоненте у материјалу. У [93] су дати изрази

за одређивање топлотне проводљивости главних компоненти прехранбених производа у зависности од температуре:

$$\lambda_{\text{вода}} = 0,57109 + 1,7625 \cdot 10^{-3} \cdot t - 6,7036 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 \quad (6.3)$$

$$\lambda_{\text{угљени хидрати}} = 0,20141 + 1,3874 \cdot 10^{-3} \cdot t - 4,3312 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 \quad (6.4)$$

$$\lambda_{\text{протеини}} = 0,17881 + 1,1958 \cdot 10^{-3} \cdot t - 2,7178 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 \quad (6.5)$$

$$\lambda_{\text{масти}} = 0,18071 - 2,7604 \cdot 10^{-3} \cdot t - 1,7749 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 \quad (6.6)$$

$$\lambda_{\text{пепео}} = 0,32961 + 1,4011 \cdot 10^{-3} \cdot t - 2,9069 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 \quad (6.7)$$

Ове релације важе за температурски опсег 0 - 90°C, а температуре t у изразима су дате у °C.

За предвиђање ефективне топлотне проводљивости материјала користи се више модела, као што су Паралелни модел, Серијски модел, Кришеров модел, Maxwell-Eucken модел, као и Корелман модел и други. [93]. У наставку текста ће бити описано пар најбитнијих модела.

Паралелни модел предвиђа да су компоненте постављене паралелно у односу на правац довођења топлотног протока (Слика 6.3). Ефективна топлотна проводљивост прехранбених материјала која се са састоји од n компонената, тј. слојева, може се израчунати помоћу следеће формуле:

$$\lambda_{par} = \sum_{i=0}^n \lambda_i X_i \quad (6.8)$$

$$X_i = \frac{g_i / \rho_i}{\sum_{i=0}^n (g_i / \rho_i)} \quad (6.9)$$

Где λ_i представља топлотну проводљивост i -те компоненте, X_i запремински удео i -те компоненте, g_i масени удео i -те компоненте, а ρ_i густину i -те компоненте.

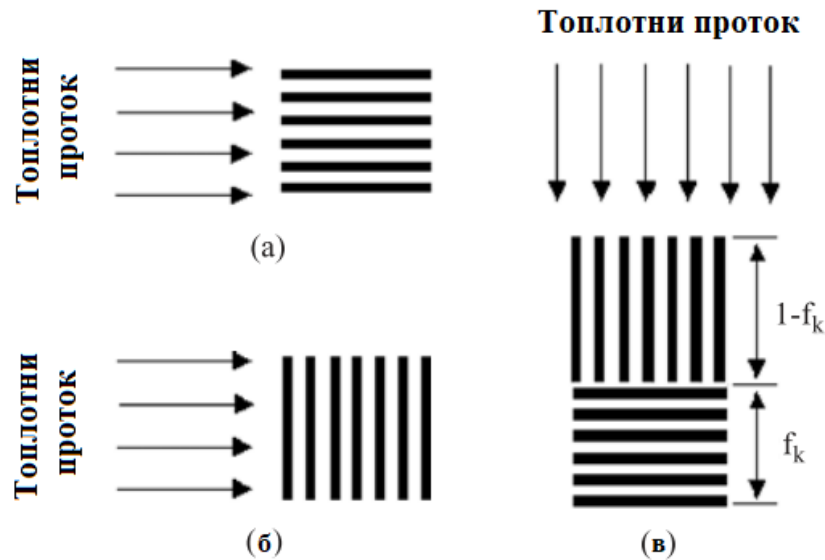
У односу на друге моделе, ефективна топлотна проводљивост израчуната помоћу паралелног модела даје *максималне* вредности. Ефективна топлотна проводљивост прехранбених материјала састављеног од n компонената може бити израчуната коришћењем запреминских удела и топлотне проводљивости сваке компоненте, коришћењем следеће једначине:

$$\lambda_{par} = X_{\text{вода}} \cdot \lambda_{\text{вода}} + X_{\text{у. хидрати}} \cdot \lambda_{\text{у. хидрати}} + X_{\text{протеини}} \cdot \lambda_{\text{протеини}} + X_{\text{масти}} \cdot \lambda_{\text{масти}} + X_{\text{пепео}} \cdot \lambda_{\text{пепео}} \quad (6.10)$$

Где је X запремински удео, који се може одредити из израза:

$$X_i = \frac{\rho \cdot g_i}{\rho_i} \quad (6.11)$$

Где је ρ укупна густина материјала, а ρ_i густина i -те компоненте, а g_i масени удео i -те компоненте.



Слика 6.3: (а) Паралелни модел (б) Серијски модел (в) Кришеров модел [93]

Серијски модел предвиђа да су компоненте постављене нормално у односу на правац довођења топлотног протока (Слика 6.3 б). Ефективна топлотна проводљивост материјала може се израчунати следећом формулом:

$$\frac{1}{\lambda_{ser}} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{\lambda_i} \quad (6.12)$$

Израчунавањем промоћу серијског модела добијају се *минималне* вредности топлотне проводљивости у односу на друге моделе. У случају прехранбених производа, ефективна топлотна проводљивост се може израчунати помоћу израза:

$$\frac{1}{\lambda_{ser}} = \frac{X_{вода}}{\lambda_{вода}} + \frac{X_{у.хидрати}}{\lambda_{у.хидрати}} + \frac{X_{протеини}}{\lambda_{протеини}} + \frac{X_{масти}}{\lambda_{масти}} + \frac{X_{пепео}}{\lambda_{пепео}} \quad (6.13)$$

Кришеров (Krischer) модел

Серијски и паралелни модел не узимају у обзир стварни распоред компонената у материјалу. Због тога, Кришеров модел (Слика 6.3 в) комбинује серијски и паралелни модел коришћењем дистрибуционог фактора f_k , који представља однос заступљености вредности паралелне и серијске ефективне топлотне проводљивости. Може се израчунати следећим изразом:

$$\lambda = \frac{1}{\frac{1-f_k}{\lambda_{par}} + \frac{f_k}{\lambda_{ser}}} \quad (6.14)$$

Мана овог модела је што се дистрибуциони фактор мора одредити експериментално.

Постоје и други изрази за израчунавање ефективне топлотне проводљивости који узимају у разматрање порозност у прехранбеном материјалу, као и утицај латентне топлоте, тј. промене фазе.

6.4. ТОПЛОТНА МОЋ

Количина топлоте која се ослобађа сагоревањем неког горива и која представља однос настале количине топлоте при потпуном сагоревању и јединице количине горива, од које је топлота добијена, назива се топлотна моћ [96].

С обзиром на топлотни ниво продуката сагоревања насталих приликом одређивања топлотне моћи постоје:

- Горња топлота моћ (H_g)
- Доња топлотна моћ (H_d)

Горња топлотна моћ је количина топлоте која се добија потпуним сагоревањем јединице масе горива под следећим условима:

- Угљеник и сумпор из гориве материје налазе се у облику својих диоксида у гасовитом стању, док до оксидације азота није дошло
- Продукти сагоревања доведени су на температуру коју је гориво имало на почетку (20°C)
- Вода, која је у продуктима сагоревања потиче од влаге из горива и од сагорелог водоника, преведена је у течно стање, што је условљено и претходним условом – хлађењем продуката сагоревања до 20°C .

Доња топлотна моћ представља количину топлоте која се ослободи потпуном сагоревањем јединице масе горива под следећим условима:

- Угљеник и сумпор из горива налазе се у облику својих диоксида (CO_2 и SO_2), док до оксидације азота не долази
- Продукти сагоревања доведени су на температуру коју је гориво имало на улазу у процес сагоревања 20°C
- Вода у продуктима сагоревања остаје у парном стању.

За чврста горива топлотна моћ се изражава у MJ/kg.

Веза између горње и доње топлотне моћи се може изразити формулом:

$$H_g = H_d + 25 \cdot (9H + W) \text{ [kJ/kg]} \quad (6.15)$$

Где је H [%] масени проценат водоника у гориву, а W [%] масени проценат влаге у гориву.

7. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА

У циљу верификације постављених теоријских претпоставки, као и постављених једначина модела и добијања релевантних података неопходних за анализу термомеханичких аспеката процеса сушења остатака из производње воћних сокова, осмишљено је и извршено низ експерименталних истраживања спроведених у контролисаним лабораторијским условима. Приликом извођења експеримената вођено је рачуна тачности добијених резултата и величини грешке, али је такође и вођено рачуна о општости добијених резултата и њиховој примени код других сличних система и експеримената.

Експериментална истраживања су извршена у две фазе. Прва фаза је обухватала испитивање кинетике процеса сушења воћног тропа при комбинованом кондуктивно – конвективном довођењу топлотног протока материјалу. Ова фаза експерименталних испитивања урађена је помоћу експерименталне сушаре направљене у ове сврхе, која се налази на Пољопривредном факултету у Београду. Друга фаза, која је обухватала додатна испитивања материјала урађена је помоћу лабораторијске опреме која се налази на Машинском факултету у Београду. За испитни материјал су коришћени остаци јабуке и нектарине из производње сокова фабрике „Нектар“ из Бачке Паланке.

Само приликом прве фазе експерименталних испитивања, извршено је 72 циклуса мерења процеса сушења од којих је сваки трајао у просеку око 22 часа, тј. укупно око 1600 часова испитивања, као и додатна мерења.

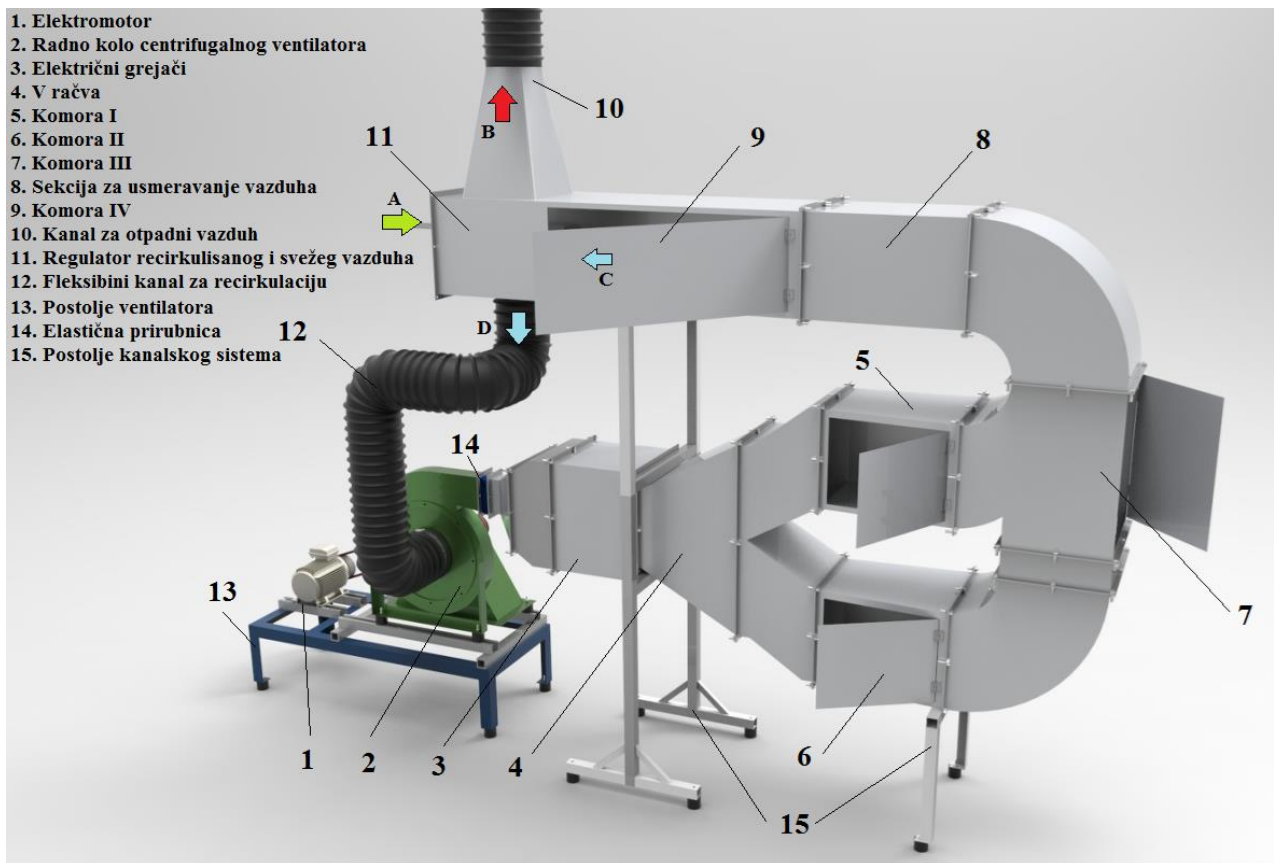
У даљем тексту је дат опис експерименталне сушаре и остале опреме која је коришћена за испитивања, а у следећим поглављима је дат преглед резултата мерења као и анализа остварених резултата.

7.1. ОПИС ЛАБОРАТОРИЈСКЕ ОПРЕМЕ КОРИШЋЕНЕ ПРИ ИСПИТИВАЊИМА

У сврху експерименталних истраживања коришћена је различита опрема, при чему се Експериментална сушара описана у Поглављу 7.1.1. налази на Пољопривредном факултету у Земуну, док се остала опрема налази на Машинском факултету у Београду.

7.1.1. ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛНЕ ЛАБОРАТОРИЈСКЕ СУШАРЕ

Имајући у виду комплексност експерименталног истраживања, као и потребу за будућим истраживањима у области сушења прехранбених производа, осмишљена је и изведена експериментална инсталација – сушара, која подржава кондуктивно, конвективно сушење, као и сушење у флуидизованом слоју материјала. Експериментална сушара се налази на Пољопривредном факултету у Београду и приказана је на слици 7.1.



Слика 7.1: Експериментална инсталација - сушара

Сушара се састоји од следећих секција:

- Центрифугални вентилатор са електромотором
- Секција електрогрејача
- Каналски систем са коморама
- Регулатор рециркулисаног и свежег ваздуха

Радно коло центрифугалног вентилатора (2) је каишним преносом (преносни однос 1:1) повезано са вратилом електромотора (1) и смештено на засебно постоље (13) које се, због смањења преношења вибрација, на под ослања преко гумено-металних амортизера. Из истог разлога је ова секција са остатком система сушаре повезана, са једне стране флексибилним цревом (12) а са друге флексибилном врећастом спојницом (14). Електрични грејачи (3) су извор топлоте за загревање ваздуха који струји преко сушеног материјала. Секција грејача се налази непосредно иза вентилатора, на почетку каналског система. На грејачку секцију се надовезује „V“-рачва (4) каналског система којом се ваздух усмерава у једну од комора за сушење - I (5), односно коморе II (6), III (7) или IV (9). Секцијом за усмеравање ваздуха (8) се постиже униформно струјно поље пре уласка ваздуха у комору IV (9). Регулатором (11) се регулишу односи количина рециркулисаног и свежег ваздуха. Отпадни ваздух се избацује кроз канал за отпадни ваздух (10). Каналски систем сушаре је израђен од поцинкованих лимених канала спајаних прирубницама, који су смештени на вертикалним носачима (15). Носачи се преко еластичних гумених подлошки ослањају на тло чиме се значајно умањује преношење вибрација система у просторију.

Да би се испитале топлотне карактеристике сушаре, урађена је анализа топлотних губитака сушаре, а резултати су приказани у раду [97].

Систем за рецикулацију служи за подешавање жељене количине рециркулисаног, односно свежег ваздуха који улази у сушару и доспева до сушеног материјала, чиме се може постићи уштеда енергије за сушење [98].

Коморе за сушење

Конструкцијом лабораторијске сушаре предвиђен је простор за четири коморе за сушење:

- Комора I (5): Кондуктивно-конвективно сушење
- Комора II (6): Кондуктивно-конвективно сушење
- Комора III (7): Конвективно сушење у флуидизованом слоју
- Комора IV (9): Конвективно сушење у танком слоју

Коморе I (5) и II (6) намењене су за комбиновано кондуктивно-конвективно сушење са могућношћу да се адаптирају и на другачији начин. Ваздух преко материјала струји у хоризонталном правцу. Секција са V-рачвом (4) поседује преграду којим се ваздух усмерава ка I или II комори, а закретање преграде се изводи ручно (два положаја, горњи и доњи). Комора III (7) је намењена за конвективно сушење материјала у флуидизованом слоју, при чему се ваздух доводи одоздо (кроз огранак коморе II која у том случају није у функцији). Комора IV (9) је намењена за конвективно сушење у танком слоју (на лесама). Пре уласка у комору IV (9), ваздух се усмерава у секцији (8) чиме се постиже униформност струјног поља.

Систем управљања

Управљање радом лабораторијске сушаре и постизање жељених параметара сушења, постиже се на следеће начине:

1. Регулација брзине струјања ваздуха

Брзина струјања ваздуха, преко материјала који се суши, подешава се помоћу фреквентног регулатора електромотора вентилатора. Подешавањем броја обртаја електромотора утиче се на брзину обртања радног кола центрифугалног вентилатора, а самим тим и на проток ваздуха кроз систем.

2. Регулација температуре ваздуха

Температура ваздуха који доспева на материјал регулише се PID терморегулатором који управља радом електрогрејача по принципу укључено/искључено. Регулатору се задаје жељена температура.

3. Регулација количине рециркулисаног ваздуха.

Регулација количине рециркулисаног ваздуха изводи се регулатором који је вођен сигналом са сонде за релативну влажност ваздуха смештене испред коморе. Жељена вредност релативне влажности задаје се микроконтролору који управља радом регулатора са тачношћу од $\pm 2.5\%$ релативне влажности.

Технички подаци

Основни технички подаци експерименталне сушаре приказани су у табели 7.1.

Табела 7.1: Основне карактеристике експерименталне инсталације - сушаре

Параметар сушења	Јединица	Мерни опсег	Тачност
Температура подлоге за кондуктивно сушење	°C	0 ÷ 90	± 0.1
Температура ваздуха	°C		
Брзина струјања ваздуха	m/s	0 ÷ 20	± 0.01
Релативна влажност ваздуха	%	5 ÷ 60	± 2.4
Маса материјала	g	0 ÷ 5000	± 0.01

Експериментална сушара је смештена у просторијама лабораторије за термотехничка и струјно-техничка мерења Института за пољопривредну технику, Пољопривредног факултета Универзитета у Београду (Слика 7.2 и Слика 7.3).



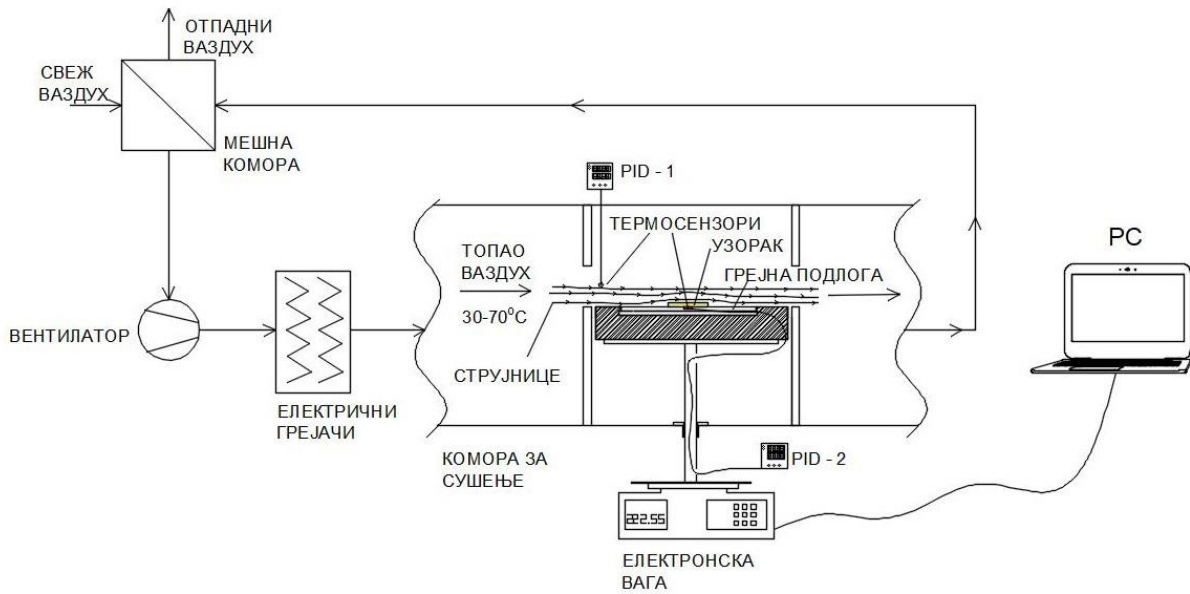
Слика 7.2: Лабораторијска сушара (управљачка јединица и електромотор са центрифугалним вентилатором)



Слика 7.3: Лабораторијска сушара (Коморе за сушење)

Опис коморе коришћене за експериментална испитивања са кондуктивно-конвективним довођењем топлотног протока материјалу

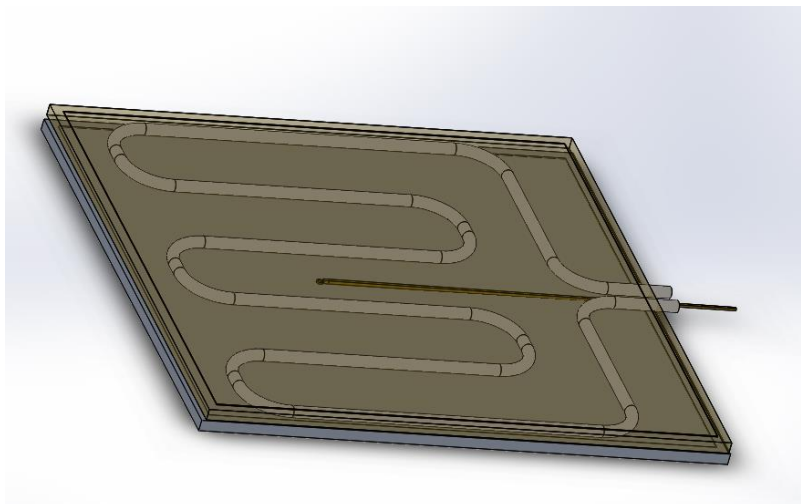
Експериментална сушара има могућност сушења прехранбених производа са комбинованим кондуктивно-конвективним довођењем топлотног протока материјалу. Комора у којој су се вршила експериментална истраживања састоји се од грејне подлоге повезане на PID терморегулатор на коју се поставља материјал који се суши (Слика 7.4). Материјал је у додиру са грејном подлогом са доње стране, чиме се омогућава кондуктивни пренос топлоте на материјал. Са горње стране, тј. преко материјала, струји топао ваздух који се загрева системом грејача, а температура ваздуха се регулише терморегулатором који је повезан на електричне грејаче. Топао ваздух који струји преко материјала има функцију загревања материјала, као и уклањања влаге са површине материјала. Са бочних страна, грејна плоча и посуда су изоловане термоизолацијом. Влажан материјал који се суши, посуда у којој се налази, као и грејна подлога са изолацијом се преко круте конструкције ослањају на дигиталну вагу. Крута конструкција се састоји из држача посуде, круте термостабилне шипке и постоља. Да би се избегле грешке мерења услед вибрација сушаре, између шипке носеће конструкције и зида канала остављен је зазор чије су димензије такве да се истицање ваздуха из коморе на том месту може занемарити.



Слика 7.4 : Комора за сушење

Опис грејне подлоге

Грејна подлога се састоји из два лима димензија 320x324mm, дебљине 1mm између којих се налази електрични грејач снаге 600W (Слика 7.5). Термосонда NTC-10K M4 је прислоњена на горњи лим и очитава температуру површине грејне плоче тачно на месту на ком се поставља сушени узорак. Овом методом се може директно мерити доња површина узорка. Термосонда је добро изолована термостабилним силиконом и каменом вуном, да не би трпела утицај грејача. Температура на површини грејне плоче се одржава константном помоћу терморегулатора који контролише рад електричног грејача грејне подлоге.



Слика 7.5: Грејна подлога

7.1.2. ОСТАЛА КОРИШЋЕНА ЛАБОРАТОРИЈСКА ОПРЕМА

Поред експеримената који су вршени на лабораторијској сушари, описаној у Поглављу 7.1.1, урађено је још низ испитивања користећи се опремом Лабораторије за сагоревање на Машинском факултету у Београду. Ова опрема укључује уређај за термогравиметријску анализу, уређај за испитивање топлотне проводљивости материјала, лабораторијску сушницу, опрему за мерење и аквизицију температуре, као и уређај за одређивање топлотне моћи материјала.

Уређај за симултану термалну анализу NETZSCH STA449F5 Jupiter® спрегнут са масеним спектрометром NETZSCH QMS403D Aeolos приказан је на Слици 7.6. Опсег радне температуре уређаја NETZSCH STA449F5 Jupiter® креће се од собне температуре до 1600°C. Брзина загревања може да се регулише у опсегу од 0,001 до 50 K/min. Осетљивост температурског сензора износи 0,001 K. Осетљивост ваге износи 0,1 µg, док је грешка ваге мања од 5 µg/h. Максимална маса узорка која се може поставити у уређај износи 35 g. Уређај се користи за симултану термалну анализу, динамичка и изотермална испитивања.



Слика 7.6.: Уређај NETZSCH STA449F5 Jupiter® за симултану термалну анализу материјала

Уређај за испитивање топлотне проводљивости и ефузивности материјала TCi Thermal Conductivity Analyzer произвођача C-Therm мери топлотну проводљивост и ефузивност по тзв. MTPS (Modified Transient Plane Source) принципу, који подразумева мерење разлике температуре на површини испитиваног материјала при довођењу константног топлотног протока. На основу измерене разлике температуре, уређај софтверски прерачунава вредност топлотне проводљивости и ефузивности. Уређај се користи за мерење топлотне проводљивости чврстих тела, течности, прахова и паста и има могућност рада у различитим атмосферама. Уређај се састоји из сонде на коју се постављају узорци, и кућишта. Изглед уређаја је приказан на слици 7.7.



Слика 7.7 TCi уређај за испитивање топлотне проводљивости и ефузивности материјала

Лабораторијска пећ произвођача Elektron, Бања Ковиљача, тип SU-4000 са терморегулатором тип Nigos 1011V са могућношћу регулације температуре ваздуха у сушари, користи се за сушење узорака при константној температури. Радни опсег уређаја је од 20-300°C. Лабораторијска пећ је приказана на Слици 7.8



Слика 7.8: Лабораторијска пећ SU-4000 са терморегулацијом

Опрема за мерење температуре површине материјала подразумева уређај Testo 400 са сондом за мерење температуре, радног опсега -20 - 200°C. Уређај са сондом се може користити за одређивање контактних температура материјала. Изглед уређаја приказан је на Слици 7.9.



Слика 7.9: Уређај за мерење температуре Testo 400 са температурском сондом

Уређај за одређивање топлотне моћи – калориметар тип С200 произвођача ИКА® је калориметар са бомбом. Служи за одређивање топлотне моћи чврстих и течних горива сагоревањем при константној запремини. На слици 7.10 је приказан изглед уређаја.

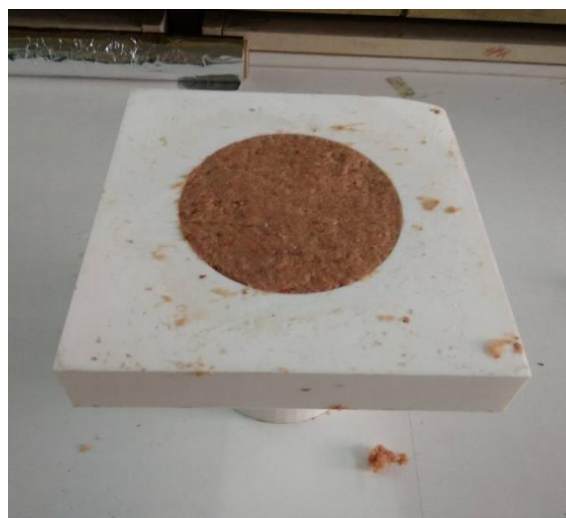


Слика 7.10: Калориметар са бомбом ИКА® С200

7.2. ОПИС ПРИПРЕМЕ УЗОРАКА ЗА ИСПИТИВАЊА

Као експериментални материјал је одабран воћни троп, тј. остатак који настаје као остатак после цеђења воћних сокова. Троп нектарине и јабуке је набављен из фабрике сокова „Нектар“ из Бачке Паланке, која је највећи домаћи произвођач воћних сокова. Свеж троп нектарине је транспортован до лабораторије, где је материјал до употребе био складиштен у замрзивачу на -21°C .

Процедура припреме материјала за испитивање кинетике сушења које је вршено у експерименталној сушари је била следећа: За обликовање узорака направљена је на Машинском факултету специјална модла од пластике помоћу 3D штампача (Слика 7.11). Узорци облика диска пречника 100mm и дебљине 5, 7 и 10mm и средње масе 45,4, 56,8 и 82,5g обликовани су помоћу модле и стављани у посебне пластичне кесе, вакумиране, и до коришћења у експериментима одложене у замрзивач. На овај начин је сачувана почетна влажност материјала. Влажност узорака је периодично контролисана током вршења експеримената, и закључено је да складиштење материјала у замрзивачу не утиче на губитак влаге.



Слика 7.11: Припрема узорака за испитивање кинетике сушења

За испитивање топлотне проводљивости и мерење температуре површине материјала у току изотермског сушења узорци су припремљени на следећи начин: Свеж троп јабуке и нектарине је обликован у цилиндричне узорке приближних димензија пречника 30mm и висине 20mm, као што је приказано на слици 7.12.



Слика 7.12: Изглед узорака за испитивање топлотне проводљивости и мерење температуре површине материјала

За одређивање топлотне моћи, као и за термогравиметријску анализу узорци су припремљени на следећи начин: Осушен троп нектарине и јабуке самлевен је у прах, затим просејан кроз сито и запакован у вакуумске кесе до употребе у експерименту. Изглед узорака приказан је на слици 7.13.



Слика 7.13: Припрема узорака за испитивање топлотне моћи

7.3. МЕТОДОЛОГИЈА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ИСПИТИВАЊА

Експериментална истраживања су подељена у две групе и вршена на две локације. Прва група испитивања подразумевала је испитивања узорака на макроскопском нивоу, са узорцима масе између 5 и 90 g чији је циљ био одређивање термомеханичких карактеристика материјала и кинетике при реалним условима који се одигравају у току процеса сушења. У ове сврхе коришћена је посебно конструисана и изведена експериментална сушара која се налази на Пољопривредном факултету у Земуну. На овој инсталацији је испитивана кинетика процеса сушења при комбинованом кондуктивно-конвективном довођењу топлотног протока материјалу и потрошња енергије за сушење. Друга група испитивања обухвата испитивање фундаменталних и термомеханичких особина материјала, која су вршена на Машинском факултету у Београду. Одређивање кинетике сушења на микроскопском нивоу са узорцима масе између 10 и 50 mg вршено је на уређају за термогравиметријску анализу NETZSCH STA449F5 Jupiter® и масеном спектрометру NETZSCH QMS403D Aeolos. Одређивање топлотне проводљивости материјала вршена је помоћу TCi уређаја. Мерење температуре површине материјала у току процеса сушења вршено је помоћу лабораторјске сушаре SU-4000 и уређаја за мерење температуре Testo 400 са температурском сондом. Мерење горње топлотне моћи извршено је помоћу уређаја IKA® C200.

7.3.1. ИСПИТИВАЊЕ КИНЕТИКЕ ПРОЦЕСА СУШЕЊА ВОЋНОГ ТРОПА У ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОЈ СУШАРИ

За испитивање кинетике процеса сушења остатака из производње сокова, извршена је серија испитивања у експерименталној лабораторијској сушари описаној у Поглављу 7.1.1. Узорци свежег воћног тропа нектарине и јабуке сушени су топлим ваздухом са конвективним довођењем топлотног протока материјалу, као и комбинованом методом коришћењем грејне подлоге, при чему је топлотни проток материјалу довођен истовремено конвективно топлим ваздухом и кондуктивно преко грејне подлоге.

У току експеримената су варирани параметри сушења, као што су температура ваздуха, температура грејне подлоге и дебљина узорака. Сваки експеримент подразумевао је мерење промене масе узорка одређене дебљине у току времена трајања експеримента, као и праћење битних параметара процеса сушења (као што су релативна влажност и температура ваздуха) при сталним параметрима сушења (температура грејне подлоге и температура ваздуха).

Експерименти су обележени трочланом ознаком типа КДхх-КВхх-Д где „КД“ означава кондуктивно довођење топлотног протока материјалу при температури грејне подлоге (хх) изражену у °С, „КВ“ означава конвективно довођење топлотног протока материјалу при температури ваздуха (хх) изражену у °С и „Д“ дебљину узорка изражену у mm. Тако на пример, режим КВ30-10 означава експеримент при коме је узорак дебљине 10 mm сушен конвективно ваздухом температуре 30 °С, без употребе грејне подлоге, а режим КД70-КВ30-5 означава експеримент при коме је узорак дебљине 5 mm сушен конвективно ваздухом температуре 30 °С и кондуктивно грејном подлогом температуре 70 °С.

Укупан број урађених експеримената је био 72, од чега је 48 извршено на тропу нектарине, а 24 на тропу јабуке, као што је приказано у Табели 7.2. Узимајући у обзир припрему, као и време трајања експеримената (у просеку сваки експеримент је трајао око 22 часа), уложен је велики напор за прикупљање, систематизацију и анализу података експерименталног

истраживања. Не рачунајући време потребно за набавку делова и израду инсталације, у испитивање је уложено око 1600 часова рада.

Табела 7.2: Приказ експерименталних параметара при испитивању кинетике сушења тропа нектарине и јабуке

Ознака експеримента	Параметри сушења		Троп нектарине			Троп јабуке		
	Температура грејне површи	Температура ваздуха	Дебљина узоракa [mm]					
			5	7	10	5	7	10
E1	/	30	+	+	+	+	+	+
E2	/	40	+	+	+	-	-	-
E3	/	50	+	+	+	+	+	+
E4	/	60	+	+	+	-	-	-
E5	/	70	+	+	+	-	-	-
E6	50	30	+	+	+	+	+	+
E7	50	40	+	+	+	-	-	-
E8	50	50	+	+	+	+	+	+
E9	60	30	+	+	+	+	+	+
E10	60	40	+	+	+	-	-	-
E11	60	50	+	+	+	+	+	+
E12	60	60	+	+	+	-	-	-
E13	70	30	+	+	+	+	+	+
E14	70	40	+	+	+	-	-	-
E15	70	50	+	+	+	+	+	+
E16	70	70	+	+	+	-	-	-

Да би се при кондуктивно-конвективном сушењу осигурао контакт, тј. пријањање материјала на подлогу, челична мрежица познате и непромењиве масе постављена је на узорак у току сваког мерења. Густина мрежице је таква да не ремети струјање, као и да не утиче на издвајање влаге са површине материјала (Слика 7.14).



Слика 7.14: Осигуравање пријањања узорка на грејну подлогу коришћењем челичне мрежица

Такође, челична мрежица има још једну улогу, а то је да спречи неконтролисану промену облика материјала у току сушења. Воћни троп има особину да мења облик у току процеса сушења.

7.3.2. МЕРЕЊЕ ПОТРОШЊЕ ЕНЕРГИЈЕ ЗА СУШЕЊЕ

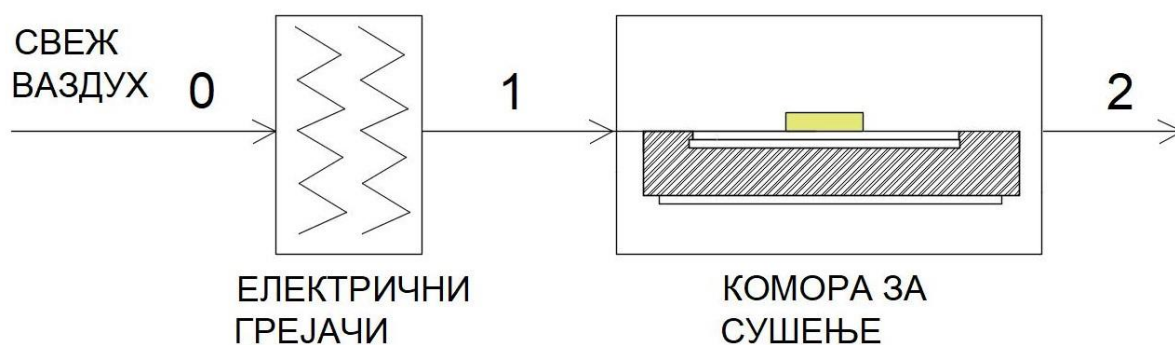
У току процеса сушења у експерименталној сушари, описаној у Поглављу 7.1.1, вршено је мерење потрошње електричне енергије са грејача за ваздух, као и са грејне подлоге. Потрошња

електричне енергије са грејача ваздуха је мерена при задатој температури ваздуха на улазу у сушну комору у распону од 30 до 70°C са кораком 10 °C, при чему је свеж ваздух константне улазне температуре усисаван из просторије. У току експеримента где је коришћена грејна подлога, температура подлоге у контакту са узорком била је подешена на 50, 60 или 70 °C.

Мерење потрошње електричне енергије са грејача за ваздух

Мерење потрошње енергије са грејача вршено је дигиталним мерачем потрошње “Prosto PM001”, произвођача Ningbo Huading Electric Appliance Co., Ltd. Бележена је укупна (кумулативна) потрошња енергије у току времена сушења са грејача за ваздух.

На Слици 7.15 приказана је шема сушења узорака у експерименталној сушари, при чему су бројевима 0,1 и 2 обележена стања свежег ваздуха на улазу у сушару, стање ваздуха после загревања у секцији грејача и стање ваздуха по напуштању коморе за сушење, следствено.



Слика 7.15: Шематски приказ експерименталне инсталације и стања ваздуха у току процеса сушења

Циљ експеримента је био да се одреди специфична потрошња енергије потребна за сушење воћног тропа, тј. утрошену енергију у току процеса сушења сведену на масу издвоје влаге из материјала.

Из материјалног и топлотног биланса идеализоване адијабатске сушаре, може се извести количина топлоте потребна за издвајање 1kg влаге из материјала топлим ваздухом [99]:

$$q_{teor.} = \frac{h_1 - h_0}{x_2 - x_1} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}_w} \right] \quad (7.1)$$

, где су h_0 и h_1 енталпије влажног ваздуха на улазу и излазу из секције грејача респективно, а x_2 и x_1 апсолутне влажности влажног ваздуха на излазу, односно улазу у комору за сушење. Енталпија влажног ваздуха дефинише се као:

$$h = 1,006 \cdot t + x \cdot (1,86 \cdot t + 2500) \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{sv}} \right] \quad (7.2)$$

Апсолутна влажност влажног ваздуха сведена на 1kg сувог ваздуха дефинише се:

$$x = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_s}{p - \varphi \cdot p_s} \left[\frac{\text{kg}_w}{\text{kg}_{sv}} \right] \quad (7.3)$$

, где је φ релативна влажност ваздуха, p_s парцијални притисак сатурације водене паре на датој температури, а p укупни притисак ваздуха.

Маса сувог ваздуха \dot{m}_{sv} на улазу у комору сушаре дефинисана је изразом:

$$\dot{m}_{sv} = \frac{\dot{m}_{v.v.}}{(1 + x_1)} \quad (7.4)$$

Стање ваздуха на улазу у комору сушаре зависи од експерименталних услова. Брзина ваздуха за сваки експеримент била је константна и износила $v = 1,5$ m/s, а површина отвора на улазу у комору износи $A_0 = 0,0102\text{m}^2$. Запремински проток је, стога, за све режиме износио $\dot{V} = 0,0153$ m³/s. За температуре ваздуха од 30 до 70°C израчунате су остале физичке карактеристике влажног ваздуха на улазу у комору и резултат је дат у Табели 7.3.

Табела 7.3.: Стање свежег ваздуха (0) и ваздуха на улазу у комору за сушење (1)

	0	1				
Температура [°C]	22	30	40	50	60	70
Релативна влажност [%]	35	21,8	12,5	7,5	4,6	3
Густина влажног ваздуха [kg _{vv} /m ³]	1,1762	1,1453	1,1086	1,0743	1,0420	1,0116
Масени проток влажног ваздуха [kg _{vv} /s]	0,0180	0,0175	0,0170	0,0164	0,0159	0,0155
Масени проток сувог ваздуха [kg _{sv} /s]	0,0179	0,0174	0,0169	0,0163	0,0158	0,0154
Апсолутна влажност [kg _w /kg _{sv}]	0,00573					
Енталпија влажног ваздуха [kJ/kg _{sv}]	36,91	45,04	55,16	65,38	75,40	85,88
Разлика енталпија пре и после загревања [kJ/kg _{sv}]	/	8,13	18,25	28,47	38,5	48,97

Стање ваздуха на излазу из сушаре одређено је на основу мерења промене масе узорка у току процеса сушења. Ваздух у комори за сушење прима влагу из узорка чиме му се повећава засићеност влагом, па стање ваздуха на излазу из коморе (стање 2 на Слици 7.14) има већу вредност апсолутне влажности од стања на улазу у комору (стање 1, $x_1 = 0,00573$ kg_w/kg_{sv}). Просечна апсолутна влажност ваздуха у току трајања експеримента у стању 2, на излазу из коморе, може се израчунати помоћу формуле:

$$x_2 = x_1 + \frac{m_w}{\tau \cdot \dot{m}_{sv}} \left[\frac{\text{kg}_w}{\text{kg}_{sv}} \right] \quad (7.5)$$

где је m_w маса воде издвојена у току сушења из материјала, а τ време сушења. Вредности издвојене воде у току сваког експеримента и просечне апсолутне влажности на излазу коморе за сушење дати су у Прилогу 12.3.

