

UNIVERZITET U BEOGRADU

MAŠINSKI FAKULTET

Ivan J. Zlatanović

**TERMOMEHANIČKI PROCESI
PRI SUŠENJU PREHRAMBENIH
MATERIJALA U SISTEMIMA SA
RECIRKULACIJOM VAZDUHA**

doktorska disertacija

Beograd, 2013

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Ivan J. Zlatanović

**THERMOMECHANICAL PROCESSES
IN DRYING OF FOOD MATERIALS
IN SYSTEMS WITH AIR
RECIRCULATION**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2013

Komisija za pregled i odbranu:

Mentor: **Prof. dr Mirko Komatina**, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet

Članovi komisije: **Prof. dr Radivoje Topić**, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet

Prof. dr Franc Kosi, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet

Dr Dragi Antonijević, viši naučni saradnik
Inovacioni centar Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu

Prof. dr Milovan Živković, vanredni profesor
Univerzitet u Beogradu - Poljoprivredni fakultet

Datum odbrane:

Svom mentoru dr Mirku Komatini, redovnom profesoru Mašinskog fakulteta u Beogradu, želim da izrazim beskrajnu zahvalnost na usmeravanju, sugestijama i stručnoj podršci koja je doprinela izradi i kvalitetu ove doktorske disertacije. Njegova kolegijalnost se ne može opisati rečima.

Članu komisije, dr Dragiju Antonijeviću, profesoru Univerziteta Singidunum u Beogradu, posebno sam zahvalan na pruženoj podršci, kako u osmišljavanju i izvođenju eksperimenata i matematičkog modela, tako i u svim fazama izrade disertacije.

Članovima komisije, dr Francu Kosiju i dr Radivoju Topiću, profesorima Mašinskog fakulteta u Beogradu i dr Milovanu Živkoviću, profesoru Poljoprivrednog fakulteta u Beogradu, zahvaljujem se na kolegijalnosti i korisnim sugestijama tokom pregleda teze.

Ekperimentalno istraživanje ove doktorske disertacije je realizovano u Laboratoriji za termodinamiku i termotehniku u okviru Instituta za poljoprivrednu tehniku, Poljoprivrednog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Ta realizacija bi bila nemoguća bez pomoći prijatelja i kolega. Kolegama, Kostu Gligoreviću i Dušanu Radojičiću, sa Katedre za poljoprivrednu tehniku, zahvaljujem se na nesebičnoj pomoći pri izradi laboratorijske instalacije za ekperimentalna istraživanja. Kolegi, Milanu Stojanoviću, studentu Odseka za poljoprivrednu tehniku, zahvaljujem se na pomoći u izradi rashladnog dela laboratorijske instalacije. Posebnu zahvalnost dugujem kolegama dr Goranu Topisiroviću, profesoru Poljoprivrednog fakulteta u Beogradu i Nedžadu Rudonji, asistentu na Katedri za termomehaniku Mašinskog fakulteta u Beogradu, na ustupljenoj mernoj opremi.

Zahvaljujem se svojoj porodici, ćerki Kristini i supruzi Mileni, koje su moja stalna inspiracija i motivacija, na pruženoj podršci i beskrajnom razumevanju tokom izrade ove teze. One mom životu i radu daju poseban smisao i čine me boljim čovekom.

Zahvaljujem se svojim roditeljima, majci Slavici i ocu Jevti na podršci koju su mi pružali svih proteklih godina kako bih istrajao u svojim nastojanjima da dostignem najveći nivo obrazovanja. U njihovim očima sam već dugo, dugo vremena unazad, bio prepoznat kao „doktor nauka“.

April 2013.

Ivan J. Zlatanović

SADRŽAJ

Apstrakt /Abstract

Nomenklatura

1. UVOD	1
2. PREGLED LITERATURE	3
2.1. Teorija i osnovni principi sušenja	3
2.2. Pregled teorijskih istraživanja procesa konvektivnog sušenja prehrambenih materijala	12
2.3. Pregled eksperimentalnih istraživanja procesa konvektivnog sušenja prehrambenih materijala	20
3. TEORIJSKO ISTRAŽIVANJE I MODELIRANJE PROCESA	27
3.1. Definisanje matematičkog modela konvektivnog sušenja prehrambenih materijala u tankom sloju	27
3.2. Numerički postupak rešavanja jednačina modela	34
3.3. Teorijska istraživanja <i>HPD</i> sistema sušenja	40
3.3.1. Komponente <i>HPD</i> sistema	40
3.3.2. Pokazatelji efikasnosti rada <i>HPD</i> sistema	42
4. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE	44
4.1. Laboratorijska instalacija	44
4.2. Opis eksperimentalnog istraživanja	52
4.3. Prikaz eksperimentalnih rezultata	59
4.3.1. Promena mase vlažnog materijala tokom procesa	61
4.3.2. Vreme procesa sušenja	62
4.3.3. Parametri rada vodenog grejača vazduha	63
4.3.4. Parametri rada vodenog hladnjaka vazduha	65
4.4. Analiza greške merenja	66
4.4.1. Merenje temperature	66
4.4.2. Merenje relativne vlažnosti	67
4.4.3. Merenje brzine strujanja	68
4.4.4. Merenje mase	68
5. ANALIZA EKSPERIMENTALNIH REZULTATA	69
5.1. Srednja vlažnost materijala	69
5.2. Brzina sušenja	74
5.3. Efektivni koeficijent difuzije vlage	77
5.4. Određivanje parametara matematičkog modela	83
5.5. Energija utrošena za zagrevanje vlažnog vazduha	86
5.6. Energija utrošena za hlađenje vlažnog vazduha uz izdvajanje vlage	90
5.7. Analiza rada toplotne pumpe	95
5.8. Pokazatelji efikasnosti rada sistema sušenja	99

6. POREĐENJE REZULTATA MODELA I EKSPERIMENTALNIH REZULTATA	103
6.1. Poređenje eksperimentalnih rezultata sa rezultatima modela.....	103
6.2. Poređenje rezultata sopstvenog modela i modela drugih autora	108
6.3. Poređenje rezultata sopstvenih eksperimenata i eksperimenata drugih autora	111
7. ZAKLJUČAK	114
8. LITERATURA.....	121
9. PRILOZI	135
9.1. Fenomenološki koeficijenti	136
9.2. Postupak određivanja apsolutne vlažnosti i entalpije nezasićenog vlažnog vazduha na osnovu poznate temperature i relativne vlažnosti	137
9.3. Geometrijski oblici i dimenzije materijala	138
9.4. Merno-regulaciona oprema	139
9.5. Prehrambeni materijali	140
9.6. Režimi sušenja.....	141
9.7. Prosečne vrednosti srednje vlažnosti materijala na početku sušenja	142
9.8. Promena mase vlažnog materijala tokom procesa	143
9.9. Vreme procesa sušenja	145
9.10. Parametri rada vodenog grejača vazduha.....	146
9.11. Masa uklonjene vlage iz sistema tokom procesa.....	148
9.12. Srednja vlažnost materijala	150
9.13. Srednja vlažnost materijala u bezdimenzionom obliku.....	152
9.14. Brzina sušenja.....	154
9.15. Računarski softver	158
9.16. Određivanje parametara matematičkog modela	159
9.17. Energija utrošena za zagrevanje vlažnog vazduha	163
9.18. Energija utrošena za hlađenje vlažnog vazduha uz izdvajanje vlage	166
9.19. Poređenje rezultata dobijenih sopstvenim modelom sa rezultatima modela drugih autora.....	171
10. BIOGRAFIJA	177
11. PRILOZI – IZJAVE	178
11.1. Izjava o autorstvu	
11.2. Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada	
11.3. Izjava o korišćenju	

TERMOMEHANIČKI PROCESI PRI SUŠENJU PREHRAMBENIH MATERIJALA U SISTEMIMA SA RECIRKULACIJOM VAZDUHA

Apstrakt

Predmet rada u ovoj disertaciji je istraživanje termomehančkih procesa pri konvektivnom sušenju prehrambenih materijala vlažnim vazduhom kao agensom sušenja u sistemima sa recirkulacijom. Matemtičko-numeričkim metodama i regresionom analizom definisan je fizičko-matematički model koji omogućava simulaciju promene vlažnosti materijala u bezdimenzionom obliku tokom procesa sušenja, a koji uzima u obzir uticaj termomehaničkih osobina vlažnog vazduha (temperature, relativne vlažnosti i brzine strujanja) na proces sušenja. U cilju verifikacije postavljenog modela, osmišljena je i izrađena laboratorijska instalacija za konvektivno sušenje prehrambenih materijala u tankom sloju, koja radi sa potpunom recirkulacijom vazduha. Odabrani materijali (jabuka, krompir i banana) su sušeni pod istim režimima, sa temperaturom sušenja u opsegu $35 \div 55^{\circ}\text{C}$, relativnom vlažnošću u opsegu $10 \div 30\%$ i brzinom strujaja vlažnog vazduha u opsegu $1 \div 2 \text{ m/s}$. Jabuke su sušene u komadićima oblika kocke dimenzija 10 mm i 13 mm , krompir u listovima debljina 2 mm i 3 mm , a banana u kolutovima debljina 6 mm i 7 mm . Analiziran je uticaj termomehaničkih osobina vlažnog vazduha na kinetiku procesa sušenja, na osnovu dobijenih vrednosti efektivnog koeficijenta difuzije. Rezultati istraživanja su potvrdili da termomehaničke osobine vlažnog vazduha značajno utiču na proces sušenja, pri čemu se u slučajevima slabijeg uticaja na proces sušenja pojedine veličine mogu zanemariti. Analiziran je rad sistema sušenja koji je podržan radom toplotne pumpe, na osnovu izračunatih vrednosti osnovnih pokazatelja efikasnosti rada sistema. Ustanovljeno je da se pravilno utvrđenim parametrima rada instalacije može uticati na povećanje energetske efikasnosti sistema i smanjenje specifične potrošnje energije po količini izdvojene vlage. Verifikacija dobijenih rezultata izvršena je poređenjem rezultata sopstvenog modela sa rezultatima sprovedenog eksperimentalnog istraživanja, a potom i sa modelima i eksperimentalnim istraživanjima drugih autora.

Ključne reči: sušenje, vlažan vazduh, konvekcija, recirkulacija, difuzija, prehrambeni materijali, toplotna pumpa, energetska efikasnost;

Naučna oblast: Mašinstvo

Uža naučna oblast: Termomehanika

UDK klasifikacija: 536.7

THERMOMECHANICAL PROCESSES IN DRYING OF FOOD MATERIALS IN SYSTEMS WITH AIR RECIRCULATION

Abstract

The motivation of the research presented in this thesis was to investigate thermomechanical processes that appears during the convective drying of food materials in systems with air recirculation. The mathematical model was formed to describe the change of moisture ratio of the material during the time, by taking into account the influence of all relevant thermomechanical properties of drying air (temperature, relative humidity and velocity) on the drying process. Convective laboratory scale dryer with possibility of full drying air recirculation was designed and built in order to achieve and measure all relevant drying process parameters. Apples, potatoes and bananas were used in the experiments. The chosen materials were dried under the same drying conditions. Drying air temperature was in range 35-55°C, relative humidity in range 10-30% and velocity in range 1-2 m/s. The apples were cut into cubes with 10 mm and 13 mm side dimension, potatoes were sliced into chips of 2 mm and 3 mm thickness and bananas were sliced into the cylinders with 6 mm and 7 mm thickness. Analysis of error appearance probability was performed. The effective moisture diffusivity was used to describe drying process efficiency. The experimental results confirmed that thermomechanical properties of drying air have significant influence on drying process. It was discovered that drying air, relative humidity could be ignored in some occasions. The performance of heat pump drying system was analyzed in order to discover system efficiency. The system energy and mass flows, air circulation behavior, drying air properties and system components behavior were monitored in order to calculate the main parameters of system performance. It was discovered that appropriate system performance optimization could increase system energy efficiency and reduce specific energy consumption. The results of mathematical model equation were compared with the experimental results and with the models and with the experimental results of the other authors, in order to be verified.

Key words: drying, psychrometrics, convection, recirculation, diffusion, food materials, heat pump, energy efficiency;

Scientific discipline: Mechanical engineering

Scientific subdiscipline: Thermomechanics

UDC classification: 536.7

NOMENKLATURA

Spisak korišćenih oznaka

Oznaka	Jedinica	Značenje
A	m^2	površina za razmenu toplote i supstancije
A_n	-	parametri, $n = 0, 1$.
a	m^2/s	koeficijent toplotne difuzivnosti
a	-	konstanta, (u Prilogu 9.19)
a_n	-	konstante, $n = 0, 1, 2, 3, 4$.
B_n	-	parametri, $n = 0, 1, 2, 3, 4$.
b	-	konstanta, (u Prilogu 9.19)
C_n	-	konstante linearne funkcije, $n = 0, 1, 2$.
c	J/kgK	specifični toplotni kapacitet
c_p	J/kgK	specifični toplotni kapacitet pri konstantnom pritisku
D_{eff}	m^2/s	efektivni koeficijent difuzije
DR	$kg_w/kg_{sm} h$	brzina sušenja
d	m	prečnik čestice (granule, komada) materijala
e	-	Euler-ov broj, osnova prirodnog logaritma, $e \approx 2.71828$
E_n	-	eksperiment, $n = 1, \dots, 27$.
h	kJ/kg	entalpija
K	-	koeficijent sušenja
K_n	-	koeficijenti pravca prave, $n = 1, 2$.
$K_{i,j}$	-	fenomenološki koeficijenti, $i, j = 1, 2, 3$.
k	m^2/s	koeficijent vlagoprovodnosti
k	-	konstanta, (u Prilogu 9.19)
k_n	-	konstante, $n = 0, 1, 2, 3, 4$.
k_p	m^2/s	koeficijent filtracione vlagoprovodnosti
M	kg_w/kg_{sm}	srednja vlažnost materijala (kg vlage po kg suve materije)
MR	-	srednja vlažnost materijala u bezdimenzionom obliku bezdimenzioni
m	kg	masa
\dot{m}	kg/s	maseni protok
n	-	konstanta (u Tabeli 2.2.1)
$P_{[1]}$	W	snaga
P_n	-	procedura, $n = 1, 2$.
P	Pa	pritisak
\dot{Q}	W	toplotni protok
Q	J, kWh	količina toplote
q	J/kg	specifična količina toplote

Oznaka	Jedinica	Značenje
RH	%	relativna vlažnost vazduha
r^2	-	koeficijent determinacije
r	kJ/kg	toplota isparavanja vode
r, φ, z	-	koordinate cilindričnog koordinatnog sistema
s	J/kgK	specifična entropija
S	m^2	površina poprečnog preseka
T, t	$K, ^\circ C$	temperatura
\dot{V}	m^3/s	zapreminski protok
w	m/s	brzina strujanja vazduha
w_k	J/kg	specifični rad kompresora
x	kg_w/kg_{sa}	apsolutna vlažnost
x	-	stepen suvoće (na Slici 2.2.4)
z	m	karakteristična dimenzija komadića materijala
x, y, z		koordinate Dekartovog pravouglog koordinatnog sistema
Grčke oznake	Jedinica	Značenje
α_n	-	pozitivni koreni Bessel-ovih funkcija
χ	-	relativan koeficijent sušenja vlažnog materijala
δ	$1/K$	koeficijent termovlagoprovodnosti
ε	-	koeficijent faznog prelaza
$tg\gamma$	-	koeficijent pravca tangente krive sušenja
λ	W/mK	koeficijent provođenja toplote vlažnog materijala
ρ	kg/m^3	gustina
τ	s	vreme
ζ	-	odnos površina poprečnih preseka materijala i slobodne struje vlažnog vazduha
Oznake u indeksu	Jedinica	Značenje
0	nula	početno stanje, početak
a	-	agens (vlažan vazduh)
BP	-	bajpas
e	-	ravnotežno stanje, kraj
i	-	isparavanje
I	-	isparivač
kd	-	kondenzacija
K	-	kompresor
KD	-	kondenzator
m	-	materijal, vlažan materijal
n	-	ceo broj
PK	-	pseudokritična tačka
rf	-	rashladni fluid
sm	-	suv materijal
$VENT$	-	ventilator
w	-	vlaga, voda

Spisak korišćenih skraćenica

Skraćenica	Skraćeno od engleske reči	Značenje
<i>BP</i>	<i>by-pass</i>	bajpas deonica, bajpas kanal
<i>BPD</i>	<i>by-pass demper</i>	regulator protoka vazduha u bajpas deonici
<i>COP</i>	<i>coefficient of performance</i>	rashladni učinak, koeficijent grejanja
<i>COP_{HP}</i>	<i>coefficient of performance of heat pump</i>	rashladni učinak pri čemu se u utrošen rad računa samo rad kompresora toplotne pumpe
<i>COP_{HPD}</i>	<i>coefficient of performance of heat pump dryer</i>	rashladni učinak pri čemu se u utrošen rad uračunavaju svi radovi pogonskih jedinica sušare
<i>DR</i>	<i>drying rate</i>	brzina sušenja
<i>DV</i>	<i>digital weight indicator</i>	digitalna vaga
<i>EG</i>	-	električni grejač
<i>EM</i>	<i>electromotor</i>	elektromotor
<i>HPD</i>	<i>heat pump dehumidifier</i>	sušara podržana radom toplotne pumpe
<i>HPDE</i>	<i>heat pump dryer efficiency</i>	efikasnost sušare podržane radom toplotne pumpe
<i>I</i>	-	isparivač
<i>ID</i>	-	regulator protoka vazduha na deonici isparivača
<i>ISP</i>	-	isparivač rashladne kade
<i>K</i>	-	kompresor
<i>KAN</i>	-	kanalski sistem, kanal
<i>KD</i>	-	kondenzator
<i>KD1</i>	-	primarni kondenzator
<i>KD2</i>	-	sekundarni kondenzator
<i>LE</i>	-	lesa
<i>ME</i>	-	menzura
<i>MER</i>	<i>moisture extraction rate</i>	odnos ukupne utrošene energije u procesu sušenja i ukupne mase vlažnog materijala
<i>MR</i>	<i>moisture ratio</i>	sadržaj vlage materijala u bezdimenzionom obliku
<i>PHV</i>	-	pumpa za hladnu vodu
<i>PK</i>	-	pseudokritična tačka
<i>PTV</i>	-	pumpa za toplu vodu
<i>PV</i>	-	prigušni ventil
<i>REG</i>	-	regulator električnog grejača
<i>RH</i>	<i>relative humidity</i>	relativna vlažnost vazduha
<i>RK</i>	-	rashladna kada
<i>RMSE</i>	<i>root mean squared error</i>	standardna greška regresije
<i>RRI</i>	-	regulator rada rashladne instalacije
<i>SEC</i>	<i>specific energy consumption</i>	odnos ukupne utrošene energije i ukupne mase uklonjene vlage uklonjene iz materijala
<i>SMER</i>	<i>specific moisture evaporation rate</i>	odnos ukupne mase izdvojene vlage i utrošene energije u procesu sušenja
<i>SMER_{HP}</i>	<i>specific moisture evaporation rate of heat pump</i>	odnos ukupne mase izdvojene vlage i utrošene energije u procesu sušenja gde se u utrošenu energiju računa samo energija kompresora toplotne pumpe

Skraćenica	Skraćeno od engleske reči	Značenje
<i>SMER_{HPD}</i>	<i>specific moisture evaporation rate of heat pump dryer</i>	odnos ukupne mase izdvojene vlage i utrošene energije u procesu sušenja gde se u utrošenu energiju računa energija svih pogonskih jedinica sušare
<i>SP</i>	<i>sprinkler</i>	sprinkler
<i>TEV</i>	<i>thermoexpansion valve</i>	termoekspanzioni ventil
<i>TK</i>	-	termostatsko kupatilo
<i>US EPA</i>	<i>united states unvironmental protection agency</i>	agencija za zaštitu životne sredine sjedinjenih američkih država
<i>VENT</i>	-	ventilator
<i>VG</i>	-	vodeni grejač vazduha
<i>VH</i>	-	vodeni hladnjak vazduha
<i>VHD</i>	-	regulator protoka vazduha na deonici vodenog hladnjaka

1. UVOD

Predmet rada u ovoj disertaciji je istraživanje termomehančkih procesa pri konvektivnom sušenju prehrambenih materijala vlažnim vazduhom kao agensom sušenja u sistemima sa recirkulacijom. Razvijen je matematički model promene vlažnosti materijala (u bezdimenzionom obliku) koji uzima u obzir uticaj termomehaničkih osobina vlažnog vazduha (temperature, relativne vlažnosti i brzine strujanja) na proces sušenja. U cilju verifikacije postavljenog modela, određivanja nepoznatih parametara, kao i određivanja parametara rada čitavog sistema sušenja, osmišljena je i izrađena laboratorijska instalacija za konvektivno sušenje prehrambenih materijala u tankom sloju. U cilju postizanja što veće rekuperacije energije, omogućeno je da instalacija radi sa potpunom recirkulacijom vazduha. U eksperimentima su korišćena tri različita prehrambena materijala: jabuka, krompir i banana. Materijali su odabrani prema kriterijumima pogodnosti svojih fizičko-mehaničkih osobina za sušenje ovom tehnologijom sušenja i mogućnosti slobodnog oblikovanja (sečenja) materijala na geometrije pogodne za ispitivanje. Odabrani materijali su sušeni pod istim režimima, sa temperaturom sušenja u opsegu $35 \div 55^{\circ}\text{C}$, relativnom vlažnošću u opsegu $10 \div 30\%$ i brzinom strujanja agensa (vlažnog vazduha) u opsegu $1 \div 2 \text{ m/s}$. Oblici i dimenzije materijala su izabrani tako da su jabuke sušene u komadićima oblika kocke dimenzija 10 i 13 mm, krompir u listovima debljina 2 i 3 mm, a banana u kolutovima debljina 6 i 7 mm. Urađena je analiza grešaka merenja.

Sprovedena istraživanja su bazirana pretpostavkama da: - termomehaničke osobine vlažnog vazduha bitno utiču na proces sušenja; - je u pojedinim slučajevima moguće zanemariti pojedine parametre sušenja zbog njihovog malog uticaja; - sistemi sa recirkulacijom vazduha pogoduju rekuperaciji energije utrošene za izdvajanje vlage iz prehrambenih materijala; - je moguće povećati energetska efikasnost sistema i smanjiti specifičnu potrošnju energije po količini izdvojene vlage.

Analiziran je uticaj temperature, relativne vlažnosti i brzine strujanja vlažnog vazduha na kinetiku procesa sušenja. Uticaj pojedinačnih parametara na kinetiku procesa sušenja razmatran je preko dobijenih vrednosti efektivnog koeficijenta difuzije. Rezultati istraživanja su potvrdili da termomehaničke osobine vlažnog vazduha značajno utiču na proces sušenja. Variranjem temperature, relativne vlažnosti i brzine

strujanja vlažnog vazduha, geometrije i dimenzije materijala, proces sušenja se može usporiti, intenzivirati ili ostati nepromenjen za drugu postavku parametara. Utvrđeno je da se u slučajevima slabijeg uticaja na proces sušenja relativna vlažnost vazduha može zanemariti.

Rezultati istraživanja ukazuju na mogućnost povezivanja i objedinjavanja uticajnih parametara procesa sušenja jedinstvenim fizičko-matematičkim modelom. Izračunati su nepoznati parametri u matematičkim jednačinama modela. U cilju verifikacije dobijenih rezultata izvršeno je poređenje rezultata sopstvenog matematičkog modela sa rezultatima sprovedenog eksperimentalnog istraživanja, a potom i sa modelima i eksperimentalnim istraživanjima drugih autora.

U cilju određivanja efikasnosti rada sistema sušenja, analiziran je rad sistema sušenja koji je podržan radom toplotne pumpe. Sagledavanjem tokova energije u sistemu, načina cirkulacije i osobina vlažnog vazduha u sistemu, postavljeni su energetske i materijalni bilansi pojedinih komponenata sistema i izračunate vrednosti osnovnih pokazatelja efikasnosti rada sistema. Ustanovljeno je da se pronalaženjem pogodne kombinacije ulaznih parametara sušenja može smanjiti angažovana snaga pogonskih komponenti sistema sušare. Pravilno utvrđenim parametrima rada instalacije je moguće uticati na povećanje energetske efikasnosti sistema i smanjenje specifične potrošnje energije po količini izdvojene vlage.

Naučni doprinos ove doktorske teze se pre svega ogleda u jednom sveobuhvatnom pristupu u razvoju matematičko-numeričkog modela promene bezdimenzionog sadržaja vlage u materijalu tokom vremena. Bitna karakteristika predloženog modela je njegova opštost koja se ogleda u primeni modela za simulaciju niza režima rada prilikom sušenja kako ispitivanih materijala tako i drugih materijala sličnih oblika i karakteristika. Analizama pokazatelja efikasnosti procesa sušenja i efikasnosti rada sistema sušenja, moguće je predvideti i eventualne konstrukcije izmene koje bi dovele do poboljšanja rada sistema.

Dobijeni su novi teorijski i eksperimentalni rezultati u nedovoljno istraženoj oblasti, koji omogućavaju bolje razumevanje procesa i pojava u sistemu, koji su značajni za predviđanje ponašanja sistema u realnosti i pružaju mogućnost optimizacije rada sistema. Stvorena je dobra podloga za dalja istraživanja koja mogu dovesti do poboljšanja procesa sušenja i povećanja energetske efikasnosti sistema.

2. PREGLED LITERATURE

2.1 Teorija i osnovni principi sušenja

U savremenoj industrijskoj proizvodnji može se sa sigurnošću tvrditi da ne postoji proizvod čija osnovna sirovina u nekoj svojoj fazi nije prošla kroz nekakav proces sušenja. Veliki broj sprovedenih naučnih studija uticao je na razjašnjavanje mnogih nedoumica u vezi sa termodinamičkim pojavama i procesima koji se javljaju prilikom sušenja higroskopskih materijala, kinetikom sušenja, isparavanjem multikomponentnih mešavina iz poroznih tela, i termomehaničkim osobinama materijala i agenasa. Teorijom i osnovni principima sušenja bavio se veliki broj autora, ističući složenost procesa koji se javljaju prilikom delimičnog ili potpunog izdvajanja vlage iz materijala, *Williams-Gardner (1971); Keey (1978); Strumillo (1986); Marinos-Kouris (1995); Pakowski (1996); Mujumdar (2006); Vega-Mercado (2001)*. U cilju određivanja odgovarajućih parametara sušenja koriste se različite eksperimentalne tehnike kojima se: određuje optimalan sadržaja vlage u materijalu, način uspostavljanja karakterističnih ravnotežnih stanja u procesima sorpcije i desorpcije, određuje toplotna provodljivost, efektivna difuzivnost i slično. Prilikom sušenja prehrambenih proizvoda neophodno je poznavati fizičko-hemijske osobine materijala, dozvoljeni sadržaj vlage u materijalu, odgovarajuću tehnologiju sušenja, vrste sorti pogodne za sušenje, kao i promene koje se tokom sušenja dešavaju u materijalu, *Mujumdar (2006)*. Opšti ciljevi eksperimenata sušenja su: izbor odgovarajuće opreme za sušenje, uspostavljanje zadatih parametara sušenja, ispitivanje efikasnosti i kapaciteta postojeće opreme za sušenje, ispitivanje efekata sušenja na finalni proizvod, kao i analiza mehanizma za sušenje, *Molnar (1995)*. Komercijalni sistemi za sušenje se mogu klasifikovati u četiri generacije: sušare za sušenje čvrstih sirovina, sušare za mulj i kaše, sublimacijske sušare i sistemi za osmotsku dehidraciju, i sušare koje primenjuju specifične tehnike sušenja, *Vega-Mercado (2001)*. Troškovi transporta energenta u većim sistemima nisu zanemarljivi i direktno zavise od sadržaja vlage u materijalu koji se suši. Prikupljanje informacija za izbor i projektovanje sistema za sušenje je ozbiljan i zahtevan posao, *Land (1991)*. Sprovedena istraživanja na području Evrope, Azije i Afrike ukazuju na raznolikost faktora koji utiču na izbor tipa sušare za sušenje voća i povrća, način kontrole kvaliteta i

ekonomsku isplativost, *Greensmith (1998)*. Analizom sistema masovne proizvodnje uočeno je da i minimalna ušteda energije na lokalnom nivou dugoročno gledano može doneti velike uštede, *Menon (1982)*. Izbor adekvatne tehnologije sušenja veoma je delikatan i osetljiv naročito po pitanju očuvanja kvaliteta proizvoda. Mogućnost primene pojedinih tipova sušara zavisi od mehaničkih katrakteristika i oblika materijala sirovine koja se suši (**Tabela 2.1.1**). Od izbora sušare zavisi i vreme utrošeno na sušenje materijala (**Tabela 2.1.2**).

Sušare se najčešće klasifikuju prema:

- 1) načinu na koji se toplota dovodi materijalu,
- 2) režimu sušenja u smislu odabranih parametara temperature i pritiska sušenja, i
- 3) načinu na koji se material u sušari tretira.

U skladu sa ovim principima moguće je analizu produbiti, međutim dalje uvođenje podklasifikacija, nema nikakvog praktičnog značaja, tako da je dovoljno zadržati se na nivou analize navedena tri načela, *Keey (1972, 1978)*.

Dovodjenje toplote materijalu koji se suši moguće je bilo kojim od mehanizama prenosa toplote: prelaženjem, provođenjem ili zračenjem (**Slika 2.1.1**)

Tabela 2.1.1

Mogućnost primene pojedinih tipova sušara u zavisnosti od karakteristika sirovine, *Mujumdar (2006)*

Karakteristike sirovine	Tečnosti			Prahovi		Čvrste čestice				Čvrsta tela	
	Rastvori	Kaše	Paste	Centrifuga	Filter	Puder	Granule	Lomljivi kristali	Pelete		Vlakna
<i>Konvektivne sušare</i>											
sa pokretnom trakom							•	•	•	•	•
sa pneumatskim transportom				•	•	•	•			•	
sa fluidizovanim slojem	•	•		•	•	•	•		•		
sa rotirajućim dobošem				•	•	•	•		•	•	
sa rasprskivanjem	•	•	•								
sa tunelom (sa vagonetima)				•	•	•	•	•	•	•	•
sa tunelom (kontinualna)				•	•	•	•	•	•	•	
<i>Konduktivne sušare</i>											
sa bubnjevima	•	•	•								
rotaciona sa pregrejanom vodenom parom (u džepovima)				•	•	•	•		•	•	
rotaciona sa pregrejanom vodenom parom (u cevima)				•	•	•	•		•	•	
sa tunelom (sa vagonetima)				•	•	•	•	•	•	•	•
sa tunelom (kontinualna)				•	•	•	•	•	•	•	

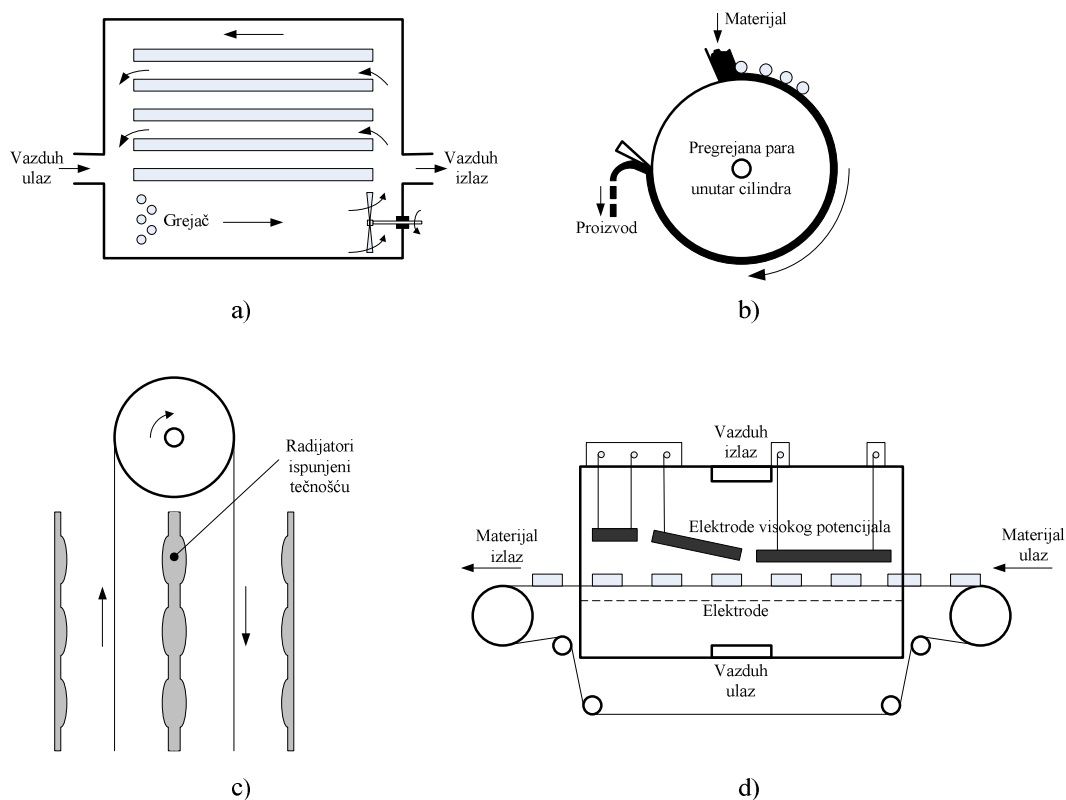
Tabela 2.1.2

Mogućnost primene pojedinih tipova sušara u zavisnosti vremena zadržavanja sirovine, *Mujumdar (2006)*

Vreme	Tipično vreme zadržavanja sirovine u sušari				
	0-10 (s)	10-30 (s)	5-10 (min)	10-60 (min)	1-6 (h)
<i>Konvektivne sušare</i>					
sa pokretnom trakom				•	
sa pneumatskim transportom	•				
sa fluidizovanim slojem				•	
sa rotirajućim bubnjem				•	
sa rasprskivanjem		•			
sa tunelom (sa vagonetima)					•
sa tunelom (kontinualna)				•	
<i>Konduktivne sušare</i>					
sa bubnjevima		•			
rotaciona sa preg.vod.parom (u džepovima)				•	
rotaciona sa preg.vod.parom (u cevima)				•	
sa tunelom (sa vagonetima)					•
sa tunelom (kontinualna)				•	

Prelaženje toplote je najčešći mehanizam prenosa toplote pri čemu se kao agens sušenja koristi atmosferski vazduh (najčešće), inertni gas (azot, i slično.), direktni produkti sagorevanja ili pregrejana vodena para. Ovakav način sušenja se još naziva i direktno sušenje. Indirektno sušenje se ostvaruje mehanizmom prolaženja toplote, pogodno je za sušenje veoma vlažnih ili veoma tankih materijala i često se izvodi korišćenjem vakuumskih režima sušenja. Indirektno i direktno sušenje se često istovremeno primenjuju. Sušenje zračenjem se ostvaruje emitovanjem elektromagnetnih talasa na različitim talasnim dužinama, od vidljivog dela spektra pa do mikrotalasa. Ovakav način sušenja je izuzetno skup i retko kada se primenjuje kao jedini, već se kombinuje najčešće sa konvektivnim metodama sušenja, *Mujumdar (2006)*.

Većina sušara radi na pritiscima blizu atmosferskog što dosta pojednostavljuje konstrukciju sušare i performanse opreme koja se koristi. Međutim, u specijalnim slučajevima kada se, na primer, materijal mora sušiti bez prisustva kiseonika ili na niskim temperaturama, koristi se tzv. sušenje u vakuumu (na niskim temperaturama – sublimacijsko sušenje). Način na koji će se materijal tretirati unutar same sušare (**Tabela 2.1.3**) bitno utiče na troškove sušenja.



Slika 2.1.1 Metode zagrevanja prilikom sušenja, Keey (1972)

a) konvektivna metoda, b) konduktivna metoda, c) radijaciona metoda i d) dielektrična metoda

Tabela 2.1.3

Uporedni prikaz tretmana materijala i uobičajenih tipova sušara, Mujumdar (2006)

Metoda tretmana	Tipična sušara	Tipičan materijal
Bez posebnog tretmana materijala	Šaržno sušenje	Paste i granule
Materijal se kreće pod dejstvom gravitacije	Rotaciona sušara	Granule
Materijal se pokreće i komeša mehanički	Sušara sa vijcima	Vlažne kaše i paste
Materijal se transportuje u kolicima	Tunelska sušara	Razni materijali
Materijal se unosi u listovima ili rolnama	Cilindrične sušare	Papir, tekstil, pulpa
Materijal se transportuje i komeša pokretnim trakama	Trakaste sušare	Pelete, zrnevlje
Materijal se transportuje vazduhom	Pneumatske sušare	Granule, zrnevlje, lišće
Kaše i rastvori atomizirani u vazduhu	Sušare sa raspršivanjem	Mleko, kafa, itd.

Kombinovanje savremenih i konvencionalnih tehnologija sušenja pruža alternativna rešenja koja je moguće primeniti prilikom sušenja specifičnih materijala. Iako postoje pokušaji da se metodologija proizvodnje sušara objedini i standardizuje, detaljne informacije o procesu dizajniranja i konstruisanja sušara najčešće su industrijska tajna, *Van't Land (1991), Mujamdar (2000)*.

Indirektne sušare (u literaturi se mogu sresti pod nazivima: kontaktne, konduktivne) su sušare u kojima se medijum za zagrevanje (pregrejana para, topli gas, topli fluid, i

slično) ne nalazi u direktnom kontaktu sa materijalom koji se suši, već posredno, preko grejane površine, *Balázs (2007)*. Raspon temperatura sušenja kod ovakvih tipova sušara kreće se od -40°C (kod sublimacionog sušenja) do 300°C (kod sušara koje se greju direktno produktima sagorevanja). Razlikuju se četiri osnovne vrste indirektnih sušara: šaržna sušara sa policama (lesama), indirektna-kontaktna rotaciona sušara, šaržna rotaciona vakuumska sušara i sušara sa mešanjem, *Walsh (1992)*, *Vetere (1997)*.

Rotacione sušare u svom sastavu imaju rotirajući doboš čija je osa postavljena pod malim uglom u odnosu na horizontalu, kojim se materijal komeša i ujedno suši odgovarajućim agensom direktno ili indirektno, *Geng (2013)*.

Sušare sa fluidizovanim slojem se pretežno koriste za sušenje vlažnih prahova (pudera) i čestica koje je moguće fluidizovati, *Mujumdar (2003)*, *Gupta (1999)*.

Valjkaste sušare se koriste za sušenje tečnih organskih i neorganskih materija. Sa unutrašnje strane valjka struju para, topla voda ili ulje, a sa spoljašnje strane se suši tanki sloj tečnog ili pastastog materijala. Pogodne su za sušenje hemikalija i često se upotrebljavaju u farmaceutskoj industriji, *Sunkara (2013)*, *Ajayi (2012)*.

Sušare sa raspršivanjem materijala poseduju komoru u koju se raspršuje tečni materijal koji se suši. Raspršivanje materijala i distribucija agensa su najvažnije operacije u procesu sušenja ovom tehnologijom, *Woo (2012a)*, *Gabites (2010)*.

Sublimaciona sušara se pretežno koristi prilikom sušenja specifičnih materijala kao što su: krvna plazma, hormonski rastvori, super provodljivi materijali, hiruški materijal za transplantaciju, zaražene organske ćelije, kao i u farmaceutskoj industriji, *Ganguly (2012)*, *Polak (2011)*. Opravdanost i prednosti korišćenja sublimacionog sušenja postoje i u prehrambenoj industriji, *Van der Sman (2013)*.

Mikrotalasno i dielektrično sušenje se prvi put javljaju početkom dvadesetog veka. Upotreba elektromagnetnih talasa određene frekventnosti i talasne dužine predstavlja efikasan način za zagrevanje materijala u industrijskoj proizvodnji, *Li, Z. (2011)*.

Solarno sušenje je jedan od najstarijih vidova sušenja i tehnologije iskorišćavanja ovakvog vida obnovljive energije konstantno se unapređuju. Ovom tehnologijom je moguće sušiti veliki broj materijala, a naročito je isplativa kod sušenja prehrambenih proizvoda, kao što su na primer žitarice, kafa, grožđe, kikiriki, orah i razne vrste voća i povrća, *Sreekumar (2010)*, *Belessiotis (2011)*. Takođe se primenjuje i za sušenje duvana, *VijayaVenkataRaman (2012)*.

Sušenje u fluidizovanom sloju se uspešno primenjuje još od pedesetih godina dvadesetog veka, prvenstveno u hemijskoj i procesnoj industriji, a potom i u prehrambenoj industriji, *Szalay (2001), Kaleta (2013)*. Ova vrsta sušara zahteva visoki nivo optimizacije geometrijskih, fizičkih i hidrodinamičkih parametara u cilju efikasnog funkcionisanja.

Sušenje koncentrisanim mlazom agensa se koristi prvenstveno u industriji gde je neophodno kontinualno sušiti materijal koji se najčešće nalazi u vidu rolne (proizvodnja papira, fotografskih filmova, tekstila, tepiha i slično), *De Bonis (2011)*. Optimizacija procesa sušenja se može uraditi određivanjem optimalnog ugla pod kojim mlaz dospeva na materijal, *AliKhan (1980)*.

Pneumatsko sušenje je jedan od načina za kontinualno konvektivno sušenje. Istovremeno odvijanje pneumatskog transporta čestica i njihovog sušenja je složen proces. Numeričkim softverskim simulacijama procesa pneumatskog sušenja može se odrediti optimalna veličina transportovanih čestica, *Pakowski (1996)*. Odgovarajućim eksperimentalnim i numeričkim analizama procesa prenošenja toplote tokom pneumatskog sušenja, moguće je definisati kinetiku sušenja materijala, *Tolmač (2011)*.

Konvejsko sušenje se ostvaruje unutar sušara sa kontinualnim radom, kroz koje se materijal kreće na nosećem konvejeru. Koristi se za sušenje lakiranih i farbanih metalnih ili drvenih delova, *Ibrahim (2013), El-Behery (2012)*.

Infracrveno sušenje je najčešće primenjivan vid sušenja u industriji, a ujedno i vid sušenja koji zahteva najveće količine energije. Ove sušare se koriste pretežno u industriji papira, kartona, tekstila i boja, ali i u prehrambenoj industriji za sušenje namirnica, *Niamnuy (2012), Basman (2011)*.

Sušenje pregrejanom vodenom parom predstavlja jedan od najstarijih koncepta sušenja i javio se još u devetnaestom veku u doba parne mašine i industrijske revolucije. Najčešće se primenjuje kod sušenja poroznih materijala, *Woo (2012b)*.

Specijalne napredne tehnologije sušenja se javljaju usled zahteva za visokim kvalitetom proizvoda, povećanjem produktivnosti, olakšanom kontrolom, energetsom efikasnošću postrojenja za sušenje, smanjenja negativnog uticaja na prirodnu okolinu.

Glavni trendovi naprednih tehnologija podrazumevaju, *Mujumdar (1991)*:

- korišćenje pregrejane pare kod direktnog sušenja;
- korišćenje indirektnog konduktivnog zagrevanja;

- primenu kombinovanih načina prenosa toplote;
- primenu zapreminskog zagrevanja pomoću mikrotalasa i radio talasa;
- upotrebu dvostepenih sušara;
- upotrebu specijalnih tehnologija sagorevanja;
- dizajniranje fleksibilnih multiprocesnih sušara.

Kombinovane tehnologije sušenja se koriste za dobijanje proizvoda vrhunskog kvaliteta, kod kojih je potrošnja energije svedena na minimum. Kombinacijom tehnologija može se postići dober izgled osušenog proizvoda, naročito uz korišćenje odgovarajućih predtretmana, **Grabowski (1994)**. Mikrotalaso zagrevanje materijala se često koristi kao dopunski način zagrevanja, čime se ukupno vreme sušenja bitno skraćuje. Mogućnost selektivnog grejanja mikrotalasima u kombinaciji sa pneumatskim transportom materijala koji se suši, korišćenjem prinudnog strujanja vazduha, koristi se za različite vrste proizvoda, **Venkatachalapathy (1998)**. Kombinacija mikrotalasnog sušenja i sušenja u vakumu često se koristi za sušenje bobičastog voća i bobičastog lekovitog bilja, **Yongsawatdigul (1996a,b)**, **Drouzas (1996)**.

Koncept kvaliteta finalnog proizvoda je prilično složen u sektoru prehrambene industrije. O kvalitetu finalnog proizvoda konačan sud imaju potrošači u vidu potražnje, čime se podstiče konkurentnost među proizvođačima, koji su time prisiljeni da vode računa o ekonomičnijem poslovanju i proizvodnji sa jedne strane, i da odgovarajućim kvalitetom sirovone i adekvatnom opremom za preradu obezbede kvalitet sa druge strane, **Bimbenet (1992)**. Bez obzira na to što se među prerađenom hranom smatraju kao proizvodi sa nižim kvalitetom, osušeni prehrambeni proizvodi sve više dobijaju na popularnosti. To potvrđuje i konstantan rast tržišta sušene hrane, **Strumillo (1996)**. Rehidracija je najviše istraživani parametar kvaliteta, pored boje i skupljanja, **Ratti (2001)**. Promene u teksturi i fizičkoj strukturi sušenog materijala i udvrđuje njihov uticaj na rekonstrukciju i rehidraciju, kao i na organoleptičke karakteristike kao što je osećaj u ustima, **Abbott (1999)**. Podvrgavanje voća i povrća različitim podtretmanima (potapanje u alkalne rastvore i slično) doprinosi poboljšanju i održavanju njihovih karakteristika prilikom sušenja. Takođe, upotrebom sumpor-dioksida i sulfita može se sprečiti promena boje, **Krokida (2001)**.

Nekoliko osobina prehrambenog materijala bitno utiču na kvalitet osušenog proizvoda, **Krokida (2000)**:

- Strukturne osobine (gustina, poroznost, veličina pora, specifična zapremina);
- Optičke osobine (boja, izgled);
- Mehaničke osobine (otpornost na pritisak i istezanje);
- Termička svojstva (staklasto, kristalno ili gumeno stanje proizvoda);
- Čulne osobine (miris, ukus, aroma);
- Nutritivna svojstva (vitamini, proteini);
- Rehidracione osobine (stepen rehidracije, kapacitet rehidracije).

Karakteristike kvaliteta su pod uticajem mnogobrojnih faktora koji se javljaju tokom sušenja, ali sve one su na kraju povezane sa temperaturom sušenja i dinamikom uklanjanja vlage iz materijala. Dovedena toplota i vreme izlaganja proizvoda na povišenoj temperaturi i toplom vazduhu prilikom sušenja, utiču na nutritivni kvalitet prehrambenih proizvoda. Takođe, proces sušenja utiče i na rehidraciju, rastvorljivost, izgled teksture i gubitak arome. Povišene temperature sušenja i perioda izlaganja materijala utiču na njegovu hranljivost, sadržaj vitamina i proteina, kao mikrobiološka strukturu materijala. Tokom sušenja materijal gubi prirodnu boju i usled oksidacije lipida dobija braonkastu boju. Takođe, gubitak prirodnih pigmenata kao što su karotenoidi, hlorofil i ksantofil je povezan sa promenom boje sušenog voća i povrća. Iako je promena boje ponekad povezana sa neželjenim hemijskim promenama koje se dešavaju u materijalu, pravi problem je u (ne)prihvatanju od strane konzumera. Očuvanje ovih pigmenata tokom dehidracije je veoma važno uglavnom da bi proizvod bio atraktivan i prihvatljiv za potrošače, **Banga (1994)**.

U cilju sagledavanja energetske efikasnosti sistema sušenja, često se sprovode energetske i eksergetske analize celokupnog sistema ili samo pojedinačnih delova sistema, na osnovu čega se sagledavaju gubici energije, **Brodyansky (1994)**. U istraživanjima koja se bave eksergetskom analizom sistema sušenja, veoma često se svaka komponenta sistema sušenja analizira odvojeno, a potom vrši sumiranje dobijenih rezultata kako bi se dobila eksergetska efikasnost celokupnog sistema sušenja, **O'Toole (1990)**, **Dincer (2011)**. Za razliku od konvencionalnih sušara kod kojih proces zagrevanja agensa sam po sebi predstavlja gubitak, kod naprednih tehnologija sušenja

(npr. sa podrškom toplotne pumpe) jedini neizbežni gubitak jeste onaj koji se javlja usled vlaženja vazduha u komori sušare, *Catton (2011), Gungor (2011)*. U odsustvu univerzalnog okvira za utvrđivanje efikasnosti sušenja, eksergetska analiza se čini kao pogodna tehnika, *Ceylan (2007)*. Međutim, eksergetska analiza samo ukazuje na potencijal ili mogućnosti unapređenja procesa rada, ali ne može navesti da li je ili nije moguće ostvariti poboljšanje ili koliko bi ono bilo ekonomski racionalno, *Feng (1996), Larson (1995)*.

Industrijski razvijene zemlje, proizvodnju i primenu odgovarajućih tehnologija sušenja uređuju specijalnim protokolima koji uzimaju obzir različite uticajne faktore još u ranim fazama projektovanja. Tako na primer, Agencija za zaštitu životne sredine SAD, *US EPA* (skraćeno od *eng. United States Environmental Protection Agency*), zahteva da se pri dizajniranju sistema sušenja posebno obrati pažnja na:

- karakteristike materijala koji se suši,
- kontrolu produkcije prašine i čestica prilikom sušenja,
- skladištenje osušenog proizvoda,
- sprečavanja bakteriološke neispravnosti materijala,
- položaj sistema sušenja u odnosu na kanalizacione sisteme,
- kapacitete sistema i infrastrukture na koju se povezuje,
- prikupljanje i skladištenje otpadnog materijala,
- energetske efikasnost postrojenja,
- bezbednosne rizike i zaštitu na radu.

U malom broju istraživanja se pojam sušenja sagledava u jednom globalnom kontekstu međusobne intenzivne interakcije ovog procesa i okolne sredine, *Dincer (2000)*. Primena ekološki prihvatljivih tehnologija u oblasti sušenja, može bitno uticati na smanjenje negativnog uticaja procesa sušenja na životnu sredinu, naročito u velikim industrijskim proizvodnim sistemima, *Wang (2012)*. Korišćenje biogasa, zemnog gasa, otpadnog gasa kod turbina i toplote čvrstih produkata sagorevanja kod direktnog sušenja, kao i pregrejane vodene pare i otpadne tople vode kod indirektnog načina sušenja, samo su neka od rešenja kojima se smanjuje negativan uticaj na okolinu, *Moss (2005)*. Korišćenje različitih peleta od biomase kao energenta u sistemima sušenja, bez

odgovarajuće regulacije emisije štetnih gasova, može biti izuzetno štetno po okolinu, *Dolak (2001), Rupar (2003)*.

2.2 Pregled teorijskih istraživanja procesa konvektivnog sušenja prehrambenih materijala

Istraživanje i analiza procesa sušenja je neophodna radi njegove dalje optimizacije i usavršavanja. Jasan fizički i matematički opis procesa sušenja biološkog materijala je i dan danas u priličnoj meri ostao nerazjašnjen bez obzira na ogroman broj sprovedenih istraživanja. Većina metoda modeliranja baziraju se na konceptu difuzije vlage kroz materijal, opisujući promenu prosečnog sadržaja vlage u materijalu tokom vremena, *Kemp (2001)*. Modeliranje kompletnog proces sušenja se može raščlaniti na tri dela: modeliranje procesa strujanja vazduha, modeliranje materijala koji se suši i modeliranje opreme koja se koristi, *McMinn (1999)*.

Teorija sušenja predstavlja važan deo nauke o prostiranju toplote i supstancije. Proces sušenja zavisi od strukturno-mehaničkih, tehnoloških i biohemijskih svojstava vlažnog materijala. Ovaj proces je moguće opisati sistemom diferencijalnih jednačina prostiranja toplote i supstancije izvedenih u skladu sa načelima termodinamike nepovratnih procesa. Međutim, čak i uz poznavanje početnih i graničnih uslova u jednačinama, veoma je teško doći do analitičkog rešenja ovih sistema jednačina. Usled toga, veoma često se pribegava eksperimentalnim i numeričkim metodama, kojima se određuju nepoznate veličine od značaja za definisanje kinetike sušenja materijala, *Лыков (1968)*.

Veliki broj eksperimentalnih istraživanja zasniva se na merenju prosečnog sadržaja vlage u materijalu ili eventualno temperature površi materijala (ili prosečna vrednost temperature površi) tokom vremena. Jedan od načina opisivanja komplikovanih mehanizama prenosa toplote i supstancije koji su prisutni tokom procesa sušenja, jeste pomoću tzv. koeficijenta sušenja (**2.1**), koji zavisi od velikog broja uticajnih faktora, *Лыков (1968), Lewis (1991)*. Koeficijent sušenja predstavlja višeparametarsku funkciju, čiji parametri zavise od osobina materijala i vazduha (**2.2**), i opisuje različite i složene fenomene prenosa koji se odvijaju tokom sušenja, *Krokida (2004)*.

$$-\frac{dM}{d\tau} = K \cdot (M - M_e) \quad (2.1)$$

$$K = f(d, T, w, RH) \quad (2.2)$$

Značajan napredak postignut je razvojem savremenih računara na kojima se numeričke metode lako primenjuju posredstvom specijalizovanih softvera za obradu podataka. Primena računara omogućuje i formiranje velikih baza podataka prehrambenih materijala, *Mittal (1999)*, *Zogas (1996)*. Takođe, vreme obrade podataka se bitno umanjuje čime se omogućava brzo rešavanje jednačina modela, na primer, difuzije vlage u materijalu ili kontrakcije zapremine materijala tokom procesa sušenja metodom konačnih elemenata, *Janjai (2010)*, *Gekas (2001)*. Jedan od načina za određivanje koeficijenta sušenja (2.2) je primenom grafoanalitičkih i numeričkih metoda, povezujući je sa brzinom izdvajanja vlage iz materijala u odgovarajućim periodima sušenja, *Singh (2012)*.

Najpotpunija slika odvijanja procesa sušenja se dobija posmatranjem kriva kinetike sušenja, *Topić (1989)*. To podrazumeva praćenje promena određenih karakterističnih veličina tokom trajanja procesa sušenja, i to:

- srednje vrednosti sadržaja vlage u materijalu (**Slika 2.2.1a**),
- brzine izdvajanja vlage (**Slika 2.2.1b**), i
- srednje temperature materijala (**Slika 2.2.1c**).

Ceo proces sušenja može se podeliti na tri karakteristična perioda (**Slika 2.2.1**), i to:

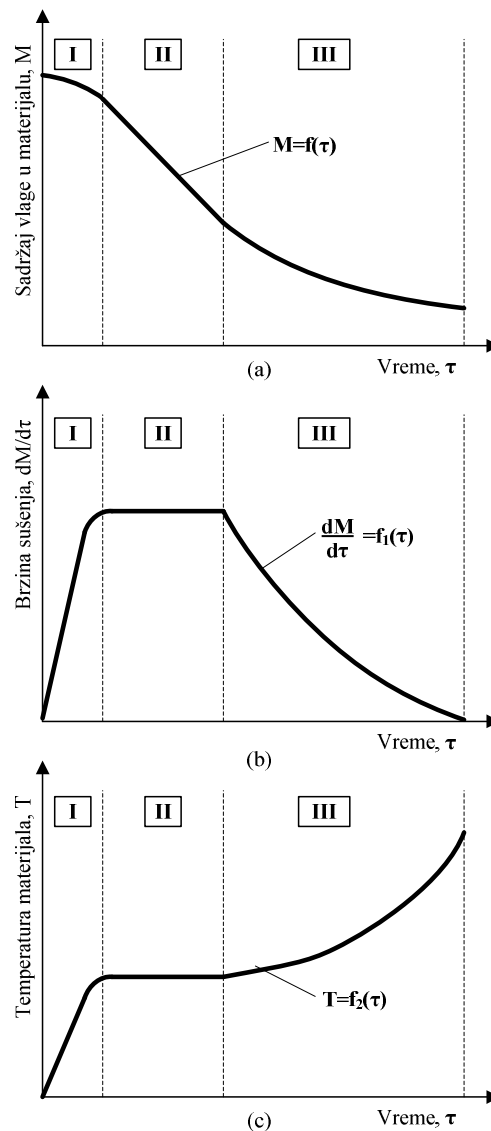
- I** period zagrevanja materijala,
- II** period konstantne brzine sušenja, i
- III** period opadajuće brzine sušenja.

Period zagrevanja vlažnog materijala (Period I, **Slika 2.2.1**) je vremenski kratak. Kod sušenja materijala u tankom sloju ovaj period se može zanemariti. U toku ovog perioda promena srednje temperature materijala je funkcija dovedenog toplotnog protoka. Obzirom na to da se deo dovedenog toplotnog protoka troši i na uklanjanje vlage iz materijala, u ovom periodu se primećuje porast brzine sušenja i smanjenje sadržaja vlage u materijalu. Usled dovođenja toplotnog protoka temperatura vlažnog materijala raste.

Nakon dostizanja temperature po vlažnm termometru temperatura vlažnog materijala se ne menja. Tada počinje period konstantne brzine sušenja (Period II, **Slika 2.2.1**) tokom koga vlaga isparava mehanizmom identičnim isparavanju vode sa slobodne površi. Tokom ovog perioda unutrašnji otpori prenošenju vlage od centralnih slojeva do spoljašnje površi materijala malo utiču na brzinu procesa.

Kada spoljašnja površ materijala postane suva, preostala vlaga se nalazi u unutrašnjosti delimično osušenog materijala. Tada počinje period opadajuće brzine sušenja (Period III, **Slika 2.2.1**). Tokom perioda III, spoljašnji uticaji su mali i kinetika sušenja je određena makroskopskim kretanjem i prenošenjem vlage iz unutrašnjih slojeva materijala ka spoljašnjoj površi materijala. Do povećanja srednje temperature vlažnog materijala dolazi zbog toga što se jedan deo dovedenog toplotnog protoka troši na ukanjanje vlage iz materijala, a drugi deo na zagrevanje materijala. Tokom odvijanja procesa sušenja srednja temperatura vlažnog materijala se sve više približava temperaturi toplotnog izvora, **Baini (2007, 2008)**.

Istraživanja procesa izdvajanja vlage iz materijala se baziraju na praćenju fenomena unutrašnjeg transporta vlage u materijalima, sa jedne strane, i posledicama spoljašnjih uticaja na materijal sa druge strane, **Perry (1999)**. Prilikom konvektivnog sušenja vlažnih materijala, vlaga difunduje iz unutrašnjih slojeva materijala ka spoljašnjoj površi materijala gde isparava i odlazi sa strujom agensa. Istraživanja sprovedena na



Slika 2.2.1 Krive kinetike sušenja, *Topić (1989)*

različitim vrstama prehrambenih materijala potvrđuju dominaciju unutrašnjih otpora u procesu sušenja, na primer kod: - sušenja banane sečene na kolutove, *Minh-Hue (2007)*; -sušenja različitih sorti jabuka, *Kaya (2006, 2007)*, *Chandra (2010)*; - sušenja krompira sečenog u kockice, *Simal (1997)*; - kontinualnog sušenja krompira sečenog u listove, *Aghbashlo (2009)*; - konvektivnog sušenja jabuke, *Lengyel (2007)*; i mnogih drugih istraživanja.