Да би резултати могли да се пореде са резултатима других аутора, потрошњу енергије треба свести на специфичну потрошњу енергије по килограму издвојене воде из материјала. Специфична потрошња енергије се дефинише као утрошена количина енергије за сушење подељена масом издвојене воде у току сваког експеримента:

$$q_v = \frac{Q_{v,eksp}}{m_{w,eksp}} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}_w} \right] \quad (7.6)$$

Мерење потрошње електричне енергије са грејне подлоге

Мерење потрошње електричне енергије са грејне подлоге вршено је дигиталним мерачем потрошње “Prosto PM001”, произвођача Ningbo Huading Electric Appliance Co., Ltd. У грејну

подлогу је уграђен грејач снаге 600W, али због прецизнијег подешавања температуре, снага је варијаком оборена на 130W.

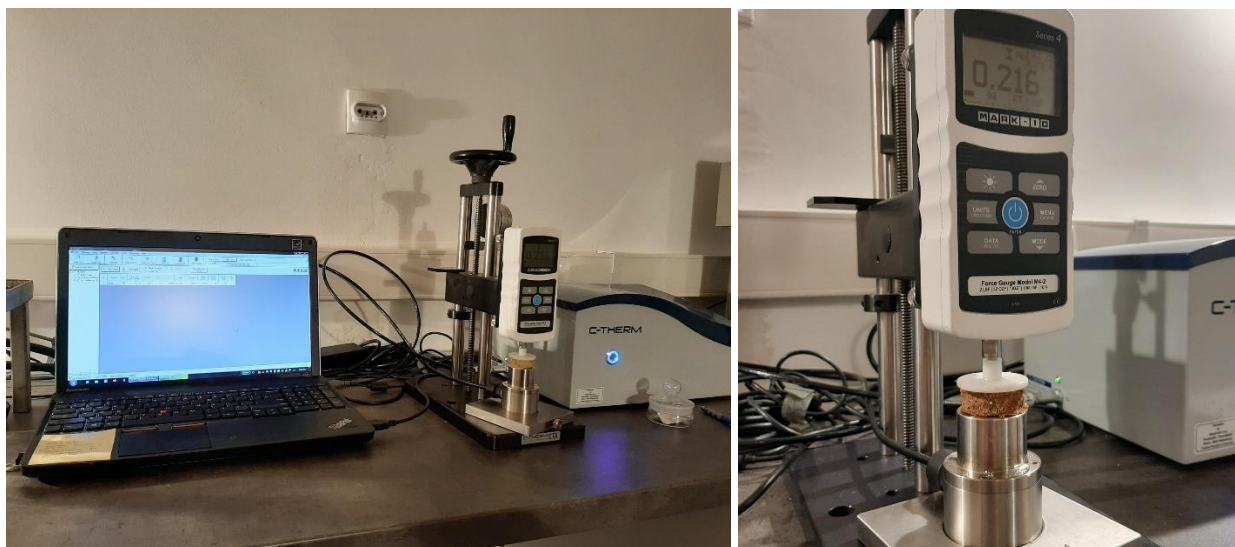
Мерена је кумулативна потрошња енергије са грејне подлоге у току експеримената. Специфична потрошња енергије са грејне подлоге добија се за сваки експеримент када се укупна утрошена енергија у току процеса сушења подели масом издвојене влаге, тј.

$$\dot{q}_{gp} = \frac{Q_{gp}}{m_{w,eksp}} \quad (7.7)$$

Резултати мерења потрошње енергије дати су у Поглављу 8.6.

7.3.3. МЕРЕЊЕ ТОПЛОТНЕ ПРОВОДЉИВОСТИ МАТЕРИЈАЛА

Топлотна проводљивост урорака тропа нектарине и јабуке мерена је уређајем TSi Thermal Conductivity Analyzer, описаног у поглављу 7.1.2. Као што је приказано на Слици 7.16, на сонду се поставља испитивани материјал, а затим се вредност топлотне проводљивости бележи и читава на рачунару. Да би се осигурао исти притисак материјала на мерну сонду у току сваког експеримента, коришћен је уређај за мерење силе Mark-10 M4-2 Force Gauge.



Слика 7.16: Поступак испитивања топлотне проводљивости воћног тропа

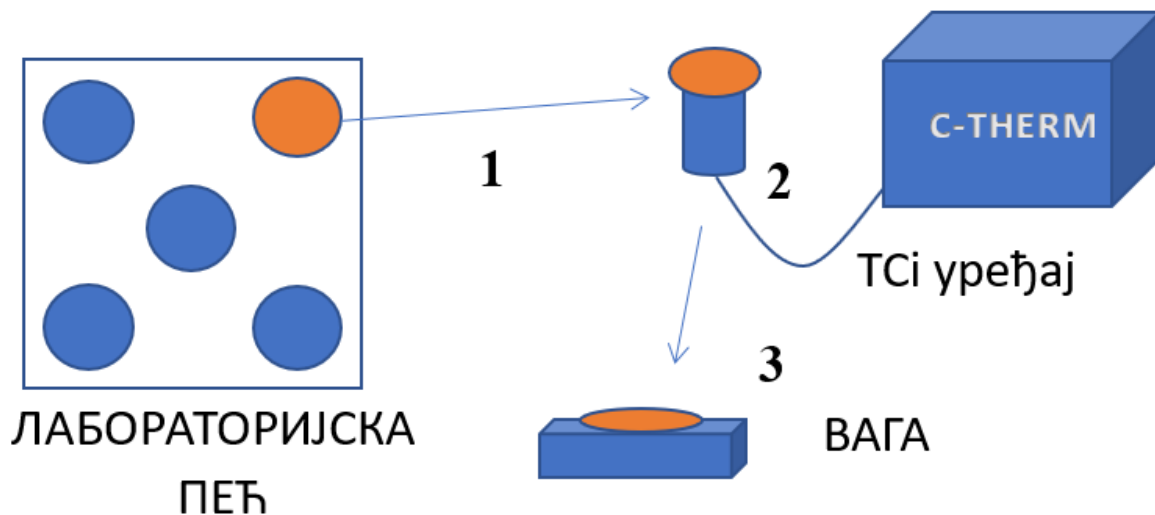
Експеримент је осмишљен тако да се испита промена топлотне проводљивости материјала у зависности од садржаја влаге и температуре материјала.

Урађено је укупно 8 серија експеримената, а број мерења је био између 5 и 8 (Табела 7.4). Узорци су постављани на фолију и затим убацивани у лабораторијску пећ (описану у Поглављу 7.1.2) на задату температуру ваздуха за сушење која је износила 50, 70 и 90°C. На одређен временски интервал, који је био 75 минута за сушење температуром 90°C, односно 90 минута за сушење температуром 50 и 70°C, вађен је по један узорак и мерена му је вредност топлотне проводљивости од почетне до амбијенталне температуре на доњој површини, оној која је била на фолији, као и на горњој површини узорка, која је била у директном контакту са топлим ваздухом у сушари (Слика 7.17). Тиме је урађено укупно осам серија експеримената за испитивање топлотне проводљивости, 6 серија на доњој и 2 серије на горњој површини материјала. Свака серија експеримената је трајала између 6 и 8 часова.

Табела 7.4: Број мерења узорака за сваки режим експеримента

	Троп јабуке		Троп нектарине	
	Површина узорка која је испитивана			
Температура	Доња	Горња	Доња	Горња
50	5	5	5	5
70	5	-	5	-
90	8	-	6	-

Циљ експеримента је био да се испитају термофизичке особине материјала при условима који су приближни условима при испитивању кинетике сушења у експерименталној лабораторијској инсталацији.



- Слика 7.17: Шема експеримента за мерење топлотне проводљивости воћног тропа: 1
- Узорци се у одређеном временском интервалу ваде из сушнице 1
 - 2 - Мери се топлотна проводљивост узорака од почетне до амбијенталне температуре 3
 - Мери се крајња маса узорака 3

Резултати испитивања дати су у Поглављу 8.8.

7.3.4. МЕРЕЊЕ ТЕМПЕРАТУРЕ ПОВРШИНЕ МАТЕРИЈАЛА У ТОКУ ПРОЦЕСА СУШЕЊА

Мерење температуре површине узорака материјала извршено је помоћу уређаја Testo 400 са термосондом, описаног у Поглављу 7.1.2.

Мерена је температура површине воћног остатка (тропа) у току процеса сушења у лабораторијској пећи описаној у Поглављу 7.1.2, при чему су свежи узорци постављани на фолију, тако да им је једна страна у контакту са топлим ваздухом у пећи, док је доња страна која је на фолији, постављена на лесе пећи. Тиме се постижу приближно слични услови као код испитивања кинетике сушења у експерименталној сушари. Мерење температуре површина узорака вршено је приликом сушења на температурама од 50, 70 и 90°C. Урађено је укупно 12 серија експеримената, са бројем мерења од 3 до 5 (Табела 7.5). На почетку сваке серије узорци су стављани у лабораторијску пећ, а затим је на одређен временски интервал, који је био 75 минута за сушење температуром 90°C, односно 90 минута за сушење температуром 50 и 70°C, по један узорак вађен и директно по вађењу мерена му температура

површине у току 5 минута и маса. У по 6 серија је мерена температура доње и горње површине материјала.

Табела 7.5: Број мерења узорака за сваки режим експеримента

Температура	Троп јабуке		Троп нектарине	
	Површина узорка која је испитивана			
	Доња	Горња	Доња	Горња
50	5	5	4	4
70	3	2	3	2
90	3	5	5	5

7.3.5. МЕРЕЊЕ ИЗДВАЈАЊА ВЛАГЕ ИЗ МАТЕРИЈАЛА ПРИ ИЗОТЕРМСКОМ СУШЕЊУ

У лабораторијској пећи, описаној у Поглављу 7.1.2, мерена је промена масе узорака тропа нектарине и јабуке током изотермског сушења. Мерења су вршена у две серије – прва серија је подразумевала испитивање свежих узорака тропа нектарине и јабуке, а друга осушених узорака. Испитивања су вршена на температурама ваздуха између 70 и 180°C. После сушења, узорци су вађени и пуштани да се охладе на собну температуру. Маса узорака је потом мерена на собној температури да би се установила разлика маса на почетку и крају процеса сушења. Свежи узорци нектарине и јабуке били су цилиндричног облика, сваки масе око 25g, док су суви узорци били у виду праха и њихова маса је износила око 5g. Циљ експеримента је било одредити количину издвојене влаге из свежих и сувих узорака током изотермског сушења у истом временском периоду од 2 часа, и затим пронаћи функционалну зависност између температуре сушења и количине издвојене влаге.

7.3.6. МЕРЕЊЕ ТОПЛОТНЕ МОЋИ ВОЋНОГ ТРОПА

За експериментално одређивање топлотне моћи користе се специјални уређаји – калориметри. Топлотна моћ осушеног праха тропа јабуке и нектарине одређена је калориметром са бомбом ИКА С200, описаном у Поглављу 7.1.2.

Одређивање топлотне моћи горива при константној запремини на температури 25°C у калориметру са бомбом врши се у складу са одредбама стандардна ISO 1928 „Чврста минерална горива – Одређивање горње топлотне моћи применом калориметра са бомбом и израчунавање доње топлотне моћи“.

7.3.7. ТЕРМОГРАВИМЕТРИЈСКА АНАЛИЗА

Термогравиметријском анализом (Thermogravimetric Analysis – TGA) одређују се термомеханичке карактеристике испитиваног материјала при промени масе материјала у току времена. Промена масе узорка мери се вагом високе осетљивости (до 10^{-7} g), а сами узорци су

маса од неколико милиграма до највише неколико десетина грама. Мала маса узорка омогућава испитивање фундаменталних карактеристика материјала елиминишући при томе утицај геометрије и начин довођења топлотног протока. TGA уређај поседује могућност одређивања термомеханичких карактеристика материјала при постепеном повећању температуре, чиме се могу одредити карактеристичне промене физичких и хемијских особина материјала на одређеним температурама. Резултати анализе се могу представити помоћу дијаграма промене масе материјала у времену или у зависности од температуре.

Диференцијална термална анализа (Differential Thermal Analysis – DTA) заснива се на мерењу разлике температуре посуде са узорком и празне посуде без узорка, у току мерења при истим експерименталним условима. На овај начин се добијају подаци о одвијању хемијских реакција или фазних прелаза у материјалу, па се нпш. може установити да ли у току термалне разградње долази до ендотермне или екзотермне хемијске реакције.

Симултана термална анализа (Simultaneous Thermal Analysis – STA) представља комбинацију метода TGA и DTA. Овом комбинованом методом се омогућава истовремено мерење промене масе узорка, као и праћење промене физичких и хемијских карактеристика испитиваног материјала.

Додатно, уколико се уређај за симултану термалну анализу NETZSCH STA449F5 Jupiter® повеже са квадрополним масеним спектрометром NETZSCH QMS403D Aëolos, може се извршити анализа масеног спектра гасова који се из испитиваног материјала ослободе у току термалног разлагања материјала.

Циљ испитивања термогравиметријском методом је био да се установи који хемијски елементи, тј. једињења и на којој температури се издвајају у току процеса термалне разградње остатака из процеса производње сокова, на примеру тропа нектарине и јабуке. Урађене су две серије мерења, при чему је прва серија урађена у неизотермским условима, при брзини загревања од 5 K/min. Овом динамичком методом може се одредити које материје се издвајају на одређеној температури праћењем издвајања гасова масеном спектрометријом. Такође је урађено испитивање узорака при изотермском режиму сушења при температурама 50, 60, 70, 80 и 90°C. Испитивање се састојало у загревању узорка максималном брзином загревања од 50 K/min од собне температуре до жељене температуре, затим изотермског сушења у периоду од 2h, и на крају загревању узорка максималном брзином загревања од 50 K/min до температуре од 105 °C на којој је узорак испитиван 25 min. Било је потребно време за достизање жељене температуре узорака, које је износило између 18-30 min, тако да је време изотермског сушења нешто краће од 2h. Сва испитивања су извршена у атмосфери ваздуха, при чему је проток ваздуха био 170 ml/min. Почетне масе узорака за прву серију мерења - динамичко мерење, приказане су у Табели:

Температура [°C]	Почетна маса узорака [mg]	
	Троп јабуке	Троп нектарине
50	31,05	30,9
60	30,1	29,05
70	34,6	34,25
80	33,5	34,6
90	31,7	34,25

Друга серија мерења је извршена на температури загревања од 5 K/min са осушеним и самлевеним узорцима гранулације 0,25 mm тропа нектарине и јабуке. Материјал је загреван

од собне температуре до 200 °C, на којој је узорак био још 10 min. Маса узорака је била 10,65 mg за троп нектарине и 9,3 mg за троп јабуке.

Загревање 5 K/min	Почетна маса узорака [mg]	
	Троп јабуке	Троп нектарине
Осушени самлевени узорци	9,3	10,65
Свежи узорци	30,3357	30,8767

Са свежим узорцима тропа нектарине и јабуке извршено је мерење. Брзина загревања од 5 K/min, до 180 °C, маса узорка тропа нектарине 30,8767 mg, почетна влажност 83,10%, маса тропа јабуке 30,3357 mg, почетна влажност 69,57%.

Укупно је урађено 14 експеримената.

8. АНАЛИЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ РЕЗУЛТАТА

У овом поглављу су приказани резултати експерименталних истраживања, као и анализа добијених резултата. У току експерименталних истраживања одређено је:

- Почетни и равнотежни садржај влаге
- Време сушења
- Кинетика процеса сушења воћног тропа
- Ефективни коефицијент дифузије влаге
- Одређивање параметара сопственог математичког модела
- Потрошња енергије за сушење
- Топлотна проводљивост материјала
- Температура површине материјала
- Издвајање влаге из материјала при изотермском сушењу
- Топлотна моћ
- Термогравиметријска анализа

8.1. ПОЧЕТНИ И РАВНОТЕЖНИ САДРЖАЈ ВЛАГЕ

Почетни садржај влаге материјала је одређен стандардном процедуром на 105°C током 12 часова. Вредност средње почетне влажности материјала (M_0) за троп нектарине износио је 82,24% ($4,63 \pm 0,01 \text{ kg}_w/\text{kg}_{sm}$), док је за троп јабуке износио 75,61% ($3,10 \pm 0,01 \text{ kg}_w/\text{kg}_{sm}$).

У току сушења прехранбених материјала, влажност материјала постепено опада од почетне влажности (M_0) до равнотежне влажности (M_e). Равнотежни садржај влаге представља минимални садржај влаге који материјал може да достигне на крају сушења при одређеном режиму и условима сушења. При комбинованом кондуктивно – конвективном довођењу топлотног протока материјалу, равнотежна влажност материјала зависи од комбинације температура грејне подлоге и температуре топлог ваздуха. Вредности равнотежног садржаја влаге упросеченог за све дебљине материјала (5,7 и 10 mm) за троп нектарине и јабуке, дате су у Табелама 8.1 и 8.2.

Табела 8.1: Равнотежни садржај влаге за кондуктивно-конвективно сушење тропа нектарине

		Температура ваздуха [°C]				
		30	40	50	60	70
Температура грејне подлоге [°C]	КВ	0,35	0,27	0,23	0,18	0,13
	50	0,16	0,21	0,25	/	/
	60	0,13	0,17	0,2	0,23	/
	70	0,08	0,09	0,11	/	0,14

*КВ – Конвективно сушење без употребе грејне подлоге

Табела 8.2: Равнотежни садржај влаге за кондуктивно-конвективно сушење тропа јабуке

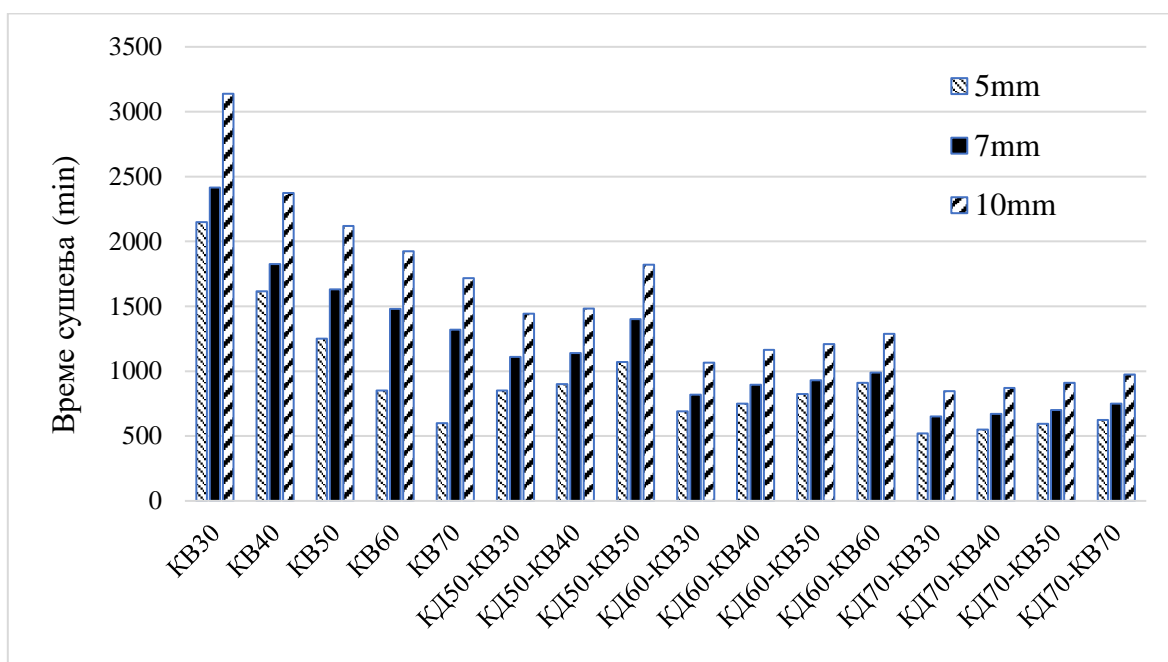
		Температура ваздуха [°C]	
		30	50
Температура грејне подлоге [°C]	КВ	0,22	0,1
	50	0,12	0,1
	60	0,06	0,11
	70	0,09	0,13

*КВ – Конвективно сушење без употребе грејне подлоге

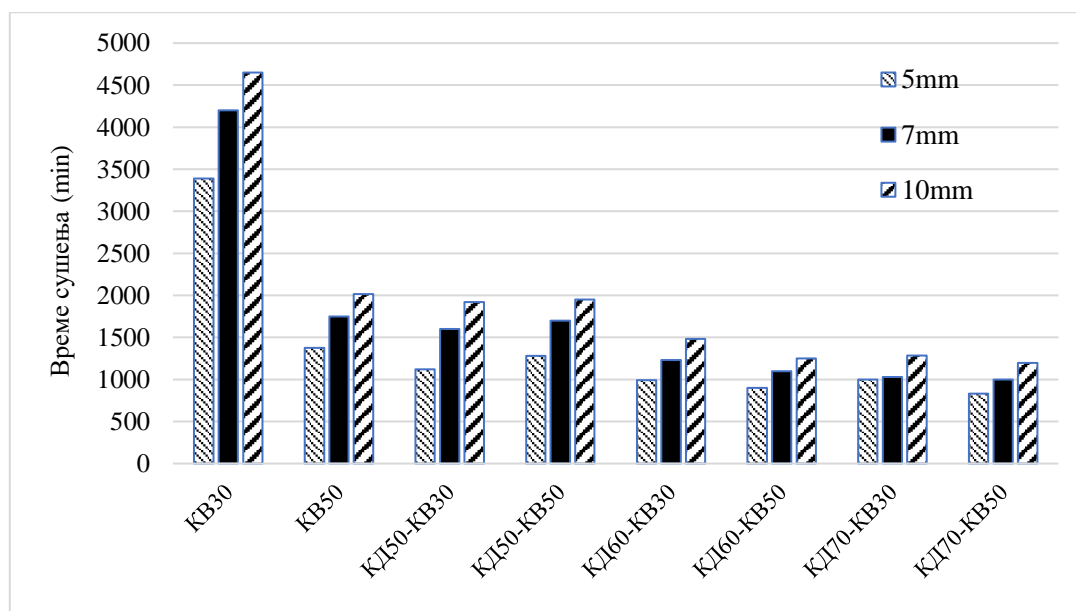
Као што се види из добијених резултата, са повећањем температуре грејне подлоге и температуре ваздуха, смањује се вредност средње равнотежне влажности M_e . Међутим, троп нектарине и јабуке достиже минималну вредност равнотежног садржаја влаге при режиму КД70-КВ30, тј. када је температура грејне подлоге 70°C, а температура топлог ваздуха 30°C. Ово имплицира да се материјал најбоље исуши ако постоји градијент температуре између грејне подлоге и топлог ваздуха. Практична примена овог резултата је да се комбинацијом температура грејне подлоге и топлог ваздуха може постићи жељена равнотежна влажности материјала.

8.2. ВРЕМЕ СУШЕЊА

Време сушења подразумева временски период од постављања узорка у сушару, па све док узорак не достигне равнотежну влажност. Крај сушења се у пракси, при експерименталним истраживањима одређује када узорак престане да губи масу, тј. уколико у два узастопна мерења не дође до промене масе узорка, експеримет се проглашава завршеним. Време сушења је одређено за експерименте из Табеле 7.2, који су изведени у лабораторијској сушари описаној у Поглављу 7.1.1. На Сликама 8.1 и 8.2 дати су резултати времена сушења тропа нектарине и јабуке за сваки појединачни режим сушења.



Слика 8.1: Време сушења узорака тропа нектарине



Слика 8.2: Време сушења узорака тропа јабуке

Ради лакшег читавања вредности, време потребно за сушење тропа нектарине и јабуке за све експерименталне режиме из Табеле 7.2, дато је у систематизовано у Табели 8.3.

Табела 8.3.: Време сушења узорка тропа јабуке и нектарине

	Троп нектарине			Троп јабуке		
	5mm	7mm	10mm	5mm	7mm	10mm
KB30	2150	2415	3140	3391	4200	4650
KB40	1615	1825	2373	-	-	-
KB50	1250	1630	2119	1375	1750	2015
KB60	850	1480	1924	-	-	-
KB70	600	1320	1716	-	-	-
КД50-КВ30	850	1110	1443	1120	1600	1920
КД50-КВ40	900	1140	1482	-	-	-
КД50-КВ50	1070	1400	1820	1280	1700	1950
КД60-КВ30	690	820	1066	992	1230	1483
КД60-КВ40	750	895	1164	-	-	-
КД60-КВ50	825	930	1209	900	1098	1252
КД60-КВ60	910	990	1287	-	-	-
КД70-КВ30	520	650	845	1000	1030	1285
КД70-КВ40	550	670	871	-	-	-
КД70-КВ50	595	700	910	832	997	1198
КД70-КВ70	625	750	975	-	-	-

* KB – Конвективно сушење; КД – Кондуктивно сушење

Из експерименталних резултата је јасно да се употребом грејне подлоге приликом сушења тропа нектарине и јабуке значајно смањује време сушења у односу на чисто конвективно сушење, па се процес сушења, са аспекта времена, може оптимизовати коришћењем грејне подлоге.

Из резултата се може закључити да су режими сушења са највећим градијентом температуре уједно и режими где долази до највећег смањења времена сушења коришћењем грејне подлоге. Ово се може објаснити тиме да при сушењу воћног тропа са кондуктивним довођењем топлотног протока материјалу долази до изражаја механизам преношења влаге термодифузија, која је у смеру супротног градијенту температуре. Како је термодифузија филтрациони механизам преношења влаге, процес сушења се убрзава.

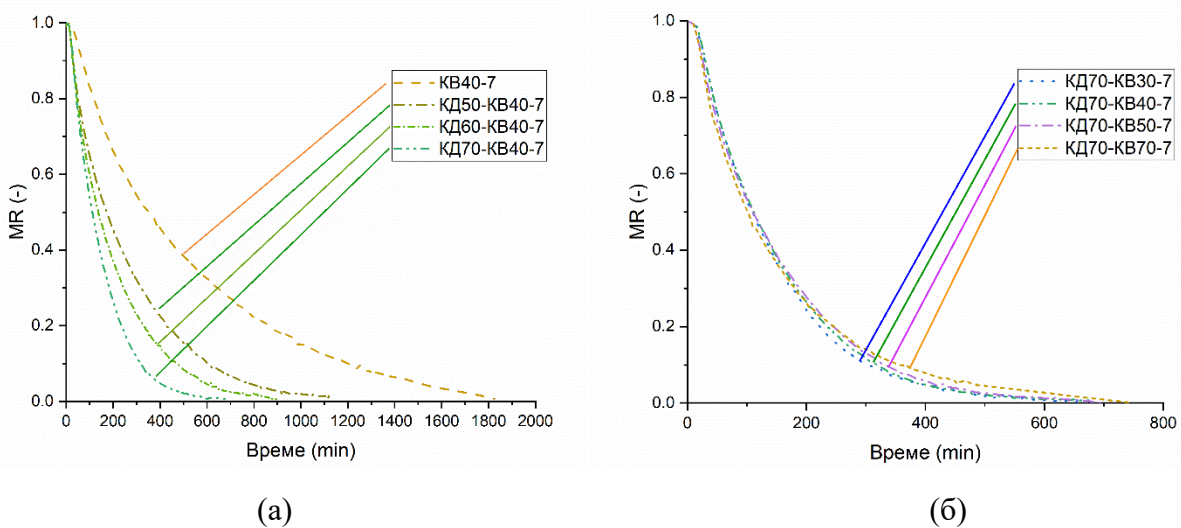
При режимима сушења без градијента температуре и малом дебљином узорка, као што су режими КД60-КВ60-5 и КД70-КД70-5, нема евидентне разлике у времену сушења са чисто конвективним сушењем. Ова чињеница наводи на закључак да је за сушење тропа нектарине тање дебљине $\leq 5\text{mm}$ на температурама ваздуха преко 60°C довољно користити само конвективно довођење топлотног протока материјалу. Ово се може објаснити чињеницом да се узорци мање дебљине на вишим температура у почетним фазама сушења брзо загревају, као и да влага прелази краћи пут до слободне површине, што скраћује време сушења. За узорке дебљине $>5\text{mm}$ коришћење грејне подлоге доводи до значајног смањења времена сушења.

8.3. КИНЕТИКА ПРОЦЕСА СУШЕЊА ВОЋНОГ ТРОПА

Једна од главних карактеристика велике већине прехранбених производа је да се целокупно сушење одвија у периоду опадајуће брзине сушења, тј. у одсуству периода константне брзине сушења. Ово указује на то да су унутрашњи отпори пролажењу влаге кроз материјал значајно већи од отпора прелажењу топлоте са површине материјала у околни ваздух.

Пре самог процеса сушења, узорци су излагани спољашњем собном ваздуху да се одмрзну, чиме се смањује период прогревања материјала у самом процесу сушења.

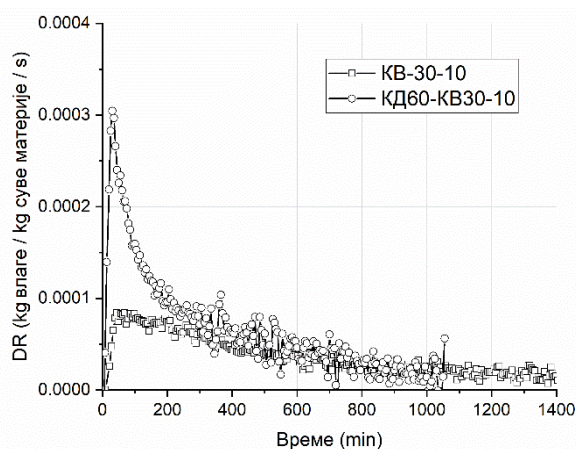
Карактер кривих сушења при чистом конвективном у односу на кондуктивно-конвективно сушење значајно се разликује. То се најбоље види на карактеристичним кривама сушења које су облика $MR = f(\tau)$. На кривој сушења тропа нектарине MR -време на Слици 8.3, приказана су два карактеристична режима сушења. На слици 8.3 (а) приказан је случај конвективног сушења тропа нектарине при температури ваздуха од 40°C (КВ40), као и комбинованог сушења при температурама грејне подлоге од 50, 60 до 70°C. Са слике 8.3 (а) се може закључити да температура грејне подлоге има доминантан утицај на време сушења, као и облик криве сушења. На Слици 8.3 (б) приказан је случај комбинованог сушења тропа нектарине при константној температури грејне подлоге, при чему се температура ваздуха мења од 30 до 70°C са кораком од 10°C. Уочљиво је да промена температуре ваздуха готово да нема утицаја на време сушења и облик криве сушења када је укључена грејна подлога. Међутим, пажљивијом анализом може се закључити да се при сушењу са већим градијентом температуре време сушења скраћује. Ово се може објаснити постојањем термодифузије као једног од механизма преношења влаге кроз материјал, као и стварањем корице на горњој површини материјала што смањује преношење топлоте са ваздуха на материјал.



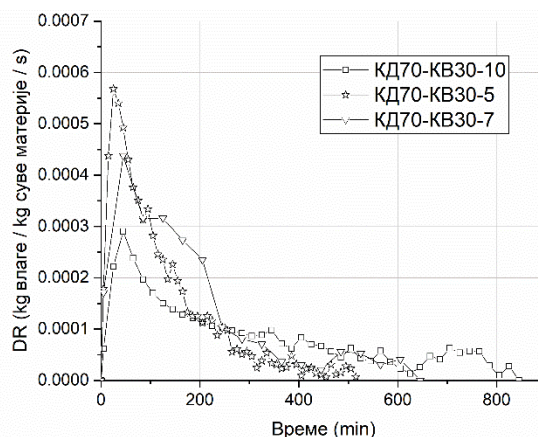
Слика 8.3: Утицај температуре ваздуха и грејне подлоге на промену бездимензионог садржаја влаге: (а) константна температура ваздуха (б) константна температура грејне подлоге

Брзина сушења DR дефинисана је формулом (2.8) и представља диференцијалну промену влажности материјала у времену. На Сликама 8.4 а и б приказане су брзине сушења у времену на примеру тропа нектарине. На слици 8.4 (а) је приказан утицај грејне подлоге на брзину сушења при чему је упоређен режим сушења при чистом конвективном довођењу топлотног протока материјалу при температури ваздуха од 30°C са режимом сушења са комбинованим кондуктивно-конвективним довођењем топлотног протока где је температура грејне подлоге била 60°C, а ваздуха 30°C. Може се закључити да је максимална вредност брзине сушења при комбинованом кондуктивно-конвективном довођењу топлотног протока материјалу значајно већа од максималне брзине сушења при чистом конвективном сушењу. Максимална вредност

брзине сушења се достиже на крају периода загревања материјала. После достизања максималне вредности, брзина сушења опада до краја сушења. За режим са комбинованом кондуктивно-конвективним довођењем топлотног протока материјалу, могу се идентификовати две фазе промене брзине сушења. У првој фази брзина нагло опада до одређене тачке, од које наставља да опада постепено. Ово указује на премоену механизма преношења влаге у материјалу. Насупрот томе, при конвективном сушењу, брзина сушења од максималне вредности постепено опада до краја сушења. Може се, дакле, закључити да је процес сушења при ова два режима квалитативно различит, тј. да су заступљени другачији механизми преношења влаге кроз материјал. На слици 8.4 (б) приказане су упоредо брзине сушења при режиму КД70-КВ30 за различите дебљине материјала. Са слике се може закључити да навећу максималну брзину сушења има узорак дебљине 5mm, док најмању има узорак дебљине 10mm. Ово се објашњава тиме да топлотни флуks лакше продире у узорак мање дебљине, тј. да се узорак мање дебљине лакше загрева, затим краћи је пут кретању влаге ка слободној површини материјала, па је и максимална брзина сушења већа.



(а)



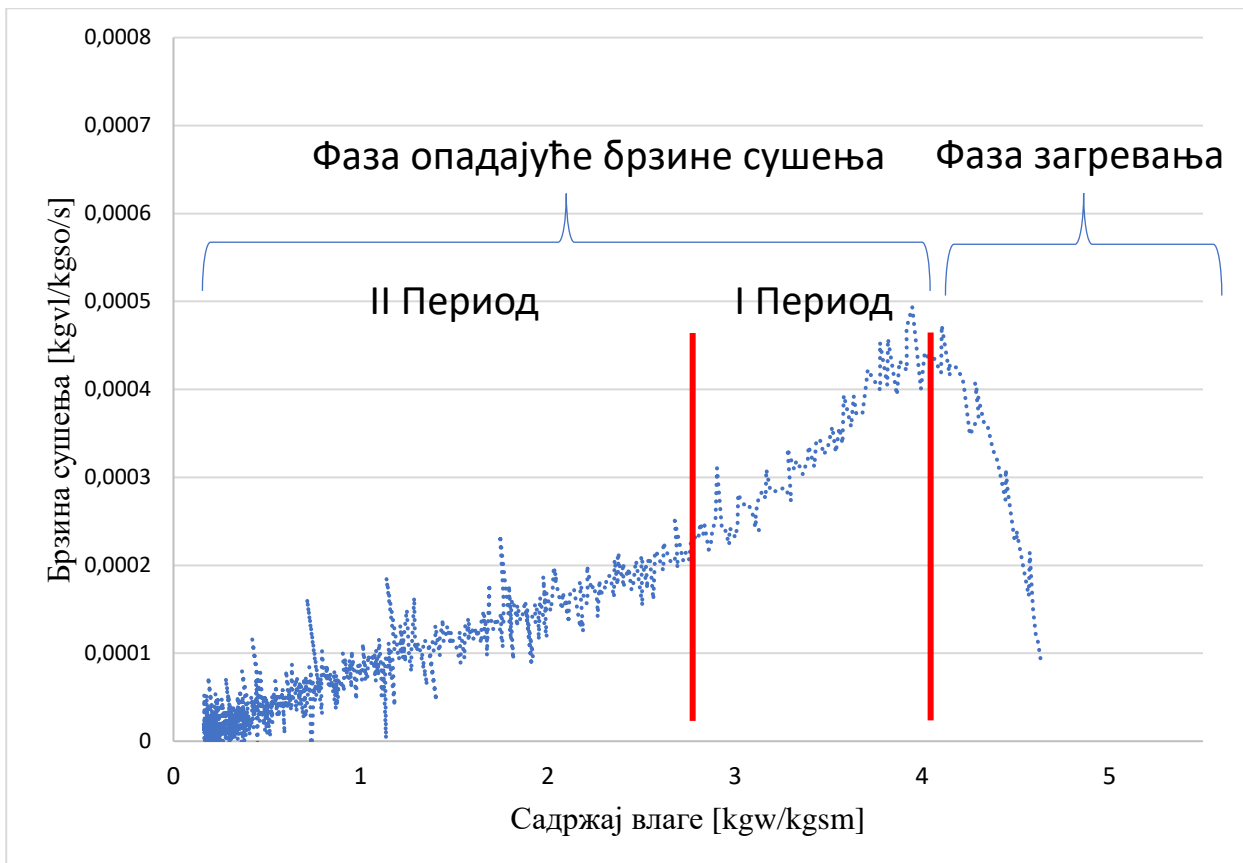
(б)

Слика 8.4: Вредности брзине сушења тропа нектарине анализирајући (а) начин довођења топлотног протока материјалу (б) утицај дебљине узорака

Опис механизма преношења влаге у воћном тропу по фазама сушења

Воћни троп је материјал биљног порекла изузетно нехомогене структуре. Због тога је аналитичко описивање процеса сушења тропа захтеван посао. Овде ће бити дат покушај квалитативног описивања процеса сушења тропа преко механизма преноса влаге објашњених у Поглављу 3.2.

Воћни троп је материјал који спада у групу прехранбених материјала и процес сушења овог материјала се одвија у периоду опадајуће брзине сушења, осим кратког периода загревања материјала на почетку процеса сушења. Уколико се погледа дијаграм брзина сушења – садржај влаге за сушење комбинованом кондуктивно-конвективном методом (Слика 8.5), могу се јасно идентификовати три фазе сушења: фаза загревања, прва фаза опадајуће брзине сушења и друга фаза опадајуће брзине сушења.



Слика 8.5: Анализа фаза сушења тропа нектарине комбинованом кондуктивно-конвективном методом

Брзина сушења достиже највеће вредности на почетку првог периода опадајуће брзине сушења због издвајања највеће количине влаге у јединици времена. Ово је узроковано тиме да материјал на почетку сушења има највећи садржај влаге, а такође поседује и одређену количину слободне влаге на површини. Због разлике концентрације влаге између материјала и ваздуха, влага лако испарава са површине материјала конвективном и површинском дифузијом.

Фаза загревања

У овој фази сушења материјал се загрева и долази у температурску равнотежу, а из материјала се одстрањује сва слободна влага. Слободна влага подразумева течну влагу на површини материјала, као и течну влагу која се налази у отвореним порам материјала. У току ове фазе сушења, капиларе и поре су испуњене течношћу (слика 8.6). На крају периода загревања у материјалу остаје само везана влага.



Слика 8.6: Фаза загревања воћног тропа

Прва фаза опадајуће брзине сушења

У овој фази се из материјала одстрањује физичко-механички везана влага. Влага у материјалу налази као течна физичко-механички и физичко-хемијски везана влага. Површина материјала

се постепено исушује, тако да се јављају суве зоне на површини материјала. Како се воћни троп највећим делом састоји из влакана која могу бити растворљива (упијају воду) и нерастворљива (не упијају воду), и при томе је масени однос нерастворљивих влакана у просеку 2 до 4,5 пута већи од растворљивих, можемо да закључимо да се физичко-механики заробљена влага налази преваходно у капиларама и порама материјала. Кроз систем отворених капилара влага се преноси течном капиларном дифузијом до површине материјала. Такође је због присуства растворљивих влакана присутна осмоза кроз зидове ћелија. Када се садржај воде у материјалу смањи на меру да течна вода у капиларама није више повезана, већ се налази у облику засебних капљица или „острваца“ течности, термодифузија постаје битан механизам преношења влаге. Како термодифузија зависи од градијента температуре у материјалу, овај вид механизма преноса је утицајнији уколико је већа разлика температура између грејне подлоге и ваздуха. У овој фази сушења се већи део физичко-механички везане влаге издваја из материјала.



Слика 8.7: Прва фаза опадајуће брзине сушења воћног тропа

Друга фаза опадајуће брзине сушења

У овој фази се фронт испаравања повлачи у материјал и влага се из унутрашњости материјала до површине преноси у облику парне фазе. Контролишући механизам преношења влаге у овом периоду је парна дифузија. Због структуре материјала (поре су знатно веће од $10^{-7}m$) ефузија је искључена из разматрања. Такође, филтрација парне фазе се не узима у разматрање јер температура грејне подлоге није прелазила $70^{\circ}C$ у току експеримената па не долази до појаве градијента притиска у материјалу. У унутрашњости материјала влага се и даље налази у капиларама, али у знатно мањој мери него у Првој фази опадајуће брзине сушења. Влага преостала у растворљивим биљним влакнима се до отворених капилара преноси осмозом, а одатле парном дифузијом до слободне површине материјала. Друга фаза опадајуће брзине сушења је знатно спорији процес од прве фазе опадајуће брзине сушења.



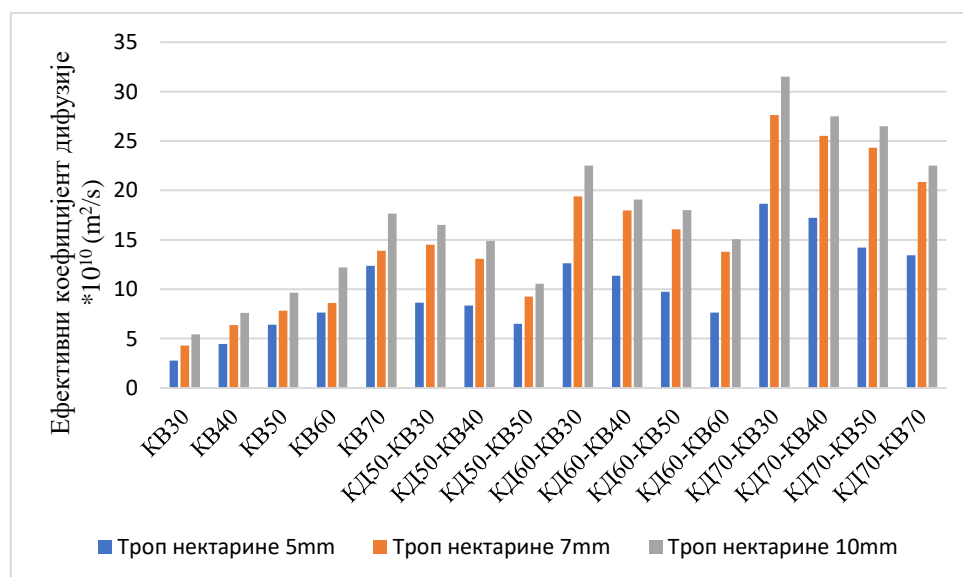
Слика 8.8: Друга фаза опадајуће брзине сушења воћног тропа

8.4. ЕФЕКТИВНИ КОЕФИЦИЈЕНТ ДИФУЗИЈЕ ВЛАГЕ

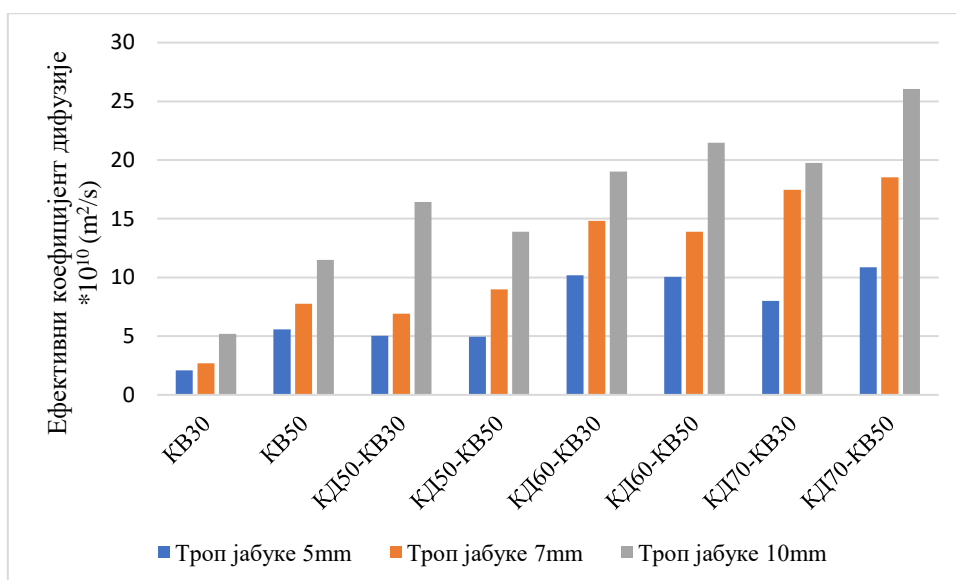
За све експерименте спроведене на експерименталној сушари израчунате су графо-аналитичком методом и коришћењем једначине (6.2) вредности ефективног коефицијента дифузије влаге (D_{eff}) који обухвата све механизме преношења влаге који се јављају у процесу сушења. Предност познавања D_{eff} представља чињеница да није неопходно улазити дубље у физикалност процеса сушења, већ се кинетика сушења може одредити из експерименталних резултата. Међутим, експерименталним одређивањем D_{eff} губи се на општости резултата, тј. закључци добијени анализом D_{eff} могу се применити само за конкретне услове сушења (геометрија и густина узорка, метод сушења и режими сушења), тако да добијене вредности D_{eff} зависе од геометријског облика и димензија материјала који се суши [20].

У случају сушења тропа нектарине и јабуке, геометрија узорака је била у облику танког диска, при чему је дебљина материјала била вишеструко мања од пречника диска. У овом случају се издвајање влаге у радијалном правцу може занемарити, те се сматра да је у току сушења кретање влаге у аксијалном правцу. Како је у току процеса сушења узорак доњом површином у контакту са грејном површи, усвојено је да се издвајање влаге врши само са горње површине узорка изложеној струји топлог ваздуха. Карактеристична димензија материјала која фигурише у једначини (6.2) је у овом случају дебљина узорка L .

На основу експерименталних резултата, графо-аналитичком методом помоћу једначине (6.2) су одређени ефективни коефицијенти дифузије влаге за троп нектарине и јабуке (Слика 8.9 и 8.10)



Слика 8.9: Ефективни коефицијент дифузије тропа нектарине за експерименталне режимо сушења



Слика 8.10: Ефективна дифузивност тропа јабуке за експерименталне режиме сушења

Вредности ефективног коефицијента дифузије износили су:

- за троп нектарине $2,79 - 31,51 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$.
- за троп јабуке $2,10 - 26,05 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$.

Збирни резултати за D_{eff} дати су за сваки експеримент у Табели 8.5:

Табела 8.5: Вредности експериментално одређеног D_{eff} за троп нектарине и јабуке.

			Ефективни коефицијент дифузије [$D_{\text{eff}} \cdot 10^{10}$]					
			Троп нектарине			Троп јабуке		
Параметри сушења			Дебљина узорака [mm]					
Режим експеримента	Температура грејне површи	Температура ваздуха	5	7	10	5	7	10
E1	/	30	2,79	4,30	5,43	2,10	2,70	5,20
E2	/	40	4,45	6,38	7,62	-	-	-
E3	/	50	6,42	7,82	9,64	5,58	7,76	11,48
E4	/	60	7,64	8,62	12,22	-	-	-
E5	/	70	12,36	13,89	17,65	-	-	-
E6	50	30	8,64	14,51	16,51	5,04	6,90	16,44
E7	50	40	8,36	13,09	14,89	-	-	-
E8	50	50	6,52	9,27	10,55	5,72	8,99	13,89
E9	60	30	12,64	19,41	22,51	10,19	14,83	19,02
E10	60	40	11,35	17,99	19,06	-	-	-
E11	60	50	9,76	16,05	18,01	10,04	13,90	21,47
E12	60	60	7,64	13,78	15,07	-	-	-
E13	70	30	18,64	27,64	31,51	11,93	17,47	19,75
E14	70	40	17,24	25,51	27,51	-	-	-
E15	70	50	14,22	24,31	26,51	10,86	18,54	26,05
E16	70	70	13,44	20,85	22,51	-	-	-

Из резултата се види да ефективни коефицијент дифузије расте се повећањем дебљине узорка материјала, што се слаже са резултатима других аутора за сушење прехранбених производа [100] [101] [102]. При чистом конвективном сушењу, D_{eff} расте са повећањем температуре топлог ваздуха за троп нектарине и јабуке. Тако је, на пример, вредност D_{eff} за конвективно сушење узорка дебљине 7mm температуром од 70°C, већа 3,23, односно чак 5,34 пута у односу

на конвективно сушење температуром од 30°C, за троп нектарине и јабуке следствено. Када се материјал суши кондуктивно-конвективном методом, највеће вредности D_{eff} добијене су за режиме где се јавља највећа разлика у температури између грејне површи и топлог ваздуха, тј. при сушењу са највећим градијентом температуре. Стога је интересантно приметити да режим КД70-КВ70 (Е16) има нижу вредност D_{eff} од режима КД70-КВ30 (Е13). Ово указује на то да се при комбинованом кондуктивно-конвективном довођењу топлотног протока материјалу, највећа вредност D_{eff} се добија за режиме са високом температуром подлоге и ниском температуром ваздуха.

У Табели 8.6 је приказан утицај коришћења грејне подлоге на вредности D_{eff} у односу на чисто конвективно сушење топлим ваздухом.

Табела 8.6: Повећање D_{eff} при комбинованом кондуктивно-конвективном у односу на конвективно сушење тропа нектарине и јабуке

Параметри сушења		Температура грејне површи [°C]					
Температура ваздуха [°C]	Дебљина узорка [mm]	50	60	70	50	60	70
		Троп нектарине			Троп јабуке		
30	5	3,1	4,53	6,68	2,4	4,85	5,68
	7	3,37	4,51	6,43	2,55	5,49	6,47
	10	3,04	4,15	5,8	3,16	3,66	3,8
50	5	1,35	1,52	2,21	1,03	1,8	1,95
	7	1,19	2,05	3,11	1,16	1,79	2,39
	10	1,09	1,87	2,75	1,21	1,87	2,27
60	5	-	1	-	-	-	-
	7	-	1,60	-	-	-	-
	10	-	1,23	-	-	-	-
70	5	-	-	1,09	-	-	-
	7	-	-	1,5	-	-	-
	10	-	-	1,28	-	-	-

Из Табеле 8.7 се види да се за све режиме сушења D_{eff} има већу вредност у односу на чисто конвективно сушење. Највеће повећање ефективног коефицијента дифузије код тропа нектарине и јабуке остварује се за режим сушења 70 – 30, што потврђује да разлика температуре између грејне подлоге и ваздуха има значајан утицај на кинетику сушења. Температура грејне подлоге и температурска разлика имају највећи утицај на ефективни коефицијент дифузије.

Табела 8.7: Повећање ефективног коефицијента дифузије комбинованог кондуктивно-конвективног сушења у односу на чисто конвективно сушење

Параметри сушења	Температура грејне површи [°C]					
	50	60	70	50	60	70
Температура ваздуха [°C]	Нектарина			Јабука		
	30	3,17	4,40	6,3	2,65	4,67
50	1,21	1,81	2,69	1,09	1,63	2,21

8.5. ОДРЕЂИВАЊЕ ПАРАМЕТАРА СОПСТВЕНОГ МАТЕМАТИЧКОГ МОДЕЛА

Из Поглавља 4 и 5 се може закључити да коришћење просторно-временских модела, као што је Ликовљев модел, захтева претходно одређивање великог броја термомеханичких параметара. Такође, решавање постављених модела је компликовано и врши се најчешће нумерички. У пракси је због тога чешћи случај да се развије полуемпиријски или емпиријски модел сушења који са задовољавајућом тачношћу описује процес сушења одређеног материјала за услове и методе сушења примењене у експерименталним истраживањима. Предност ове методе је једноставност, али је недостатак немогућност директне примене модела на друге услове сушења и на друге материјале. То значи да ће емпиријски и полуемпиријски модели бити примењиви само за сушење исте врсте материјала при истим или јако сличним условима (геометрија узорка, брзина струјања, температура, итд.).

Полу-емпиријски математички модели су облика $MR=f(\tau)$, при чему за прехранбене производе, већина има експоненцијални облик, као што се може видети у Табели 5.2 у Поглављу 5. Приликом развијања математичког модела, треба водити рачуна да се добије највеће поклапање са експерименталним резултатима. У случају сушења воћног остатка, најбоље слагање са експерименталним резултатима дао је модел типа:

$$MR = a \cdot e^{\left(\frac{-\tau}{b}\right)} + c \cdot e^{\left(\frac{-\tau}{d}\right)} + e \quad (8.1)$$

Где су a,b,c и d корелациони параметри. У Табелама 8.8 и 8.9 су дата слагања модела са експерименталним резултатима за троп нектарине и јабуке.

Табела 8.8: Коefицијенти сопственог математичког модела за троп нектарине

Троп нектарине		$MR = a \cdot e^{\left(\frac{-\tau}{b}\right)} + c \cdot e^{\left(\frac{-\tau}{d}\right)} + e$					
		ExpDec2					
		a	b	c	d	e	R ²
KB30	5mm	-0,12605	0,50208	325,00393	0,64863	1250,7478	0,99972
	7mm	-0,17749	0,41345	243,4819	0,81678	1544,90026	0,99924
	10mm	-0,03263	0,38164	422,04554	0,67682	1963,4701	0,99971
KB40	5mm	-0,02041	0,15466	117,46895	0,90663	450,74132	0,99959
	7mm	-0,08774	0,31303	201,02837	0,81898	815,8718	0,99949
	10mm	-0,113	0,34259	237,30599	0,81139	1603,57278	0,99944
KB50	5mm	-0,01068	0,08286	51,12169	0,95922	290,5799	0,99912
	7mm	-0,0391	0,19176	88,84802	0,8797	523,64963	0,99959
	10mm	0,05941	0,13673	135,72651	0,86038	605,07183	0,99765
KB60	5mm	-0,02519	0,091	68,60456	0,95356	265,04279	0,99891
	7mm	-0,03541	0,12418	72,2258	0,93415	509,5173	0,99887
	10mm	-0,04429	0,16816	85,07183	0,91174	569,88746	0,99931
KB70	5mm	-0,04725	0,44907	156,40246	0,60883	216,67055	0,99867
	7mm	-0,05614	0,25834	163,16344	0,71156	420,35492	0,99941
	10mm	-0,06772	0,15219	60,70499	0,93927	521,71513	0,99936
КД50-КВ30	5mm	-0,03075	0,17835	46,60655	0,88344	254,5713	0,99962
	7mm	-0,02225	0,1252	50,94614	0,92467	320,63371	0,99963
	10mm	-0,07272	0,25137	118,82934	0,84869	811,70759	0,99978
КД50-КВ40	5mm	-0,00666	0,18971	40,50564	0,84537	216,90695	0,9996

	7mm	-0,01459	0,1387	46,74993	0,91756	295,0429	0,99954
	10mm	-0,15049	0,27227	122,24647	0,91251	936,59927	0,99925
КД50-КВ50	5mm	-0,00786	0,23669	40,35941	0,7722	286,08151	0,99938
	7mm	-0,02187	0,17106	57,12804	0,86578	401,58964	0,99955
	10mm	0,01166	0,23049	79,28757	0,79197	694,84767	0,9998
КД60-КВ30	5mm	-0,16055	0,40951	84,94736	0,79325	371,64052	0,99834
	7mm	-0,01851	0,05838	50,32543	0,99615	210,00106	0,99945
	10mm	-0,0667	0,14689	60,45121	0,95815	500,9377	0,99956
КД60-КВ40	5mm	-0,00919	0,43173	96,00772	0,62527	184,24957	0,99924
	7mm	-0,012	0,12029	57,67244	0,93512	220,76363	0,9994
	10mm	0,00246	0,12847	48,55894	0,89933	414,49683	0,99965
КД60-КВ50	5mm	-0,0184	0,13571	37,68224	0,90477	170,72429	0,9994
	7mm	-0,00716	0,17298	48,66242	0,88072	230,40747	0,99943
	10mm	-0,17639	0,29786	98,23033	0,92244	758,60071	0,99919
КД60-КВ60	5mm	-0,00104	0,16467	41,06121	0,88449	163,021	0,99897
	7mm	-0,02455	0,23018	51,83715	0,83298	280,49054	0,9993
	10mm	-0,00486	0,18543	53,73122	0,85216	495,5675	0,99838
КД70-КВ30	5mm	-0,01032	0,52586	116,3311	0,52497	116,33109	0,99942
	7mm	-0,01362	0,554	139,20581	0,54429	139,88297	0,99823
	10mm	-0,01324	0,50796	278,1086	0,52805	278,1086	0,99718
КД70-КВ40	5mm	-0,02915	0,5481	114,66291	0,54732	114,66275	0,99831
	7mm	-0,0139	0,54633	145,33613	0,54642	145,33613	0,99856
	10mm	-0,05653	0,112	67,45975	1,00498	348,36694	0,99948
КД70-КВ50	5mm	-0,01158	0,05708	30,70629	0,99567	136,29076	0,99902
	7mm	-0,013	0,52715	152,30443	0,52886	152,30443	0,99919
	10mm	-0,06252	0,1487	87,42132	0,96444	327,04008	0,99904
КД70-КВ70	5mm	-0,02529	0,80589	158,79917	0,26109	49,05006	0,99874
	7mm	-0,00731	0,43861	89,3312	0,61618	196,58171	0,99907
	10mm	-0,03336	0,23184	66,11959	0,84495	390,86308	0,99953

Табела 8.9: Коефицијенти сопственог математичког модела за троп јабуке

Троп јабуке		$MR = a \cdot e\left(-\frac{\tau}{b}\right) + c \cdot e\left(-\frac{\tau}{d}\right) + e$					R ²
		ExpDec2					
		a	b	c	d	e	
КВ30	5mm	-0,06217	0,31588	213,3922	0,76685	1241,59509	0,99975
	7mm	-0,08558	0,21834	160,87726	0,88541	1286,79697	0,9999
	10mm	-0,09198	0,16318	177,02104	0,94412	1371,70694	0,99987
КВ50	5mm	-0,00506	0,49212	304,4367	0,49107	307,77359	0,99802
	7mm	-0,06006	0,11118	53,71116	0,97067	556,8799	0,99948
	10mm	-0,14277	0,16116	98,53155	1,00655	782,9443	0,99976
КД50-КВ30	5mm	-0,00248	0,49029	281,34535	0,48578	281,34535	0,9944
	7mm	-0,06863	0,12815	44,76792	0,95002	492,92362	0,99993
	10mm	0,38781	0,31707	204,493	0,31485	204,49379	0,99673
КД50-КВ50	5mm	-0,03913	0,21548	32,88569	0,8374	478,88851	0,99981

	7mm	-0,03032	0,12837	38,28422	0,92139	396,94879	0,99981
	10mm	-0,04626	0,16728	55,69994	0,89305	550,21636	0,99993
КД60-КВ30	5mm	-0,00779	0,49512	199,12121	0,50358	199,12121	0,99902
	7mm	-0,02121	0,50413	267,97623	0,50982	267,97623	0,99909
	10mm	-0,08112	0,45167	260,49117	0,63302	501,46595	0,99969
КД60-КВ50	5mm	-0,0047	0,0822	21,51815	0,94429	177,36441	0,99965
	7mm	-0,03388	0,18508	42,20281	0,87131	472,01354	0,99982
	10mm	-0,03218	0,50356	347,07527	0,51293	347,07527	0,99881
КД70-КВ30	5mm	-0,00552	0,17482	38,54437	0,85651	232,6119	0,99972
	7mm	-0,02339	0,51355	234,34316	0,53087	234,34316	0,99798
	10mm	-0,00676	0,73454	253,92815	0,33006	253,92815	0,79961
КД70-КВ50	5mm	-0,00608	0,11237	23,83749	0,92018	186,90734	0,99922
	7mm	-0,00691	0,09891	29,36846	0,94181	214,806	0,99922
	10mm	0,18565	0,41964	142,00624	0,41651	245,21749	0,99883

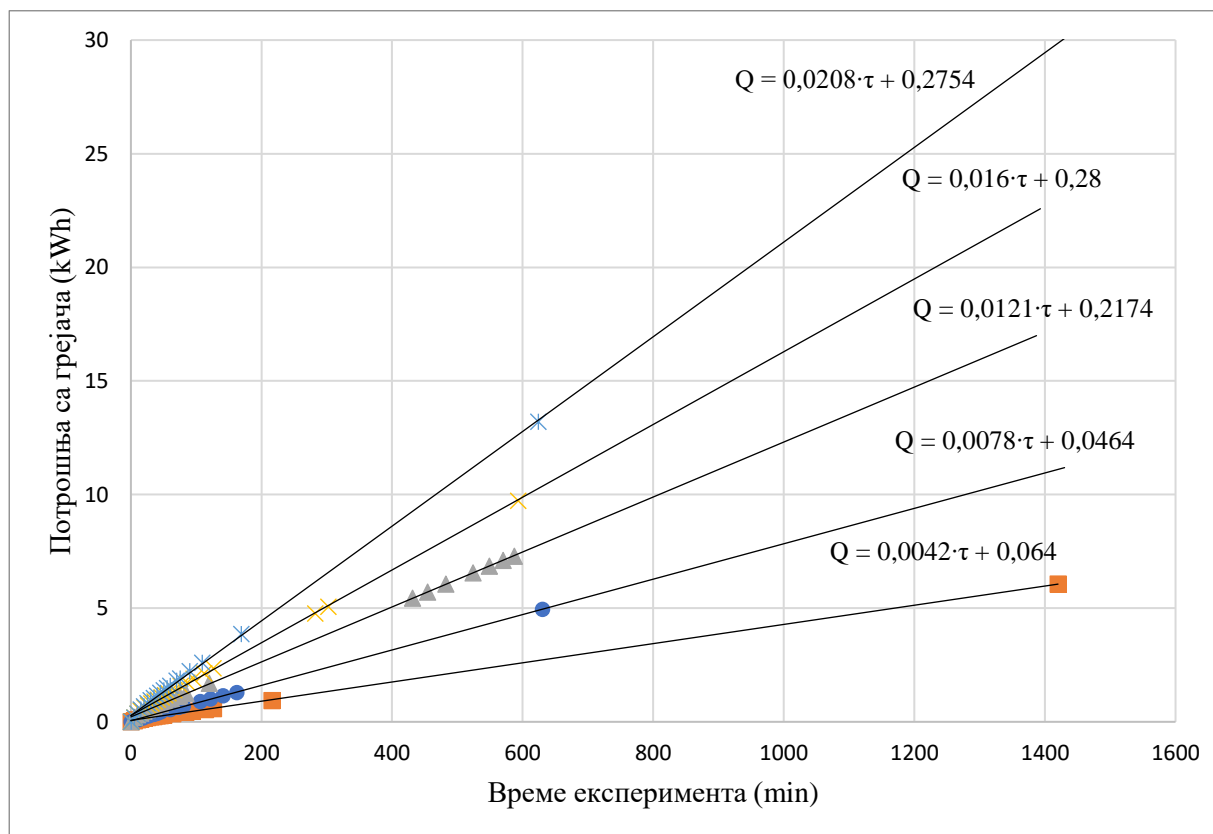
Највеће поклапање овог модела са експерименталним резултатима може да се објасни тиме да дводелни модел лакше може да опише довођење топлотног флукса на два начина истовремено, што указује на предност у односу на једноставније моделе.

8.6. ПОТРОШЊА ЕНЕРГИЈЕ ЗА СУШЕЊЕ

Потрошња енергије за сушење један је од најбитнијих параметара при одабиру система сушења. Зависи од материјала, режима и начина сушења, као и од ефикасности сушаре. У овом поглављу извршено је мерење потрошње енергије потребне за сушење при комбинованом кондуктивно-конвективном довођењу топлотног протока материјалу – воћном тропу на експерименталној сушари описаној у Поглављу 7.1.1. Дати су резултати мерења потрошња енергије потребне за загревање ваздуха и грејне подлоге, а такође је израчуната и укупна специфична потрошња енергије.

8.6.1. ПОТРОШЊА ЕНЕРГИЈЕ ЗА ЗАГРЕВАЊЕ ВАЗДУХА

Да би се проценила потрошња енергије потребна за загревање ваздуха, мерена је потрошња електричне енергије са грејача за ваздух за задате температуре ваздуха, које су се кретале од 30 до 70°C са кораком од 10°C, при чему је улазни ваздух константне температуре 22 °C усисаван из просторије. На Слици 8.11 је дата мерена потрошња електричне енергије са грејача у односу на време трајања експеримента.



Слика 8.11: Потрошња енергије са грејача ваздуха

Као што се види са слике, експериментална сушара релативно брзо (10-30 минута) улази у стационарни режим, а потрошња електричне енергије са грејача може да се апроксимира правом линијом. Као што је и било очекивано, највећа потрошња енергије је била при температури ваздуха од 70°C, а најмања на 30°C. За сваки режим сушења може да се постави функционална зависност потрошње електричне енергије у односу на време рада сушаре, у облику:

$$Q_V = a \cdot \tau + b \quad (8.2)$$

Коефицијенти a и b су прерачунати у кЈ и дати су у Табели 8.10, а τ је време у минутима.

Табела 8.10: Коефицијенти a и b за једначину (8.2)

Температура ваздуха [°C]	30	40	50	60	70
a	15,12	28,08	43,56	57,6	74,88
b	230,4	167,04	782,64	1008	991,44

Експериментално одређена потрошња енергије са грејача за ваздух

На основу једначине (8.2), израчуната је потрошња енергије за сваки појединачни експеримент сушења тропа нектарине и јабуке који су изведени у експерименталној сушари, а резултати су дати у Табели 8.11.

Табела 8.11: Експериментална потрошња са грејача (у кЈ) за сваки појединачни режим сушења за троп нектарине и јабуке

	Троп нектарине			Троп јабуке		
	5mm	7mm	10mm	5mm	7mm	10mm
КВ30	32738	36745	47707	51502	63734	70538
КВ40	45516	51413	66801	-	-	-
КВ50	55233	71785	93086	60678	77013	88556
КВ60	49968	86256	111830	-	-	-
КВ70	45919	99833	129486	-	-	-
КД50-КВ30	13082	17014	22049	17165	24422	29261
КД50-КВ40	25439	32178	41782	-	-	-
КД50-КВ50	47392	61767	80062	56539	74835	85725
КД60-КВ30	10663	12629	16348	15229	18828	22653
КД60-КВ40	21227	25299	32852	-	-	-
КД60-КВ50	36720	41293	53447	39987	48612	55320
КД60-КВ60	53424	58032	75139	-	-	-
КД70-КВ30	8093	10058	13007	15350	15804	19660
КД70-КВ40	15611	18981	24625	-	-	-
КД70-КВ50	26701	31275	40422	37025	44212	52968
КД70-КВ70	47791	57151	73999	-	-	-

На основу једначине (7.6) израчунате су специфичне потрошње енергије са грејача по килограму издвојене влаге за сваки експеримент, а резултати су приказани у Табели 8.12.

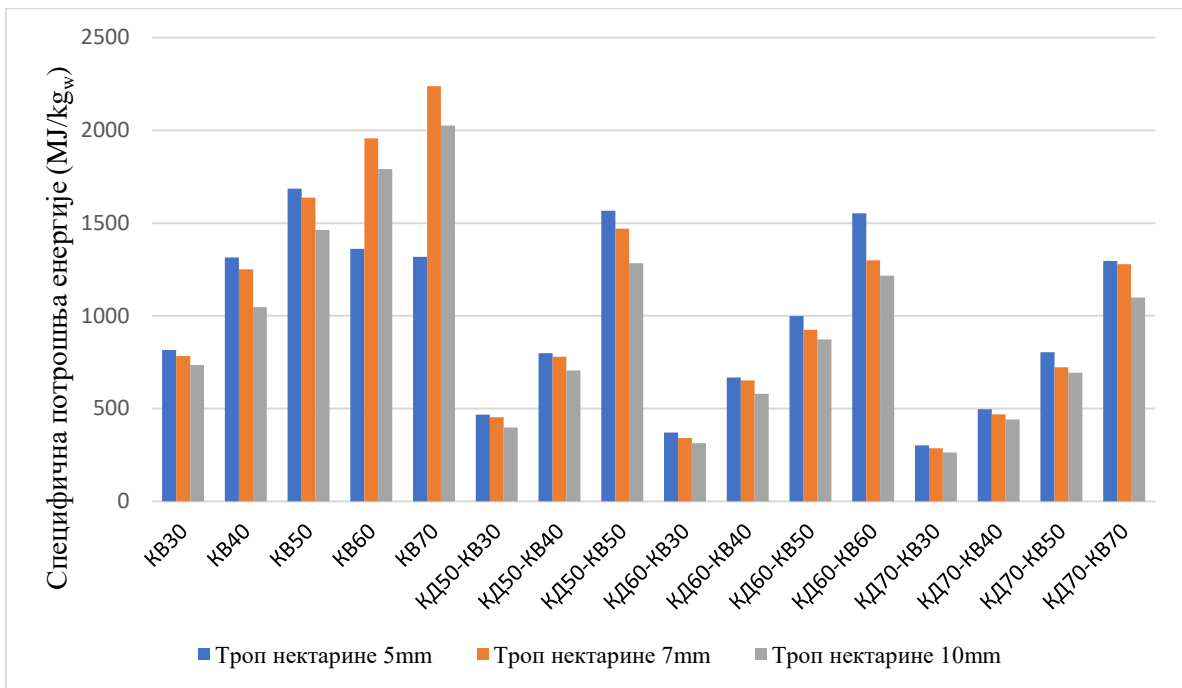
Табела 8.12: Експериментална специфична потрошња енергије са грејача за ваздух (у кЈ/kg_w) за воћни троп нектарине и јабуке

	Троп нектарине			Троп јабуке		
	5mm	7mm	10mm	5mm	7mm	10mm
KB30	816623	893848	735626	1495743	1393071	1221698
KB40	1314807	1250923	1047115	/	/	/
KB50	1685829	1636714	1462726	1786949	1585111	1459490
KB60	1360732	1956495	1791367	/	/	/
KB70	1318770	2238183	2026190	/	/	/
КД50-KB30	364323	382139	335840	496133	516574	486694
КД50-KB40	708285	735331	650459	/	/	/
КД50-KB50	1364187	1431440	1248333	1633050	1547641	1423997
КД60-KB30	296802	275814	252505	439568	389386	374568
КД60-KB40	580477	588909	516219	/	/	/
КД60-KB50	949760	880720	823752	1178907	1012656	922104
КД60-KB60	1513132	1266496	1183785	/	/	/
КД70-KB30	222269	217605	200768	447112	326904	330264
КД70-KB40	430291	408722	382363	/	/	/
КД70-KB50	747429	672125	637756	1097034	918896	898074
КД70-KB70	1242563	1247238	1073202	/	/	/

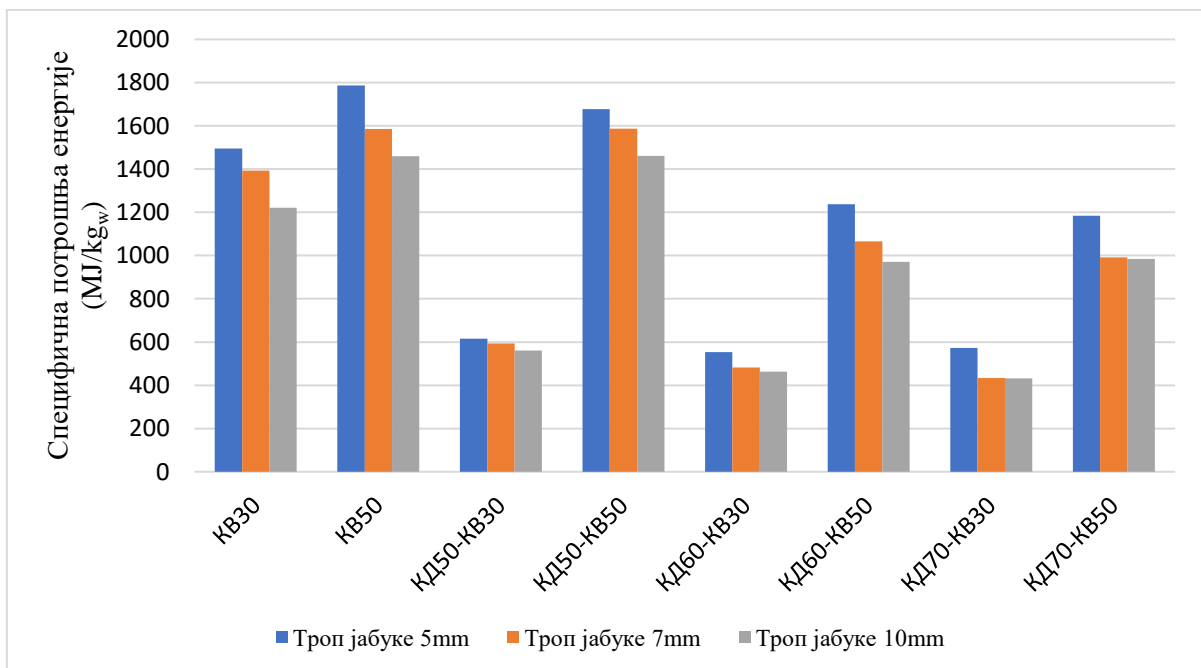
Као што се види из Табеле 8.12, највећа специфична потрошња енергије са грејача за троп нектарине је била при режиму сушења KB70-7 и износила је 2238,183 MJ/kg_w, а најмања при режиму сушења КД70-KB30-10 и износила је 200,768 MJ/kg_w.

За троп јабуке, највећа специфична потрошња енергије са грејача била је при режиму сушења KB50-5 и износила је 1786,949 MJ/kg_w, а најмања при режиму сушења КД70-KB30-7 и износила је 326,904 MJ/kg_w.

Вредности специфичне потрошње енергије са грејача за ваздух за троп нектарине и јабуке дебљине 5, 7 и 10mm илустративно су приказани на Сликама 8.12 и 8.13. Занимљиво је уочити карактер промене специфичне енергије са температуром сушења. За троп нектарине дебљине 5mm приликом чистог конвективног сушења, специфична потрошња енергије је најнижа за температуру ваздуха 30°C и износи 816,623 MJ/kg_w, затим расте са порастом температуре ваздуха до 50°C где постиже максималну вредност 1685,829 MJ/kg_w, а потом са даљим повећањем температуре опада до вредности 1318,770 MJ/kg_w при температури ваздуха 70°C. Насупрот томе, за узорке тропа нектарине дебљине 7 и 10 mm примећује се константан раст специфичне потрошње енергије са порастом температуре ваздуха. Са повећањем температуре сушења расте потошња енергије за загревање ваздуха. Међутим, са друге стране, виша температура сушења поспешује раскидање веза влаге и сувог скелета материјала што доводи до смањења време сушења. За мање дебљине узорака топлотни флуks се лакше проводи до унутрашњих слојева, материјал се брже загрева на почетку процеса сушења, а такође је и краћи пут који влага мора да пређе до површине материјала. Из овог разлога за троп нектарине дебљине 5mm на температурама сушења преко 50°C утицај температуре сушења постаје доминантни параметар који доводи до значајног смањења времена сушења и специфичне потрошње енергије. Очекивано би било да се за узорке тропа нектарине мање од 5mm дебљине максимум потрошње специфичне енергије помера ка нижим температурама сушења, док се за узорке веће дебљине смањење специфичне потрошње енергије може очекивати тек на температурама ваздуха вишим од 70°C.



Слика 8.12: Експериментална специфична потрошња енергије са грејача за троп нектарине



Слика 8.13: Експериментална специфична потрошња енергије са грејача тропа јабуке

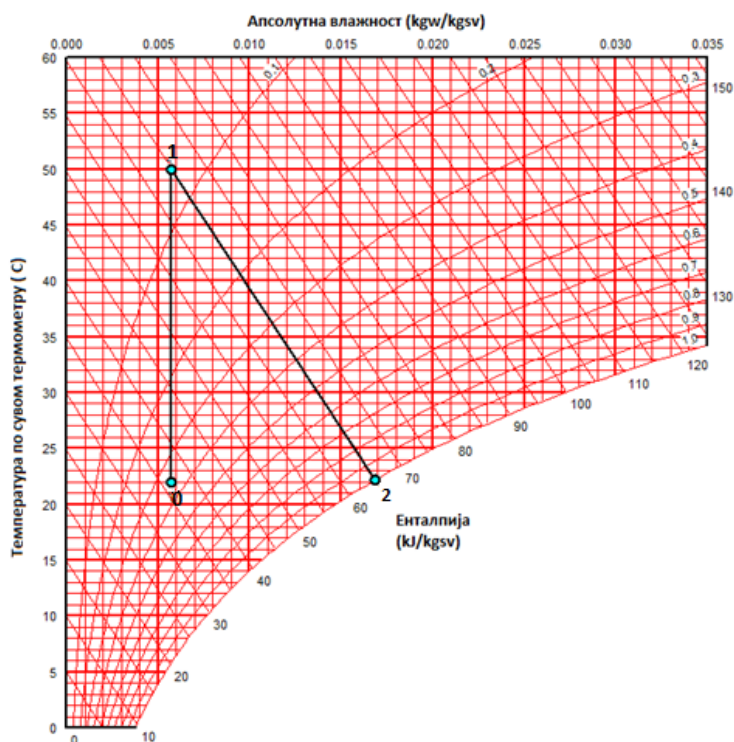
Минимална специфична потрошња енергије при датим условима сушења

Добијене вредности специфичне потрошње су далеко веће од уобичајене индустријске потрошње енергије за сушење прехранбених производа. То је због тога што је проток ваздуха у експерименталној сушари био много већи од потребне количине ваздуха за сушење количине материјала коришћене у експериментима. Да би се добила реалнија слика специфичне потрошње енергије са грејача, експериментална потрошња енергије може се поделити максималном теоријском масом воде коју је при датим условима сушења било могуће издвојити из материјала, тј.:

$$q_{V, kor} = \frac{Q_{eksp, V}}{m_{w, max}} \quad (8.3)$$

Максимална теоријска маса воде која се може издвојити приликом једног експеримента може се одредити претпостављајући да је ваздух на излазу из коморе потпуно засићен, тј. да му је релативна влажност 100 %, уз познавање стања ваздуха на улазу у комору за сушење (Стање 1, Табела 7.3). У том случају би се ваздух на излазу из коморе сушаре налазио на линији засићења, при температури засићења за вредност енталпије влажног ваздуха у току процеса сушења (Слика 8.14)

Вредности максималне масе воде која се може издвојити у току сваког експеримента, у зависности од температуре сушења и трајања експеримента дате су у **Прилогу 12.4**.



Слика 8.14: Шема процеса сушења у идеализованој адијабатској сушари при чему је влажан ваздух на излазу у стању засићења

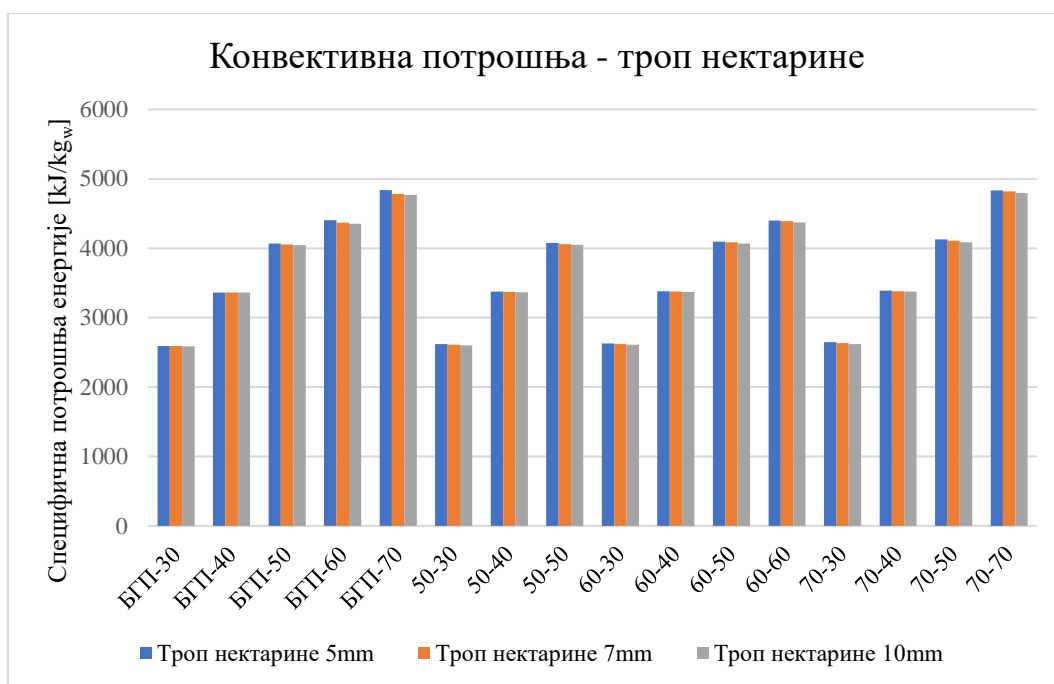
Минимална температура коју ваздух након процеса сушења може достићи је адијабатска температура сатурације, тј. температура у тачки 2 на слици 8.14. То је такође и тачка при којој се може издвојити максимална количина воде из материјала. У реалним условима се само за одређене типове сушара могу приближно постићи ови услови излазног ваздуха, али је из практичних разлога, да би се избегла кондензација и да би се смањиле димензије сушаре, температура на излазу из сушаре значајно виша од температуре тачке росе [103].