Kontinualno praćenje sadržaja vlage u materijalu tokom celokupnog vremenskog perioda sušenja i njegovo predstavljanje u bezdimenzionom obliku *MR* (skraćeno od eng. *Moisture ratio*), predstavlja uobičajen pristup u tehnici sušenja, *Pavón-Melendez (2002)*. Utvrđivanje vlažnosti materijala na početku procesa sušenja i krajnje ravnotežne vlažnosti materijala na kraju procesa sušenja najčešće se vrši nekom od metoda za određivanje mase suve materije u materijalu, *Doymaz (2009)*.

Trenutni sadržaj vlage u materijalu, dobijen eksperimentalnim merenjem mase materijala u određenim vremenskim intervalima za vreme trajanja procesa sušenja, se može iskoristiti za određivanje (2.3) bezdimenzionog sadržaja vlage u materijalu u posmatranom trenutku vremena, *Yesilata (2009)*.

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (2.3)$$

Poznavanje bezdimenzionog sadržaja vlage u materijalu u bilo kom trenutku vremena, tj. funkcionalne zavisnosti $MR = f(\tau)$, je od ključne važnosti za modeliranje procesa sušenja (**Tabela 2.2.1**).

Verifikacije modela se ostvaruju na različitim tipovima laboratorijskih sušara koje poseduju mogućnosti varjacije svih ili samo određenih parametara sušenja. Poklapanje rezultata dobijenih matematičkom modelom i eksperimentalnih rezultata je veće ukoliko je broj parametara obuhvaćenih modelom veći. Laboratorijska istraživanja najčešće podrazumevaju utvrđivanje pojedinačnog ili ukupnog uticaja parametara sušenja na kinetiku procesa, *Velić (2004)*, *Uretir (1996)*.

Zanemarivanjem nekog od parametara sušenja se izbegava dublje zalaženje u međusobne korelacije između parametara unutar samog modela. Jedan od parametara koji se često zanemaruje je relativna vlažnost vazduha koji se koristi kao agens sušenja.

Tabela 2.2.1 - Modeli karakterističnih krivih sušenja predloženi od strane drugih autora

Naziv modela	Model	Literatura
<i>Newton</i>	$MR = e^{(-k_1\tau)}$	<i>Mujumdar (2006), Doymaz (2009), Sacilik (2006), Seiedlou (2010), Meisami-asl (2010), Aktas (2009), Kaya (2007); Akpinar (2003); Baini (2007), Fadhel (2011a), Koua (2009)</i>
<i>Page</i>	$MR = a_1 \cdot e^{(-k_1\tau^n)}$	<i>Mujumdar (2006), Doymaz (2009), Sacilik (2006), Seiedlou (2010), Meisami-asl (2010), Aktas (2009); Singh (2011), Akpinar (2003); Baini (2007), Fadhel (2011a), Koua (2009)</i>
<i>Modified Page</i>	$MR = a_1 \cdot e^{((-k_1\tau)^n)}$	<i>Mujumdar (2006), Seiedlou (2010), Meisami-asl (2010), Aktas (2009); Akpinar (2003); Baini (2007), Fadhel (2011a), Koua (2009)</i>
<i>Modified Page equation - II</i>	$MR = a_1 \cdot e^{\left(-k_1 \left(\frac{\tau}{a_2}\right)^n\right)}$	<i>Baini (2007)</i>
<i>Henderson and Pabis</i>	$MR = a_1 \cdot e^{(-k_1\tau)}$	<i>Henderson (1961), Doymaz (2009), Sacilik (2006), Seiedlou (2010), Meisami-asl (2010), Aktas (2009), Kaya (2007); Singh (2011), Akpinar (2003); Baini (2007), Fadhel (2011a), Minh-Hue (2007), Koua (2009)</i>
<i>Modified Henderson and Pabis</i>	$MR = a_1 \cdot e^{(-k_1\tau)} + a_2 \cdot e^{(-k_2\tau)} + a_3 \cdot e^{(-k_3\tau)}$	<i>Doymaz (2009), Sacilik (2006), Meisami-asl (2010); Baini (2007)</i>
<i>Logarithmic</i>	$MR = a_1 \cdot e^{(-k_1\tau)} + a_2$	<i>Doymaz (2009), Sacilik (2006) Seiedlou (2010), Meisami-asl (2010); Akpinar (2003); Baini (2007), Fadhel (2011a), Koua (2009)</i>
<i>Two-term</i>	$MR = a_1 \cdot e^{(-k_1\tau)} + a_2 \cdot e^{(-k_2\tau)}$	<i>Doymaz (2009), Sacilik (2006), Kaya (2007), Meisami-asl (2010); Akpinar (2003); Baini (2007), Fadhel (2011a)</i>
<i>Two-term exponential</i>	$MR = a_1 \cdot e^{(-k_1\tau)} + (1 - a_1) \cdot e^{(-k_1a_2\tau)}$	<i>Doymaz (2009), Sacilik (2006), Meisami-asl (2010); Akpinar (2003); Baini (2007), Fadhel (2011a)</i>
<i>Wang and Singh</i>	$MR = 1 + a_1 \cdot \tau + a_2 \cdot \tau^2$	<i>Doymaz (2009), Sacilik (2006), Seiedlou (2010), Meisami-asl (2010); Akpinar (2003); Baini (2007), Fadhel (2011a), Koua (2009)</i>
<i>Midilli et al.</i>	$MR = a_1 \cdot e^{(-k_1\tau^n)} + a_2 \cdot \tau$	<i>Doymaz (2009), Sacilik (2006) Seiedlou (2010), Meisami-asl (2010)</i>
<i>Approximation of diffusion</i>	$MR = a_1 \cdot e^{(-k_1\tau)} + (1 - a_1) \cdot e^{(-k_1a_2\tau)}$	<i>Doymaz (2009), Sacilik (2006) Seiedlou (2010), Meisami-asl (2010); Akpinar (2003); Baini (2007)</i>
<i>Verma et al.</i>	$MR = a_1 \cdot e^{(-k_1\tau)} + (1 - a_1) \cdot e^{(-k_2\tau)}$	<i>Doymaz (2009), Meisami-asl (2010); Akpinar (2003); Baini (2007)</i>
<i>Aghbashlo</i>	$MR = e^{\left(\frac{-k_1\tau}{1+k_2\tau}\right)}$	<i>Seiedlou (2010)</i>
<i>Weibull</i>	$MR = e^{\left(-\left(\frac{\tau}{a_2}\right)^{a_1}\right)}$	<i>Seiedlou (2010); Koua (2009)</i>
<i>Hii et al.</i>	$MR = a_1 \cdot e^{(-k_1t^n)} + a_2 \cdot e^{(-k_2t^n)}$	<i>Meisami-asl (2010)</i>

Kontrolu relativne vlažnosti vazduha koji dospeva na materijal najlakše je ostvariti u sistemima sušenja u kojima postoji neki vid potpune ili delimične recirkulacije jer se samom recirkulacijom može izbeći konstantno unošenje većih količina vlage u proces radi postizanja željenih inicijalnih vrednosti relativne vlažnosti, **Pakowski (2007)**.

Kontrolom parametara čitavog ambijentalnog prostora u kome se sušenje odvija (npr. prostorije u kojoj je smeštena sušara), omogućava da se na materijal dovede vazduh tačno željene relativne vlažnosti, **Aktas (2009)**, **Kaya (2007)**. Nedostatak ovakvog načina kontrole ulaznih veličina je taj što ju je moguće ostvariti jedino u laboratorijskim uslovima, **Saensabai (2003)**.

Sušare podržane radom toplotne pumpe, tzv. *HPD* sistemi (skraćeno od eng. *Heat Pump Dehumidifier*), po svojoj konstrukciji naročito pogoduju ovoj svrsi jer u ovim instalacijama toplotna pumpa već koristi recirkulaciju vazduha za rekuperaciju toplote, **Colak (2009a,b)**. Veliki broj istraživanja ukazuje povećanja primene ovakvih sistema u prehrambenoj industriji kod sušenja voća, povrća, lekovitog bilja, ribe i morskih plodova, kao i mnogih drugih bioloških materijala, **Goh (2011)**.

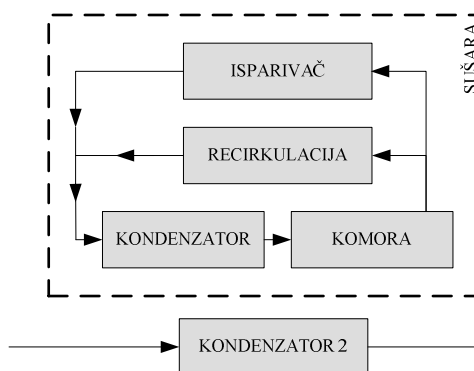
Osnovna prednost sušara podržanih radom toplotne pumpe jeste energetska efikasnost ostvarena mogućnošću rekuperacije energije i mogućnost ostvarenja visokog stepena kontrole parametara sušenja (temperature i relativne vlažnosti agensa). Mogućnost rekuperacije toplote iz vlažnog vazduha koji napušta komoru za sušenje isparivačem toplotne pumpe i povraćaj oduzete toplote kondenzatorom toplotne pumpe nazad u proces, jeste upravo ono što izuzetno doprinosi ukupnoj efikasnosti *HPD* sistema, **Pal (2008a)**.

HPD sistemi mogu biti tehnički izvedeni tako da se njihovi spoljni uticaji mogu zanemariti, **Kudra (2002)**. Zbog toga se na ovakvim instalacijama može preciznije kontrolisati veći broj parametara sušenja čime se otvara mogućnost sagledavanja njihove međusobne povezanosti, **Rahman (2007)**. Na osnovu toga, moguće je formirati korelacione modele koji će objediniti sve relevantne parametre procesa u zajedničku matematičku formulaciju, **Sosle (2003)**, **Phoungchandang (2008)**. Prilikom modeliranja procesa sušenja podržanih radom toplotnih pumpi često se sistem toplotne pumpe i procesi sušenja materijala odvojeno posmatraju, **Minea (2012a,b)**.

Zajedničke komponente, odnosno, dodirne tačke sistema za sušenje i sistema toplotne pumpe su razmenjivači toplote - isparivač i kondenzator toplotne pumpe.

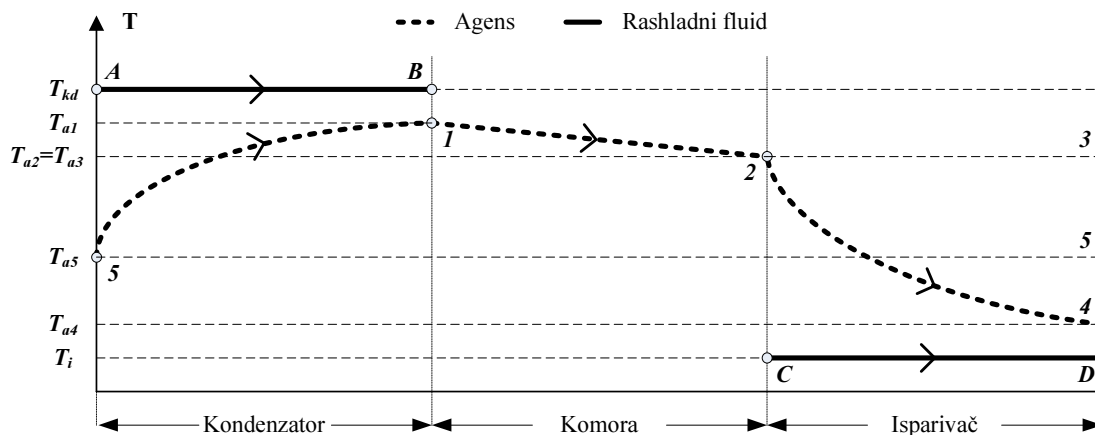
Potrebne snage ovih komponenata pri usvojenom režimu rada definišće potrebnu količinu rashladnog fluida, a samim tim snagu kompresora toplotne pumpe, *Teeboonma (2003)*.

Komponente *HPD* sistema sušenja predstavljaju zasebne celine koje se mogu opisati odgovarajućim bilansnim jednačinama. Raspored komponenata *HPD* sistema bitno utiče na efikasnost rada sistema, *Minea (2010)*.



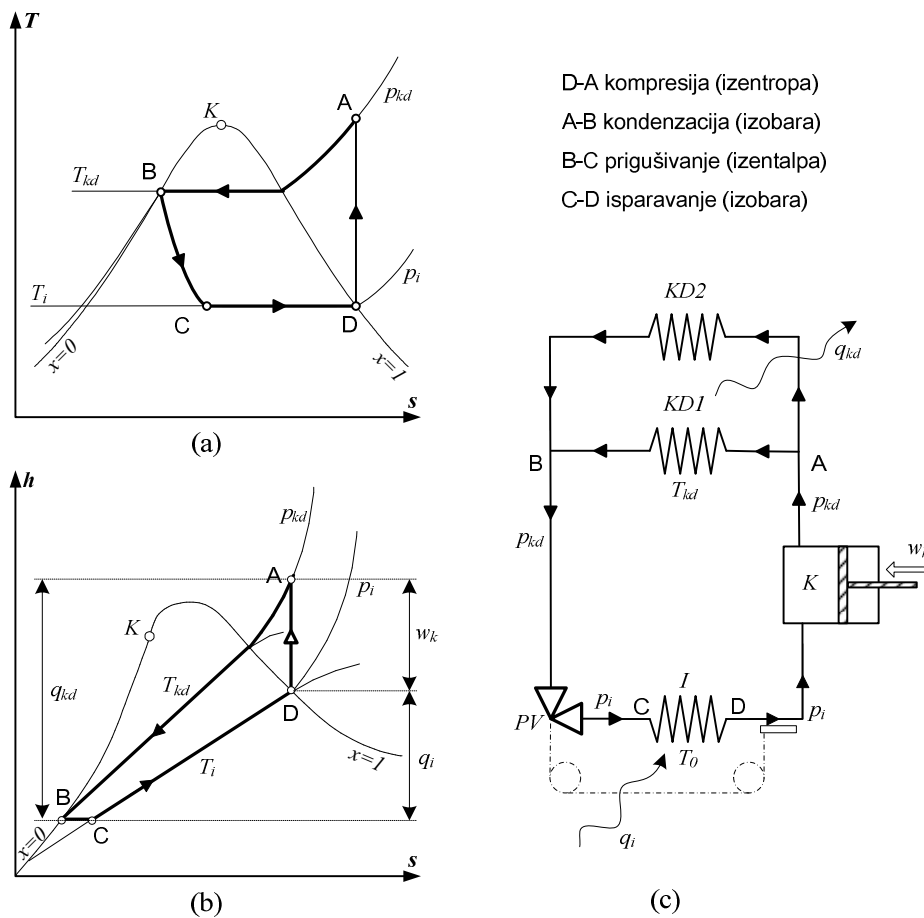
Slika 2.2.2 Konfiguracija *HPD* sistema, *Zlatanović (2011)*

Na primer, na osnovu poznate konfiguracije sistema (**Slika 2.2.2**) moguće je formiranje tzv. temperaturnog dijagrama (**Slika 2.2.3**), kojim se prikazuju temperature oba medija (freona i vlažnog vazduha) u karakterističnim tačkama sistema.



Slika 2.2.3 Temperaturni dijagram

(*A-B* ulaz-izlaz iz kondenzatora, *C-D* ulaz-izlaz iz isparivača, *1-5* temperatura vlažnog vazduha u karakterističnim tačkama sistema)



Slika 2.2.4 Parna kompresorska mašina sa prigušnim ventilom i suvim usisavanjem
 a) ciklus u T - s dijagramu, b) ciklus u h - s dijagramu, c) šema instalacije

U velikom broju istraživanja, modeliranje komponenta toplotne pumpe *HPD* sistema sušenja najčešće se pojednostavljuje, *Minea (2012a,b)*. U skladu sa tim uvode se sledeće pretpostavke:

- Toplotna pumpa je kompresiona rashladna mašina koja radi po najjednostavnijem levokretnom kružnom procesu (**Slika 2.2.4**);
- Rashladni fluid na izlazu iz isparivača se nalazi u stanju suvozasićene pare;
- Rashladni fluid na izlazu iz kondenzatora se nalazi u stanju ključale tečnosti;
- Promena stanja rashladnog fluida tokom procesa kompresije je izentropska;
- Promena stanja rashladnog fluida tokom procesa ekspanzije je izentalpska;
- Cevovodi toplotne pumpe su toplotno izolovani;
- Padovi pritiska u cevnoj mreži se mogu zanemariti;
- Sve komponente sistema su toplotno izolovane;
- Rad toplotne pumpe se posmatra u periodu stacionarnog rada.

2.3 Pregled eksperimentalnih istraživanja procesa konvektivnog sušenja prehrambenih materijala

Veliki broj istraživanja posvećen je upotrebi toplotnih pumpi u sistemima sušenja, *Minea (2012a,b)*, *Goh (2011)*, *Colak (2009a,b)*. Toplotna pumpa predstavlja efikasno rešenje za rekuperaciju energije i svrstava *HPD* sisteme sušenja u energetski efikasne tehnologije. Mogućnost toplotne pumpe da rekuperiše latentnu toplotu pri kondenzaciji pare u senzibilnu toplotu vazdušne struje koja prolazi preko kondenzatora, čini je atraktivnom tehnologijom naročito u kombinaciji sa mogućnošću ostvarenja dobro kontrolisanih parametara sušenja, *Coşkun (2012)*, *Chua (2010)*. Rekuperacija otpadne toplote iz industrijskih procesa primenom toplotnih pumpi, već dugo vremena je tema mnogih istraživanja, *Ping (2012)*, *Chamoun (2010)*.

Prednost upotrebe toplotnih pumpi su potvrđene u: - industriji drveta i drvnih prerađevina, *Sun (1996)*, *Minea (2010)*; - tekstilnoj industriji, *Wang (2011a)*; ali i u prehrambenoj industriji, *Chua (1998)*, *Chou (1998)*.

U prehrambenoj industriji, korišćenje *HPD* sistema pokazuje dobre rezultate prilikom sušenja: - pečuraka, *Artnaseaw (2010)*; - banane, *Prasertsan (1997,1998a)*; - lešnika, *Borompichaichartkul (2009)*; - zrna kakaa, *Hii (2012)*; - žita, *Li,Y. (2011)*; - grožđa, *Velazquez (1997)*, *Meyer (1992)*; - luka, šargarepe i krompira, *Fatouh (1998)*; - ribe i plodova mora (školjke, itd.), *Daghigh (2010)*; - lekovitog i začinskog bilja, *Fatouh (2006)*; i mnogih drugih proizvoda.

Jedinstveni potencijal toplotne pumpe potvrđen je pri sušenju osetljivih materijala gde je teško postići dobar kvalitet osušenog proizvoda: - toplotno osetljivi materijali, *Strommen (1994)*; - biološki aktivni materijali (bakterijske kulture), *Alves-Filho (1998a,b)*;

Nagli porast cena goriva u poslednjim decenijama XX veka uticao je na ponovno oživljavanje ideje o primeni toplotnih pumpi. Smanjene zalihe fosilnih goriva i povećana potreba za energijom podstakla je istraživanje korišćenja alternativnih izvora toplote u procesima pripreme vazduha za sušenje. Od tada, mnoge studije su sprovedene oblasti primene *HPD* sistema. Razvijeni su različiti procesi sušenja raznih aplikacija kao što su drvo i slad (Nemačka), sušenje ribe i morskih plodova (Norveška), otklanjanju vlage objekata zaštićenog prostora i slično, *Law (2012)*, *Pererra (1997)*. Uočeno je da

je primenom *HPD* sistema smanjenje potrošnje energije moguće, ali i to da cena opreme korišćene za rekuperaciju toplote često premašuje cenu sušare, *Hesse (1995)*.

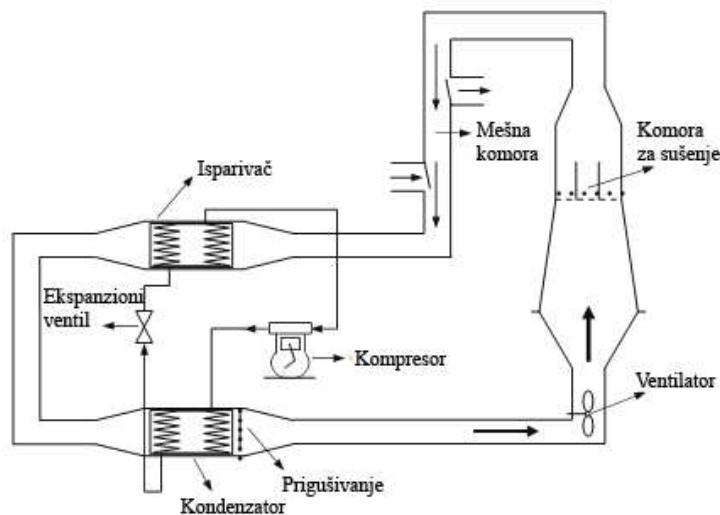
Celokupni učinak *HPD* sistema može biti bitno poboljšan ukoliko se proces sušenja odvija sa recirkulisanim vazduhom. Recirkulacija vazduha u sistemu sušenja se može ostvariti na više načina (**Tabela 2.3.1**).

Tabela 2.3.1

Najčešće primenjivane konfiguracije *HPD* sistema sušenja, *Theerakulpisut (1990)*

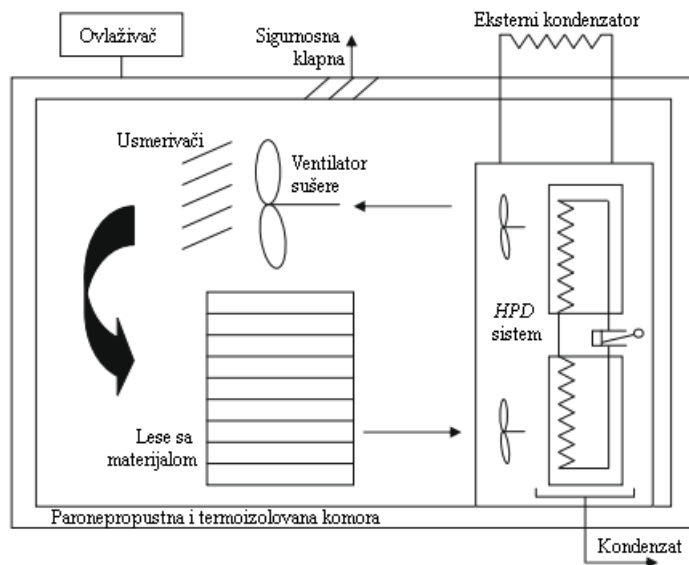
Karakteristika sistema	Oznaka sistema	Konfiguracija sistema (<i>I</i> - isparivač, <i>KD</i> - kondenzator)
Bez recirkulacije	<i>HPD-1</i>	
	<i>HPD-2</i>	
	<i>HPD-3</i>	
Delimična recirkulacija	<i>HPD-4</i>	
	<i>HPD-5</i>	
Potpuna recirkulacija	<i>HPD-6</i>	

Veliki broj eksperimentalnih istraživanja se sprovodi na laboratorijskim instalacijama koje procenat recirkulisanog vazduha kontrolišu u mešnoj komori kanalskog sistema, pri čemu se deo vazduha ventilira, a deo vraća ponovo u sistem (na primer, **Slika 2.3.1**). Delimičnom recirkulacijom vazduha se bitno smanjuje potrošnja energije i skraćuje vreme sušenja, *Oktay (2003), Adapa (2005)*.



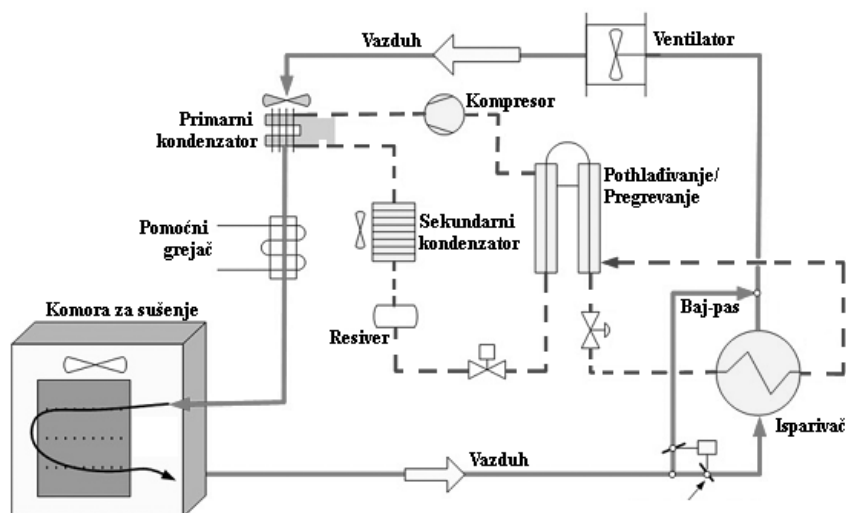
Slika 2.3.1 Primer HPD sistema sa delimičnom recirkulacijom vazduha, *Xanthopoulos (2007)*.

Potpuna recirkulacija vazduha se često koristi u HPD sistemima. Ovakav vid recirkulacije se može postići sušenjem u potpuno zatvorenom prostoru (**Slika 2.3.2**) gde su parametri sušenja ujedno i parametri ambijenta postignuti radom sistema toplotne pumpe.



Slika 2.3.2 Primer HPD sistema sa potpunom recirkulacijom vazduha, *Pererra (1997)*.

Drugi način postizanja potpune recirkulacije je primenom posebnih konfiguracija *HPD* sistema (**Slika 2.3.3**). Brojna istraživanja pokazuju da se primenom *HPD* sistema sušenja sa potpunom recirkulacijom vazduha, sa mogućnošću zaobilaska isparivača toplotne pumpe, na temperaturama sušenja nižim od $+50^{\circ}\text{C}$, može dobiti vrhunski kvalitet osušenog proizvoda, *Soponronnarit (1998)*.

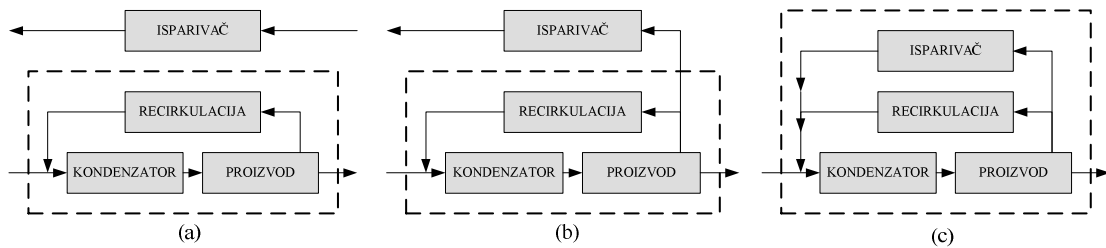


Slika 2.3.3 Primer *HPD* sistema sa potpunom recirkulacijom vazduha, *Minea (2010)*.

Toplotne pumpe su prvenstveno korišćene kao uređaji koji će obezbediti neophodan toplotni protok za odvijanje procesa sušenja. Njihov rad je često analiziran nezavisno od procesa sušenja. Međutim, vremenom su toplotne pumpe preuzele i ulogu komponente sistema kojom se smanjuje vlažnost vazduha. Veliki broj istraživanja odnosi se na izbor pojedinih komponentata toplotne pumpe, na primer kompresora, kondenzatora i isparivača, ekspanzionih ventila, ali i njihove interakcije u sistemu, *Söylemez (2006)*, *Chua (2005, 2010)*, *Aceves-Saborio (1993)*, *Rossi (1992)*. Takođe, razmatraju se mogućnosti i opravdanosti primenjivanja višestepene kompresije, različitih vrsta uređaja za pothladivanje, ali i komponenti kao što su na primer dopunski grejači i slično, *Chou (2001)*, *Hawllader (1998a)*.

Uloga i pozicija isparivača toplotne pumpe u sistemu sušenja, bitno utiče na koncepciju celokupnog sistema sušenja (**Slika 2.3.4**).

Sistem sušenja može biti konfigurisan tako da isparivač bude komponenta koja će pored uloge rekuperatora imati i zadatak kondenzovanja vlage koja će se potom iz sistema izbaciti u tečnom stanju.



Slika 2.3.4 Različite konfiguracije komponenta toplotnih pumpi, *Bannister (2002)*.
 (a) atmosferski izvor toplote, (b) delimična rekuperacija otpadne toplote, (c) potpuna rekuperacija
 otpadne toplote

Pojednima istraživanja se bave modelovanjem komponenta *HPD* sistema, *Hawllader (1998b)*. Osnovni model toplotne pumpe se najčešće sastoji od individualnih komponenti isparivača, kondenzatora, kompresora i ekspanzionog ventila, *Teeboonma (2003)*. Pomenuti modeli se potom sklapaju u željene konfiguracije čime se softverski simulira rad sistema u celini. Ovakva istraživanja mogu jednostavno i efikasno da ukažu na neka veoma bitna i praktična pitanja koja se odnose na toplotnu pumpu i sušenje kao i na kompromise koji treba da se reše radi boljeg rada ovakvog sistema, *Jolly (1990)*.

Ekonomska isplativost *HPD* sistema se obično procenjuje po svom periodu otplate investicije, *Pendyala (1986)*. Pojačan tehnološki razvoj i dostupnost savremenih tehnologija u XXI veku, kao i automatizacija procesa proizvodnje, odražavaju se i na *HPD* sisteme sušenja, koji se sa posebnim pravom svrstavaju u napredne tehnologije sušenja, *Kudra (2002)*. Međutim, i pored toga što su proizvođači i sami svesni benefita koji ova tehnologija može da im donese, njeno usvajanje je relativno sporo, *Wijesinghe (2004)*, *Wang (2011)*. Ukoliko se ekonomska analiza isplativosti *HPD* sistema sprovede uzimajući u obzir troškove amortizacije opreme i strukturnih objekata, troškove rada, troškove komunalnih usluga, troškove održavanja, servisiranje kredita i druge troškove, period otplate investicije ovog sistema se značajno umanjuje, *Szabert (1995)*.

Dva uobičajena pokazatelja efikasnosti procesa sušenja u energetskom smislu, koji se najčešće sreću u literaturi su, *Minea (2012b)*:

- *SMER* (skraćeno od eng. *Specific moisture extraction rate*) koji se definiše kao odnos ukupne mase vlage uklonjene iz materijala (izražene u *kg*) i utrošene energije (izražene u *kWh*) (2.4):

$$SMER = \frac{m_w}{W} \quad \left[\frac{kg}{kWh} \right] \quad (2.4)$$

- *SEC* (skraćeno od *eng. Specific energy consumption*) koji se definiše kao odnos ukupne utrošene energije (izražene u *MJ*) i ukupne mase vlage uklonjene iz materijala (izražene u *kg*) (2.5):

$$SEC = \frac{W}{m_w} \quad \left[\frac{MJ}{kg} \right] \quad (2.5)$$

Efikasnost sušare se može indirektno predstaviti brzinom izdvajanja vlage iz proizvoda, čime se ceo proces sušenja može podeliti na zone visoke, srednje i niske efikasnosti, *Prasertsan (1996a,b)*.

Upotreba *COP-a* (skraćeno od *eng. Coefficient of performance*) je uobičajena samo prilikom razmatranja rada toplotne pumpe. Određivanje vrednosti *COP-a* ima smisla jedino u sistemima gde se posmatra samo učinak isparivača (kroz faktor hlađenja) ili samo učinak kondenzatora (kroz koeficijent grejanja). U *HPD* sistemima gde se i isparivač i kondenzator toplotne pumpe istovremeno koriste, *COP* se ne može jasno odrediti. U ovakvim slučajevima je u analizama efikasnosti rada sistema sušenja pogodnije koristiti pokazatelje *SMER* i *SEC*, kojima se obuhvata rad celog sistema sušenja.

Pojedina istraživanja *HPD* sistema sušenja ukazuju na težnju da se ova tehnologija dalje unapređuje i razvija i pored toga što se radi o energetske efikasnoj tehnologiji sušenja. Tako na primer, kao izvor toplote se često koristi sunčeva energija koja se prikuplja kolektorima i dalje koristi za dogrevanje vazduha u sušari ili predaje isparivaču toplotne pumpe, *Zafri (2007), Hawlader (2008), Fadhel (2011b)*.

HPD sistemi se posmatraju sa aspekta povećanja energetske efikasnosti, zaštite životne sredine, kvaliteta osušenog proizvoda i slično, prvenstveno na nivou energetskih bilansa i tokova sirovina. Nedostatak fundamentalnijeg pristupa u istraživanjima prisutnih procesa i pojava, dovodi i do nedostatka konkretnih podataka iz ove oblasti i potrebe za dodatnim istraživanjima. Stoga, radi dobijanja pouzdanih podataka, koji bi neposredno ili posredno doprineli razumevanju fundamentalnih termomehaničkih procesa i pojava, neophodno je uraditi sopstvena teorijska i eksperimentalna istraživanja.

Kao predmet izučavanja izabrano je istraživanje termomehaničkih procesa pri sušenju prehrambenih materijala u sistemima sa recirkulacijom vazduha. Prehrambeni

materijali su odabrani zbog pogodnosti svojih fizičko-mehaničkih osobina za sušenje ovom tehnologijom sušenja i mogućnosti oblikovanja na geometrije pogodne za ispitivanje. Razumevanje procesa i pojava koje se odvijaju prilikom rada *HPD* sistema je od značaja za njegovu analizu i optimizaciju. U istraživanju će se koristiti tri različita materijala (jabuka, krompir i banana) kako bi se ispitali uticaji raznolikosti osobina materijala i njihove geometrije na kinetiku procesa sušenja. U tom cilju napraviće se fizičko-matematički modeli procesa. Osmisliće se i napraviti eksperimentalna instalacija koja će imati mogućnost regulisanja parametara sušenja kontrolom termomehaničkih osobina vlažnog vazduha. U cilju verifikacije dobijenih rezultata modela izvršiće se poređenje sa rezultatima sopstvenog eksperimentalnog istraživanja i rezultatima istraživanja drugih autora. Na osnovu rezultata teorijskog i eksperimentalnog istraživanja analiziraće se rad kompletnog sistema sušenja i mogućnosti njegove optimizacije u smislu povećanja energetske efikasnosti i smanjenja specifične potrošnje energije po količini uklonjene vlage.

3. TEORIJSKO ISTRAŽIVANJE I MODELIRANJE PROCESA

3.1. Definisanje matematičkog modela konvektivnog sušenja prehrambenih materijala u tankom sloju

Na osnovu celokupnog uvida u do sada sprovedena teorijska istraživanja drugih autora u ovom delu teksta disertacije će biti definisane potrebne jednačine matematičkog modela koje će opisati fenomene prenosa toplote i supstancije pri konvektivnom sušenju materijala u tankom sloju. Analitičko proučavanje procesa kretanja vlage u tankom sloju konvektivno sušenog materijala vrlo je složeno, imajući u vidu broj i raznorodnost osnovnih mehanizama prostiranja toplote i supstancije. U posmatranom slučaju konvektivnog sušenja vlažnog materijala nosilac potrebne energije je vlažan vazduh. Mehanizmi prostiranja toplote i prenošenje vlage pri dominaciji spoljašnjih i unutrašnjih otpora određivaće brzinu prenošenja vlage sa materijala u okolnu sredinu. Međutim, i pored toga što jednačine podležu osnovnim zakonima održanja mase, impulsa i energije, njihovo analitičko rešavanje otežava nemogućnost nezavisnog određivanja brojnih termofizičkih parametara zastupljenih u izrazima koji opisuju posmatrane mikroprocese. Kada bi ove parametre i bilo moguće odrediti, postavlja se suštinski problem njihove promenljivosti usled nehomogenosti i anizotropije materijala i problem njihove zavisnosti od polja temperature, vlažnosti i ukupnog pritiska, od drugih mikrokretanja, kao i međusobnih zavisnosti pojedinih parametara, *Antonijević (1999)*.

U literaturi je prihvaćen pristup koji je na principima nepovratnih termodinamičkih procesa postavio *Лыков (1968)*. Pristup se bazira na ideji da se pojedini mehanizmi prenošenja ne proučavaju zasebno već da se pažnja posveti samo ukupnim efektima izazvanim gradijentima odgovarajućih potencijala prenošenja koji se javljaju kod konvektivnog sušenja. Matematički model je u osnovi predstavljen sistemom parcijalnih diferencijalnih jednačina (3.1), (3.2) i (3.3) koje predstavljaju polaznu osnovu za dalju analizu,

$$\frac{\partial M}{\partial \tau} = K_{11} \nabla^2 M + K_{12} \nabla^2 T + K_{13} \nabla^2 P \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = K_{21} \nabla^2 M + K_{22} \nabla^2 T + K_{23} \nabla^2 P \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = K_{31} \nabla^2 M + K_{32} \nabla^2 T + K_{33} \nabla^2 P \quad (3.3)$$

gde su $K_{i,j} = 1, 2, 3$; fenomenološki koeficijenti (**Prilog 9.1**) koji zavise od međusobne povezanosti veličina vlažnosti materijala, temperature i pritiska, *Гунзбурз (1973)*.

Za rešavanje navedenog sistema jednačina potrebno je definisati početne i granične uslove koji važe za prethodno pomenute periode zagrevanja materijala, konstantne brzine sušenja i opadajuće brzine sušenja. Imajući u vidu to da se u ovoj disertaciji razmatra sušenje materijala u tankom sloju, kao i to da su posmatrani režimi sušenja niskotemperaturni, sa temperaturama koje su po vrednostima bliske temperaturama na kojima se materijal nalazi pri unosu u komoru za sušenje, onda se sa dovoljnom sigurnošću može smatrati da je period zagrevanja materijala dovoljno kratak da se može izostaviti iz razmatranja. Zanemarivanje perioda zagrevanja materijala bitno ne utiče na tačnost dobijenih rezultata i predstavlja uobičajeni pristup u literaturi, ukoliko se posmatra sušenje materijala u tankom sloju, *Sacilik (2006)*, *Doymaz (2009)*, *Seiidlou (2010)*, *Singh (2011)*, *Fadhel (2011a)*. Preostala dva perioda će biti detaljnije razmotrena u nastavku teksta.

Postojanje gradijenta ukupnog pritiska u materijalu može izazvati hidrodinamička i filtraciona kretanja parne i tečne vlage. Prisustvo gradijenta ukupnog pritiska u vlažnom materijalu je moguće i na temperaturama koje ne obezbeđuju proključavanje vlage u materijalu, međutim, u tom slučaju je njegova vrednost znatno niža. Imajući u vidu da je ovo istraživanje usmereno na procese konvektivnog sušenja na temperaturama znatno nižim ($\leq +55^\circ\text{C}$) od temperature ključanja vlage u materijalu, kretanja vlage izazvana gradijentom ukupnog pritiska će biti zanemarena (3.4) i izostavljena iz analize. Ovakav pristup je prisutan i u istraživanjima drugih autora, od kojih većina smatra da se gradijent ukupnog pritiska u potpunosti gubi na temperaturama nižim od $+85^\circ\text{C}$, pri atmosferskom pritisku okoline, *Antonijević (1999)*.

$$\text{Uslov 1} \rightarrow \nabla P = 0 \quad (3.4)$$

Posledica postavljenog uslova (3.4) je izostavljanje jednačine prenošenja impulsa (3.3) iz razmatranja. Uslov (3.4) istovremeno pojednostavljuje i oblike diferencijalnih

jednačina za prenos toplote (3.2) i vlage (3.1) u vlažnom materijalu, pri čemu se one transformišu u jednačine (3.5) i (3.6) sledstveno.

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\lambda_m}{c_m \rho_m} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \varepsilon \frac{r_w}{c_m} \frac{\partial M}{\partial \tau} \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial M}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial M}{\partial x} + k \delta \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (3.6)$$

U jednačini (3.5) se u drugom članu sa desne strane pojavljuje veličina ε koja se naziva koeficijent faznog prelaza i koji može imati vrednosti $0 \leq \varepsilon \leq 1$. Koeficijent faznog prelaza je u opštem slučaju funkcija oblika $\varepsilon = f(M, T)$ i pokazuje koliki je udeo vlage koja se kroz materijal prenosi u vidu pare. Ukoliko je $\varepsilon = 0$ vlaga se kroz materijal prenosi u obliku tečnosti (nema promene faze), dok ukoliko je $\varepsilon = 1$ vlaga se kreće u obliku pare. Na desnoj strani jednačine (3.6) u prvom članu figuriše gradijent vlažnosti ($\partial M / \partial x$), a u drugom članu gradijent temperature ($\partial T / \partial x$). Ukupan protok vlage kroz materijal je jednak zbiru protoka vlage izazvanog postojanjem gradijenta vlažnosti (izraženog preko koeficijenta vlagoprovodnosti k) i protoka vlage izazvanog postojanjem gradijenta temperature (izraženog preko koeficijenta termovlagoprovodnosti δ). U posmatranom slučaju konvektivnog sušenja materijala gradijent vlažnosti i gradijent temperature imaju suprotan smer, jer posmatrano u smeru od centra materijala ka spoljnoj površi, sadržaj vlage opada, a temperatura raste. Vlaga se unutar materijala kreće zahvaljujući vlagoprovodnosti, dok termovlagoprovodnost predstavlja dopunski otpor kretanju vlage, *Mariani (2008), Čažlar (2009)*.

U klasičnoj teoriji sušenja uobičajena je pretpostavka o nepromenljivosti termofizičkih parametara vlažnog materijala, tj. koeficijenata u odgovarajućim jednačinama matematičkog modela, tokom procesa. Oblik jednačina kojima se opisuju početni i granični uslovi tokom procesa, ostaje nepromenjen u odnosu na sistem sa varijabilnim koeficijentima, s tim što su sada termofizički koeficijenti nezavisni od temperature i vlažnosti na pojedinim rastojanjima od grejne površi tokom procesa, *Antonijević (1999)*. Ovakvim pojednostavljenjem se sistem jednačina (3.5) i (3.6) svodi na oblik (3.7) i (3.8) sledstveno.

$$q(\tau) = \lambda_m \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) + r_w (1 - \varepsilon) \cdot M(\tau) \quad (3.7)$$

$$M(\tau) = -k\rho_m \frac{\partial M}{\partial x} - k\rho_m \delta \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.8)$$

Jednačina (3.8) predstavlja osnovni zakon kretanja vlage u materijalu i može se napisati i u obliku (3.9),

$$M(\tau) = -k\rho_m \left(1 - \delta \frac{\partial T}{\partial M}\right) \frac{\partial M}{\partial x} \quad (3.9)$$

gde količnik $\partial T/\partial M$ predstavlja parcijalni izvod temperature materijala po vlažnosti u datoj tački materijala (tzv. temperaturni koeficijent sušenja).

Može se pokazati da je tokom čitavog perioda konstantne brzine sušenja, vrednost koeficijenta faznog prelaza jednaka nuli (3.10), što za posledicu ima to da je temperatura površi površine materijala nepromenljiva i jednaka je temperaturi po vlažnom termometru, *Лыков (1968)*.

$$Uslov 2 \rightarrow \varepsilon = 0 \quad (3.10)$$

Imajući u vidu da se razmatra sušenje materijala u tankom sloju, može se smatrati da će se srednja temperatura vlažnog materijala i temperatura po vlažnom termometru veoma brzo izjednačiti, pa se postojanje gradijenta temperature u materijalu može zanemariti (3.11), a samim tim i termovlagoprovodnost (3.12), *Erdođdu (2008)*.

$$Uslov 3 \rightarrow \partial T/\partial x = 0 \quad (3.11)$$

$$Uslov 4 \rightarrow \delta = 0 \quad (3.12)$$

Granični uslovi postavljeni izrazima (3.10), (3.11) i (3.12) se veoma često primenjuju u istraživanjima koja se bave sušenjem materijala u tankom sloju, *Keey (2000)*, *Hadrich (2009)*. Stoga, uzimajući u obzir postavljene granične uslove, jednačine (3.7) i (3.8) se transformišu u oblike (3.13) i (3.14) sledstveno.

$$q(\tau) = r_w \cdot M(\tau) \quad (3.13)$$

$$M(\tau) = -k\rho_m \frac{\partial M}{\partial x} \quad (3.14)$$

Jednačina (3.13) pokazuje da se tokom čitavog perioda konstantne brzine sušenja, toplotni protok koji vlažan vazduh predaje materijalu troši samo na isparavanje vlage iz vlažnog materijala (3.15).

$$\dot{Q} = -m_{sm} \cdot r_w \cdot \frac{dM}{d\tau} \quad (3.15)$$

Brzina sušenja DR (skraćeno od eng. *Drying rate*) se može odrediti metodom grafičkog diferenciranja, kao tangens ugla tangente na krivu sušenja u bilo kojoj tački (3.16), *Giner (2009)*.

$$DR = \frac{dM}{d\tau} = tg\gamma \quad (3.16)$$

Za razliku od prethodno razmatranog perioda konstantne brzine sušenja, tokom perioda opadajuće brzine sušenja (3.17) na kinetiku sušenja najviše utiču unutrašnji otpori kretanju vlage kroz materijal, *Puyate (2006)*.

$$Uslov\ 5 \rightarrow DR \neq const. \quad (3.17)$$

Tokom perioda opadajuće brzine sušenja zona isparavanja vlage se premešta sa površine materijala postepeno ka centralnim slojevima materijala. U tom slučaju je sve veća količina vlage koja se kroz materijal prenosi u obliku pare (3.18), tako da se iz jednačine (3.5) dobija diferencijalna jednačina provođenja toplote (*Fourier*-ova jednačina) (3.19),

$$Uslov\ 6 \rightarrow \varepsilon \rightarrow 1, \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = -a \cdot \nabla^2 T, \quad (3.19)$$

gde veličina a predstavlja koeficijent toplotne difuzivnosti. Na sličan način, uzimajući u obzir prethodno postavljen granični uslov (3.12), jednačina (3.6) se transformiše u diferencijalnu jednačinu provođenja vlage (3.20).

$$\frac{\partial M}{\partial \tau} = k \cdot \nabla^2 M \quad (3.20)$$

U fizičkim zakonitostima prenosa toplote i supstancije javlja se velika analogija, što se i može primetiti upoređivanjem jednačina (3.19) i (3.20).

U literaturi je prihvaćen pristup kojim se *Fick*-ov zakon, iako u principu važi samo za molekulska difuziju, primenjuje formalno u slučaju kada se supstanca transportuje kombinovanim mehanizmima prenosa, pri čemu se u tom slučaju u izrazu za *Fick*-ov zakon (3.21), umesto koeficijenta molekulske difuzije, uvodi tzv. efektivni koeficijent difuzije D_{eff} .

$$\frac{\partial M}{\partial \tau} = D_{eff} \nabla^2 M \quad (3.21)$$

Imajući u vidu svu složenost istovremenog odvijanja procesa prenosa toplote i supstancije tokom sušenja vlažnog materijala, a u odsustvu univerzalnog načina za opisivanje mehanizama kretanja vlage u materijalu koji se suši, veliki broj sprovedenih istraživanja se upravo bazira na jednačini (3.21) i primeni efektivnog koeficijenta difuzije, *Chen (2008), Janjai (2010), Taheri-Garavand (2011)*. Uvođenjem efektivnog koeficijenta difuzije objedinjuju se različite kombinacije mogućih mehanizama prenošenja vlage u materijalu kao što su: difuzija vlage u tečnom obliku usled postojanja gradijenta koncentracije i kapilarnih sila, difuzija vlage u parnom obliku usled postojanja gradijenta pritiska i skupljanja materijala, difuzija vlage u tečnom i parnom obliku usled postojanja diferencijalnog pritiska izazvanog spoljašnjim pritiskom i temperaturom, efekti isparavanja ili kondenzacije izazvani temperaturnim razlikama, prenošenje vlage u materijalu usled dejstva gravitacionih sila i slično, *Gavrila (2008)*.

U zavisnosti od geometrijskog oblika vlažnog materijala zavisice i oblik diferencijalne jednačine prenosa vlage kroz taj materijal, u smislu izbora koordinatnog sistema u kome je opisivanje procesa prenosa pogodnije, *Crank (1975)*. U slučaju pogodnijeg prikazivanja geometrije materijala u *Descartes*-ovom pravouglom koordinatnom sistemu primenjivaće se jednačina oblika (3.22), odnosno oblika (3.23) ukoliko je geometriju materijala pogodnije opisati cilindričnim koordinatama, *Kaya (2007), Fernando (2011)*.

$$\frac{\partial M}{\partial \tau} = D_{eff} \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \right) \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial M}{\partial \tau} = \left(\frac{D_r}{r} \right) \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial M}{\partial r} \right) + \left(\frac{D_\varphi}{r^2} \right) \cdot \left(\frac{\partial^2 M}{\partial \varphi^2} \right) + D_z \cdot \left(\frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \right) \quad (3.23)$$

Jednačina bilansa mase u procesu sušenja bazira se na činjenici da je količina vlage koja iz materijala ispari jednaka je količini vlage koju vlažan vazduh u sebe primi. U slučaju uniformne raspodele vlage duž elementarne zone (**Slika 3.1.1**) jednačina bilansa mase će imati oblik (3.24), *Keey (1972)*.

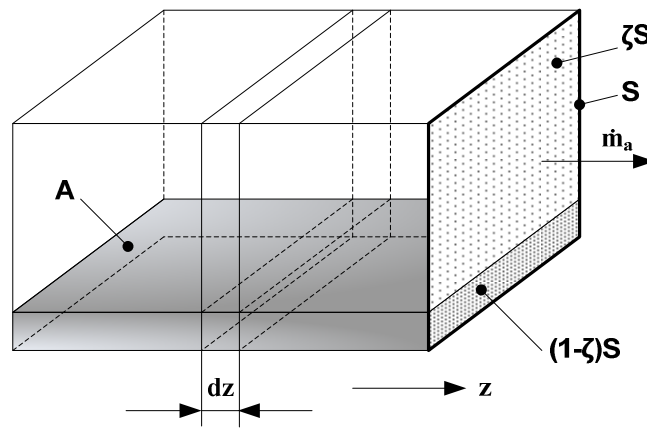
$$\frac{\partial}{\partial \tau} (M \cdot \rho_m \cdot (1 - \zeta) S \cdot dz) = \frac{\partial}{\partial z} \left(x_a \cdot \frac{\dot{m}_a}{A} \cdot \zeta S \cdot dz \right) + \frac{\partial}{\partial \tau} (x_a \cdot \rho_a \cdot \zeta S \cdot dz) \quad (3.24)$$

Pod pretpostavkama da je materijal homogen, a strujanje vlažnog vazduha uniformno, stacionarno (3.25) i ravnomerno (3.26), jednačina (3.24) se transformiše u (3.27):

$$\text{Uslov 7} \rightarrow \dot{m}_a = \text{const.} \quad (3.25)$$

$$\text{Uslov 8} \rightarrow \dot{m}_a/A = \text{const.} \quad (3.26)$$

$$\rho_m \cdot (1-\zeta) \frac{\partial M}{\partial \tau} = \zeta \left[\frac{\dot{m}_a}{A} \cdot \frac{\partial x_a}{\partial z} + \rho_a \frac{\partial x_a}{\partial \tau} \right] \quad (3.27)$$



Slika 3.1.1 Maseni bilans procesa sušenja, *Keey (1972)*

Imajući u vidu to da se u ovom istraživanju razmatra proces konvektivnog sušenja vlažnog materijala, tokom koga vlažan vazduh intenzivno struji preko materijala, odnos veličina $(\dot{m}_a/A)/\rho_a \approx 10^4$ predstavlja veliki broj, tako da se drugi član sa desne strane jednačine (3.27), koji opisuje promenu apsolutne vlažnosti vazduha u vremenu, može zanemariti (3.28), čime se jednačina (3.27) transformiše u (3.29).

$$\text{Uslov 9} \rightarrow \partial x_a / \partial \tau = 0 \quad (3.28)$$

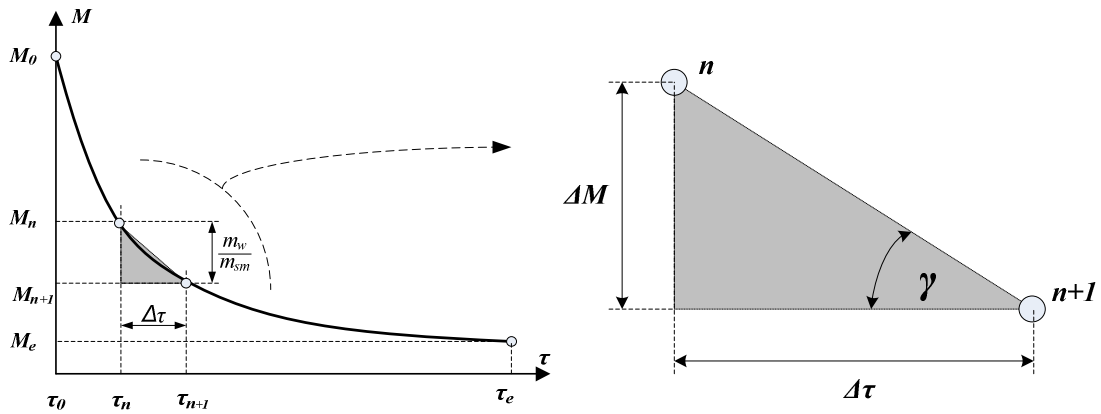
$$\frac{\partial M}{\partial \tau} = \frac{\zeta}{(1-\zeta)} \cdot \frac{\dot{m}_a}{\rho_m A} \cdot \frac{\partial x_a}{\partial z} \quad (3.29)$$

Ovakav pristup u određivanju promene vlažnosti materijala praćenjem promene apsolutne vlažnosti vlažnog vazduha pri opstrujavanju materijala (3.29), prisutan je u velikom broju istraživanja, *Barati (2011), Defraeye (2012a,b)*.

3.2 Numerički postupak rešavanja jednačina modela

Jednačinu (3.29) nije moguće rešiti analitički, međutim, numeričko rešavanje ove jednačine je moguće praćenjem promene mase vlage koja je u odgovarajućem vremenskom periodu uklonjena iz vlažnog materijala, što se može izvesti na dva načina.

Prvi način podrazumeva kontinualno praćenje promene mase materijala, odnosno srednje vlažnosti materijala, tokom procesa sušenja, a razlika izmerenih vrednosti u odgovarajućim trenutcima vremena predstavlja masu uklonjene vlage (3.30) u posmatranom vremenskom intervalu (Slika 3.2.1).



Slika 3.2.1 Promena srednje vlažnosti materijala (M) u vremenu

U odsustvu hemijskih reakcija, masa apsolutno suvog materijala ostaje nepromenjena tokom čitavog procesa sušenja tako da za suv materijal važi jednačina (3.31).

$$m_w = m_0 - m_e = m_{sm} \cdot (M_0 - M_e) \quad (3.30)$$

$$m_{sm} = m_0 / (1 + M_0) = m_e / (1 + M_e) \quad (3.31)$$

Masa apsolutno suvog materijala, koja figuriše u jednačini (3.31) utvrđuje se eksperimentalno.

Jednačine (3.30) i (3.31) se mogu iskoristiti za određivanje srednje vlažnosti materijala na početku (3.32) i na kraju (3.33) procesa sušenja, odnosno u bilo kom trenutku vremena tokom trajanja procesa sušenja (3.34).

$$M_0 = m_0 / m_{sm} - 1, \quad m(\tau_0) = m_0 \quad (3.32)$$

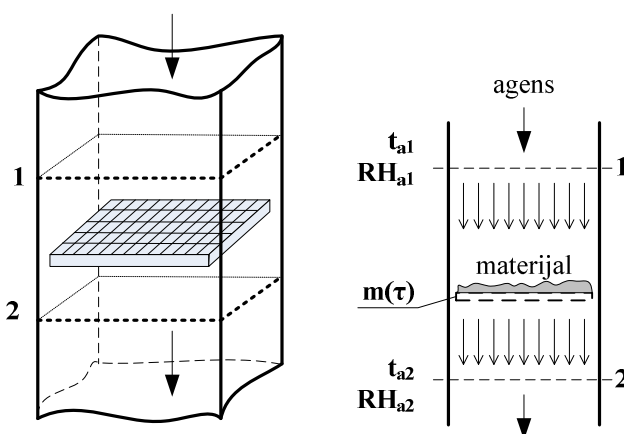
$$M_e = m_e / m_{sm} - 1, \quad m(\tau_e) = m_e \quad (3.33)$$

$$M_n = m(\tau_n)/m_{sm} - 1 \quad (3.34)$$

Izrazom (3.34) određuje se srednja vlažnost materijala u proizvoljnom trenutku vremena, pri čemu važi odnos $M_e < M_n < M_0$. Korišćenjem jednačine (3.34) uspostavlja se veza između mase materijala i srednje vlažnosti materijala, odakle proizilazi relacija (3.35).

$$m_w = m_n - m_{n+1} = m_{sm} \cdot (M_n - M_{n+1}) \quad (3.35)$$

Drugi način praćenja količine vlage koja je uklonjena iz materijala, zasniva se na činjenici da je ista količina vlage dospela u vlažan vazduh i uticala na povećanje njegove apsolutne vlažnosti (3.36), odnosno, merenjem promene vrednosti apsolutne vlažnosti vazduha na ulazu i izlazu iz komore u identičnim vremenskim intervalima (Slika 3.2.2).



Slika 3.2.2 Položaj kontrolnih preseka

Apsolutna vlažnost vazduha se najčešće određuje posredno (računski) na osnovu izmerenih vrednosti temperature i relativne vlažnosti vazduha (Prilog 9.2).

$$m_w = -m_a \cdot (x_{a,n} - x_{a,n+1}) \quad (3.36)$$

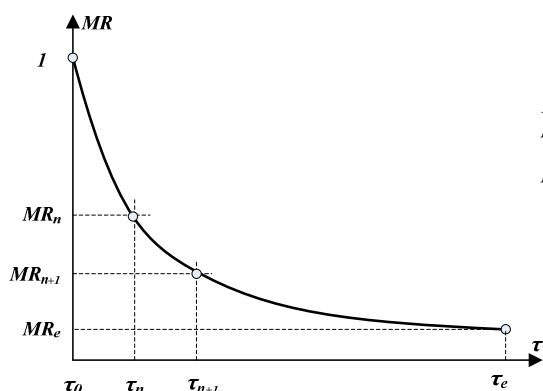
Izjednačavanjem jednačina (3.35) i (3.36), uspostavlja se matematička povezanost (3.37) između promene srednje vlažnosti materijala i apsolutne vlažnosti vazduha, a koju je numeričkim putem moguće rešiti.

$$m_{sm} \cdot (M_n - M_{n+1}) = -m_a \cdot (x_{a,n} - x_{a,n+1}) \quad (3.37)$$

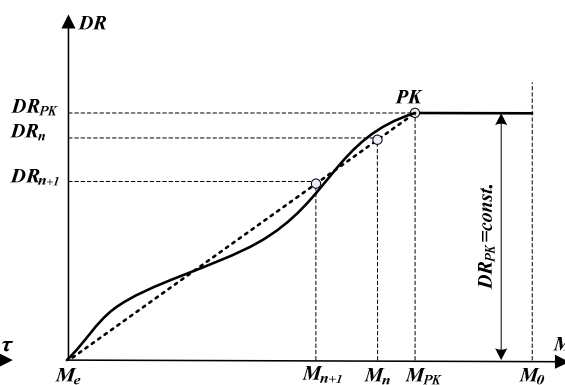
Kako bi se osigurala opštost rešenja i njihova primenljivost u različitim uslovima i za različite materijale, srednja vlažnost materijala se prikazuje u svom bezdimenzionom obliku (3.38).

$$MR_n = \frac{M_n - M_e}{M_0 - M_e} \quad (3.38)$$

Poznavanje matematičkog oblika jednačine (3.38), u obliku $MR = f(\tau)$, od suštinske je važnosti za formiranje osnovnih krivi sušenja (Slika 3.2.3), o čemu govore brojne matematičke formulacije proistekle iz istraživanja drugih autora (Tabela 2.2.1).



Slika 3.2.3 Promena srednje vlažnosti materijala u bezdimenzionom obliku tokom vremena



Slika 3.2.4 Veza između brzine sušenja i srednje vlažnosti materijala

Numeričkim rešavanjem jednačine (3.16), koristeći rezultate merenja o promeni srednje vlažnosti materijala tokom vremena, može se izračunati brzina sušenja (3.39),

$$DR = \frac{\Delta M}{\Delta \tau} = \frac{M_{n+1} - M_n}{\tau_n - \tau_{n+1}} \approx tg\gamma \quad (3.39)$$

gde je $tg\gamma$ koeficijent pravca tangente krive sušenja $M = f(\tau)$ (Slika 3.2.1).

Tokom perioda konstantne brzine sušenja vrednost $tg\gamma$ se ne menja, dok se u periodu opadajuće brzine sušenja brzina menja u zavisnosti od promene srednjeg sadržaja vlage u materijalu. Karakter ove promene je najčešće složenija funkcija koja se često aproksimira pravom linijom (Slika 3.2.4) i koja se sa pravom $DR_{PK} = const.$ seče u tzv. pseudokritičnoj tački (PK). Takođe, promenu srednje vlažnosti materijala koja figuriše u jednačini (3.39) moguće je odrediti iz jednačine (3.37) koristeći raspoložive rezultate merenja. Tokom perioda opadajuće brzine sušenja, a u skladu sa prethodno

uvedenim konceptom PK tačke, jednačina (3.39) se može napisati u obliku (3.40), **Лыков (1968)**

$$-\frac{dM}{d\tau} = K \cdot (M - M_e) \quad (3.40)$$

gde je sa K označen koeficijent sušenja koji zavisi od osobina vlažnog materijala i režima sušenja. Određivanje koeficijenta brzine sušenja se može izvršiti grafički (**Slika 3.2.4**) pri čemu se dobija zavisnost (3.41),

$$K = \chi \cdot DR_{PK} = \frac{1}{M_{PK} - M_e} \cdot DR_{PK} \quad (3.41)$$

gde je sa χ označen relativan koeficijent sušenja vlažnog materijala, koji predstavlja svojevrsnu vezu sa vrednošću brzine tokom perioda konstantne brzine sušenja. Uvrštanjem izraza (3.41) u jednačinu (3.40) dobija se oblik (3.42).

$$-\left(\frac{1}{DR_{PK}}\right) \frac{dM}{d\tau} = \frac{M - M_e}{M_{PK} - M_e} \quad (3.42)$$

Razmatrajući slučaj eksponencijalne zavisnosti promene srednje vlažnosti materijala, što je najčešći slučaj u literaturi (**Tabela 2.2.1**), numeričko rešavanje je moguće relacijom (3.43),

$$\frac{M_n - M_e}{M_{PK} - M_e} = \exp(-K \cdot \tau) \quad (3.43)$$

koja se može iskoristiti za određivanje koeficijenta sušenja jednačinom (3.44).

$$K = \frac{\ln\left(\frac{M_n - M_e}{M_{n+1} - M_e}\right)}{\tau_{n+1} - \tau_n} \quad (3.44)$$

Uvažavajući sve ranije navedene početne i granične uslove, diferencijalne jednačine prenošenja vlage kroz materijal (3.22) i (3.23) se mogu uprostiti i rešiti analitički. Na oblik rešenja u opštem slučaju utiču mehanizmi prenošenja vlage kroz materijal, izbor koordinatnog sistema, pravac i smer prenošenja vlage kroz materijal. Međutim, imajući u vidu da se svi mehanizmi prenošenja vlage obuhvataju jedinstvenim efektivnim koeficijentom difuzije D_{eff} , rešenja pomenutih diferencijalnih jednačina će zavisiti samo od pravca prostiranja vlage.

U slučaju posmatranja vlažnog materijala, čiji se oblik aproksimira geometrijom kocke (**Prilog 9.3**), srednja vlažnost materijala u bezdimenzionom obliku se može odrediti jednačinom (3.45), *Crank (1975)*, *Zogzas (1994)*, *Simal (1997)*.

$$MR = \frac{8^3}{\pi^6} \cdot \exp\left(-\frac{3\pi^2 D_{eff} \tau}{z^2}\right) \quad (3.45)$$

U slučaju posmatranja vlažnog materijala, čiji se oblik aproksimira geometrijom ravne ploče (**Prilog 9.3**), srednja vlažnost materijala u bezdimenzionom obliku se može odrediti jednačinom (3.46), *Crank (1975)*, *Akpinar (2003)*, *Aghbashlo (2009)*.

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \cdot \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} \tau}{4z^2}\right) \quad (3.46)$$

U slučaju posmatranja vlažnog materijala, čiji se oblik aproksimira geometrijom cilindra (**Prilog 9.3**), srednja vlažnost materijala u bezdimenzionom obliku se može odrediti jednačinom (3.47), *Crank (1975)*, *Fernando (2011)*.

$$MR = \left[\frac{4\pi}{\alpha_n^2} \cdot \exp\left(-\frac{D_r \alpha_n^2 \tau}{r^2}\right) \right] \cdot \left[\frac{8}{\pi^2} \cdot \exp\left(-\frac{D_z \pi^2 \tau}{4z^2}\right) \right], \quad (3.47)$$

gde su sa $\alpha_n = 2.4 + 3.13 \cdot (n-1)$, prema *Polyanin (2003)*, određeni pozitivni koreni *Bessel*-ovih funkcija koje se kao međukoraci javljaju prilikom rešavanja jednačina. Efektivni koeficijenti difuzije u radijalnom ili aksijalnom pravcu se mogu objediniti zajedničkim efektivnim koeficijentom difuzije prema jednačini (3.48).

$$D_{eff} = D_z + \left(\frac{2D_r}{\pi^2 r^2} \right) \cdot z^2 \quad (3.48)$$

Zahvaljujući tome što je promena bezdimenzionog sadržaja vlage u materijalu najčešće eksponencijalna funkcija, efektivni koeficijent difuzije se iz jednačina (3.46) i (3.47) može odrediti jednostavnom grafo-analičkom metodom. Ovakav pristup se primenjuje u velikom broju istraživanja drugih autora (**Tabela 2.2.1**). Metoda podrazumeva logaritmovanje (prirodnim logaritmom) leve i desne strane jednačina (3.46) i (3.47) pri čemu se dobijaju (3.49) i (3.50) sledstveno,

$$\ln MR = \ln \frac{M_n - M_e}{M_0 - M_e} = \ln \frac{8^3}{\pi^6} + \left(-\frac{3\pi^2 D_{eff}}{z^2} \right) \cdot \tau_n = C_1 + K_1 \cdot \tau_n \quad (3.49)$$

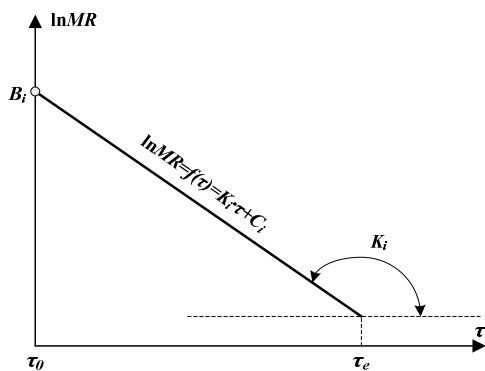
$$\ln MR = \ln \frac{M_n - M_e}{M_0 - M_e} = \ln \frac{8}{\pi^2} + \left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{4z^2} \right) \cdot \tau_n = C_2 + K_2 \cdot \tau_n \quad (3.50)$$

gde su K_1, K_2 koeficijenti pravca prave, a C_1, C_2 konstante linearne funkcije oblika $\ln MR = K \cdot \tau + C$ (Slika 3.2.5).

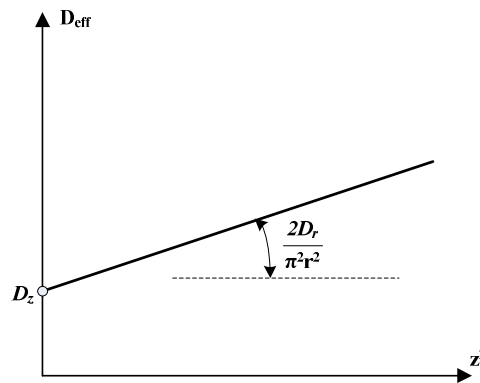
Efektivni koeficijenti difuzije se dalje mogu odrediti na osnovu prethodno određenog koeficijenta pravca prave, tako da će u slučaju oblika materijala aproksimiranog geometrijom kocke i ravne ploče on biti određen iz jednačina (3.51) i (3.52) sledstveno.

$$D_{eff} = -\frac{K_1 \cdot z^2}{3\pi^2} \quad (3.51)$$

$$D_{eff} = -\frac{K_2 \cdot 4z^2}{\pi^2} \quad (3.52)$$



Slika 3.2.5 Logaritamska promena bezdimenzionog sadržaja vlage u vremenu za posmatrani i -ti eksperiment



Slika 3.2.6 Grafički prikaz međusobne povezanosti koeficijenata difuzije vlage u radijalnom i aksi-jalnom pravcu u slučaju geometrije cilindra

U slučaju kada se oblik materijala aproksimira geometrijom cilindra, efektivni koeficijenti difuzije se posebnim postupkom može odrediti iz jednačine (3.48). Postupak se sastoji u formiranju linearne funkcije (Slika 3.2.6) oblika $D_{eff} = f(D_r) \cdot z^2 + D_z$, pod pretpostavkama da se prenošenje vlage u radijalnom pravcu može zanemariti i da efektivni koeficijent difuzije zavisi samo od prenošenja vlage u aksijalnom pravcu, *Fernando (2011)*.

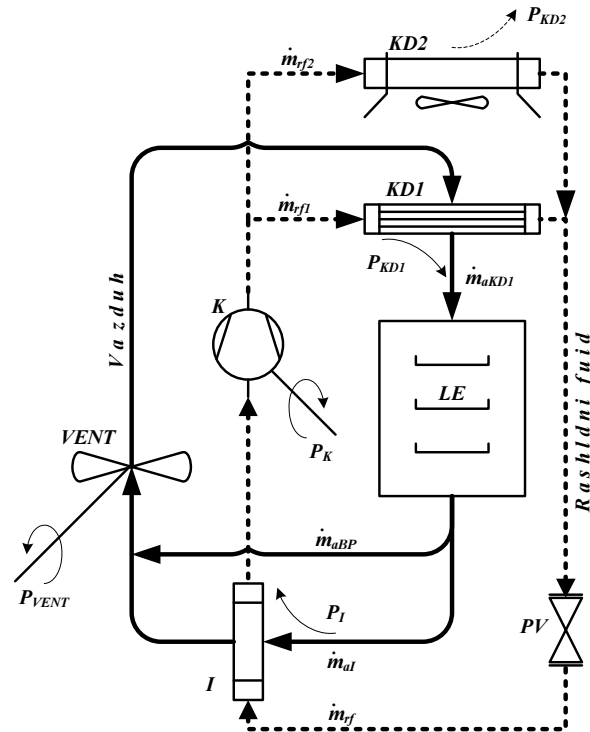
3.3. Teorijska istraživanja HPD sistema sušenja

3.3.1 Komponente HPD sistema

Na osnovu do sada sprovedenih teorijskih istraživanja HPD sistema drugih autora, a u skladu sa postavljenim zadacima i ciljevima istraživanja u ovoj disertaciji, usvojen je koncept funkcionalne šeme HPD sistema sušenja (Slika 3.3.1) koji predstavlja polaznu osnovu za dalja razmatranja. Komponente HPD sistema su odabrane i pozicionirane u skladu sa preporukama iz literature, Teeboonma (2003), Oktay (2003), Minea (2010, 2012a,b).

U daljem tekstu će zasebno biti postavljene i razmotrene osnovne jednačine bilansa mase i energije svake komponente HPD sistema.

Uzimajući u obzir promenu apsolutne vlažnosti vlažnog vazduha pri prolasku kroz isparivač, pomoću jednačine bilansa mase (3.53) može se odrediti količina vlage koja se kondenzovala na površini isparivača, Pal (2008b). Količina toplote koju struja vlažnog vazduha preda isparivaču troši se na isparavanje odgovarajuće količine rashladnog



Slika 3.3.1 Funkcionalna šema HPD sistema

fluida unutar isparivača i na kondenzovanje odgovarajuće količine vlage na površini isparivača. Snagu isparivača je moguće odrediti iz jednačine energetskog bilansa (3.54).

$$\dot{m}_{wF} = \dot{m}_{a2} \cdot (x_{a2} - x_{a4}) \quad (3.53)$$

$$P_I = \dot{m}_{a2} (h_{a2} - h_{a4}) - \dot{m}_{wF} h_{wF} = \dot{m}_{rf} (h_{rfD} - h_{rfC}) \quad (3.54)$$

$$\dot{m}_{rf} = \frac{P_I}{q_1} = \frac{P_I}{(h_{rfD} - h_{rfC})} \quad (3.55)$$

U slučaju raspoloživih podataka o promeni stanja 2→4 vlažnog vazduha pri prolasku preko površine isparivača, levu stranu jednačine (3.54) je moguće eksplicitno rešiti. Potreban maseni protok rashladnog fluida se može izračunati iz jednačine (3.55).

Obzirom na to da se vrednost apsolutne vlažnosti vazduha na ulazu u isparivač menja tokom vremena, potrebna snaga isparivača će takođe biti promenljiva veličina u vremenu $P_I = f(\tau)$, a samim tim će i potreban maseni protok fluida $\dot{m}_{rf} = f(\tau)$ varirati u vremenu. Snaga kompresora se može odrediti i iz (3.56) na osnovu promene specifične entalpije rashladnog fluida u procesu kompresije.

$$P_K = \dot{m}_{rf} \cdot w_K = \dot{m}_{rf} \cdot (h_{rfA} - h_{rfD}) \quad (3.56)$$

Promena masenog protoka rashladnog fluida u vremenu $\dot{m}_{rf} = f(\tau)$, uticaće i na Promenu potrebne snage kompresora $P_K = f(\tau)$. To znači da će na početku procesa sušenja, kada je potreba za rashladnim fluidom najveća, potrebna snaga kompresora biti najveća, a samim tim i potrošnja energije najveća. Tokom vremena, sa opadanjem količine izdvojene vlage opadaće i potrebna snaga kompresora.

U skladu sa h - s dijagramom (Slika 2.2.4b), specifična količina toplote odvedena u procesu kondenzacije se može odrediti (3.57) kao zbir specifične količine toplote isparavanja i specifičnog tehničkog rada utrošenog u procesu kompresije, Teeboonma (2003). Deo toplote kondenzacije (3.58) se vraća u proces sušenja preko primarnog kondenzatora $KD1$ čime se ostavruje rekuperacija količine toplote koja je iz sušare odvedena isparivačem.

$$q_{KD} = q_I + w_K = q_{KD1} + q_{KD2} \quad (3.57)$$

$$P_{KD1} = \dot{m}_{a5} (h_{a1} - h_{a5}) = \dot{m}_{a5} (c_{pa} + x_{a1} c_{p_p}) \cdot (T_{a1} - T_{a5}) \quad (3.58)$$

$$P_{KD1} = \dot{m}_{rf1} \cdot q_{KD1} = q_{KD1} \cdot (h_{rfB} - h_{rfA}) \quad (3.59)$$

$$P_{KD2} = P_I + P_K - P_{KD1} \quad (3.60)$$

Potreban maseni protok rashladnog fluida u primarnom kondenzatoru $KD1$ (3.59) je promenljiv u vremenu i zavisi od količine toplote koju je potrebno predati vlažnom vazduhu kako bi se on zagrejao do željene temperature. Preostala količina toplote kondenzacije predaje okolini posredstvom sekundarnog kondenzatora $KD2$ (3.60).

Ventilator sušare nije komponenta sistema toplotne pumpe, međutim, imajući u vidu da pojedini pokazatelji efikasnosti čitavog HPD sistema, kao što su to $SMER_{HPD}$, $HPDE$

i *MER*, uzimaju u obzir celokupnu potrošnju energije u procesu sušenja, ventilator se uzima u razmatranje.

$$P_{VENT} = \dot{V}_a \cdot P \quad (3.61)$$

Energija utrošena za rad ventilatora (3.61) zavisi od zapreminskog protoka vlažnog vazduha i potrebnog statičkog pritiska za savlađivanje otpora strujanja, *Pal (2008b)*.

3.3.2 Pokazatelji efikasnosti rada *HPD* sistema

Performanse *HPD* sistema sušenja mogu se pratiti i procenjivati pomoću nekoliko pokazatelja.

COP (skraćeno od eng. *Coefficient of performance*) - predstavlja efikasnosti rada kompresione rashladne mašine (3.61). U kontekstu rashladne mašine ovo bi bio faktor hlađenja (*COP*), odnosno, koeficijent grejanja (*COP_{HP}*) ukoliko se radi o toplotnoj pumpi. Prilikom analiziranja rada *HPD* sistema uobičajena je praksa korišćenja, tzv. koeficijenta grejanja toplotne pumpe proširenog na čitav sistem sušenja (*COP_{HPD}*), pri čemu se uz snagu kompresora računa i snaga ventilatora sušare (3.62). Ovakav pristup prisutan je u istraživanjima velikog broja autora, *Colak (2009a)*, *Goh (2011)*.

$$COP_{HP} = \frac{q_{KD}}{w_K} = \frac{q_I + w_K}{w_K} = \frac{q_I}{w_K} + 1 = COP + 1 \quad (3.61)$$

$$COP_{HPD} = \frac{P_{KD}}{P_K + P_{VENT}} \quad (3.62)$$

SMER (skraćeno od eng. *Specific moisture evaporation rate*) – predstavlja odnos (3.63) ukupne mase izdvojene vlage iz materijala i energije utrošene na kompresoru toplotne pumpe (prikazane u jedinicama kilovat-čas *kWh*), *Colak (2009a)*. U *HPD* sistemima koji rade u niskotemperaturnim režimima, preporučuje se uzimanje u obzir energije utrošene na rad ventilatora sušare, koja u tom slučaju nije zanemarljiva (3.64), *Kudra (2002)*.

$$SMER_{HP} = \frac{m_w}{P_K \cdot \Delta \tau_h}, \quad [kg/kWh] \quad (3.63)$$

$$SMER_{HPD} = \frac{m_w}{(P_K + P_{VENT}) \cdot \Delta \tau_h}, \quad [kg/kWh] \quad (3.64)$$

SEC (skraćeno od eng. *Specific energy consumption*) – predstavlja odnos (3.65) ukupne utrošene energije na kompresoru toplotne pumpe (prikazane u jedinicama *MJ/kg*) i ukupne mase vlage koja je izdvojena iz materijala, **Colak (2009a,b)**. **SEC** je veličina koja ima recipročnu vrednost u odnosu na **SMER** (pri čemu je $1 kWh = 3.6 MJ$) i često se koristi pri poređenju različitih tipova sušara.

$$SEC = \frac{1}{3.6} \cdot \frac{1}{SMER_{HP}}, \quad [MJ/kg] \quad (3.65)$$

Ukoliko se energija utrošena na rad ventilatora sušare ne zanemaruje, **SEC** zamenjuje veličina **HPDE** (skraćeno od eng. *Heat pump dryer efficiency*), koja se određuje iz jednačine (3.66).

$$HPDE = \frac{1}{3.6} \cdot \frac{1}{SMER_{HPD}}, \quad [MJ/kg] \quad (3.66)$$

MER (skraćeno od eng. *Moisture extraction rate*) – predstavlja odnos (3.67) ukupne utrošene energije u procesu sušenja i ukupne mase vlažnog materijala, **Braun (2002)**.

$$MER = \frac{(P_K + P_{VENT}) \cdot \Delta\tau_h}{m_w + m_{sm}}, \quad [kWh/kg] \quad (3.67)$$

Navedeni pokazatelji efikasnosti procesa sušenja biće korišćeni u daljim analizama efikasnosti rada **HPD** sistema u ovoj disertaciji.

Sprovedeno teorijsko istraživanje i matematičko modeliranje procesa opisano u prethodnim poglavljima predstavlja osnovu za dalje eksperimentalno istraživanje. Eksperimentalni rezultati biće opisani predstavljenim matematičkim formulacijama za unapred utvrđene parametre sušenja. Nepoznati parametri u jednačinama modela biće određeni tako da odstupanja rezultata modela od eksperimentalnih rezultata budu minimalna. Dobijene vrednosti rezultata pokazatelja efikasnosti procesa sušenja u **HPD** sistemima biće iskorišćene za poređenje sa rezultatima drugih autora čime će validnost sprovedenog istraživanja biti verifikovana.

4. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE

U cilju verifikacije postavljenih jednačina modela i određivanja nepoznatih parametara u modelu, osmišljeno je eksperimentalno istraživanje koje će obuhvatiti niz eksperimenata sprovedenih u kontrolisanim laboratorijskim uslovima.

U ovom poglavlju opisani su eksperimenti sprovedeni na posebno osmišljenoj i izrađenoj laboratorijskoj instalaciji. Eksperimenti imaju za cilj određivanje nepoznatih relevantnih parametara procesa, koji se jedino eksperimentalnim putem mogu odrediti. Kao agens sušenja u eksperimentima je korišćen vlažan vazduh. Prilikom izvođenja ovih eksperimenata vođeno je računa o standardima i normama koje važe prilikom eksperimentalnog određivanja ovih veličina, tačnosti dobijenih rezultata i veličini greške, ali je takođe i vođeno računa o opštosti dobijenih rezultata i njihovoj primeni kod drugih sličnih sistema.

Svi rezultati eksperimenata prikazani su tabelarno ili u funkcionalnoj zavisnosti, tako da se u najpogodnijem obliku mogu koristiti za dalju analizu.

4.1 Laboratorijska instalacija

U cilju sprovođenja eksperimenta sušenja osmišljena je i napravljena laboratorijska instalacija (**Slika 4.1.1**) za konvektivno sušenje. Osnovna ideja prilikom konstruisanja laboratorijske instalacije jeste ostvarivanje mogućnosti kontrole svih relevantnih parametara procesa i njihov monitoring tokom celokupnog perioda trajanja procesa sušenja. U cilju jednostavnije kontrole vrednosti relativne vlažnosti vazduha kao parametra procesa sušenja, usvojen je koncept rada laboratorijske instalacije sa potpunom recirkulacijom vlažnog vazduha.

Osnovne komponente koje čine laboratorijsku instalaciju (**Slika 4.1.1**) su:

- Komora za sušenje sa lesama (LE);
- Sistem vazdušnih kanala sa pripadajućim regulacionim elementima (KAN);
- Pogonski ventilator (VENT);
- Razmenjivači toplote (VG i VH);
- Postrojenja za pripremu hladne (RK) i tople vode (TK).



Slika 4.1.1 Fotografija laboratorijske instalacije

Radi jednostavnijeg načina merenja veličina koje se pojavljuju u jednačinama bilansa, razmenjivači toplote na laboratorijskoj instalaciji nisu isparivač i kondenzator, kako bi to inače bilo u *HPD* sistemu, već vodeni hladnjak vazduha i vodeni grejač vazduha. Razlog za ovakav pristup i ovakvo konstruktivno rešenje jeste mogućnost ostvarenja boljeg uvida u razmenjenu količinu toplote i jednostavnijeg merenja razmenjenih toplotnih protoka, kao i jednostavnija regulacija vodenog sistema u odnosu na freonski sistem.

Na osnovu poznatih vrednosti masenog protoka vode i promene temperature vode (ulaz/izlaz) pri prolasku kroz razmenjivač toplote, moguće je odrediti veličinu ogovarajućih toplotnih protoka, odnosno snagu razmenjivača. Ovakav način određivanja potrebne snage razmenjivača je daleko jednostavniji nego što bi to bio slučaj sa

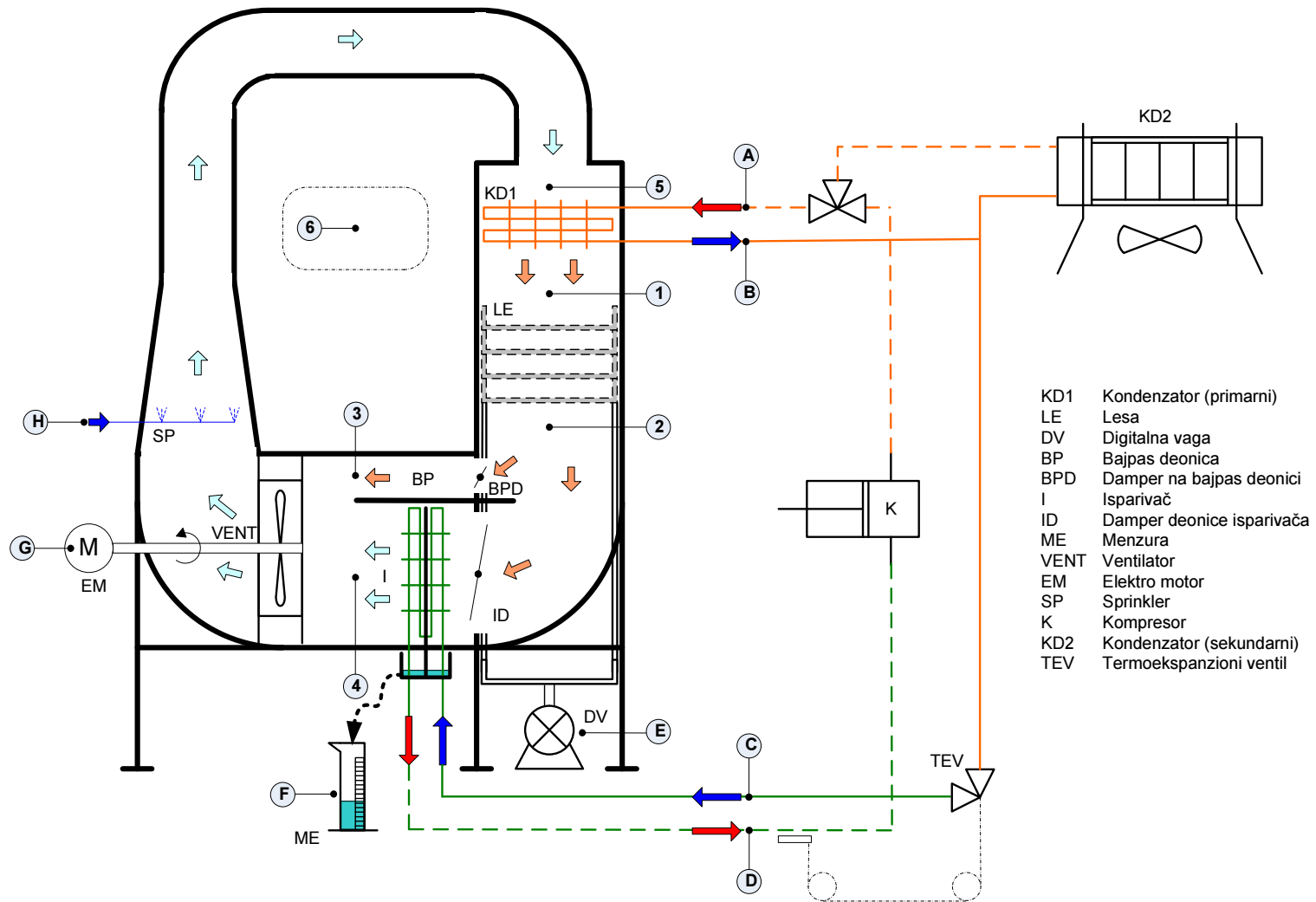
isparivačem (kondenzatorom) kada bi se morala određivati količina rashladnog fluida koji isparava (kondenzuje se). Stoga, umesto da je laboratorijska instalacija imala oblik *HPD* sistema (**Slika 4.1.2**) prema konceptu opisanom u prethodnom poglavlju (**Slika 3.3.1**), ona je osmišljena na taj način da se vodenim hladnjakom simulira rad isparivača, a vodenim grejačem simulira rad kondenzatora toplotne pumpe (**Slika 4.1.3**). To znači da će podaci o opterećenju hladnjaka i grejača biti iskorišćeni kao podaci o potrebnim snagama isparivača i kondenzatora, odnosno ulazni podaci u numeričkoj softverskoj simulaciji rada sistema toplotne pumpe, iz koje će se dobiti ostale nepoznate veličine koje su od značaja za dalje razmatranje.

Brojčanim oznakama (Poz. 1 do 5 na **Slici 4.1.3**) označene su pozicije na kojima se vrši merenje temperature i relativne vlažnosti vazdušne struje kao i brzine strujanja vazduha. Takođe, predviđeno je i merenje temperature i relativne vlažnosti ambijentalnog vlažnog vazduha (Poz. 6 na **Slici 4.1.3**). Slovnim oznakama (Poz. A do H na **Slici 4.1.3**) označene su pozicije na kojima je izvršeno merenje veličina vezanih za kontrolu rada pojedinih komponenata instalacije i to na pozicijama:

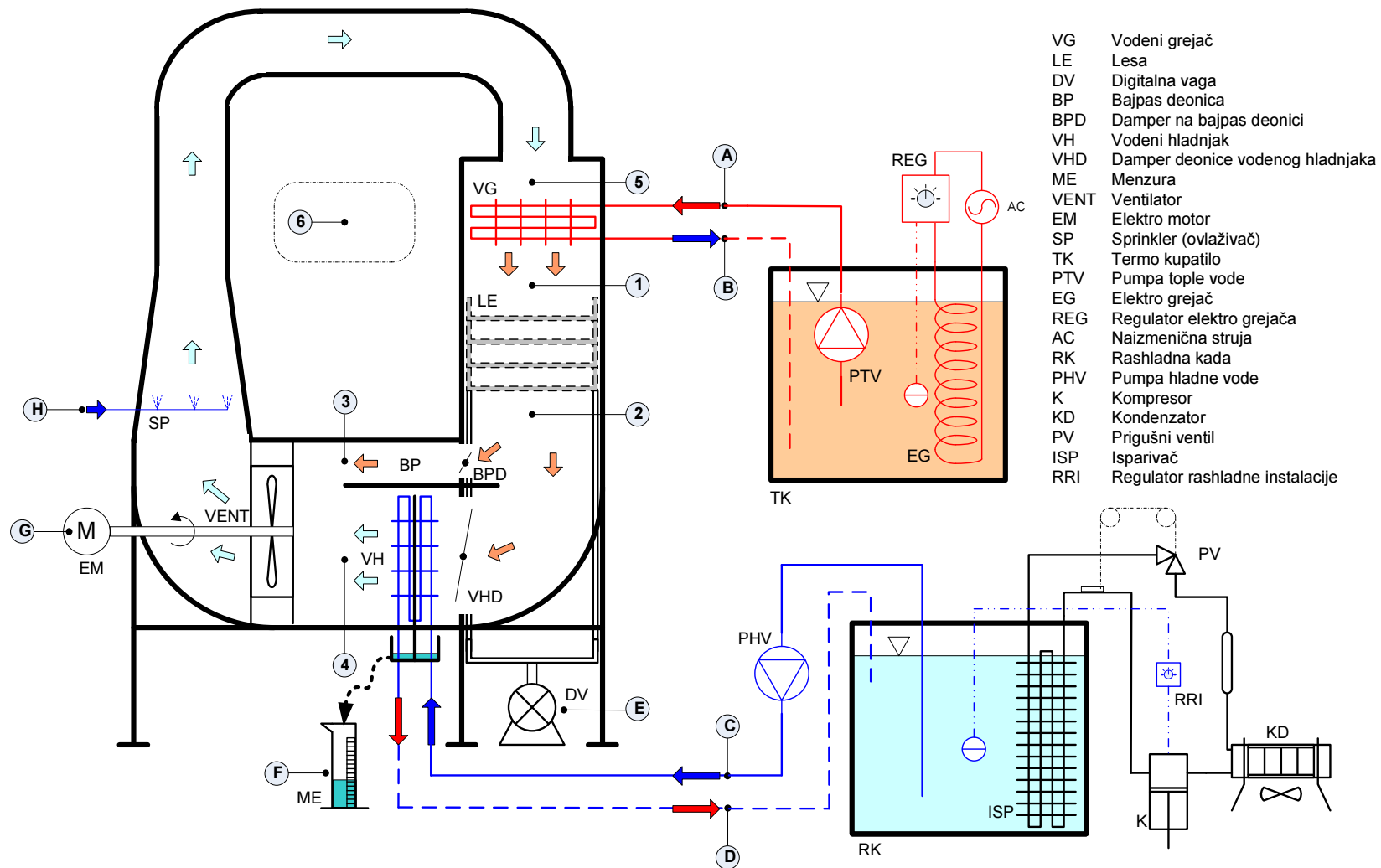
- A, B, C i D - temperature i protoci vode na ulazu/izlazu iz VG i VH;
- E - trenutna masa proizvoda na lesi;
- F – zapremina izdvojene vode;
- G – parametri rada el.motora;
- H – zapremina dodate vode.

U eksperimentima su korišćeni kanalski i ručni merni instrumenti visoke tačnosti. Osnovne karakteristike korišćenih instrumenata su navedene u **Prilogu 9.4**. Oznake mernih mesta navedene u **Tabeli 9.4.1** prikazanoj u **Prilogu 9.4**, usklađene su sa **Slikom 4.1.3** laboratorijske instalacije.

Pojedini merni instrumenti poseduju mogućnost samokalibracije mernih veličina, tako da su oni dalje korišćeni kao etalon za baždarenje ostalih instrumenata. Tačnost pokazivanja vrednosti temperature na digitalnim mernim instrumentima potvrđena laboratorijskim etalon-termometrom visoke tačnosti, dok je tačnost pokazivanja relativne vlažnosti vazduha na digitalnim mernim instrumentima potvrđena laboratorijskim *Assman*-ovim psihrometrom. Baždarenje instrumenata izvršeno je u laboratorijskim kontrolisanim uslovima.



Slika 4.1.2 Šema laboratorijske instalacije
 (koncept sa isparivačem i kondenzatorom toplotne pumpe)



Slika 4.1.3 Šema laboratorijske instalacije
(usvojen koncept sa vodenim hladnjakom i vodenim grejačem vazduha)

Laboratorijska instalacija (**Slika 4.1.3**) se sastoji od vertikalne i horizontalne kanalske sekcije (**Slika 4.1.4**) koje se međusobno nadovezuju jedna na drugu i u kojima su smeštene pojedine komponente sistema, i fleksibilnog kanala kojim se ostvaruje potpuna recirkulacija vazduha koji pokreće ventilator (VENT) sa frekventno regulisanim radom elektromotora (EM).



Slika 4.1.4 Fotografija kanalskog sistema instalacije sa prikazanim položajem lesa, ventilatora i elektro motra sa frekventnim regulatorom

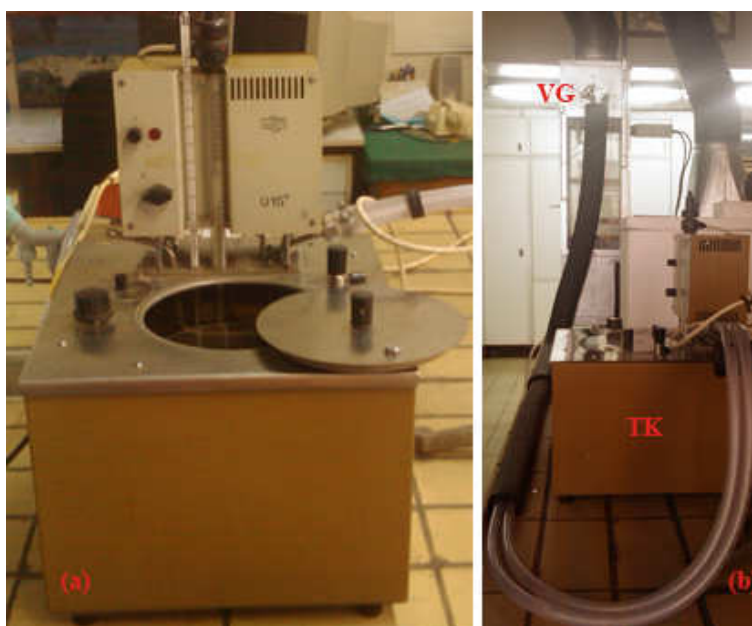
Vodeni grejač (VG) koji se koristi za zagrevanje vazduha pozicioniran je na samom vrhu vertikalne sekcije. Ispod njega su smeštene lese (LE) sa vlažnim materijalom (**Slika 4.1.4**), pri čemu lesa sa svojom dimenzijom od $240 \times 200 \text{ mm}$, zauzima čitav poprečni presek vertikalnog kanala. Instalacija ima mogućnost postavljanja maksimalno četiri lese istovremeno (u položaju jedna iznad druge), a u eksperimentima je korišćena samo jedna lesa, obzirom na to da se posmatra sušenje materijala u tankom sloju. Lese su smeštene na zajedničku konstrukciju koja se oslanja na digitalnu vagu (DV) smeštenu ispod instalacije na radnom stolu.

Vodeni hladnjak (VH) kojim se vazduh hladi je pozicioniran u horizontalnom kanalu neposredno ispod baj-pas (BP) kanala. Vлага kondenzovana na spoljnoj površi

vodenog hladnjaka se sliva u kadu smeštenu ispod hladnjaka, a potom crevom izbacuje iz sistema i prikuplja u graduisanoj menzuri (ME).

Ventilator (VENT) je postavljen na kraju horizontalne sekcije i obezbeđuje željeni protok vazduha u sušari. Broj obrtaja ventilatora reguliše se pomoću frekventnog regulatora rada elektro-motora (EM). Protok vazduha kroz baj-pas (BP) kanal i preko vodenog hladnjaka (VH) reguliše se ručno pomoću dva regulatora protoka (dampera) smeštena na deonici baj-pasa (BPD) i na deonici vodenog hladnjaka (VHD). Regulacija protoka obavlja se ručno, a način regulisanja zavisi od režima sušenja koji se želi postići.

Vodeni grejač (VG) koristi toplu vodu prethodno pripremljenu u ultra-termostatskom kupatilu (TK) proizvođača *MLW*, tip *U 15^C* (Slika 4.1.5a). U ovom kupatilu se voda zagreva električnim grejačem (EG) do željene temperature (max. 90°C) uz finu termostatsku kontrolu (REG) temperature vode sa tačnošću $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Kupatilo poseduje integrisanu centrifugalnu pumpu za vodu (PTV) koja stalnim masenim protokom od 0,166 kg/s, posredstvom izolovanog cevovoda (Slika 4.1.5b), snabdeva vodeni grejač pripremljenom toplom vodom.



Slika 4.1.5 Fotografija instalacije za pripremu tople vode
(a) termostatsko kupatilo, (b) veza sa vodenim grejačem

Imajući u vidu to da se protok tople vode ne može menjati, jedina moguća regulacija učinka vodenog grejača vazduha je kvalitativna, tj. posredstvom regulacije temperature vode pomoću termostata kupatila. Merenjem temperature vode na ulazu i izlazu iz

vodenog grejača (Poz. A i B na **Slici 4.1.3**), određuje se predati toplotni protok za zagrevanje vazduha. Kako se ceo grejač nalazi u struji vazduha i toplotno je izolovan, može se smatrati da je predati toplotni protok određen na osnovu pada temperature vode u potpunosti predat vazduhu u sušari.



Slika 4.1.6 Fotografija instalacije za pripremu hladne vode

(a) rashladna kada sa ledom, (b) instalacija

Vodeni hladnjak (VH) koristi hladnu vodu temperature $1\pm 1^{\circ}\text{C}$ prethodno pripremljenu u rashladnoj kadi (RK) (**Slika 4.1.6a**). Ovakva temperatura vode se obezbeđuje iz mešavine leda i vode koji se nalaze u rashladnoj kadi. Vodeni hladnjak se snabdeva hladnom vodom pomoću pumpe za hladnu vodu (PHV) proizvođača *SPECK Geretsred*, tip VA25/64 (EWN8/2), koja poseduje mogućnost regulacije masenog protoka vode u tri stepena (I stepen: $0,03\text{ kg/s}$, II stepen: $0,044\text{ kg/s}$ i III stepen: $0,066\text{ kg/s}$). Imajući u vidu to da se temperatura hladne vode ne može menjati, jedina moguća regulacija učinka vodenog hladnjaka vazduha je kvantitativna, tj. izborom jednog od tri ponuđena stepena regulacije protoka. Ceo hladnjak se nalazi u struji vazduha i potpuno je toplotno izolovan.

Merenjem temperature vode na ulazu i izlazu iz vodenog hladnjaka (Poz. C i D na **Slici 4.1.3**) kao i količine izdvojene vlage (Poz. F na **Slici 4.1.3**), dobijaju se podaci na osnovu kojih se mogu odrediti senzibilna i latentna toplota utrošena na hlađenje vazduha. Rashladna kada je toplotno izolovana i u njoj se nalazi isparivač rashladne instalacije (ISP) kojim se postiže zaleđivanje oko 75% ukupne zapremine vode koja se u kadi nalazi. Ostatak od 25% vode cirkuliše u sistemu i toplotu uzetu od vazduha (posredstvom VH) u komori predaje ledu u rashladnoj kadi direktnim kontaktom. Imajući u vidu to da se količina leda u kadi smanjuje prilikom izvođenja eksperimenta, početna količina leda je dovoljna za sprovođenje 2 do 3 seta eksperimentalnih merenja. Ovakvo rešenje sa akumulacijom leda u rashladnoj kadi omogućuje da kapacitet rashladne instalacije namenjene za pripremu hladne vode bude mali, a veličina instalacije primerena laboratorijskim uslovima i raspoloživom smeštajnom prostoru. Međutim, da bi instalacija proizvela dovoljnu količinu leda potrebno je da radi duži vremenski period (≈ 12 časova) pre početka odvijanja eksperimenta.

Ostatak rashladne instalacije (**Slika 4.1.6b**) čine kompresor proizvođača *EMBRACO* tip *FF 7.5 BK* (rashladni kapacitet 0,902 kW), vazduhom hlađeni kondenzator (KD) i termostatski ekspanzioni ventil (PV) proizvođača *Danfoss*, tip *TE-2*. Rashladni fluid u instalaciji je freon R134a. Temperatura isparavanja freona je -18°C , a kondenzacija se obavlja na sobnoj temperaturi.

4.2 Opis eksperimentalnog istraživanja

Eksperimentalno istraživanje sprovedeno je sa prehrambenim materijalima: jabuke, krompira i banane (**Prilog 9.5**). Materijali su odabrani na osnovu više kriterijuma, od kojih su najbitniji:

- dostupnost i velika zastupljenost na tržištu Republike Srbije,
- sličnost u termomehaničkim osobinama,
- sličnost u mehaničkoj obradi i pripremi materijala za sušenje,
- sličnost u načinu sušenja,
- mogućnost primene iste tehnologije sušenja kod svih odabranih materijala,

- postojanje ranije sprovedenih istraživanja drugih autora na ovim materijalima radi mogućnosti poređenja eksperimentalnih rezultata, kao i
- postojanje ranije sprovedenih teorijskih istraživanja i modeliranja radi mogućnosti poređenja sa sopstvenim modelima..

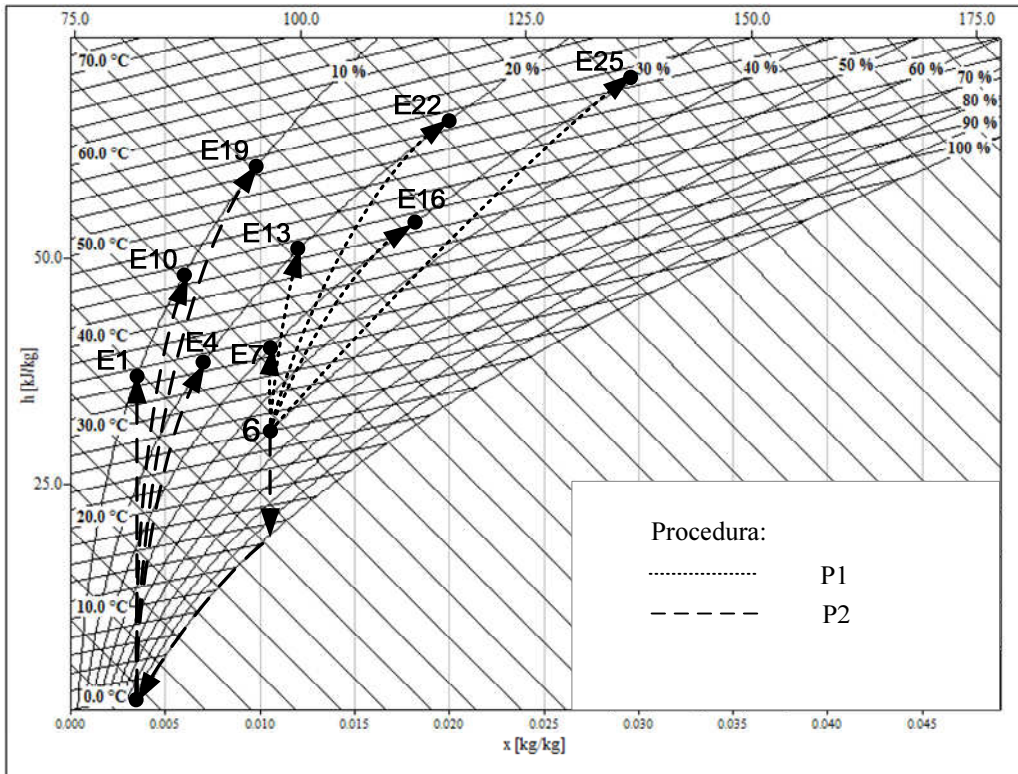
Geometrijski oblici i dimenzije komadića materijala (**Prilog 9.3**) usvojeni su tako da sa jedne strane odgovaraju geometriji koja je jednostavna za analizu i matematičko modelovanje, a sa druge strane budu što približnije geometriji koja se sreće u praksi. Usvojena geometrija materijala utiče na pravac prenošenja vlage u materijalu, a samim tim i na izbor koordinatnog sistema u kome je opisivanje jednostavnije. Eksperimentalno istraživanje se sprovodi pod pretpostavkom da smanjenje srednje vlažnosti materijala ne utiče na promenu dimenzije materijala. Zanimarivanje promene dimenzije materijala (tzv. skupljanja materijala) koja inače u stvarnosti postoji, utiče na smanjenje broja parametara u procesu sušenja, čime se jednačine matematičkog modela uprošćuju. Ovakav pristup je prisutan je u velikom broju istraživanja, *Sacilik (2006)*, *Taheri-Garavand (2011)*, *Fernando (2011)*.

U slučaju prehrambenog materijala jabuke, materijal je obrađen na oblik kocke, sa stranicama dimenzija 10 mm i 13 mm. Dimenzije su usvojene iz opsega dimenzija 6 mm do 20 mm, koje se često koriste u istraživanjima koja se bave sušenjem materijala u obliku kocke ili kvadra, *Velić (2004)*, *Sacilik (2006)*, *Lengyel (2007)*, *Meisami-asl (2010)*. Obzirom na to da je geometrijski oblik kocke najjednostavnije opisati *Descartes*-ovim pravouglim koordinatnim sistemom (**Prilog 9.3**), može se smatrati da će u pravcu sve tri koordinatne ose doći do podjednagog prenošenja vlage, odnosno, da će vlaga ravnomerno odlaziti iz materijala preko svih šest površi kocke podjednako. U slučaju prehrambenog materijala krompira, materijal je sečen na listove debljine 2 mm i 3 mm. Dimenzije su usvojene iz opsega dimenzija 0,3 mm do 4,3 mm, koje se često koriste u istraživanjima koja se bave sušenjem materijala u listovima, *Leeratanarak (2006)*, *Kingsly (2007)*. Ovaj geometrijski oblik se takođe najjednostavnije opisuje *Descartes*-ovim pravouglim koordinatnim sistemom. Dimenzija materijala sečenog na tanke listove (**Prilog 9.3**) u pravcu *z*-ose je mnogo manja od ostale dve dimenzije u pravcima *x*-ose i *y*-ose. Usled toga će dominantan pravac prenošenja vlage kroz materijal biti upravo pravac *z*-ose, tako da se u jednačinama mogu zanemariti članovi koji opisuju kretanje vlage u ostala dva pravca, tj. u pravcu *x*-ose i *y*-ose. U slučaju

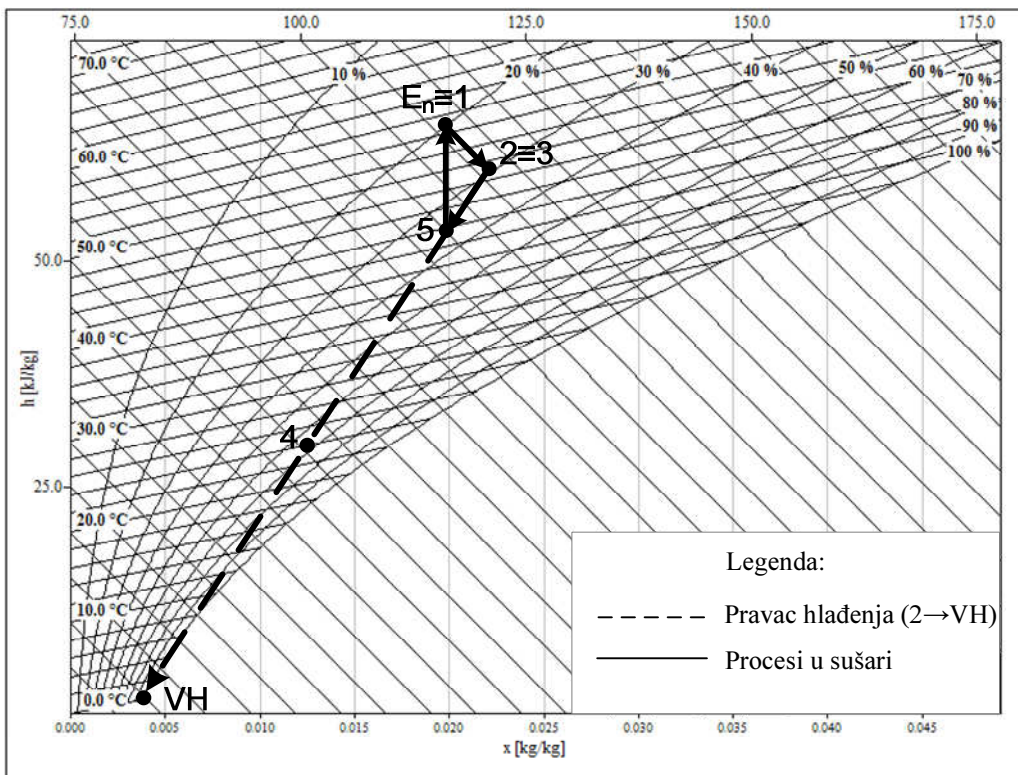
prehrambenog materijala banane, materijal je sečen na kolutove u obliku cilindra visine 6 mm i 7 mm. Dimenzije su usvojene iz opsega dimenzija 3 mm do 20 mm, koje se često koriste u istraživanjima koja se bave sušenjem materijala u obliku cilindra, **Karim (2005)**, **Nguyen (2007)**. U slučaju opisivanja cilindričnog oblika materijala koristi se cilindrični koordinatni sistem. Odnos visine i poluprečnika cilindra je takav da prenošenje vlage postoji kako u pravcu z -ose tako i u radijalnom pravcu (**Prilog 9.3**).

Odabrani prehrambeni materijali su sušeni pod istim režimima (**Prilog 9.6**), sa temperaturom sušenja u opsegu $35 \div 55^{\circ}\text{C}$, relativnom vlažnošću u opsegu $10 \div 30\%$ i brzinom strujanja agensa (vlažnog vazduha) u opsegu $1 \div 2 \text{ m/s}$. Opsezi variranja parametara sušenja: temperature, relativne vlažnosti vazduha i brzine strujanja vazduha, odabrani su na osnovu preporuka iz literature: -za jabuku, **Vega-Gálvez (2012)**, **Velić (2004)**; - za krompir, **Taheri-Garavand (2011)**, **Hassini (2007)**; - za bananu, **Baini (2007)**, **Nguyen (2007)**. Detaljna postavka parametara sušenja za svaki od eksperimenata, prikazana je u **Prilogu 9.6**.

Jedan eksperiment (E_n) obuhvata praćenje svih relevantnih parametara procesa pri jednom nepromenljivom režimu sušenja (T, RH, w) geometrije uzorka karakteristične dimenzije (z). Za svaki od materijala sprovedena su po dva seta eksperimentalnih merenja (2×27 merenja), tj. po jedan set merenja (E_1 to E_{27}) za svaku od dimenzija materijala. Stanje ambijentalnog vazduha (vazduh u laboratoriji u trenutku sprovođenja eksperimenta) je identično stanju vlažnog vazduha zatečenog u komori pre početka sušenja ($T = 26^{\circ}\text{C}$, $RH = 50\%$) i utvrđuje se odgovarajućim merenjem (Poz. 6 na **Slici 4.1.3**). Pre početka eksperimenta instalacija se mora dovesti u radni režim što podrazumeva da se ovo stanje vazduha se mora promeniti na odgovarajući način kako bi se dostiglo stanje koje odgovara nekom od usvojenih režima sušenja. Dostizanje željenih parametara sušenja vlažnog vazduha se ostvaruje jednom od dve moguće procedure (**Prilog 9.6**). Procedura P_1 (**Slika 4.2.1**) se sprovodi za slučaj da je apsolutna vlažnost ambijentalnog vazduha manja, a procedura P_2 (**Slika 4.2.1**) za slučaj da je apsolutna vlažnost ambijentalnog vazduha veća od apsolutne vlažnosti vlažnog vazduha čije se stanje želi dostići. Krajnja stanja (**Slika 4.2.1**) ne zavise od brzine strujanja vazduha tako da se npr. tačke eksperimenata E_1, E_2 i E_3 na ovom dijagramu poklapaju.



Slika 4.2.1 Procedure za dostizanje radnog režima laboratorijske instalacije prikazane u Mollier-ovom dijagramu za vlažan vazduh



Slika 4.2.2 Promene stanja vlažnog vazduha prilikom odvijanja procesa sušenja prikazane u Mollier-ovom dijagramu za vlažan vazduh

Postizanje radnog režima eksperimenata procedurom P_1 podrazmeva istovremeno zagrevanje početnog stanja vazduha i dodavanje vlage. Vlaga se dodaje ubrizgavanjem vode (SP) u turbulentnu struju vazduha neposredno iza ventilatora (VENT) sušare (Poz. H na **slici 4.1.3**). Ubrizgavanje vode se vrši klipnom pumpom za vodu, proizvođača *DLC Micro pump (England) Tip 3*, koja poseduje finu regulaciju protoka podešavanjem veličine slobodnog hoda klipa čime se ostvaruje regulacija zapreminskog protoka vode u opsegu 0-3000 ml/h. Postizanje radnog režima eksperimenata procedurom P_2 postiže se iz dva koraka. Prvo se vazduh hladi uporedno sa izdvajanjem vlage do temperature bliske 0°C , a potom se na prethodno opisan način zagreva do željenog stanja uz dodavanje vlage.

Po dostizanju radnih uslova (procedura P_1 ili P_2) proizvod raspoređen na lesi se unosi u sušaru i počinje se sa eksperimentalnim merenjem.

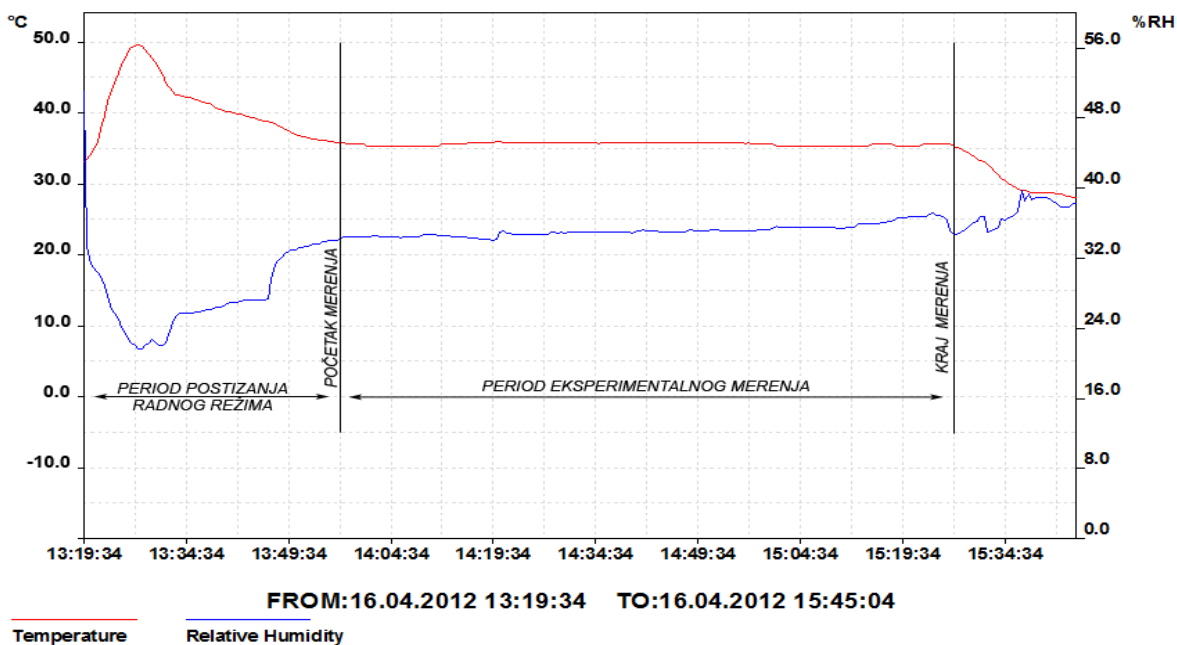
Vazduh stanja 1 (sa temperaturom u opsegu $35\text{-}55^{\circ}\text{C}$ i relativnom vlažnošću u opsegu 10-30%) struji konstantnom brzinom (u opsegu 1-2 m/s) preko vlažnog materijala raspoređenog na LE. Materijal se suši i predaje vlagu vazdušnoj struji koja komoru za sušenje napušta sa stanjem 2. Proces se potom uz odgovarajuću regulaciju odvija prema načinu koji je prikazan na **Slici 4.2.2**. Vazdušna struja stanja 2 se deli na dve struje čiji se protoci regulišu sa BPD i VHD regulatorima protoka. Prva vazdušna struja koja prolazi kroz BP zadržava svoje stanje, tj. stanja 2 i 3 vlažnog vazduha su identična (deonica je veoma kratka pa se gubici u okolinu mogu zanemariti). Druga vazdušna struja, koja prolazi preko VH čija je temperatura površine $\approx 0^{\circ}\text{C}$, se izobarski hladi do temperature niže od temperature tačke rose stanja 2, pri čemu dolazi do kondenzacije vlage iz vazduha i njenog izbacivanja iz sistema (na ranije opisan način) tako da na izlasku iz hladnjaka druga vazdušna struja dostiže stanje 4.