Максимална издвојена количина воде по килограму сувог ваздуха представља разлику апсолутних влажности засићеног ваздуха на излазу из коморе за сушење (тачка 2) и ваздуха

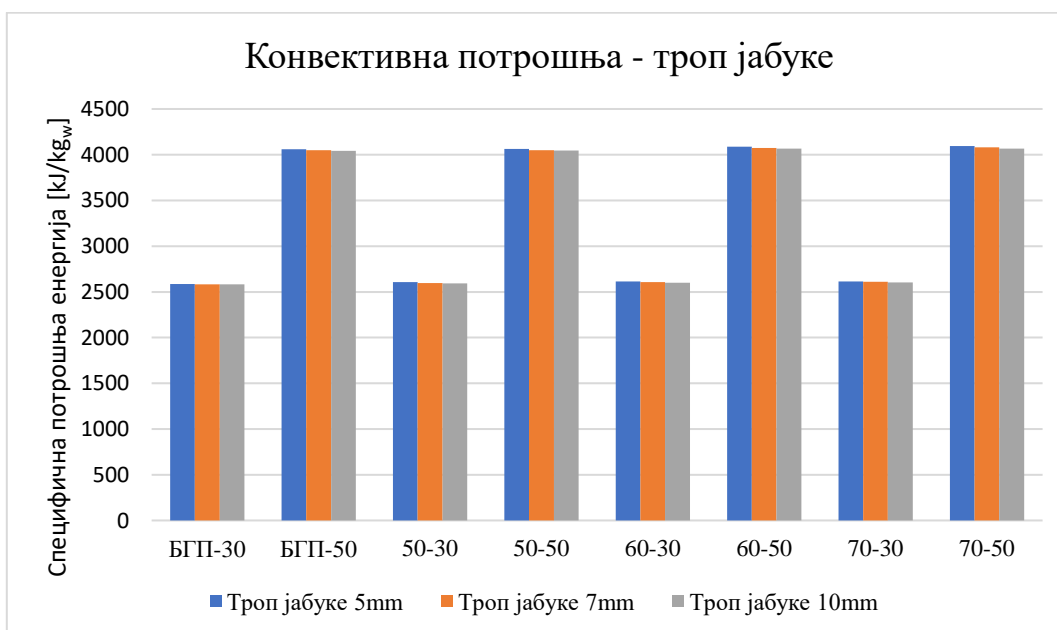
на улазу у комору (тачка 1), усвојивши да је процес сушења адијабатски, тј. да се одвија по изенталпи.

На основу максималне издвојене количине влаге и потрошње енергије са грејача, израчуната је корисна специфична потрошња енергије за сваки експериментални режим коришћењем формуле (8.3).

На Сликама 8.15 и 8.16 су приказане корисне специфичне потрошње енергије за троп нектарине и јабуке.

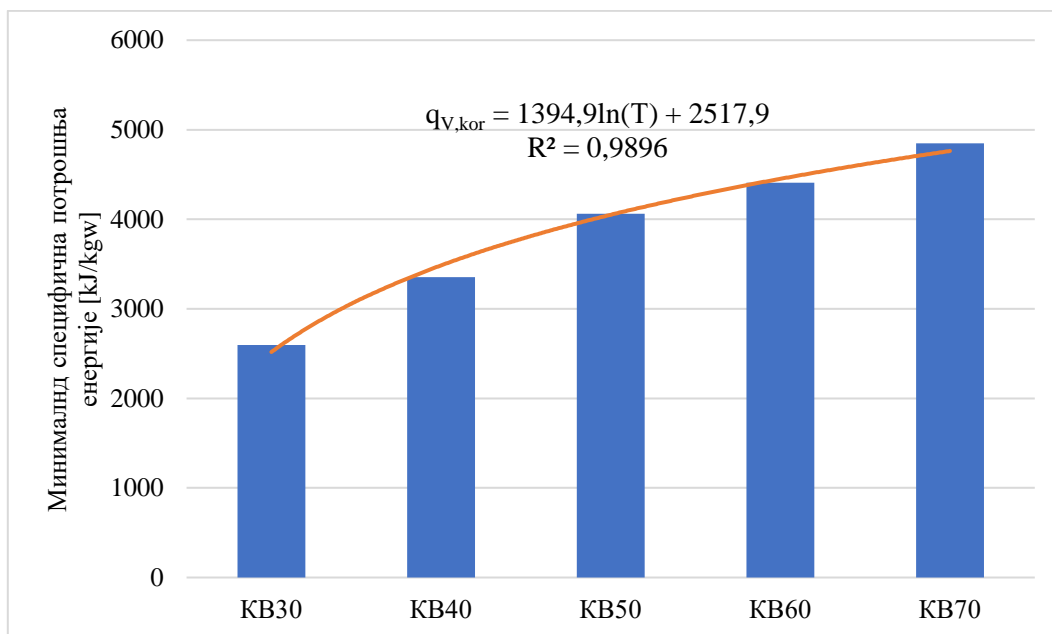


Слика 8.15: Специфична потрошња енергије са грејача ваздуха за троп нектарине за максимално могућу издвојену влагу.



Слика 8.16: Специфична потрошња енергије са грејача ваздуха за троп јабуке за максимално могућу издвојену влагу.

Као што се види са слика 8.15 и 8.16, вредности корисне специфичне потрошње енергије зависе од режима сушења, док дебљина узорка готово да нема никаквог утицаја. Може се, према томе, успоставити зависност између температуре ваздуха и корисне специфичне потрошње енергије са грејача, као што је приказано на Слици 8.17.



Слика 8.17: Корисна специфична потрошња енергије са грејача ваздуха

8.6.2. ПОТРОШЊА ЕНЕРГИЈЕ СА ГРЕЈНЕ ПОДЛОГЕ

У Табели 8.13 приказана је измерена потрошња електричне енергије са грејне подлоге, $Q_{gp, eksp}$ за режиме када је грејна подлога била укључена, за троп јабуке и нектарине.

Табела 8.13: Потрошња енергије са грејне подлоге у kWh

	Троп нектарине			Троп јабуке		
	5	7	10	5	7	10
КД50-КВ30	0,68	0,88	1,14	0,93	1	1,24
КД50-КВ40	0,56	0,72	0,97	/	/	/
КД50-КВ50	0,39	0,47	0,64	0,43	0,52	0,61
КД60-КВ30	0,73	0,83	1,1	1,1	1,24	1,48
КД60-КВ40	0,69	0,76	1,11	/	/	/
КД60-КВ50	0,52	0,58	0,89	0,55	0,7	0,81
КД60-КВ60	0,39	0,42	0,57	/	/	/
КД70-КВ30	0,8	0,87	1,12	1,2	1,44	1,67
КД70-КВ40	0,67	0,79	1,05	/	/	/
КД70-КВ50	0,56	0,65	0,98	0,82	0,97	1,42
КД70-КВ70	0,36	0,4	0,51	/	/	/

Фитовањем криве потрошње енергије са експерименталним резултатима закључено је да потрошња електричне енергије са грејне плоче у времену може бити апроксимирана степеном (Belehradek) функцијом :

$$Q_{gp} = c \cdot (\tau - d)^e \quad (8.4)$$

, где су c , d и e корелациони параметри. Функција показује добро слагање са свим експерименталним резултатима при којима је мерена потрошња са грејне подлоге са просечним слагањем од $R^2 = 0,9986$ за троп нектарине и $R^2 = 0,9995$ за троп јабуке. Коefицијенти за Behrgrdek функцију за троп нектарине и јабуке дати су у Табелама 8.14 и 8.15.

Табела 8.14: Коefицијенти Behrgrdek-ове функције за троп нектарине

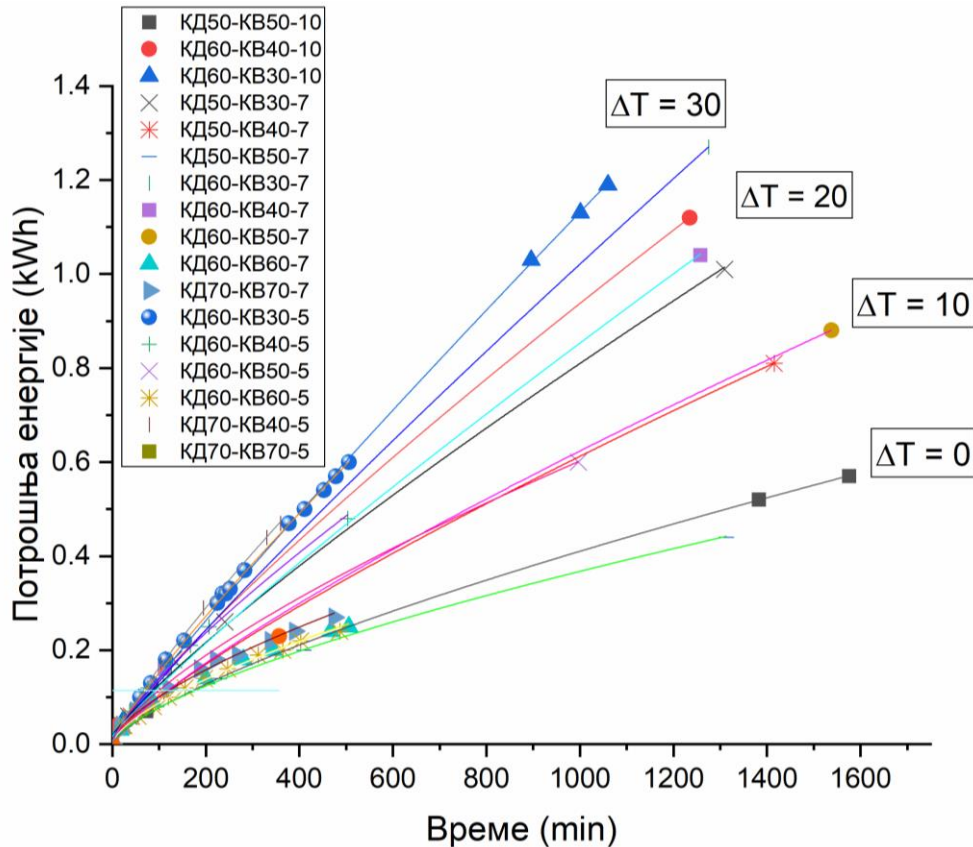
	$Q = c \cdot (\tau - d)^e$			
Троп нектарине	Коefицијенти			
Режим	c	d	e	R^2 (COD)
КД50-КВ50-10	0,0027	-123.502	0,72729	0,99971
КД60-КВ40-10	0,0027	-449.615	0,84691	0,99973
КД60-КВ30-10	0,002	-506.825	0,91673	0,99987
КД50-КВ30-7	0,0023	-1.201.709	0,84515	0,99844
КД50-КВ40-7	0,0022	-804.309	0,81272	0,9995
КД50-КВ50-7	0,0034	-125.869	0,67815	0,99921
КД60-КВ30-7	0,002	-512.787	0,90289	0,99984
КД60-КВ40-7	0,0019	-1.166.214	0,88331	0,9987
КД60-КВ50-7	0,0024	-296.464	0,80329	0,99972
КД60-КВ60-7	0,00403	-0,85224	0,6667	0,99604
КД70-КВ70-7	0,0047	-292.249	0,66309	0,99319
КД60-КВ30-5	0,0028	-36.074	0,86079	0,99942
КД60-КВ40-5	0,0035	-409.706	0,79489	0,998
КД60-КВ50-5	0,0041	-0,30761	0,72128	0,99974
КД60-КВ60-5	0,0042	-0,55966	0,657	0,99754
КД70-КВ40-5	0,0035	-0,64065	0,83512	0,99965
КД70-КВ50-5	0,0036	-214.038	0,81442	0,99762

Табела 8.15: Коefицијенти Behrgrdek-ове функције за троп нектарине

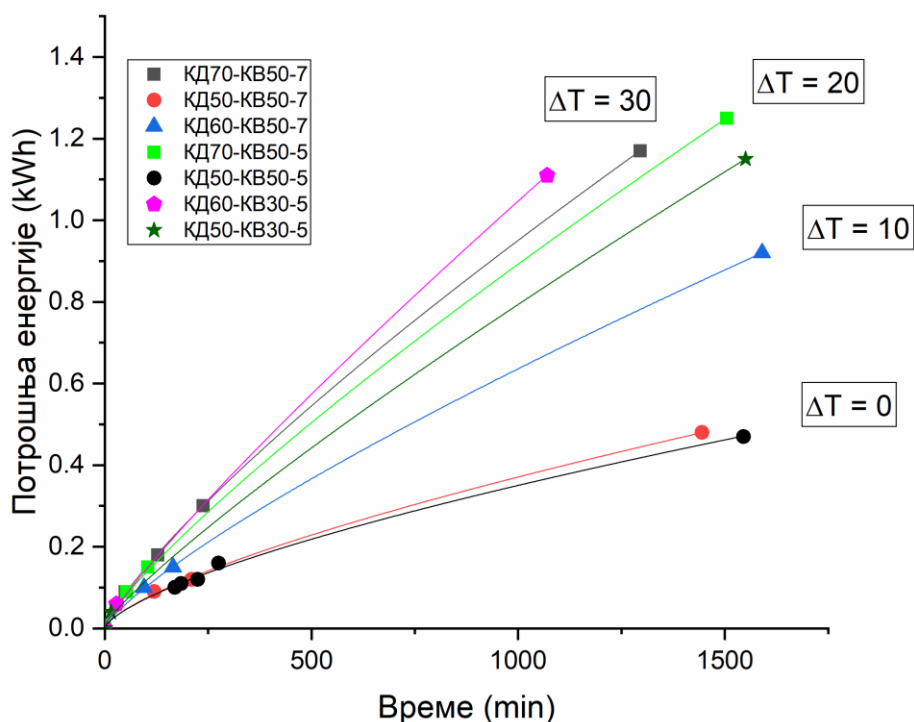
	$Q = c \cdot (\tau - d)^e$			
Троп јабуке	Коefицијенти			
Режим	c	d	e	R^2 (COD)
КД70-КВ50-5	0,0029	-423.366	0,82954	0,99978
КД50-КВ50-5	0,0032	-1,13E-17	0,68139	0,9978
КД60-КВ30-5	0,0025	-309.899	0,87166	0,99983
КД50-КВ30-5	0,0022	-529.294	0,8504	0,99975
КД70-КВ50-7	0,0032	-28.334	0,82344	0,99982
КД50-КВ50-7	0,0029	-0,0303	0,70197	0,99959
КД60-КВ50-7	0,0022	-233.207	0,81669	0,99987

Карактеристике потрошње са грејне подлоге

Потрошња енергије са грејне подлоге зависи највише од разлике температура грејне подлоге и топлог ваздуха, а у нешто мањој мери од температура сушења и дебљине узорака. На Слици 8.18 и 8.19 је приказан пораст потрошње енергије са грејне подлоге у времену за троп нектарине и јабуке. Као што се може видети, режими сушења са идентичном разликом температуре између грејне подлоге и ваздуха могу се груписати. Режији код којих не постоји градијент температуре између грејне подлоге и ваздуха показују најспорији тренд раста потрошње у времену. Са порастом разлике између грејне подлоге и ваздуха расте и потрошња енергије, тако да је потрошња енергије са грејне подлоге највећа за режими са великом температурском разликом.



Слика 8.18: Потрошња електричне енергије у времену са грејне подлоге за троп нектарине



Слика 8.19: Потрошња електричне енергије у времену са грејне подлоге за троп јабуке

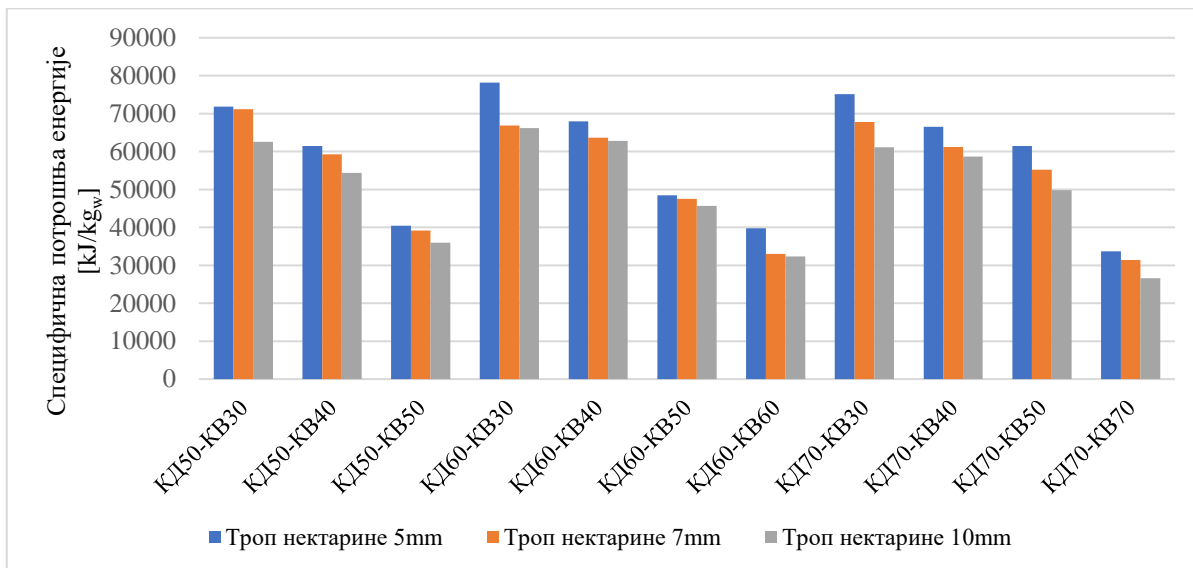
Експерименти при којима у току процеса сушења није постојао градијент температуре су уједно и режими са најмањом потрошњом енергије. Уколико се анализирају режими сушења исте дебљине узорака са истом температурском разликом и између грејне подлоге и ваздуха, може се закључити да са повећањем температура потрошња енергије благо расте. Потрошња енергије са грејне подлоге такође у мањој мери зависи од дебљине материјала, што се може приметити анализом слике 8.18 за режимо сушења КД50-КВ50-7 и КД50-КВ50-10, као и анализом слике 8.19 за режимо сушења КД50-КВ50-5 и КД50-КВ50-7. При идентичном режиму сушења, највећа потрошња енергије је потребна за сушење при сушењу узорака од 10mm дебљине, а најнижа за узорке од 5mm.

У Табели 8.16 је дата специфична потрошња енергије по килограму издвојене влаге из материјала рачуната према формули (7.7):

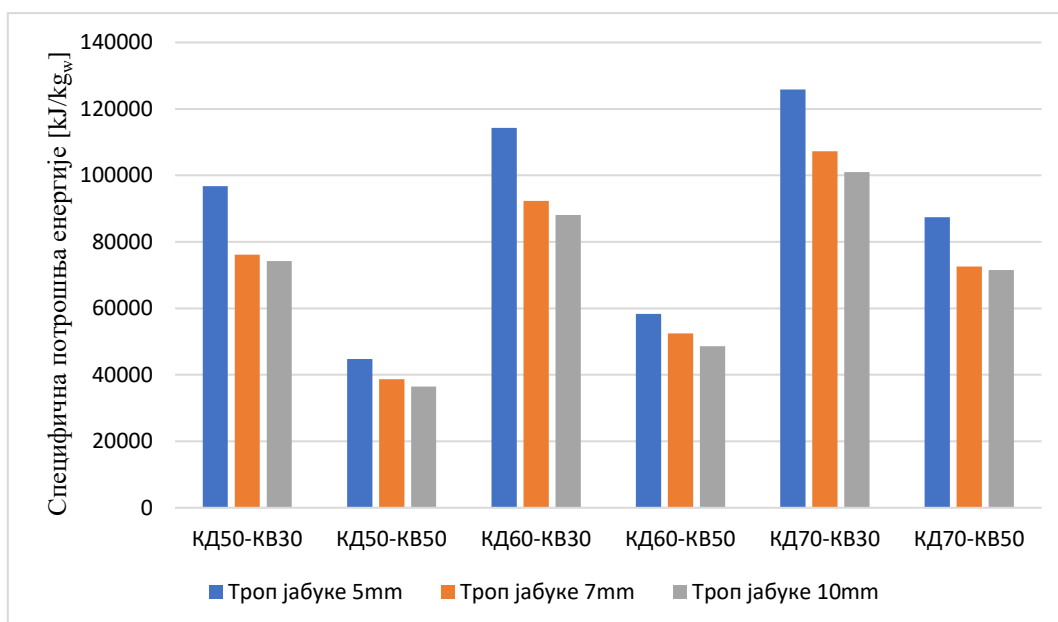
Табела 8.16: Специфична потрошња са грејне подлоге за сваки експеримент у kJ/kg_w

	Троп нектарине			Троп јабуке		
	5mm	7mm	10mm	5mm	7mm	10mm
КД50-КВ30	68173	71156	62511	96771	76146	74250
КД50-КВ40	56130	59232	54364	/	/	/
КД50-КВ50	40415	39212	35924	44711	38714	36478
КД60-КВ30	73148	65258	61163	114298	92321	88097
КД60-КВ40	67928	63689	62791	/	/	/
КД60-КВ50	48420	44534	49382	58375	52496	48606
КД60-КВ60	39766	32998	32328	/	/	/
КД70-КВ30	79099	67758	62236	125829	107230	100996
КД70-КВ40	66483	61242	58694	/	/	/
КД70-КВ50	56433	50289	55662	87467	72577	86675
КД70-КВ70	33696	31426	26627	/	/	/

На Сликама 8.20 и 8.21 је дата специфична потрошња енергије према формули (7.7).



Слика 8.20: Специфична потрошња са грејне подлоге за троп нектарине



Слика 8.21: Специфична потрошња са грејне подлоге за троп јабуке

Корисна специфична потрошња енергије при датим условима сушења

Топлотна снага грејача грејне подлоге $P_{el,gp} = 130W$ равномерно је распоређена на грејну подлогу површине $A_{gp} = 0,09m^2$. Површина коју су заузимали узорци постављени на грејну подлогу износила је $A_{uz} = 0,00785m^2$. Да би се израчунала корисна потрошња енергије, тј. енергија коришћена за загревање површине узорка, може се експериментално добијена потрошња енергије помножити односом површине узорка и грејне подлоге:

$$Q_{gp,kor} = Q_{gp} \frac{A_{uz}}{A_{gp}} \quad (8.5)$$

Према томе, корисна специфична потрошња енергије са грејне подлоге добија се када се корисна потрошња енергије подели експериментално добијеном масом издвојене влаге за сваки експеримент, тј.:

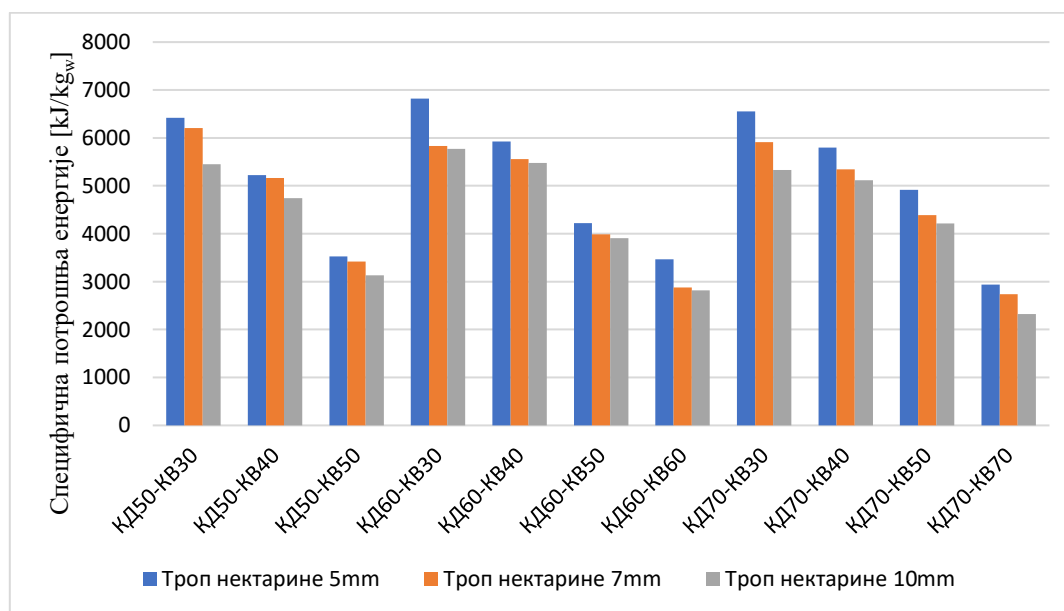
$$q_{gp,kor} = \frac{Q_{gp,kor}}{m_{w,eksp.}} \quad (8.6)$$

, при чему је експериментално добијена маса издвојене влаге за сваки експеримент дата у **Прилогу 12.3**. Уколико потрошњу енергије израчунамо према формули (8.6) добијају се вредности специфичне потрошње енергије са грејне подлоге дати у Табели 8.17:

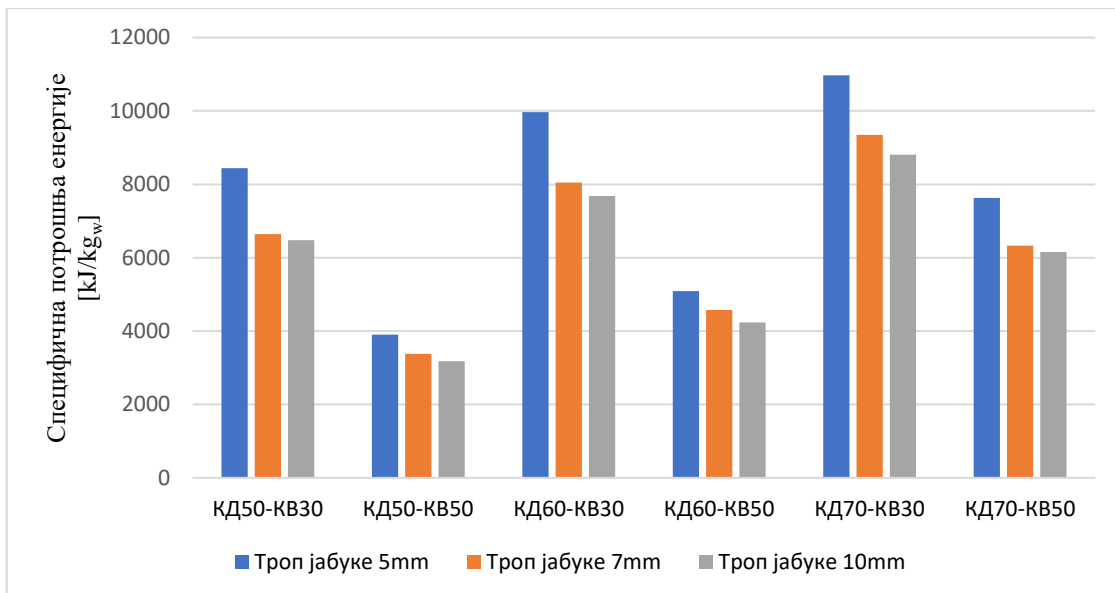
Табела 8.17: Корисна специфична потрошња енергије са грејне подлоге

	Троп нектарине			Троп јабуке		
	5mm	7mm	10mm	5mm	7mm	10mm
КД50-КВ30	6420	6206	5452	8441	6642	6476
КД50-КВ40	5221	5166	4742	/	/	/
КД50-КВ50	3525	3420	3133	3900	3377	3182
КД60-КВ30	6817	5829	5771	9969	8052	7684
КД60-КВ40	5925	5555	5477	/	/	/
КД60-КВ50	4223	3986	3905	5092	4579	4239
КД60-КВ60	3468	2878	2820	/	/	/
КД70-КВ30	6554	5910	5331	10975	9353	8809
КД70-КВ40	5799	5342	5119	/	/	/
КД70-КВ50	4918	4386	4215	7629	6330	6152
КД70-КВ70	2939	2741	2322	/	/	/

На сликама 8.22. и 8.23 је приказана специфична минимална потрошња са грејне подлоге за троп нектарине и јабуке.



Слика 8.22 : Минимална специфична потрошња са грејне подлоге за троп нектарине



Слика 8.23 : Минимална специфична потрошња са грејне подлоге за троп јабуке

8.6.3. УКУПНА ПОТРОШЊА ЕНЕРГИЈЕ

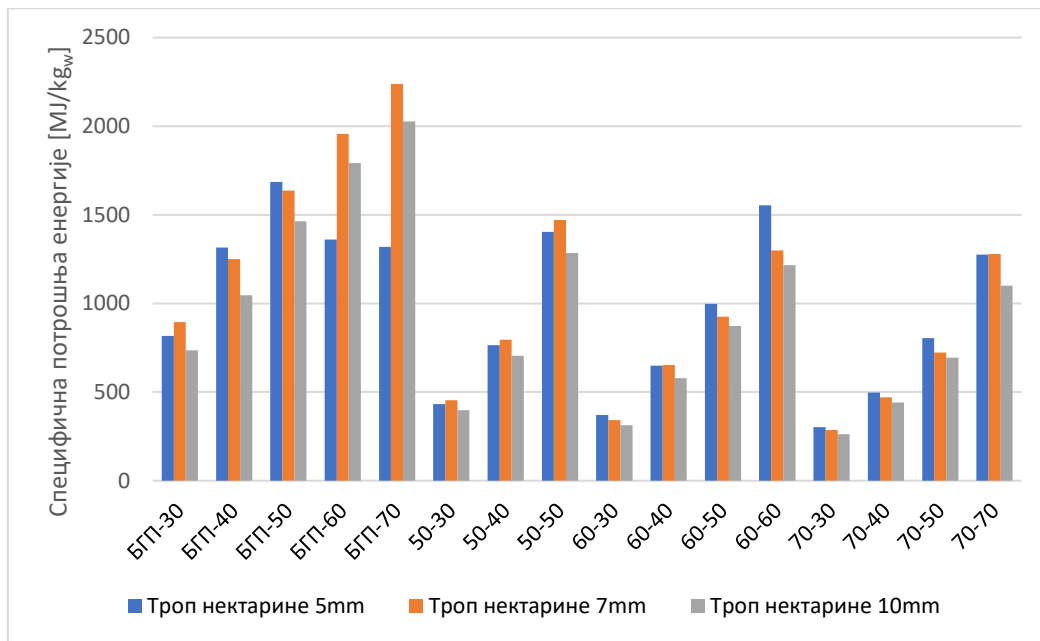
Може се израчунати укупна потрошња енергије за сушење за сваки режим сушења као збир потрошње енергије на загревање ваздуха и грејне подлоге где је била коришћена. Формула за израчунавање потрошње се састоји из два члана, где први представља потрошњу грејача за загревање ваздуха, а други део потрошњу са грејне подлоге.

$$Q_{uk} = Q_V + Q_{gp} = a \cdot \tau + b + c \cdot (d - \tau)^e \quad (8.7)$$

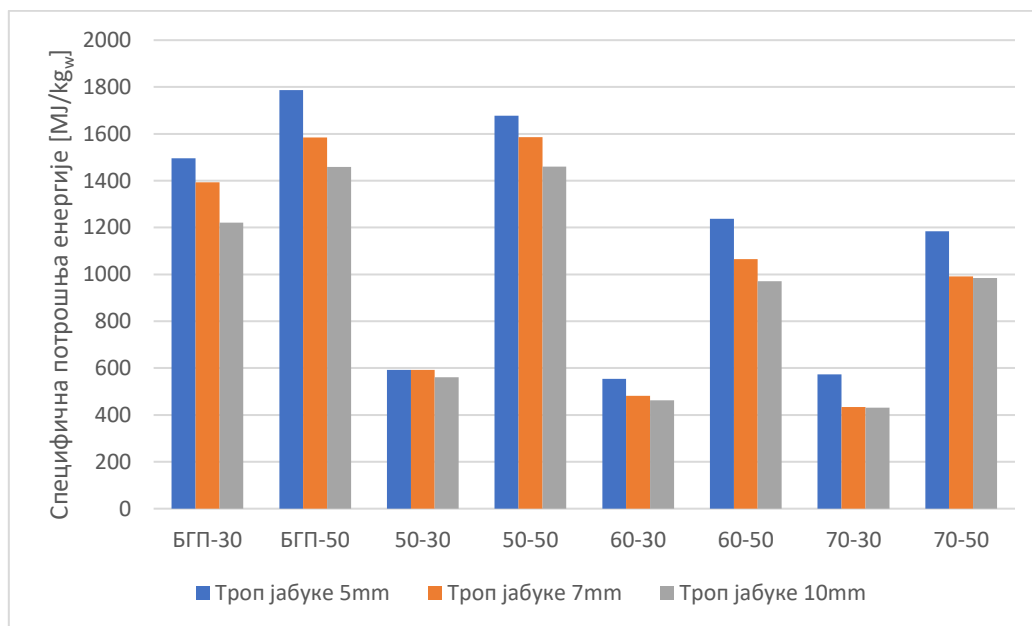
Где су а, b, c, d и e коефицијенти из Табела 8.10, 8.14 и 8.15.

Експериментално одређена укупна потрошња енергије

Када се укупна количина енергије добијена формулом (8.7) подели масом издвојене влаге из узорка, добија се укупна експериментална специфична потрошња енергије, дата на сликама 8.24 и 8.25 за троп нектарине и јабуке.



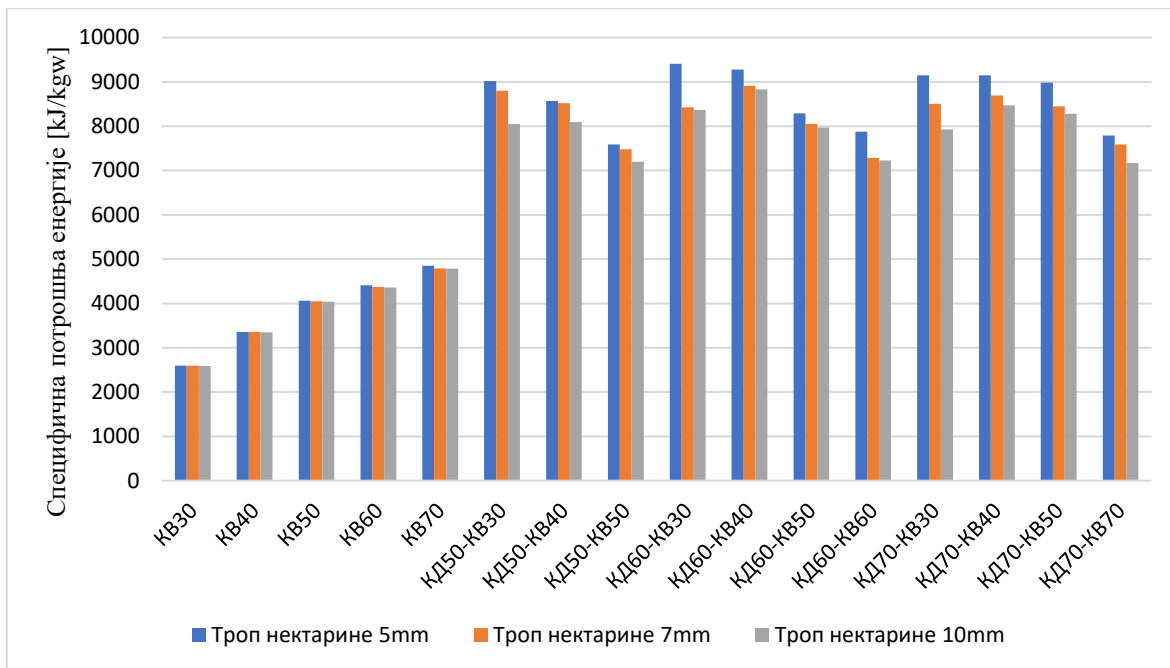
Слика 8.24: Укупна експериментална специфична потрошња енергије за комбиновано сушење тропа нектарине



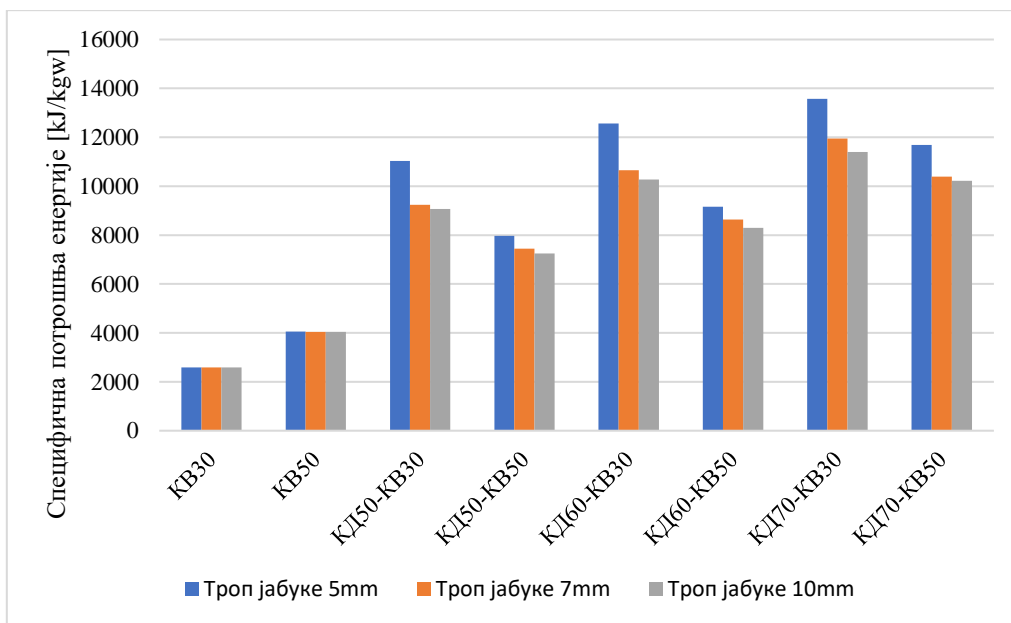
Слика 8.25: Укупна специфична потрошња енергије за комбиновано сушење тропа јабуке

Укупна корисна специфична потрошња

Када се корисне специфичне количине енергије добијене формулама (8.3) и (8.6) саберу, добија се минимална специфична потрошња енергије, дата на сликама 8.26 и 8.27 за троп нектарине и јабуке.



Слика 8.26: Укупна специфична потрошња енергије за комбиновано сушење тропа нектарине



Слика 8.27: Укупна специфична потрошња енергије за комбиновано сушење тропа јабуке

Може да се направи упоредни приказ специфичне потрошње и времена сушења за конвективно и кондуктивно-конвективно сушење за различите режиме сушења. На Слици 8.28 је дат упоредни приказ времена сушења и специфичне потрошње енергије за троп нектарине узорка дебљине 7mm.

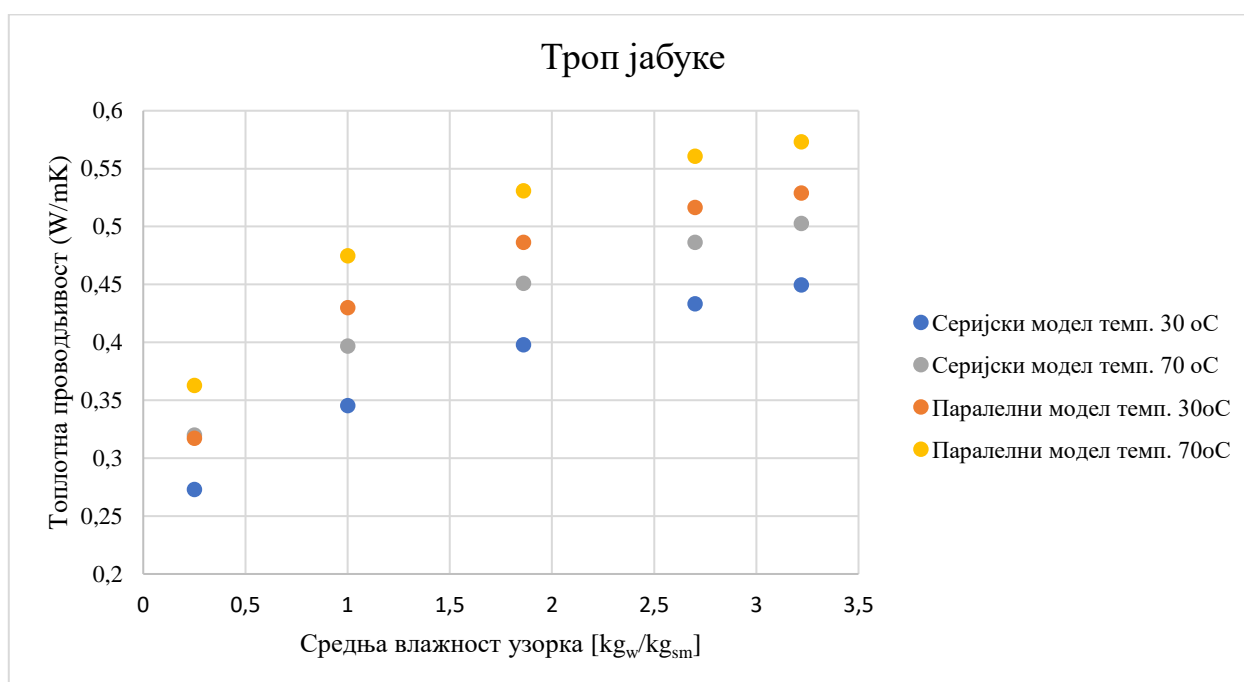


Слика 8.28: Упоредни приказ времена сушења и специфичне потрошње за троп нектарине дебљине 7mm

8.7. ТОПЛОТНА ПРОВОДЉИВОСТ

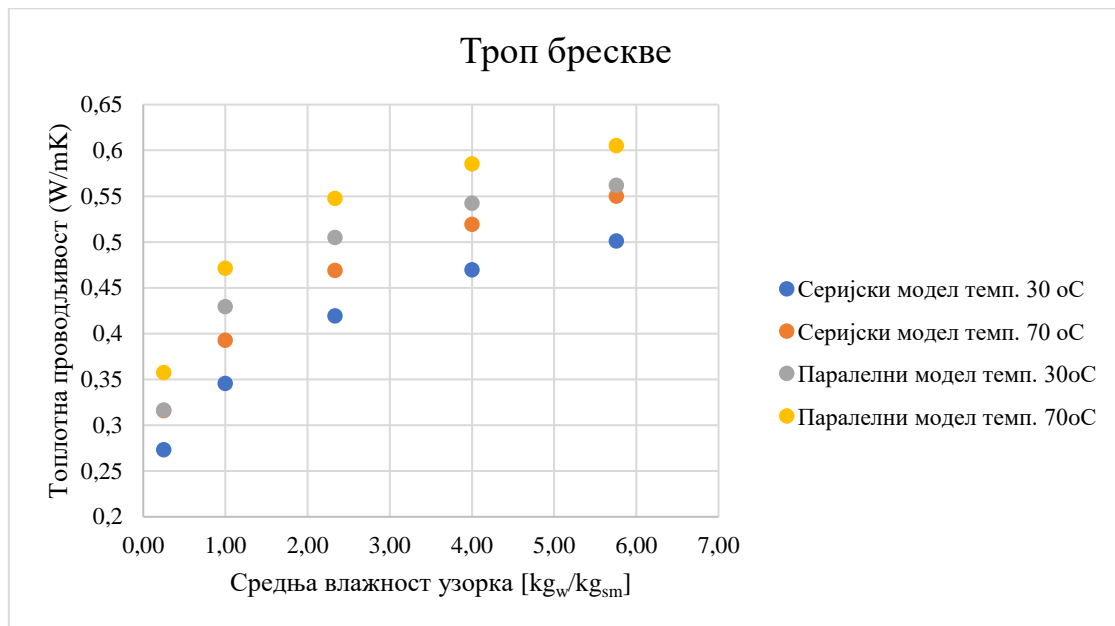
Одређивање топлотне проводљивости помоћу модела

На основу Серијског и Паралелног модела објашњеним у Поглављу 6.3, израчунаће се вредност ефективне топлотне проводљивости за воћног тропа за различите вредности температуре и садржаја воде, под претпоставком да се приликом процеса сушења издваја само вода. Анализа је урађена за троп јабуке, а како у литератури нису пронађени подаци о саставу тропа нектарине, анализа је урађена за троп брескве, који је материјал најсличнији тропу нектарине. На основу једначина (6.10), (6.13) и (6.3-6.7) и усвајајући састав материјала из Табеле 6.3, израчунате су вредности ефективне топлотне проводљивости тропа јабуке и брескве, а резултати приказани на Сликама 8.29 и 8.30.