Promena stanja vlažnog vazduha koja se dešava pri prelazu vazdušne struje preko hladne površine VH je nekvazistatička tako da se na **Slici 4.2.2** ova promena ne može ucrtati. Međutim, položaj tačke 4 na dijagramu može se ucrtati dovoljno precizno iz uslova poznatog pravca promene stanja 2→4 i izmerene temperature u stanja 4. U nastavku, pomenute dve vazdušne struje stanja 3 i 4 se spajaju i efikasno mešaju obzirom na to da veoma brzo nailaze na VENT. Stanje 5 vlažnog vazduha se uz pomoć regulatora BPD i VHD podešava tako da bude iste apsolutne vlažnosti kao stanje 1, a potom se vrši zagrevanje u VG čija temperatura mora biti dovoljna da bi se promena

stanja 5→1 ostvarila. U zoni intenzivnog turbulentnog strujanja vazduha, predviđena je i mogućnost dodavanja i raspršivanja određene količine vode sprinklerom (SP) kako bi se željena relativna vlažnost ostvarila. Vazдушna struja se kanalom vodi ponovo na VG čime je jedan radni ciklus završen. Trenutna masa sušenog materijala se prati na DV.

Merenje veličina koje su od značaja za određivanje stanja vlažnog vazduha u svim tačkama (stanjima) prikazanih na **Slici 4.2.2**, izvedeno je na unapred utvrđenim mernim mestima u skladu sa **Slikom 4.1.3** i pomoću merno-regulacione opreme (**Prilog 9.4**).

Postizanje radnog režima instalacije i održavanje željenog režima sušenja izvedeno je konstantnim praćenjem temperature i relativne vlažnosti stanja 1 na mernom mestu br.1 pozicioniranom ispred lese sa vlažnim materijalom (**Slika 4.2.3**). Svi upravljački mehanizmi instalacije (prvenstveno pložaj BPD i VHD, a potom i vrednost temperature tople vode na ulazu u VG), podešavaju se tako da obezbede što manje oscilacije veličina od ciljanog režima sušenja.



Slika 4.2.3 Prikaz vrednosti temperature i relativne vlažnosti vazduha stanja 1 u realnom vremenu, zabeleženih datalogerom na mernom mestu br.1 i odgovarajućih karakterističnih perioda, u slučaju ciljanog režima sušenja 35°C i 30% RH

Obzirom na to da je regulacija rada instalacije ručna, tokom perioda eksperimentalnog merenja postoje izvesne oscilacije veličina oko ciljanih vrednosti, ali u granicama dozvoljenih odstupanja (maksimalno $\pm 1\%$) tako da bitno ne utiču na validnost eksperimenta. U periodu eksperimentalnog merenja, oscilacije vrednosti

relativne vlažnosti vazduha (**Slika 4.2.3**) su veće nego oscilacije temperature. Održavanje relativne vlažnosti u dozvoljenim granicama odstupanja je primetno teže, što je i jedan od razloga za zanemarivanje relativne vlažnosti kao uticajnog parametra sušenja u literaturi, *Uretir (1996), Velić (2004), Doymaz (2009)*.

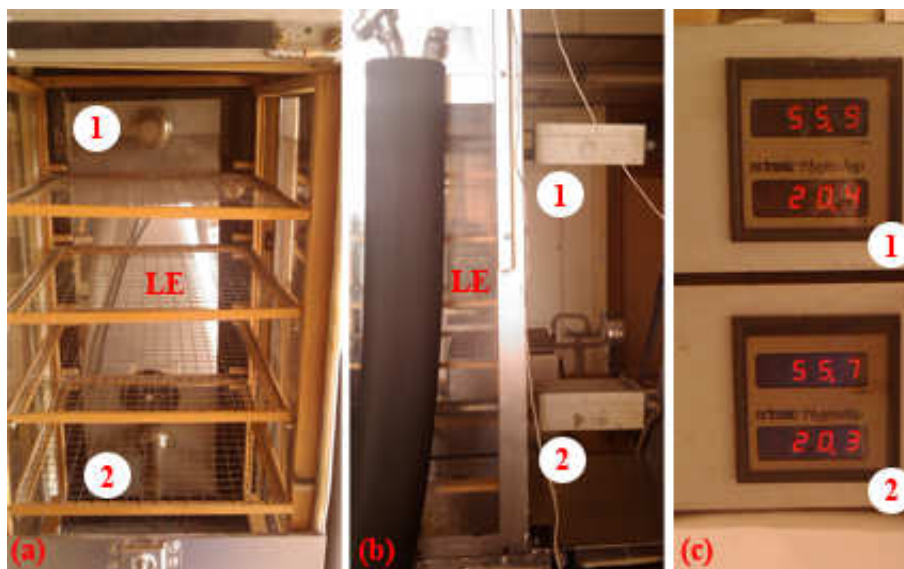
U **Poglavlju 3.2** je opisana važnost kontinualnog praćenja promena mase vlage koja je u odgovarajućem vremenskom periodu uklonjena iz materijala i to na dva različita načina. Prvi način podrazumeva praćenje promene mase materijala tokom procesa sušenja i realizovan je tako što se masa materijala raspoređenog na lese (LE) u komori za sušenje (**Slika 4.2.4a**) meri digitalnom vagom (DV) (**Slika 4.2.4b**) na koju se oslanja kompletna konstrukcija na kojoj su lese smeštene (**Slika 4.2.4c**). Vлага uklonjena iz materijala, uklanja se i iz sistema sušare i prikuplja se u menzuri (ME).



Slika 4.2.4 Eksperimentalno merenje mase materijala
(a) konstrukcija sa lesama, (b) digitalna vaga, (c) pozicija vage za vreme eksperimenta

Drugi način praćenja količine vlage koja je uklonjena iz materijala vrši se utvrđivanjem promene vrednosti apsolutne vlažnosti vazduha na ulazu i izlazu iz

komore u identičnim vremenskim intervalima. Vlažan vazduh stanja 1 prelazi preko vlažnog materijala na lese i napušta komoru za sušenje sa povišenom vlažnošću i nižom temperaturom. Promena stanja se beleži kanalskim sondama pozicioniranim ispred i iza lese, tj. na mernim mestima br.1 i 2 (Slika 4.2.5).



Slika 4.2.5 Određivanje promene 1→2 veličina stanja
(a) merna mesta 1 i 2, (b) položaj mernih instrumenata na vertikalnom kanalu,
(c) displeji za očitavanje vrednosti temperature i relativne vlažnosti

Merenje brzine strujanja vazduha vrši se na mernom mestu br.1 termomanometrijskom sondom, postavljenom u preseku dijagonala vertikalnog kanala, između vodenog grejača i lese sa materijalom. Regulacija brzine strujanja postiže se frekventnim regulatorom elektromotora ventilatora.

Ostale merene veličine i njihova merna mesta su navedene u **Prilogu 9.4**.

4.3 Prikaz eksperimentalnih rezultata

Prilikom izvođenja eksperimenata intervali beleženja podataka su usvojeni tako da su dovoljno dugi da između dva susedna merenja veličine nemaju bilo kakvu vrstu diskontinuiteta ili nagle promene koja bi uticala na rezultat merenja. Usvojen je interval u trajanju od 5 minuta. Do optimalne dužine trajanja intervala se došlo kako pregledom i konsultovanjem relevantne literature (**Tabela 2.2.1**), tako i izvođenjem probnih merenja. U navedenim intervalima očitavane su i beležne sve veličine na usvojenim

mernim mestima (**Prilog 9.4**), kao i veličine koje opisuju trenutni položaj regulacionih elemenata instalacije, na primer, položaj regulacionih dampera i slično.

Dobijeni rezultati merenja se mogu svrstati u dve grupe:

- I** Prva grupa rezultata se odnosi na praćenje promene mase vlažnog materijala u vremenu i dužine vremenskog perioda trajanja procesa sušenja. Obradom prve grupe rezultata dobijene su veličine od značaja za modeliranje kinetike sušenja posmatranog materijala, veličine od značaja za analizu difuzije vlage kroz materijal kao i nepoznati parametri u matematičkim jednačinama modela razmatranih procesa i pojava. Takođe, dobijene su prosečne vrednosti srednje vlažnosti materijala na početku sušenja (**Prilog 9.7**).
- II** Druga grupa rezultata odnosi se na praćenje odgovarajućih vrednosti temperatura i masenih protoka agensa i vode, koji su od značaja za definisanje potrebnih kapaciteta komponenata sistema, efekata rekuperacije energije i veličina koje se koriste u parametarskoj analizi rada samog sistema. Obradom druge grupe rezultata definiše se energetske potrebe sistema kao i ostale veličine od značaja za definisanje i praćenje energetskih tokova u sistemu.

Za određivanje nepoznatih parametara koji figurišu u jednačinama modela, verifikovanje jednačina modela, kao i određivanje veličina procesa koje će se koristiti u daljoj parametarskoj analizi rada komponenata instalacije, eksperimentom su utvrđene sledeće zavisnosti:

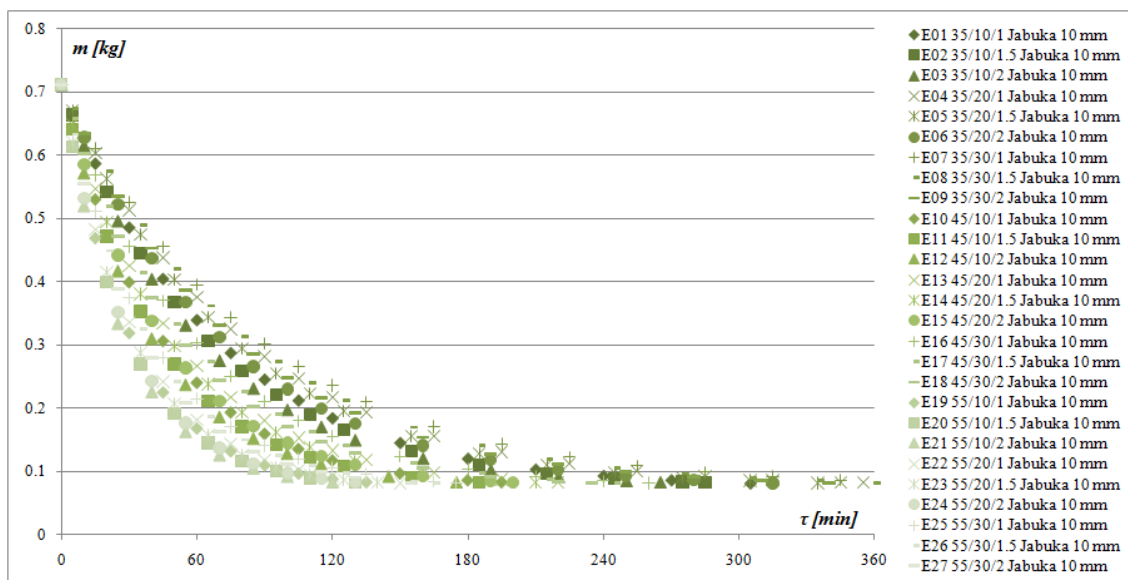
- 1) promena mase vlažnog materijala u vremenu tokom celokupnog perioda odvijanja procesa sušenja, odnosno količina izdvojene vlage iz vlažnog materijala;
- 2) trajanje procesa sušenja;
- 3) maseni protoci i temperature (ulaz/izlaz) vlažnog vazduha i vode na vodenom grejaču vazduha u cilju određivanja dovedenog toplotnog protoka za zagrevanje vlažnog vazduha;
- 4) maseni protoci i temperature (ulaz/izlaz) vlažnog vazduha i vode na vodenom hladnjaku vazduha u cilju određivanja odvedenog toplotnog protoka za hlađenje vlažnog vazduha uz izdvajanje vlage;

Rezultati eksperimentalnih merenja na osnovu kojih se dolazi do navedenih zavisnosti, prikazani su u nastavku za svaki od korišćenih materijala (jabuke, krompira i banane).

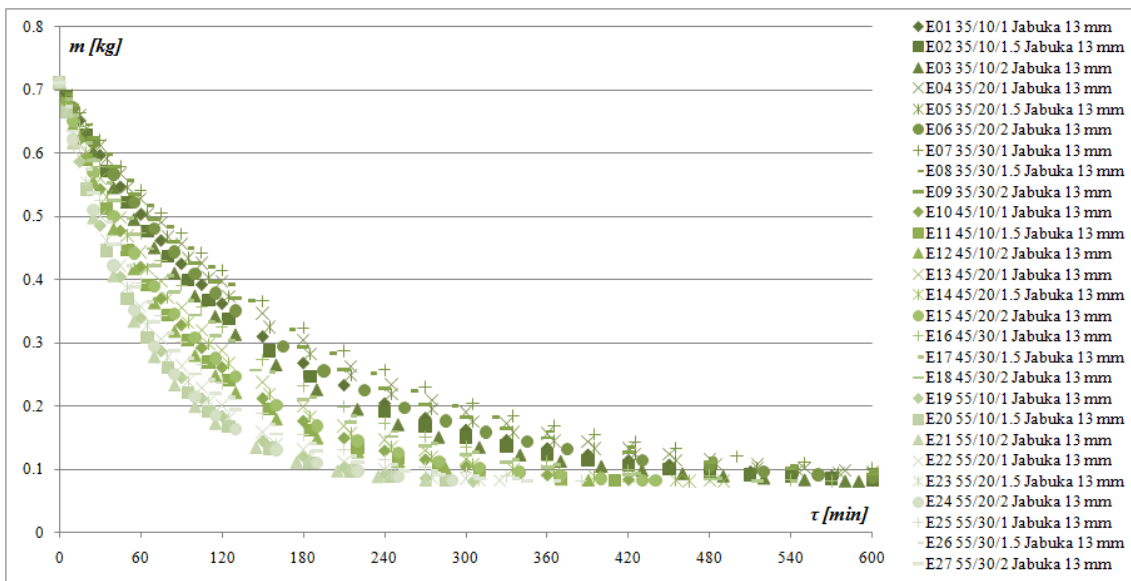
4.3.1 Promena mase vlažnog materijala tokom procesa

Pri različitim režimima sušenja (**Prilog 9.6**), eksperimentalnim merenjima je utvrđena promena mase vlažnog materijala jabuke tokom procesa, za dimenziju kocke uzorka od 10 mm (**Slika 4.3.1a**) i 13 mm (**Slika 4.3.1b**). Tokom procesa sušenja masa vlažnog materijala se smanjivala od početne mase od 0,712 kg do mase na kraju sušenja od oko 0,08 kg.

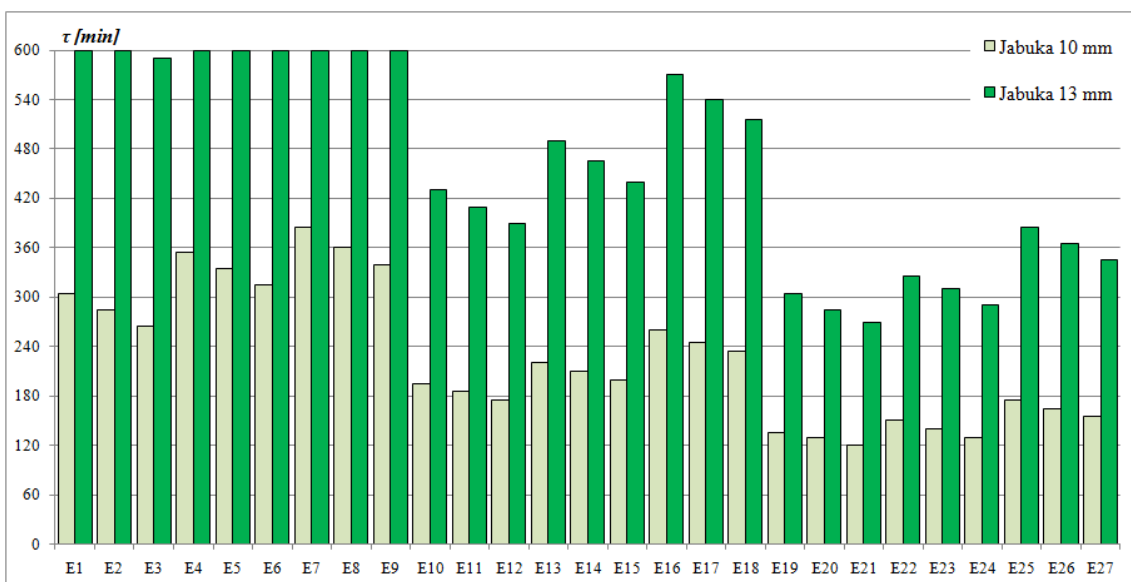
Rezultati merenja promene mase vlažnog materijala krompira i banane tokom procesa sušenja su na sličan način prikazani u **Prilogu 9.8**. Tokom procesa sušenja masa vlažnog materijala se smanjivala: kod krompira u opsegu 0,1÷0,02 kg (prosečna vrednost sadržaja vlage 78,1%), a kod banane u opsegu 0,206÷0,06 kg (prosečna vrednost sadržaja vlage 74,8%).



Slika 4.3.1a Promena mase vlažnog materijala tokom procesa (jabuka, kocka 10 mm)



Slika 4.3.1b Promena mase vlažnog materijala tokom procesa (jabuka, kocka 13 mm)



Slika 4.3.2 Vreme procesa sušenja (jabuka, kocka 10 i 13 mm, početna masa 0,712kg)

4.3.2 Vreme procesa sušenja

Pri različitim režimima sušenja (**Prilog 9.6**), eksperimentalnim merenjima je utvrđeno vreme procesa sušenja vlažnog materijala jabuke, za dimenzije kocke uzorka od 10 mm i 13 mm (**Slika 4.3.2**). Najduže vreme sušenja zabeleženo je kod eksperimenta E_7 sa postavljenim parametrima sušenja $T = 35^\circ\text{C}$, $RH = 30\%$ i $w = 1\text{ m/s}$. Ovo se objašnjava korišćenjem režima sušenja sa najmanjim vrednostima

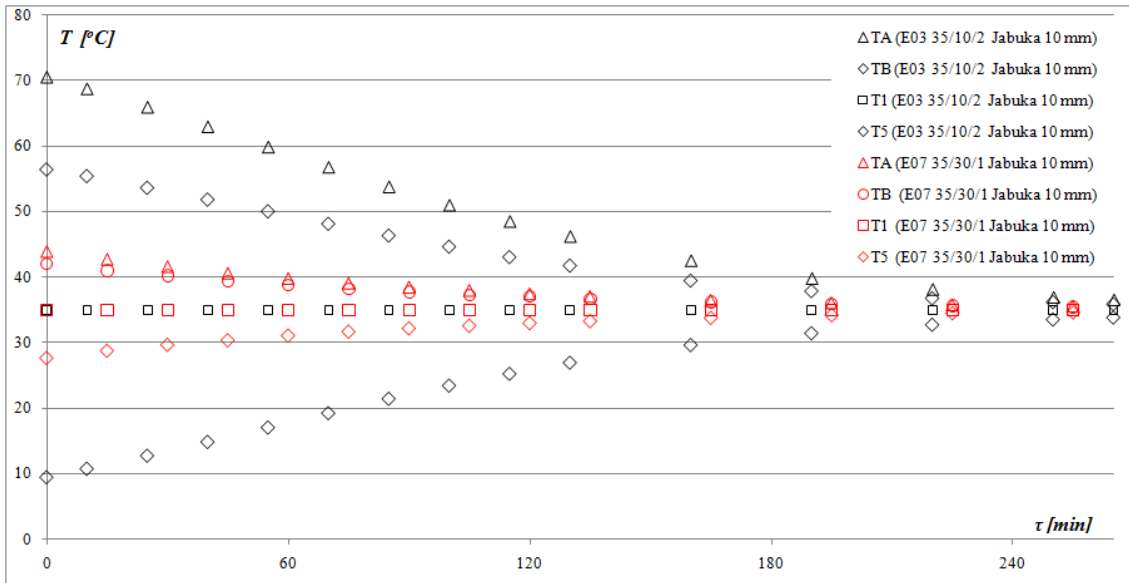
temperature i brzine strujanja vlažnog vazduha, a najvećom vrednošću relativne vlažnosti vazduha, u posmatranom opsegu vrednosti ovih parametara. Najkraće vreme sušenja je zabeleženo kod eksperimenta E_{21} sa postavljenim parametrima sušenja $T = 50^{\circ}C$, $RH = 10\%$ i $w = 2 m/s$. Ovo se objašnjava korišćenjem režima sušenja sa najvećim vrednostima temperature i brzine strujanja vlažnog vazduha, a najmanjom vrednošću relativne vlažnosti vazduha, u posmatranom opsegu vrednosti ovih parametara. Vremena procesa sušenja vlažnih materijala krompira i banane su na sličan način predstavljena u **Prilogu 9.9**.

4.3.3 Parametri rada vodenog grejača vazduha

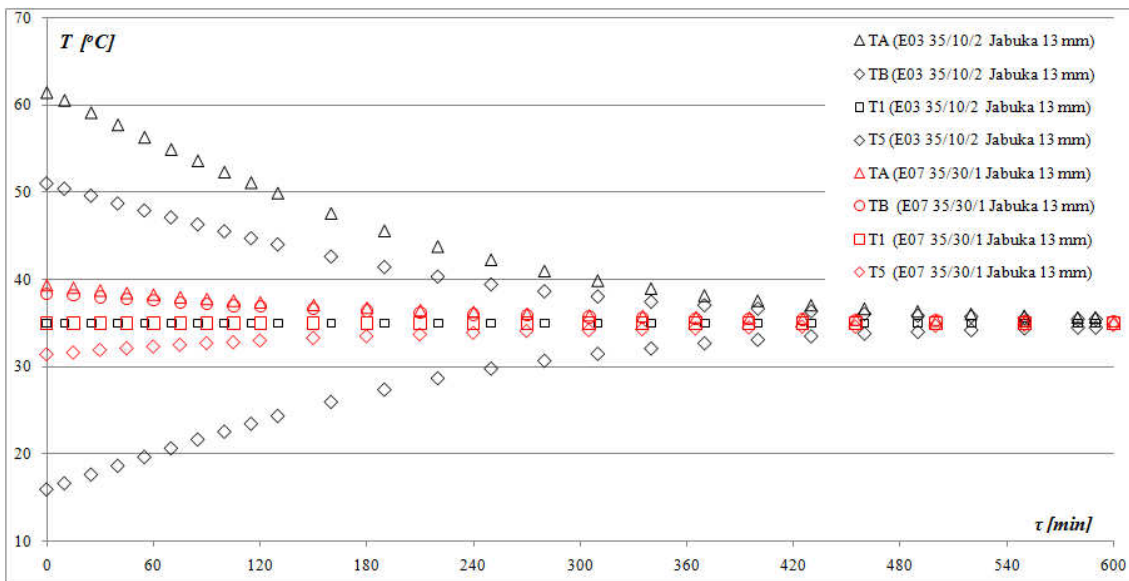
Pri različitim režimima sušenja (**Prilog 9.6**), određene su temperature koje su od značaja za određivanje potrebnog toplotnog protoka vodenog grejača vazduha. To su temperature vlažnog vazduha: na ulazu (T_5) i izlazu (T_I) iz grejača; i temperature vode: na ulazu (T_A) i izlazu (T_B) iz grejača. Maseni protok vazduha zavisi od brzine strujanja definisane odgovarajućim režimom sušenja, dok je maseni protok vode kroz grejač stalan i iznosi $0,166 kg/s$. Regulacija rada vodenog grejača vazduha je kvalitativna.

Eksperimentalnim merenjima prilikom sušenja materijala jabuke, za dimenzije kocke uzorka od $10 mm$ i $13 mm$, utvrđene su potrebne snage grejača na osnovu izmerenih temperatura. Najveća potrebna snaga grejača, kreće se u opsegu $5,57 kW$ (na početku sušenja) do $0,235 kW$ (na kraju sušenja) i zabeležena je u eksperimentu E_3 sa postavljenim parametrima sušenja $T = 35^{\circ}C$, $RH = 10\%$ i $w = 2 m/s$. Najmanja potrebna snaga grejača, kreće se u opsegu $0,814 kW$ (na početku sušenja) do $0,011 kW$ (na kraju sušenja) i je zabeležena u eksperimentu E_7 sa postavljenim parametrima sušenja $T = 35^{\circ}C$, $RH = 30\%$ i $w = 1 m/s$. Ovakvi rezultati se objašnjavaju korišćenjem režima sušenja sa najnižim vrednostima temperature i posledica su potrebe da se vlažan vazduh prvo ohladi do temperature tačke rose, a potom ponovo zagreje do temperature sušenja.

Kod svih eksperimentalnih merenja, bez obzira na posmatrani režim sušenja, geometriju i veličinu materijala, najveće razlike temperatura (ulaz/izlaz) javljaju se na početku procesa sušenja i tokom trajanja procesa postepeno se smanjuju.



Slika 4.3.3a Temperature vazduha i vode na ulazu/izlazu grejača (jabuka, kocka 10 mm)

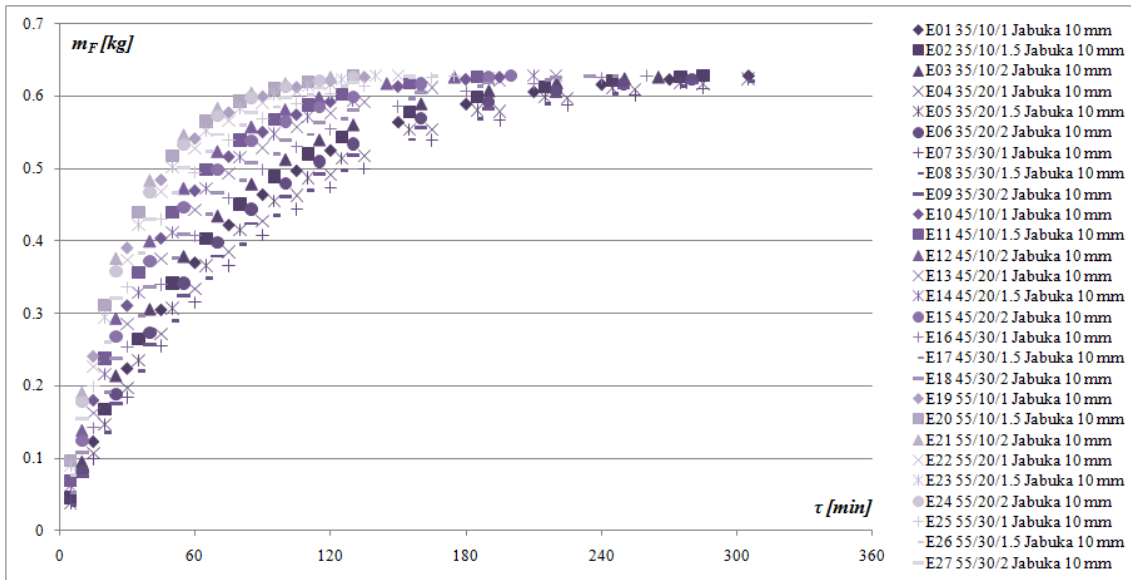


Slika 4.3.3b Temperature vazduha i vode na ulazu/izlazu grejača (jabuka, kocka 13 mm)

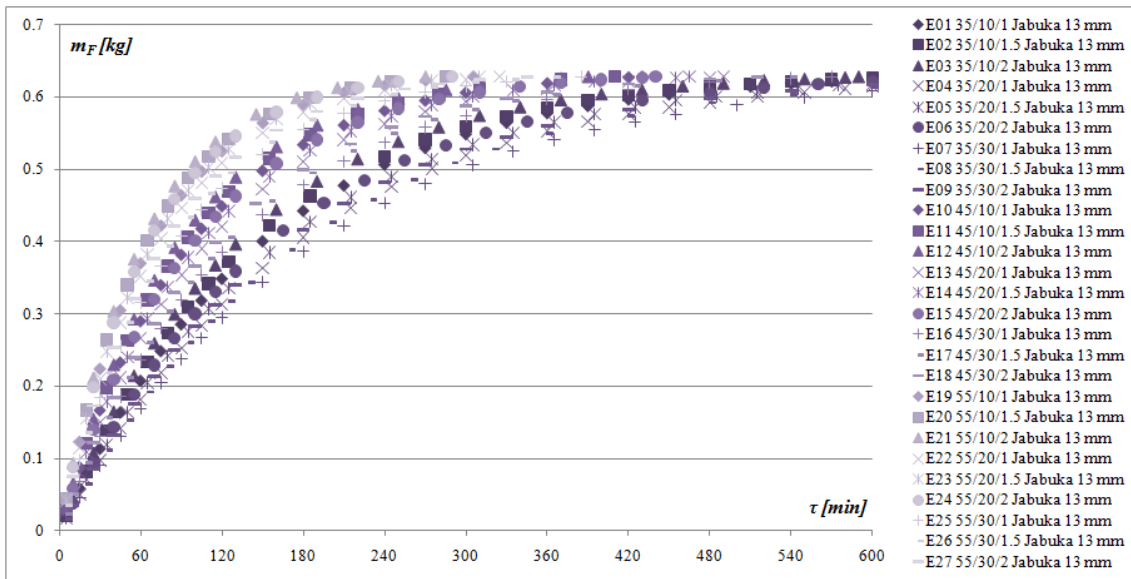
Zbog obima prikazivanja merenih rezultata (po 54 dijagrama za svaki od materijala) u tekstu disertacije su predstavljeni samo već pomenuti dijagrami na osnovu kojih su dobijene maksimalna i minimalna snaga grejača vazduha, dok ostale vrednosti zbog svoje sličnosti neće biti prikazane. Isti pristup je zadržan i kod materijala krompira i banane, a rezultati izmerenih temperatura, iz kojih proističu maksimalna i minimalna potrebna snaga grejača, prikazani su u **Prilogu 9.10**.

4.3.4 Parametri rada vodenog hladnjaka vazduha

U svakom eksperimentu izvršena su merenja odgovarajućih temperatura koje su od značaja za određivanje potrebne toplotne snage vodenog hladnjaka vazduha. To su temperature vlažnog vazduha: na ulazu (T_2) i izlazu (T_4) iz hladnjaka; i temperature vode: na ulazu (T_C) i izlazu (T_D) iz hladnjaka.



Slika 4.3.4a Masa vlage uklonjene iz sistema tokom procesa (jabuka, kocka 10 mm)



Slika 4.3.4b Masa vlage uklonjene iz sistema tokom procesa (jabuka, kocka 13 mm)

Vlaga kondenzovana na površini hladnjaka odvedena je iz sistema i prikupljena u menzuri. Masa vode u menzuri merena je tokom procesa sušenja (za jabuku **Slika 4.3.4a** i **Slika 4.3.4b**). Promena mase uklonjene vlage iz sistema tokom vremena, je obrnuto proporcionala promeni mase vlažnog materijala tokom procesa, prikazane u **Poglavlju 4.3.1**.

Na osnovu prikupljenih podataka o masi vlage koja je tokom procesa sušenja uklonjena iz sistema, moguće je odrediti odvedeni toplotni protok pri hlađenju vlažnog vazduha uz izdvajanje vlage. Isti pristup je zadržan i kod materijala krompira i banane, čiji su dijagrami prikazani u **Prilogu 9.11**.

4.4 Analiza grešaka merenja

Tačnost dobijenih rezultata merenja zavisi prvenstveno od rezolucije mernih instrumenata, a potom i od subjektivnog načina očitavanja. Karakteristike merno-regulacione opreme korišćene u eksperimentalnom istraživanju dat je u **Prilogu 9.4**, u skladu sa oznakama mernih mesta prikazanih na šemi instalacije (**Slika 4.1.3**).

4.4.1 Merenje temperature

Tokom eksperimentalnog istraživanja izvršeno je merenje temperature vlažnog vazduha (agensa sušenja) i temperature tople/hladne vode na razmenjivačima toplote (vodeni grejač/hladnjak vazduha). Prilikom merenja temperature vlažnog agensa korišćene su kanalske sonde proizvođača *Rotronic AG (Švajcarska)*, tačnosti $\pm 0,175^{\circ}C$ i rezolucije $0,1^{\circ}C$, koje poseduju sopstveni digitalni displej. Greška merenja ovim instrumentima je u domenu rezolucije instrumenta bez mogućnosti javljanja subjektivne greške pri očitavanju vrednosti (zbog postojanja displeja).

Merenje oscilacije temperature sušenja tokom vremena izvršeno je kanalskim datalogerima proizvođača *Volcraft (Nemačka)*, tačnosti $\pm 1^{\circ}C$ i rezolucije $0,03^{\circ}C$, automatskim beleženjem u memoriju instrumenta u unapred programiranom vremenskom intervalu, bez mogućnosti javljanja subjektivne greške.

Vrednosti temperatura tople/hladne vode izmerene su laboratorijskim digitalnim instrumentima za merenje temperature površine, tačnosti $\pm 1^{\circ}\text{C}$ i rezolucije $0,1^{\circ}\text{C}$. Merenje je izvršeno na ulazu/izlazu iz razmenjivača toplote naslanjanjem sonde na bakarnu cev. Merni instrumenti su sa digitalnim displejom, čime je eliminisana mogućnost subjektivne greške u očitavanju.

Merenje temperature vode u termostatskom kupatilu proizvođača *MLW (Nemačka)*, koje poseduje integrisani termometar sa živom sa rezolucijom očitavanja $0,1^{\circ}\text{C}$. Očitavanje temperature je subjektivno tako da postoji mogućnost pojave greške u visini vrednosti rezolucije instrumenta.

Greška merenja vrednosti temperature tokom eksperimentalnog istraživanja prvenstveno zavisi od tačnosti samog instrumenta i iznosi maksimalno $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Pre početka merenja, pokazivanja svih mernih instrumenata su usaglašena (baždarena) laboratorijskim etalon-termometrom visoke tačnosti.

4.4.2 Merenje relativne vlažnosti

Tokom eksperimentalnog istraživanja izvršeno je merenje temperature vlažnog vazduha (agensa sušenja). Prilikom merenja relativne vlažnosti vlažnog agensa korišćene su kanalske sonde proizvođača *Rotronic AG (Švajcarska)*, tačnosti $\pm 1\%$ na intervalu 0-100% *RH* i rezolucije $0,1\%$ *RH*, koje poseduju sopstveni digitalni displej. Greška merenja ovim instrumentima je u domenu rezolucije instrumenta bez mogućnosti javljanja subjektivne greške pri očitavanju vrednosti (zbog postojanja displeja).

Merenje oscilacije relativne vlažnosti agensa koji dospeva na vlažan materijal tokom vremena izvršeno je kanalskim datalogerima proizvođača *Volcraft (Nemačka)*, tačnosti $\pm 3\%$ na intervalu 0-100% *RH* i rezolucije $0,1\%$ *RH*, automatskim beleženjem u memoriju instrumenta u unapred programiranom vremenskom intervalu, bez mogućnosti javljanja subjektivne greške. Greška merenja vrednosti relativne vlažnosti tokom eksperimentalnog istraživanja prvenstveno zavisi od tačnosti samog instrumenta i iznosi maksimalno $0,1\%$ *RH*. Pre početka merenja, pokazivanja svih mernih instrumenata su usaglašena (baždarena) laboratorijskim psihrometrom visoke tačnosti.

4.4.3 Merenje brzine strujanja

Tokom eksperimentalnog istraživanja izvršeno je merenje brzine strujanja vlažnog vazduha (agensa sušenja). Merenje brzine je izvršeno termoanemometrijskom sondom proizvođača *Airflow Developements Ltd. (Engleska)*, tačnosti $\pm 3\%$ na intervalu 0-20 *m/s* i rezolucije 0,01 *m/s*, koja poseduje sopstveni digitalni displej. Greška merenja ovim instrumentom je u domenu rezolucije instrumenta, bez mogućnosti javljanja subjektivne greške pri očitavanju vrednosti (zbog postojanja displeja). Merenje brzine je izvršeno u više tačaka u ravni preseka odabranog mernog mesta, međutim, usled postojanja orebrenog vodenog grejača vazduha u preseku kanala ispred ravni merenja (koji time ujedno ima i funkciju usmerivača strujanja), dobijane su identične vrednosti u svim tačkama. Instrument poseduje mogućnost samokalibracije za uslove ambijenta u kome se nalazi.

4.4.4 Merenje mase

Tokom eksperimentalnog istraživanja izvršeno je merenje mase vlažnog materijala. Merenje mase je izvršeno digitalnom vagom proizvođača *Elite (Kina)*, tačnosti $\pm 0,001$ *kg* i rezolucije 0,001 *kg*, koja poseduje sopstveni digitalni displej. Greška merenja ovim instrumentom je u domenu rezolucije instrumenta, bez mogućnosti javljanja subjektivne greške pri očitavanju vrednosti (zbog postojanja displeja). Pre početka merenja instrument je baždaren laboratorijskim kompletom tegova precizne mase u opsegu 0,001 *kg* do 1 *kg*.

5. ANALIZA EKSPERIMENTALNIH REZULTATA

U ovom poglavlju su prikazani i analizirani rezultati eksperimentalnih merenja za svaki od ispitivanih materijala (jabuke, krompira i banane), a koji su proistekli iz eksperimentalnog istraživanja opisanog u prethodnim poglavljima.

Veličine koje je neophodno odrediti na osnovu dobijenih rezultata eksperimentalnih merenja, u cilju poređenja sa modelom, su:

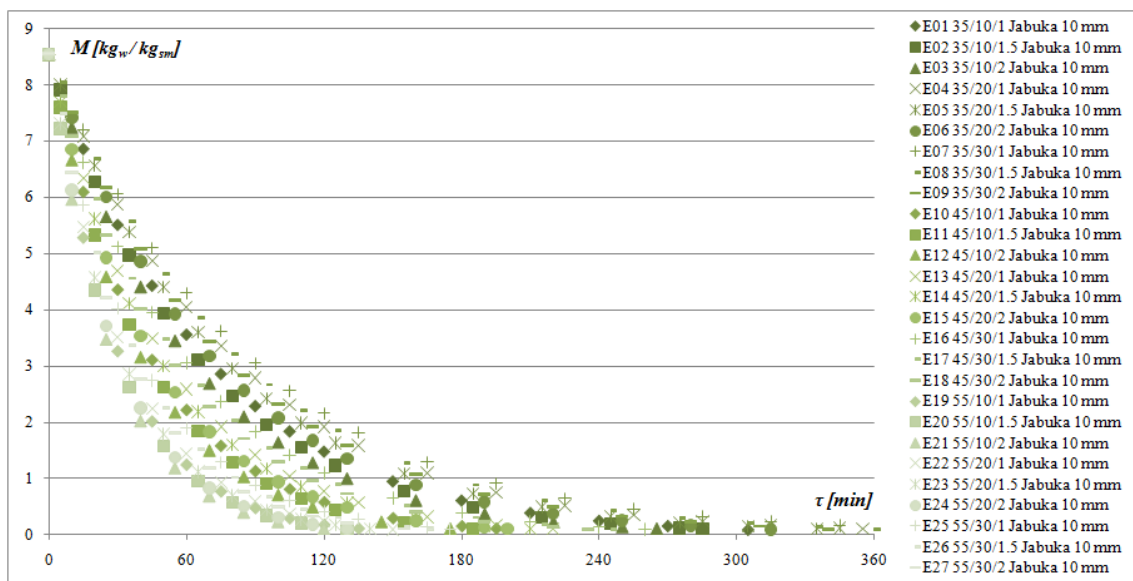
- srednja vlažnost materijala,
- srednja vlažnost materijala u bezdimenzionom obliku,
- brzina sušenja,
- efektivni koeficijent difuzije vlage,
- nepoznati parametri u jednačinama matematičkog modela,
- energija utrošena za zagrevanje agensa,
- energija utrošena za hlađenje agensa uz izdvajanje vlage,
- parametri rada toplotne pumpe, i
- pokazatelji efikasnosti procesa sušenja.

5.1. Srednja vlažnost materijala

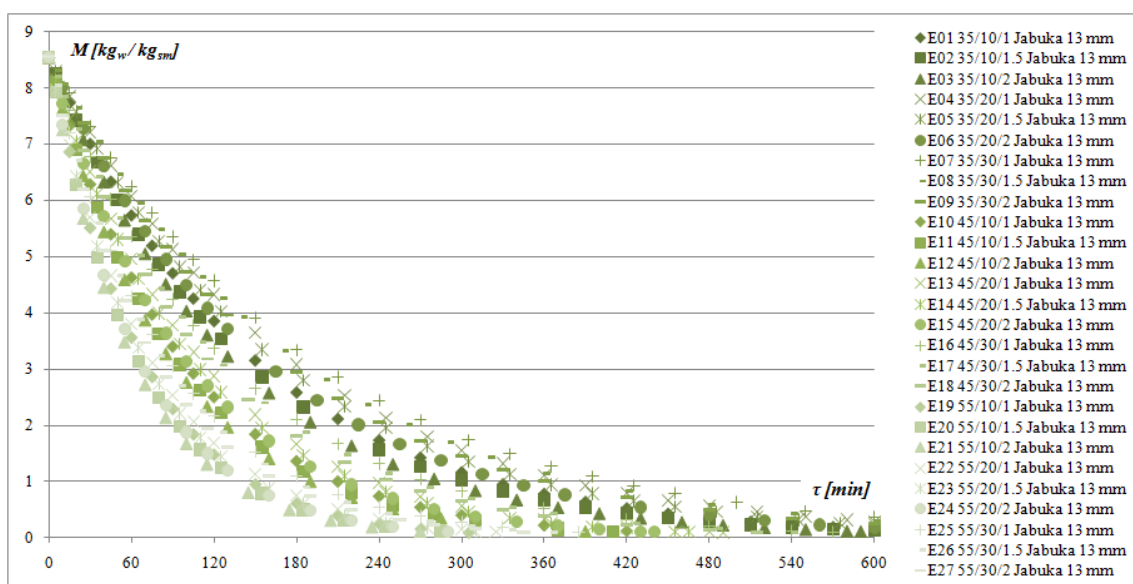
Određivanje srednje vlažnosti materijala izvršeno je na osnovu rezultata određivanja prosečnih vrednosti srednje vlažnosti materijala na početku sušenja (**Prilog 9.7**) i jednačina od (3.30) do (3.34) prikazanih u **Poglavljju 3.2**. Srednja vlažnost materijala je utvrđena za svaki od ispitivanih materijala (jabuku, krompir i bananu).

Pri različitim režimima sušenja (**Prilog 9.6**), utvrđene su promene srednje vlažnosti materijala jabuke, za dimenziju kocke uzorka od 10 mm (**Slika 5.1.1a**) i 13 mm (**Slika 5.1.1b**). Tokom procesa sušenja srednja vlažnost materijala se smanjivala od početne vrednosti 8,55 kg/kg do vrednosti od oko 0,1 kg/kg na kraju procesa.

Promene vlažnosti materijala krompira i banane u vremenu su na sličan način prikazane u **Prilogu 9.12**. Zabeleženi rezultati su slični rezultatima materijala jabuke, pri čemu vlažnost materijala krompira opada od 3,58 kg/kg do 0,2 kg/kg, a banane od 2,97 kg/kg do 0,3 kg/kg.



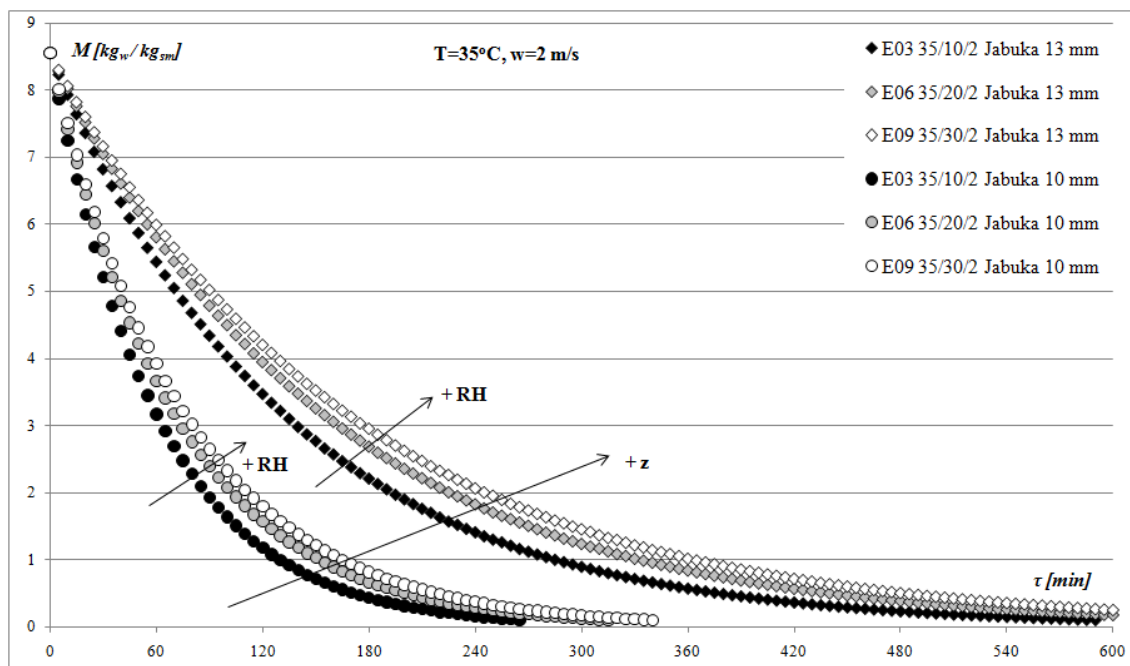
Slika 5.1.1a Promena srednje vlažnosti materijala tokom procesa (jabuka, kocka 10 mm)



Slika 5.1.1b Promena srednje vlažnosti materijala tokom procesa (jabuka, kocka 13 mm)

Srednja vlažnost materijala je najveća na početku procesa sušenja i u prvih ≈ 180 minuta, njena promena u odnosu na početnu vrednost je najveća. Ovo se objašnjava položajem zone isparavanja vlage. Na početku procesa zona isparavanja vlage je bliža spoljašnjoj površini materijala i tokom vremena se postepeno pomera ka centralnim slojevima materijala. Time se i otpori prenošenju vlage kroz materijal postepeno povećavaju, što vremenom otežava prenošenje vlage kroz materijal i uzrokuje sporije opadanje srednje vlažnosti materijala.

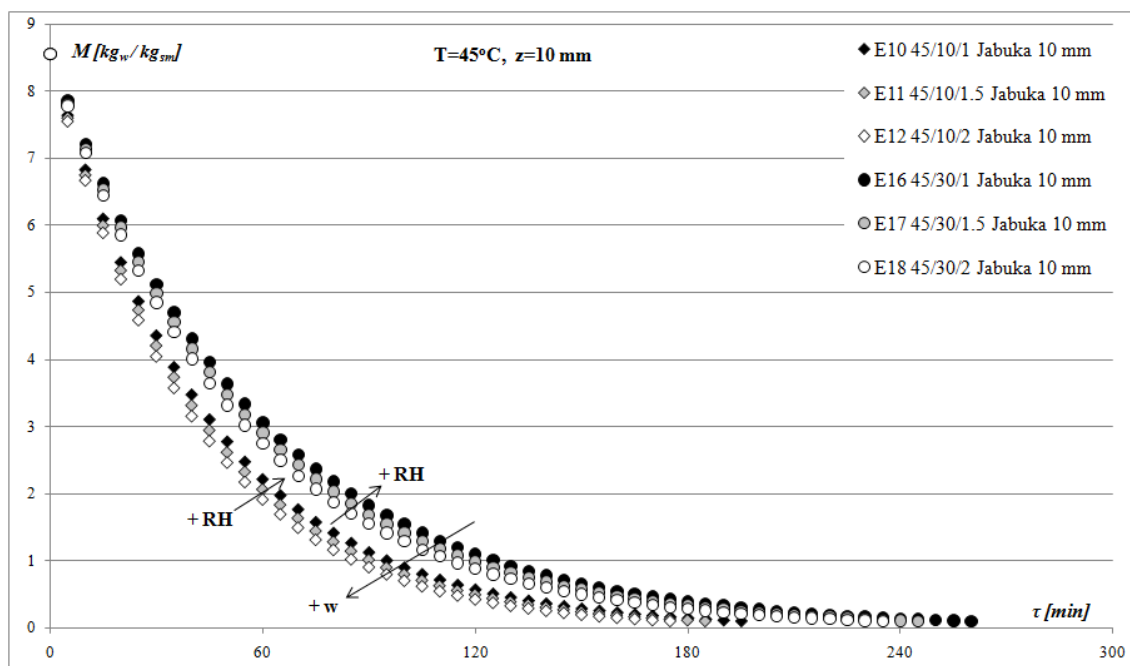
Dobijeni rezultati ukazuju na to da se povećanjem vrednosti relativne vlažnosti vazduha smanjuje njegov potencijal sušenja (Slika 5.1.2), a samim tim se i brzina sušenja smanjuje. Smanjenjem dimenzije komadića materijala koji se suši umanjuje se i dužina puta koji vlaga prelazi, od unutrašnjih slojeva materijala pa do površine materijala koju vlažan vazduh opstrujava. Ukoliko se želi postići ista brzina sušenja i kod većih komadića materijala, potrebno je povećati temperaturu vlažnog vazduha čime će se pobuditi vlaga u unutrašnjim dubinskim slojevima materijala i pokrenuti ka površini materijala.



Slika 5.1.2 Uticaj povećanja relativne vlažnosti vazduha (RH) i dimenzije komadića materijala (z) na promenu srednje vlažnosti materijala u toku vremena (jabuka)

Ukoliko se posmatra proces sušenja komadića materijala pri stalnoj temperaturi vlažnog vazduha (Slika 5.1.3), vreme sušenja će se produžiti sa povećanjem relativne vlažnosti vazduha, a smanjiti sa povećanjem brzine strujanja. Brzina izdvajanja vlage iz materijala se povećava sa povećanjem brzine strujanja vazduha (zbog intenzivnije razmene supstancije na površini materijala), ali se ista smanjuje pri povećanju relativne vlažnosti vazduha (zbog njegovog smanjenog potencijala da u sebe primi vlagu). U pojedinim slučajevima se pri istoj temperaturi sušenja i dimenziji materijala može ostvariti sličan karakter promene vlažnosti materijala u vremenu u više slučaja različitih kombinacija brzine strujanja vazduha i njegove relativne vlažnosti. Na primer, ukoliko

za odgovarajuće vrednosti istovremeno povećamo brzinu strujanja vazduha i njegovu relativnu vlažnost, kriva sušenja se praktično neće promeniti.



Slika 5.1.3 Uticaj povećanja relativne vlažnosti vazduha (RH) i brzine strujanja (w) na promenu srednje vlažnosti materijala u toku vremena (*jabuka*)

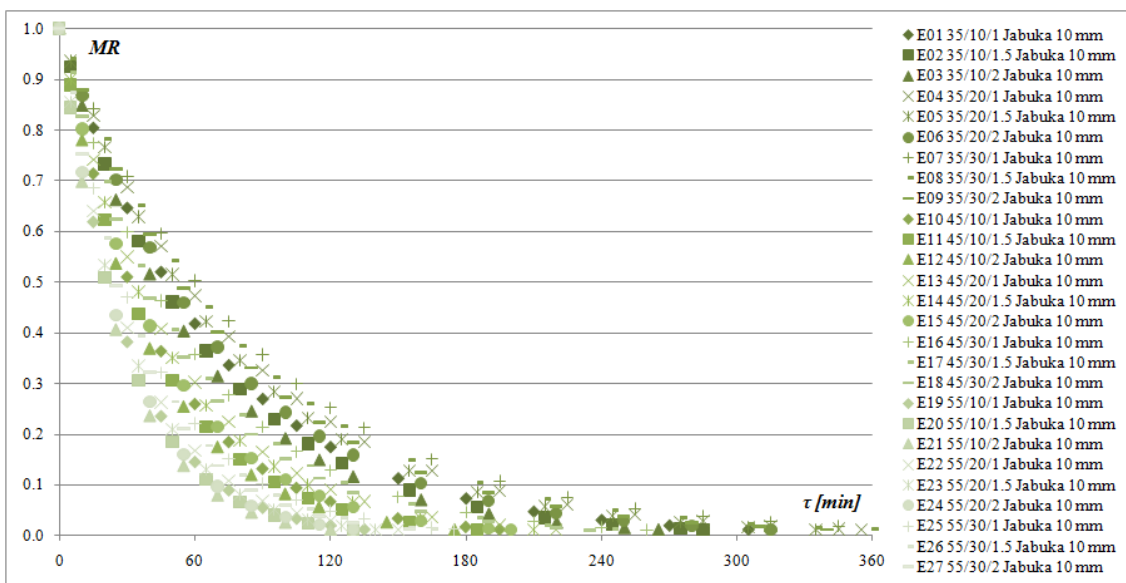
Sa povećanjem relativne vlažnosti vazduha, pri stalnim vrednostima ostalih parametara sušenja, smanjuje se njegov potencijal da kao agens sušenja u sebe primi vlagu. Na primer, ukoliko posmatramo kocku jabuke dimenzije 10 mm, posle vremenskog perioda od 120 minuta sušenja vlažnim vazduhom temperature 45°C i relativne vlažnosti 10%, povećanje brzine sa 1 m/s na 2 m/s uticaće na promenu vlažnosti materijala koja će opasti za 34%. Takođe, povećanjem relativne vlažnosti vlažnog agensa sa 10% na 30%, pri brzini strujanja od 1 m/s, vrednost vlažnosti materijala povećaće se za 83%. Slična zapažanja se mogu izvesti i prilikom posmatranja parametara sušenja vlažnih materijala krompira i banane.

☑ Ovako dobijeni rezultati idu u prilog postavljenim pretpostavkama o bitnom uticaju termomehaničkih osobina vlažnog vazduha na proces sušenja.

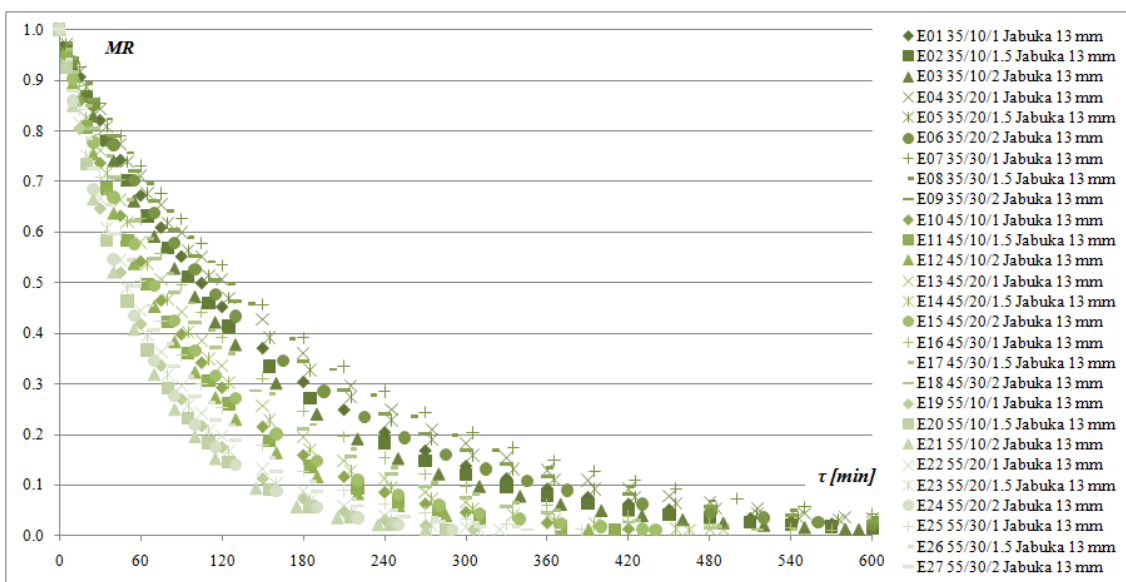
Prikazivanje srednje vlažnosti materijala u bezdimenzionom obliku otvara mogućnost međusobnog upoređivanja kinetike sušenja više različitih materijala, bez obzira na ukupnu masu materijala i početnu vrednost srednje vlažnosti materijala.

Određivanje srednje vlažnosti materijala u bezdimenzionom obliku izvršeno je na osnovu rezultata određivanja prosečnih vrednosti srednje vlažnosti materijala na početku sušenja (**Prilog 9.7**) i jednačine (3.38) prikazane u **Poglavlju 3.2**.

Pri različitim režimima sušenja (**Prilog 9.6**), utvrđene su promene srednje vlažnosti materijala u bezdimenzionom obliku tokom procesa materijala jabuke, za dimenziju kočke uzorka od 10 mm (**Slika 5.1.4a**) i 13 mm (**Slika 5.1.4b**).



Slika 5.1.4a Promena srednje vlažnosti materijala u bezdimenzionom obliku tokom procesa (jabuka, kocka 10 mm)



Slika 5.1.4b Promena srednje vlažnosti materijala u bezdimenzionom obliku tokom procesa (jabuka, kocka 13 mm)

Promena srednje vlažnosti materijala u bezdimenzionom obliku tokom procesa prati karakter promene srednje vlažnosti materijala, obzirom na to da su ove dve veličine međusobno povezane jednačinom (3.38).

$$MR_n = \frac{M_n - M_e}{M_0 - M_e} \quad (3.38^1)$$

Tokom procesa sušenja srednja vlažnost materijala u bezdimenzionom obliku se smanjuje od početne vrednosti $MR_0 = 1$ do krajnje vrednosti MR_e .

Promene srednje vlažnosti materijala u bezdimenzionom obliku tokom procesa sušenja materijala krompira i banane, na sličan način su prikazane u **Prilogu 9.13**.

5.2 Brzina sušenja

Određivanje brzine sušenja materijala izvršeno je na osnovu rezultata određivanja srednje vlažnosti materijala u **Poglavljju 5.1** i jednačine (3.39) prikazanih u **Poglavljju 3.2**. Brzina sušenja je utvrđena za svaki od ispitivanih materijala (jabuka, krompir, banana).

Brzina sušenja se određuje prema jednačini (3.39) i predstavlja promenu srednje vlažnosti materijala u posmatranom vremenskom intervalu. U literaturi su zastupljena dva načina grafičkog prikazivanja brzine sušenja i to: promene brzine sušenja tokom procesa u obliku $DR = f(\tau)$ i zavisnosti $DR = f(M)$ između brzine sušenja i srednje vlažnosti materijala, **Kemp (2001)**.