Слика 8.29: Предвиђена зависност топлотне проводљивости тропа јабуке од средњег садржаја воде урађена према паралелном и серијском моделу за температуру материјала 30 и 70°C

Приликом сушења прехранбених производа, са смањењем садржаја воде долази до смањења вредности топлотне проводљивости. То је последица тога да вода има највећу вредност топлотне проводљивости од свих осталих компоненти прехранбених материјала. Према предвиђеним вредностима, температура има мањи утицај на топлотну проводљивост од садржаја воде, али се примећује тренд раста ефективне топлотне проводљивости са повећањем температуре.



Слика 8.30 : Предвиђена зависност топлотне проводљивости тропа брескве од садржаја воде и температуре

Као што се види са слика, модели предвиђају пораст топлотне проводљивости са порастом средње влажности материјала, при чему су вредности добијене за паралелни модел више од вредности добијених за серијски модел, што је у сагласности са теоријским претпоставкама датим у Поглављу 6.3.

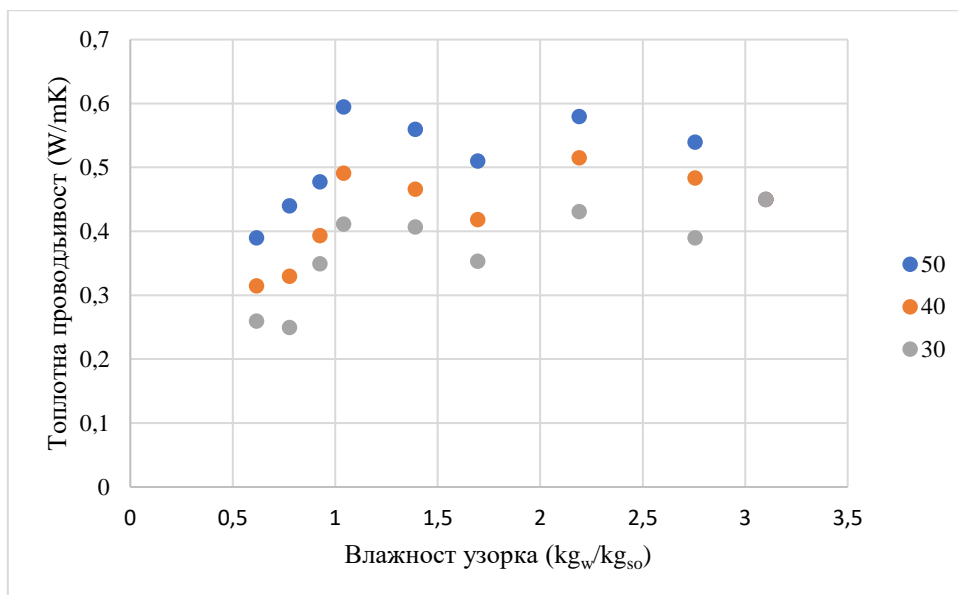
Експериментални резултати

Приликом експерименталних истраживања, мерење топлотне проводљивости воћног тропа извршено је на две површине материјала: горњој – изложеној топлотом ваздуху, и доњој – која је била постављена на алуминијумску фолију. У току процеса сушења у пећи на температурама од 50, 70 и 90 °C, долазило је до неједнаке промене топлотне проводљивости на горњој и доњој површини материјала.

На доњој површини материјала, услед немогућности одавања воде због фолије, топлотна проводљивост се није много мењала у току сушења, све до каснијих фаза сушења, индукујући да на вредност топлотне проводљивости значајан утицај има влажност материјала. С друге стране, на горњој површини материјала, изложеној топлотом ваздуху, у току сушења у пећи долази до стварања корице на материјалу што постепено доводи до смањења топлотне проводљивости на овој површини. Из наведеног се може закључити да на вредност топлотне проводљивости утиче веома значајно начин довођења топлотног протока материјалу.

Топлотна проводљивост је мерена прво на свешим узорцима на амбијенталној температури и просечна вредност за троп јабуке и нектарине је износила 0,430 и 0,463 W/mK, респективно.

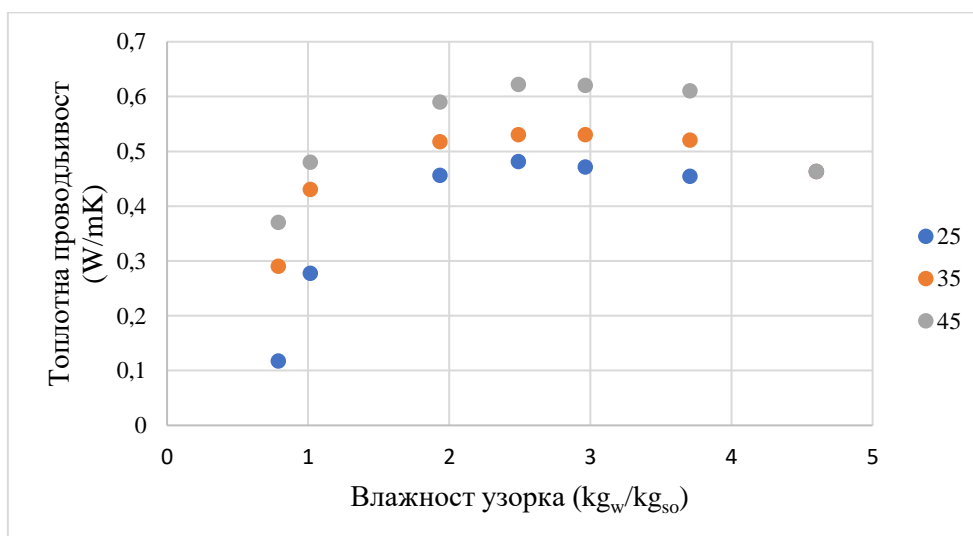
На слици 8.31 је дат приказ измерених вредности топлотне проводљивости тропа јабуке при различитом садржају воде и температуре.



Слика 8.31 : Промена вредности топлотне проводљивости доње површине тропа јабуке сушеног на температури од 90°C у зависности од температуре материјала

На слици се види да вредност топлотне проводљивости тропа јабуке остаје приближно константна са благим осцилацијама, све до вредности средње влажности материјала од 1 kg_w/kg_{so}, после чега вредност топлотне проводљивости нагло опада. Осцилације у измереним вредностима се могу приписати нехомогености материјала што доводи до разлика у измереним вредностима топлотне проводљивости код појединачних узорака материјала.

На слици 8.32 је дат карактер промене топлотне проводљивости тропа нектарине са средњом влажношћу материјала и температуром. Као и код тропа јабуке, вредност топлотне проводљивости јасно расте са порастом температуре. Што се тиче зависности топлотне проводљивости од средње влажности на доњој површини материјала у току процеса сушења тропа нектарине, може се видети да њена вредност остаје приближно константна до вредности средње влажности материјала од 2 kg_w/kg_{so}, после чега нагло почиње да опада.

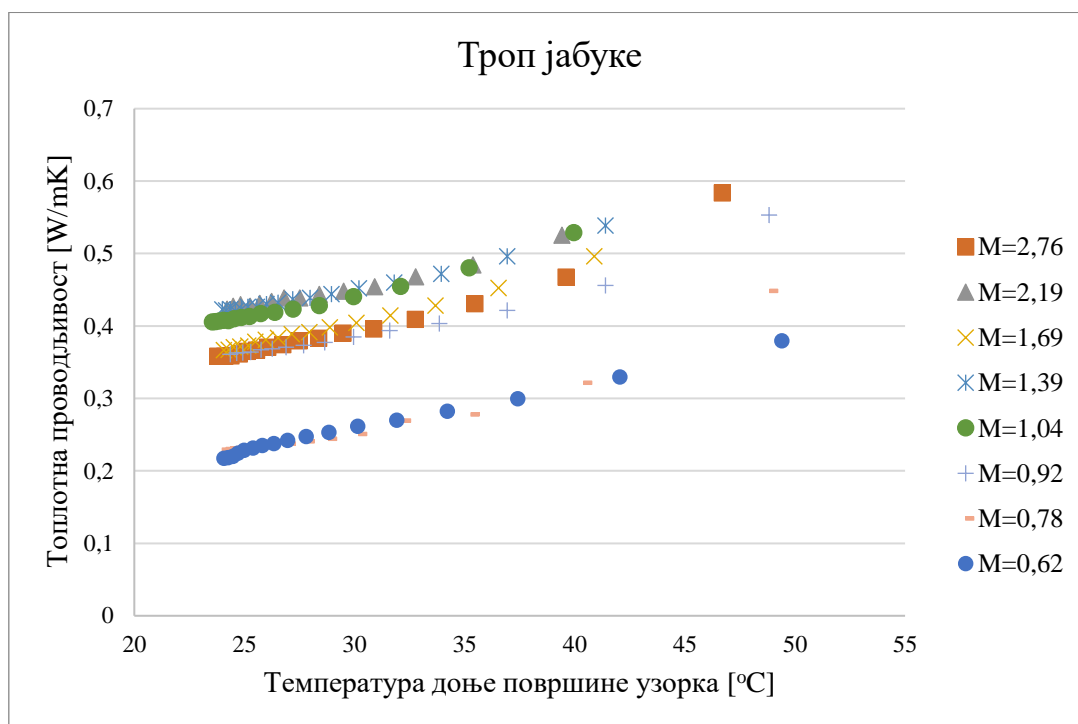


Слика 8.32: Промена вредности топлотне проводљивости доње површине тропа нектарине сушеног на температури од 90°C у зависности од температуре материјала

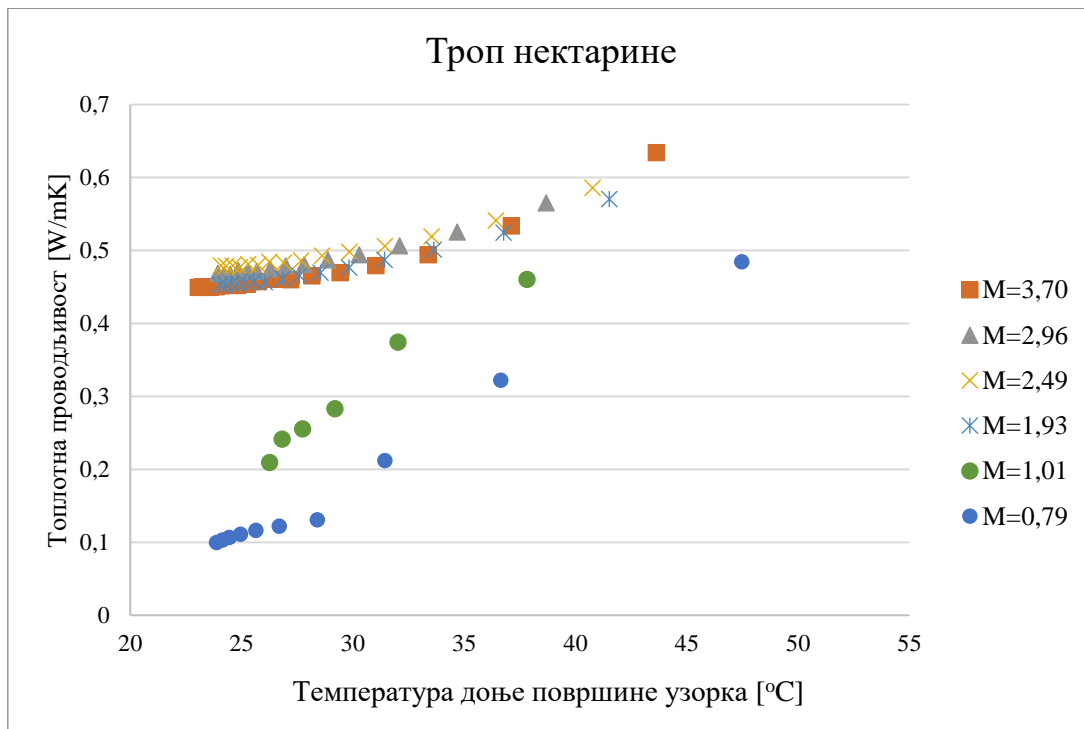
Примећује се да вредност топлотне проводљивости тропа јабуке осцилује више од вредности топлотне проводљивости тропа нектарине. Ово може да се објасни структуром и природом

материјала, тј. због веће нехомогености, троп јабуке има веће осцилације у измереној вредности топлотне проводљивости.

На Слици 8.33 и 8.34 приказан је карактер промене вредности топлотне проводљивости доње површине материјала тропа јабуке и нектарине у зависности од температуре, при константном садржају влаге. Види се да са порастом температуре, расте и вредност топлотне проводљивости. Карактер промене топлотне проводљивости доњих површина узорака тропа јабуке и нектарине остаје приближно непромењен до одређеног садржаја влаге, после ког вредност топлотне проводљивости нагло опада. Пад топлотне проводљивости се дешава испод вредности садржаја влаге $0,92 \text{ kg}_w/\text{kg}_{s0}$ за троп јабуке, односно $1,93 \text{ kg}_w/\text{kg}_{s0}$ за троп нектарине.

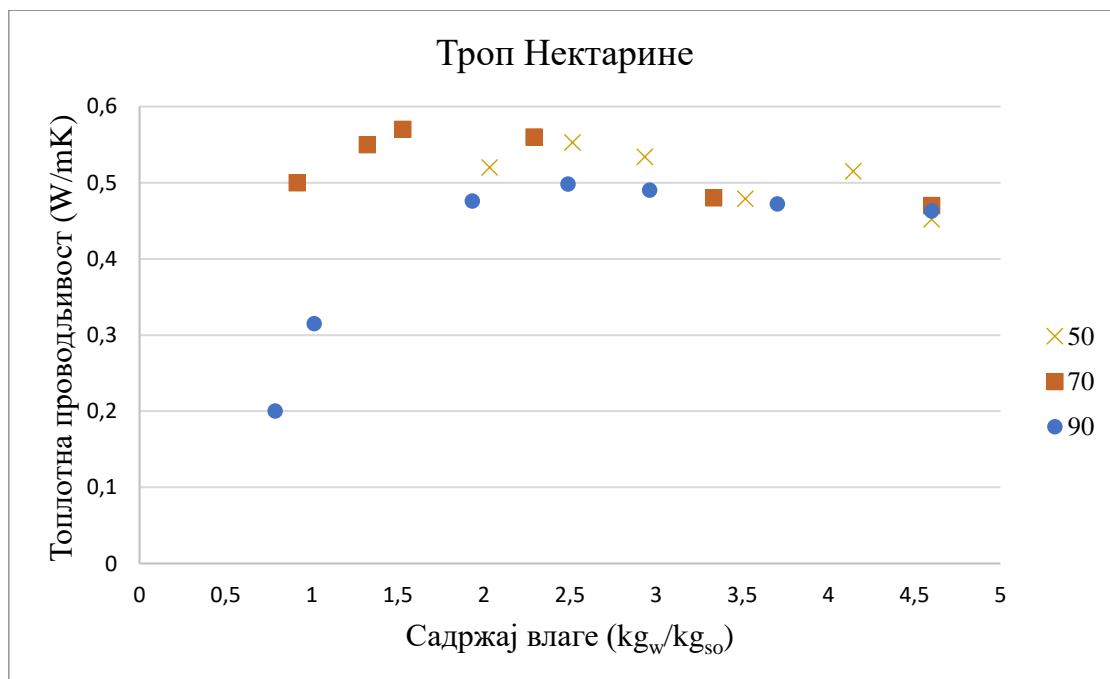


Слика 8.33: Промена топлотне проводљивости јабучног тропа са температуром на доњој површини узорка.

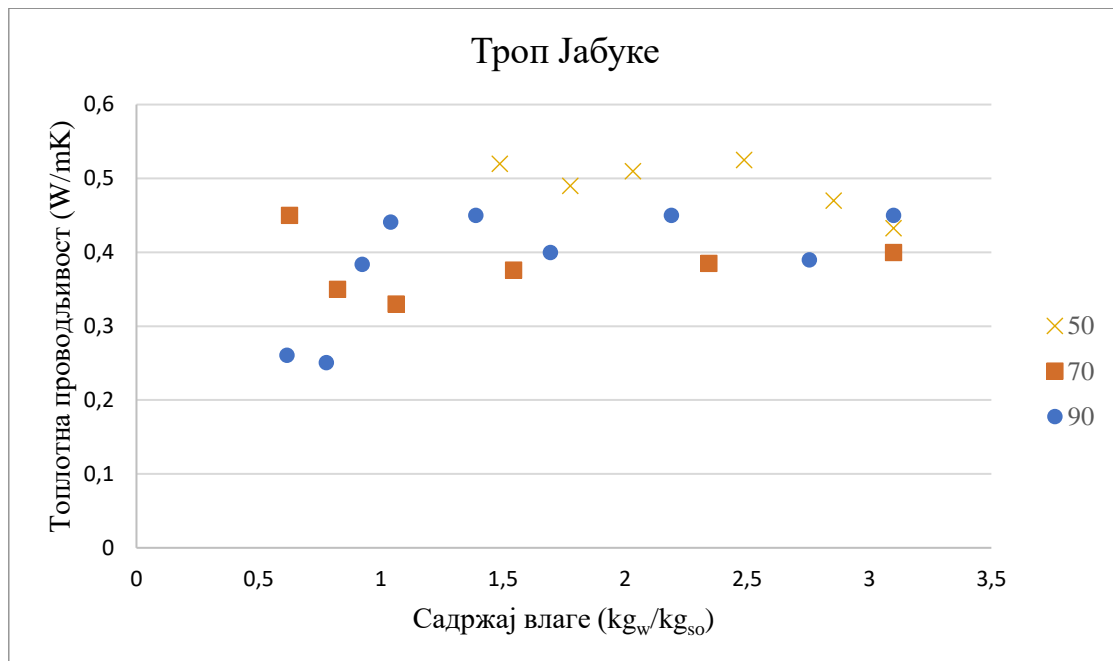


Слика 8.34: Промена топлотне проводљивости тропа нектарине са температуром на доњој површини узорка.

Да би се испитао утицај температуре сушења на мерење топлотне проводљивости, вредност топлотне проводљивости је мерена приликом сушења на 3 различите температуре ваздуха у пећи – 50, 70 и 90°C. На Сликама 8.35 и 8.36 су дати сумирани резултати топлотних проводљивости узорака тропа нектарине и јабуке температуре 30°C при различитим режимима сушења.



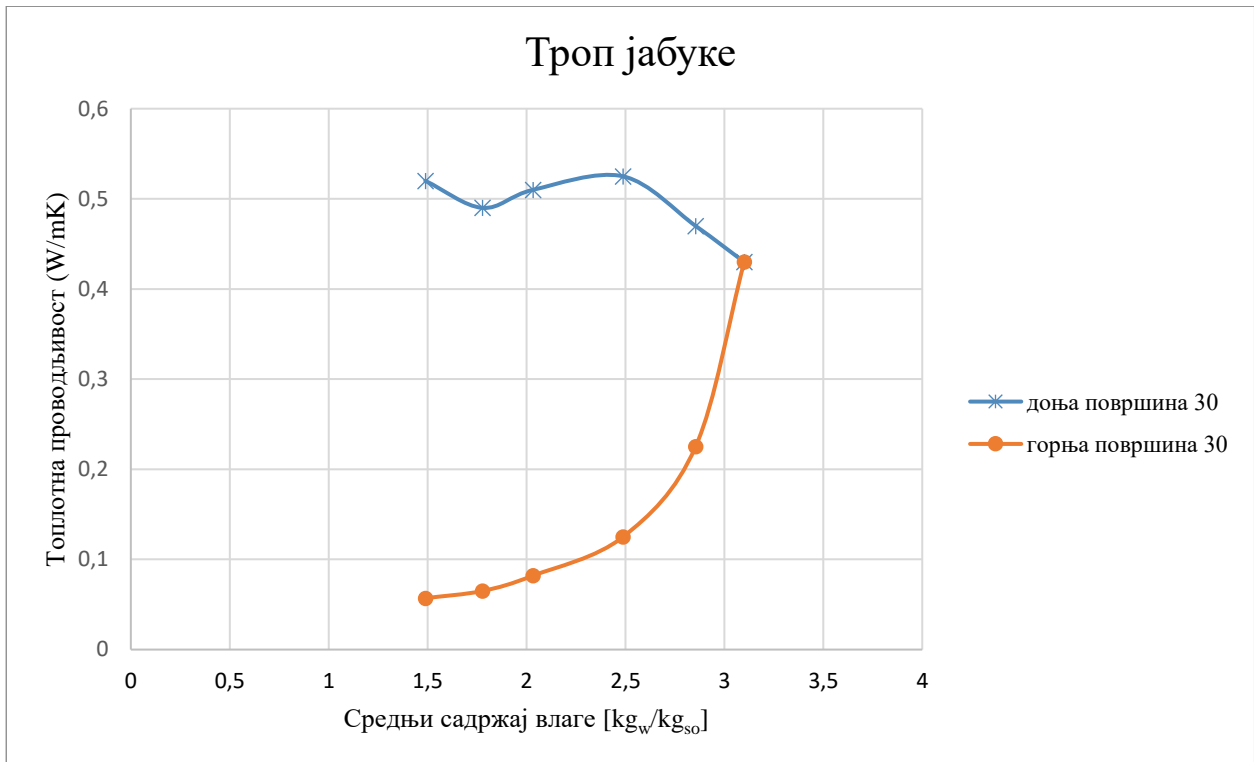
Слика 8.35: Троп нектарине температуре 30°C сушен при различитим температурама ваздуха у пећи



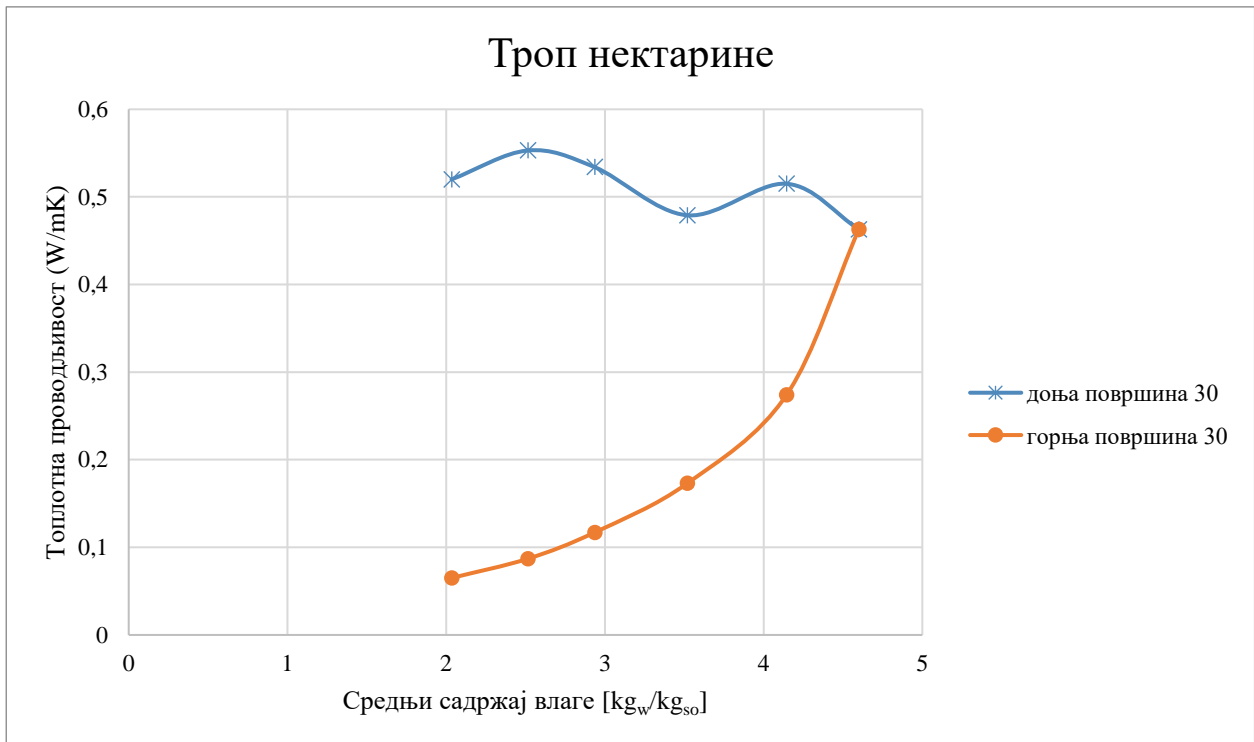
Слика 8.36: Троп јабуке температуре 30°C сушен при различитим температурама ваздуха

Може се закључити да су измерене вредности топлотних проводљивости тропа нектарине температуре 30°C уједначене за све 3 температуре сушења до садржаја влаге од 2 kg_w/kg_{so} и крећу се од 0,48-0,55 W/mK. За троп јабуке вредности топлотних проводљивости више варирају, за садржај влаге до 1,5 kg_w/kg_{so} крећу се од 0,38-0,53 W/mK.

У другој серији експеримената, мерена је топлотна проводљивост на горњој површини материјала – корици. Уколико се упореди вредност топлотне проводљивости на горњој и доњој површини узорака у току процеса сушења остатака из производње сокова, може се закључити да се вредност топлотне проводљивости корице знатно брже смањује са смањењем влажности узорка у односу на вредност горње површи. На сликама 8.37 и 8.38 се може видети карактер промене топлотне проводљивости са садржајем влаге.



Слика 8.37: Топлотна проводљивост доње површине и корице тропа јабуке на температури 30°C (сушеног на 50°C)



Слика 8.38: Топлотна проводљивост доње површине и корице тропа нектарине температуре 30°C, (сушеног на 50°C)

Специфичност комбинованог кондуктивно-конвективног довођења топлотног протока материјалу огледа се у различитим вредностима топлотне проводљивости материјала на две граничне површине материјала, тј. на оној изложеној топлом ваздуху и оној на грејној површи. На горњој површини материјала, која је изложена топлом ваздуху, услед губитка влаге и повлачења фронта испаравања, долази до стврдњавања материјала што доводи до

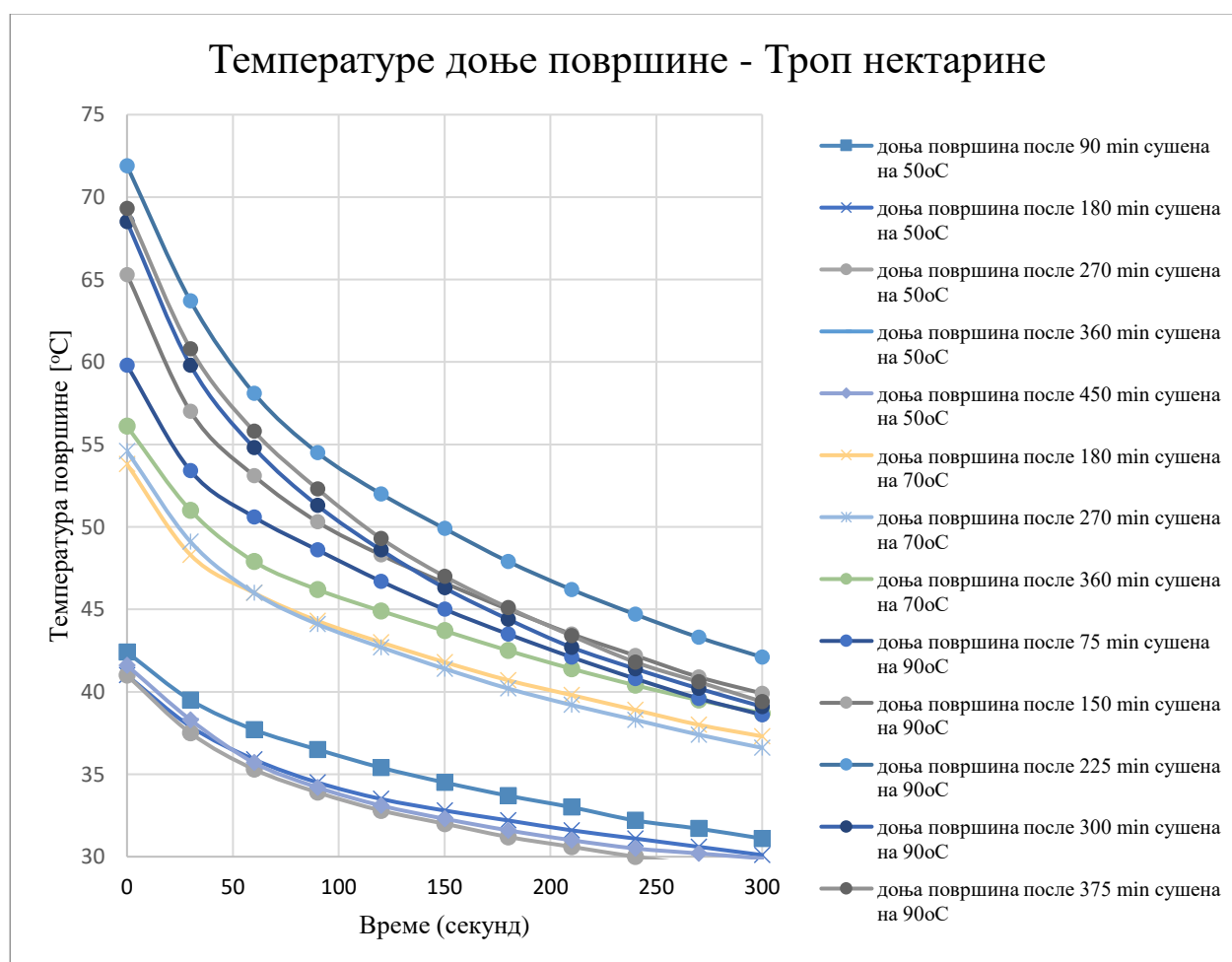
наглог смањења вредности топлотне проводљивости са смањењем садржаја воде, а самим тим и смањења размене топлоте између материјала и околног ваздуха. Са друге стране, доња површина материјала која је у контакту са грејном подлогом остаје влажна до крајњих фаза процеса сушења, па се самим тим и вредност топлотне проводљивости одржава приближно константном до крајњих фаза сушења.

За реалне услове сушења, присутне у лабораторијским и индустријским сушарама од значаја је познавање вредности топлотне проводљивости на граничним површинама сушеног материјала. Дрastiчно већа вредност топлотне проводљивости на доњој површини материјала указује на ефикасност кондуктивног довођења топлоте овој врсти материјала и предност у односу на конвективно довођење топлотног протока.

8.8. ТЕМПЕРАТУРА ПОВРШИНЕ МАТЕРИЈАЛА У ТОКУ СУШЕЊА

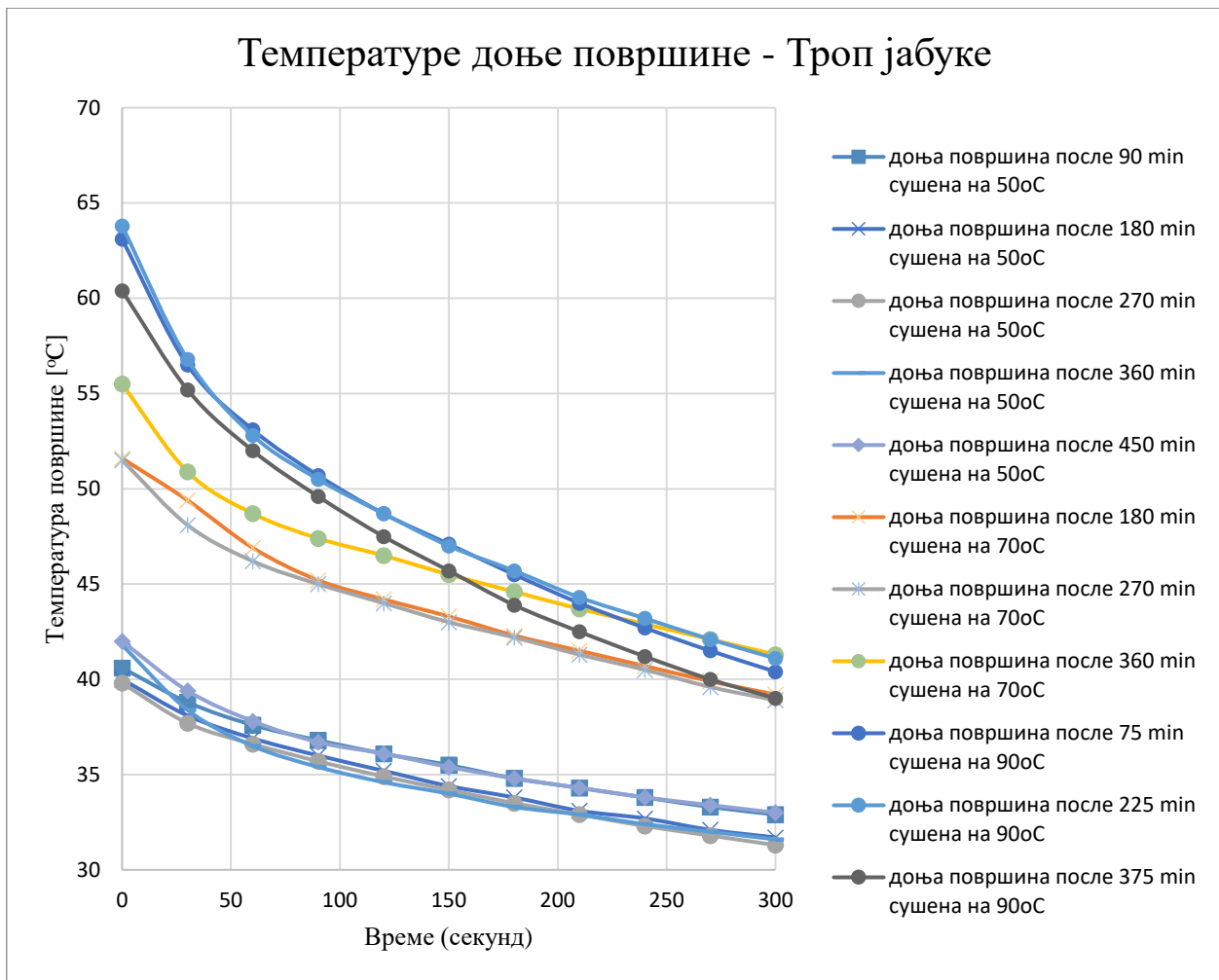
Мерена је температура површине воћног остатка (тропа) у току процеса сушења у пећи при чему је свеж узорак постављен на фолију, тако да му је једна страна у контакту са топлим ваздухом у пећи, док је доња страна, која је на фолији постављена на лесе пећи. Тиме се постижу приближно слични услови као код кондуктивно-конвективног сушења у експерименталној сушари, при режиму када је температура вадзуха и грејне површи идентична. Мерење температуре вршено је приликом сушења у пећи при температурама сушења од 50, 70 и 90°C. Узорци су из пећи вађени у одређеном временском интервалу, мерена им је температура површина током периода 5 минута, а затим и маса да би се установио садржај влаге узорака.

На сликама 8.39 и 8.40 дате су вредности температуре доње површине узорака за троп нектарине и јабуке при сушењу температурама 50, 70 и 90°C.



Слика 8.39: Температуре доње површине тропа нектарине за различит садржај влаге

Са Сlike се види да при сушењу температуром од 50 °C температура доње површине тропа нектарине одмах по вађењу из пећи има температуру између 41 и 43 °C. Температура доње површине узорака сушених на 70 °C износи између 54 и 56 °C, док узорци сушени на 90 °C имају температуру доње површи између 60 и 72 °C.



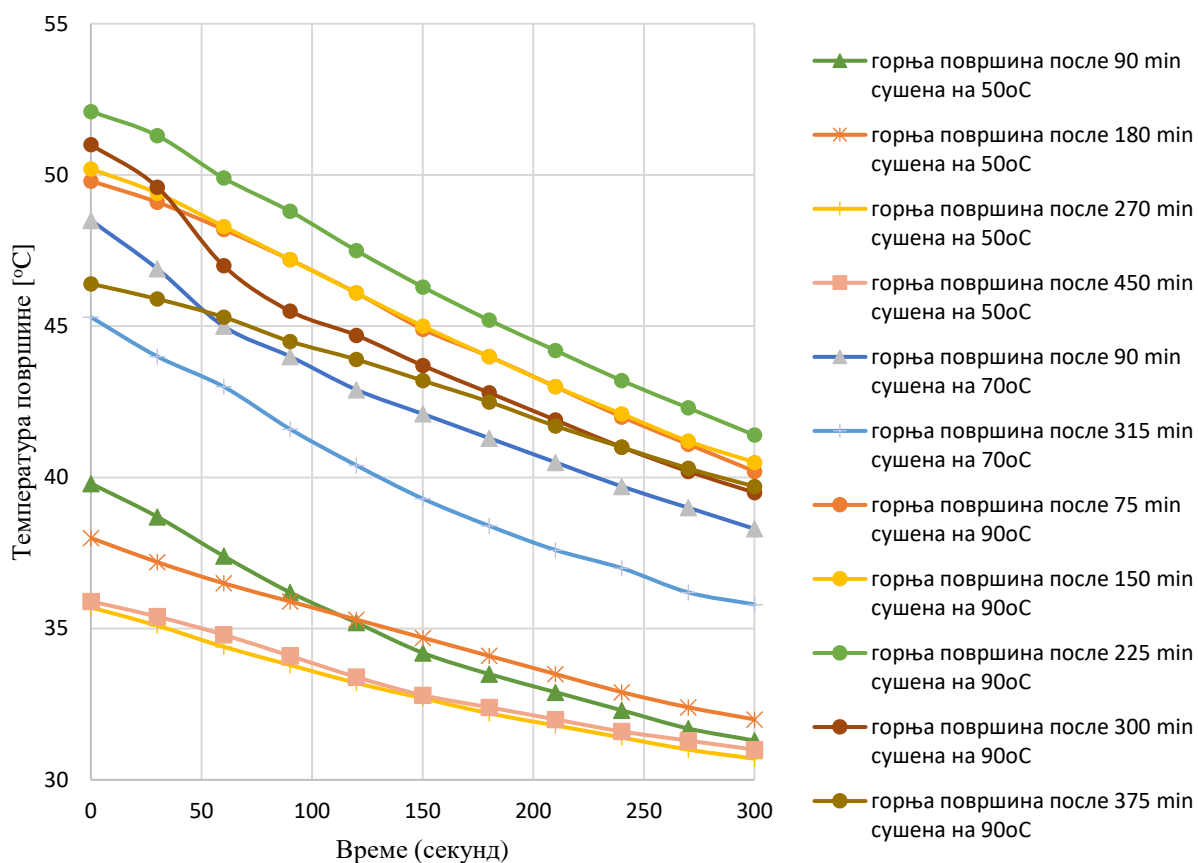
Слика 8.40: Температуре доње површине троп јабуке за различит садржај влаге

Када је реч о доњој површини троп јабуке, при сушењу температуром од 50 °C температура доње површине материјала одмах по вађењу из пећи има температуру између 39,8 и 42 °C. Температура доње површине узорка сушених на 70 °C износи између 51,5 и 55,5 °C, док узорци сушени на 90 °C имају температуру доње површине између 60 и 63,8 °C.

На сликама 8.41 и 8.42 дате су вредности температуре корице узорка за троп нектарине и јабуке при сушењу температурама 50, 70 и 90°C.