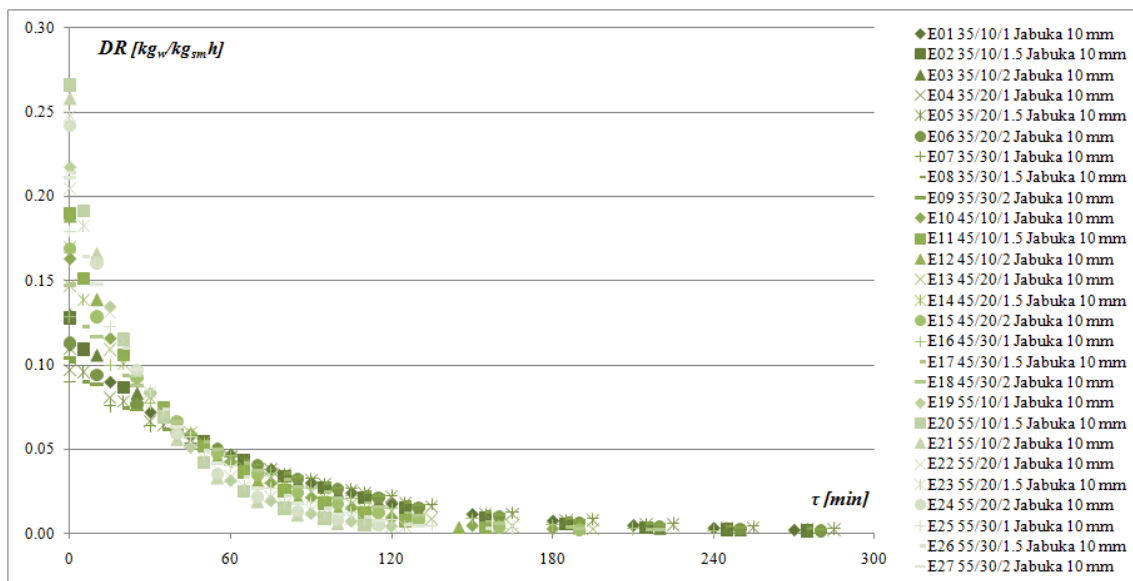
$$DR = \frac{\Delta M}{\Delta \tau} \quad (3.39^2)$$

Rezultati eksperimentalnog istraživanja, ukazuju na nepostojanje perioda konstantne brzine sušenja, odnosno, samo na postojanje perioda opadajuće brzine sušenja. Tokom trajanja procesa sušenja brzina sušenja je u konstantnom opadanju, što se objašnjava činjenicom da je materijal sušen u tankom sloju. Ovakvi rezultati se slažu sa rezultatima drugih autora (**Tabela 2.2.1**). Pri različitim režimima sušenja (**Prilog 9.6**), utvrđene su

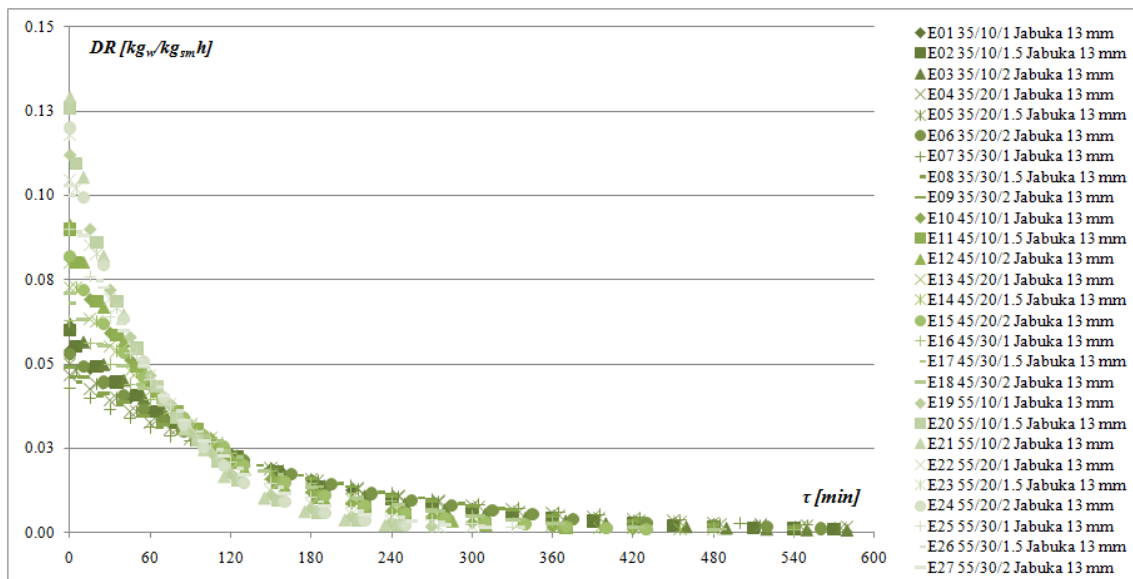
¹ Jednačina je obeležena istim brojem (3.38) pod kojim je već ranije razmatrana u Poglavljju 3.2

² Jednačina je obeležena istim brojem (3.39) pod kojim je već ranije razmatrana u Poglavljju 3.2

promene brzine sušenja tokom procesa materijala jabuke, za dimenziju kocke uzorka od 10 mm (Slika 5.2.1a) i 13 mm (Slika 5.2.1b).



Slika 5.2.1a Promena brzine sušenja tokom procesa (jabuka, kocka 10 mm)

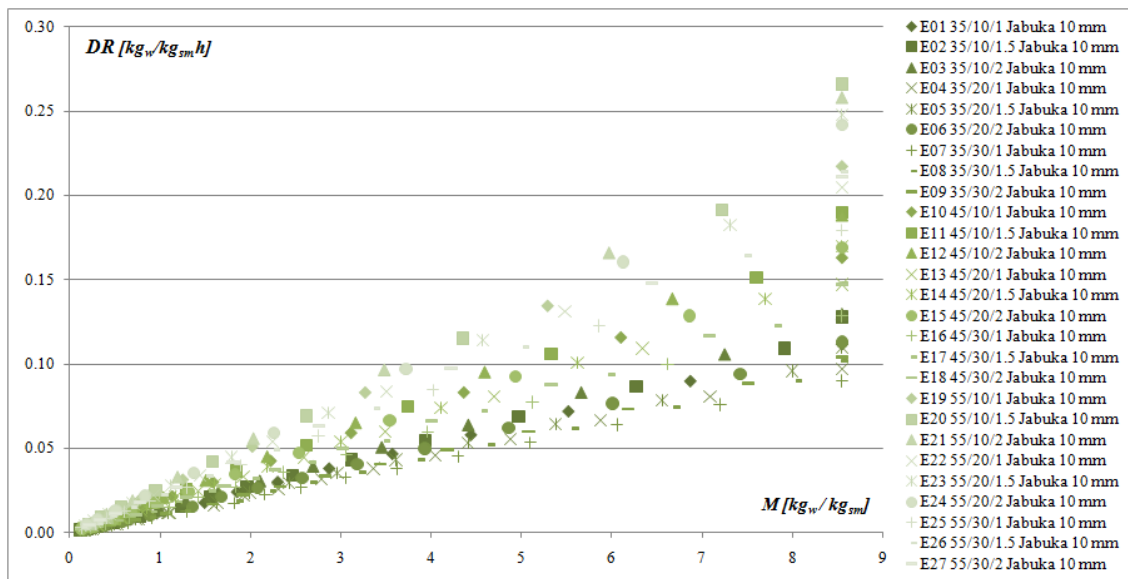


Slika 5.2.1b Promena brzine sušenja tokom procesa (jabuka, kocka 13 mm)

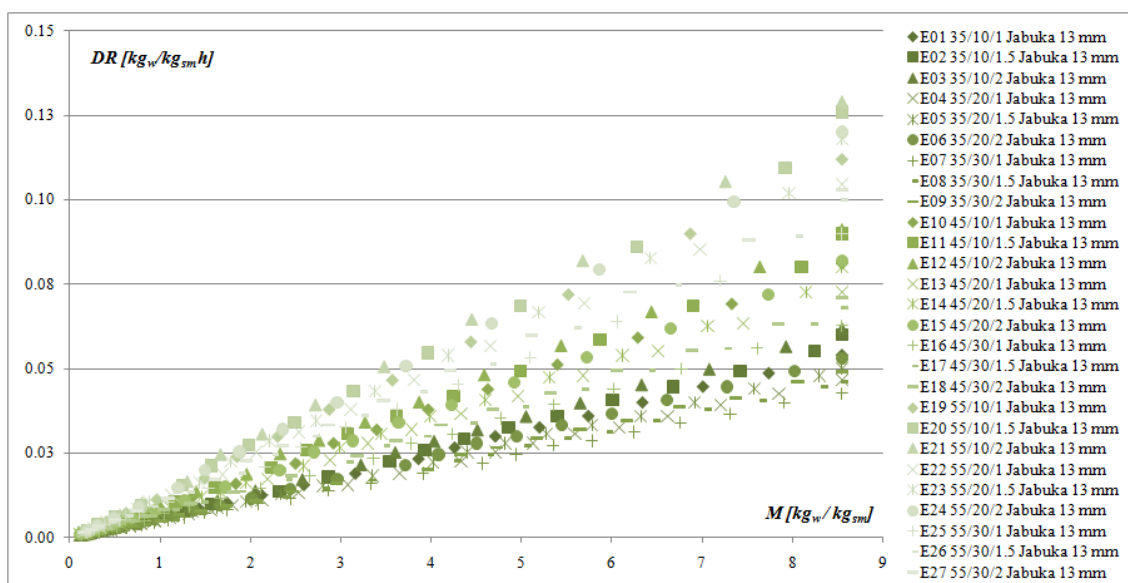
Takođe, pri različitim režimima sušenja (Prilog 9.6), utvrđene su promene brzine sušenja u zavisnosti od srednje vlažnosti materijala jabuke, za dimenziju kocke uzorka od 10 mm (Slika 5.2.2a) i 13 mm (Slika 5.2.2b). Najveće brzine sušenja se javljaju na početku sušenja, kada je srednja vlažnost materijala najveća. Ovo se objašnjava položajem zone isparavanja vlage, koja je na početku procesa bliža spoljašnjoj površini materijala, pa su i otpori prenošenju vlage kroz materijal manji. Dobijene zavisnosti

između vrednosti brzine sušenja i vlažnosti materijala se mogu smatrati približno linearnim.

Brzina sušenja vlažnih materijala krompira i banane su na sličan način prikazane u Prilogu 9.14.



Slika 5.2.2a Promena brzine sušenja u zavisnosti od srednje vlažnosti materijala (jabuka, kocka 10 mm)



Slika 5.2.2b Promena brzine sušenja u zavisnosti od srednje vlažnosti materijala (jabuka, kocka 13 mm)

Najveće brzine sušenja određene su kod eksperimenata E_{21} sa postavljenim parametrima sušenja $T = 55^{\circ}C$, $RH = 10\%$ i $w = 2 m/s$. Ovo se objašnjava korišćenjem maksimalne vrednosti parametara temperature i brzine strujanja vlažnog vazduha, a minimalne vrednosti parametara relativne vlažnosti vazduha i karakteristične

dimenzije komadića materijala, u posmatranim opsezima vrednosti za svaki od pomenutih parametra. Nasuprot tome, najmanje brzine sušenja su određene kod eksperimenata E_7 sa postavljenim parametrima sušenja $T = 35^{\circ}\text{C}$, $RH = 30\%$ i $w = 1\text{ m/s}$. U tom slučaju, korišćene su minimalne vrednosti parametara temperature i brzine strujanja, a maksimalne vrednosti parametara relativne vlažnosti i karakteristične dimenzije komadića materijala, u posmatranim opsezima vrednosti za svaki od pomenutih parametara.

5.3 Efektivni koeficijent difuzije vlage

Upotrebom efektivnog koeficijenta difuzije (D_{eff}), omogućeno je obuhvatanje svih mogućih mehanizama prenošenja vlage koji se javljaju u materijalu, tako da prenošenje vlage zavisi samo od geometrijskog oblika i dimenzija materijala koji utiču na pravac i smer kretanja vlage. Određivanje efektivnog koeficijenta difuzije vlage kroz materijal izvršeno je na osnovu usvojenih geometrijskih oblika komadića materijala (**Prilog 9.3**), izbora odgovarajuće jednačine (3.45), (3.46) ili (3.47) prikazane u **Poglavljju 3.2.**, i grafo-analitičke metode čiji je postupak opisan jednačinama od (3.48) do (3.52) i prikazan na **Slici 3.2.5** i **Slici 3.2.6** u okviru **Poglavlja 3.2.**

U slučaju posmatranja materijala jabuke, čiji su komadići oblikovani u geometriju kocke, vlaga krećući se od centra kocke ka površima kocke, ide se u svih šest mogućih smerova, tj. pozitivni i negativni smerovi x , y , i z -ose. Karakteristična dužina materijala koja figuriše u jednačini (3.45) je u tom slučaju $\frac{1}{2}$ dužine stranice kocke. Određivanje efektivnog koeficijenta difuzije u ovom slučaju, bazira se na pretpostavci da je prenošenje vlage podjednako zastupljeno u svih šest smerova. U slučaju materijala krompira, sečenog na tanke listove, debljina listova (u pravcu z -ose) je višestruko manja od preostale dve dimenzije (u pravcima x i y -ose), tako da se za pravac kretanja vlage usvaja pravac z -ose. Kretanje vlage u pravcu x i y -ose se zanemaruje. Karakteristična dužina materijala koja figuriše u jednačini (3.46) je u tom slučaju $\frac{1}{2}$ debljine lista. Određivanje efektivnog koeficijenta difuzije u ovom slučaju, bazira se na pretpostavci da se prenošenje vlage odvija u dva smera duž pravca z -ose. Kod materijala banane, čiji su komadići geometrijskog oblika cilindra, vlaga se od centralnih slojeva cilindra ka

površima cilindra prenosi u aksijalnom i radijalnom pravcu. Karakteristične dužine materijala koje figurišu u jednačini (3.47) su u tom slučaju $\frac{1}{2}$ visine cilindra i poluprečnik cilindra. Određivanje efektivnog koeficijenta difuzije u ovom slučaju, objedinjuje koeficijente difuzije u aksijalnom i radijalnom pravcu jednačinom (3.48).

Određivanje efektivnog koeficijenta difuzije vlage (Tabela 5.3.1) je izvršeno za svaki od ispitivanih materijala (jabuka, krompir, banana).

Tabela 5.3.1

Rezultati određivanja efektivnog koeficijenta difuzije vlage u materijalu

Oznaka eksperimenta	Režim sušenja			Efektivni koeficijent difuzije $D_{eff} \cdot 10^8 [m^2/s]$					
	T [°C]	RH [%]	w [m/s]	jabuka		krompir		banana	
				$z=10$ [mm]	$z=13$ [mm]	$z=2$ [mm]	$z=3$ [mm]	$z=6$ [mm]	$z=7$ [mm]
E1	35	10	1	4,94	3,77	1,91	1,90	7,16	6,96
E2	35	10	1.5	5,24	4,06	2,04	2,01	8,91	8,75
E3	35	10	2	5,58	4,29	2,17	2,12	10,70	10,50
E4	35	20	1	4,23	3,26	1,64	1,61	6,13	5,96
E5	35	20	1.5	4,50	3,43	1,75	1,72	8,18	7,95
E6	35	20	2	4,77	3,66	1,87	1,83	9,06	8,95
E7	35	30	1	3,89	2,97	1,51	1,50	5,58	5,57
E8	35	30	1.5	4,12	3,20	1,62	1,57	7,59	7,36
E9	35	30	2	4,40	3,37	1,72	1,68	8,91	8,75
E10	45	10	1	7,61	5,83	2,68	2,63	9,79	9,74
E11	45	10	1.5	7,98	6,17	2,82	2,77	14,80	12,10
E12	45	10	2	8,42	6,46	2,97	2,92	14,90	14,30
E13	45	20	1	6,73	5,20	2,39	2,34	8,32	8,15
E14	45	20	1.5	7,10	5,43	2,50	2,45	11,20	11,10
E15	45	20	2	7,47	5,71	2,63	2,59	12,40	12,30
E16	45	30	1	5,78	4,46	2,04	2,01	7,74	7,55
E17	45	30	1.5	6,09	4,69	2,14	2,12	10,50	10,30
E18	45	30	2	6,39	4,91	2,26	2,23	12,40	12,10
E19	55	10	1	10,80	8,34	3,83	3,72	15,80	15,50
E20	55	10	1.5	11,40	8,80	4,04	3,94	19,70	19,30
E21	55	10	2	12,10	9,31	4,28	4,20	23,70	23,10
E22	55	20	1	10,00	7,71	3,54	3,47	13,40	13,10
E23	55	20	1.5	10,60	8,17	3,73	3,65	18,10	17,90
E24	55	20	2	11,30	8,63	3,98	3,87	20,00	19,70
E25	55	30	1	8,52	6,57	3,00	2,96	12,40	12,10
E26	55	30	1.5	8,99	6,91	3,18	3,10	16,80	16,50
E27	55	30	2	9,57	7,37	3,38	3,32	19,90	19,50

Efektivni koeficijent difuzije raste sa povećanjem temperature vlažnog vazduha i brzinom strujanja vlažnog vazduha, a opada sa povećanjem relativne vlažnosti vazduha i karakteristične dimenzije komadića materijala. Najveće vrednosti efektivnih koeficijenata difuzije određene su kod eksperimenata E_{21} sa postavljenim parametrima

sušenja $T = 55^{\circ}\text{C}$, $RH = 10\%$ i $w = 2 \text{ m/s}$. Ovo se objašnjava maksimalnim vrednostima parametara temperature i brzine strujanja vlažnog vazduha, a minimalnom vrednošću parametra relativne vlažnosti vazduha, u posmatranim opsegu variranja ovih veličina. Najmanje vrednosti efektivnih koeficijenata difuzije određene su kod eksperimenata E_7 sa postavljenim parametrima sušenja $T = 35^{\circ}\text{C}$, $RH = 30\%$ i $w = 1 \text{ m/s}$. Ovo se objašnjava minimalnim vrednostima parametara temperature i brzine strujanja vlažnog vazduha, a maksimalnom vrednošću parametra relativne vlažnosti vazduha, u posmatranim opsegu variranja ovih veličina.

Efektivni koeficijent difuzije u opštem slučaju zavisi od svih parametara sušenja, uključujući pod specijalnim okolnostima i vremensku koordinatu, odnosno $D_{eff} = f(T, RH, w, z, \tau)$. Na osnovu dobijenih eksperimentalnih rezultata (**Tabela 5.1.1**), primećuje se da je promena $D_{eff}(\tau) = const.$, odnosno da je D_{eff} konstantna veličina u vremenu, bez obzira na odabrani režim sušenja. Ovim se dalja razmatranja dosta pojednostavljuju i svode na praćenje zavisnosti $D_{eff} = f(T, RH, w, z)$.

U tom cilju, na osnovu podataka prikazanih u **Tabeli 5.3.1**, formirana je **Tabela 5.3.2** u kojoj su eksperimentalno dobijene vrednosti D_{eff} prikazane tako da su po kolonama navedeni parametri (relativna vlažnost agensa i dimenzija komadića materijala) čijim se povećanjem ostvaruje negativan priraštaj D_{eff} , dok su po redovima navedeni parametri (brzina strujanja i temperatura agensa) čijim se povećanjem ostvaruje pozitivan priraštaj D_{eff} .

Vrednosti D_{eff} se kod ispitivanih materijala kreću u opsegu:

- Jabuka: $2,97 \times 10^{-8} \div 12,10 \times 10^{-8} \text{ [m}^2/\text{s]}$,
- Krompir: $1,50 \times 10^{-8} \div 4,28 \times 10^{-8} \text{ [m}^2/\text{s]}$,
- Banana: $5,57 \times 10^{-8} \div 23,7 \times 10^{-8} \text{ [m}^2/\text{s]}$.

Primećuje se da su ove vrednosti D_{eff} prilično ujednačene, što je posledica izabranih geometrijskih oblika materijala i njihovih dimenzija. To pruža mogućnost da se prema vrednosti D_{eff} međusobno upoređuju i različiti materijali u posmatranom domenu istraživanja.

Tabela 5.3.2

Efektivni koeficijent difuzije $D_{eff} \times 10^8 [m^2/s]$

j a b u k a

Parametri sušenja		$z=10 \text{ mm}$			$z=13 \text{ mm}$		
		$RH=10\%$	$RH=20\%$	$RH=30\%$	$RH=10\%$	$RH=20\%$	$RH=30\%$
$w=1 \text{ m/s}$	$T=35^\circ C$	4,94	4,23	min.3,89	3,77	3,26	min.2,97
	$T=45^\circ C$	7,61	6,73	5,78	5,83	5,20	4,46
	$T=55^\circ C$	10,80	10,00	8,52	8,34	7,71	6,57
$w=1.5 \text{ m/s}$	$T=35^\circ C$	5,24	4,50	4,12	4,06	3,43	3,20
	$T=45^\circ C$	7,98	7,10	6,09	6,17	5,43	4,69
	$T=55^\circ C$	11,40	10,60	8,99	8,80	8,17	6,91
$w=2 \text{ m/s}$	$T=35^\circ C$	5,58	4,77	4,40	4,29	3,66	3,37
	$T=45^\circ C$	8,42	4,47	6,39	6,46	5,71	4,91
	$T=55^\circ C$	max.12,10	11,30	9,57	max.9,31	8,63	7,37

k r o m p i r

Parametri sušenja		$z=2 \text{ mm}$			$z=3 \text{ mm}$		
		$RH=10\%$	$RH=20\%$	$RH=30\%$	$RH=10\%$	$RH=20\%$	$RH=30\%$
$w=1 \text{ m/s}$	$T=35^\circ C$	1,91	1,64	min.1,51	1,90	1,61	min.1,50
	$T=45^\circ C$	2,68	2,39	2,04	2,63	2,34	2,01
	$T=55^\circ C$	3,83	3,54	3,00	3,72	3,47	2,96
$w=1.5 \text{ m/s}$	$T=35^\circ C$	2,04	1,75	1,62	2,01	1,72	1,57
	$T=45^\circ C$	2,82	2,50	2,14	2,77	2,45	2,12
	$T=55^\circ C$	4,04	3,73	3,18	3,94	3,65	3,10
$w=2 \text{ m/s}$	$T=35^\circ C$	2,17	1,87	1,72	2,12	1,83	1,68
	$T=45^\circ C$	2,97	2,63	2,26	2,92	2,59	2,23
	$T=55^\circ C$	max.4,28	3,98	3,38	max.4,20	3,87	3,32

b a n a n a

Parametri sušenja		$z=6 \text{ mm}$			$z=7 \text{ mm}$		
		$RH=10\%$	$RH=20\%$	$RH=30\%$	$RH=10\%$	$RH=20\%$	$RH=30\%$
$w=1 \text{ m/s}$	$T=35^\circ C$	7,16	6,13	min.5,58	6,96	5,96	min.5,57
	$T=45^\circ C$	9,79	8,32	7,74	9,74	8,15	7,55
	$T=55^\circ C$	15,80	13,40	12,40	15,50	13,10	12,10
$w=1.5 \text{ m/s}$	$T=35^\circ C$	8,91	8,18	7,59	8,75	7,95	7,36
	$T=45^\circ C$	14,80	11,20	10,50	12,10	11,10	10,30
	$T=55^\circ C$	19,70	18,10	16,80	19,30	17,90	16,50
$w=2 \text{ m/s}$	$T=35^\circ C$	10,70	9,06	8,91	10,50	8,95	8,75
	$T=45^\circ C$	14,90	12,40	12,40	14,30	12,30	12,10
	$T=55^\circ C$	max.23,70	20,00	19,9	max.23,10	19,70	19,50

U daljoj analizi, u nekoliko karakterističnih slučajeva, praćena je promena $D_{eff} = f(T, RH, w, z)$ prilikom variranja uticajnih veličina.

Variranjem vrednosti RH sa 10% na 30%, vrednost D_{eff} se kod svih materijala smanjuje za oko 20%, bez obzira na geometriju i dimenziju materijala. Ovakav rezultat ukazuje na mogućnost predvidivosti oscilacije vrednosti D_{eff} u slučajevima varijacije parametra RH . Sa druge strane, variranjem karakteristične dimenzije materijala z za određeni procenat, nije moguće predvideti kako će varirati vrednost D_{eff} pri

nepromenjenoj vrednosti RH . Na primer, ukoliko posmatramo promenu dimenzije kockice jabuke z sa 10 mm na 13 mm (što znači povećanje za 30%), vrednost D_{eff} se umanjila za oko -23% pri stalnoj RH od 10%. Međutim, u slučaju promene dimenzije lista krompira z sa 2 mm na 3 mm (što znači povećanje za 50%), vrednost D_{eff} se smanjila za oko 2% pri stalnoj RH od 10%. Slično se dešava i kod materijala banane. Ovakav rezultat ukazuje na to da su geometrija i dimenzija materijala specifičniji parametri u smislu predvidivosti njihovog uticaja na oscilacije vrednosti D_{eff} u odnosu na RH . Ukoliko se posmatraju brzina strujanja (w) i temperatura (T) vlažnog vazduha, čija povećanja utiču na povećanje vrednosti D_{eff} , može se uočiti sledeće. Bez obzira na vrstu materijala i vrednost w , povećanjem T sa $T = 35^{\circ}\text{C}$ na $T = 55^{\circ}\text{C}$ (što znači povećanje za 66%), vrednost D_{eff} se povećala za oko 115%. Na sličan način, povećanjem w sa $w = 1\text{ m/s}$ na $w = 2\text{ m/s}$ (što znači povećanje za 100%), vrednost D_{eff} se povećala za oko 25% bez obzira na T i vrstu materijala. Ovakav rezultat ukazuje na to da uticaj promena w i T na varijaciju D_{eff} u posmatranom domenu istraživanja može biti predvidiv.

Na osnovu prethodnog razmatranja se može konstatovati da u posmatranom domenu istraživanja, termomehantičke osobine vlažnog vazduha (T, RH, w) na predvidiv način utiču na promenu efektivnog koeficijenta difuzije D_{eff} , dok oblik i dimenzije materijala imaju složeniji uticaj. Ukoliko bi pri stalnoj dimenziji materijala (z) varirali parametre (T, RH, w) vlažnog vazduha za isti ili približno isti procenat, mogla bi se utvrditi veličina uticaja svakog od parametara na promenu D_{eff} (**Tabela 5.3.3**).

Tabela 5.3.3
Uticaj varijacije vrednosti parametara sušenja na promenu vrednosti efektivnog koeficijenta difuzije

Parametar sušenja	Variranje parametra sušenja	Promena efektivnog koeficijenta difuzije		
		jabuka <i>10 mm</i>	krompir <i>2 mm</i>	banana <i>6 mm</i>
Temperatura	≈ +60%	+118%	+100%	+120%
Relativna vlažnost	+100%	-14%	-14%	-14%
Brzina strujanja	+100%	+13%	+13%	+50%

Kod svih materijala vrednost T najviše utiče na vrednosti efektivnog koeficijenta difuzije, za razliku od ostala dva parametra (RH i w). Relativna vlažnost (RH) kod

svih materijala ima ujednačen uticaj na promenu vrednosti D_{eff} . Uticaj RH i w na promenu vrednosti D_{eff} kod materijala jabuke i krompira je prilično ujednačen ali različite prirode, obzirom na to da sa povećanjem RH vrednosti D_{eff} opadaju, dok sa povećanjem w rastu vrednosti D_{eff} . Kod materijala banane uticaj w na porast vrednosti D_{eff} je daleko veći nego kod jabuke i krompira, što se može objasniti većim razlikama u osobinama i strukturi materijala. Ovakva dešavanja mogu biti manje ili više izražena u zavisnosti od dela domena u kome se odgovarajuća varijacija posmatra. Tako na primer, ukoliko posmatramo materijal jabuku u domenu nižih temperatura sušenja ($T \rightarrow 35^{\circ}C$) uticaj RH na vrednosti D_{eff} je veći ($\approx -14\%$) nego u domenu viših temperatura sušenja ($T \rightarrow 55^{\circ}C$) kada je isti uticaj dosta manji ($\approx -7\%$). Takođe, u domenu nižih brzina strujanja agensa ($w \rightarrow 1 m/s$) uticaj RH na vrednosti D_{eff} je veći ($\approx -14\%$) nego u domenu većih brzina strujanja agensa sušenja ($w \rightarrow 2 m/s$) kada je isti uticaj manji ($\approx -11\%$).

Ovakav rezultat ukazuje na to da kod pojedinih materijala postoji mogućnost zanemarivanja nekog od parametara ukoliko je u posmatranom domenu istraživanja njegov uticaj manji u odnosu na ostale parametre. Na primer, u analizama sušenja materijala banane, uticaj RH (od oko $\approx -15\%$) je daleko manji od uticaja T (preko 100%) i uticaja w (preko 50%). Takođe, u domenu manjih vrednosti T i w , uticaj variranja vrednosti RH na vrednost D_{eff} (od oko $\approx -15\%$) je veći u nego u domenu većih vrednosti T i w (od oko $\approx -8\%$). Stoga, kod materijala banane, veličina uticaja RH se može zanemariti u čitavom posmatranom domenu istraživanja, naročito u domenu većih vrednosti T i w . U slučajevima sušenja materijala jabuke i krompira, uticaj RH se ne sme zanemariti u domenu nižih temperatura sušenja.

☑ Ovakvo dobijeni rezultati su u skladu sa postavljenim pretpostavkama o mogućnosti zanemarivanja pojedinih uticajnih veličina prilikom analiziranja procesa sušenja, što je veoma čest slučaj u istraživanjima drugih autora, **Velić (2004)**, **Lengyel (2007)**, **Doymaz (2009)**, **Seiedlou (2010)**, **Meisami-asl (2010)**.

5.4 Određivanje parametara matematičkog modela

Matematički oblik jednačine (3.38) prikazane u **Poglavlju 3.2**, čiji je konačni oblik funkcionalna zavisnost $MR = f(\tau)$, korišćen je za formiranje krive kinetike sušenja. Funkcija promene sadržaja vlage u materijalu tokom vremena u svom bezdimenzionom obliku mora biti takva da se njena rešenja i grafički prikaz u zadovoljavajućoj meri poklapaju sa eksperimentalnim rezultatima prikazanim u **Poglavlju 5.1** i **Prilogu 9.13**. Eksperimentalni rezultati se mogu iskoristiti za određivanje nepoznatih parametara u jednačini oblika $MR = f(\tau)$.

Postupak određivanja parametara u jednačinama modela izveden je iz dva dela.

Prvi korak podrazumeva, formiranje matematičke zavisnosti $MR = f(\tau)$. Pronalaženje nepoznatih parametara u jednačini izvedeno je tako da odstupanje rešenja modela od eksperimentalnih rezultata bude što manje. Formulisan je matematički model oblika (5.1):

$$MR = f(\tau) = \exp(A_0 + A_1 \cdot \tau), \quad (5.1)$$

gde su A_0 i A_1 nepoznati parametri jednačine koje je potrebno odrediti.

Matematički model promene sadržaja vlage u bezdimenzionom obliku tokom vremena, ima oblik eksponencijalne matematičke funkcije (5.1), što se, generalno gledano, slaže u velikoj meri sa modelima predstavljanim u **Tabeli 2.2.1**, od kojih su većina upravo eksponencijalne funkcije. Rezultati računskog određivanja parametara A_0 i A_1 u jednačini (5.1) za svaki od eksperimenata sušenja jabuke, prikazani su za dimenzije komadića materijala kockice 10 mm i 13 mm tabelarno (**Tabela 5.4.1** i **Tabela 5.4.2**) i grafički (**Slika 5.4.1a** i **Slika 5.4.1b**).

Drugi korak podrazumeva definisanje parametara u jednačini modela (5.1), preko odgovarajućeg korelacionog modela (5.2) koji predstavlja funkcionalnu zavisnost između osnovnih termomehaničkih veličina koje definišu režim sušenja, a to su temperatura, relativna vlažnost i brzina strujanja vazduha koji dospeva na vlažan materijal.

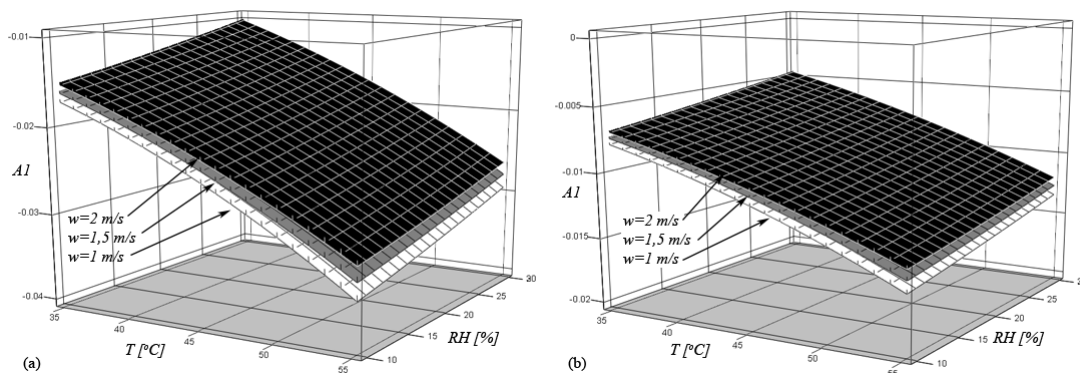
$$A_1 = f(T, RH) = B_0 + B_1 \cdot T^{B_2} + B_3 \cdot RH^{B_4}, \quad (5.2)$$

gde su B_0, B_1, B_2, B_3 i B_4 nepoznati parametri jednačine koje je potrebno odrediti.

Tabela 5.4.1

Rezultati određivanja nepoznatih parametara u jednačini matematičkog modela (*jabuka, kocka 10 mm*)

Oznaka eksperimenta	Režim sušenja			Parametri						
	w [m/s]	T [°C]	RH [%]	$MR = \exp(A_0 + A_1 \cdot \tau)$		$A_1 = B_0 + B_1 \cdot T^{B_2} + B_3 \cdot RH^{B_4}$				
				A_0	A_1	B_0	B_1	B_2	B_3	B_4
E1	1	35	10	8.75E-05	-0.01460					
E4	1	35	20	-3.74E-04	-0.01651					
E7	1	35	30	-3.29E-04	-0.01145					
E10	1	45	10	-4.89E-05	-0.02248					
E13	1	45	20	2.93E-04	-0.01990					
E16	1	45	30	1.10E-03	-0.01710					
E19	1	55	10	-4.50E-04	-0.03196					
E22	1	55	20	4.56E-04	-0.02960					
E25	1	55	30	7.98E-04	-0.02520					
E2	1.5	35	10	-3.27E-04	-0.01550					
E5	1.5	35	20	4.24E-04	-0.01327					
E8	1.5	35	30	-1.67E-04	-0.01224					
E11	1.5	45	10	-4.77E-05	-0.02360					
E14	1.5	45	20	7.94E-06	-0.02090					
E17	1.5	45	30	9.64E-05	-0.01799					
E20	1.5	55	10	-3.17E-04	-0.03370					
E23	1.5	55	20	-2.89E-04	-0.03128					
E26	1.5	55	30	-6.36E-05	-0.02660					
E3	2	35	10	-3.74E-04	-0.01650					
E6	2	35	20	1.09E-04	-0.01413					
E9	2	35	30	-1.45E-04	-0.01300					
E12	2	45	10	1.06E-04	-0.02487					
E15	2	45	20	-7.50E-06	-0.02204					
E18	2	45	30	2.28E-04	-0.01890					
E21	2	55	10	-1.46E-04	-0.03590					
E24	2	55	20	2.00E-04	-0.03329					
E27	2	55	30	-2.30E-04	-0.02820					



Slika 5.4.1 Grafički prikaz korelacija temperature, relativne vlažnosti vazduha i brzine strujanja vazduha

a) jabuka, kocka 10 mm; b) jabuka, kocka 13 mm

Tabela 5.4.2Rezultati određivanja nepoznatih parametara u jednačini matematičkog modela (*jabuka, kocka 13 mm*)

Oznaka eksperimenta	Režim sušenja			Parametri						
	w [m/s]	T [°C]	RH [%]	$MR = \exp(A_0 + A_1 \cdot \tau)$		$A_1 = B_0 + B_1 \cdot T^{B_2} + B_3 \cdot RH^{B_4}$				
				A_0	A_1	B_0	B_1	B_2	B_3	B_4
E1	1	35	10	2.17E-05	-0.00663					
E4	1	35	20	-5.35E-05	-0.00567					
E7	1	35	30	2.00E-04	-0.00522					
E10	1	45	10	-1.08E-03	-0.01021					
E13	1	45	20	-3.62E-04	-0.00906					
E16	1	45	30	8.95E-04	-0.00780					
E19	1	55	10	-1.42E-04	-0.00861					
E22	1	55	20	-5.95E-04	-0.01347					
E25	1	55	30	4.00E-04	-0.01148					
E2	1.5	35	10	6.18E-05	-0.00706					
E5	1.5	35	20	1.11E-04	-0.00600					
E8	1.5	35	30	1.20E-04	-0.00557					
E11	1.5	45	10	-1.29E-03	-0.01072					
E14	1.5	45	20	-1.14E-03	-0.00951					
E17	1.5	45	30	4.03E-04	-0.00819					
E20	1.5	55	10	-1.05E-03	-0.01535					
E23	1.5	55	20	-8.80E-04	-0.01423					
E26	1.5	55	30	2.47E-04	-0.01212					
E3	2	35	10	-4.48E-04	-0.00751					
E6	2	35	20	-4.00E-04	-0.00642					
E9	2	35	30	-7.96E-05	-0.00592					
E12	2	45	10	-1.80E-03	-0.01126					
E15	2	45	20	-2.09E-03	-0.00999					
E18	2	45	30	-1.42E-04	-0.00861					
E21	2	55	10	-1.08E-03	-0.01629					
E24	2	55	20	-1.36E-03	-0.01507					
E27	2	55	30	6.85E-05	-0.01287					

Jednačina (5.2) je jednačina zakrivljene površi, što se i primećuje na **Slici 5.4.1**. U celom domenu variranja parametara sušenja (temperature i relativne vlažnosti vazduha), zakrivljene površi (**Slika 5.4.1**) su na približno istom međusobnom rastojanju. To znači da se povećanje brzine strujanja vazduha, kao parametara sušenja, manifestuje translatorskim pomeranjem zakrivljene površi ka većim vrednostima parametra A_1 .

Određivanje svih prethodno pomenutih parametara i korelacija u jednačinama izvršeno je pomoću softverskog paketa *Table Curve* čiji je detaljniji opis dat u **Prilogu 9.15**. Rezultati određivanja nepoznatih parametara u jednačinama modela vlažnih materijala krompira i banane su na sličan način predstavljeni u **Prilogu 9.16**.

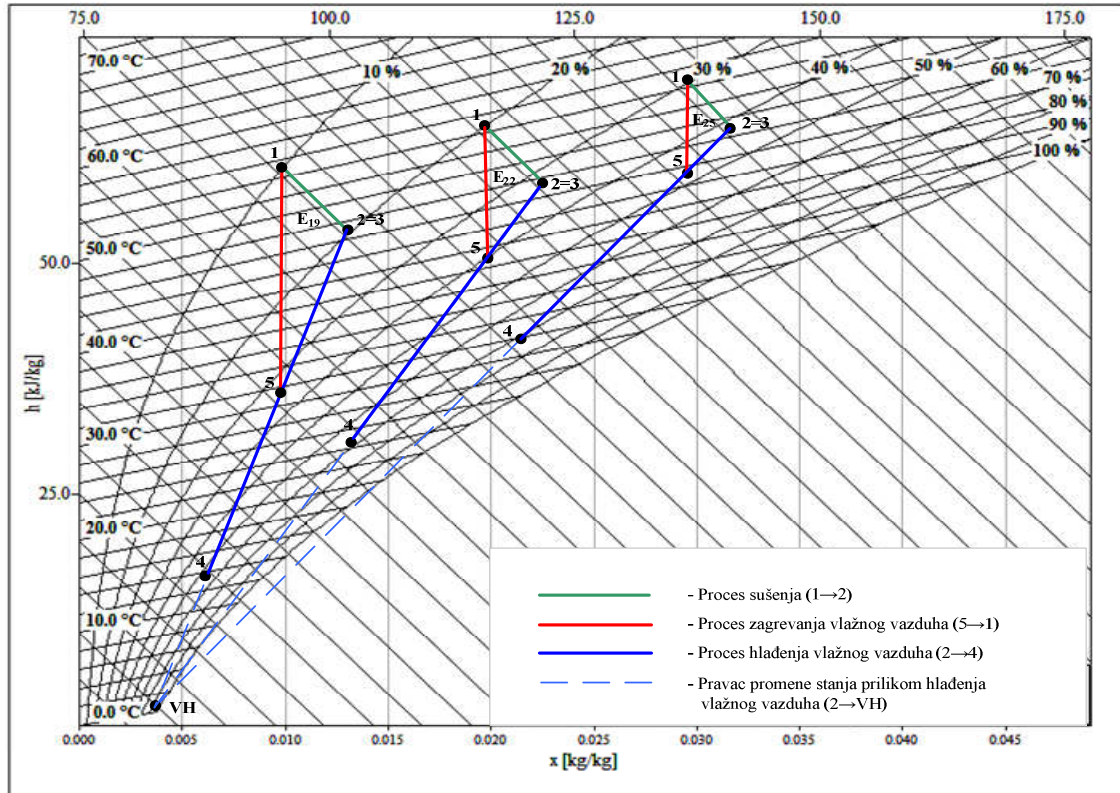
5.5 Energija utrošena za zagrevanje vlažnog vazduha

Analiza rezultata, koji se odnose na određivanje utrošene energije u procesu sušenja, zahteva istovremeno sagledavanje tokova energije u sistemu i termomehaničkih osobina i načina cirkulacije vlažnog vazduha u sistemu. Imajući u vidu funkcionalnu šemu usvojenog *HPD* sistema (**Slika 3.3.1** u **Poglavlju 3.3.1**), može se konstatovati sledeće:

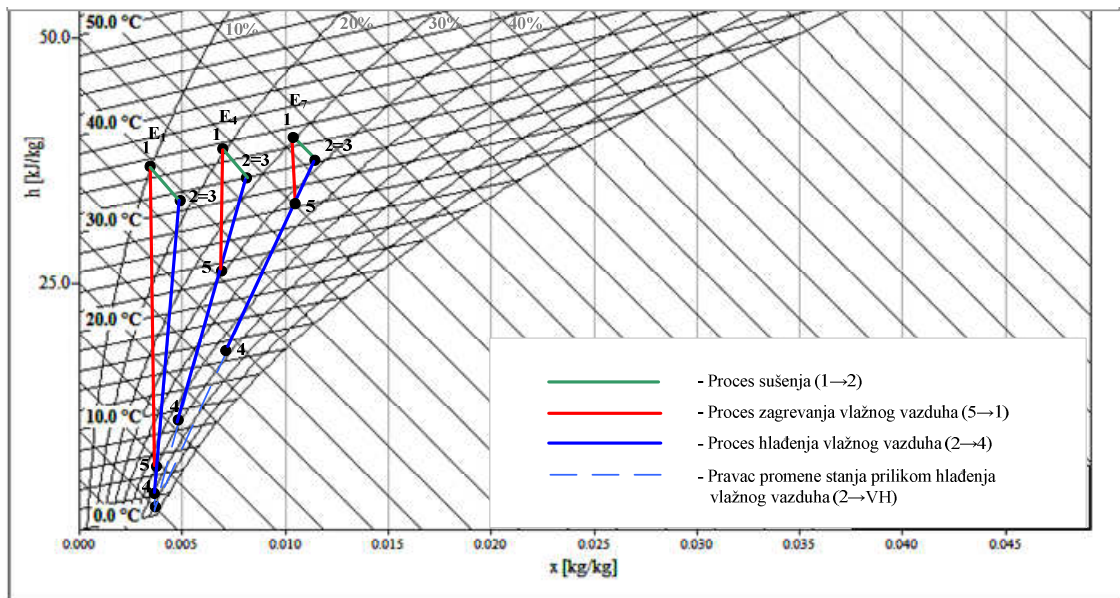
- vlažan vazduh, koji recirkuliše u sistemu, toplotu prima od primarnog kondenzatora KD_1 (u eksperimentu od vodenog grejača *VG*), a predaje je isparivaču *I* (u eksperimentu vodenom hladnjaku *VH*);
- uticaj ventilatora sušare na povišenje temperature vlažnog vazduha je veoma mali ($\leq 0.1\%$) tako da se može zanemariti;

Obzirom na to da se u ovom istraživanju razmatra potpuna recirkulacija vlažnog vazduha u sistemu, snaga primarnog kondenzatora i snaga isparivača u svakom trenutku vremena moraju biti međusobno jednake. Maseni protok vazduha koji struji preko primarnog kondenzatora je određen brzinom sušenja i stalan je u toku vremena. Za razliku od njega, maseni protok vazduha koji struji preko isparivača se tokom vremena menja i zavisi od količine vlage koju želimo ukloniti iz sistema. Regulacija masenog protoka se vrši preusmeravanjem dela vazdušne struje kroz baj-pas deonicu, čime se deo vlage u vlažnom vazduhu zaobilaženjem isparivača namerno zadržava u sistemu, tj. recirkuliše. Nakon toga, ove dve struje vazduha se mešaju, čime se postiže zadržavanje željene količine vlage u sistemu. Na taj način se eliminiše potreba za unošenjem vlage u sistem (sistemom za ovlaživanje vazduha), nakon postizanja radnih parametara sušare. Sva stanja kroz koja vlažan vazduh prolazi tokom odvijanja raznih procesa u sušari, moguće je prikazati na *Molier*-ovom dijagramu za vlažan vazduh, za svaki eksperiment posebno (**Slika 5.5.1** i **Slika 5.5.2**). Veličina potrebnog toplotnog protoka za zagrevanje vlažnog vazduha zavisi od odabranog režima sušenja i vrste materijala. Odnos masenih protoka vazdušnih struja koje prolaze kroz baj-pas deonicu i kroz isparivač, zavisi od željenog režima sušenja. Takođe, u svakom trenutku vremena, količina vlage koja iz materijala pređe u vazdušnu struju mora biti jednaka količini vlage kondenzovane na površini isparivača, što znači da će temperatura vlažnog vazduha na izlazu iz razmenjivača (stanje 4) mora biti jednaka ili manja temperaturi tačke rose stanja 1 koje definiše željeni režim sušenja. Kako vreme sušenja odmiče, tako će se stanje 2 (po liniji

2 → 1) i stanje 5 (po liniji 5 → 1) polako pomerati sve do trenutka potpunog poklapanja ($1 \equiv 2 \equiv 5$) na kraju procesa sušenja. Za to vreme stanje 4 će uvek biti na istoj temperaturi, ali će protok vazduha preko isparivača biti u konstantnom opadanju do potpunog prestanka.



Slika 5.5.1 Prikaz ciklusa sušenja u *Molier*-ovom dijagramu kod režima sa $T = 55^{\circ}\text{C}$ i relativnim vlažnostima $RH = 10, 20, 30\%$

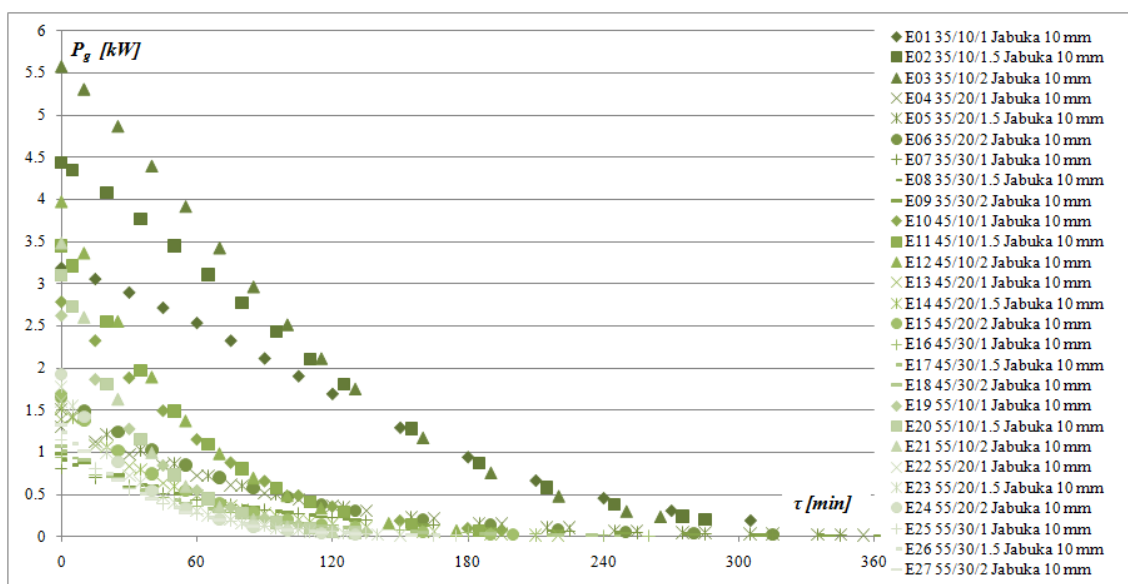


Slika 5.5.2 Prikaz ciklusa sušenja u *Molier*-ovom dijagramu kod režima sa $T = 35^{\circ}\text{C}$ i relativnim vlažnostima $RH = 10, 20, 30\%$

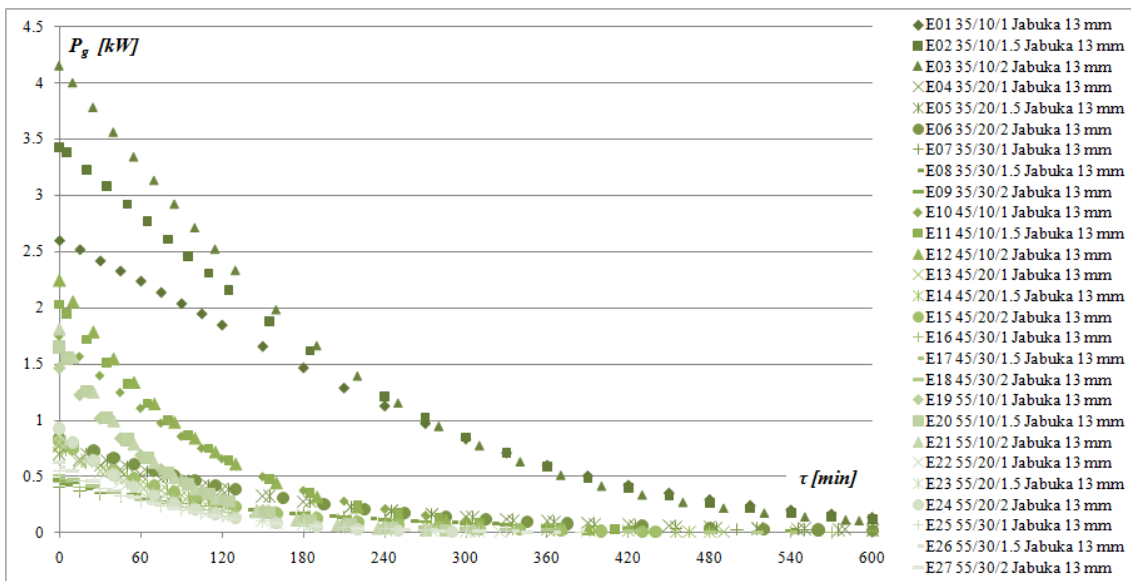
Na **Slici 5.5.1** i **Slici 5.5.2** vrednost masenog protoka vazduha kroz baj-pas deonicu \dot{m}_{aBP} je srazmerna dužini duži 4–5, a vrednost masenog protoka vazduha preko isparivača \dot{m}_{al} je srazmerna dužini duži 3–5.

Ukoliko se međusobno uporede režimi sušenja koji imaju istu temperaturu sušenja od $T = 55^\circ\text{C}$, a različite relativne vlažnosti $RH = 10, 20, 30\%$ (**Slika 5.5.1**), primećuje se da sa smanjenjem RH potrebna snaga za zagrevanje (ujedno i za hlađenje) vlažnog vazduha raste i da se potreban protok vazduha preko isparivača povećava (protok kroz baj-pas deonicu se smanjuje). Tako da se odnos masenih protoka vazduha kroz baj-pas deonicu i kroz isparivač sa početnih $\dot{m}_{aBP} : \dot{m}_{al} \approx 3 : 1$ (kod eksperimenta E_{25}) smanjuje na $\dot{m}_{aBP} : \dot{m}_{al} \approx 1 : 1$ (kod eksperimenta E_{19}). Međutim, ukoliko se ista analiza uradi za temperaturu vlažnog vazduha $T = 35^\circ\text{C}$ (**Slika 5.5.2**), primećuje se da sa smanjenjem RH potrebna snaga za zagrevanje (ujedno i za hlađenje) vlažnog vazduha raste još više, a da se potreban protok vazduha preko isparivača povećava od odnosa $\dot{m}_{aBP} : \dot{m}_{al} \approx 3 : 1$ (kod eksperimenta E_7), do $\dot{m}_{aBP} : \dot{m}_{al} \approx 1 : 16$ (kod eksperimenta E_1).

Za svaki od režima sušenja (**Prilog 9.3**), određena je toplotna snaga grejača (P_g) vlažnog vazduha tokom procesa sušenja za vlažan materijal jabuke, sa dimenzijom kocke uzorka od 10 mm (**Slika 5.5.3a**) i 13 mm (**Slika 5.5.3b**).

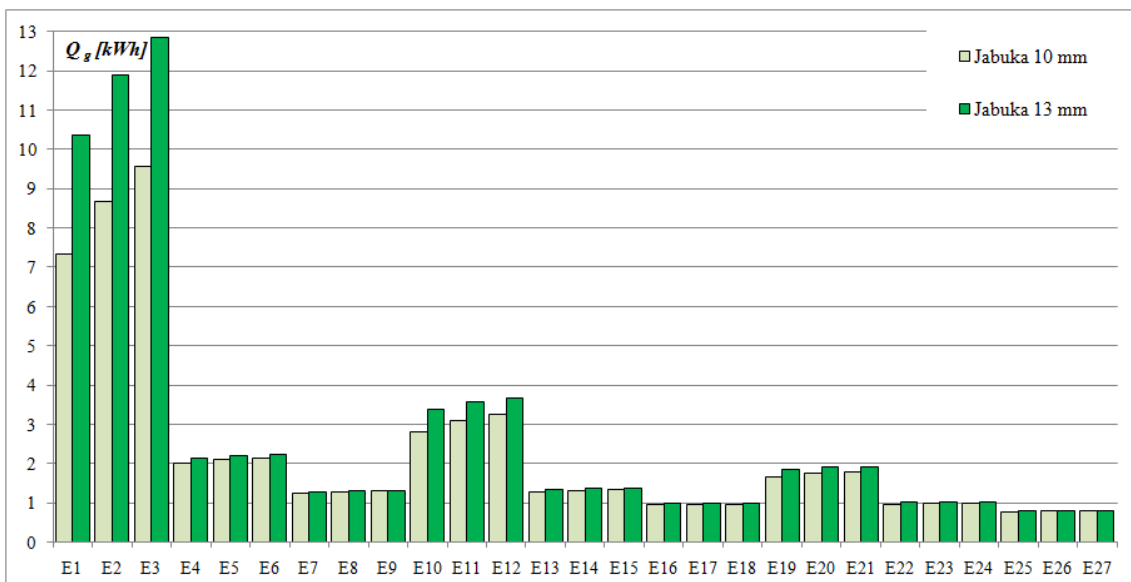


Slika 5.5.3a Toplotni protok utrošen za zagrevanje vlažnog vazduha (jabuka, kocka 10 mm)



Slika 5.5.3b Toplotni protok utrošen za zagrevanje vlažnog vazduha (jabuka, kocka 13 mm)

Na osnovu podataka o dovedenom toplotnom protoku za zagreva vlažnog vazduha tokom procesa (Slika 5.5.3a i Slika 5.5.3b), određene su dovedene količine toplote (Q_g) u svakom pojedinačnom eksperimentu (Slika 5.5.4).



Slika 5.5.4 Količina toplote utrošena za zagrevanje vlažnog vazduha (jabuka, kocke 10 i 13 mm)

Rezultati eksperimentalnog istraživanja (Slike 5.5.3a do Slike 5.6.4) potvrđuju da se najveće potrebe za energijom javljaju upravo u eksperimentima sa nižim vrednostima T i RH . Prilikom tumačenja ovih rezultata, treba imati u vidu i to da je laboratorijska

instalacija dizajnirana tako da je minimalna moguća ostvariva temperatura površine VH (**Slika 5.5.1** i **Slika 5.5.2**) $T_{VH} = 0^{\circ}C$ što je veoma blisko temperaturi tačke rose za stanje vlažnog vazduha eksperimentalne postavke E_1 , E_2 i E_3 ($T = 35^{\circ}C$, $RH = 10\%$). U tom slučaju, laboratorijska instalacija ulaže dodatni napor da postigne željeni učinak u procesu obzirom da radi na granici kapaciteta (**Slika 5.5.3**). Ovim se može objasniti veća količina toplote koja je dovedena vlažnom vazduhu u eksperimentima E_1 , E_2 i E_3 (**Slika 5.5.4**), sa temperaturom sušenja $T = 35^{\circ}C$, u odnosu na ostale eksperimentalne postavke.

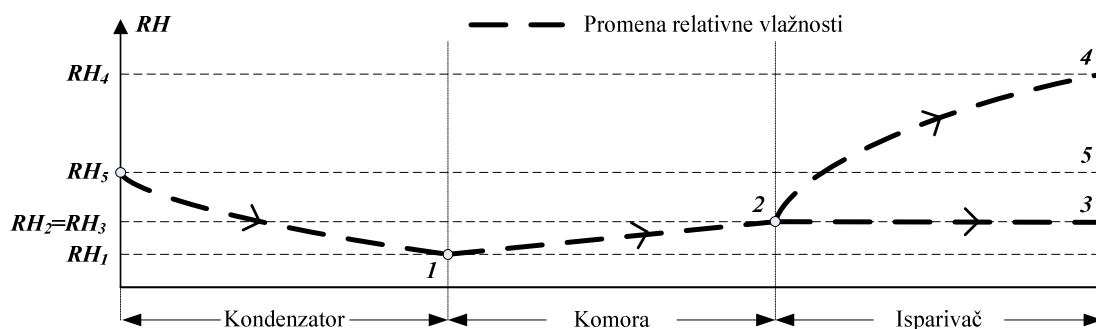
Rezultati određivanja potrebnih snaga grejača prilikom sušenja vlažnih materijala krompira i banane su na sličan način predstavljeni u **Prilogu 9.17**.

5.6 Energija utrošena za hlađenje vlažnog vazduha uz izdvajanje vlage

Vlažan vazduh koji prelazi preko površine isparivača (u eksperimentu hladnjaka) se hladi se uz izdvajanje vlage. Ukupni odvedeni toplotni protok se troši na snižavanje temperature vlažnog vazduha i na kondenzovanje vlage iz vlažnog vazduha na površini isparivača. Kondenzovana vlaga se potom uklanja iz sistema.

Imajući u vidu da vlažan vazduh u sušari recirkuliše u zatvorenom kanalskom sistemu sušare, ukupni odvedeni i dovedeni toplotni protoci vlažnom vazduhu moraju biti međusobno jednaki, kako bi bila zadovoljena jednačina energetske bilansa sistema. To znači da su snage isparivača i primarnog kondenzatora međusobno uslovljene i jednake.