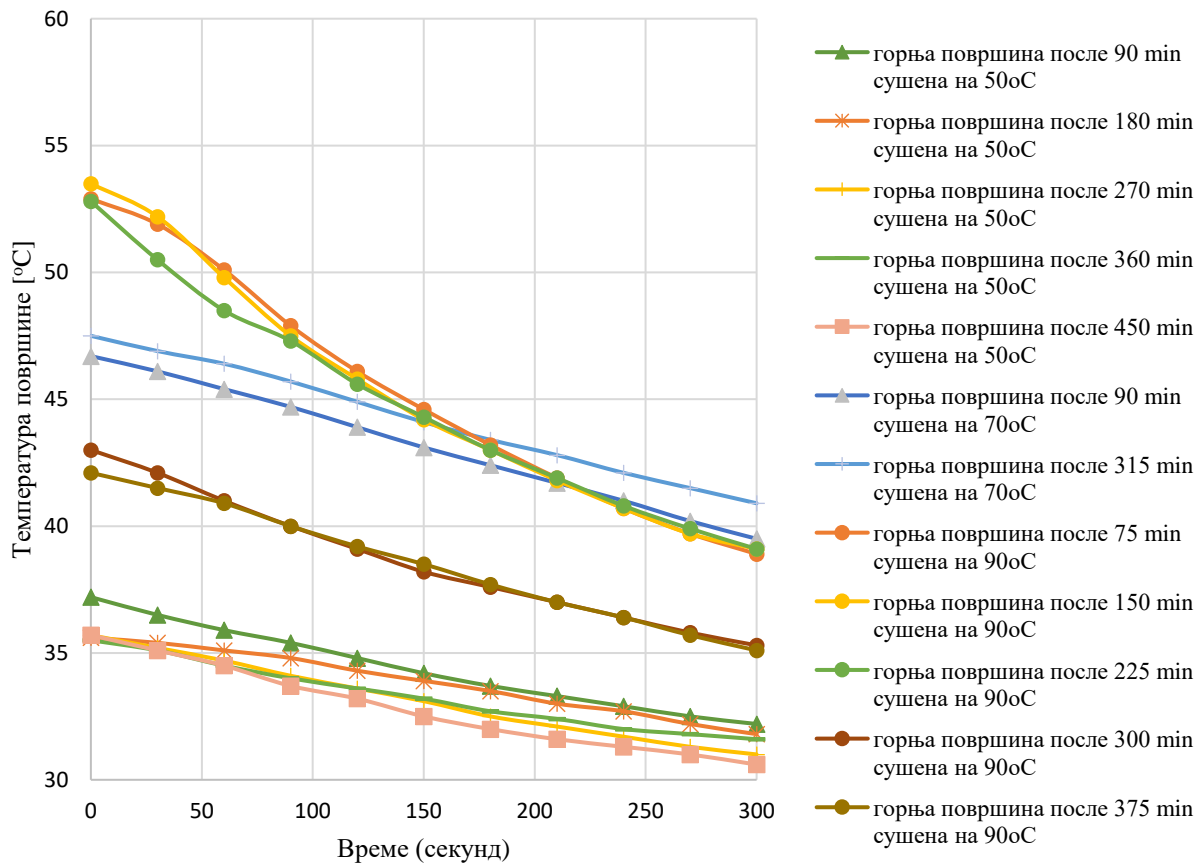
Када је реч о корици троп нектарине, температура је нижа и креће се између 36 и 40 степени за 50, 45 и 48,5 за 70, и 46 и 52 за 90 степени. За троп јабуке је при сушењу температуром од 50 °C корица материјала одмах по вађењу из пећи има температуру између 35 и 37 °C. Температура корице узорка сушених на 70 °C износи између 46,5 и 47,5 °C, док узорци сушени на 90 °C имају температуру корице између 42 и 53,5 °C.

Температуре горње површине - Троп јабуке



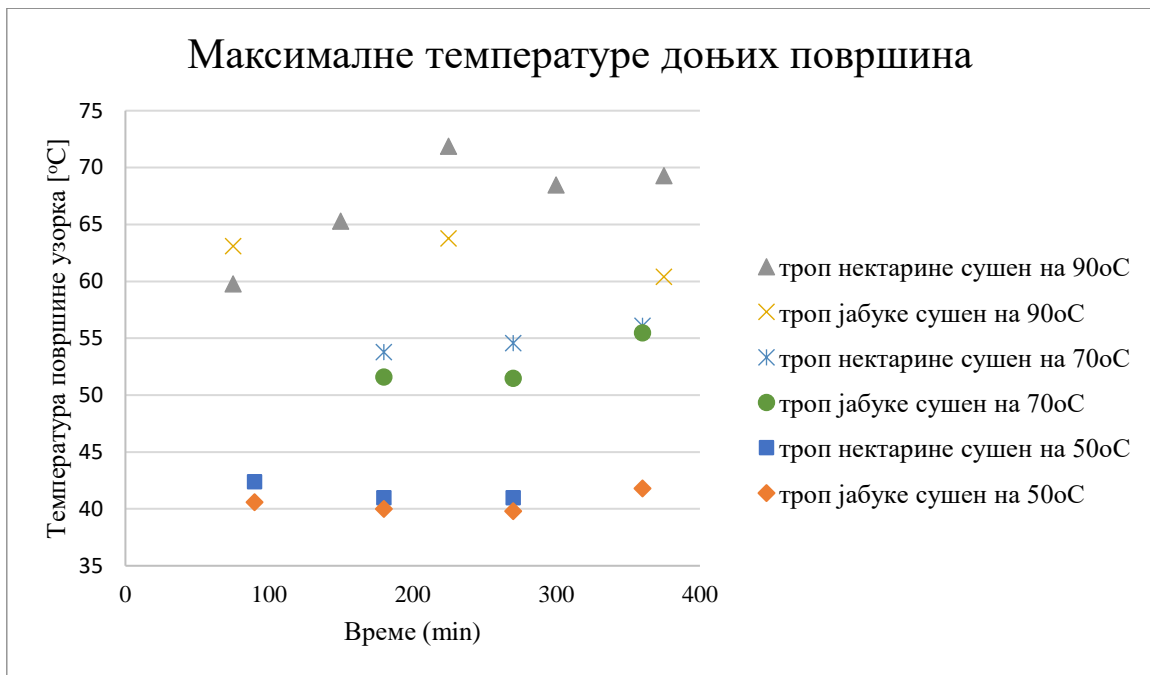
Слика 8.41: Температуре горње површине тропа нектарине за различит садржај влаге

Температуре горње површине - Троп јабуке

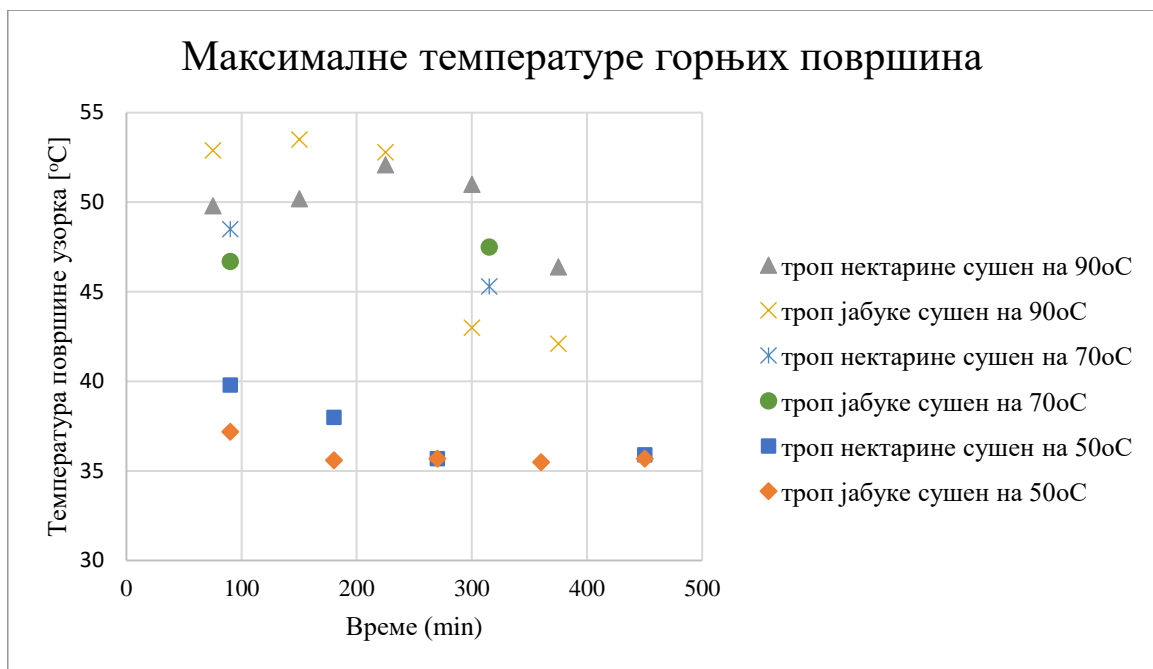


Слика 8.42: Температуре корице тропа јабуке за различит садржај влаге

Уколико се на дијаграму прикажу максималне измерене температуре доњих површина и корица узорака, уочава се да што је режим сушења јачи, то је и температура већа. На сликама 8.43 и 8.44 је приказан распоред температура у току сушења на доњој површини и корицу материјала за нектарину и јабуку.



Слика 8.43: Максималне температуре доњих површина

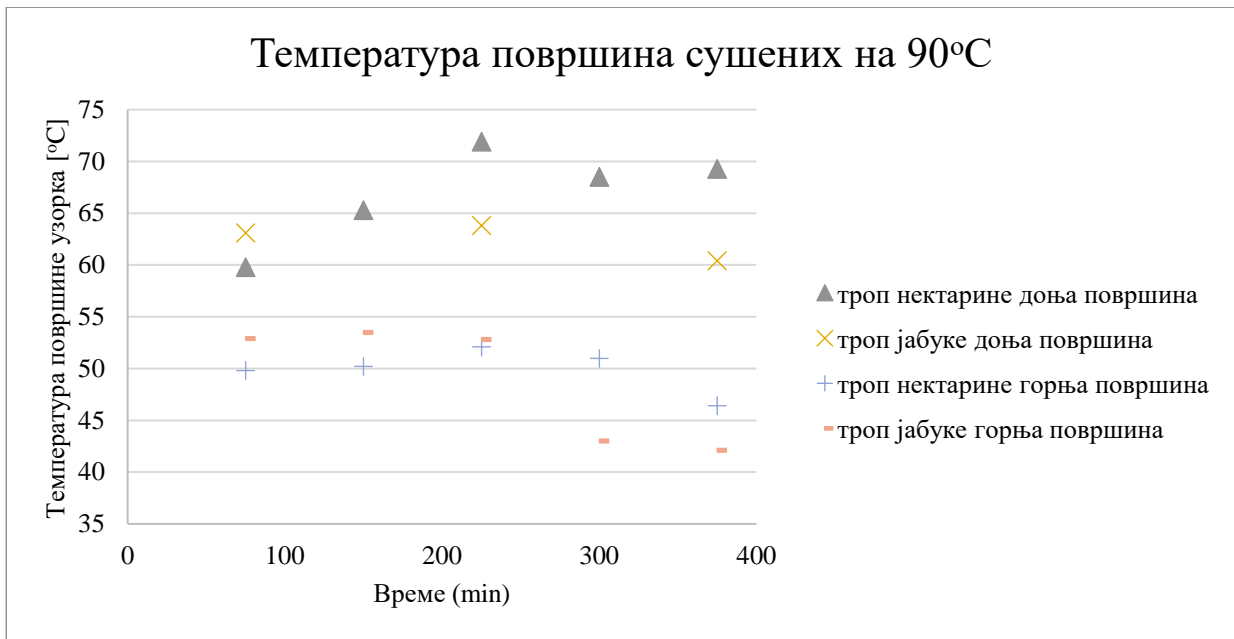


Слика 8.44: Максималне температуре корица

На слици 8.44 је приказана максимална температура корице при вађењу из пећи. Приликом испитивања температуре корице, установљено је да се за сушење тропа јабуке на 90 °C, температура одржава константном, а затим нагло опада. Ово је узорковано променом текстуре и карактеристика на горњој површини материјала.

Материјал на горњој површини постаје тврђи, што доводи до повећања отпора прелажењу топлоте са топлог ваздуха на материјал, што резултује нижом температуром на површини материјала. Може се закључити да температура површине зависи од влажности материјала. Такође се може закључити да температура површине материјала не достиже температуру

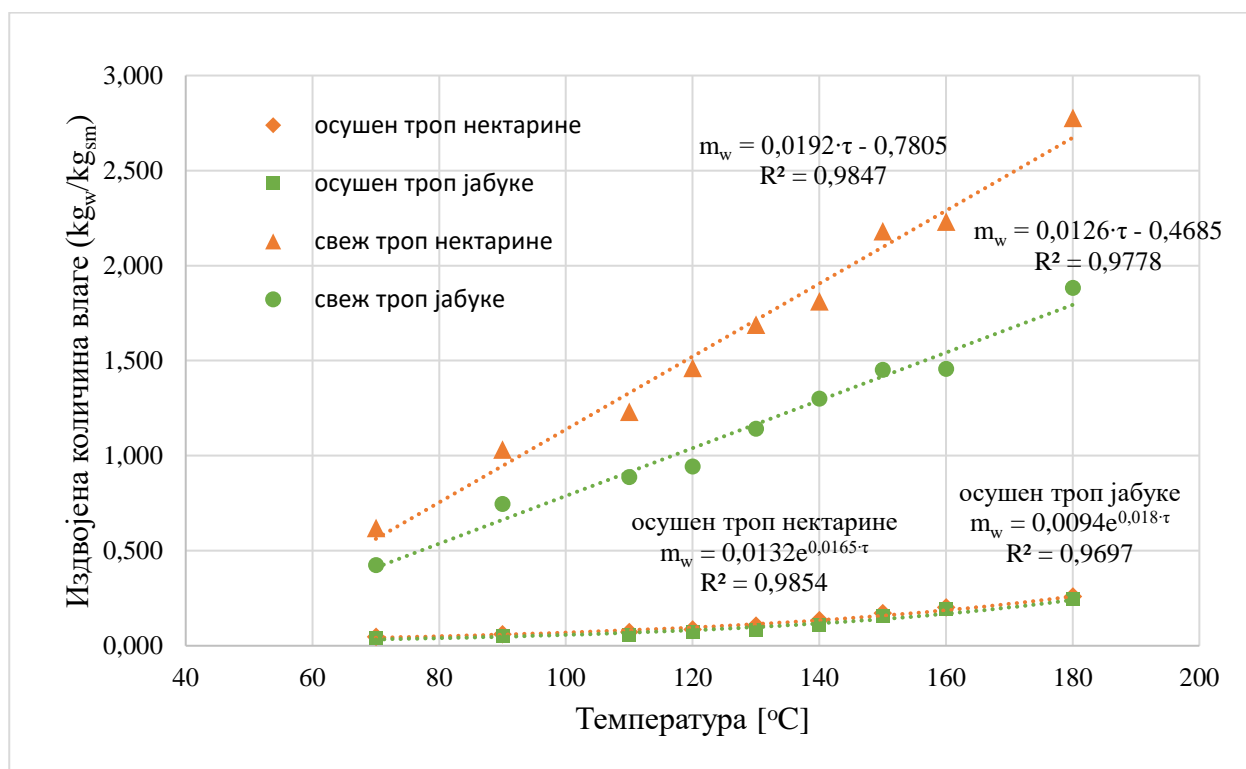
ваздуха у пећи. На Слици 8.45 је дат приказ промене температура горње и доње површине материјала у току процеса сушења.



Слика 8.45: Упоредни приказ промене температуре површине на доњој и горњој површини узорка у току сушења у пећи при температури ваздуха 90°C

8.9. ИЗДВАЈАЊЕ ВЛАГЕ ПРИ КОНСТАНТНОЈ ТЕМПЕРАТУРИ ВАЗДУХА

Урађено је испитивање количине издвојене влаге из свежег и осушеног тропа нектарине и јабуке, при сушењу у пећи при константној температури ваздуха. Мерења су вршена на температури ваздуха између 70 и 180°C током периода од 2 часа. Узорци тропа нектарине и јабуке припремљени на начин објашњен у Поглављу 7.3.5. убацивани су у пећ на задату температуру сушења, а затим сушили током 2 часа на константној температури. После сушења, узорци су вађени и пуштани да се охладе на собну температуру. Маса узорака је потом мерена на собној температури да би се установила разлика маса на почетку и крају процеса сушења. Средња почетна влажност свежих узорака била је 81,34 % ($M_0=4,36 \text{ kg}_w/\text{kg}_{sm}$) за троп нектарине и 74,55 % ($M_0=2,92 \text{ kg}_w/\text{kg}_{sm}$) за троп јабуке, а сувих узорака 5,94% за троп нектарине и 5,18% за троп јабуке. У складу са очекивањем, претходно осушени узорци изгубили су много мање масе него свежи, што је и потврђено експериментом. Такође је установљено да се у опсегу температура сушења између 70°C до 180°C, за оба материјала, троп јабуке и нектарине, количина издвојене влаге расте са порастом температуре (Слика 8.46). Зависност издвајања влаге из свежег тропа јабуке и нектарине од температуре сушења може се апроксимирати правом линијом. Са слике 8.45 се такође види да се за исту температуру сушења у пећи из тропа нектарине издваја више влаге него код тропа јабуке. Зависност издвајања влаге из осушеног тропа јабуке и нектарине од температуре сушења може се апроксимирати експоненцијалном функцијом.



Слика 8.46: Влага издвојена на одређеној температури

У Табели 8.18 су дате масе издвојене влаге по сувом остатку ($\text{kg}_w/\text{kg}_{sm}$) за различите температуре сушења.

Табела 8.18: Маса издвојене влаге по сувом остатку за изотермско сушење

Врста материјала	Температура сушења [°C]								
	70	90	110	120	130	140	150	160	180
Осушен троп нектарине	0,047	0,060	0,072	0,086	0,107	0,134	0,171	0,202	0,259
Осушен јабучни троп	0,039	0,051	0,059	0,070	0,083	0,111	0,158	0,195	0,247
Влажан троп нектарине	0,620	1,032	1,231	1,462	1,690	1,813	2,181	2,232	2,778
Влажан јабучни троп	0,425	0,746	0,888	0,943	1,141	1,301	1,451	1,457	1,883

8.10. ТОПЛОТНА МОЋ ОСУШЕНОГ ВОЋНОГ ТРОПА

Топлотна моћ осушеног воћног тропа је одређена методом са калориметром са бомбом. Да би се одредила вредност доње топлотне моћи одређена је и влажност праха воћног тропа. Такође су за троп јабуке и нектарине урађене додатне анализе: садржај пепела, садржај волатила и коксни остатак.

Троп јабуке:

Укупна влага је одређена према EN 14781 је мерена 2 пута, први пут је износила 5,36%, а други пут 5,00%, тако да је просек 5,18% масе узорка.

Садржај пепела у узорку је био 1,77 и 1,78% масе, тако да је усвојено 1,78% масе узорка.

Садржај волатила је био 76,51 и 76,81, тако да је просек 76,66% масе узорка.

Коксни остатак је износио 18,31% и 18,01%, тако да је просек 18,16% масе узорка.

Горња топлотна моћ тропа јабуке износи $H_g = 17282$ kJ/kg.

Троп нектарине:

Укупна влага је одређена према EN 14781 је мерена 2 пута, први пут је износила 6,11%, а други пут 5,76%, тако да је просек 5,94% масе узорка.

Садржај пепела у узорку је био 2,57 и 2,64% масе, тако да је усвојено 2,61% масе узорка.

Садржај волатила је био 72,93 и 72,69, тако да је просек 72,81% масе узорка.

Коксни остатак је износио 21,13% и 21,37%, тако да је просек 21,25% масе узорка.

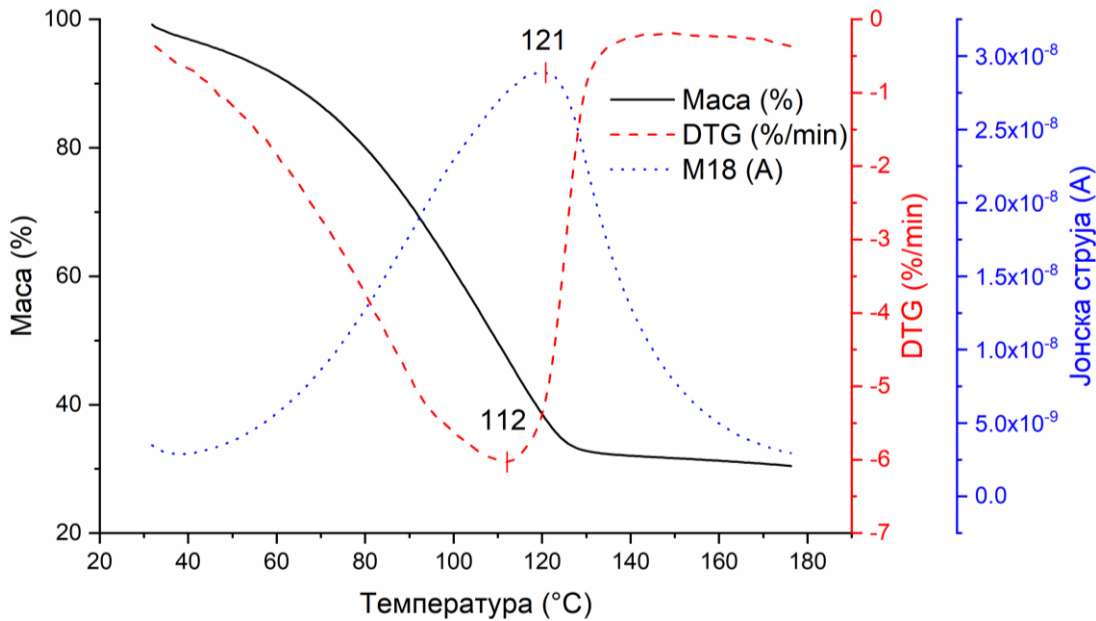
Горња топлотна моћ тропа нектарине износи $H_g = 17624$ kJ/kg.

Уколико усвојимо да је садржај водоника 6% масе узорка, помоћу формуле (6.15) можемо да израчунати доња топлотна моћ тропа јабуке и нектарине.

Доња топлотна моћ тропа јабуке износи $H_d = 15802,5$ kJ/kg, а тропа нектарине $H_d = 16125,5$ kJ/kg.

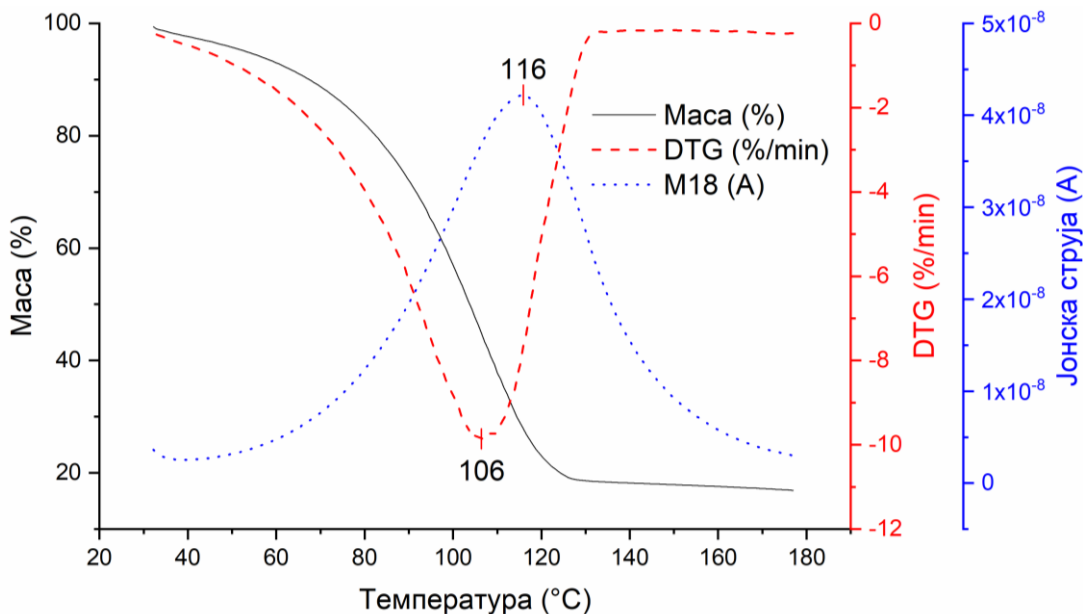
8.11. ТЕРМОГРАВИМЕТРИЈСКА АНАЛИЗА

Термогравиметријском анализом је утврђено да је почетна влажност свежих узорака била 83,1 % за троп нектарине и 69,57 % за троп јабуке. За свеже узорке, највише воде се издваја на температури од 116°C за троп нектарине, односно 120°C за троп јабуке, као што је приказано на Сликама 8.47 и 8.48.



Слика

8.47: Издвајање воде при термогравиметријској анализи узорака троп јабуке при 5K/min

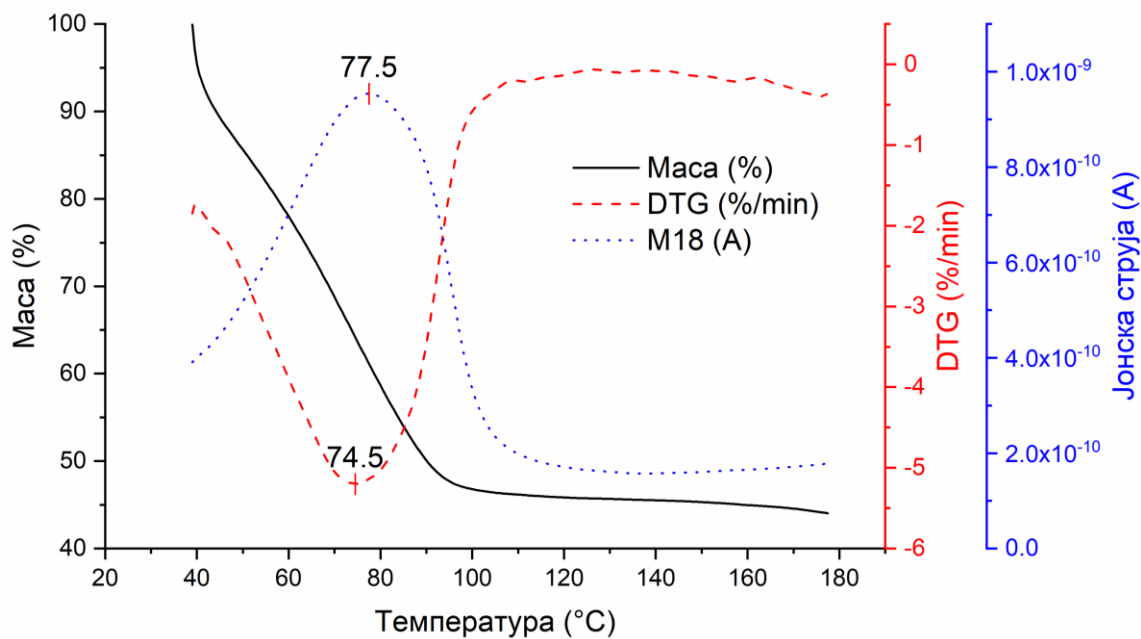


Слика 8.48: Издвајање воде при термогравиметријској анализи узорака троп јабуке при 5K/min

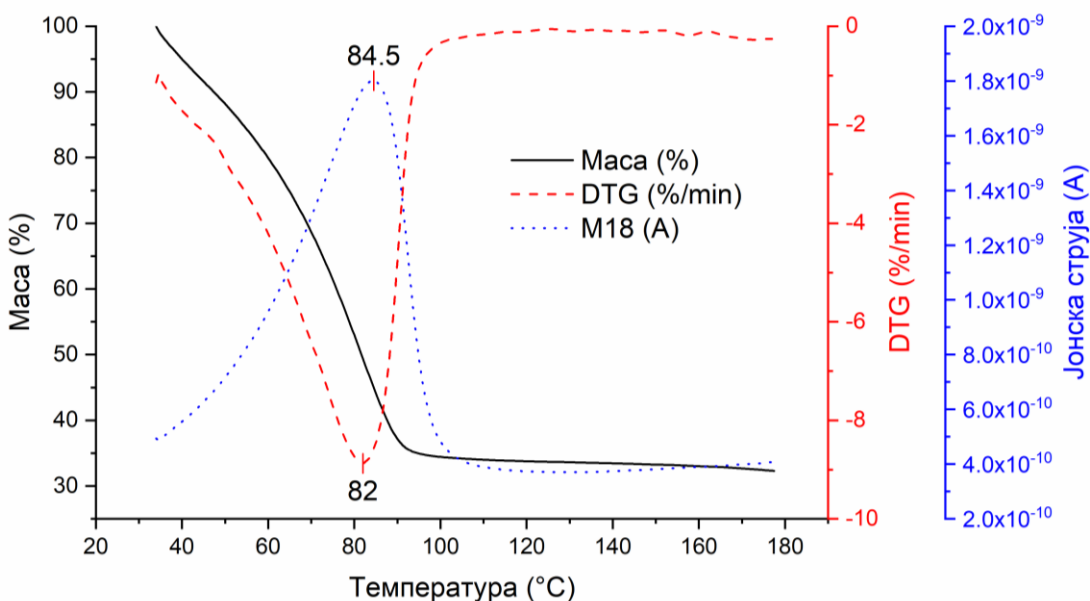
Као што се види са Слика 8.46 и 8.47, тренд издвајања воде прати промену масе, тј. највећа промена масе одговара максималном издвајању воде из узорака, што потврђује да се при термалној декомпозицији остатака из процеса производње сокова на температурама до 180 °C издваја само вода у облику водене паре. Ово је значајно са аспекта процеса сушења ове врсте материјала, јер доказује да се током процеса сушења воћног троп не дешава ни један други

процес сем испаравања водене паре, па се претходно описаним механизмима издвајања влаге из материјала може описати процеса сушења. На Слици ознака M18 представља количину испареле водене паре на одређеној температури добијену масеном спектрометријом. Ова вредност се изражава јонском струјом у амперима. Остале компоненте које се издвајају се издвајају у количини која је за два реда вреличине мања од количине издвојене водене паре. Приликом масене спектрометрије масени број 18 може да одговара и другим издвојеним једињењима, али је утврђено да при термалној декомпозицији биомасе масени број 18 одговара издвајању само воденој пари. Разлика у температури достигања маскимальне вредности издвајања влаге и промене масе може се објаснити начином функционисања уређаја, тј. сигнал M18 има кашњење у доносу на DTG.

Урађена је такође анализа осушених узорака тропа нектарине и јабуке, који су самлевени у прах. Резултати су дати на Сликама 8.49 и 8.50:



Слика 8.49: Термалана анализа осушеног тропа јабуке

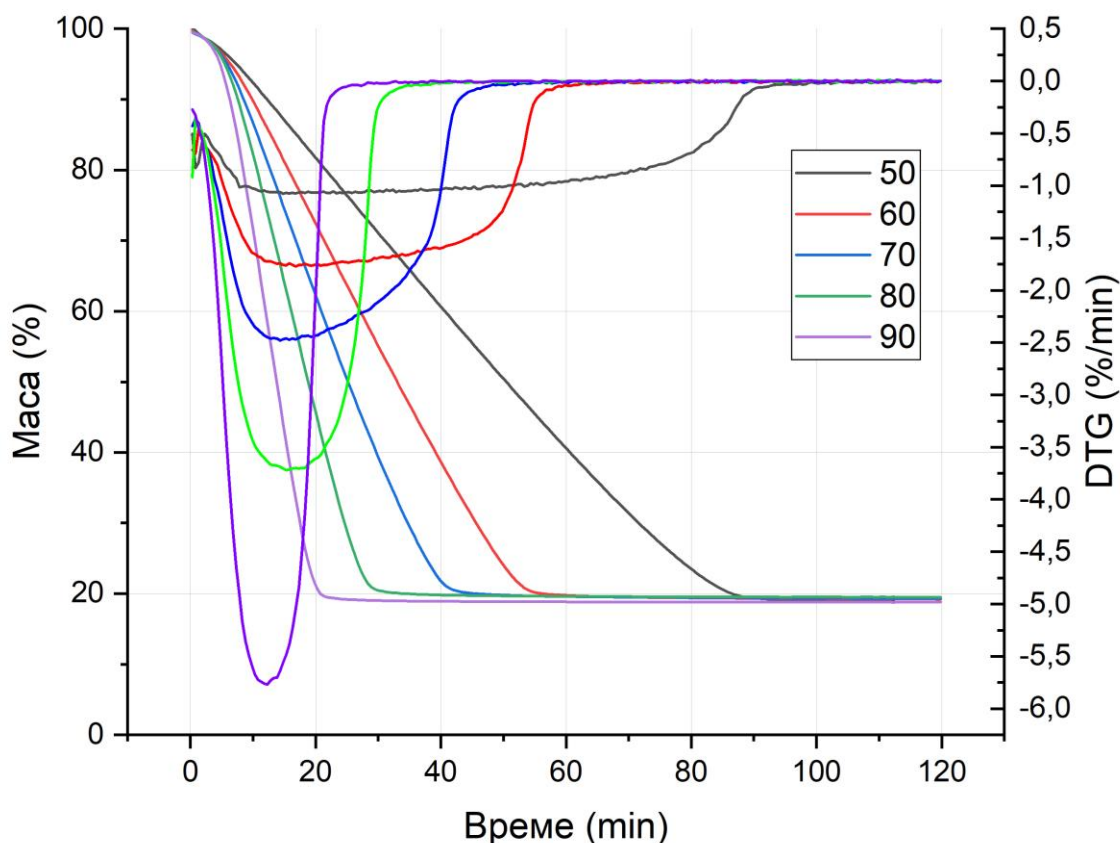


Слика 8.50: Термална анализа осушеног тропа нектарине

На сликама је приказана термална декомпозиција осушеног праха тропа јабуке и нектарине. Приказана је промена масе узорака, као и DTG сигнал, тј. први извод промене масе по температури. Јасно се види да издвајање водене паре прати промену масе узорака, тако да се највећа промена масе поклапа са најинтензивнијем издвајањем водене паре. Максимално издвајање водене паре се дешава на температури од 77,5 °C и 84,5 °C за троп јабуке и нектарине следствено.

Из добијених резултата се види да се при термогравиметријском сушењу остатака из производње сокова издваја готово искључиво вода, тј. водена пара. Код свежих узорака тропа нектарине и јабуке, у знатно мањој мери се издваја кисеоник и то на почетку процеса сушења, док се остали елементи, као што је на пример угљен диоксид или метан издваја у количинама које су два и више реда величине мања од количине издвојене водене паре. Из овога се може закључити да се приликом процеса сушења воћног тропа до температура 180 °C из материјала издваја само влага у облику водене паре, тако да се цео процес термалне анализе може оправдано звати сушење, тј. процес издвајања влаге из материјала.

У току процеса сушења је такође урађена и термогравиметријска анализа осушеног и самлевоног тропа нектарине и јабуке, при изотермалним условима током периода од 2 часа на температурама између 50 и 90 °C. Резултати су приказани на Слици 8.51:



Слика 8.51: Изотермско сушење тропа јабуке

Са слике се види да се време сушења при изотермалном сушењу узорака са порастом температуре скраћује. Такође се примећује да се са повећањем температуре смањује период константне брзине сушења. За сушење температуром од 50 °C примећује се релативно дуг период (од око 60 min) у коме је брзина сушења приближно константна, док се за више температуре сушења, посебно преко 70 °C, не уочава период константне брзине сушења. Ово значи да се материјал на фундаменталном нивоу на температурама до 50 °C суши у режиму

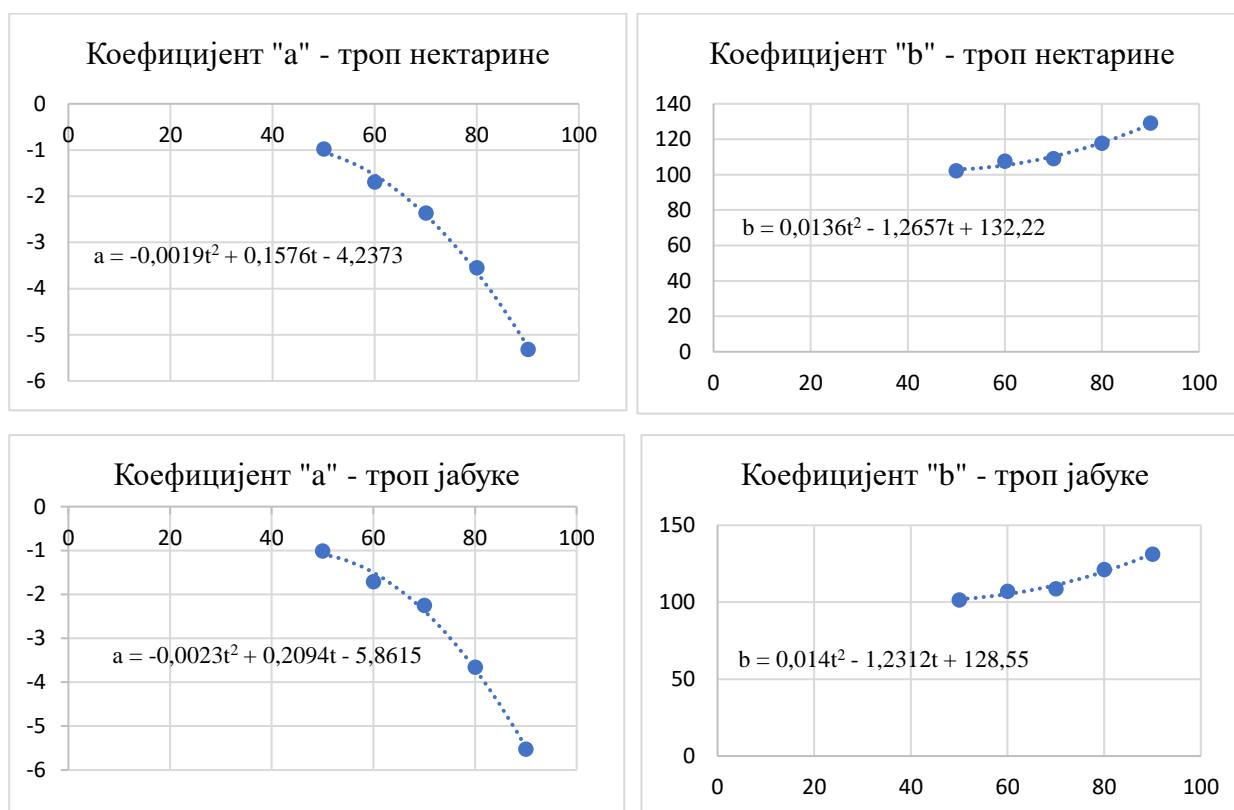
константне брзине сушења, док се преко ове температуре суши у периоду опадајуће брзине сушења.

Може се извести израз за масу узорка у зависности од времена и температуре сушења у облику $M=a(t)\cdot\tau+b(t)$, где су а и б корелациони коефицијенти. Промена масе узорка у односу на време сушења се може апроксимирати правом линијом, тако да се фитовањем праве опадања масе у времену могу одредити коефицијенти а и б за сваку појединачну температуру сушења, а затим одредити и зависност ових коефицијената од температуре сушења.

Табела 8.19: Коефицијенти уз једначину праве $M=f(\tau,t)$

Температура [°C]	Троп нектарине		Троп јабуке	
	a	b	a	b
50	-0,9828	102,04	-1,0067	101,59
60	-1,695	107,54	-1,711	107,05
70	-2,3657	108,95	-2,247	108,74
80	-3,5498	117,57	-3,658	121,35
90	-5,3196	128,99	-5,5207	131,18

Зависност коефицијената а и б од температуре сушења приказани су на Слици 8.52 заједно са формулама.



Слика 8.52: Зависност коефицијената а и б од температуре сушења

Коришћењем добијених зависности коефицијената а и б од температуре сушења може се извести израз за сушење тропа нектарине и јабуке у зависности од температуре и времена сушења.

За троп нектарине и јабуке, следствено:

$$M (\%) = (-0,0019t^2 + 0,1576t - 4,2373)\tau + 0,0136t^2 + 1,2657t + 132,22 \quad (8.8)$$

$$M (\%) = (-0,0023t^2 + 0,2094t - 5,8615)\tau + 0,014t^2 + 1,2312t + 128,55 \quad (8.9)$$

9. ПОРЕЂЕЊЕ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ РЕЗУЛТАТА СА СОПСТВЕНИМ МОДЕЛОМ И ЕКСПЕРИМЕНТИМА И МОДЕЛИМА ДРУГИХ АУТОРА

Да би се установило слагање модела са експерименталним истраживањима, као и са моделима других аутора, извршено је поређење сопственог математичког модела са резултатима експерименталних истраживања, као и са моделима који су заступљени у литератури за ову и сродне врсте материјала.

Резултати су поређени по следећим критеријумима:

1. Ефективни коефицијент дифузије
2. Потрошња енергије потребна за сушење

9.1. ПОРЕЂЕЊЕ СОПСТВЕНОГ МАТЕМАТИЧКОГ МОДЕЛА СА СОПСТВЕНИМ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИМ РЕЗУЛТАТИМА

Сопствени математички модел је упоређен са експерименталним резултатима за разне режиме сушења. Слагање модела облика $MR = f(\tau)$ са експерименталним резултатима бездимензионог садржаја влаге анализирано је на основу статистичких параметара регресионе анализе:

- Коефицијент детерминације (R^2) чија се вредност креће у границама од 0 до 1, при чему 1 представља најбоље могуће слагање са експерименталним резултатима, а што је ова вредност ближа 0 слагање је лошије. Приликом регресионе анализе, коефицијент детерминације представља релативну меру прилагођености регресијског правца емпиријским подацима [20].
- Стандардна грешка регресије (RMSE) представља меру одступања емпиријских (експерименталних) података од једначине регресије, тј. модела. Што је ова вредност мања, боље је слагање експерименталних резултата са моделом.

Коефицијент детерминације и стандардна грешка регресије израчунати су помоћу софтвера Origin 2018 Pro за сваки експеримент конвективног и кондуктивно-конвективног сушења у експерименталној сушари. Добијене експерименталне вредности за троп јабуке и нектарине дати су у Табели 9.1.

Поклапање сопственог модела са експерименталним резултатима могу се приказати следећим опсегом:

- | | | |
|------------------|---------------------------|----------------------------|
| • Троп јабуке | $0,99612 < R^2 < 0,99993$ | $0,00008 < RMSE < 0,00423$ |
| • Троп нектарине | $0,99718 < R^2 < 0,9998$ | $0,00022 < RMSE < 0,00307$ |

Табела 9.1: Добијене експерименталне вредности коефицијента детерминације (R^2) и стандардне грешке регресије (RMSE) при поређењу сопственог емпиријског модела са експерименталним резултатима сушења тропа нектарине и јабуке

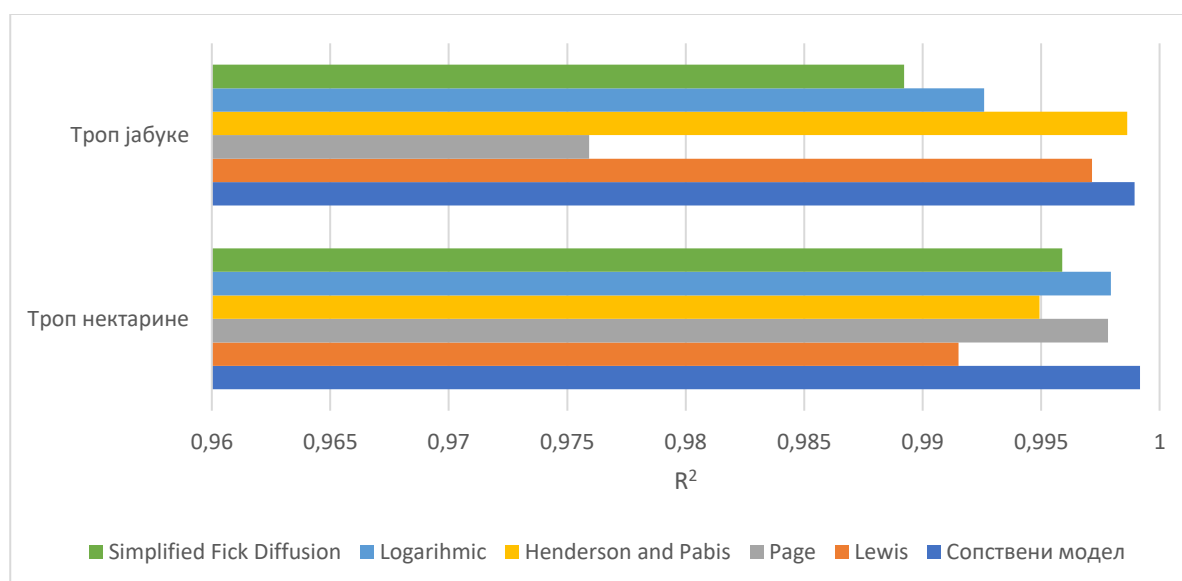
Режим експеримента	Параметри сушења		Троп нектарине						Троп јабуке					
	Температура грејне површи	Температура ваздуха	Дебљина узорка [mm]											
			5		7		10		5		7		10	
			R2	RMSE	R2	RMSE	R2	RMSE	R2	RMSE	R2	RMSE	R2	RMSE
E1	/	30	0,99972	0,00031	0,99924	0,00083	0,99971	0,00032	0,99975	0,00027	0,9999	0,00011	0,99987	0,00014
E2	/	40	0,99959	0,00045	0,99949	0,00056	0,99944	0,00061	/	/	/	/	/	/
E3	/	50	0,99912	0,00096	0,99959	0,00045	0,99765	0,00256	0,99802	0,00216	0,99948	0,00057	0,99976	0,00026
E4	/	60	0,99891	0,00119	0,99887	0,00311	0,99931	0,00075	/	/	/	/	/	/
E5	/	70	0,99867	0,00145	0,99941	0,00088	0,99936	0,00070	/	/	/	/	/	/
E6	50	30	0,99962	0,00041	0,99963	0,00040	0,99978	0,00024	0,9944	0,00610	0,99993	0,00008	0,99673	0,00356
E7	50	40	0,9996	0,00044	0,99954	0,00050	0,99925	0,00082	/	/	/	/	/	/
E8	50	50	0,99938	0,00068	0,99955	0,00049	0,9998	0,00022	0,99981	0,00021	0,99981	0,00021	0,99993	0,00008
E9	60	30	0,99834	0,00181	0,99945	0,00060	0,99956	0,00048	0,99902	0,00107	0,99909	0,00099	0,99969	0,00034
E10	60	40	0,99924	0,00083	0,9994	0,00065	0,99965	0,00038	/	/	/	/	/	/
E11	60	50	0,9994	0,00065	0,99943	0,00062	0,99919	0,00088	0,99965	0,00038	0,99982	0,00020	0,99881	0,00130
E12	60	60	0,99897	0,00112	0,9993	0,00076	0,99838	0,00177	/	/	/	/	/	/
E13	70	30	0,99942	0,00063	0,99823	0,00193	0,99718	0,00307	0,99972	0,00031	0,99798	0,00220	0,99612	0,00423
E14	70	40	0,99831	0,00184	0,99856	0,00157	0,99948	0,00057	/	/	/	/	/	/
E15	70	50	0,99902	0,00107	0,99919	0,00088	0,99904	0,00105	0,99922	0,00085	0,99922	0,00085	0,99883	0,00128
E16	70	70	0,99874	0,00137	0,99907	0,00101	0,99953	0,00051	/	/	/	/	/	/

9.2. ПОРЕЂЕЊЕ СОПСТВЕНОГ МАТЕМАТИЧКОГ МОДЕЛА СА МОДЕЛИМА ДРУГИХ АУТОРА

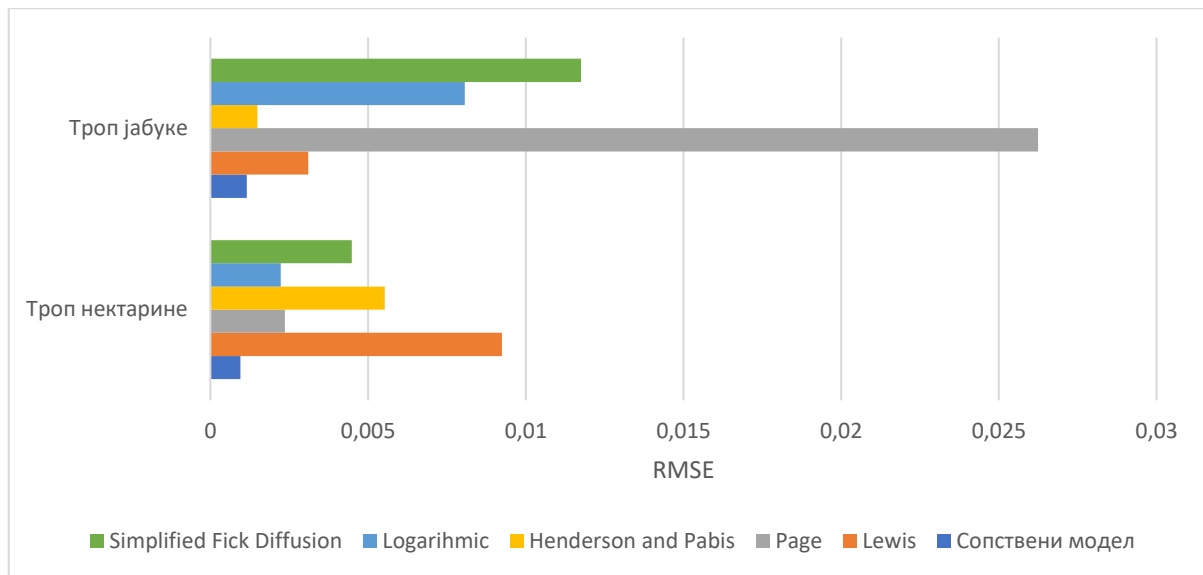
Урађено је поређење сопственог математичког модела са моделима других аутора за сушење материјала сличних карактеристика и режима сушења. За поређење су изабрани модели који су се у пракси показали као најбољи за описивање процеса сушења прехранбених производа, посебно воћа и поврћа. У Табели 9.2 су дати модели који су фитовани са сопственим експерименталним подацима, као и просечне вредности статистичких показатеља, а на Сликама 9.1 и 9.2 је дат упоредни приказ резултата.

Табела 9.2: Просечне вредности коефицијента детерминације и стандардне грешке регресије сопственог модела и модела других аутора

Назив модела (рад из ког потиче)	Статистички параметри			
	Троп јабуке		Троп нектарине	
	R^2	$RMSE$	R^2	$RMSE$
Сопствени модел	0,99894	0,00116	0,999175	0,00095
Lewis [104] [105]	0,99715	0,0031065	0,99152	0,0092432
Page [106]	0,97592	0,0262472	0,99783	0,0023653
Henderson and Pabis [107]	0,99863	0,0014933	0,99493	0,0055263
Logarithmic [56]	0,9926	0,008066	0,99795	0,0022345
Simplified Fick Diffusion [108]	0,98922	0,0117502	0,99589	0,0044799



Слика 9.1: Упоредни приказ коефицијента детерминације сопственог модела и модела других аутора



Слика 9.2: Упоредни приказ стандардне грешке регресије сопственог модела и модела других аутора

9.3. ПОРЕЂЕЊЕ СОПСТВЕНИХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ РЕЗУЛТАТА СА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИМ РЕЗУЛТАТИМА ДРУГИХ АУТОРА

Поређење ефективног коефицијента дифузије

Експериментални резултати сопствених експерименталних истраживања ефективног коефицијента дифузије влаге поређени су са експерименталним резултатима других аутора.

Вредности ефективног коефицијента дифузије сопствених истраживања износили су:

- за троп нектарине $2,79 - 3,151 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$.
- за троп јабуке $2,10 - 2,605 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$.

У литератури је пронађено свега неколико радова који се баве тематиком одређивања ефективног коефицијента дифузије приликом сушења јабучног тропа.

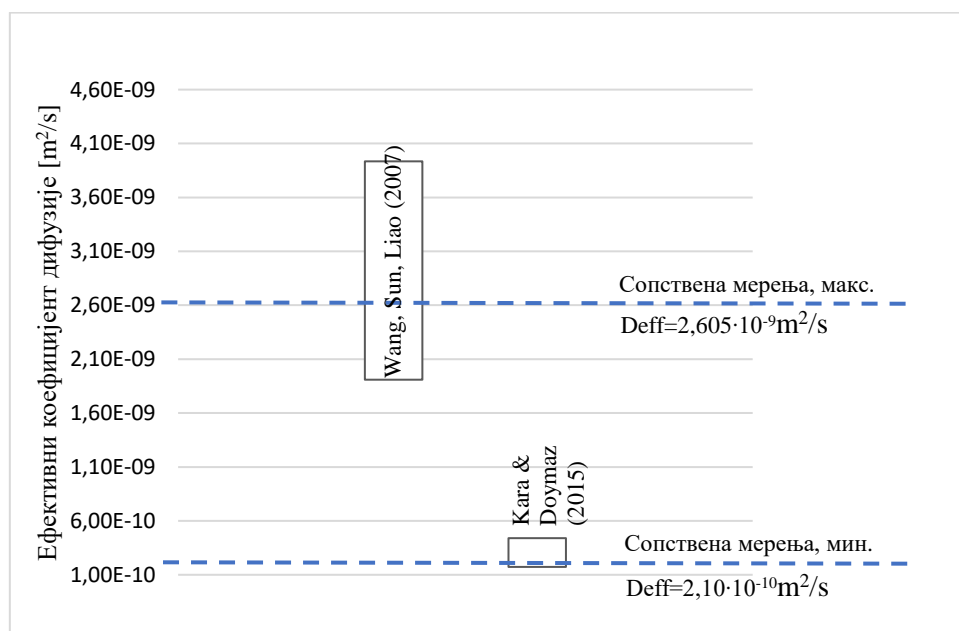
У раду [56] вредности ефективног коефицијента дифузије за троп јабуке сушен топлим ваздухом на температурама од 75 до 105°C износи од $1,9082 \cdot 10^{-9}$ до $3,9346 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$.

У раду [57] утврђено је да је приликом сушења јабучног тропа топлим ваздухом на температурама од 50 до 80°C брзином ваздуха од 2m/s, вредности ефективног коефицијента дифузије износила у границама $1,73 \cdot 10^{-10}$ до $4,40 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$.

У раду [58] јабучни троп је сушен микроталасима снаге 150, 300, 450 и 600W са и без предтретмана топлим ваздухом и добијене вредности ефективног коефицијента дифузије су биле између $1,0465 \cdot 10^{-8}$ до $9,1537 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$.

У раду [59] израчуната је вредност ефективног коефицијента дифузије јабучног тропа сушеног инфрацрвеним зрачењем са и без предтретмана топлим ваздухом и установљено је да је ефективни коефицијент дифузије био у границама $3,477 \cdot 10^{-9}$ до $8,808 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$.

Према подацима из литературе за конвективно сушење јабучног тропа, ефективни коефицијент дифузије се креће у границама од $4,40 \cdot 10^{-10}$ до $3,9346 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ што се слаже са сопственим експерименталним резултатима (Слика 9.3)



Слика 9.3: Поређење вредности ефективног коефицијента дифузије других аутора [56], [57] са сопственим експерименталним резултатима

Што се тиче тропа нектарине, није пронађен ниједан рад који се бавио одређивањем ефективног коефицијента дифузије тропа нектарине, али постоји пар радова који су истраживали нектарине

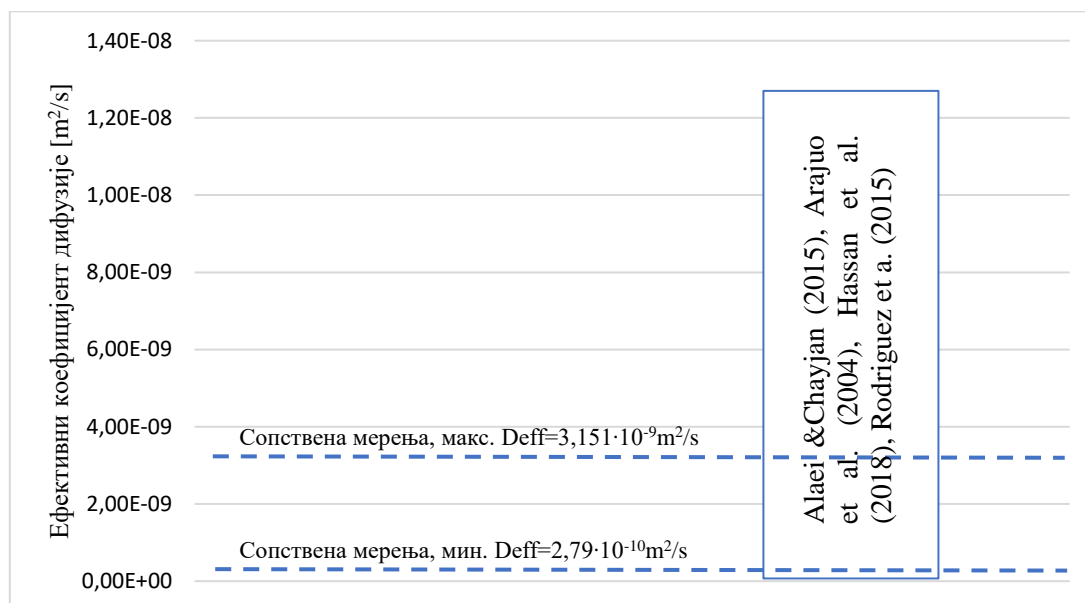
У раду [68] сушене су кришке нектарине дебљине 2,8mm и пречника 28mm и масе узорка 45+-2g комбинованим инфрацрвеним и вакуум сушењем. Вредности ефективног коефицијента дифузије влаге биле су у распону $2,46 \cdot 10^{-10}$ до $6,48 \cdot 10^{-10}$ m²/s.

У раду [69] је истраживана кинетика конвективног сушења нектарине узимајући и не узимајући у обзир скупљање на температурама 40 и 60°C и при брзини ваздуха од 2,1 m/s. Ефективна дифузивност влаге је била у оквиру $9,12 \cdot 10^{-10}$ до $13,6 \cdot 10^{-10}$ m²/s када се скупљање материјала није узимало у обзир и у оквиру $0,7 \cdot 10^{-10}$ до $1,77 \cdot 10^{-10}$ m²/s када се скупљање материјала узимало у обзир.

У раду [71] је испитивано сушење кришки нектарине топлим ваздухом и хибридном методом топлим ваздухом и микроталасним сушењем при константној температури и брзини ваздуха (50°C и 0,5m/s). Ефективна дифузивност влаге је била у оквиру $8,15 \cdot 10^{-8}$ до $2,83 \cdot 10^{-7}$ m²/s за хибридно сушење, и $1,27 \cdot 10^{-8}$ m²/s за сушење топлим ваздухом.

У раду [73] истраживан је утицај осмотског претретмана на нектарине са раствором глукозног сирупа и сорбитола на кинетику сушења топлим ваздухом температуре 60, 70 и 80 °C. Ефективна дифузивност влаге је била у оквиру $4,96 \cdot 10^{-9}$ до $2,43 \cdot 10^{-8}$ m²/s.

На слици 9.4 је дато поређење опсега вредности ефективног коефицијента дифузије из радова који су се бавили сушењем нектарине са сопственим вредностима ефективног коефицијента дифузије тропа нектарине.



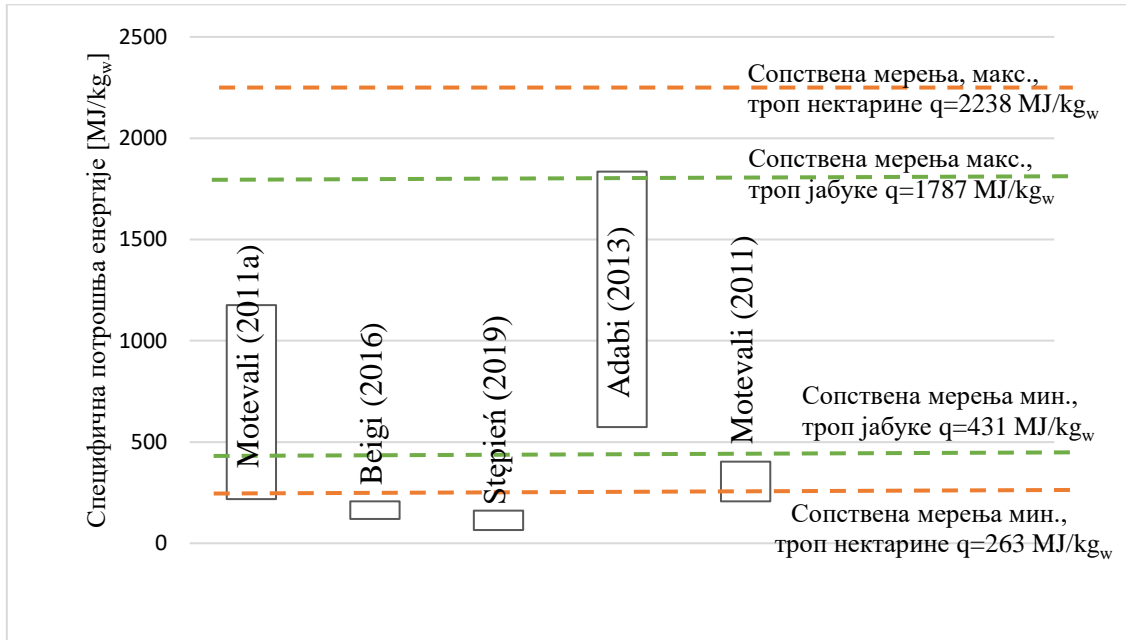
Слика 9.4: Поређење ефективног коефицијента дифузије тропа нектарине сопствених експерименталних мерења и коефицијента дифузије нектарине експерименталних мерења других аутора [68], [73], [69], [71]

Поређење потрошње енергије за сушење

Потребна енергија за сушење зависи од начина израчунавања, врсте производа, методе, па се самим тим у литератури потрошња налази у широком опсегу. Експериментално добијена вредност специфичне потрошње енергије за сушење је упоређена са резултатима других аутора и то према два критеријума. Прво је упоређена укупна специфична потрошња енергије

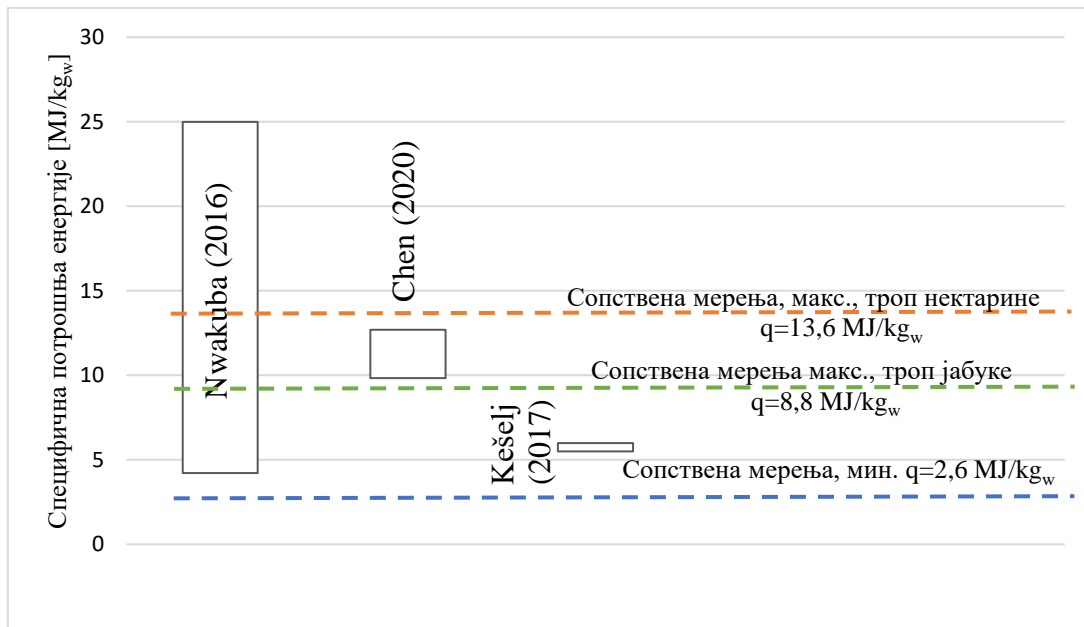
за сушење тропа јабуке и нектарине, а затим корисна енергија која је добијена под условом да је енергија ваздуха и грејне подлоге маскимално искоришћена.

На Слици 9.5 је дато поређење укупне специфичне потрошње енергије са експерименталним резултатима других аутора.



Слика 9.5: Поређење укупне специфичне потрошње енергије са експерименталним резултатима других аутора [23], [24], [26], [28], [31]

На Слици 9.6 упоређена је сопствена корисна специфична потрошња енергије са резултатима других аутора



Слика 9.6: Сопствена потрошња енергије при максималној ефикасности и резултати других аутора [22] [25] [27]

На основу поређења са другим ауторима, може се закључити да су добијени резултати у опсегу вредности пронађених у литератури.

9.4. АНАЛИЗА ГРЕШАКА МЕРЕЊА

Мерења су изведена на узорцима чија је маса захтевала прецизно мерење. У току експерименталних истраживања, извршено је мерење већег броја термомеханичких величина укључујући мерење масе, топлотне проводљивости, температуре, влажности ваздуха и брзине струјања ваздуха. Највећи изазов приликом експерименталних истраживања представљало је мерење промене масе узорка на експерименталној сушари. Наиме, приликом опструјавања сушеног узорка, јављају се аеродинамичке силе на узорку, што доводи до флукуација у измереној вредности масе. Међутим, овај проблем је превазиђен одабиром одговарајуће брзине струјања ваздуха, као и правилним подешавањем ваге и аквизиционе опреме. Карактеристике мерно-регулационе опреме коришћене у експерименталном истраживању дати су у Поглављу 7.1.

Мерење и регулисање температуре

У току експерименталних истраживања вршена су мерења температуре влажног ваздуха на улазу у комору за сушење експерименталне сушаре, затим температуре површине сушаре, као и мерење температуре узорака, што је укључивало прецизно мерење температуре узорака у оквиру термогравиметријских испитивања, мерење температуре површине узорака у току изотермалног сушења у пећи. Коришћени су следећи инструменти :

- Приликом мерења и регулисања температуре влажног ваздуха на улазу у комору експерименталне сушаре коришћена је каналска сонда WRKX, типа К, тачности $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$, као и терморегулатор REX C-100 тачности $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Приликом мерења и регулисања температуре грејне подлоге коришћена је сонда NTC-10K M4 тачности $\pm 1\%$ на опсегу $-20^{\circ}\text{C} - 125^{\circ}\text{C}$, као и терморегулатор REX C-100 тачности $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Грешка мерења начињена овим уређајима је у домену резолуције инструмента, а субјективна грешка мерења се може елиминсати због постојања дигиталног екрана на коме су директно читаване вредности температуре.
- Приликом одређивања топлотних губитака на сушари, мерење температуре је вршено бесконтактним мерачем температуре DT8220, опсега мерења $-50-220^{\circ}\text{C}$, резолуције $0,1^{\circ}\text{C}$ и тачности $\pm 2\%$ или 2°C , инфрацрвеним термометром FLIR TG165 тачности $\pm 1,5\%$ или $1,5^{\circ}\text{C}$, опсега мерења од -25 до 380°C , и резолуције $0,1^{\circ}\text{C}$, као и термовизијском камером FLUKE Ti100, опсега мерења -20°C до $+250^{\circ}\text{C}$, топлотне осетљивости $\leq 0,10^{\circ}\text{C}$ на 30°C (100 mK). Грешка мерења начињена овим уређајима је у домену резолуције инструмента, а субјективна грешка мерења се може елиминсати због постојања дигиталног екрана на коме су директно читаване вредности температуре.
- У току испитивања кинетике сушења термогравиметријском методом, на уређају NETZSCH STA449F5 Jupiter® осетљивост температурског сензора износила је $0,001\text{ K}$. Могућност субјективне грешке не постоји, јер уређај преко рачунара бележи и приказује податке о температури.
- У току мерења температуре површине узорака у току испитивања изотермалног сушења у пећи, коришћен је Testo 400 - 0563 4001, мултифункционални логер са сондом за мерење температуре површине материјала NiCr-Ni, радног опсега $-50 - 400^{\circ}\text{C}$, класе тачности 2. Грешка мерења је у домену резолуције инструмента, због директног читавања са екрана уређаја, субјективна грешка не постоји.

Мерење влажности ваздуха је вршено сондама Rotronic AG (Швајцарска), које имају тачност $\pm 1\%$ на интервалу $0-100\% \text{ RH}$ и резолуцију $0,1\% \text{ RH}$. Грешка мерења начињена овим уређајем је у домену резолуције инструмента, а субјективна грешка мерења се може елиминсати због постојања дигиталног екрана на коме су директно читаване вредности температуре.

Мерење брзине струјања ваздуха вршена је помоћу анемометра (термоанемометријском сондом) Airflow Developements Ltd., тачности $\pm 3\%$ на интервалу 0-20 m/s и резолуције 0,01 m/s. Брзина ваздуха је мерена је на улазу у комору експерименталне сушаре, у којој су вршена истраживања кинетике процеса сушења. Брзина ваздуха је мерена на улазном попречном пресеку у комору у складу са препорукама о мерењу брзине ваздуха у каналима правоугаоног и кружног попречног пресека ("Sl. list SFRJ", br. 61/87). Попречни пресек коморе је правоугаон, тако да је мерење вршено у 30 тачака, а затим је израчуната средња вредност брзине ваздуха. Грешке мерења које су се могле јавити су у позиционирању анемометра, тј. субјективна грешка, као и грешка мерења самог анемометра у домену резолуције инструмента.

Мерење масе

Мерење масе узорака приликом испитивања кинетике сушења у експерименталној сушари вршено је вагом Kernel (Kernel S232) са тачношћу $\pm 0,01\text{g}$. Грешка која се јавља приликом мерења масе потиче од чињенице да је постоље са грејном подлогом и узорком постављено на вагу. Услед струјања ваздуха кроз комору сушаре, јављају се вибрације на ваги. Како се мерење врши континуално и резултати аутоматски бележе у рачунар у одређеном временском интервалу, снимљена маса не мора да одговара стварној маси узорка у тренутку снимања. Ове грешке су биле реда величине до $\pm 1,5\%$ почетне масе узорка.

Мерење масе у току испитивања кинетике сушења термогравиметријском методом, вршено је уређајем NETZSCH STA449F5 Jupiter®. Осетљивост ваге овог уређаја износи 0,1 μg , док је грешка ваге мања од 5 $\mu\text{g/h}$. Могућност субјективне грешке не постоји, јер уређај преко рачунара бележи и приказује податке о маси узорка.

На основу анализе грешака мерења у току експерименталних истраживања, може се закључити да су грешке мерења у оквирима дозвољених граница, тј. да у току вршења експеримената нису уочене веће неправилности, што доприноси валидацији добијених података.

10. ЗАКЉУЧАК

У докторској дисертацији испитивани су термомеханички аспекти процеса сушења остатака из процеса производње сокова (тзв. троп). За испитни материјал су узети троп нектарине и јабуке због своје распрострањене употребе у Републици Србији и у свету. Извршена је детаљна анализа термомеханичких особина материјала, испитивање кинетике сушења на фундаменталном нивоу, при чему су коришћене методе термогравиметријске анализе, као и анализа процеса сушења узорака у полу-индустријским условима на посебно пројектованој и изведеној експерименталној сушари. Експериментална испитивања су извршена у две фазе. Анализа кинетике сушења на експерименталној сушари извршена је на Пољопривредном факултету у Земуну. Прилоком ових истраживања за материјал воћни троп нектарине и јабуке одређен је ефективни коефицијент дифузије, почетна и равнотежна влажност, време сушења, као и потрошња енергије за сушење. Друга фаза испитивања извршена је на Машинском факултету у Београду. У оквиру ових испитивања урађене су додатне анализе материјала које укључују испитивање кинетике сушења на фундаменталном нивоу коришћењем термогравиметријске методе, мерење топлотне проводљивости и температуре на граничним површинама материјала, одређивање топлотне моћи и мерење издвојене влаге из материјала при изотермском сушењу.

На основу теоријских истраживања, развијен је модел сушења воћног тропа на бази Ликовљеве теорије сушења капиларно-порозних материјала. Такође, на основу експерименталних полу-индустријских истраживања, развијен је емпиријски математички модел сушења при конвективном и комбинованом кондуктивно-конвективном сушењу материјала воћног тропа у танком слоју.

На основу теоријских и експерименталних истраживања процеса сушења остатака из производње сокова комбинованом кондуктивно-конвективном методом на експерименталној сушари остварен је већи број резултата који омогућавају да се изврши анализа ефикасности ове методе сушења, односно да се изврши оптимизација утицајних параметара на процес сушења у циљу подизања енергетске ефикасности процеса сушења. На основу прикупљених података из овог истраживања, направљена је основа за евалуацију економске исплативости коришћења остатака из производње сокова као енергента у процесима сагоревања или сировине за производњу сточне хране, ђубрива, за производњу биоразградиве амбалаже итд.

У даљем тексту је дат преглед закључака у вези са специфичним резултатима тезе.

Закључци о могућностима коришћења остатака из производње сокова

Остатак из процеса производње сокова (троп, кљук, комовина) је влажан материјал који остаје после цеђења воћа или поврћа. Састоји се од коре, семенки, петелки и везивног ткива биљака. У свету и код нас воћни троп се користи као сточна храна, али се може користити и у моге друге сврхе: за екстракцију пектина и антиоксиданаса, као сировина за производњу јаких алкохолних пића, воћног јогурта, воћног брашна, као додатак кондиторским производима, затим као ђубриво, гориво, супстрат за узгајање гљива, па чак и као сировина за амбалажу. Тренутно је најисплативија употреба воћног остатка за екстракцију пектина, али се анаеробна дигестија за производњу биогаса све више потенцира.

Процењује се да на светском нивоу остатак из производње сока од јабука износи око 1,4 милиона тона. У Француској, где је производња јабука око 1,8 милиона тона, процена је да се трећина користи за производњу сокова или сајдера, од чега остаје око 150 000 тона воћног отпада (тропа). У Индији се, на пример, производи 1 милион тона јабучног отпада, од чега се само 10000 тона користи као сточна храна, тј. око 1%.

Потенцијали употребе остатака из производње сокова у Републици Србији су значајни. Према подацима Републичког завода за статистику укупна производња безалкохолних пића у Србији у 2019. години износила је 7105 хиљада хектолитара, од чега је укупна производња воћних сокова износила 1472 хиљада хектолитара. Узевши у обзир да се у технологији производње сокова 75% масе воћа претвара у сок, а 25% представља остатак из процеса производње, укупна маса произведеног отпада из индустрије сокова у Србији је у 2019. године износила око 147232 тона. Горња топлотна моћ осушеног воћног остатка износи између 17 и 17,6 MJ/kg што је приближна вредност горње топлотне моћи неких врста биогорива. Грубом проценом се може доћи да је то енергија довољна за грејање преко 7300 домаћинстава у Србији у току једне зимске сезоне.

Закључци о механизмима преношења влаге у прехранбеним материјалима током процеса сушења

Приликом процеса сушења прехранбених материјала влага се у материјалу налази у облику течне и парне фазе (осим у случају лиофилизације када се у материјала јавља чврста фаза). У почетку процеса сушења, микро и макропорама су испуњене водом, а влага се до површине материјала преноси у облику течне влаге, док се у каснијим фазама сушења влага до површине материјала преноси у парној фази.

Два највише проучавана и најважнија механизма током процеса сушења су капиларни транспорт и дифузија течности. Док је капиларни транспорт влаге кроз материјал највише примењив на сушење грануластих материјала дифузија течности је доминантни механизам преношења влаге у једнофазним материјалима са колоидном или геластом структуром. У многим случајевима су у току процеса сушења одређеног материјала заступљена оба механизма преношења влаге, тако да на почетку процеса сушења доминантну улогу има капиларни транспорт, док у каснијим фазама сушења доминантну улогу преузима дифузија течности.

Воћни троп, за разлику од свежег воћа и поврћа, након процеса цеђења сока има значајно другачију структуру. Циљ индустрије сокова је издвајање што веће количине воде из свежег воћа, а највећа количина воде (78-95%) у воћу се налази унутар ћелија, тј. као интрацелуларна вода, па приликом процеса екстракције сокова долази до руптуре (пуцања) биљних ћелија. Може се, дакле, сматрати да се сва преостала вода у воћном тропу налази у међућелијском простору, тј. као интерцелуларна вода и вода у влакнима који су саставни део ћелијских зидова воћа и поврћа.

На почетку процеса сушења вода у воћном тропу налази се у капиларама и у растворљивим влакнима. У капиларама вода може да се налази као слободна, уколико се налази на површини материјала или у већим, отвореним капиларама, затим као физичко-механички везана у затвореним и мањим капиларама и на крају као физичко-хемијски везана у биљним влакнима. На почетку процеса сушења се издваја слободна влага, па затим физичко-механички везана из већих и мањих капилара. Како сушење одмиче, вода нестаје из капилара и сва преостала вода се налази као физичко-хемијски везана влага која се налази у растворљивим влакнима. Између трећине и четвртине свих влакана су растворљива (влакна која упијају воду), па се влага из њих одстрањује осмозом који је генерално спорији процес од течне дифузије.

Закључци о просторно-временском математичком моделу сушења воћног тропа

Математички модел сушења воћног тропа је изведен на основу општег модела процеса сушења капиларно-порозних материјала према Ликовљевој теорији, детаљно приказаној у Поглављу 4. Овај општи модел је прилагођен конкретним граничним и почетним условима коришћеним у експериментима и уз одређене претпоставке развијен просторно-временски модел сушења воћног тропа. На основу конкретних услова при сушењу воћног тропа може се занемарити филтрационо кретање влаге јер се занемарује градијент притиска у материјалу. Градијент притиска се ствара при интензивном испаравању и/или кондензацији влаге унутар материјала која се јавља на температурама изнад температуре кључања воде, тј. 100°C при сушењу на атмосферском притиску. Градијент притиска се може јавити и на температурама нижим од 100°C, али је граница испод које се градијент притиска може занемарити 85°C. Како је у овом раду у току експерименталних истраживања максимална температура којом је третиран узорак била 70°C, оправдано је занемарити градијент притиска у материјалу. Сушење воћног тропа се може поделити на две фазе: сушење у првој опадајућој брзини сушења, где су заступљени механизми преношења влаге у течной и парној фази, и сушење у другој опадајућој брзини сушења, где се влага преноси искључиво у парној фази.

Закључак о сопственом математичком моделу процеса сушења

У Поглављу 5 је констатовано да математичко моделирање фундаменталним просторно-временским моделима, као што је Ликовљев модел, захтевају одређивање већег броја физичких величина, а њихово решавање је комплексно и врши се нумеричким алгоритмима. Због тога се у савременом приступу проучавања процеса сушења прибегава употреби једноставнијих полуемпиријских и емпиријских модела који су лакши за анализу. Ови модели се развијају на бази експерименталних података, при чему је циљ добити што боље поклапање модела са експерименталним подацима. За утврђивање степена слагања модела и експеримената користе се статистички параметари регресионе анализе - коефицијент детерминације (R^2) и стандардна грешка регресије (RMSE). Иако су модели развијени на овај начин лакши за разумевање и практичну примену, њихова употреба је ограничена на услове и материјал коришћен при експерименталним условима. Међутим, за одређене групе материјала, као што су на пример прехранбени материјали, развијени су модели који генерално добро описују кинетику процеса сушења, тј. показују добро слагање са експериментима. На основу претходно развијених математичких модела за материјал воћни троп и сличне материјале, развијен је сопствени математичког модела за описивање кинетике сушења тропа нектарине и јабуке при комбинованом кондуктивно-конвективном довођењу топлотног протока материјалу. Вођено је рачуна да се добије што боља подударност модела са експерименталним резултатима, што је и верификовано одличним слагањем сопственог модела са експерименталним резултатима, при чему је остварено слагање боље од било ког модела пронађеног у литератури за исте или сличне материјале.

Закључци на основу експерименталних истраживања

Експериментална истраживања су извршена у две фазе. Прва фаза је урађена на експерименталној сушари која је направљена на Пољопривредном факултету у Београду. Друга фаза - додатна испитивања која су рађена на лабораторијској опреми на Машинском факултету у Београду.

За испитивање кинетике процеса сушења на експерименталној сушари на Пољопривредном факултету коришћени су узорци од воћног тропа јабуке и нектарине добијене као остатак из производње сокова фабрике „Нектар“ из Бачке Паланке. Узорци су били облика диска пречника 100mm и дебљине 5, 7 и 10mm и средње масе 45,4, 56,8 и 82,5g, следствено. Сушење је вршено при комбинованом кондуктивно-конвективном довођењу топлотног протока материјалу, при чему је варирана температура ваздуха за сушење у опсегу 30 – 70 °C и температура грејне плоче у опсегу 50 – 70 °C. Извршено је укупно 72 циклуса мерења од којих је сваки трајао у просеку 22 часа, тј. укупно око 1600 часова испитивања.

Додатна испитивања термомеханичких особина материјала извршена су на Машинском факултету. За испитивање кинетике сушења на узорцима мале масе, са циљем утврђивања фундаменталних особина материјала, коришћена је термогравиметријска анализа. Поред тога, на лабораторијској опреми која се састојала од лабораторијске пећи, уређаја за испитивање топлотне проводљивости материјала, уређаја за мерење температуре и калориметра са бомбом, извршене су додатне анализе у циљу одређивања термомеханичких особина материјала битних за процес сушења остатака из производње сокова.

На основу извршених испитивања може се констатовати следеће:

- У току испитивања остатака из производње сокова – тропа нектарине и јабуке динамичком термогравиметријском анализом до температуре 180°C са порастом од 5K/min и масеном спектрометријом, закључено је да се из материјала издваја само вода у виду водене паре. Може се, дакле, закључити да приликом термалне разградње овог материјала не долази ни до једног другог процеса, осим процеса сушења.
- Изотермском термогравиметријском методом дошло се до зависности времена сушења од температуре за материјал троп јабуке и нектарине, при чему се ова зависност односи искључиво на својство материјала не разматрајући при томе утицај геометрије и начин довођења топлотног протока.
- Употреба грејне подлоге значајно утиче на кинетику процеса сушења остатака из производње сокова у односу на чисто конвективно сушење. Један од најбитнијих закључака је да се употребом грејне подлоге постиже значајно смањење времена сушења. Ово се може објаснити тиме да се при сушењу воћног тропа са комбинованим кондуктивно-конвективним довођењем топлотног протока материјалу саопштава већа количина енергије у јединици времена, што доприноси раскидању веза између воде и скелета материјала, а самим тим и већој брзини сушења. Употреба грејне подлоге такође утиче на равнотежни садржај воде, максималних вредности брзина сушења, карактер кривих сушења, као и на ефективни коефицијент дифузије воде.
- Режији сушења са највећим градијентом температуре (тј. највећом разликом температура грејне подлоге и ваздуха) су уједно и Режији где долази до највећег смањења времена сушења. Ово се може објаснити тиме да при сушењу са градијентом температуре у материјалу долази до изражаја механизам преношења воде термодифузија, која је у смеру супротног градијенту температуре. Самим тим се и процес сушења убрзава.