Odvedeni toplotni protok, koji se troši na kondenzovanje vlage na površini isparivača, tokom vremena ima promenljive vrednosti, koje zavise od količine vlage koja je iz vlažnog materijala prenešena u vlažan vazduh. To znači da masa vlage koja iz vlažnog materijala dospe u vlažan vazduh, mora biti kondenzovana na površini isparivača i uklonjena iz sistema, kako bi bila zadovoljena jednačina masenog bilansa sistema. Na sličan način kako je promena temperature vlažnog vazduha predstavljena temperaturnim dijagramom (**Slika 2.2.3**) u **Poglavlju 2.2**, može se predstaviti i promena relativne vlažnosti vlažnog vazduha u sistemu (**Slika 5.6.1**).



Slika 5.6.1 Dijagram promene relativne vlažnosti vazduha u sistemu

Relativna vlažnost vazduha u stanju 5, dobijena je mešanjem vazdušnih struja stanja 3 i stanja 4 vlažnog vazduha, u tačno onolikom odnosu koliko je potrebno da se posle zagrevanja vlažnog vazduha stanja 5 u kondenzatoru (promena stanja $5 \rightarrow 1$) dostigne vrednost relativne vlažnosti vazduha u stanju 1, zadate željenim režimom sušenja (**Prilog 9.6**). Ovim je postignuta recirkulacija potrebne količine vlage u sistemu.

U praksi postoje i druge konfiguracije sistema u kojima ili nema recirkulacije vazduha ili je recirkulacija delimična (**Tabela 2.3.1** u **Poglavlju 2.3**), međutim, pored povišenog utroška energije u takvim sistemima, javljaju se i problemi održavanja nepromenljivih parametara sušenja usled oscilacija ulaznih veličina (T i RH) koje određuju režim sušenja, naročito usled poteškoće održavanja nepromenljive vrednosti RH .

U slučaju da recirkulacija vlažnog vazduha u sistemu nije potpuna, to bi značilo da deo vlage u parnom stanju u sistem dospeva iz okoline sa strujom ventiliranog vlažnog vazduha. U tom slučaju bi uspostavljanje željene vrednosti relativne vlažnosti stanja 1 (utvrđene režimom sušenja) bilo otežano jer bi zahtevalo postojanje dopunskih komponenti (komora za ovlaživanje, i slično) u sistemu, kojima bi se uticalo na vrednost relativne vlažnosti vazduha stanja 5. Takođe, snage isparivača i kondenzatora ne bi morale biti međusobno jednake, i zavisile bi od položaja i uloge isparivača u sistemu sušenja, **Bannister (2002)**.

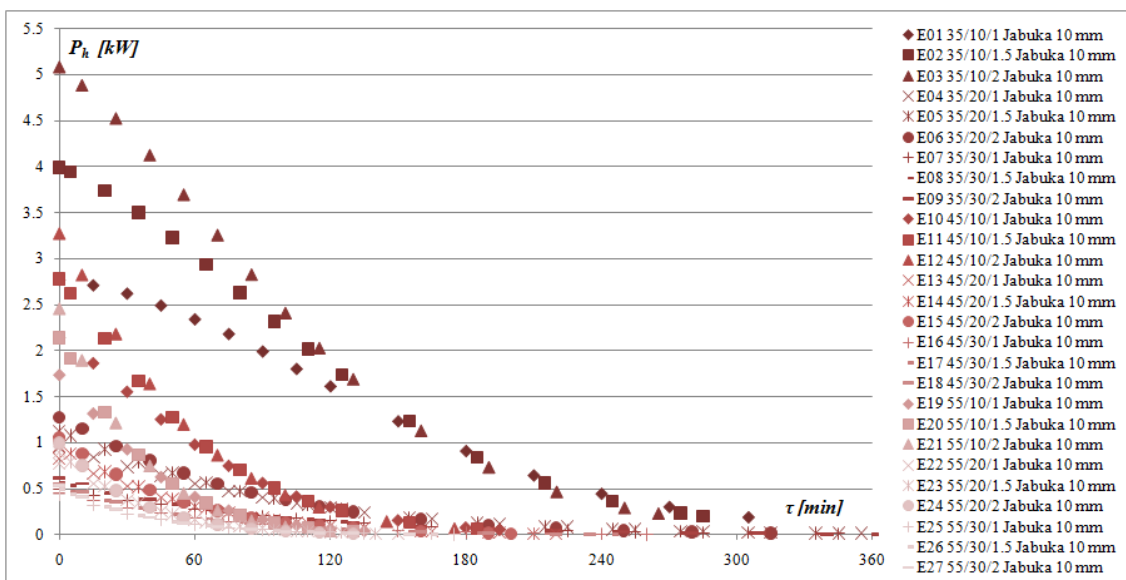
U ovom istraživanju, vlaga se iz sistema sušare uklanja u tečnom stanju što omogućava rekuperaciju celokupnog toplotnog protoka utrošenog na kondenzaciju vlage na površini isparivača, dok samo mali deo toplotnog protoka utrošenog na snižavanje temperature vlažnog vazduha ne biva obuhvaćen.

U cilju ostvarenja procesa sa potpunom recirkulacijom, vlažan vazduh se mora naizmenično zagrevati i hladiti, što u kombinaciji sa usvojenim konceptom *HPD* sistema (Slika 3.3.1) u Poglavlju 3.3.1, pruža odličnu mogućnost za rekuperaciju energije. U ovom slučaju, primarni kondenzator i isparivač se nalaze u struji vlažnog vazduha koja u sistemu potpuno recirkuliše (Slika 2.2.2). Dobijeni eksperimentalni rezultati ukazuju na pogodnosti postojanja potpune recirkulacije vazduha, kako sa stanovišta rekuperacije energije, tako i sa stanovišta kontrole parametara sušenja.

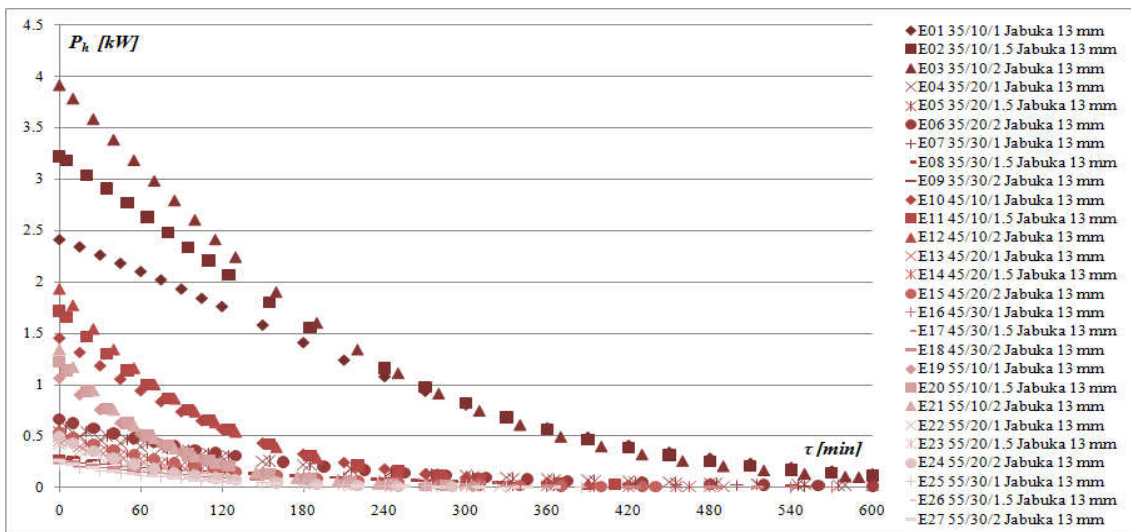
☑ Dobijeni rezultati su u skladu sa postavljenim pretpostavkama o pogodnostima postojanja recirkulacije vlažnog vazduha u sistemima konvektivnog sušenja.

Za svaki od režima sušenja (Prilog 9.3), određen je odvedeni toplotni protok za hlađenje vlažnog vazduha (P_h) za vlažan materijal jabuke, sa dimenzijom kocke uzorka od 10 mm (Slika 5.6.2a) i 13 mm (Slika 5.6.2b). Takođe, određen je i toplotni protok utrošen za kondenzovanje vlage na površini hladnjaka (P_w) za vlažan materijal jabuke, sa dimenzijom kocke uzorka od 10 mm (Slika 5.6.3a) i 13 mm (Slika 5.6.3b).

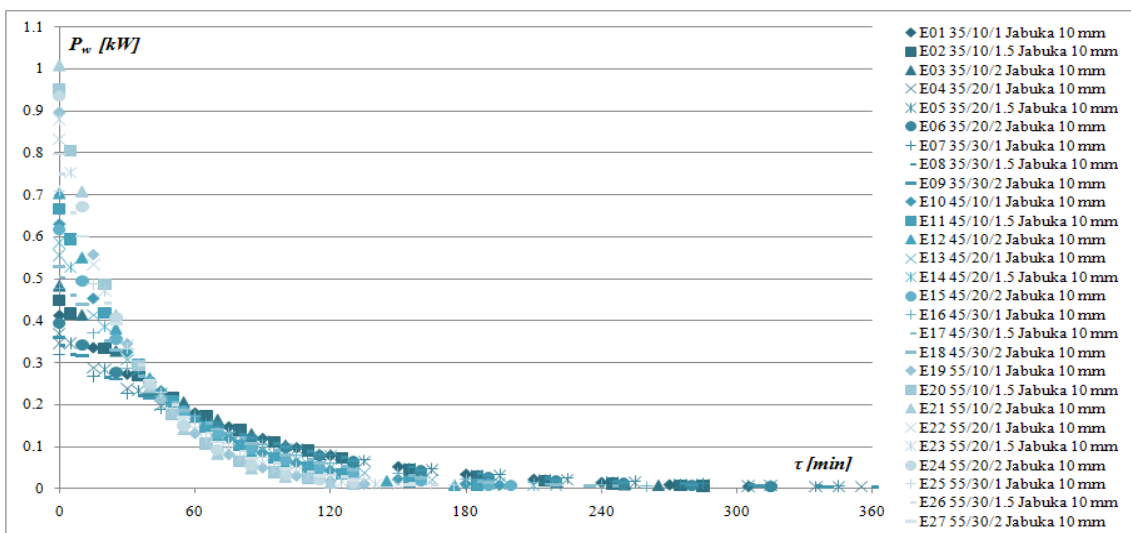
Zbir toplotnog protoka utrošenog na hlađenje vlažnog vazduha (P_h) i toplotnog protoka utrošenog za kondenzovanje vlage (P_w), predstavlja ukupni odvedeni toplotni protok, odnosno snagu isparivača (P_I).



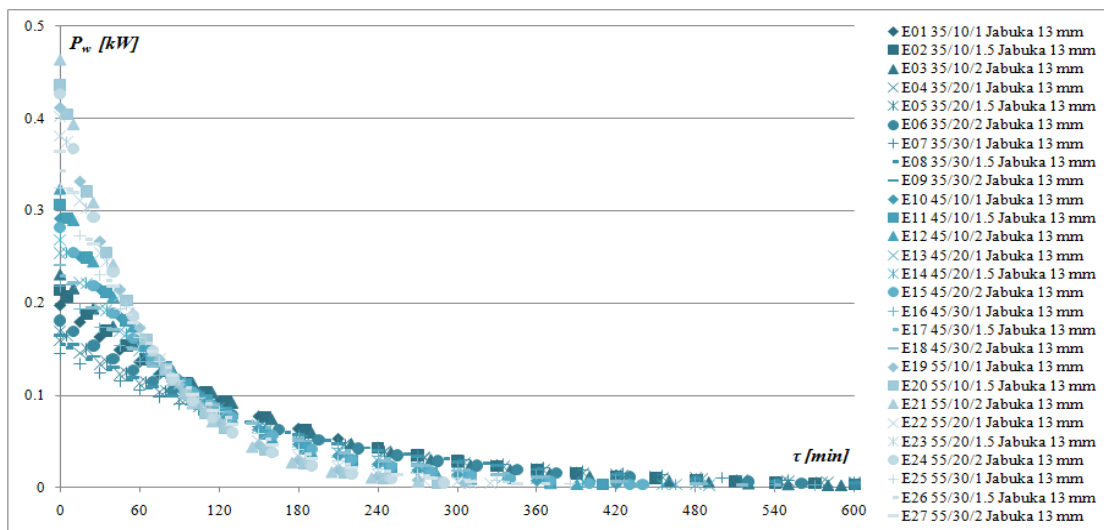
Slika 5.6.2a Toplotni protok utrošen za hlađenje vlažnog vazduha (jabuka, kocka 10 mm)



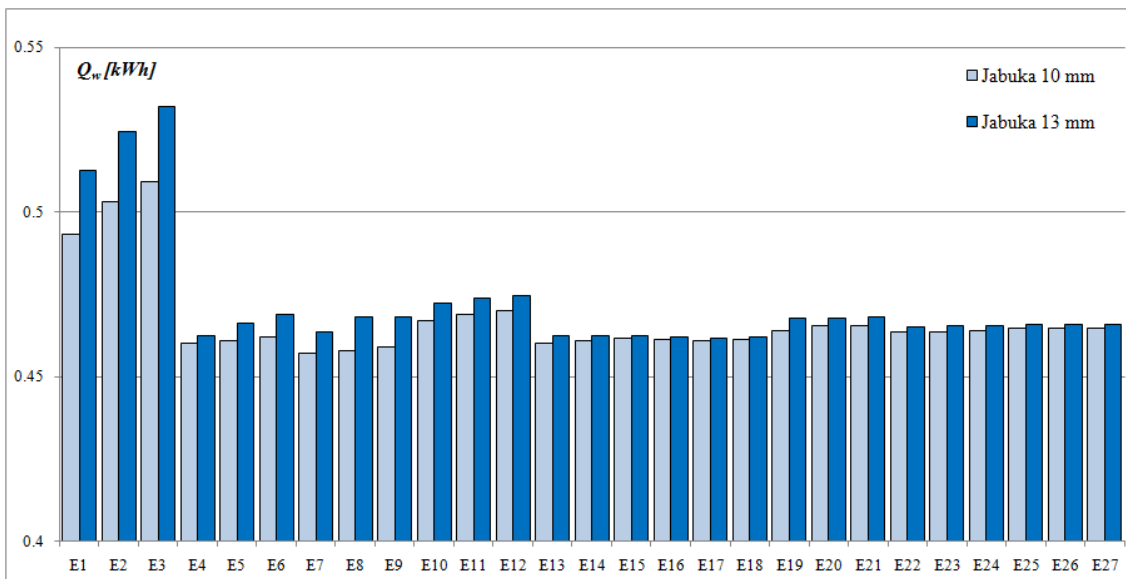
Slika 5.6.2b Toplotni protok utrošen za hlađenje vlažnog vazduha (jabuka, kocka 13 mm)



Slika 5.6.3a Toplotni protok utrošen za kondenzovanje vlage (jabuka, kocka 10 mm)



Slika 5.6.3b Toplotni protok utrošen za kondenzovanje vlage (jabuka, kocka 13 mm)



Slika 5.6.4 Količina toplote utrošena za kondenzovanje vlage (jabuka, kocka 10 i 13 mm)

Na osnovu podataka o odvedenom toplotnom protoku za hlađenje vlažnog vazduha tokom procesa (Slika 5.6.2a do Slika 5.6.3b), određene su odvedene količine toplote (Q_w) u svakom pojedinačnom eksperimentu (Slika 5.6.4).

Imajući u vidu to da je prilikom izvođenja eksperimenata vođeno računa o tome da početna masa vlažnog materijala bude ista u svakom eksperimentu, opravdano je očekivati da količine toplote utrošene za kondenzovanje vlage budu približno istih vrednosti. Ovo očekivanje je potvrđeno rezultatima eksperimenata (Slika 5.6.4). U eksperimentima E_4 do E_{27} , primećuje se zadovoljavajuće međusobno poklapanje između dobijenih vrednosti količine toplote utrošene za kondenzovanje vlage (Slika 5.6.4). U eksperimentima E_1 do E_3 , pojavljuje se izvesno odstupanje i dobijene količine toplote su većih vrednosti. Ovakvo odstupanje se može objasniti činjenicom da su režimi E_1 do E_3 , niskotemperaturski sa temperaturom sušenja $T = 35^\circ C$, što je niže u odnosu na ostale eksperimentalne postavke. U tom slučaju, kao što je to bilo i ranije rečeno, kod režima sušenja sa temperaturom $T = 35^\circ C$ i relativnom vlažnošću vazduha $RH = 10\%$, laboratorijska instalacija radi na granici kapaciteta. Instalacija u tom slučaju iziskuje dodatan napor za nesmetano odvijanje procesa sušenja, što nepovoljno utiče na potrošnju energije i odvijanje procesa u sušari.

Rezultati određivanja potrebnih snaga hladnjaka prilikom sušenja vlažnih materijala krompira i banane su na sličan način predstavljeni u Prilogu 9.18.

5.7 Analiza rada toplotne pumpe

Na osnovu usvojenog koncepta *HPD* sistema (Slika 3.3.1) u Poglavlju 3.3.1, u skladu sa prethodno pomenutim pretpostavkama (Poglavlje 2.2) kojima se rad sistema (Slika 2.2.4c) uprošćava, određene su potrebne snage kompresora, isparivača, primarnog i sekundarnog kondenzatora, kao i potrebna količina rashladnog fluida.

Kod određivanja prethodno pomenutih veličina, korišćene su jednačine (3.53) do (3.60) koje su prikazane u Poglavlju 3.3.1. Na osnovu eksperimentalnih podataka o količini toplote utrošene za zagrevanje vlažnog vazduha (korišćeni rezultati su prikazani u Poglavlju 5.5 i Prilogu 9.17), kao i količini toplote utrošene na hlađenje vlažnog vazduha uz izdvajanje vlage (Poglavlje 5.6 i Prilog 9.18), određene su vrednosti svih parametara rada toplotne pumpe za svaki eksperiment.

Dobijene maksimalne i minimalne vrednosti su prikazane u Tabeli 5.7.1, za svaki od korišćenih materijala.

Tabela 5.7.1

Maksimalne i minimalne vrednosti pojedinih parametara rada toplotne pumpe (rashladni fluid *R134a*)

Parametri rada			jabuka		krompir		banana	
			$z = 10$ [mm]	$z = 13$ [mm]	$z = 2$ [mm]	$z = 3$ [mm]	$z = 6$ [mm]	$z = 7$ [mm]
P_I	[kW]	max.	9,579	12,847	2,000	2,144	3,770	3,927
		min.	0,781	0,801	0,095	0,096	0,182	0,182
P_{KD1}	[kW]	max.	9,579	12,847	2,000	2,144	3,77	3,927
		min.	0,781	0,801	0,095	0,096	0,182	0,182
\dot{m}_{rf}	[kg/s]	max.	0,0645	0,0865	0,0134	0,0144	0,032	0,0264
		min.	0,0066	0,0068	0,0008	0,0008	0,0015	0,0015
P_K	[kW]	max.	1,475	1,978	0,308	0,330	1,074	0,604
		min.	0,222	0,228	0,027	0,027	0,051	0,051
P_{KD}	[kW]	max.	11,05	14,83	2,308	2,474	4,844	4,532
		min.	1,004	1,029	0,122	0,123	0,234	0,234

Analiza rada *HPD* sistema obuhvata analizu rada pojedinih komponenti sistema i ostvarene efikasnosti celokupnog sistema na osnovu ustanovljenih pokazatelja.

Imajući u vidu teorijska istraživanja razmatranog koncepta *HPD* sistema (Poglavlje 3.3.1) kao i parametre rada toplotne pumpe dobijene na osnovu eksperimentalnih rezultata (Tabela 5.7.1) koje se odnose na rad komponenti *HPD* sistema, mogu se konstatovati sledeće činjenice:

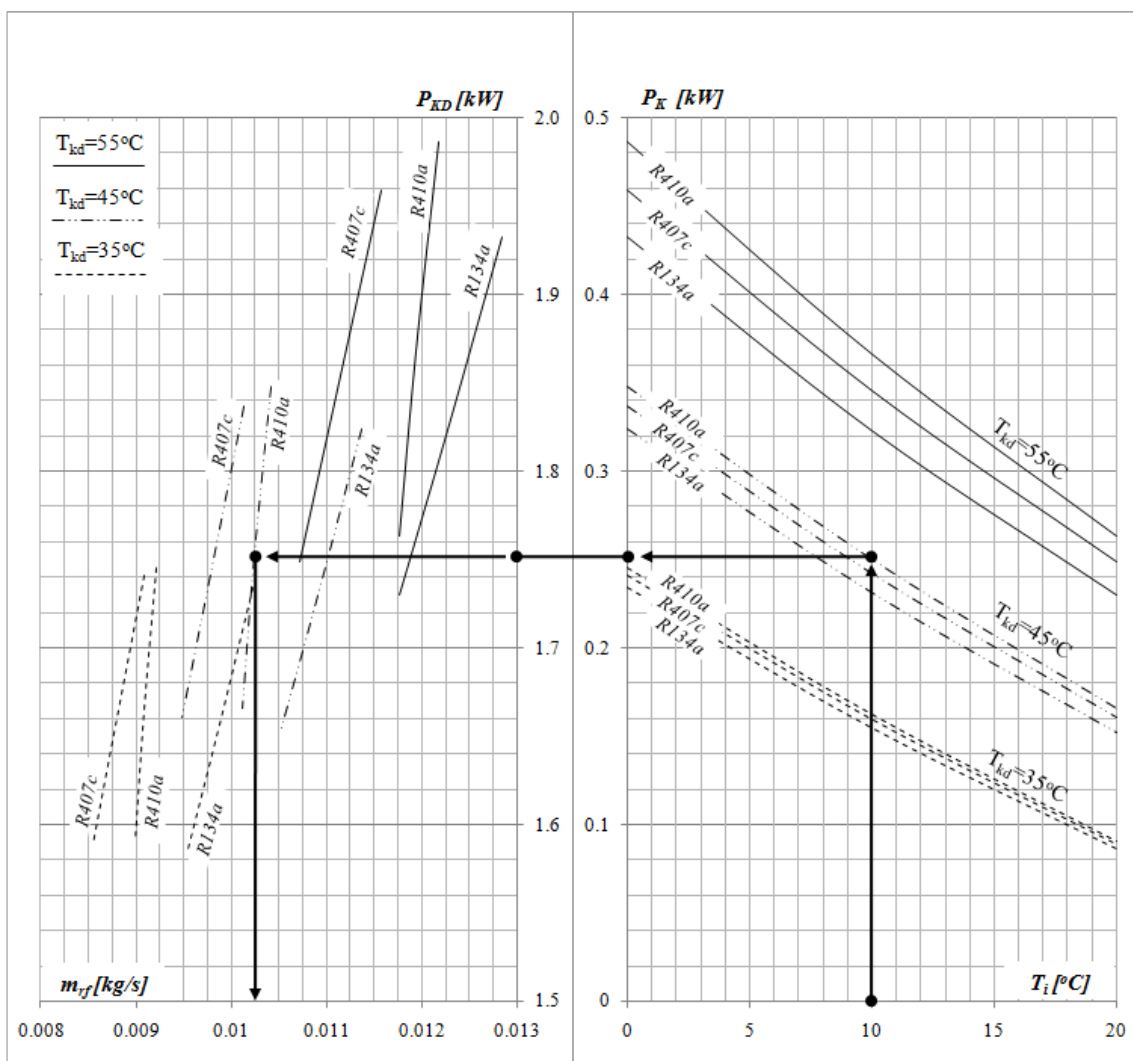
- tokom odvijanja procesa sušenja toplotni protok koji primarni kondenzator dovede vlažnom vazduhu i toplotni protok koji isparivač odvede od vlažnog vazduha su međusobno jednaki;
- tokom odvijanja procesa sušenja snaga kompresora i snaga sekundarnog kondenzatora su međusobno jednake;
- u svim eksperimentima temperatura površine hladnjaka vazduha kojom je simulirana temperatura isparavanja rashladnog fluida u isparivaču iznosila je $T_i = 0^{\circ}C$.
- u svim eksperimentima temperatura kondenzacije i temperatura sušenja definisana režimom sušenja smatrane su međusobno jednakim (35, 45 ili $55^{\circ}C$).

Na osnovu navedenih činjenica, može se primetiti da postoji mogućnost optimizacije rada sistema i to na više načina. Optimizacija bi podrazumevala pronalaženje pogodnijih kombinacija parametara koji utiču na rad sistema uz istovremeno zadržavanje iste snage kompresora ili eventualno njenog umanjenja.

U cilju analize mogućnosti optimizacije rada *HPD* sistema kreiran je grafički nomogram (**Slika 5.7.1**) koji povezuje najrelevantnije parametre rada sistema i omogućava brz i jednostavan uvid u pojedine varijacije uticajnih parametara. Veličine obuhvaćene nomogramom su: temperature isparavanja i kondenzacije, snaga kompresora, ukupna snaga kondenzacije (zbir snaga primarnog i sekundarnog kondenzatora), maseni protok rashladnog fluida u sistemu kao i tip rashladnog fluida. Analiza je sprovedena za tri najčešće primenjivana rashladna fluida u instalacijama ovog tipa: *R134a*, *R410a* i *R407c*. Nomogram (**Slika 5.7.1**) je kreiran na osnovu rezultata dobijenih u eksperimentalnom istraživanju za prosečnu vrednost potrebne snage isparivača od $P_i = 1.5 kW$ određenu pri sušenju materijala jabuke (kocka, 10 mm). Takođe, slične nomograme je moguće formirati i za ostale i materijale na osnovu prethodno sprovedenih analiza prosečne potrebne snage za zagrevanje/hlađenje. Metodologija formiranja grafičkog nomograma i načina procene efikasnosti rada toplotne pumpe je preuzeta iz literature, *Daghigh (2009)*, *Vojcinak (2010)*.

Uzimajući u obzir da je u eksperimentalnim istraživanjima temperatura površine hladnjaka stalna, kao i to da je izdvajanje vlage u postavljenim eksperimentima moguće i na višim temperaturama površine hladnjaka (gornja granica je temperatura tačke rose

za odabrani režim strujanja), varijacija temperature površine hladnjaka (kojom se simulira temperatura površine isparivača) izvršena je softverski programom *Interactive Thermodynamics*, čije su osnovne karakteristike navedene u **Prilogu 9.15**. Rezultati simulacije su korišćeni u kreiranju nomograma. Stoga, na osnovu odabrane temperature isparavanja ($0 \leq T_i \leq 20^\circ\text{C}$), temperature kondenzacije ($35 \leq T_k \leq 55^\circ\text{C}$) i tipa rashladnog fluida (*R134a*, *R410a* ili *R407c*), korišćenjem nomograma se može doći do rezultata o angažovanoj snazi kompresora, ukupnoj snazi kondenzacije i potrebnom masenom protoku odabranog rashladnog fluida u sistemu.



Slika 5.7.1 Nomogram rada toplotne pumpe pri prosečnoj vrednosti snage isparivača od $P_i = 1.5$ kW za materijal jabuku, dimenzija kocke 10 mm

Kako je to već ranije navedeno, snage isparivača i primarnog kondenzatora su tokom odvijanja procesa sušenja međusobno jednake (ovim se ostvaruje rekuperacija

energije), dok angažovana snaga kompresora (koja je jednaka snazi sekundarnog kondenzatora) predstavlja energetski gubitak. Stoga, optimizacija rada *HPD* sistema bi se sastojala u tome da se potrebna snaga kompresora na neki način umanjuje ili da se pri nepromenjenoj vrednosti snage pozitivno utiče na neke druge parametre sistema. U cilju dobijanja najefikasnijeg rešenja, u koliko je to moguće, poželjno je i sprovođenje odgovarajuće tehnokonomске analize. Upotrebom nomograma (**Slika 5.7.1**) mogu se analizirati opcije koje su na raspolaganju za optimizaciju sistema.

Ista vrednost snage kompresora se može postići odgovarajućim izborom rashladnog fluida i temperature isparavanja. Na primer, snaga od $P_K = 0.4 \text{ kW}$ na temperaturi kondenzacije (sušenja) od $T_{kd} = 55^\circ\text{C}$, može se postići upotrebom freona *R134a* i temperature isparavanja $T_i = +3^\circ\text{C}$, ili upotrebom *R407c* i $T_i = +5^\circ\text{C}$, ili upotrebom *R410a* i $T_i = +7^\circ\text{C}$.

Nomogramom se može ustanoviti koji rashladni fluid je najpogodniji za željeni režim rada sistema. Na primer, pri konstantnoj temperaturi isparavanja $T_i = +5^\circ\text{C}$, najmanja snaga kompresora $P_K = 0.28 \text{ kW}$ je dobijena upotrebom *R134a*, u poređenju sa *R410a* se kojim bi se dobilo $P_K = 0.52 \text{ kW}$. U ovom slučaju, izborom rashladnog fluida potrebna snaga kompresora je umanjena za oko 13%. Analiza pokazuje da se u posmatranom domenu istraživanja, pravilnim izborom rashladnog fluida i temperature isparavanja može uštedeti od 10 do 14% potrebne snage kompresora pri temperaturama kondenzacije $T_{kd} = 55^\circ\text{C}$, odnosno od 2 do 4% pri temperaturama kondenzacije $T_{kd} = 35^\circ\text{C}$. To znači da pri višim temperaturama kondenzacije izbor rashladnog fluida značajno utiče na potrošnju energije, dok se na nižim temperaturama ovaj uticaj može i zanemariti.

Količina rashladnog fluida koji cirkuliše u sistemu može se posredno dovesti u vezu sa veličinom komponenti sistema. Veći protok najčešće znači i veće dimenzije komponenata sistema (razmenjivači, cevovodi armatura, i slično). U zavisnosti od tipa odabranog rashladnog fluida, za istu P_K potreban maseni protok rashladnog fluida biće različit. Na primer, ukoliko je potrebna snaga kompresora $P_K = 0.3 \text{ kW}$, upotrebom *R134a* potreban maseni protok rashladnog fluida je $\dot{m}_{rf} = 0.0121 \text{ kg/s}$, dok bi u slučaju korišćenja *R407c* on bio manji i iznosio bi $\dot{m}_{rf} = 0.0108 \text{ kg/s}$. Pravilna optimizacija

systema značila bi istovremeno usaglašavanje T_i , T_{kd} za izabrani tip rashladnog fluida. Na primer, ukoliko iz nekog razloga postoji potreba za variranjem T_i , to će se odraziti na veličinu sistema, potrebnu količinu rashladnog fluida i slično. Analiza pokazuje da će u posmatranom domenu istraživanja taj uticaj će biti izraženiji pri višim temperaturama kondenzacije $T_{kd} \rightarrow 55^\circ C$. Takođe, uticaj varijacije vrednosti P_K (kao posledica oscilacije vrednosti T_i) na elastičnost komponenata sistema može se umanjiti izborom rashladnog fluida. Na primer, upotrebom *R410a* umesto *R407c* opseg variranja vrednosti potrebne količine rashladnog fluida se može umanjiti za 25%, odnosno, za 100% ukoliko je korišćen *R134a*.

☑ Prikazani rezultati su u skladu sa postavljenim pretpostavkama i ukazuju na mogućnost sprovođenja optimizacije komponenata *HPD* sistema čime se utiče na povećanje energetske efikasnosti sistema.

5.8 Pokazatelji efikasnosti rada sistema

Određivanje pokazatelja efikasnosti rada sistema sušenja izvršeno je pomoću jednačina od (3.63) do (3.67) prikazane u **Poglavljju 3.3.2**. U jednačinama figurišu članovi koji opisuju količinu utrošene energije i količinu uklonjene vlage tokom procesa. U skladu sa usvojenim konceptom *HPD* sistema (**Slika 3.3.1** u **Poglavljju 3.3.1**), pogonske komponente *HPD* sistema koje troše energiju su kompresor toplotne pumpe i ventilator sušare.

Snaga ventilatora sušare zavisi od potrebnog masenog protoka vazduha kojim se zadovoljava postizanje odgovarajuće brzine strujanja definisane režimom sušenja i zavisi od statičkog pritiska koji se mora postići u kanalskom distributivnom sistemu sušare radi savladavanja svih otpora strujanja. U okviru eksperimentlnog istraživanja, broj obrtaja (n) i snaga elektromotora ventilatora (P_{VENT}), određeni su frekventnim regulatorom rada elektromotora sa mogućnošću očitavanja (na svom displeju) željenih vrednosti (merno mesto G , **Prilog 9.4**), a dobijene vrednosti prikazane u **Tabeli 5.8.1**. Obzirom na to, da se ovaj podatak koristi jedino kod određivanja pokazatelja efikasnosti sistema, ovaj način utvrđivanja angažovane snage je jednostavniji i precizniji, za razliku

od načina kojim bi se zahtevala detaljna analiza padova pritiska pri prolasku vazdušne struje kroz komponente sistema i materijal koji se suši.

Tabela 5.8.1

Parametri rada elektro-motora ventilatora sušare

Parametri rada ventilatora		Brzina strujanja agensa		
		$w = 1 [m/s]$	$w = 1,5 [m/s]$	$w = 2 [m/s]$
n	$[o/min]$	1014	1288	1562
P_{VENT}	$[kW]$	0,109	0,224	0,400

Smanjenje specifične potrošnje energije po količini izdvojene vlage može se postići smanjenjem energije utrošene na pogon ventilatora. Jedan od načina optimizacije rada ventilatora sušare je upotreba frekventnih regulatora rada elektromotora, čime se postiže angažovanje minimalne moguće snage elektromotora ventilatora za postizanje željenog masenog protoka vlažnog vazduha, odnosno njegove brzine strujanja. Pored optimizacije rada ventilatora sušare kao pogonske jedinice, moguće je izvršiti i optimizaciju kanalskog i distributivnog sistema u smislu smanjenja otpora strujanju vazduha. Na primer, upotrebom materijala sa manjim koeficijentom trenja, većim dimenzijama kanala, većim radijusom krivine kolena, izborom razmenjivača sa manjim padom pritiska sa vazdušne strane i izborom adekvatnih regulacionih elemenata u cilju bolje regulacije i bržeg odziva sistema.

Na osnovu sopstvenih eksperimentalnih istraživanja, dobijene su vrednosti pokazatelja efikasnosti sistema koje se kreću u sledećem opsegu vrednosti:

- $SMER_{HP} = 0,030 \div 1,317 \text{ kg/kWh}$,
- $SMER_{HPD} = 0,047 \div 0,651 \text{ kg/kWh}$,
- $SEC = 0,211 \div 9,358 \text{ MJ/kg}$,
- $HPDE = 0,426 \div 20,7 \text{ MJ/kg}$,
- $MER = 1,362 \div 17,194 \text{ kWh/kg}$.

Prosečne vrednosti pokazatelja efikasnosti rada sistema sušenja su utvrđene za svaki od ispitivanih materijala (jabuku, krompir i bananu), a rezultati su prikazani u **Tabeli 5.8.2.**

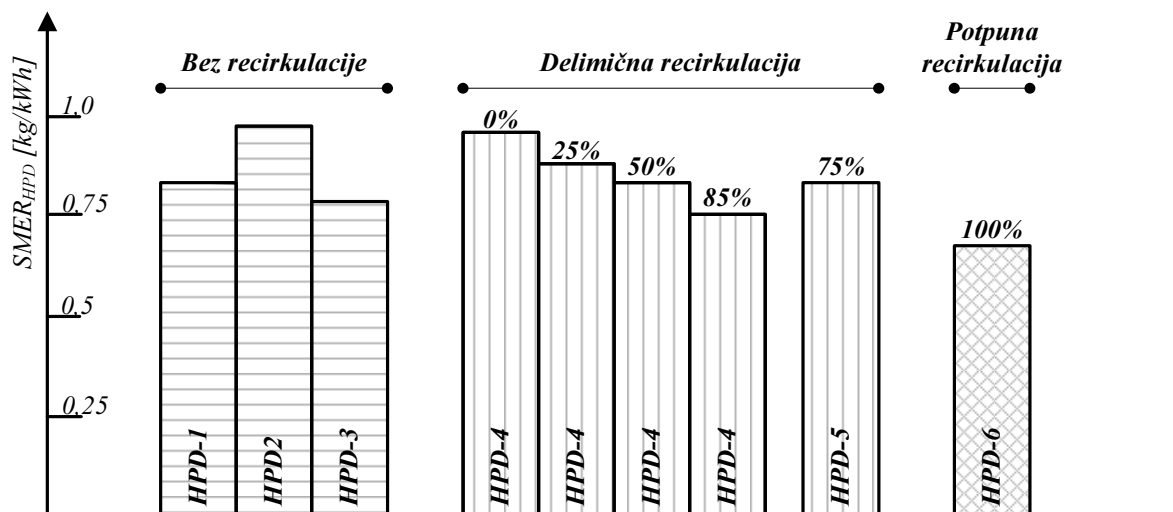
Tabela 5.8.2

Prosečne vrednosti pokazatelja efikasnosti rada sistema sušenja

Pokazatelji efikasnosti		jabuka		krompir		banana	
		$z = 10$ [mm]	$z = 13$ [mm]	$z = 2$ [mm]	$z = 3$ [mm]	$z = 6$ [mm]	$z = 7$ [mm]
$SMER_{HP}$	[kg/kWh]	0,767	0,244	0,588	0,259	0,318	0,232
$SMER_{HPD}$	[kg/kWh]	0,404	0,155	0,105	0,047	0,093	0,068
SEC	[MJ/kg]	0,362	1,140	0,473	1,074	0,874	1,198
$HPDE$	[MJ/kg]	0,687	1,794	2,649	5,970	2,979	4,071
MER	[kWh/kg]	2,196	5,734	7,628	17,194	7,602	10,387

U zavisnosti od konfiguracije HPD sistema sušenja (**Tabela 2.3.1** u **Poglavlju 2.3**), izvršeno je međusobno poređenje sistema koji rade bez recirkulacije, sa delimičnom ili sa potpunom recirkulacijom vazduha (**Slika 5.8.1**), prema kriterijumu postignute maksimalne vrednosti pokazatelja efikasnosti $SMER_{HPD}$.

Kod prikazivanja rezultata za konfiguraciju pod oznakom $HPD-6$ korišćeni su podaci iz sopstvenog istraživanja, dok su kod konfiguracija sistema bez recirkulacije ($HPD-1$, $HPD-2$, $HPD-3$) i konfiguracija sistema sa delimičnom recirkulacijom ($HPD-4$, $HPD-5$) korišćeni podaci iz sličnih istraživanja drugih autora, *Theerakulpisut (1990)*, *Shi (2008)*, *Colak (2009a)*, *Chua (2010)*, *Harchegani (2012)*. Podaci korišćeni kod prikaza pokazatelja efikasnosti konfiguracija $HPD-1$ do $HPD-5$ svedeni su na veličinu sistema sopstvenog istraživanja, kako bi uporedno prikazivanje bilo moguće.



Slika 5.8.1 Uporedni prikaz vrednosti $SMER_{HPD}$ ostvarenih na različitim konfiguracijama HPD sistema sušenja

Može se primetiti (**Slika 5.8.1**) da su kod svih konfiguracija sistema *HPD-1* do *HPD-6*, dobijene vrednosti približno ujednačene i nalaze se u opsegu 0,6 do 0,9 *kg/kWh*. Pri određivanju $SMER_{HPD}$, kod svih konfiguracija su kompresor toplotne pumpe i ventilator sušare jedine pogonske komponente u sistemu. Konfiguracija *HPD-6* je jedina koja poseduje regulaciju svih parametara sušenja (T , RH i w), dok su kod ostalih konfiguracija regulisane samo vrednosti T i w . U konfiguracijama *HPD-1* do *HPD-5*, vrednosti RH zavise samo od ambijentalnih uslova. Procenat recikulisnog vazduha u sistemima *HPD-4* i *HPD-5*, prikazan je brojčano (**Slika 5.8.1**).

Konfiguracija sistema *HPD-4* u slučaju 0% recirkulacije odgovara konfiguraciji *HPD-2*, odnosno u slučaju 100% recirkulacije odgovara konfiguraciji *HPD-6*. Može se zaključiti da povećanjem količine recikulisnog vazduha u sistemu, vrednost $SMER_{HPD}$ postepeno opada. Ovo se može objasniti povećanjem količine recikulisnog vlažnog vazduha koji se posle hlađenja na isparivaču ponovo vraća u sistem, **Theerakulpisut (1990)**. Na prvi pogled, može se doći do zaključka da je konfiguracija *HPD-6* nepovoljnija u odnosu na ostale razmatrane konfiguracije, jer ima najmanju ostvarenu $SMER_{HPD}$ vrednost. Međutim, treba imati u vidu dodatne pogodnosti koje ova konfiguracija pruža, kao što su: - kontrola svih parametara sušenja; - mogućnost sušenja proizvoda u zatvorenom (neventiliranom) sistemu u sopstvenim mirisima, što je izuzetno važno kod sušenja biosenzitivnih materijala gde se zahteva očuvanje mirisa i arome osušenog proizvoda (čajevi, lekovito bilje, začinsko bilje i slično); - izolovanost od spoljnih ambijentalnih uticaja; i slično. Postavljanje sličnih zahteva konfiguracijama *HPD-1* do *HPD-5*, značilo bi uvođenje novih komponenti u sistem (ovlaživač vazduha, i slično). Uvođenjem nove komponente dodatno bi se povećala potrošnja energije i snaga takvog uređaja morala bi biti uračunata u $SMER_{HPD}$ vrednost, koja bi se zbog toga dodatno smanjila.

Prikazani rezultati su u skladu sa postavljenim pretpostavkama da se optimizacijom parametara rada pogonskih komponenti *HPD* sistema sušenja moguće smanjiti specifičnu potrošnju energije po količini izdvojene vlage. Takođe, dodatne uštede u radu sistema, moguće je ostvariti pravilnim izborom konfiguracije *HPD* sistema u smislu opravdanosti i usklađenosti sa zahtevima proizvodnje.

6. POREĐENJE REZULTATA MODELA I EKSPERIMENTALNIH REZULTATA

U cilju verifikacije modela, izvršeno je poređenje rezultata sopstvenog matematičkog modela sa rezultatima sprovedenog eksperimentalnog istraživanja, a potom i sa modelima i eksperimentalnim istraživanjima drugih autora.

Prilikom poređenja sopstvenih eksperimentalnih rezultata sa rezultatima sopstvenog modela korišćene su dve metode: matematičko-statistička i grafo-analitička metoda.

U poređenju sopstvenih rezultata sa rezultatima modela drugih autora korišćena je matematičko-statistička metoda. U cilju verifikacije sopstvenih eksperimentalnih rezultata, izvršeno je njihovo poređenje sa rezultatima eksperimentalnih istraživanja drugih autora, prema dva kriterijuma:

- 1) efektivnom koeficijentu difuzije (D_{eff}), kao pokazatelju efikasnosti procesa sušenja, i
- 2) pokazateljima efikasnosti rada *HPD* sistema za sušenje.

6.1. Poređenje eksperimentalnih rezultata sa rezultatima modela

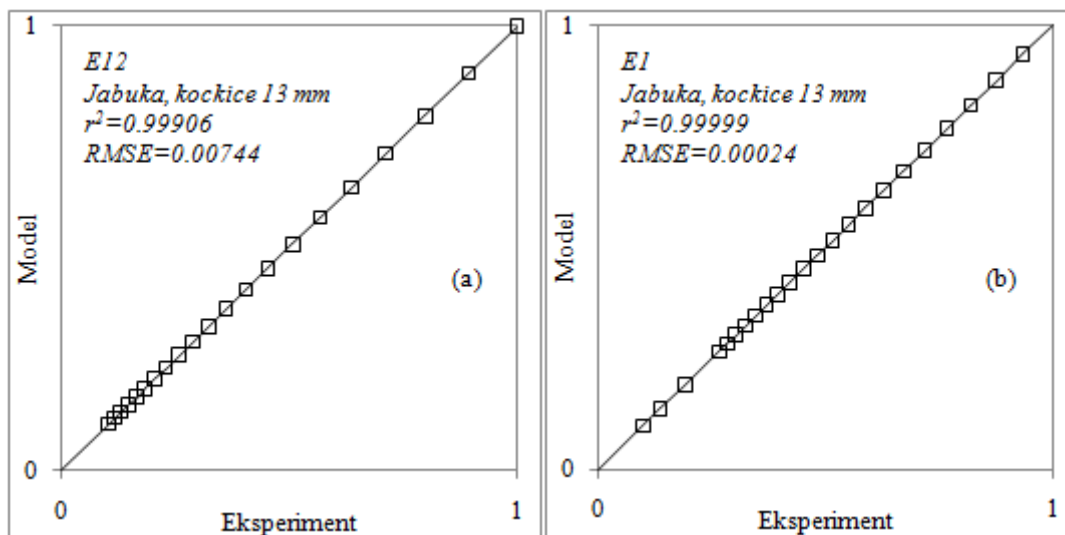
U cilju verifikacije postavljenog matematičkog modela izvršeno je poređenje sa sopstvenim eksperimentalnim rezultatima. Poređenje rezultata jednačine u matematičkoj formi $MR = f(\tau)$ sa eksperimentalno utvrđenim vrednostima bezdimenzionog sadržaja vlage u materijalu tokom vremena, analiziran je matematičko-statističkom i grafo-analitičkom metodom. Korišćeni su sledeći matematičko-statistički pokazatelji:

- 1) Koeficijent determinacije (r^2) (skraćeno od *eng. Coefficient of determination*)

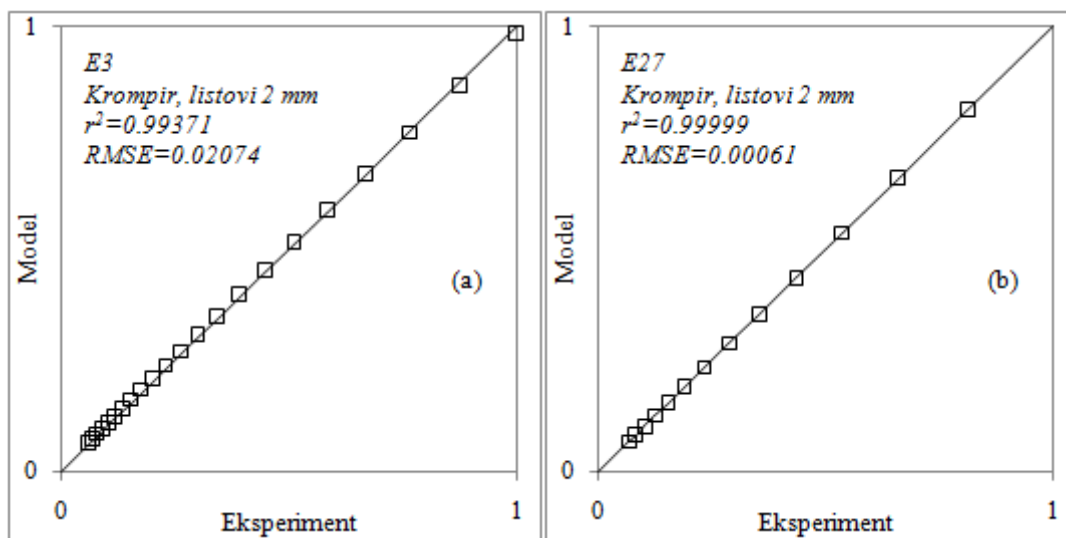
To je veličina čija vrednost određuje korelacionu vezu posmatranih promenljivih ($0 \leq r^2 \leq 1$). Što je ta vrednost bliža jedinici slaganje je bolje, a što je bliža nuli slaganje je lošije. Ovaj statistički pokazatelj predstavlja proporcionalni deo ukupnog varijabiliteta zavisno-promenljive objašnjen uticajem nezavisno-promenljive, *Stanković (2002)*. U regresionoj analizi, koeficijent determinacije predstavlja relativnu meru prilagođenosti regresijskog pravca empirijskim podacima.

- 2) Standardna greška regresije (RMSE) (skraćeno od *eng. Root Mean Squared Error*), je veličina koja predstavlja meru odstupanja empirijskih podataka od jednačine regresije. Što je standardna greška regresije manja regresioni model bolje opisuje zavisnost posmatranih obeležja, *Stanković (2002)*.

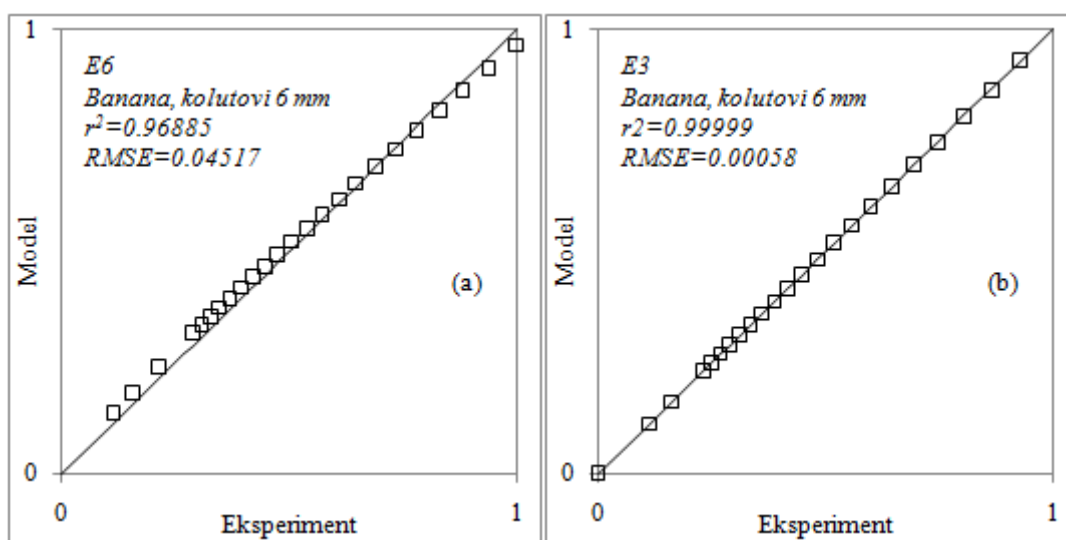
Matematičko-statistička analiza podrazumeva praćenje vrednosti koeficijenta determinacije (r^2) i standardne greške regresije (RMSE). Izračunavanje ovih statističkih pokazatelja, za svaki pojedinačni eksperiment, izvedeno je pomoću softvera *Table Curve 2D i 3D* (detalji dati u **Prilogu 9.15**). Poklapanje rezultata modela i eksperimentalnih podataka je veće ukoliko je vrednost koeficijenta determinacije veća (tj. bliža vrednosti $r^2=1$), a vrednost standardne greške regresije manja (tj. bliža vrednosti $RMSE=0$). Dobijene vrednosti za sve ispitivane materijale (jabuke, krompira i banane) su prikazane u **Tabeli 6.1.1**. Grafo-analički postupak poređenja rezultata modela i eksperimentalnih rezultata predviđa njihovo uporedno prikazivanje na zajedničkom dijagramu, pri čemu se rezultati dobijeni matematičkim modelom nanose na vertikalnu y-osu, a eksperimentalne vrednosti na horizontalnu x-osu koordinatnog sistema. Međusobno odstupanje se vizuelno manifestuje nepoklapanjem vrednosti dijagrama sa pravom $x = y$ (dijagonala). Dijagrami sa najvećim i najmanjim odstupanjem su prikazani: za materijal jabuke (**Slika 6.1.1**), za materijal krompira (**Slika 6.1.2**) i za materijal banane (**Slika 6.1.3**).



Slika 6.1.1 Grafički prikaz odstupanja rezultata modela od eksperimentalnih rezultata (jabuka)
a) najveće odstupanje; b) najmanje odstupanje



Slika 6.1.2 Grafički prikaz odstupanja rezultata modela od eksperimentalnih rezultata (*krompir*)
 a) najveće odstupanje; b) najmanje odstupanje



Slika 6.1.3 Grafički prikaz odstupanja rezultata modela od eksperimentalnih rezultata (*banana*)
 a) najveće odstupanje; b) najmanje odstupanje

Poklapanje rezultata dobijenih sopstvenim modelom (5.1) sa eksperimentalnim rezultatima kreće se u opsegu r^2 i $RMSE$ vrednosti:

- Jabuka: $0,99906 \leq r^2 \leq 0,99999$, $0,00744 \geq RMSE \geq 0,00024$;
- Krompir: $0,99371 \leq r^2 \leq 0,99999$, $0,02074 \geq RMSE \geq 0,00061$;
- Banana: $0,96885 \leq r^2 \leq 0,99999$, $0,19520 \geq RMSE \geq 0,00058$.

Tabela 6.1.1

Rezultati poređenja sopstvenih rezultata i sopstvenog modela na osnovu veličine koeficijenta determinacije i standardne greške regresije

Oznaka eksperimenta	Režim sušenja			Statistički pokazatelji											
	T [°C]	RH [%]	w [m/s]	Jabuka				Krompir				Banana			
				z = 10 [mm]		z = 13 [mm]		z = 2 [mm]		z = 3 [mm]		z = 6 [mm]		z = 7 [mm]	
				r ²	RMSE	r ²	RMSE	r ²	RMSE	r ²	RMSE	r ²	RMSE	r ²	RMSE
E1	35	10	1	0.99999	0.00038	0.99999	0.00024	0.99764	0.01276	0.99918	0.00749	0.99767	0.01272	0.99679	0.01465
E2	35	10	1.5	0.99999	0.00032	0.99999	0.00026	0.99653	0.01557	0.99828	0.01077	0.97633	0.03834	0.98693	0.02984
E3	35	10	2	0.99999	0.00040	0.99986	0.00294	0.99371	0.02074	0.99481	0.01849	0.99999	0.00058	0.99732	0.01388
E4	35	20	1	0.99999	0.00040	0.99998	0.00089	0.99915	0.00788	0.99919	0.00742	0.98580	0.03229	0.98694	0.03058
E5	35	20	1.5	0.99997	0.00145	0.99999	0.00079	0.99892	0.00883	0.99899	0.00829	0.99473	0.19520	0.99847	0.01043
E6	35	20	2	0.99997	0.00038	0.99987	0.00295	0.99767	0.01289	0.99766	0.01249	0.96885	0.04517	0.99914	0.00775
E7	35	30	1	0.99999	0.00041	0.99998	0.00111	0.99922	0.00743	0.99928	0.00689	0.98645	0.03153	0.99191	0.02129
E8	35	30	1.5	0.99999	0.00045	0.99998	0.00092	0.99982	0.00355	0.99982	0.00364	0.99722	0.01422	0.99742	0.01341
E9	35	30	2	0.99999	0.00040	0.99999	0.00028	0.99897	0.00863	0.99896	0.00839	0.99878	0.00944	0.99922	0.00739
E10	45	10	1	0.99999	0.00041	0.99960	0.00489	0.99779	0.01274	0.99758	0.01275	0.99594	0.01698	0.99963	0.01602
E11	45	10	1.5	0.99999	0.00037	0.99945	0.00572	0.99660	0.01577	0.99644	0.01541	0.99997	0.00160	0.99999	0.00066
E12	45	10	2	0.99998	0.00036	0.99906	0.00744	0.99434	0.02019	0.99405	0.01974	0.99431	0.02056	0.99712	0.01467
E13	45	20	1	0.99998	0.00195	0.99983	0.00333	0.99903	0.00857	0.99911	0.00787	0.99695	0.01427	0.99707	0.01376
E14	45	20	1.5	0.99994	0.00035	0.99965	0.00480	0.99864	0.01014	0.99827	0.01089	0.99916	0.00792	0.99850	0.01045
E15	45	20	2	0.99999	0.00037	0.99940	0.00582	0.99681	0.01545	0.99669	0.01499	0.98845	0.02902	0.99999	0.00074
E16	45	30	1	0.99999	0.00297	0.99998	0.00374	0.99966	0.00494	0.99954	0.00548	0.99998	0.00072	0.98801	0.02803
E17	45	30	1.5	0.99990	0.00149	0.99997	0.00130	0.99988	0.00295	0.99988	0.00283	0.99651	0.01627	0.99732	0.01371
E18	45	30	2	0.99997	0.00032	0.99999	0.00027	0.99999	0.00069	0.99999	0.00064	0.99978	0.00406	0.99965	0.00505
E19	55	10	1	0.99997	0.00438	0.99999	0.00027	0.99725	0.01436	0.99744	0.01330	0.99754	0.01396	0.99677	0.01539
E20	55	10	1.5	0.99990	0.00152	0.99960	0.00531	0.99705	0.01498	0.99678	0.01490	0.99470	0.02125	0.99614	0.01743
E21	55	10	2	0.99997	0.00037	0.99949	0.00565	0.99599	0.01783	0.99643	0.01572	0.99833	0.01234	0.99773	0.01365
E22	55	20	1	0.99999	0.00099	0.99980	0.00364	0.99903	0.00884	0.99908	0.00811	0.98865	0.03111	0.98775	0.03093
E23	55	20	1.5	0.99998	0.00290	0.99977	0.00395	0.99918	0.00819	0.99880	0.00928	0.99879	0.10191	0.99862	0.01044
E24	55	20	2	0.99990	0.00039	0.99959	0.00660	0.99612	0.01771	0.99674	0.01517	0.99999	0.00077	0.99999	0.00061
E25	55	30	1	0.99999	0.00195	0.99995	0.00220	0.99979	0.00401	0.99968	0.00461	0.99998	0.00082	0.98831	0.02885
E26	55	30	1.5	0.99999	0.00191	0.99996	0.00149	0.99980	0.00392	0.99985	0.00321	0.99743	0.01484	0.99745	0.01415
E27	55	30	2	0.99999	0.00041	0.99999	0.00028	0.99999	0.00061	0.99999	0.00064	0.99999	0.00077	0.99999	0.00071

Prilikom poređenja sopstvenih rezultata sa rezultatima korelacionog modela prikazanog jednačinom (5.2) u **Poglavlju 5.4**, poklapanje rezultata dobijenih sopstvenim modelom sa eksperimentalnim rezultatima kreće se u opsegu r^2 i $RMSE$ vrednosti:

- Jabuka: $0,98993 \leq r^2 \leq 0,99043$, $0,00116 \geq RMSE \geq 0,00046$;
- Krompir: $0,90703 \leq r^2 \leq 0,99446$, $0,00807 \geq RMSE \geq 0,00235$;
- Banana: $0,88393 \leq r^2 \leq 0,98322$, $0,00147 \geq RMSE \geq 0,00058$.

Izračunate vrednosti statističkih pokazatelja poklapanja sopstvenih eksperimentalnih rezultata sa sopstvenim korelacionim modelom, prikazane su u **Tabeli 6.1.2**.