- При режимима сушења без градијента температуре и малом дебљином узорка, као што су режими КД60-КВ60-5 и КД70-КД70-5, нема евидентне разлике у времену сушења у односу на чисто конвективно сушење са истом температуром ваздуха. Ова чињеница наводи на закључак да је за сушење тропа нектарине дебљине $\leq 5\text{mm}$ на температурама ваздуха преко 60°C довољно користити само конвективно довођење топлотног протока материјалу. Ово се може објаснити чињеницом да се узорци мање дебљине на вишим температура у почетним фазама сушења брзо загревају, као и да влага прелази краћи пут до слободне површине, што скраћује време сушења. За узорке дебљине $>5\text{mm}$ коришћење грејне подлоге доводи до значајног смањења времена сушења.
- Сушење воћног тропа је процес контролисан унутрашњим отпорима пролажењу влаге кроз материјал, па се цео процес сушења овог материјала одвија у периоду опадајуће брзине сушења. За режим са комбинованом кондуктивно-конвективним довођењем топлотног протока, период опадајуће брзине сушења се може поделити на два дела – период прве опадајуће брзине сушења – где се влага из унутрашњости до површине материјала преноси у облику течне и парне влаге, као и период друге опадајуће брзине сушења где се влага из унутрашњости до површине материјала преноси искључиво у облику парне влаге. Постојање два периода опадајуће брзине сушења је израженији што је већи градијент температуре у материјалу током сушења. Насупрот томе, при конвективном сушењу, брзина сушења од максималне вредности постепено опада до краја сушења. Може се, дакле, закључити да је процес сушења са конвективном и комбинованом кондуктивно-конвективном довођењем топлотног протока квалитативно различит, тј. да су заступљени другачији механизми преношења влаге кроз материјал.
- Брзина сушења се при комбинованом кондуктивно-конвективном драстично повећава у односу на чисто конвективно сушење. Максимална вредност брзине сушења се достиже на почетку процеса сушења, тј. на крају периода загревања материјала. После достизања максималне вредности, брзина сушења опада до краја сушења.
- Повећање ефективног коефицијента дифузије је највеће код тропа нектарине и јабуке остварује се за режим сушења КД70–КВ30, што потврђује да разлика температуре између грејне подлоге и ваздуха има значајан утицај на кинетику сушења. Температура грејне подлоге и температурска разлика имају највећи утицај на ефективни коефицијент дифузије.
- Поклапање усвојеног математичког модела са експерименталним резултатима је веома добро и може се објасни тиме да дводелни модел лакше може да опише довођење топлотног флукса на два начина истовремено, што указује на предност у односу на једноставније моделе.
- Потрошња енергије за сушење је мерена на експерименталној сушари са грејача за ваздух и са грејне подлоге. Добијене су функционалне зависности потрошње енергије у времену. За потрошњу енергије са грејача ова зависност је линеарна, док је за потрошњу са грејне подлоге ова зависност степена функција (Belehradek). Такође, израчунате су укупне потрошње енергије у току сваког експеримента сведене на килограм издвојене влаге.
- Експериментална сушара при изабраним експерименталним условима поседује капацитет да осуши много већу масу узорка од масе која је коришћена при испитивању. Због тога је израчуната корисна специфична потрошња енергије за сушење која је подразумевала коришћење минималне потребне количине ваздуха и топлотног флукса са грејне подлоге сведен на површину узорка. Ово је било значајно и са аспекта поређења са другим ауторима.
- Корисна специфична потрошња енергије за сушење одређена је као количник корисне енергије утрошене за сушење и масе издвојене влаге. Тако је за сваки експериментални режим приликом испитивања кинетике сушења установљена корисна специфична потрошња енергије. Најмања и највећа специфична потрошња енергије била је 263 и

2238MJ по килограму издвојене влаге за троп нектарине, тј. 431 и 1787MJ по килограму издвојене влаге за троп јабуке.

- У току испитивања топлотне проводљивости материјала закључено је да у току процеса сушења долази до неједнаке промене ове величине на горњој површини материјала – изложеној топлом ваздуху и доњој површини – која је била на грејној подлози. Топлотна проводљивост, а самим тим и размена масе и супстанције опада на горњој површини материјала, док се на доњој површини не мења све до крајњих фаза сушења. Ово за последицу има следеће закључке:
 - Ефикасност кондуктивног довођења топлотног протока овој врсти материјала је ефикасније у односу на конвективно
 - Како ефикасност довођења топлоте материјалу конвекцијом опада, могуће је у току процеса сушења смањити температуру и/или проток ваздуха и тиме, без негативног утицаја на време сушења, остварити уштеде енергије коришћењем, од тог тренутка, само кондуктивно довођење топлотног протока.
- Температуре површина материјала у току процеса сушења се разликују од задатих температура ваздуха и никада их не достижу. Разлика је већа, што је виша задата температура ваздуха.
- При изотермском издвајању влаге из тропа јабуке и нектарине, примећен је линеаран тренд раста количине издвојене влаге са повећањем температуре ваздуха.
- Вредности горњих топлотних моћи тропа јабуке и нектарине износи 17282 и 17624 kJ/kg.

Приликом поређења резултата, закључено је:

- Сопствени математички модел боље описује процес сушења воћног тропа од модела до сада доступних у литератури за сушење прехранбених производа.
- Добијене вредности ефективног коефицијента дифузије тропа јабуке ($2,10 - 2,605 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$) и нектарине ($2,79 - 3,151 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$) слажу се врло добро са малобројним истраживањима других аутора, а сви резултати су у оквиру граница ефективног коефицијента дифузије прехранбених производа, који се крећу од 10^{-8} до $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.
- Потрошња енергије за сушење је у опсегу измерених вредности других аутора из ове области.

Резултати ове дисертације доприносе бољем разумевању феномена који се дешавају у току процеса сушења остатака из производње сокова – воћном тропу. На примеру тропа јабуке и нектарине направљен је искорак у проучавању процеса сушења комбинујући фундаментална истраживања материјала на узорцима масе до 50mg са истраживањима на полу-индустријском пилот постројењу – експерименталној сушари на узорцима масе до 80g, која је осмишљена и направљена у ове сврхе. Додајући овоме испитивања термомеханичких особина материјала као што је топлотна проводљивост и топлотна моћ добија се комплетан увид у процес сушења ове врсте материјала, као и добра основа за даља истраживања. Даљи рад у овој области може да буде испитивање ове врсте материјала у сврху употребе као гориво. Такође, коришћењем резултата термогравиметријске анализе и комбиновањем резултата добијених на макроскопском нивоу могу се детаљније квалитативно и квантитативно анализирати механизми преношења влаге кроз овај материјал у току процеса сушења.

11. ЛИТЕРАТУРА

- [1] V. P. Gouw, J. Jung, J. Simonsen, and Y. Zhao, "Fruit pomace as a source of alternative fibers and cellulose nanofiber as reinforcement agent to create molded pulp packaging boards," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 99, pp. 48–57, 2017.
- [2] T. de Moraes Crizel, A. de Oliveira Rios, V. D. Alves, N. Bandarra, M. Moldão-Martins, and S. Hickmann Flôres, "Active food packaging prepared with chitosan and olive pomace," *Food Hydrocoll.*, vol. 74, pp. 139–150, 2018.
- [3] J. Gustafsson, M. Landberg, V. Bátori, D. Åkesson, M. J. Taherzadeh, and A. Zamani, "Development of Bio-Based Films and 3D Objects from Apple Pomace," *Polymers (Basel)*, vol. 11, no. 2, p. 289, 2019.
- [4] S. A. Mir, B. N. Dar, A. A. Wani, and M. A. Shah, "Effect of plant extracts on the techno-functional properties of biodegradable packaging films," *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 80, no. February, pp. 141–154, 2018.
- [5] X. Wang, E. Kristo, and G. LaPointe, "Adding apple pomace as a functional ingredient in stirred-type yogurt and yogurt drinks," *Food Hydrocoll.*, vol. 100, no. July 2019, 2020.
- [6] Sangeeta Singh and K. Kulshrestha, "Peach Juice and Pomace Powder; Nutritive Value and Use of Pomace Powder in Biscuits," *Int. J. Food Sci. Technol.*, vol. 6, no. 3, pp. 5–16, 2016.
- [7] B. Saha, "Peach and Nectarine Processing By-Products as Substrate For Growing Mushrooms - Master Thesis," California State University, 2009.
- [8] C. W. Hall, *Handbook of Industrial Drying*, vol. 6, no. 3. 1988.
- [9] I. Dincer and C. Zamfirescu, *Drying Phenomena - Theory and Application*. 2016.
- [10] R. Shalini and A. Singh, "Mathematical Modelling of Drying Kinetics of Apple Pomace," *J. Food Sci. Technol. Nepal*, vol. 5, pp. 110–121, 2009.
- [11] Feedipedia, "Feedipedia Web Site." [Online]. Available: <https://www.feedipedia.org/>.
- [12] R. zavod za Statistiku, "<https://www.stat.gov.rs/>," 2019. .
- [13] R. R C, *Modern Methods of Plant Analysis*, vol. 39, no. 3. 1956.
- [14] S. Rana, S. Gupta, A. Rana, and S. Bhushan, "Functional properties, phenolic constituents and antioxidant potential of industrial apple pomace for utilization as active food ingredient," *Food Sci. Hum. Wellness*, vol. 4, no. 4, pp. 180–187, 2015.
- [15] P. M. Топић, *Основе пројектовања, прорачуна и конструисања сушара*. Београд: Научна књига, 1989.
- [16] A. V. Luikov, *Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies*. 1966.
- [17] D. G. Mercer, *An Introduction to the Dehydration and Drying of Fruits and Vegetables Part 2: Drying of specific fruits and vegetables*. Ontario: University of Guelph, 2014.
- [18] G. Rajasheker and V. P. Chandramohan, "Estimation of Initial Moisture Content of Agricultural Products by an ASTM Experimental Procedure," *Indian J. Nat. Sci.*, vol. 8, no. 43, pp. 12618–12622, 2017.
- [19] X. D. Chen and A. S. Mujumdar, *Drying technologies in food processing*. 2008.
- [20] I. Zlatanović, "Termomehanički procesi pri sušenju prehrambenih materijala u sistemima sa

recirkulacijom vazduha, Doktorska disertacija,” Univerzitet u Beogradu, 2013.

- [21] A. S. Mujumdar *et al.*, *Handbook of Industrial Drying*. 2006.
- [22] N. R. Nwakuba, S. N. Asoegwu, and K. N. Nwaigwe, “Energy requirements for drying of sliced agricultural products: A review,” *Agric. Eng. Int. CIGR J.*, vol. 18, no. 2, pp. 144–155, 2016.
- [23] A. Motevali, S. Minaei, and M. H. Khoshtagaza, “Evaluation of energy consumption in different drying methods,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 52, no. 2, pp. 1192–1199, 2011.
- [24] M. Beigi, “Energy efficiency and moisture diffusivity of apple slices during convective drying,” *Food Sci. Technol.*, vol. 36, no. 1, pp. 145–150, 2016.
- [25] C. Chen, C. Venkitasamy, W. Zhang, L. Deng, X. Meng, and Z. Pan, “Effect of step-down temperature drying on energy consumption and product quality of walnuts,” *J. Food Eng.*, vol. 285, no. February, 2020.
- [26] A. E. Stępień, J. Gorzelany, N. Matłok, K. Lech, and A. Figiel, “The effect of drying methods on the energy consumption, bioactive potential and colour of dried leaves of Pink Rock Rose (*Cistus creticus*),” *J. Food Sci. Technol.*, vol. 56, no. 5, pp. 2386–2394, 2019.
- [27] K. Keselj, I. Pavkov, M. Radojcin, and Z. Stamenkovic, “Comparison of energy consumption in the convective and freeze drying of raspberries,” *J. Process. Energy Agric.*, vol. 21, no. 4, pp. 192–196, 2017.
- [28] M. E. Adabi, A. Motevali, A. M. Nikbakht, and M. H. Khoshtaghaza, “Investigation of Some Pretreatments on Energy and Specific Energy Consumption Drying of Black Mulberry,” *Chem. Ind. Chem. Eng. Q.*, vol. 19, no. 1, pp. 89–105, 2013.
- [29] O. Ismail, B. Beyribey, and I. Doymaz, “Effect of drying methods on drying characteristic, energy consumption and color of nectarine,” *J. Therm. Eng.*, vol. 2, no. 3, pp. 801–806, 2016.
- [30] H. Elmesery and H. Mao, “Influence of Drying Methods on Specific Energy Consumption and Physical Quality of Tomato Slices (*Lycopersicon Esculentum*),” *Sci. Int.*, vol. 29, no. 2, pp. 143–147, 2017.
- [31] A. Motevali, S. Minaei, M. H. Khoshtaghaza, and H. Amirnejat, “Comparison of energy consumption and specific energy requirements of different methods for drying mushroom slices,” *Energy*, vol. 36, no. 11, pp. 6433–6441, 2011.
- [32] R. Shalini and D. K. Gupta, “Utilization of pomace from apple processing industries: A review,” *J. Food Sci. Technol.*, vol. 47, no. 4, pp. 365–371, 2010.
- [33] S. Reis, D. K. Rai, and N. Abu-Ghannam, “Apple Pomace as a Potential Ingredient for the Development of New Functional Foods,” in *Food Chemistry Commons*, 2012.
- [34] S. D. UN Food & Agriculture Organization, “FAOSTAT,” 2017.
- [35] M. Yates, M. R. Gomez, M. A. Martin-Luengo, V. Z. Ibañez, and A. M. Martinez Serrano, “MultivalORIZATION of apple pomace towards materials and chemicals. Waste to wealth,” *J. Clean. Prod.*, vol. 143, pp. 847–853, 2017.
- [36] G. S. Dhillon, S. Kaur, and S. K. Brar, “Perspective of apple processing wastes as low-cost substrates for bioproduction of high value products: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 27, pp. 789–805, 2013.
- [37] F. Figuerola, M. L. Hurtado, A. M. Estavez, I. Chiffelle, and F. Asenjo, “Fibre concentrates

from apple pomace and citrus peel as potential fibre sources for food enrichment,” *Food Chem.*, vol. 91, no. 3, pp. 395–401, 2005.

- [38] M. F. Sato, R. G. Vieira, D. M. Zardo, L. D. Falcao, A. Nogueira, and G. Wosiacki, “Apple pomace from eleven cultivars: an approach to identify sources of bioactive compounds,” *Acta Sci. Agron.*, vol. 32, no. 1, 2010.
- [39] S. Gorjanović *et al.*, “Evaluation of Apple Pomace Flour Obtained Industrially by Dehydration as a Source of Biomolecules with Antioxidant, Antidiabetic and Antiobesity Effects,” *Antioxidants*, vol. 9, no. 5, p. 413, 2020.
- [40] M. Kruczek, D. Gumul, M. Kacániiová, E. Ivanišhová, J. Marecek, and H. Gambus, “Industrial apple pomace by-products as a potential source of pro-health compounds in functional food,” *J. Microbiol. Biotechnol. Food Sci.*, vol. 7, no. 1, pp. 22–26, 2017.
- [41] M. L. Sudha, V. Baskaran, and K. Leelavathi, “Apple pomace as a source of dietary fiber and polyphenols and its effect on the rheological characteristics and cake making,” *Food Chem.*, vol. 104, no. 2, pp. 686–692, 2007.
- [42] H. N. Rabetafika, B. Bchir, C. Blecker, and A. Richel, “Fractionation of apple by-products as source of new ingredients: Current situation and perspectives,” *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 40, no. 1, pp. 99–114, 2014.
- [43] E. L. Karkle, S. Alavi, and H. Dogan, “Cellular architecture and its relationship with mechanical properties in expanded extrudates containing apple pomace,” *Food Res. Int.*, vol. 46, no. 1, pp. 10–21, 2012.
- [44] N. O’Shea *et al.*, “Physicochemical assessment of two fruit by-products as functional ingredients: Apple and orange pomace,” *J. Food Eng.*, vol. 153, pp. 89–95, 2015.
- [45] V. R. Preedy, R. Srirajaskanthan, and V. B. Patel, Eds., *Handbook of Food Fortification and Health*, vol. 2. Humana Press.
- [46] R. R. Madrera, R. Pando, A. G. Hevia, M. B. Arce, and B. S. Valles, “Food and Bioproducts Processing Production of spirits from dry apple pomace,” vol. 1, no. April, pp. 623–631, 2013.
- [47] S. Ahmad, S. John, D. Bosco, and M. Ahmad, “Effect of apple pomace on quality characteristics of brown rice based cracker,” *J. Saudi Soc. Agric. Sci.*, vol. 16, no. 1, pp. 25–32, 2017.
- [48] S. Bhushan, K. Kalia, M. Sharma, B. Singh, and P. S. Ahuja, “Processing of apple pomace for bioactive molecules,” *Crit. Rev. Biotechnol.*, vol. 28, no. 4, pp. 285–296, 2008.
- [49] Obstpresse Bramberg, Kulturverein Tauriska and V. Olschnögger, “Lebensmittel Technik.”
- [50] F. Dranca and M. Oroian, “Extraction, purification and characterization of pectin from alternative sources with potential technological applications,” *Food Res. Int.*, vol. 113, no. June, pp. 327–350, 2018.
- [51] A. Schieber, P. Hilt, H. U. Endress, C. Rentschler, and R. Carle, “A new process for the combined recovery of pectin and phenolic compounds from apple pomace,” *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, vol. 4, no. 1, pp. 99–107, 2003.
- [52] D. Constenla, A. G. Ponce, and J. E. Lozano, “Effect of Pomace Drying on Apple Pectin,” *LWT - Food Sci. Technol.*, vol. 35, no. 3, pp. 216–221, 2002.
- [53] M. T. Aldosari, “Effects of different drying methods on the total phenolic, antioxidant properties, and functional properties of apple pomace,” Michigan State University, 2014.

- [54] R. Shalini, *Apple pomace drying - drying characteristics of apple pomace*. 2010.
- [55] R. Rodríguez Madrera, R. Pando Bedriñana, A. García Hevia, M. B. Arce, and B. Suárez Valles, "Production of spirits from dry apple pomace and selected yeasts," *Food Bioprod. Process.*, vol. 91, no. 4, pp. 623–631, 2013.
- [56] Z. Wang *et al.*, "Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace," *Food Res. Int.*, vol. 40, pp. 39–46, 2007.
- [57] C. Kara and I. Doymaz, "Effective moisture diffusivity determination and mathematical modelling of drying curves of apple pomace," *Heat Mass Transf.*, vol. 51, no. 7, pp. 983–989, 2015.
- [58] Z. Wang, J. Sun, F. Chen, X. Liao, and X. Hu, "Mathematical modelling on thin layer microwave drying of apple pomace with and without hot air pre-drying," *J. Food Eng.*, vol. 80, no. 2, pp. 536–544, May 2007.
- [59] J. Sun *et al.*, "Characteristics of thin-layer infrared drying of apple pomace with and without hot air pre-drying," *Food Sci. Technol. Int.*, vol. 13, no. 2, pp. 91–97, 2007.
- [60] AIJN - European Fruit Juice Association, "2018 Liquid Fruit Market Report," 2018.
- [61] N. K. Sinha, J. S. Sidhu, J. Barta, J. S. B. Wu, and M. P. Cano, *Handbook of Fruits and Fruit Processing: Second Edition*. 2012.
- [62] O. Ismail, A. S. Kipcak, İ. Doymaz, and S. Piskin, "Thin-layer drying kinetics of nectarine slices using IR , MW and hybrid methods," *Bulg. Chem. Commun.*, vol. 49, no. 1, pp. 92–100, 2017.
- [63] P. Sarkar and G. S. Choudhury, "Peach Pomace Processing Using Twin Screw Extrusion," *J. Microbiol. Biotechnol. Food Sci.*, pp. 279–286, 2014.
- [64] J. Pagán and A. Ibarz, "Extraction and rheological properties of pectin from fresh peach pomace," *J. Food Eng.*, vol. 39, no. 2, pp. 193–201, 1999.
- [65] J. Pagán, A. Ibarz, M. Llorca, A. Pagán, and G. V Barbosa-Cánovas, "Extraction and characterization of pectin from stored peach pomace," *Food Res. Int.*, vol. 34, no. 7, pp. 605–612, 2001.
- [66] S. Lalas, A. Alibade, E. Bozinou, and D. P. Makris, "Drying Optimisation to Obtain Carotenoid-Enriched Extracts from Industrial Peach Processing Waste (Pomace)," *Beverages*, vol. 5, no. 3, p. 43, 2019.
- [67] M. Milanović, M. Komatina, I. Zlatanovic, N. Manic, and D. Antonijevic, "Kinetic parameters identification of conductive enhanced hot air drying process of food waste," *Therm. Sci.*, vol. 25, no. 3 Part A, pp. 1795–1807, 2021.
- [68] B. Alaei and R. A. Chayjan, "Modelling of Nectarine Drying under Near Infrared –Vacuum Conditions," *Acta Sci. Pol. Technol. Aliment.*, vol. 14, no. 1, pp. 15–27, 2015.
- [69] E. A. F. Araujo, C. A. Ribeiro, M. Azoubel, and E. X. Fernanda, "Drying Kinetics Of Nectarine (*Prunus Persica*) With And Without Shrinkage," in *Drying 2004 - Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004)*, 2004, vol. C, pp. 2189–2194.
- [70] I. Pavkov, L. Babic, M. Babic, M. Radojein, and C. Stojanovic, "Effects of Osmotic Pre-Treatment on Convective Drying Kinetics of Nectarines Halves (*Pyrus Persica L.*)," *J. Process. Energy Agric.*, vol. 15, no. 4, pp. 217–222, 2011.
- [71] M. A. S. Hassan, B. Sturm, and A. Nasirahmadi, "Effects of hot-air and hybrid hot air-

microwave drying on drying kinetics and textural quality of nectarine slices,” *Heat Mass Transf.*, vol. 54, pp. 915–927, 2018.

- [72] F. M. Demirel and O. Ismail, “Investigation of the effect of a hybrid drying method on the color quality of nectarine slices and energy consumption,” *Stud. Univ. Babeş-Bolyai Chem.*, vol. 62, no. 1, pp. 237–248, 2017.
- [73] M. M. Rodríguez, R. H. Mascheroni, and A. Quintero-Ramos, “Mathematical Modeling of Hot-Air Drying of Osmo-dehydrated Nectarines,” *Int. J. Food Eng.*, vol. 11, no. 4, pp. 533–545, 2015.
- [74] Л. А.В., *Теория сушки*. Москва: Энергия, 1968.
- [75] M. U. H. Joardder, M. Mourshed, and M. Hasan, *State of Bound Water: Measurement and Significance in Food Processing*. 2019.
- [76] M. I. H. Khan, T. Farrell, S. A. Nagy, and M. A. Karim, “Fundamental Understanding of Cellular Water Transport Process in Bio-Food Material during Drying,” *Sci. Rep.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–12, 2018.
- [77] R. Treybal, *Mass Transfer Operations*. Mc Graw Hill International Book Company, 1981.
- [78] Z. Erbay and F. Icier, “A review of thin layer drying of foods: Theory, modeling, and experimental results,” *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 50, no. 5, pp. 441–464, 2010.
- [79] C. Gavrilă, A. G. Ghiaus, and I. Gruia, “Heat and Mass Transfer in Convective Drying Processes,” in *COMSOL Conference*, 2008.
- [80] S. V. Jangam, C. L. Law, and A. S. Mujumdar, *Drying of Foods, Vegetables and Fruits (Volume 1)*. 2010.
- [81] K. Roger, E. Sparr, and H. Wennerström, “Evaporation, diffusion and self-assembly at drying interfaces,” *Phys. Chem. Chem. Phys.*, vol. 20, pp. 10430–10438, 2018.
- [82] R. G. Mortimer and H. Eyring, “Elementary transition state theory of the Soret and Dufour effects,” *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 77, no. 4 II, pp. 1728–1731, 1980.
- [83] Miljanić S. Šćepan, *Udžbenik nuklearne hemije*. Univerzitet u Beogradu, Fakultet za fizičku hemiju, 2008.
- [84] A. V. Luikov, *Heat and mass transfer*. Moscow: Mir Publishers, 1980.
- [85] D. Antonijević, “Nestacionarno Prenosjenje Toplote i Materije Tokom Procesu Kombinovanog Konduktivno-Konvektivnog Sušenja Koloidnih Kapilarnoporoznih Materijala, Doktorska disertacija,” Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, 1999.
- [86] D. Antonijević and D. Voronjec, “Moisture migration within material during the drying process with conductive heat supply,” *Procesna Teh.*, vol. 2, no. 3, pp. 318–321, 1988.
- [87] D. Antonijević, “Temperature and Moisture Distributions Inside a Layer of Moist Material Placed on a Hot Isothermal Surface,” *J. Eng. Phys. Thermophys.*, vol. 74, no. 4, pp. 970–977, 2001.
- [88] I. Zlatanović, M. Komatina, and D. Antonijević, “Low-temperature convective drying of apple cubes,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 53, no. 1, pp. 114–123, 2013.
- [89] D. Antonijević, “Variable Coefficients Model for Drying Processes with Conductive Heat Supply,” *Dry. Technol.*, vol. 27, no. 1, pp. 71–75, 2009.
- [90] S. Whitaker, “Advances in Heat Transfer, Volume 12, 1976.,” *Adv Heat Transf.*, vol. 12,

1976.

- [91] H. T. Vu and E. Tsotsas, "Mass and Heat Transport Models for Analysis of the Drying Process in Porous Media: A Review and Numerical Implementation," *Int. J. Chem. Eng.*, vol. 2018, 2018.
- [92] J. Crank, *The Mathematics of Diffusion*, Second edi. Oxford: Clarendon press, 1975.
- [93] S. Sahin and S. G. Sumnu, *Physical properties of foods*. Springer, 2006.
- [94] P. Burg, T. Vítěz, J. Turan, and J. Burgová, "Evaluation of grape pomace composting process," *Acta Univ. Agric. Silvic. Mendelianae Brun.*, vol. 62, no. 5, pp. 875–881, 2014.
- [95] M. Maslovarić, "Ispitivanje Nutritivne Vrednosti Osušenog Jabučnog Tropa i Mogućnosti Njegove Upotrebe u Industrijskoj Proizvodnji Hrane za Životinje - Doktorska disertacija," Univerzitet u Novom Sadu, Tehnološki fakultet, 2017.
- [96] M. R. Radovanovic, *Goriva*. Beograd, 1994.
- [97] Mihailo Milanović *et al.*, "Analiza Uticaja Toplotne Izolovanosti Sekcije Grejača Tunelske Konvektivne Sušare na Postizanje Radnih Parametara, Energetsku Efikasnost i Ekonomičnost," *Agric. Eng.*, 2018.
- [98] I. Zlatanović, M. Komatina, and D. Antonijević, "Experimental Investigation of the Efficiency of Heat Pump Drying System with Full Air Recirculation," *J. Food Process Eng.*, 2016.
- [99] D. Voronjec and Đ. Kozić, *Vlažan vazduh – termodinamicke osobine i primena*. Beograd: SMEITS, 1980.
- [100] M. Nguyen and W. E. Price, "Air-drying of banana : Influence of experimental parameters , slab thickness , banana maturity and harvesting season," *J. Food Eng.*, vol. 79, pp. 200–207, 2007.
- [101] M. U. Ocoró Zamora and A. Ayala-Aponte, "Influence of thickness on the drying of papaya puree (carica papaya l.) through refractance windowtm technology," *Dyna; Vol. 80, num. 182 (2013); 147-154 DYNA; Vol. 80, num. 182 (2013); 147-154 2346-2183 0012-7353*, pp. 147–154, 2014.
- [102] W. J. N. Fernando, H. C. Low, and A. L. Ahmad, "Dependence of the effective diffusion coefficient of moisture with thickness and temperature in convective drying of sliced materials. A study on slices of banana, cassava and pumpkin," *J. Food Eng.*, vol. 102, no. 4, pp. 310–316, 2011.
- [103] A. S. Mujumdar and E. Tsotsas, Eds., *Modern Drying Technology*, vol. 4. 2012.
- [104] W. K. Lewis, "The Rate of Drying of Solid Materials," *J. Ind. Eng. Chem.*, no. THE SYMPOSIUM ON DRYING, pp. 427–432, 1921.
- [105] F. Gamli, "A Review Based on the Relationship Among Drying , Curve Fitting and Mathematical Models in Food Systems," *Adv. Res. Agric. Vet. Sci.*, vol. 1, no. 2, pp. 47–53, 2014.
- [106] E. G. Page, "Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers," Purdue University, 1949.
- [107] S. M. Henderson and S. Pabis, "Grain Drying Theory: Temperature Effect on Drying Coefficient," *J. Agric. Eng. Res.*, vol. 6, pp. 169–174, 1961.

- [108] H. Kucuk, A. Midilli, A. Kilic, and I. Dincer, "A Review on Thin-Layer Drying-Curve Equations," *Dry. Technol.*, vol. 32, pp. 757–773, 2014.

12. ПРИЛОЗИ

12.1. Прилог 1 – Средњи почетни садржај влаге неких врста воћа и поврћа

Табела 12.1: Средњи почетни садржај влаге неких врста воћа и поврћа

Материјал	Геометрија узорака	Просечни почетни садржај влаге по сувој основи (kg _w /kg _{sm})	Просечни почетни садржај влаге по влажној основи (kg _w /kg _{sm})	Литературни извор
Шаргарепа	Коцкице 2x2x2 cm	6,0978	86%	[18]
	Колутићи 5-6mm дебљине	8,10	89%	[17]
Ђумбир	Коцкице 2x2x2 cm	5,3391	84%	[18]
	Нарендан	8,71	90%	[17]
Купус	Коцкице 2x2x2 cm	11,8895	92%	[18]
Зелена љута папричица	Сечене на половине	6,7215	87%	[18]
Шкотска Боннет папричица	Сечене на половине	6,69	87%	[17]
Јалапено папричица	Кришке	15,53	94%	[17]
Слатка зелена паприка	Сечене на половине	16,74	94%	[17]
Жута папричица	Сечене на половине	13,02	93%	[17]
Парадајз	Кришке / комадићи	19,804	95%	[18]
	Кришке	15,08	94%	[17]
Цвекла	Коцкице 2x2x2 cm	14,4102	94%	[18]
Тиквица	Коцкице 2x2x2 cm	30,9495	97%	[18]
Црни лук	Коцкице 2x2x2 cm	7,246	88%	[18]
Црно грожђе (са семенкама)	Комадићи	6,652	87%	[18]
Зелено грожђе	Комадићи	7,038	88%	[18]
Банана	Коцкице 2x2x2 cm	3,693	79%	[18]
	Дискови	2,80	74%	[17]
	Дискови	2,97	75%	[20]
Јабука	Коцкице 2x2x2 cm	6,3557	86%	[18]
	Колутићи	5,84	85%	[17]
	Коцкице	8,55	90%	[20]
Кромпир	Листићи	3,58	78%	[20]
Оригано	Листови цели	6,7	87%	[17]
Манго	Кришке 5-6 мм дебљине	5,97	86%	[17]

Папаја	Кришке у облику полумесеца 5-6 mm дебљине	6,64	87%	[17]
Ананас	Колутићи дебљине 5-6 mm	5,35	84%	[17]
Ротквице	Колутићи око 3 mm дебљине	19,82	95%	[17]
Лубеница	Комадићи дебљине 3 cm	14,38	93%	[17]

12.2. Прилог 2 - Коефицијенти уз Ликовљеве једначине

$$\begin{aligned} K_{11} &= D_m & K_{12} &= D_m \delta & K_{13} &= k_p \rho_0 \\ K_{21} &= \frac{\varepsilon r D_m}{c} & K_{22} &= \alpha + \frac{\varepsilon r D_m \delta}{c} & K_{23} &= \frac{\varepsilon r D_m \delta p}{c} \\ K_{31} &= -\frac{\varepsilon D_m}{c_p} & K_{32} &= -\frac{\varepsilon D_m \delta}{c_p} & K_{33} &= D_p - \frac{\varepsilon D_m \delta p}{c_p} \end{aligned}$$

Где су: D_m – коефицијент дифузије влаге, δ – коефицијент термовлагопроводности, c – специфични топлотни капацитет влажног материјала, k_p – коефицијент филтрације; δ_p – бездимензиони коефицијент филтрационог кретања влаге; c_p – специфични топлотни капацитет влажног ваздуха у порозном телу; D_p – конвективни филтрациони коефицијент дифузије; ρ_0 – густина чврстог скелета материјала; ε – коефицијент фазне трансформације; r – топлота промене фазе; α – топлотна дифузивност,

12.3. Прилог 3 – Вредност апсолутне влажности ваздуха на излазу из коморе и експериментално утврђена маса издвојене влаге

Табела 12.2: Вредност апсолутне влажности ваздуха на излазу из коморе за сушење x_2 [kg_w/kg_{sv}]

	Троп нектарине			Троп јабуке		
	5mm	7mm	10mm	5mm	7mm	10mm
KB30	0,005747861	0,005746305	0,005749783	0,005739726	0,005740434	0,005741893
KB40	0,005751139	0,005752210	0,005756513	/	/	/
KB50	0,005756800	0,005757513	0,005760708	0,005755251	0,005758387	0,005760790
KB60	0,005775571	0,005761422	0,005764226	/	/	/
KB70	0,005792806	0,005766571	0,005770304	/	/	/
КД50-КВ30	0,005770465	0,005768419	0,005773579	0,005759588	0,005758303	0,005759994
КД50-КВ40	0,005769356	0,005767856	0,005772744	/	/	/
КД50-КВ50	0,005763198	0,005761515	0,005766032	0,005757657	0,005759083	0,005761566
КД60-КВ30	0,005779874	0,005783485	0,005788176	0,005763454	0,005767655	0,005769063
КД60-КВ40	0,005778085	0,005777336	0,005783919	/	/	/
КД60-КВ50	0,005777917	0,005781549	0,005784873	0,005768535	0,005774703	0,005778996
КД60-КВ60	0,005770927	0,005778823	0,005782024	/	/	/
КД70-КВ30	0,005797068	0,005798116	0,005803438	0,005762885	0,005774958	0,005774372
КД70-КВ40	0,005795053	0,005798355	0,005802919	/	/	/
КД70-КВ50	0,005791390	0,005797968	0,005801217	0,005771477	0,005779345	0,005780339
КД70-КВ70	0,005796601	0,005796122	0,005806537	/	/	/

Табела 12.3: Експериментално утврђена маса влаге издвојена при сушењу

	5mm	7mm	10mm	5mm	7mm	10mm
KB30	40,09	41,11	64,85	34,43	45,75	57,74
KB40	34,62	41,10	63,80	/	/	/
KB50	32,76	43,86	63,64	33,96	48,59	60,68
KB60	36,72	44,09	62,43	/	/	/
KB70	34,82	44,60	63,91	/	/	/
КД50-КВ30	35,91	44,52	65,65	34,60	47,28	60,12
КД50-КВ40	35,92	43,76	64,23	/	/	/
КД50-КВ50	34,74	43,15	64,14	34,62	48,35	60,20
КД60-КВ30	35,93	45,79	64,74	34,65	48,35	60,48
КД60-КВ40	36,57	42,96	63,64	/	/	/
КД60-КВ50	38,66	46,89	64,88	33,92	48,00	59,99
КД60-КВ60	35,31	45,82	63,47	/	/	/
КД70-КВ30	36,41	46,22	64,79	34,33	48,34	59,53
КД70-КВ40	36,28	46,44	64,40	/	/	/
КД70-КВ50	35,72	46,53	63,38	33,75	48,11	58,98
КД70-КВ70	38,46	45,82	68,95	/	/	/

12.4. Прилог 4 – Максимално могућа издвојена влага

Табела 12.4: Теоријски максимална могућа издвојена маса воде у току сушења [kg]

	Троп нектарине			Троп јабуке		
	5mm	7mm	10mm	5mm	7mm	10mm
KB30	12,6	14,2	18,4	19,9	24,6	27,3
KB40	13,6	15,3	19,9	/	/	/
KB50	13,6	17,7	23,0	15,0	19,0	21,9
KB60	11,3	19,7	25,7	/	/	/
KB70	9,5	20,8	27,1	/	/	/
КД50-KB30	5,0	6,5	8,5	6,6	9,4	11,3
КД50-KB40	7,6	9,6	12,5	/	/	/
КД50-KB50	11,6	15,2	19,8	13,9	18,5	21,2
КД60-KB30	4,0	4,8	6,3	5,8	7,2	8,7
КД60-KB40	6,3	7,5	9,8	/	/	/
КД60-KB50	9,0	10,1	13,1	9,8	11,9	13,6
КД60-KB60	12,1	13,2	17,2	/	/	/
КД70-KB30	3,1	3,8	5,0	5,9	6,0	7,5
КД70-KB40	4,6	5,6	7,3	/	/	/
КД70-KB50	6,5	7,6	9,9	9,1	10,8	13,0
КД70-KB70	9,9	11,8	15,4	/	/	/

Биографија аутора

Михаило П. Милановић, маг. инж. маш., рођен је 1988. године у Београду. Основну школу „Вук Караџић“ и Пету београдску гимназију природно-математичког смера завршио је у Београду са одличним успехом и стеченим Вуковим дипломама за завршено основно и средњошколско образовање.

Школске 2007/08. године уписује Машински факултет Универзитета у Београду, где 2010. године стиче диплому основних академских студија, а потом 2012. године звање Мастер инжењера машинства на одсеку за Процесну технику и заштиту животне средине, са одбрањеним дипломским радом са оценом 10.

Докторат на Машинском факултету у Београду уписује у новембру 2012. године, а од 01.04.2013. је запослен у Иновационом центру Машинског факултета, где и даље ради. Упоредо са својим студијским обавезама, испитним активностима и експерименталним истраживањима, током докторских и мастер студија имао је прилику да учествује на студентским разменама и програмима.

За време Мастер студија, 2011. године, преко организације IAESTE, био је на студентској размени у Хаифи (Израел) где је током 2 месеца радио у Israel Electric Company на побољшању термомеханичких система у термоелектранама.

Током 2013. године, као стипендиста фондације др Зоран Ђинђић, био је на стручној пракси у Манхајму (Немачка) где је 6 месеци радио у фабрици BASF SE на технологијама за складиштење електричне енергије добијене из обновљивих извора енергије.

У току 2015. године био је на усавршавању у Брашову (Румунија) где се 2 месеца бавио ефикасношћу система за складиштење електричне енергије у транспортном сектору.

У току 2018. године боравио је близу месец дана у Талину (Естонија), где је учествовао у програму Pioneers into Practice, организованог од стране глобалне организације за супротстављање климатским променама Climate-KIC. У оквиру програма учествовао је на такмичењу Hackathon где је са својим тимом освојио прво место, што му је омогућило учешће у финалу светског такмичења start-up компанија у Единбургу исте године.

У оквиру програма турске развојне агенције (ТИКА), 2019. године је учествовао на двонедељном семинару о повећању енергетске ефикасности у индустрији, одржаног у Анкари.

У току докторских студија био је ангажован у настави. У току школске 2019/2020 и 2020/2021 био је ангажован на Машинском факултету у Београду на одржавању вежби из предмета Термодинамика Б (ОАС) са фондом часова 0+1.

Школске 2018/2019 и 2019/2020 био је ангажован на Пољопривредном факултету у Земуну, где је држао вежбе из предмета Термодинамика и Компјутерска графика и елементи технолошке опреме.

Течно говори енглески и немачки језик (поседује C1 сертификате), а служи се и француским језиком. Активно користи Microsoft Office, OriginPro, AutoCad и SolidWorks софтверске пакете, а поседује и основно знање Python програмског језика.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а Михаило Милановић
број индекса Д 11/12

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

ТЕРМОМЕХАНИЧКИ АСПЕКТИ ПРОЦЕСА СУШЕЊА ОСТАТАКА
ИЗ ПРОИЗВОДЊЕ СОКОВА

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

у Београду, 16.08.2021.

Потпис докторанда

Михаило Милановић

Прилог 2.

**Изјава о истоветности штампане и електронске
верзије докторског рада**

Име и презиме аутора Михаило Милановић
Број индекса Д 11/12
Студијски програм ТЕРМОМЕХАНИКА
Наслов рада ТЕРМОМЕХАНИЧКИ АСПЕКТИ ПРОЦЕСА СУШЕЊА ОСТАКА
ИЗ ПРОИЗВОДЊЕ СОКОВА
Ментор проф др Мирко Коматина

Потписани/а Михаило Милановић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 16.08.2021.

Михаило Милановић

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

ТЕРМОМЕХАНИЧКИ АСПЕКТИ ПРОЦЕСА СУШЕЊА ОСТАТАКА
ИЗ ПРОИЗВОДЊЕ СОКОВА

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

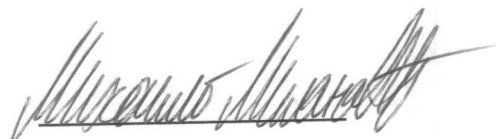
Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

У Београду, 16.08.2021.

Потпис докторанда



1. Ауторство - Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. Ауторство – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.