Tabela 6.1.2

Rezultati poređenja sopstvenih rezultata i sopstvenog korelacionog modela na osnovu veličine koeficijenta determinacije i standardne greške regresije

Oznaka eksperimenta	Režim sušenja			Statistički pokazatelji											
				Jabuka		Krompir		Banana							
	w [m/s]	T [°C]	RH [%]	$z=10$	$z=13$	$z=2$	$z=3$	$z=6$	$z=7$						
				[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	r^2	$RMSE$	r^2	$RMSE$
E1	1	35	10	0.99007	0.001037	0.99043	0.000462	0.93548	0.001963	0.98700	0.000338	0.8848	0.001471	0.98941	0.000254
E4	1	35	20												
E7	1	35	30												
E10	1	45	10												
E13	1	45	20												
E16	1	45	30												
E19	1	55	10												
E22	1	55	20												
E25	1	55	30												
E2	1.5	35	10												
E5	1.5	35	20												
E8	1.5	35	30												
E11	1.5	45	10												
E14	1.5	45	20												
E17	1.5	45	30												
E20	1.5	55	10												
E23	1.5	55	20												
E26	1.5	55	30												
E3	2	35	10	0.98993	0.00116	0.99049	0.000513	0.98995	0.000749	0.98971	0.000331	0.98741	0.000578	0.98781	0.000409
E6	2	35	20												
E9	2	35	30												
E12	2	45	10												
E15	2	45	20												
E18	2	45	30												
E21	2	55	10												
E24	2	55	20												
E27	2	55	30												

6.2. Poređenje rezultata sopstvenog modela i modela drugih autora

Poređenje sopstvenih rezultata izvršeno je i sa matematičkim modelima drugih autora. Izbor modela za poređenje izvršen je tako da je analizom velikog broja istraživanja i modela drugih autora (**Tabela 2.2.1**) sužen izbor na ona istraživanja koja se tiču istih materijala i sličnih režima sušenja (**Tabela 6.2.1**) i pozitivnog zaključka o pogodnosti korišćenja odgovarajućeg modela. Odabrana su po tri u literaturi najčešće primenjivana modela za svaki od materijala.

Tabela 6.2.1

Pregled odabranih matematičkih modela drugih autora za poređenje sa sopstvenim rezultatima

Naziv modela	Model	Materijal	Literatura
<i>Newton</i>	$MR = e^{(-k_1\tau)}$	Jabuka	<i>Seiedlou (2010), Sacilik (2006), Aktas (2009), Kaya (2007), Doymaz (2009), Kaleta (2010)</i>
		Krompir	<i>Akpinar (2009), Simal (1994)</i>
		Banana	<i>Baini (2007), Koua (2009), Fadhel (2011a)</i>
<i>Page</i>	$MR = a_1 \cdot e^{(-k_1\tau^n)}$	Krompir	<i>Singh (2011), Aghbashlo(2009), Akpinar (2009)</i>
		Banana	<i>Baini (2007), Koua (2009), Fadhel (2011a)</i>
<i>Henderson & Pabis</i>	$MR = a_1 \cdot e^{(-k_1\tau)}$	Jabuka	<i>Seiedlou (2010), Sacilik (2006), Aktas (2009), Velić (2004), Kaya (2007), Doymaz (2009)</i>
<i>Wang & Singh</i>	$MR = 1 + a_1 \cdot \tau + a_2 \cdot \tau^2$	Jabuka	<i>Seiedlou (2010), Sacilik (2006), Doymaz (2009), Kaleta (2010)</i>
		Krompir	<i>Akpinar (2009), Simal (1994)</i>
		Banana	<i>Koua (2009), Fadhel (2011a)</i>

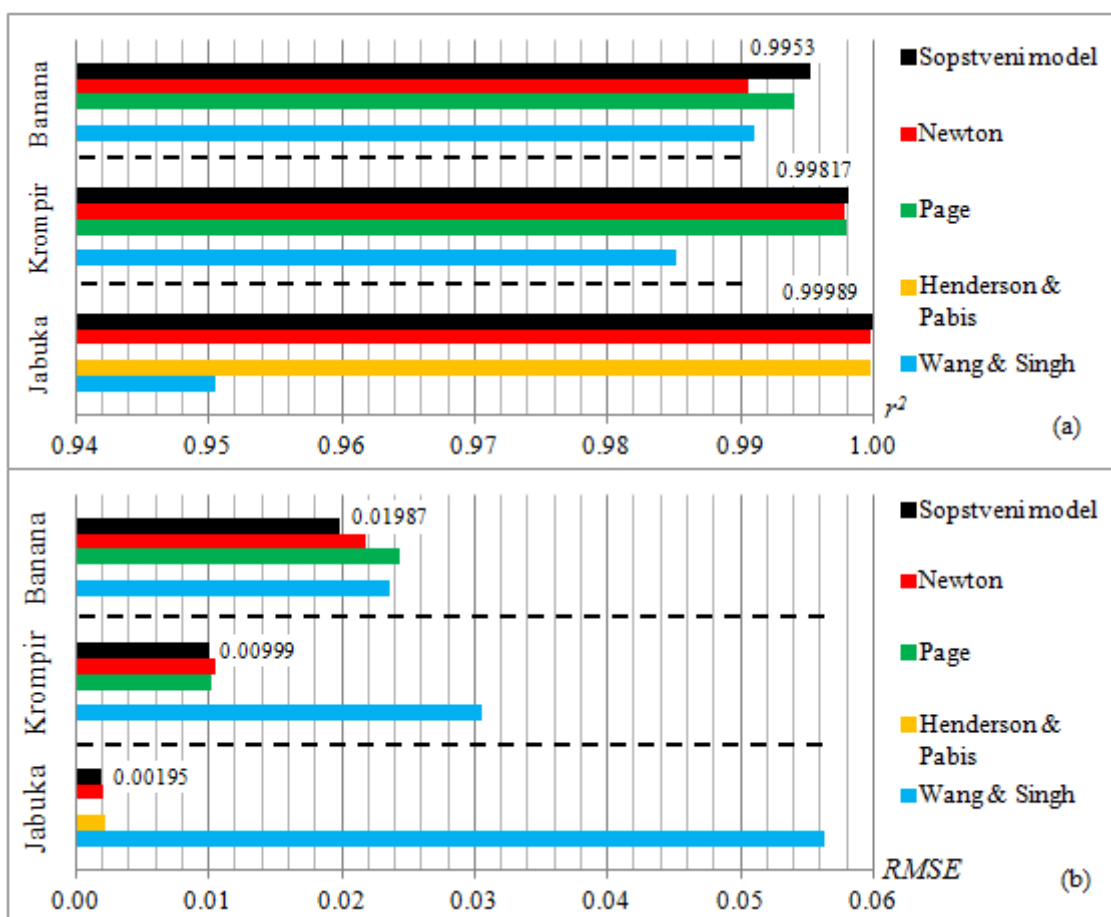
Kriterijumi za poređenje su maksimalna vrednost koeficijenta determinacije i minimalna vrednost standardne greške regresije. Poređenje je izvršeno pomoću softvera *Table Curve 2D i 3D* (detalji dati u **Prilogu 9.15**), koji ima mogućnost da u matematičkim modelima odredi nepoznate parametre tako da odstupanje od eksperimentalnih rezultata bude minimalno, a potom i izračuna vrednosti statističkih pokazatelja kvaliteta ostvarenog poklapanja.

Rezultati poređenja su za svaki od materijala (jabuke, krompira i banane) prikazani u **Prilogu 9.19**, dok su prosečne vrednosti (**Tabela 6.2.2**) statističkih pokazatelja prikazane uporedno (**Slika 6.2.1**) za svaki od navedenih materijala.

Tabela 6.2.2

Prosečne vrednosti koeficijenta determinacije i standardne greške regresije sopstvenog i drugih modela

Naziv modela	Model	Statistički pokazatelji	Materijal		
			Jabuka	Krompir	Banana
Sopstveni model	$MR = e^{(A_0 + A_1 \tau)}$	r^2	0,99989	0,99817	0,99530
		RMSE	0,00195	0,00999	0,01987
Newton	$MR = e^{(-k_1 \tau)}$	r^2	0,99985	0,99789	0,99065
		RMSE	0,00200	0,01043	0,02181
Page	$MR = a_1 \cdot e^{(-k_1 \tau^n)}$	r^2	n/a	0,99795	0,99409
		RMSE	n/a	0,01021	0,02434
Henderson & Pabis	$MR = a_1 \cdot e^{(-k_1 \tau)}$	r^2	0,99981	n/a	n/a
		RMSE	0,00216	n/a	n/a
Wang & Singh	$MR = 1 + a_1 \cdot \tau + a_2 \cdot \tau^2$	r^2	0,95055	0,98522	0,99107
		RMSE	0,05625	0,03061	0,02355



Slika 6.2.1 Upporedni prikaz prosečnih vrednosti statističkih pokazatelja kvaliteta modela

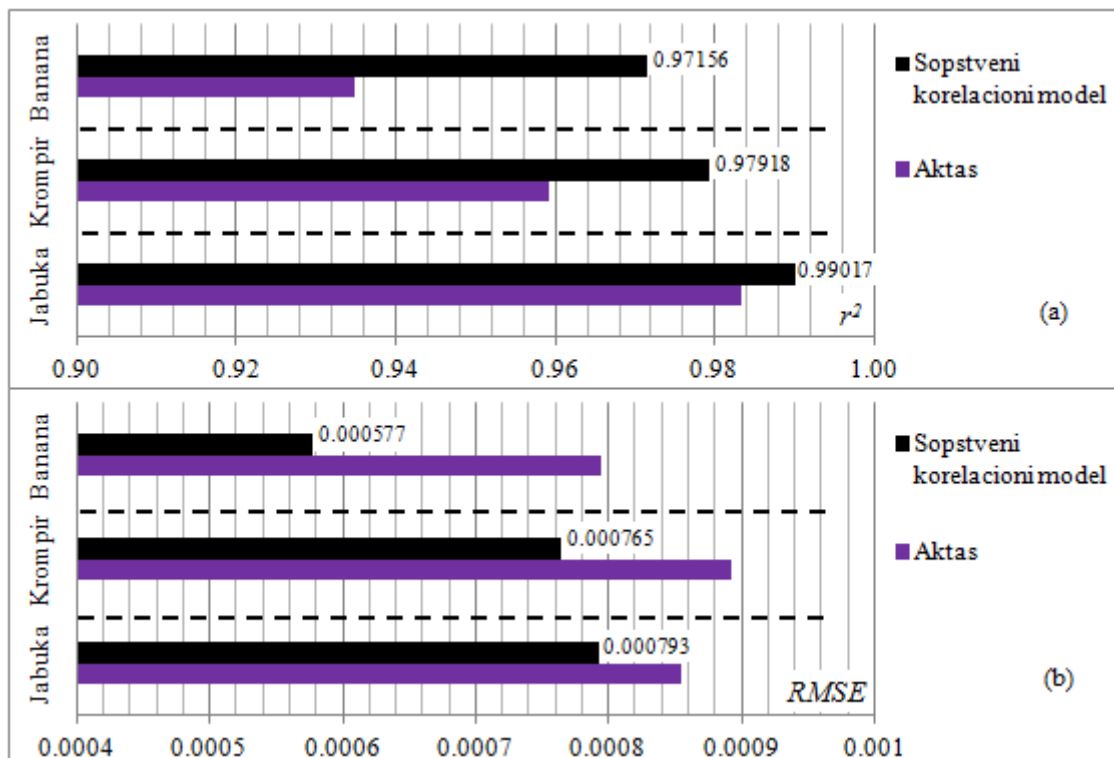
a) koeficijent determinacije (r^2); b) standardna greška regresije (RMSE)

Na sličan način upoređeni su sopstveni korelacioni model (5.2) sa korelacionim modelima drugih autora, *Aktas*-a (2009). Prosečne vrednosti (Tabela 6.2.3) statističkih pokazatelja kvaliteta poklapanja rezultata sopstvenog korelacionog modela i modela prema *Aktas* (2009), prikazane su uporedno (Slika 6.2.2) za svaki od navedenih materijala.

Tabela 6.2.3

Prosečne vrednosti koeficijenta determinacije i standardne greške regresije sopstvenog korelacionog modela i korelacionih modela drugih autora

Naziv modela	Model	Statistički pokazatelj	Materijal		
			Jabuka	Krompir	Banana
<i>Sopstveni korelacioni model</i>	$A_1 = B_0 + B_1 \cdot T^{B_2} + B_3 \cdot RH^{B_4}$	r^2	0,99017	0,97918	0,97156
		<i>RMSE</i>	0,000793	0,000765	0,000577
<i>Aktas (2009)</i>	$A_1 = B_0 + B_1 \cdot T + B_2 \cdot RH$	r^2	0,98320	0,95925	0,93490
		<i>RMSE</i>	0,000854	0,000892	0,000794



Slika 6.2.2 Uporedni prikaz prosečnih vrednosti statističkih pokazatelja kvaliteta korelacionog modela
a) koeficijent determinacije (r^2); b) standardna greška regresije (RMSE)

6.3. Poređenje rezultata sopstvenih eksperimenata i eksperimenata drugih autora

Poređenje rezultata dobijenih u sopstvenim eksperimentima izvršeno je sa rezultatima eksperimentalnih merenja drugih autora. U cilju upoređivanja ostvarene efikasnosti procesa sušenja u eksperimentalnim istraživanjima, upoređivane su dobijene vrednosti efektivnih koeficijenta difuzije (D_{eff}), dok su za upoređivanje ostvarene efikasnosti rada čitavog *HPD* sistema upoređivane vrednosti pokazatelja efikasnosti rada sistema sušenja definisane u **Poglavlju 3.3.2**.

Vrednosti efektivnog koeficijenta difuzije dobijenog u sopstvenim eksperimentima kreću se u ukupnom opsegu D_{eff} vrednosti od $1.5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ do $23.7 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, odnosno pojedinačno po materijalima:

- Jabuka: $2.97 \cdot 10^{-8} \leq D_{eff} \leq 12.1 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$,
- Krompir: $1.50 \cdot 10^{-8} \leq D_{eff} \leq 4.28 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$,
- Banana: $5.57 \cdot 10^{-8} \leq D_{eff} \leq 23.7 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$.

Ovako dobijene vrednosti efektivnog koeficijenta difuzije se nalaze u opsegu rezultata do kojih su u svojim istraživanjima došli drugi autori:

- za materijal jabuke u opsegu od $1 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ do $2.68 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, **Rahman (2007)**, **Doymaz (2009)**, **Velić (2004)**, **Aktas (2009)**;
- za materijal krompira u opsegu od $1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ do $1.54 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, **Singh (2011)**, **Simal (1994)**, **Aghbashlo (2009)**, **Akpinar (2003)**;
- za materijal banane, u opsegu od $5 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ do $7.9 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, **Baini (2007, 2008)**, **Fernando (2011)**, **Mariani (2008)**, **Karim (2005)**.

Veliki raspon dobijenih vrednosti efektivnog koeficijenta difuzije u rezultatima drugih autora je posledica raznovrsnosti usvajanih geometrija, dimenzija materijala i režima sušenja materijala.

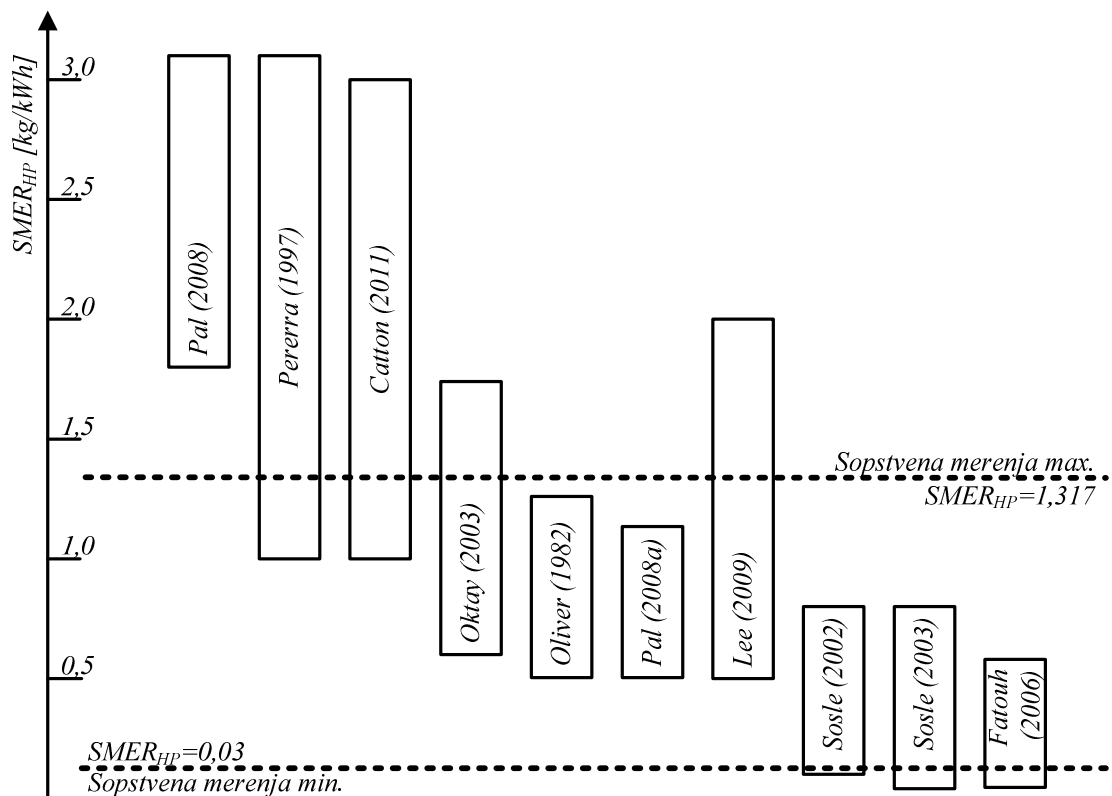
Prosečne vrednosti posmatranih pokazatelja efikasnosti procesa sušenja *HPD* sistema prikazani u **Poglavlju 5.8** u **Tabeli 5.8.2**. Vrednosti usvojenih pokazatelja efikasnosti $SMER_{HP}$, $SMER_{HPD}$, SEC , $HPDE$ i MER , dobijenih na osnovu sopstvenih eksperimentalnih istraživanja, se kreću u sledećem opsegu vrednosti:

- $SMER_{HP} = 0,030 \div 1,317 \text{ kg/kWh}$,
- $SMER_{HPD} = 0,047 \div 0,651 \text{ kg/kWh}$,

- $SEC=0,211 \div 9,358 \text{ MJ/kg}$,
- $HPDE= 0,426 \div 20,7 \text{ MJ/kg}$,
- $MER= 1,362 \div 17,194 \text{ kWh/kg}$.

Najveći broj istraživača efikasnost svojih *HPD* sistema opisuje prvenstveno vrednošću veličine $SMER_{HP}$, pa je i poređenje sa sopstvenim rezultatima preko ovog pokazatelja efikasnosti dato grafički (**Slika 6.3.1**).

Na **Slici 6.3.1**, isprekidanom linijom su označene minimalna i maksimalna vrednost veličine $SMER_{HP}$ određene na osnovu sopstvenih eksperimentalnih rezultata, dok je opseg dobijenih rezultata u eksperimentima drugih autora prikazan pravougaonikom srazmerno postavljenim u granicama posmatranja. Poklapanje je bolje u domenu minimalnih postignutih vrednosti $SMER_{HP-a}$, dok su u istraživanjima pojedinih autora prisutne i veće vrednosti.



Slika 6.3.1 Poređenje rezultata preko vrednosti $SMER_{HP}$

Ovakav rezultat se može objasniti pre svega veličinom instalacije i količinom tretiranog vlažnog materijala, odnosno, kod većih instalacija je odnos uklonjene vlage

naspram angažovane snage kompresora daleko veći (procenat rekuperacije toplote od oko 95% kod ovakvih sistema, u velikoj meri ne zavisi od veličine sistema).

Poređenje ostalih navedenih pokazatelja efikasnosti daje takođe dobre rezultate. Tako na primer, **Oktay (2003)** postiže vrednosti $SMER_{HPD}$ u opsegu $0,4 \div 1,0 \text{ kg/kWh}$.

Kod određivanja vrednosti SEC -a postignute su prosečne vrednosti: - od 10 MJ/kg u eksperimentima u kojima su se vrednosti ovog pokazatelja kretale u opsegu $0 \div 50 \text{ MJ/kg}$, **Sosle (2003)**; - u opsegu $3,7 \div 6,7 \text{ kg/kWh}$, **Fatouh (2006)**.

Veliki broj autora ostvarenu efikasnost svojih sistema u ispitivanjima opisuje pokazateljem MER . U analizama HPD sistema korišćenim za sušenje prehrambenih materijala, dobijene su prosečne vrednosti MER -a: - $0,66 \text{ kWh/kg}$, **Braun (2002)**; - $21,2 \text{ kWh/kg}$, **Catton (2011)**; - $2,75 \text{ kg/kWh}$, **Prasertsan (1998b)**; i slično.

7. ZAKLJUČAK

U disertaciji su prikazani rezultati istraživanja termomehaničkih procesa pri sušenju prehrambenih materijala u sistemima sa recirkulacijom vazduha. Izvršena je analiza termomehaničkih procesa koji se odvijaju sistemu i sagledane su mogućnosti optimizacije rada sistema konvektivnog sušenja sa recirkulacijom vazduha. Razvijen je matematički model promene vlažnosti materijala (u bezdimenzionom obliku) koji uzima u obzir uticaj termomehaničkih osobina vlažnog vazduha na proces sušenja. Osmišljena je i napravljena laboratorijska instalacija koja ima mogućnost regulisanja parametara sušenja kontrolom termomehaničkih osobina vlažnog vazduha. U cilju verifikacije matematičkog modela, kao i određivanja nepoznatih parametara, sprovedena su obimna eksperimentalna istraživanja pojava i procesa koji se javljaju prilikom sušenja prehrambenih materijala. U eksperimentima su korišćena tri različita prehrambena materijala: Jabuka, Krompir i Banana. Materijali su odabrani prema kriterijumima pogodnosti svojih fizičko-mehaničkih osobina za sušenje ovom tehnologijom sušenja i mogućnosti slobodnog oblikovanja (sečenja) materijala na geometrije pogodne za ispitivanje. Takođe, uzeti su u obzir i kriterijumi potrošnje i zastupljenosti materijala na tržištu Republike Srbije. Urađena je analiza grešaka merenja. Urađena je analiza i diskusija eksperimentalnih rezultata. U cilju verifikacije dobijenih rezultata izvršeno je poređenje sa rezultatima istraživanja drugih autora. Na osnovu rezultata teorijskog i eksperimentalnog istraživanja analiziran je rad kompletnog sistema sušenja i mogućnosti njegove optimizacije u smislu povećanja energetske efikasnosti i smanjenja specifične potrošnje energije po količini uklonjene vlage.

Matematički model omogućava simulaciju promene vlažnosti materijala (u bezdimenzionom obliku) tokom procesa sušenja. Pretpostavke modela su usvojene tako da odgovaraju realnoj fizičkoj slici procesa. Predloženim modelom razmatrani su relevantni parametri sušenja. Jednačina modela je složena više-parametarska zavisnost koja se grafički može prikazati u 3D prostoru. Takođe, u modelu se neki parametri mogu i zanemarivati, čime se forma modela pojednostavljuje. Na taj način se dobijeni rezultati mogu prebaciti u domen 2D prirode. Model se sastoji iz dve funkcije: osnovne i korelacione. Osnovna funkcija prikazuje promenu vlažnosti materijala u bezdimenzionom obliku tokom vremena i predstavljena je eksponencijalnom funkcijom

$MR = \exp(A_0 + A_1\tau)$, gde su A_0, A_1 parametri funkcije. Korelaciona funkcija prikazuje povezanost između parametara sušenja (T, RH) unutar parametra osnovne funkcije A_1 pri konstantnoj vrednosti brzine strujanja agensa (w) i predstavljena je višestepenim polinomom $A_1 = B_0 + B_1T^{B_2} + B_3RH^{B_4}$, gde su B_0, \dots, B_4 parametri funkcije. Na bazi rezultata eksperimentalnih merenja određeni su nepoznati parametri u jednačinama modela, uz upotrebu softvera *Table Curve 2D v.5.01* i *Table Curve 3D v.4.0*. Definisanjem vlažnosti materijala u bezdimenzinom obliku, moguće je primeniti rezultate modela skaliranjem na željenu veličinu sistema.

U cilju verifikacije postavljenog modela, određivanja nepoznatih parametara, kao i određivanja parametara rada čitavog sistema sušenja, osmišljena je i izrađena laboratorijska instalacija za konvektivno sušenje prehrambenih materijala u tankom sloju. U cilju postizanja što veće rekuperacije energije, omogućeno je da instalacija radi sa potpunom recirkulacijom vazduha. Odabrani materijali (jabuka, krompir i banana) su sušeni pod istim režimima, sa temperaturom sušenja u opsegu $35 \div 55^\circ\text{C}$, relativnom vlažnošću u opsegu $10 \div 30\%$ i brzinom strujanja agensa (vlažnog vazduha) u opsegu $1 \div 2 \text{ m/s}$. Parametri sušenja su odabrani na osnovu preporuka iz literature o optimalnim režimima sušenja za postizanje zadovoljavajućeg kvaliteta osušenog proizvoda. Oblici i dimenzije materijala su izabrani tako da su jabuke sušene u komadićima oblika kocke dimenzija 10 mm i 13 mm , krompir u listovima debljina 2 mm i 3 mm , a banana u kolutovima debljina 6 mm i 7 mm . Usvojene dimenzije materijala se nalaze u opsegu veličina koji se preporučuje u literaturi. Oblici materijala su usvojeni prema kriterijumima jednostavnosti i rešivosti jednačina za modeliranje efektivnog koeficijenta difuzije. U cilju bržeg zagrevanja, postizanja kraćeg vremena sušenja i jednostavnijeg opisivanja i modeliranja procesa i pojava, materijali su sušeni na lesi u tankom sloju. U cilju određivanja efikasnosti rada sistema sušenja, analiziran je rad *HPD* sistema sušenja, primenom računarskih programa *VisSim v.3.0 FAP* i *Interactive Thermodynamics v.3.0*.

Dobijeni rezultati eksperimentalnih merenja su svrstani u dve grupe. Prva grupa rezultata se odnosi na praćenje promene mase vlažnog materijala u vremenu i vremena trajanja procesa sušenja. Druga grupa rezultata odnosi se na praćenje odgovarajućih vrednosti temperatura i masenih protoka agensa i vode, na osnovu kojih su definisani

potrebni kapaciteti komponenata sistema, uticaj recirkulacije agensa na rekuperaciju energije i određene veličine koje se koriste u parametarskoj analizi rada samog sistema. Svi prikupljeni rezultati su obrađeni i analizirani. Određene su veličine od značaja za modeliranje kinetike sušenja posmatranog materijala, analizu difuzije vlage kroz materijal. Izračunati su nepoznati parametri u matematičkim jednačinama modela. Postavljeni su energetske bilansi svih komponenata sistema i izračunate vrednosti osnovnih pokazatelja efikasnosti rada sistema.

Analiziran je uticaj temperature, relativne vlažnosti i brzine strujanja agensa na kinetiku procesa sušenja. Utvrđeno je da se bez obzira na geometriju i vrstu ispitivanog materijala, režimom sušenja sa najvećom temperaturom i brzinom strujanja agensa, a najmanjom relativnom vlažnošću, postiže najkraće vreme trajanja procesa sušenja i obrnuto. Na bazi urađenih merenja utvrđeno je da su brzine sušenja su najveće na početku svakog eksperimenta kada je vlažnost materijala najveća, što je i očekivano obzirom na to da se u početnim trenucima front isparavanja vlage nalazi veoma blizu spoljašnje površine materijala pa je time i put koji vlaga pređe od unutrašnjih slojeva materijala do površine materijala najkraći.

Uticaj pojedinačnih parametra na kinetiku procesa sušenja razmatran je preko dobijenih vrednosti efektivnog koeficijenta difuzije. Vrednost efektivnog koeficijenta difuzije se ne menja u vremenu. Variranjem vrednosti RH u opsegu $10 \div 30\%$, vrednost D_{eff} se kod svih materijala smanjuje za oko 20%, bez obzira na geometriju i dimenziju materijala, što ukazuje na mogućnost da se predvidi način promene vrednosti D_{eff} u slučajevima varijacije parametra RH . Promenom dimenzije materijala nije moguće predvideti način na koji će se vrednost D_{eff} promeniti. Na primer, ukoliko posmatramo promenu dimenzije kockice jabuke z sa 10 mm na 13 mm (što znači povećanje za 30%), vrednost D_{eff} se umanjila za oko 23% pri nepromenljivoj $RH = 10\%$. Međutim, u slučaju promene dimenzije lista krompira z sa 2 mm na 3 mm (što znači povećanje za 50%), vrednost D_{eff} se umanjila za oko 2% pri nepromenljivoj $RH = 10\%$. Slično se dešava i kod materijala banane. Povećanja brzine strujanja (w) i temperature agensa (T) dovode do porasta vrednosti D_{eff} uz predvidivu uzročno-posledičnu vezu. Na primer, variranjem T sa $35 \rightarrow 55^\circ\text{C}$ (+ 66%), vrednost D_{eff} se povećala za oko 115%.

Na sličan način, povećanjem w sa $1 \rightarrow 2 \text{ m/s}$ (+ 100%), vrednost D_{eff} se povećala za oko 25% bez obzira na T i vrstu materijala.

Može se zaključiti da parametri sušenja koji se odnose na vlažan vazduh kao agens sušenja (T, RH, w) proporcionalno utiču na promenu efektivnog koeficijenta difuzije D_{eff} . Sa druge strane, geometrija i dimenzija (z) materijala, kao parametri sušenog materijala, imaju složeniji uticaj. Takav uticaj se objašnjava osobinama materijala kao što su struktura materijala, orijentacija vlakana u odnosu na pravac strujanja agensa, fizičko-hemijske osobine, i slično.

U skladu sa prethodnim zaključkom, izvršeno je poređenje parametara sušenja prema svom uticaju. Utvrđeno je da T ima najveći uticaj na vrednosti efektivnog koeficijenta difuzije. Takođe, utvrđeno je da kod pojedinih materijala postoji mogućnost zanemarivanja nekog od parametara jer je u istraživanom opsegu parametara njegov uticaj manji u odnosu na ostale parametre. Na primer, u analizama sušenja materijala banane, uticaj RH (od oko $\approx -15\%$) je daleko manji od uticaja T (preko 100%) i uticaja w (preko 50%). Takođe, pri manjim vrednostima T i w , uticaj variranja vrednosti RH na vrednost D_{eff} ($\approx -15\%$) je veći u nego pri većim vrednostima T i w ($\approx -8\%$). Stoga, kod materijala banane, veličina uticaja RH se može zanemariti u čitavom istraživanom opsegu parametara, naročito pri većim vrednostima T i w .

Rezultati istraživanja su potvrdili da termomehaničke osobine agensa (vlažnog vazduha) značajno utiču na proces sušenja. Variranjem T, RH i w agensa, geometrije i dimenzije (z) materijala, proces sušenja se može usporiti, intenzivirati ili ostati nepromenjen za drugu postavku parametara. Utvrđeno je da se u slučajevima slabijeg uticaja na proces sušenja RH agensa može zanemariti. Međutim, pre bilo kakvog zanemarivanja potrebno je sagledati veličinu greške koja se time stvara kako bi bila ujedno i poznata i minimalna.

Sagledavanjem tokova energije u sistemu, načina cirkulacije agensa u sistemu i osobina agensa, postavljeni su energetske i materijalni bilansi pojedinih komponenata sistema i ustanovljene mogućnosti optimizacije rada sistema. Utvrđeno je da vrednost angažovane snage zavisi od odabranog režima sušenja, karakteristika materijala koji se suši, dinamike kojom vlaga napušta materijal, kao i konstruktivnih karakteristika instalacije sistema. Sa smanjenjem relativne vlažnosti agensa potrebna snaga za

zagrevanje/hlađenje vlažnog vazduha raste, a protok vazduha preko razmenjivača toplote povećava. Najveće potrebe za energijom javljaju u eksperimentima sa nižim vrednostima temperature i relativne vlažnosti agensa, a većim vrednostima brzine strujanja agensa. To se objašnjava osobinom vlažnog vazduha da se iz iste mase vlažnog vazduha na nižim temperaturama uz istu odvedenu količinu toplote izdvaja manja količina vlage. Vлага se iz sistema sušare izbacuje u tečnom stanju čime se rekuperiše celokupna latentna toplota dobijena kondenzacijom vode na površini isparivača, dok samo mali deo osetne toplote ne biva obuhvaćen. Recirkulacijom agensa u sistemu omogućava se rekuperacija energije i pojednostavljuje se kontrola parametara sušenja.

U cilju unapređenja i optimizacije rada sistema sušenja sprovedena je analiza uprošćenog modela sistema sušenja koji radi uz podršku toplotne pumpe. Ustanovljeno je da se pronalaženjem pogodne kombinacije ulaznih parametara sušenja može smanjiti angažovana snaga pogonskih komponenti sistema sušare. Veličine kojima se direktno utiče na energetska efikasnost sistema toplotne pumpe su temperature isparavanja i kondenzacije rashladnog fluida i vrsta rashladnog fluida. U cilju analize mogućnosti optimizacije rada sistema kreiran je grafički nomogram koji povezuje relevantne parametre rada sistema i pojednostavljuje njihovo upoređivanje. Pokazano je da se pravilnim izborom rashladnog fluida i temperature isparavanja može uticati na potrošnju energije, veličinu komponenta sistema i elastičnost njihovog rada. Na efikasnost celog sistema se može još dodatno uticati i konstruktivnim karakteristikama kanalskog distributivnog sistema sa pripadajućim komponentama u smislu pronalaženja optimalnog opterećenja pogonskog ventilatora sušare. Pravilno utvrđenim parametrima rada instalacije je moguće uticati na povećanje energetske efikasnosti sistema i smanjenje specifične potrošnje energije po količini izdvojene vlage.

U cilju verifikacije dobijenih rezultata izvršeno je poređenje rezultata sopstvenog matematičkog modela sa rezultatima sprovedenog eksperimentalnog istraživanja, a potom i sa modelima i eksperimentalnim istraživanjima drugih autora. Formirana jednačina modela je eksponencijalnog oblika i pokazuje zadovoljavajuće slaganje sa modelima drugih autora. Slaganje rezultata sopstvenog modela i rezultata eksperimenata je u granicama $0,99371 \leq r^2 \leq 0,99999$, odnosno $0,19520 \geq RMSE \geq 0,00024$. Vrednosti koeficijenta determinacije (r^2) i standardne geške regresije ($RMSE$) dobijene su softverski pomoću programa *Table Curve 2D v.5.01* i *Table Curve 3D v.4.0*.

Najbolje slaganje rezultata sopstvenog modela je postignuto sa rezultatima modela drugih autora: *Newton-a*, *Page-a* i *Henderson & Pabis-a*, i kreće se u granicama $0,99065 \leq r^2 \leq 0,99985$, odnosno $0,02434 \geq RMSE \geq 0,002$. Ovo se može objasniti korišćenjem sličnih eksponencijalnih funkcija u ovim modelima. Rezultati sopstvenog korelacionog modela u poređenju sa rezultatima modela *Aktas-a*, imaju manja odstupanja od eksperimentalnih vrednosti, što se objašnjava korišćenjem funkcije polinoma višeg stepena u sopstvenom korelacionom modelu.

U cilju verifikacije dobijenih vrednosti efektivnog koeficijenta difuzije, izvršeno je poređenje rezultata dobijenih sopstvenim eksperimentima sa rezultatima eksperimenata drugih autora. Dobijene su vrednosti D_{eff} u granicama $1.50 \cdot 10^{-8} \leq D_{eff} \leq 23.7 \cdot 10^{-8} m^2/s$. Pokazano je zadovoljavajuće slaganje sa dobijenim vrednostima D_{eff} drugih autora, koje se kreću u granicama $1 \cdot 10^{-10} \leq D_{eff} \leq 1.54 \cdot 10^{-6} m^2/s$.

Naučni doprinos ove doktorske teze se pre svega ogleda u jednom sveobuhvatnom pristupu u razvoju matematičko-numeričkog modela promene bezdimenzionog sadržaja vlage u materijalu tokom vremena. Bitna karakteristika predloženog modela je njegova opštost koja se ogleda u primeni modela za simulaciju niza režima rada prilikom sušenja kako ispitivanih materijala tako i drugih materijala sličnih oblika i karakteristika. Analizama pokazatelja efikasnosti procesa sušenja i efikasnosti rada sistema sušenja, moguće je predvideti i eventualne konstrukcione izmene koje bi dovele do poboljšanja rada sistema.

Dalja naučna istraživanja bi pre svega trebalo bazirati na razvoju modela kinetike sušenja posmatranjem pojava i procesa u proširenom domenu istraživanja. Pri tome bi trebalo izvršiti i određenu eksperimentalnu verifikaciju na realnom sistemu sušenja koji radi sa podrškom toplotne pumpe. Takođe, trebalo bi razmatrati i uticaj promene zapremine materijala (skupljanje) kao dopunski parametar u jednačinama modela, koja je u ovoj tezi zanemarena. Buduća istraživanja bi trebalo bazirati i na pretpostavkama očuvanja pojedinih pokazatelja kvaliteta osušenog proizvoda (boja, miris, aroma, ukus i slično) prilikom odgovarajućih postavki uticajnih parametara, čime bi se upotpunila slika o krajnjem efektu i benefitu ovakve tehnologije sušenja. Posebnu pažnju bi trebalo posvetiti istraživanjima usmerenim na postizanje visoke energetske efikasnosti sistema, područja njegove primene i smanjenja negativnog uticaja na okruženje.

Proces sušenja prehrambenih materijala se ne završava na granicama sistema izabranim u ovoj tezi, već se može proširiti uzimanjem u obzir dodatnih uticajnih parametara čije se varijacije mogu postići na najrazličitije načine, uključujući i implementaciju naprednih tehnologija. Spajanjem eksperimentalnih istraživanja koja se tiču kvaliteta procesa, efikasnosti rada sistema, kvaliteta dobijenog proizvoda i uticaja na životnu sredinu, može nastati jedinstvena celina koja bi bila veoma značajna za sveobuhvatnu multidisciplinarnu analizu procesa sušenja prehrambenih materijala.

8. LITERATURA

- Abbott, J.A. 1999. Quality measurement of fruits and vegetables, *Postharvest Biology and Technology* 15: 207–225.
- Aceves-Saborio, S. 1993. Analysis of energy consumption in heat pump and conventional driers. *Heat Recovery Systems & CHP*, 13(5), p.419-428.
- Adapa, P.K., Schoenau, G.J. 2005. Re-circulating heat pump assisted continuous bed drying and energy analysis, *Int J Energy Res* 29, p.961–972.
- Aghbashlo, M., Kianmehr, M.H., Arabhosseini A. 2009. Modeling of thin-layer drying of potato slices in length of continuous band dryer, *Energy Conversion and Management* 50, p.1348–1355.
- Ajayi, O.O., Sheehan, M.E. 2012. Design loading of free flowing and cohesive solids in flighted rotary dryers, *Chemical Engineering Science*, 73(7), p.400-411.
- Akpinar, E., Midilli, A., Bicer Y. 2003. Single layer drying behavior of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling, *Energy Conversion and Management* 44, p.1689-1705.
- Aktas, M., Ceylanb, I., Yilmaz S. 2009. Determination of drying characteristics of apples in a heat pump and solar dryer, *Desalination*, Volume 239, p.266–275.
- AliKhan, M. 1980. The effect of placing a perforated plate just upstream of the impigement surface. Ph.D.thesis, University of Tokyo
- Alves-Filho, O. , Strommen, I., Aasprong, A., Torsveit, A.K., Boman, H.C., Hovin, W. 1998a. Heat pump fluidized bed drying for lactic acid suspensions using inert particles and freeze drying. *Drying 98 - Proceedings of the 11th International Drying Symposium (IDS 98)*, Halkidiki, Greece, p.1833-1840.
- Alves-Filho, O., Thorbergsen, E., Strommen, I. 1998b. A component model for simulation of multiple fluidized bed heat pump dryers. *Drying 98 - Proceedings of the 11th International Drying Symposium (IDS 98)*, Halkidiki, Greece, p.94-101.
- Alves-Filho, O., Tokle, T. 1999. Heat pumps dry food products in Norway. *IEA Heat Pump Centre Newsletter* 17(4), p.22–23.
- Antonijević, D. 1999. Nestacionirano prenošenje toplote i materije tokom procesa kombinovanog konduktivno-konvektivnog sušenja koloidnih kapilarno-poroznih materijala, *Doktorska disertacija*, Mašinski fakultet Univerzitet u Beogradu, Beograd.
- Artnaseaw, A., Theerakulpisut, S., Benjapiyaporn, C. 2010. Drying characteristics of Shiitake mushroom and Jinda chili during vacuum heat pump drying, *Food and Bioproducts Processing*, 88(2–3), p.105-114.
- Baini, R., Langrish, T.A.G. 2007. Choosing an appropriate drying model for intermittent and continuous drying of bananas, *Journal of Food Engineering* 79, p.330–343.

- Baini, R., Langrish, T.A.G. 2008. An assessment of the mechanisms for diffusion in the drying of bananas, *Journal of Food Engineering* 85, p.201–214.
- Balázs, T., Örvös, M., Tömösy, L. 2007. Heat and Mass Transfer in an Agitated Contact-Convective Heated Dryer, *Food and Bioproducts Processing*, 85(3), p.291-297.
- Banga, J.R., Singh, R.P. 1994. Optimization of air drying of foods. *J. Food Engng.*, 23, p.189-211.
- Bannister, P., Carrington, G., Chen, G. 2002. Heat pump dehumidifier drying technology: Status, potential and prospects. 7th International Energy Agency Conference on Heat Pump technology, Beijing, China, Vol.1, China Architecture and Building Press, p.219-230.
- Barati, E., Esfahani, J.A. 2011. A new solution approach for simultaneous heat and mass transfer during convective drying of mango, *Journal of Food Engineering*, 102(4), p.302-309.
- Basman, A., Yalcin, S. 2011. Quick-boiling noodle production by using infrared drying, *Journal of Food Engineering*, 106(3), p.245-252.
- Belessiotis, V., Delyannis, E. 2011. Solar drying, *Solar Energy*, 85(8), p.1665-1691.
- Bimbenet, J.J., Lebert, A. 1992. Food drying and quality interactions. In: *Drying 92 - Proceedings of the 8th International Drying Symposium*, Montreal, Canada, p.42-57.
- Borompichaichartkul, C., Luengsode, K., Chinprahast, N., Devahastin, S. 2009. Improving quality of macadamia nut (*Macadamia integrifolia*) through the use of hybrid drying process, *Journal of Food Engineering*, 93(3), p.348-353.
- Braun, J.E., Bansal, P.K., Groll, E.A. 2002. Energy efficiency analysis of air cycle heat pump dryers, *International Journal of Refrigeration* 25, p.954–965.
- Brodyansky, V.M., Sorin, M.V., Le Goff, P. 1994. *The Efficiency of Industrial Processes: Exergy Analysis and Optimization*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, p.512. (ISBN: 978-0444899965)
- Çağlar, A., Toğrul, İ.T., Toğrul, H. 2009. Moisture and thermal diffusivity of seedless grape under infrared drying, *Food and Bioproducts Processing*, 87(4), p.292-300.
- Catton, W., Carrington, G., Sun, Z. 2011. Exergy analysis of an isothermal heat pump dryer, *Energy*, 36(8), p.4616-4624.
- Ceylan, İ., Aktaş, M., Doğan, H. 2007. Energy and exergy analysis of timber dryer assisted heat pump, *Applied Thermal Engineering*, 27(1), p.216-222.
- Chamoun, M., Rulliere, R., Haberschill, P., Berail, J.F. 2010. Dynamic model of an industrial heat pump using water as refrigerant, *International Journal of Refrigeration*, 35(4), p.1080-1091.
- Chandra, V., Mohan, P., Talukdar, P. 2010. Three dimensional numerical modeling of simultaneous heat and moisture transfer in a moist object subjected to

- convective drying, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 53, p.4638-4650.
- Chen, X.D., Mujumdar, A.S. 2008. *Drying technologies in food processing*, First edition, Blackwell Publishing, Ltd., UK. (ISBN: 978-1-4051-5763-6)
- Chou, S.K., Chua, K.J. 2001. *Proceedings of the First Nordic Drying Conference (CD-ROM)*, Trondheim, Norway.
- Chou, S.K., Hawlader, M.N.A, Ho, J.C., Chua, K.J. 1998. On the study of a two-stage heat pump cycle for drying of agricultural products. *Proc. ASEAN Seminar and Workshop on Drying Technology*. Phitsanulok, Thailand, Paper H, p.1-4.
- Chua, K.J., Chou, S.K. 2005. A modular approach to study the performance of a two-stage heat pump system for drying, *Applied Thermal Engineering*, 25(8–9), p.1363-1379.
- Chua, K.J., Chou, S.K., Hawlader, M.N.A, Ho, J.C. 1998. A two-stage heat pump dryer for better heat recovery and product quality. *J. Institute of Engineers of Singapore* 38(6), p.8-14.
- Chua, K.J., Chou, S.K., Yang, W.M. 2010. Advances in heat pump systems: A review, *Applied Energy*, 87(12), p.3611-3624.
- Colak, N., Hepbasli, A. 2009a. A review of heat pump drying: Part1 – Systems, models and studies, *Energy Conversion and Management*, 50, p.2180–2186.
- Colak, N., Hepbasli, A. 2009b. A review of heat pump drying (HPD): Part2 – Applications and performance assessments, *Energy Conversion and Management* 50, p.2187–2199.
- Coşkun, S., Motorcu, A.R., Yamankaradeniz, N., Pulat, E. 2012. Evaluation of control parameters' effects on system performance with Taguchi method in waste heat recovery application using mechanical heat pump, *International Journal of Refrigeration*, 35(4), p.795-809.
- Crank, J. 1975. *The mathematics of diffusion*, Second edition, Brunel University Uxbridge, Oxford University Press, London. (ISBN: 0-19-853344-6)
- Daghigh, R., Ruslan, M.H., Alghoul, M.A., Zaharim, A., Sopian, K. 2009. Design of nomogram to predict performance of heat pump dryer, 3rd WSEAS Int. Conf. on Renewable Energy Sources (RES' 09), *Proceedings*, p.277-282, University of La Laguna, Tenerife, Canary Islands, Spain, July 1-3. (ISSN: 1790-5095, ISBN: 978-960-474-093-2)
- Daghigh, R., Ruslan, M.H., Sulaiman, M.Y., Sopian, K. 2010. Review of solar assisted heat pump drying systems for agricultural and marine products, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), p.2564-2579.
- De Bonis, M.V., Ruocco, G. 2011. An experimental study of the local evolution of moist substrates under jet impingement drying, *International Journal of Thermal Sciences*, 50(1), p.81-87.
- Defraeye, T., Blocken, B., Carmeliet, J. 2012a. Analysis of convective heat and mass transfer coefficients for convective drying of a porous flat plate by

- conjugate modelling, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(1–3), p.112-124.
- Defraeye, T., Blocken, B., Derome, D., Nicolai, B., Carmeliet, J. 2012b. Convective heat and mass transfer modelling at air–porous material interfaces: Overview of existing methods and relevance, *Chemical Engineering Science* 74, p.49-58.
- Dincer, I. 2000. Energetic, exergetic and environmental aspects of drying systems. *Proceedings of the 12th Int. Drying Symp. (IDS 2000)*, Leeuwenhorst, The Netherlands, Aug 28-31, 2000 (CD-ROM), Paper #18.
- Dincer, I. 2011. Exergy as a potential tool for sustainable drying systems, *Sustainable Cities and Society*, 1(2), p.91-96.
- Dolak, I., Murthy, S., Bauer, T. 2001. Impact of Upstream Processes on Heat-drying Technology. In *Proceedings of the Water Environment Federation, American Water Works Association and California Water Environment Association Specialty Conference, Biosolids 2001: Building Public Su ort*. Arlington, VA: Water Environment Federation.
- Doymaz, I. 2009. An experimental study on drying of green apples, *Drying Technology*, 27(3), p.478-485.
- Drouzas, A.E., Schubert, H. 1996. Microwave a lication in vacuum drying of fruits. *J. Food Engng.*, 28, p.203-209.
- El-Behery, S.M., El-Askary, W.A., Hamed, M.H., Ibrahim, K.A. 2012. Numerical simulation of heat and mass transfer in pneumatic conveying dryer, *Computers & Fluids*, 68(15), p.159-167.
- Erdoğan, F. 2008. A review on simultaneous determination of thermal diffusivity and heat transfer coefficient, *Journal of Food Engineering*, 86(3), p.453-459.
- Fadhel, M.I., Abdo, R.A., Yousif, B.F., Azami, Z., Sopian, K. 2011a. Thin-layer drying characteristics of banana slices in a force convection indirect solar drying. In: *EE 2011: 6th IASME/WSEAS International Conference on Energy and Environment*, 23-25 Feb 2011, Cambridge, United Kingdom.
- Fadhel, M.I., Sopian, K., Daud, W.R.W., Alghoul, M.A. 2011b. Review on advanced of solar assisted chemical heat pump dryer for agriculture produce, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(2), p.1152-1168.
- Fatouh, M., Abou-Ziyan, H.Z., Metwally, M.N., Abdel-Hameed, H.M. 1998. Performance of a series air-to-air heat pump for continuous and intermittent drying, *Proc ASME Adv Energy Syst Div* 38, p.435–442.
- Fatouh, M., Metwally, M.N., Helali, A.B., Shedid, M.H. 2006. Herbs drying using a heat-pump dryer, *Energy Conversion and Management* 47, p.2629-2643.
- Feng, X., Zhu, X.X., Zheng, J.P. 1996. A practical exergy method for system analysis. *Proceedings of the 31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, IECEC 96*, Washington, D.C., p.2068-2071.
- Fernando, W.J.N., Low, H.C., Ahmad, A.L. 2011. 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, *Journal of Food Engineering* 102, p.310-316.
- Gabites, J.R., Abrahamson, J., Winchester, J.A. 2010. Air flow patterns in an industrial milk powder spray dryer, *Chemical Engineering Research and Design*, 88(7), p.899-910.
- Ganguly, A., Alexeenko, A.A. 2012. Modeling and measurements of water–vapor flow and icing at low pressures with application to pharmaceutical freeze-drying, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(21–22), p.5503-5513.
- Gavrila, C., Ghiaus, A.G., Gruia, I. 2008. Heat and mass transfer in convective drying processes, *COMSOL Conference, Proceedings, Hannover*. <http://www.comsol.com/papers/5295>
- Gekas, V. 2001. Mass transfer modeling. *J. Food Engng.*, 49, p.97-102.
- Geng, F., Li, Y., Yuan, L., Liu, M., Wang, X., Yuan, Z., Yan, Y., Luo, D. 2013. Experimental study on the space time of flexible filamentous particles in a rotary dryer, *Experimental Thermal and Fluid Science* 44, p.708-715.
- Giner, S.A. 2009. Influence of Internal and External Resistances to Mass Transfer on the constant drying rate period in high-moisture foods, *Biosystems Engineering*, 102(1), p.90-94.
- Goh L.J., Othman M.Y., Mat S., Ruslan H., Sopian K. 2011. Review of heat pump systems for drying application, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, p.4788–4796.
- Grabowski, S., Mujumdar, A.S., Ramaswamy, H.S., Strumillo, C. 1994. Osmo-convective drying of grapes in a fluidized bed of sugar and semolina. In: *Drying 94 - Proceedings of the 9th International Drying Symposium, Gold Coast, Australia*. p.921-928.
- Greensmith, M. 1998. *Practical Dehydration*. CRC Press, Boca Raton, FL
- Gungor, A., Erbay, Z., Hepbasli, A. 2011. Exergetic analysis and evaluation of a new application of gas engine heat pumps (GEHPs) for food drying processes, *Applied Energy*, 88(3), p.882-891.
- Gupta, C.K., Sathiyamoorthy, D. 1999. *Fluid Bed Technology in Material Processing*, CRC Press, NewYork.
- Hadrich, B., Kechaou, N. 2009. Mathematical modeling and simulation of shrunk cylindrical material's drying kinetics – Approximation and application to banana, *Food and Bioproducts Processing* 87, p.96-101.
- Harchegani, M.T., Sadeghi, M., Emami, M.D., Moheb, A. 2012. Investigating energy consumption and quality of rough rice drying process using a grain heat pump dryer, *Australian Journal of Crop Science*, 6(4), p.592-597.
- Hassini, L., Azzouz, S., Peczalski, R., Belghith, A. 2007. Estimation of potato moisture diffusivity from convective drying kinetics with correction for shrinkage, *Journal of Food Engineering*, 79(1), p.47-56.

- Hawladar, M.N.A., Bong, T.Y., Yang, Y. 1998b. A simulation and performance analysis of a heat pump batch dryer. *Drying 98 - Proceedings of the 11th International Drying Symposium (IDS 98)*, Halkidiki, Greece, Paper A, p.208-215.
- Hawladar, M.N.A., Chou, S.K., Ho, J.C., Chua, K.J. 1998a. On the development of a heat pump dryer to maximise heat recovery. *Drying 98 -Proceedings of the 11th International Drying Symposium (IDS 98)*, Halkidiki, Greece, Paper A, p.616-623.
- Hawladar, M.N.A., Rahman, S.M.A., Jahangeer, K.A. 2008. Performance of evaporator-collector and air collector in solar assisted heat pump dryer, *Energy Conversion and Management*, 49(6), p.1612-1619.
- Henderson, S.M., Pabis S. 1961. Grain drying theory I. Temperature effect on drying coefficient, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 6(3), p.169–174.
- Hesse, B. 1995. Energy efficient electric drying systems for industry. *Drying Tech.*, 13, p.1543-1562.
- Hii, C.L., Law, C.L., Suzannah, S. 2012. Drying kinetics of the individual layer of cocoa beans during heat pump drying, *Journal of Food Engineering*, 108(2), p.276-282.
- Ibrahim, K.A., Hamed, M.H., El-Askary, W.A., El-Behery, S.M. 2013. Swirling gas–solid flow through pneumatic conveying dryer, *Powder Technology* 235, p.500-515.
- Janjai, S., Mahayothee, B., Lamlert, N., Bala, B.K., Precoppe, M., Nagle, M., Müller, J. 2010. Diffusivity, shrinkage and simulated drying of litchi fruit (*Litchi Chinensis Sonn.*), *Journal of Food Engineering* 96, p.214-221.
- Jolly, P., Jia, X., Clements, S. 1990. Heat pump assisted continuous drying part 1 : Simulation model. *Intl. J. Energy Res.*, 14, p.757-770.
- Kaleta, A., Gornicki, K. 2010. Evaluation of drying models of apple (var.McIntosh) dried in a convective dryer, *International Journal of Food Science and Technology* 45, p.891-898.
- Kaleta, A., Górnicki, K., Winiczenko, R., Chojnacka, A. 2013. Evaluation of drying models of apple (var. Ligol) dried in a fluidized bed dryer, *Energy Conversion and Management* 67, p.179-185.
- Karim, M.A., Hawladar, M.N.A. 2005. Drying characteristics of banana: theoretical modelling and experimental validation, *Journal of Food engineering*, Volume 70, p.35-45.
- Kaya, A., Aydın, O., Demirtas, C. 2007. Drying kinetics of red delicious apple, *Biosystems Engineering*, 96(4), p.517–524.
- Kaya, A., Aydın, O., Dincer, I. 2006. Numerical modeling of heat and mass transfer during forced convection drying of rectangular moist objects, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 49, p.3094-3103.
- Keey, R.B. 1972. *Drying: Principles and Practice*. Pergamon, New York.

- Keey, R.B. 1978. *Introduction to Industrial Drying Operations*. Pergamon, New York.
- Keey, R.B., Langrish, T.A.G., Walker, J.C.F. 2000. *Kiln-drying of lumber*. New York: Springer, p.85–105.
- Kemp, I., Fyhr, B., Laurent, S., Roques, M., Groenewold, C., Tsotsas, E., Sereno, A., Bonazzi, C., Bimbenet, J., Kind, M. 2001. Methods for processing experimental drying kinetics data. *Drying Technology*, 19(1), p.15-20.
- Kingsly, A.R.P., Singh, R., Goyal, R.K., Singh, D.B. 2007. Thin-layer drying behaviour of organically produced tomato, *American Journal of Food Technology* 2(2), p.71-78.
- Koua, K.B., Fassinou, W.F., Gbaha, P., Toure, S. 2009. Mathematical modeling of the thin layer solar drying of banana, mango and cassava. *Energy* 34, p.1594–1602.
- Krokida, M., Maroulis, Z. 2000. Quality changes during drying of food materials. In: *Drying Technology in Agriculture and Food Sciences*, Mujumdar, A.S. ed., Science Publishers, Inc., Enfield, NH, p.61-106.
- Krokida, M.K., Foundoukidis, E, Maroulis, Z. 2004. Drying constant: literature data compilation for foodstuffs, *Journal of Food Engineering*, 61(3), p.321-330
- Krokida, M.K., Maroulis, Z.B., Saravacos, G.D. 2001. The effect of the method of drying on the colour of dehydrated products. *Intl. J. Food Sci. Tech.* 36, p.53-59.
- Kudra, T., Mujumdar, A.S. 2002. *Advanced drying technologies, Part II, Ch.15: Heat-pump drying*, p.239-264, Marcel Dekker Inc. (ISBN: 0-8247-9618-7)
- Land, CM. 1991. *Industrial Drying Equipment: Selection and Application*. Marcel Dekker, New York, NY.
- Larson, D.L., Cortez, L.A.B. 1995. Exergy analysis: essential to effective energy management. *Trans. ASAE*, 38(4), p.1173-1178.
- Law R., Harvey, A., Reay, D. 2012. Opportunities for low-grade heat recovery in the UK food processing industry, *Applied Thermal Engineering*, 10.1016/j.applthermaleng.2012.03.024.
- Leeratanarak, N., Devahastin, S., Chiewchan, N. 2006. Drying kinetics and quality of potato chips undergoing different drying techniques, *Journal of Food Engineering* 77, p.635–643.
- Lengyel, A. 2007. The Change of Body Temperature During Convective Drying of Cube-Shaped Apple Pieces, *Drying Technology*, 25(7-8), p.1275-1280.
- Lewis, W. K. 1991. The rate of drying of solid materials. *I & EC-Symposium on Drying*, 3(5), p.42.
- Li, Y., Li, H.F., Dai, Y.J., Gao, S.F., Wei, Lei, Li, Z.L., Odinez, I.G., Wang, R.Z. 2011. Experimental investigation on a solar assisted heat pump in-store drying system, *Applied Thermal Engineering*, 31(10), p.1718-1724.

- Li, Z., Raghavan, G.S.V., Wang, N., Vigneault, C. 2011. Drying rate control in the middle stage of microwave drying, *Journal of Food Engineering*, 104(2), p.234-238.
- Mariani, V.C., De Lima, A.G.B., Coelho, L.S. 2008. Apparent thermal diffusivity estimation of the banana during drying using inverse method, *Journal of Food Engineering*, 85(4), p.569-579.
- Marinos-Kouris, D., Maroulis, Z.B. 1995. Transport properties in the drying of solids. In: *Handbook of Industrial Drying*, Mujumdar, A.S. ed., Marcel Dekker, Inc., New York, NY.
- McMinn, W.A.M., Magee, T.R.A. 1999. Principles, methods and applications of the convective drying of foodstuffs, Institution of Chemical Engineers, *Transactions IChemE*, 77(C).
- Meisami-asl, E., Rafiee, S., Keyhani, A., Tabatabaeefar, A. 2010. Determination of suitable thin layer drying curve model for apple slices (variety-Golab), *Plant Omics Journal*, 3(3), p.103-108.
- Menon, A.S., Mujumdar, A.S. 1982. Energy saving in the drying of solids, *Indian Chem. Eng.*, 14(2), p.8-13.
- Meyer, J.P., Greyvenstein, G.P. 1992. The drying of grain with heat pumps in South Africa: A techno-economic analysis. *Intl. J Energy Research* 16, p.13-20.
- Minea, V. 2010. Improvements of high-temperature drying heat pumps, *International Journal of Refrigeration*, 33(1), p.180-195.
- Minea, V. 2012a. Part I – Drying heat pumps – System integration, *International Journal of Refrigeration*, 10.1016/j.ijrefrig.2012.11.025.
- Minea, V. 2012b. Part II – Drying heat pumps – Agro-food, biological and wood products, *International Journal of Refrigeration*, 10.1016/j.ijrefrig.2012.11.026.
- Minh-Hue, N., William, E.P. 2007. Air-drying of banana: influence of experimental parameters, slab thickness, banana maturity and harvesting season. *Journal of Food Engineering* 79, p.200-207.
- Mittal, G.S. 1999. Mass diffusivity of food products. *Food Rev. Intl.*, 15(1), p.19-66.
- Molnar, K. 1995. Experimental techniques in drying. In: *Handbook of Industrial Drying*, Mujumdar, A.S. ed., Marcel Dekker, Inc., New York, NY.
- Moss, L., Sapienza, F. 2005. Presented at *Managing Biosolids: A Toolbox for Texas*, hosted by the Water Environment Association of Texas, Austin, Texas.
- Mujumdar, A.S. 1991. Drying technologies of the future. *Drying Technol* 9(2), p.325-347.
- Mujumdar, A.S. 2000. Classification and selection of industrial dryers. In: SDevahastin, ed. *Mujumdar's Practical Guide to Industrial Drying: Principles, Equipment and New Developments*. Brossard, Canada: Exergex Corporation, 23-36.

- Mujumdar, A.S. 2006. Handbook of Industrial Drying, Third edition, Marcel Dekker, Inc., New York.(ISBN: 978-1-57444-668-5)
- Mujumdar, A.S., Devahastin, S. 2003. Applications for fluidized bed drying, Handbook of Fluidization and Fluid Systems, Yang,W.C., Ed., Ch.18., Marcel Dekker, New York.
- Nguyen, M.H., Price, W.E. 2007. Air-drying of banana: Influence of experimental parameters, slab thickness, banana maturity and harvesting season, Journal of Food Engineering 79, p.200–207.
- Niamnuy, C., Nachaisin, M., Poomsa-ad, N., Devahastin, S. 2012. Kinetic modelling of drying and conversion/degradation of isoflavones during infrared drying of soybean, Food Chemistry, 133(3), p.946-952.
- O’Toole, F., McGovern, J.A. 1990. Some concepts and conceptual devices for exergy analysis. J. Mech. Engng. Sci. - Proc. Instn. Mech. Engrs., 24, p.329-340.
- Oktaý, Z. 2003. Testing of a heat-pump assisted mechanical opener dryer, Applied thermal engineering 23, p.153-162.
- Oliver, T.N. 1982. Process drying with a dehumidifying heat pump. International Symposium on the Industrial Application of Heat Pumps, Coventry, England, March 24-26, 1982, p.73-88.
- Pakowski, Z. 1996. DryPak - Program for Psychometric and Drying Computation.
- Pakowski, Z., Adamski, A. 2007. The comparison of two models of convective drying of shrinking materials using apple tissue as an example, Drying Technology, 25(7-8), p.1139-1147.
- Pal, U.S., Khan, Md.K. 2008b. Calculation steps for the design of different components of heat pump dryers under constant drying rate condition, Drying Technology, 26(7), p.864-872.
- Pal, U.S., Khan, Md.K., Mohanty, S.N. 2008a. Heat pump drying of green sweet pepper, Drying Technology 26, p.1584-1590.
- Pavón-Melendez, G., Hernández, J.A., Salgado, M.A., Garca, M.A. 2002. Dimensionless analysis of the simultaneous heat and mass transfer in food drying, Journal of Food Engineering, 51(4), p.347-353.
- Pendyala, V.R., Devotta, S., Patwardhan, V.S. 1986. The economics of heat pump assisted drying systems. Heat Recovery Systems, 6(6): 433-442.
- Perera, C.O., Rahman M.S. 1997. Heat pump dehumidifier drying of food. Trends in Food Sci.Tech. 8, p.75-79.
- Perry, R.H., Green, D.W. 1999. Perry’s chemical engineers’ handbook, 7th edition, McGraw-Hill Companies Inc. (ISBN: 0-07-049841-5)
- Phoungchandang, S., Srinukroh, W., Leenanon, B. 2008. Kaffir Lime Leaf (Citrus hystric DC.) drying using tray and heat pump dehumidified drying, Drying Technology, 26(12), p.1602-1609.

- Ping, W., Changfang, X., Shiming, X., Yulin, G. 2012. Study of Direct Compression Heat Pump Energy-saving Technology, *Procedia Environmental Sciences*, 12(A), p.394-399.
- Polak, R., Pitombo, R.N.M. 2011. Care during freeze-drying of bovine pericardium tissue to be used as a biomaterial: A comparative study, *Cryobiology*, 63(2), p.61-66.
- Polyanin, A.D., Zaitsev, V.F., 2003. *Handbook of Exact Solutions for Ordinary Differential Equations*, second ed. Chapman Hall, Washington. p.750.
- Prasertsan, S., Saen-saby, P. 1998. Heat pump drying of agricultural materials. *Drying Technology* 16 (1-2), p.235-250.
- Prasertsan, S., Saen-saby, P. 1998b. Heat pump dryers: Research and development needs and opportunities. *Drying Tech.*, 16(1), p.251-270.
- Prasertsan, S., Saen-saby, P., Ngamsritrakul, P., Prateepchaikul, G. 1996b. Heat pump dryer part 1: Simulation of the models. *Intl. J. Energy Res.* 20, p.1067-1079.
- Prasertsan, S., Saen-saby, P., Prateepchaikul, G., Ngamsritrakul, P. 1997. Heat pump dryer. Part 3: Experiment verification of the simulation. *Intl. J Energy Research* 21, p.1-20.
- Prasertsan, S., Saen-saby, P., Prateepchaikul, G., Ngamsritrakul, P. 1996a. Effects of product drying rate and ambient condition on the operating modes of heat pump dryer. *Drying 96 - Proceedings of the 10th International Drying Symposium, Krakow, Poland, A*, p.529-534.
- Puyate, Y.T., Lawrence, C.J. 2006. Sherwood's models for the falling-rate period: A missing link at moderate drying intensity, *Chemical Engineering Science*, 61(21), p.7177-7183.
- Rahman, S.M.A., Islam, M.R., Mujumdar, A.S. 2007. A Study of Coupled Heat and Mass Transfer in Composite Food Products during Convective Drying, *Drying Technology*, Vol. 25, Issue 7-8, p.1359-1368.
- Ratti, C. 2001. Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review. *J. Food Engng.*, 49, p.311-319.
- Rossi, S.J., Neves, L.C., Kieckbusch, T.G. 1992. Thermodynamic and energetic evaluation of a heat pump applied to drying of vegetables. In: Mujumdar AS, ed. *Drying '92*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, p.1475-1484.
- Rupar, K., Sanati, M. 2003. The release of organic compounds during biomass drying depends upon the feedstock and/or altering drying heating medium, *Biomass and Bioenergy*, 25(6), p.615-622.
- Sacilik, K., Elicin, A.K. 2006. The thin layer drying characteristics of organic apple slices, *Journal of Food Engineering* 73, p.281-289.
- Saensabai, P., Prasertsan, S. 2003. Effects of component arrangement and ambient and drying condition on the performance of heat pump dryers, *Drying Technology*, 21(1), p.103-27.

- Seiedlou, S., Ghasemzadeh, H.R., Hamdami, N., Talati, F., Moghaddam, M. 2010. Convective drying of apple: mathematical modeling and determination of some quality parameters, *International Journal of Agriculture & Biology*, 12(2), p.171–178.
- Shi, Q.L., Xue, C.H., Zhao, Y., Li, Z.J., Wang, X.Y., Luan, D.L. 2008. Optimization of processing parameters of horse mackerel (*Trachurus japonicus*) dried in a heat pump dehumidifier using response surface methodology, *Journal of Food Engineering*, 87(1), p.74-81.
- Simal, S., Deya, E., Frau, M., Rossello, C. 1997. Simple modelling of air drying curves of fresh and osmotically pre-dehydrated apple cubes, *Journal of Food Engineering* 33, p.139-150.
- Simal, S., Rossello, C., Berna, A., Mulet, A. 1994. Heat and mass transfer model for potato drying, *Chemical Engineering Science*, 49(22), p.3739-3744.
- Singh, J.N., Pandey, R.K. 2011. Convective air drying characteristics of sweet potato cube (*Ipomoea batatas* L.). *Food and Bioproducts Processing*, doi: 10.1016/j.fbp.2011.06.006.
- Singh, S.P., Jairaj, K.S., Srikant, K. 2012. Universal drying rate constant of seedless grapes: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), p.6295-6302.
- Soponronnarit, S., Wetchacama, S., Nathakaranakule, A., Swasdisevi, T., Rukprang, P. 1998. Papaya glace' drying using heat pump. *Drying 98 -Proceedings of the 11th International Drying Symposium (IDS 98)*, Halkidiki, Greece, B, p.1373-1380.
- Sosle, V. 2002. A heat pump dehumidifier assisted dryer for agri-foods, PhD Thesis, University Montreal, Department of agricultural and biosystems engineering, Canada, p.126.
- Sosle, V., Raghavana, G.S.V., Kittler, R. 2003. Low-temperature drying using a versatile heat pump dehumidifier, *Drying Technology*, 21(3), p.539–554.
- Söylemez, M.S. 2006. Optimum heat pump in drying systems with waste heat recovery, *Journal of Food Engineering*, 74(3), p.292-298.
- Sreekumar, A. 2010. Techno-economic analysis of a roof-integrated solar air heating system for drying fruit and vegetables, *Energy Conversion and Management*, 51(11), p.2230-2238.
- Stanković, J., Ralević, N.R., Ljubanović-Ralević, I. 2002. *Statistika sa primenom u poljoprivredi*, Treće izdanje, Univerziteti udžbenik, p.462. Izdavač: Savremena administracija – Beograd. (ISBN 86-387-0317-1)
- Strommen, I., Kramer, K. 1994. New applications of heat pumps in drying process. *Drying Technology* 12(4) , p.889-901.
- Strumillo, C., Adamiec, J. 1996. Energy and quality aspects of food drying. *Drying Tech*, 14(2) , p.423-448.
- Strumillo, C., Kudra, T. 1986. *Drying: Principles, Applications and Design*. Gordon and Breach, New York.

- Sun, Z., Carrington, C.G., McKenzie, C., Bannister, P., Bansal, B. 1996. Determination and a lica-tion of characteristic drying-rate curves in dehumidifier wood drying. Proc. 5th IUFRO Conf., Quebec, p.495-503.
- Sunkara, K.R., Herz, F., Specht, E., Mellmann, J., Erpelding, R. 2013. Modeling the discharge characteristics of rectangular flights in a flighted rotary drum, Powder Technology 234, p.107-116.
- Szalay, A., Pallai, E., Szentmarjay, T. 2001. Production of powder-like material from suspension by drying on inert particles, in Handbook of Conveying and Handling of Particulate Solids, A.LevyandH. Kalman(Eds.), Elsevier Science, Amsterdam, 10, p.581–586.
- Sztabert, Z.T., Kudra, T. 1995. Cost estimation methods for dryers. In: Handbook of Industrial Drying, Mujumdar, A.S. ed. Marcel Dekker, Inc., New York, p.1227-1240.
- Taheri-Garavand, A., Rafiee, S., Keyhani, A. 2011. Effective moisture diffusivity and activation energy of tomato in thin layer dryer during hot air drying, International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies, 2(2), p.239-248.
- Teeboonma, U., Tiansuwan, J., Soponronnarit, S. 2003. Optimization of heat pump fruit dryers, Journal of Food Engineering, 59(4), p.369-377.
- Theerakulpisut, S. 1990. Modelling heat pump grain drying system, PhD Thesis, University of Melbourne, Department of mechanical and manufacturing engineering, Australia, p.348.
- Tolmač, D., Josimović, Lj., Prvulović, S., Dimitrijević, D. 2011. Experimental and Numerical Studies of Heat Transfer and Kinetic Drying of Convection Pneumatic Dryer. FME Transactions 39, p.139-144.
- Topić, R. 1989. Osnove projektovanja, proračuna i konstruisanja sušara, Univerzitetski udžbenik, IRO "Naučna knjiga" Beograd, p.196. (ISBN: 86-23-43014-X)
- Uretir, G., Ozilgen, M., Katnas, S. 1996. Effects of Velocity and Temperature of Air on the Drying Rate Constants of Apple Cubes, Journal of Food Engineering 30, p.339-350.
- Van der Sman, R.G.M., Voda, A., Van Dalen, G., Duijster, A. 2013. Ice crystal interspacing in frozen foods, Journal of Food Engineering, 10.1016/j.jfoodeng.2012.12.045.
- Van't Land, C.M. 1991. Industrial Drying Equipment, Marcel Dekker, NewYork.
- Vega-Gálvez, A., Ah-Hen, K., Chacana, M., Vergara, J., Martínez-Monzó, J., García-Segovia, P., Lemus-Mondaca, R., Di Scala, K. 2012. Effect of temperature and air velocity on drying kinetics, antioxidant capacity, total phenolic content, colour, texture and microstructure of apple (var. Granny Smith) slices, Food Chemistry, 132(1), p.51-59.
- Vega-Mercado, H., Gongora-Nieto, M.M., Barbosa-Canovas, G.V. 2001. Advances in dehydration of foods. J. Food Engng. 49, p.271-289.

- Velazquez, G., Chenlo, F., Moreira, R., Cruz, E. 1997. Grape drying in a pilot plant with a heat pump, *Dry Technol.* 15, p.899–920.
- Velić, D., Planinic, M., Tomas, S., Bili, M. 2004. Influence of airflow velocity on kinetics of convection apple drying, *Journal of Food Engineering* 64, p.97–102.
- Venkatachalapathy, K. 1998. Combined osmotic and microwave drying of strawberries and blueberries. Ph.D. Thesis, Dept. of Agricultural and Biosystems Engineering, McGill University, Montreal, Canada.
- Vetere, D., Morris, J. 1997. How a conduction dryer works and how to select one—part I. *Powder and Bulk Engineering*, p.23–28.
- VijayaVenkataRaman, S., Iniyan, S., Goic, R. 2012. A review of solar drying technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), p.2652-2670.
- Vojcinak, P., Vrtek, M., Hajovsky, R., Koziorek, J. 2010. Evaluation and monitoring of effectiveness of heat pumps via cop parameter, *International Journal of Energy and Environment*, 4(4), p.177-188.
- Voronjec, D., Kozić, Đ. 2002. Vlažan vazduh (termodinamičke osobine i primena), Izdanje IV, Izdavač „SMEITS – Savez mašinskih i elektrotehničkih inženjera i tehničara Srbije“ Beograd. (ISBN: 86-23-43032-8)
- Walsh, J.J. 1992. *Indirect Drying of Solids Particles*. Minneapolis: Bepex Corporation.
- Wang, C., Yu, Q., Sheng, S., Gao, Z., Wu, C., Wang, K. 2012. The Performance and Environmental Impact of the Integrated Spray Drying and Incineration Demonstration Project for Dying Sludge Treatment, *Procedia Environmental Sciences* 16, p.433-442.
- Wang, D.C., Zhang, G., Han, Y.P., Zhang, J.P., Tian, X.L. 2011. Feasibility analysis of heat pump dryer to dry hawthorn cake, *Energy Conversion and Management*, 52(8–9), p.2919-2924.
- Wang, W.C., Calay, R.K., Chen, Y.K. 2011. Experimental study of an energy efficient hybrid system for surface drying, *Applied Thermal Engineering*, 31(4), p.425-431.
- Wijesinghe, B., Kiridena, S., Liyanage, S. 2004. An exploratory study on the commercialisation of heat pump-fluidised bed drying technology. In: 37th Annual AIFST Convention & Exhibition: Innovation concept creation commercialisation, Brisbane Convention & Exhibition Centre, Brisbane, Australia.
- Williams-Gardner, A. 1971. *Industrial Drying*. CRC Press, Cleveland, OH.
- Woo M.W., Stokie, D., Choo, W.L., Bhattacharya, S. 2012b. Master curve behavior in superheated steam drying of small porous particles, *Applied Thermal Engineering*, 10.1016/j.applthermaleng.2012.11.038.
- Woo, M.W., Che, L.M., Daud, W.R.W., Mujumdar, A.S., Chen, X.D. 2012a. Highly swirling transient flows in spray dryers and consequent effect on modeling

- of particle deposition, *Chemical Engineering Research and Design*, 90(3), p.336-345.
- Xanthopoulos, G., Oikonomou, N., Lambrinos, G. 2007. Applicability of a single layer drying model to predict the drying rate of whole figs. *J Food Eng* 81, p.553-9.
- Yesilata, B., Aktacir, M.A. 2009. A simple moisture transfer model for drying of sliced foods, *Applied Thermal Engineering*, 29(4), p.748-752.
- Yongsawatdigul, J., Gunasekaran, S. 1996a. Microwave vacuum drying of cranberries I: Energy use and efficiency. *J. Food Processing and Preservation*, 20, p.121-143.
- Yongsawatdigul, J., Gunasekaran, S. 1996b. Microwave vacuum drying of cranberries II: Quality evaluation. *J. Food Processing and Preservation*, 20, p.145-156.
- Zafri, M.A.A., Othman, M.Y.H., Ruslan, M.H., Sopian, K. 2007. Development of a close loop solar assisted heat pump dryer using multifunctional solar thermal collector. *Regional Conference on Engineering Mathematics, Mechanics, Manufacturing & Architecture (EM3ARC)*.
- Zlatanović, I., Rudonja, N., Gligorević, K. 2011. Primena toplotnih pumpi u sistemima za sušenje poljoprivrednih proizvoda, *Poljoprivredna tehnika*, 36(2), p.77-85.
- Zogzas, N.P., Maroulis, Z.B., Marinos-Kouris, D. 1994. Densities, shrinkage and porosity of some vegetables during air drying. *Drying Tech.*, 12(7), p.1653-1666.
- Zogzas, N.P., Maroulis, Z.B., Marinos-Kouris, D. 1996. Moisture diffusivity data compilation in food stuffs. *Drying Tech.*, 14(10), p.2225-2253.
- Гинзбург, А.С. 1973. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов, Издательство „Пищевая промышленность“, Москва.
- Льков, А.В. 1968. Теория сушки, Издание 2, Издательство „Энергия“, Москва.

9. PRILOZI

- Prilog 9.1.** Fenomenološki koeficijenti
- Prilog 9.2.** Postupak određivanja apsolutne vlažnosti i entalpije nezasićenog vlažnog vazduha na osnovu poznate temperature i relativne vlažnosti
- Prilog 9.3.** Geometrijski oblici i dimenzije materijala
- Prilog 9.4.** Merno-regulaciona oprema
- Prilog 9.5.** Prehrambeni materijali
- Prilog 9.6.** Režimi sušenja
- Prilog 9.7.** Prosečne vrednosti srednje vlažnosti materijala na početku sušenja
- Prilog 9.8.** Promena mase vlažnog materijala tokom procesa
- Prilog 9.9.** Vreme procesa sušenja
- Prilog 9.10.** Parametri rada vodenog grejača vazduha
- Prilog 9.11.** Masa uklonjene vlage iz sistema tokom procesa
- Prilog 9.12.** Srednja vlažnost materijala
- Prilog 9.13.** Srednja vlažnost materijala u bezdimenzionom obliku
- Prilog 9.14.** Brzina sušenja
- Prilog 9.15.** Računarski softver
- Prilog 9.16.** Određivanje parametara matematičkog modela
- Prilog 9.17.** Energija utrošena za zagrevanje vlažnog vazduha
- Prilog 9.18.** Energija utrošena za hlađenje vlažnog vazduha uz izdvajanje vlage
- Prilog 9.19.** Poređenje rezultata dobijenih sopstvenim modelom sa rezultatima modela drugih autora

PRILOG 9.1

Fenomenološki koeficijenti

Лыков (1968), Гинзбург (1973)

$$\frac{\partial M}{\partial \tau} = K_{11} \nabla^2 M + K_{12} \nabla^2 T + K_{13} \nabla^2 P$$

$$K_{11} = k$$

$$K_{12} = k\delta$$

$$K_{13} = \frac{k_p}{\rho_m}$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = K_{21} \nabla^2 M + K_{22} \nabla^2 T + K_{23} \nabla^2 P$$

$$K_{21} = \varepsilon \frac{r_w}{c_m} k$$

$$K_{22} = a + \varepsilon \frac{r_w}{c_m} k\delta$$

$$K_{23} = \varepsilon \frac{r_w}{c_m} k \frac{k_p}{\rho_m}$$

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = K_{31} \nabla^2 M + K_{32} \nabla^2 T + K_{33} \nabla^2 P$$

$$K_{31} = -\varepsilon \frac{1}{c_{p_a}} k$$

$$K_{32} = -\varepsilon \frac{1}{c_{p_a}} k\delta$$

$$K_{33} = \left(\frac{k_p}{c_{p_a} \rho_m} - \varepsilon \frac{1}{c_{p_a}} \frac{k_p}{\rho_m} \right)$$

PRILOG 9.2

Postupak određivanja apsolutne vlažnosti i entalpije nezasićenog vlažnog vazduha na osnovu poznate temperature i relativne vlažnosti

Neka je stanje vlažnog vazduha koji se koristi kao agens sušenja definisano temperaturom t_a i relativnom vlažnošću RH_a .

Tabela 9.2.1 - Parcijalni pritisak vodene pare u zasićenom vlažnom vazduhu i apsolutna vlažnost zasićenog vlažnog vazduha, *Voronjec (2002)*

t_a	[°C]	0	10	20	30	40	50	60	70
p'_{pa}	[kPa]	0.61	1.23	2.34	4.24	7.37	12.33	19.92	31.17
x'_a	[g/kg]	3.82	7.72	14.88	27.55	49.50	87.50	154.7	281.5

Na osnovu poznate temperature vlažnog vazduha može se iz **Tabele 9.2.1** odrediti parcijalni pritisak vodene pare u zasićenom vlažnom vazduhu, koji se uz poznatu vrednost relativne vlažnosti vazduha koristi u jednačini (9.2.1) za određivanje parcijalnog pritiska vodene pare u vlažnom vazduhu.

$$p_{pa} = RH_a \cdot p'_{pa} \quad (9.2.1)$$

Apsolutnu vlažnost vazduha možemo odrediti iz jednačine (9.2.2) pri čemu se za vrednost atmosferskog pritiska može uzeti $p = 101325 \text{ Pa}$. Množilac u jednačini (broj 0,622) dobija se iz odnosa molarnih masa vodene pare (18.016 kg/kmol) i suvog vazduha (28.964 kg/kmol).

$$x_a = 0,622 \frac{p_{pa}}{p - p_{pa}} \quad (9.2.2)$$

Entalpiju nezasićenog vlažnog vazduha (agensa) možemo odrediti iz jednačine (9.2.3).

$$h_a = c_{p_{sa}} \cdot t_a + x_a \cdot (r_w + c_{p_p} \cdot t_a) \quad (9.2.3)$$

Pri čemu vrednosti specifičnog toplotnog kapaciteta suvog vazduha iznosi $c_{p_{sv}} = 1,004 \text{ kJ/kgK}$, vodene pare $c_{p_p} = 1,805 \text{ kJ/kgK}$ i specifične toplote isparavanja vlage $r_w = 2500 \text{ kJ/kg}$. Temperatura po vlažnom termomeru se može odrediti (9.2.4) korišćenjem vrednosti apsolutne vlažnosti zasićenog vlažnog vazduha (**Tabela 9.2.1**) i entalpije određene jednačinom (9.2.3).

$$t_{wa} = \frac{h_a - x'_a \cdot r_w}{c_{p_{sa}} + x'_a \cdot c_{p_p}} \quad (9.2.4)$$

PRILOG 9.3

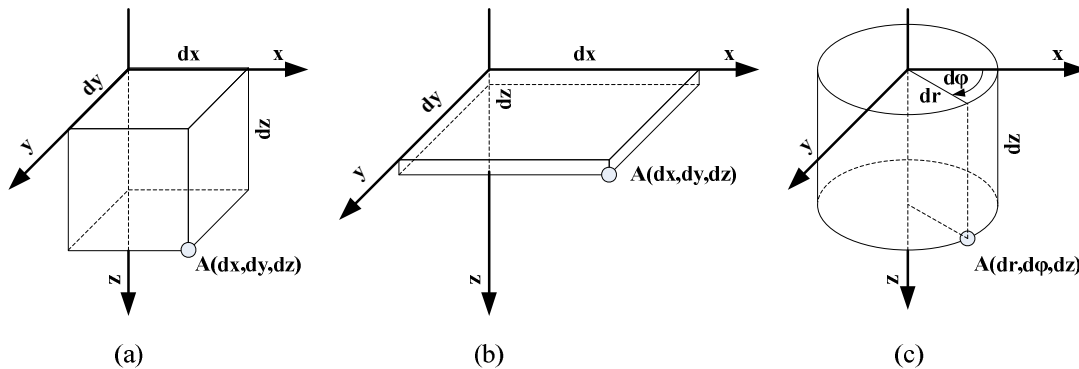
Geometrijski oblici i dimenzije materijala

Tabela 9.3.1 - Usvojene geometrije i dimenzije materijala

Materijal	Oblik komadića	Geometrija	Uzorak	Dimenzije uzoraka [mm]				Zapremina komadića [mm ³]	Površina komadića [mm ²]
				x	y	z	r		
Jabuka	Kocka	Kocka (Slika 9.3.1a)	1	10	10	10	-	1000	600
			2	13	13	13	-	2197	1014
Krompir	Listovi	Ravna ploča (Slika 9.3.1b)	1	40	60	2	-	4800	2400
			2	40	60	3	-	7200	2400
Banana	Kolutovi	Cilindar (Slika 9.3.1c)	1	-	-	6	12	2713	1356
			2	-	-	7	12	3165	1432

Tabela 9.3.2 - Osnovne zavisnosti usvojenih geometrija materijala

Geometrija materijala	Kocka	Ravna ploča	Cilindar
Međusoban odnos dimenzija	$dx = dy = dz$	$(dx = dy) \gg dz$	$dr \approx dz/2$
Put koji vlaga pređe od centra do površina materijala	$dz/2$	$dz/2$	$dz/2$
Površina za razmenu toplote i vlage	$A = 6xy$	$A = 2xy$	$A = 2r\pi(r + z)$
Zapremina	$V = xyz$	$V = xyz$	$V = r^2\pi z$



Slika 9.3.1 Geometrije materijala prikazane u odgovarajućim koordinatnim sistemima
a) i b) Dekartov pravougli koordinatni sistem, c) Cilindrični koordinatni sistem

PRILOG 9.4

Merno-regulaciona oprema

Tabela 9.4.1 - Karakteristike merno-regulacione opreme korišćene u eksperimentima

Merno mesto	Merena veličina	Instrument			
		Tip (Proizvođač)	Pozicija	Tačnost	Rezolucija
1	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura • Relativna vlažnost 	Higroskop sa kanalskom sondom (Rotronic AG, Švajcarska);	U preseku dijagonala poprečnog preseka kanala	$\pm 0.175^{\circ}\text{C}$	0.1 $^{\circ}\text{C}$
2		Volcraft 120TH i 140TH Datalogeri (Volcraft, Nemačka)		$\pm 1\% \text{RH}$	0.1% RH
3	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura • Brzina strujanja 	Termo-anemometar AIRFLOW TA35 + 8mm diam. teleskopski (Airflow Developements Ltd., Engleska)	U preseku dijagonala poprečnog preseka bajpas kanala. U preseku dijagonala poprečnog preseka kanala gde je smešten VH.	$\pm 1^{\circ}\text{C}$	0.1 $^{\circ}\text{C}$
4				± 1 digit	$\pm 3\% \text{rdg.}$
5	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura 	Volcraft 120TH Dataloger (Volcraft, Nemačka)	U preseku dijagonala poprečnog preseka kanala iznad VG	$\pm 1^{\circ}\text{C}$	0.1 $^{\circ}\text{C}$
6	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura • Relativna vlažnost 	Digitalni termometar/higrometar DT-3 (Xuzhou Jingying Electronics Technology Co., Kina)	Laboratorijski prostor	$\pm 1^{\circ}\text{C}$	0.1 $^{\circ}\text{C}$
A	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura • Zapreminski protok (ručno podešavanje) 	Laboratorijski termopar sonda za merenje temperature površine	VG in/out	$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$	0.1 $^{\circ}\text{C}$
B			površina cevi		
C			VH in/out		
D			površina cevi		
E	<ul style="list-style-type: none"> • Masa 	E-Elite KS 605, Digitalni indikator mase, max.kapacitet 5kg, (Kina)	Ispod komore za sušenje (težina lesa)	$\pm 0.001\text{kg}$	0.001kg
F	<ul style="list-style-type: none"> • Zapremina 	Graduisana staklena menzura, 500ml kapaciteta, 375mm približne visine	Ispod VH	$\pm 5.0\text{ml}$	5.0ml podeok
G	<ul style="list-style-type: none"> • Frekvenca struje 	Frekventni regularor EDS-800 (ENC Shenzhen Encom Electric Technologies CO., Kina)	Na platformi elektro-motora	$\pm 0.01\%$	0.01 Hz
H	<ul style="list-style-type: none"> • Zapreminski protok 	Klipna pumpa sa regulatorom kapaciteta DLC Micro Pump Type 3 (Engleska)	Eksterno postavljena	Kontinualno	0-3000 ml/h
I	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura 	Infracrveni termometar, DT-380 (CE ROHS, Kina)	Temperature površine materijala koji se suši	$\pm 2\% \text{rdg.}$	0.1 $^{\circ}\text{C}$

PRILOG 9.5

Prehrambeni materijali

Jabuka

U eksperimentima su korišćene sveže jabuke sorte *Idared* koja vodi poreklo iz USA i nastala je 1942. godine ukrštanjem sorti Jonathan and Wagener. Ova sorta jabuke se sa 8.6% (575.000 tona godišnje) ukupne proizvodnje jabuka u Evropskoj Uniji nalazi na trećem mestu, pri čemu je zastupljenost veća u zemljama Jugoistočne Evrope (oko 50% ukupne proizvodnje jabuka ili 125.000 tona godišnje). Zahvaljujući odličnim skladišnim osobinama (čak i do 200 dana) prisutna je na tržištu tokom cele godine. Pre sušenja jabuke su oprane, oljuštene i mašinski sečene na kockice odgovarajućih dimenzija.



Krompir

U eksperimentima je korišćen crveni krompir sorte *Désirée* koja vodi poreklo iz Holandije i nastala je 1962. godine. Ova vrsta ima veliku otpornost na sušu i na razne bolesti. Jedna je od dve najzastupljenije sorte krompira u Republici Srbiji gde se trenutno proizvodi oko 900.000 tona godišnje. Pre sušenja krompiri su oljušteni, oprani i mašinski isečeni na listove odgovarajuće debljine.



Banana

U eksperimentima je korišćena banana sorte *Grand Nein* (brend *Chiquita*) koja vodi poreklo Jugoistočne Azije. Za pravilan razvoj banani je potrebna topla i vlažna klima, jer kvalitet ploda zavisi od velike količine vode i visoke temperature. Na tržište Republike Srbije se iz SAD i Ekvadora godišnje uveze oko 48 miliona tona Banana. Pre sušenja banane su oljuštene i isečene na kolutove odgovarajuće debljine.



Kriterijumi za izbor svih pomenutih materijala opisani su u **Poglavlju 4.2.**

PRILOG 9.6

Režimi sušenja

Za svaku usvojenu dimenziju uzorka materijala definisanu u **Tabeli 9.3.1 (Prilog 9.3)** sproveden je set eksperimentalnih merenja (E_1 do E_{27}) svih relevantnih parametara procesa prema režimima i procedurama navedenim u **Tabeli 9.6.1**. To znači da je za svaki materijal sprovedeno ukupno 2×27 setova eksperimentalnih merenja, odnosno ukupno 54 eksperimenata po tretiranom materijalu.

Procedura (P_1 ili P_2) za postizanje početnih uslova za sprovođenje odgovarajućeg režima sušenja je detaljnije je objašnjena u **Poglavlju 4.2**.

Tabela 9.6.1 – Režimi sušenja i eksperimentalne procedure

Oznaka	Eksperiment Postavka	Režim sušenja			Procedura
		$T [^{\circ}C]$	$RH [\%]$	$w [m/s]$	
E1	T1/RH1/W1	35	10	1	P1
E2	T1/RH1/W2	35	10	1.5	P1
E3	T1/RH1/W3	35	10	2	P1
E4	T1/RH2/W1	35	20	1	P1
E5	T1/RH2/W2	35	20	1.5	P1
E6	T1/RH2/W3	35	20	2	P1
E7	T1/RH3/W1	35	30	1	P2
E8	T1/RH3/W2	35	30	1.5	P2
E9	T1/RH3/W3	35	30	2	P2
E10	T2/RH1/W1	45	10	1	P1
E11	T2/RH1/W2	45	10	1.5	P1
E12	T2/RH1/W3	45	10	2	P1
E13	T2/RH2/W1	45	20	1	P2
E14	T2/RH2/W2	45	20	1.5	P2
E15	T2/RH2/W3	45	20	2	P2
E16	T2/RH3/W1	45	30	1	P2
E17	T2/RH3/W2	45	30	1.5	P2
E18	T2/RH3/W3	45	30	2	P2
E19	T3/RH1/W1	55	10	1	P1
E20	T3/RH1/W2	55	10	1.5	P1
E21	T3/RH1/W3	55	10	2	P1
E22	T3/RH2/W1	55	20	1	P2
E23	T3/RH2/W2	55	20	1.5	P2
E24	T3/RH2/W3	55	20	2	P2
E25	T3/RH3/W1	55	30	1	P2
E26	T3/RH3/W2	55	30	1.5	P2
E27	T3/RH3/W3	55	30	2	P2

PRILOG 9.7

Prosečne vrednosti srednje vlažnosti materijala na početku sušenja

Tabela 9.7.1 – Rezultati za materijal: *Jabuka*

Merenje	Početna masa vlažnog materijala	Krajnja masa vlažnog materijala	Masa vlage koja je uklonjena iz materijala	Srednja vlažnost materijala na početku sušenja	Odnos krajnje i početne mase vlažnog materijala	Prosečna vrednost srednje vlažnosti materijala na početku sušenja
	m_0	m_e	$m_w = m_0 - m_e$	$M_0 = m_w / m_e$	m_e / m_0	M_0
$[n]$	$[kg]$	$[kg]$	$[kg]$	$[kg_w/kg_{sm}]$	$[-]$	$[kg_w/kg_{sm}]$
1	0,098	0,010	0,088	8,80	0,1	8,55
2	0,082	0,009	0,073	8,11	0,1	
3	0,078	0,008	0,070	8,75	0,1	

Tabela 9.7.2 - Rezultati za materijal: *Krompir*

Merenje	Početna masa vlažnog materijala	Krajnja masa vlažnog materijala	Masa vlage koja je uklonjena iz materijala	Srednja vlažnost materijala na početku sušenja	Odnos krajnje i početne mase vlažnog materijala	Prosečna vrednost srednje vlažnosti materijala na početku sušenja
	m_0	m_e	$m_w = m_0 - m_e$	$M_0 = m_w / m_e$	m_e / m_0	M_0
$[n]$	$[kg]$	$[kg]$	$[kg]$	$[kg_w/kg_{sm}]$	$[-]$	$[kg_w/kg_{sm}]$
1	0,086	0,020	0,066	3,30	0,23	3,58
2	0,090	0,019	0,071	3,73	0,21	
3	0,052	0,011	0,041	3,72	0,21	

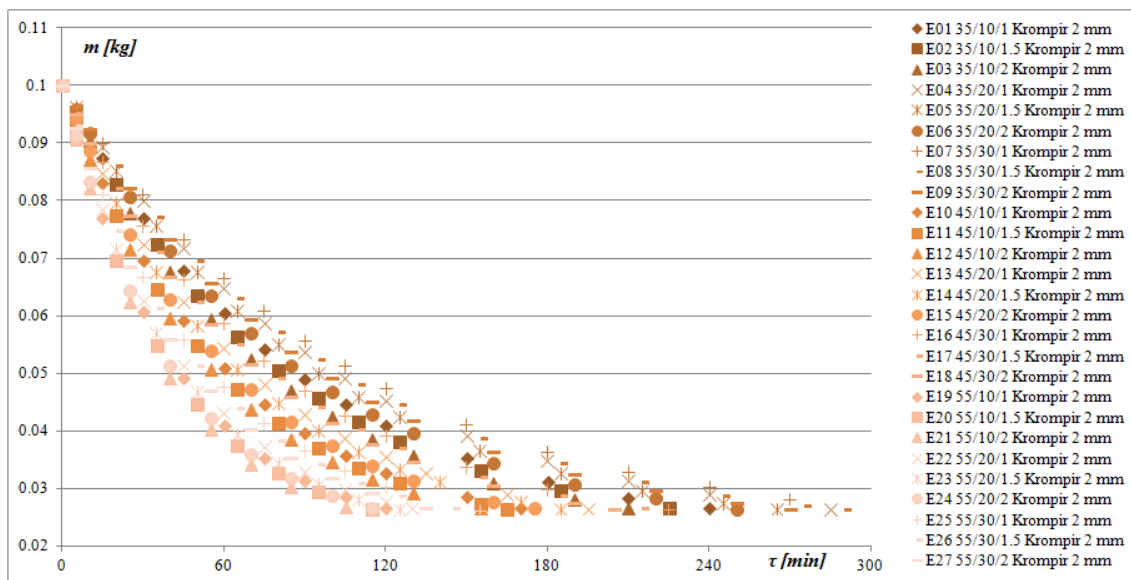
Tabela 9.7.3 - Rezultati za materijal : *Banana*

Merenje	Početna masa vlažnog materijala	Krajnja masa vlažnog materijala	Masa vlage koja je uklonjena iz materijala	Srednja vlažnost materijala na početku sušenja	Odnos krajnje i početne mase vlažnog materijala	Prosečna vrednost srednje vlažnosti materijala na početku sušenja
	m_0	m_e	$m_w = m_0 - m_e$	$M_0 = m_w / m_e$	m_e / m_0	M_0
$[n]$	$[kg]$	$[kg]$	$[kg]$	$[kg_w/kg_{sm}]$	$[-]$	$[kg_w/kg_{sm}]$
1	0,081	0,027	0,054	2,99	0,33	2,97
2	0,087	0,029	0,058	3,01	0,33	
3	0,090	0,023	0,067	2,91	0,25	

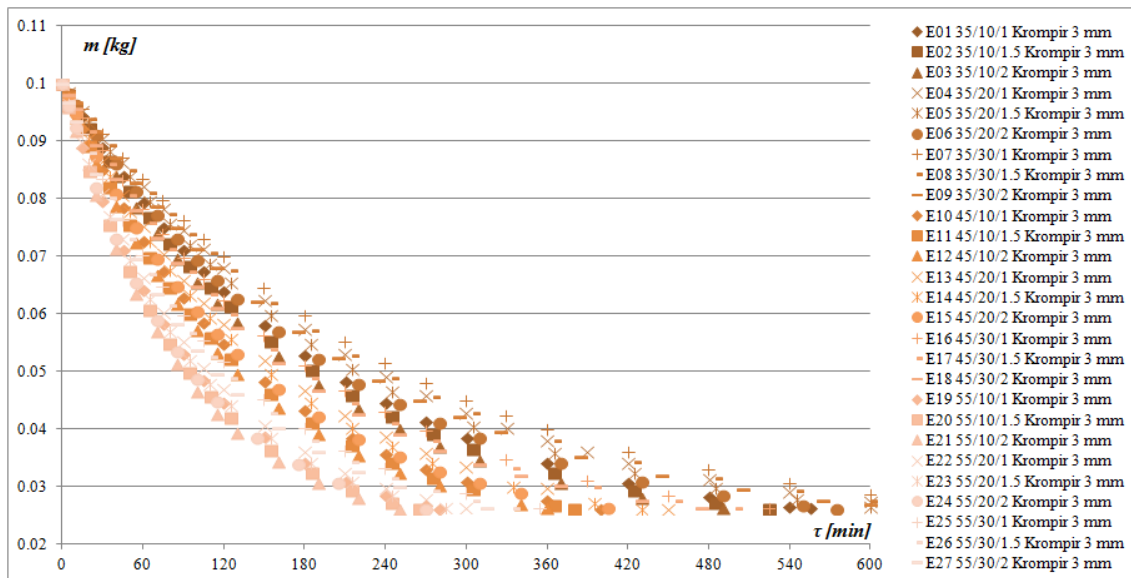
PRILOG 9.8

Promena mase vlažnog materijala tokom procesa (Krompir i Banana)

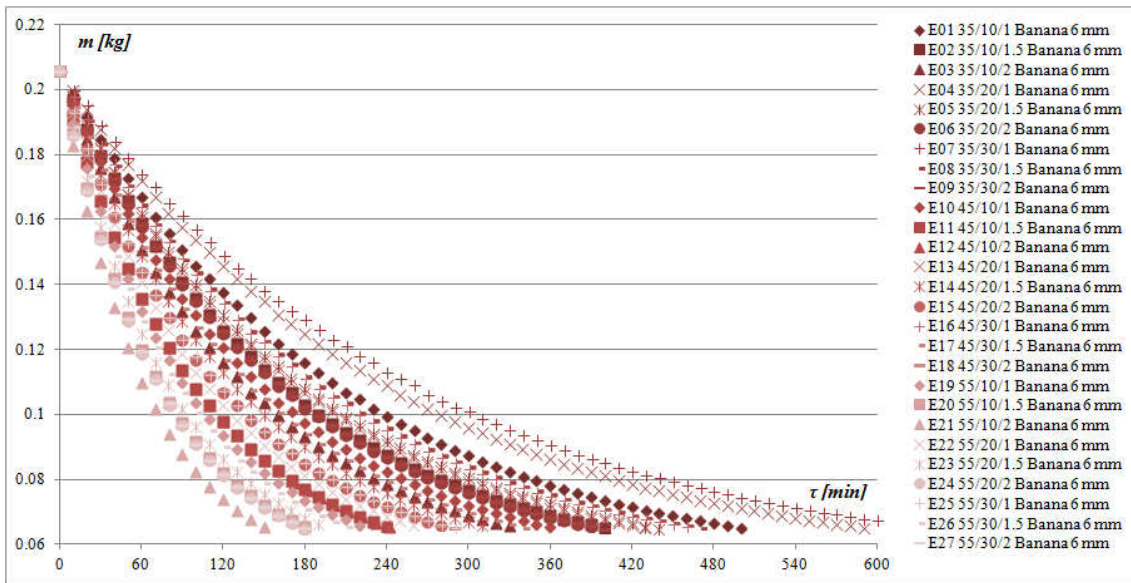
Rezultati merenja prikazani u ovom prilogu nadovezuju se na **Poglavlje 4.3.1.**



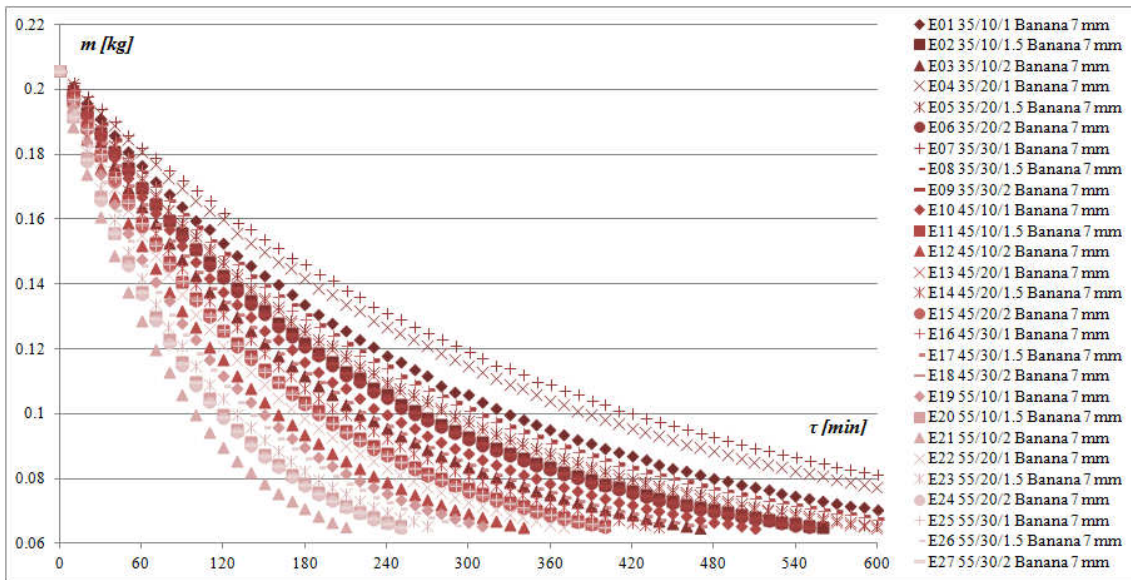
Slika 9.8.1a Promena mase vlažnog materijala tokom procesa (*Krompir, list 2 mm*)



Slika 9.8.1b Promena mase vlažnog materijala tokom procesa (*Krompir, list 3 mm*)



Slika 9.8.2a Promena mase vlažnog materijala tokom procesa (*Banana, cilindar 6 mm*)

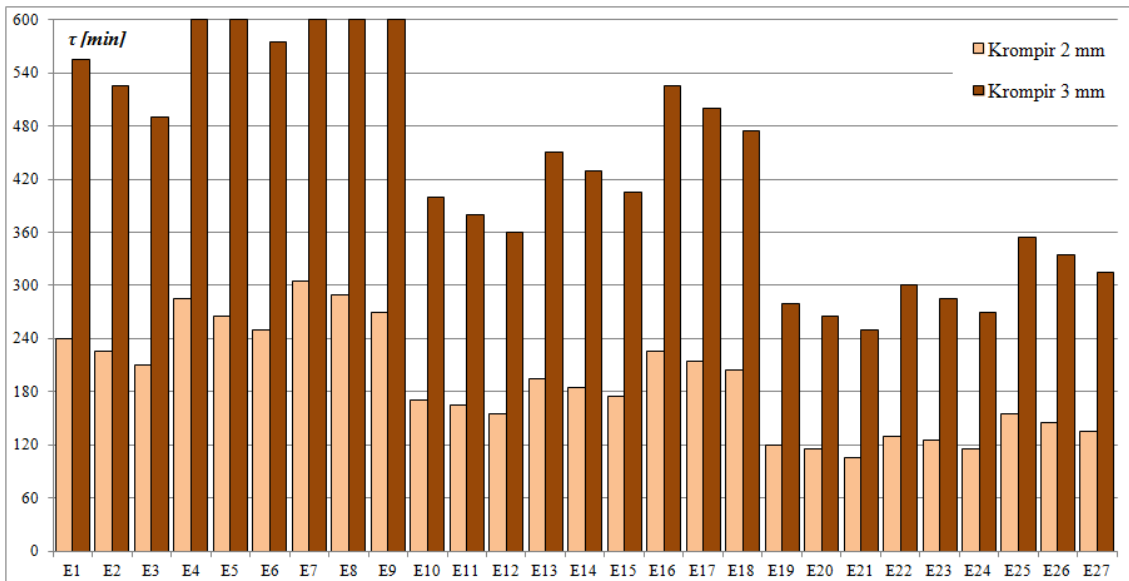


Slika 9.8.2b Promena mase vlažnog materijala tokom procesa (*Banana, cilindar 7 mm*)

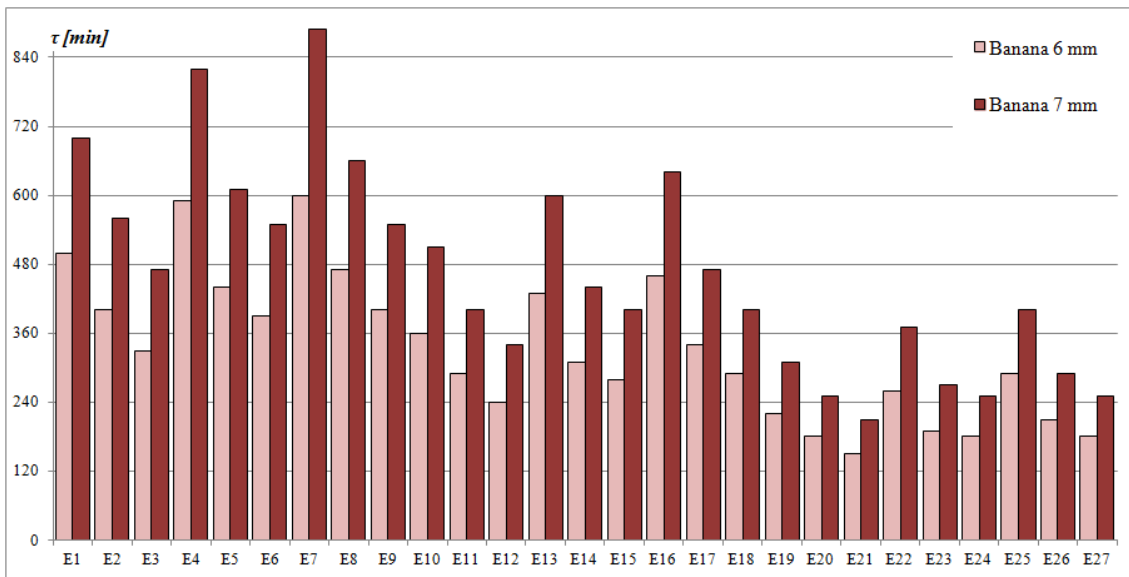
PRILOG 9.9

Vreme procesa sušenja (Krompir i Banana)

Rezultati merenja prikazani u ovom prilogu nadovezuju se na **Poglavlje 4.3.2.**



Slika 9.9.1 Vreme procesa sušenja (Krompir, list 2 i 3 mm)

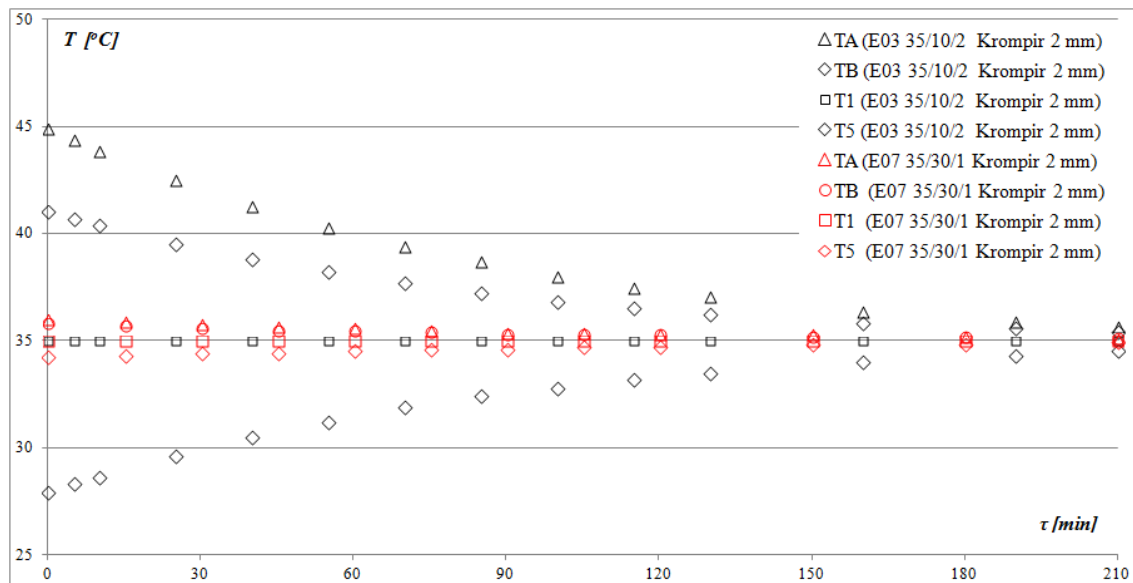


Slika 9.9.2 Vreme procesa sušenja (Banana, cilindar 6 i 7 mm)

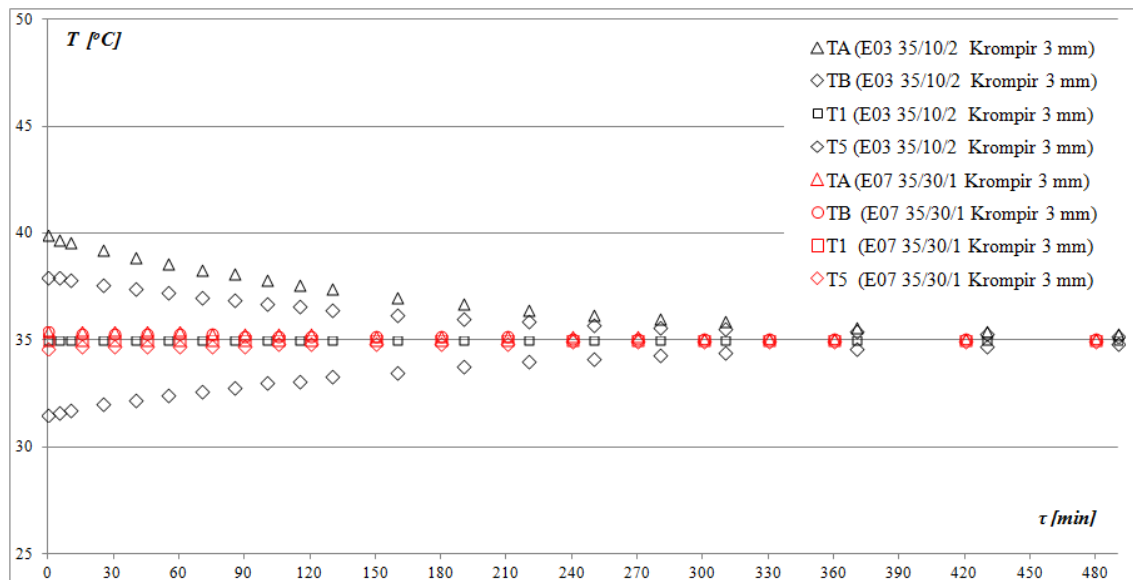
PRILOG 9.10

Parametri rada vodenog grejača vazduha (Krompir i Banana)

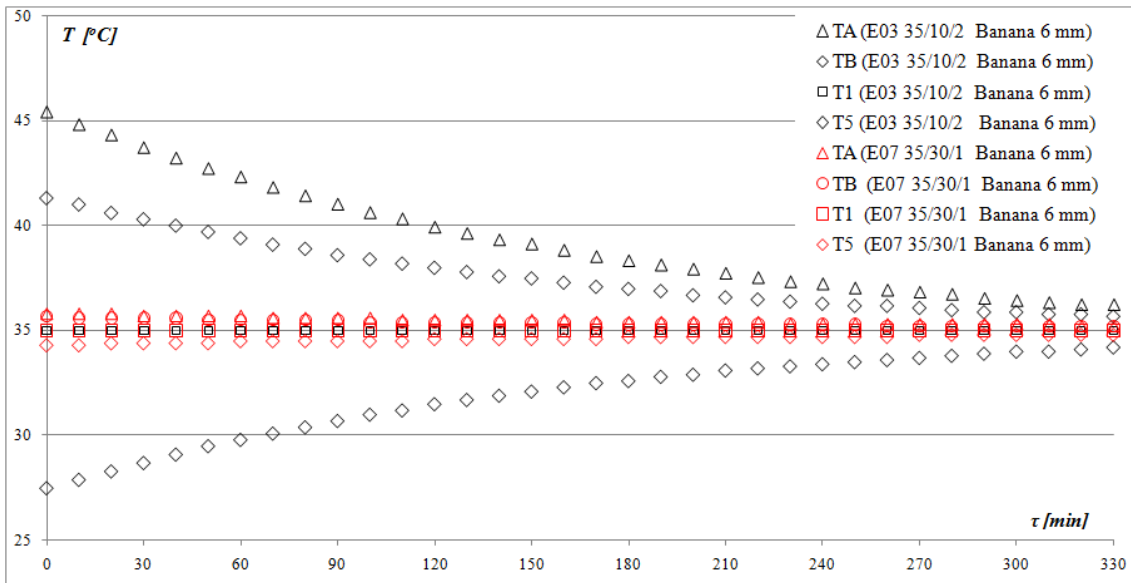
Rezultati merenja prikazani u ovom prilogu nadovezuju se na **Poglavlje 4.3.3.**



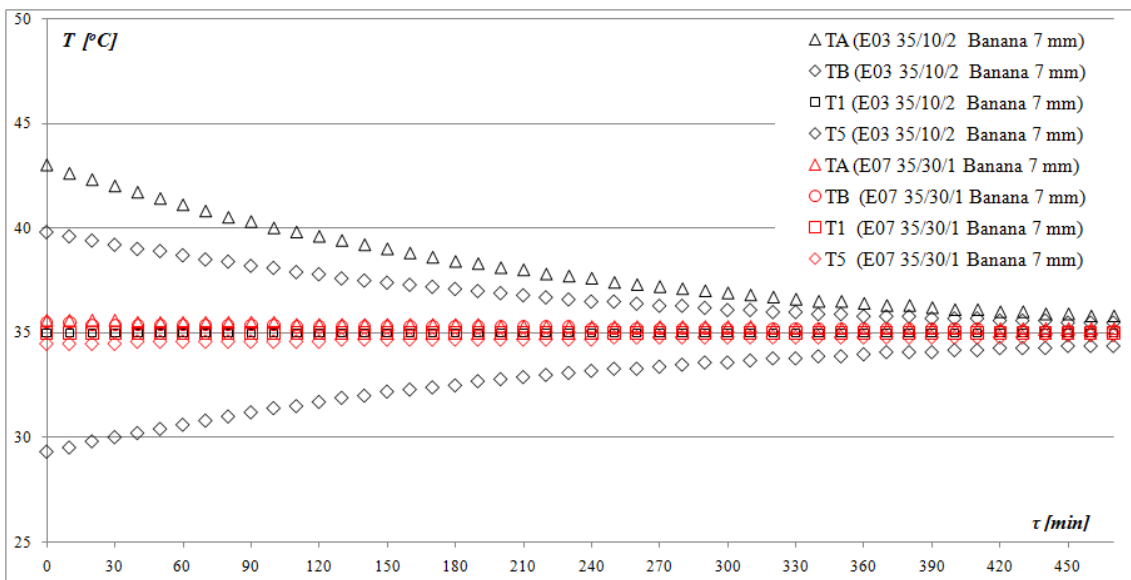
Slika 9.10.1a Temperature vazduha i vode na ulazu/izlazu grejača (Krompir, list 2 mm)



Slika 9.10.2b Temperature vazduha i vode na ulazu/izlazu grejača (Krompir, list 3 mm)



Slika 9.10.2a Temperature vazduha i vode na ulazu/izlazu grejača (Banana, cilindar 6 mm)

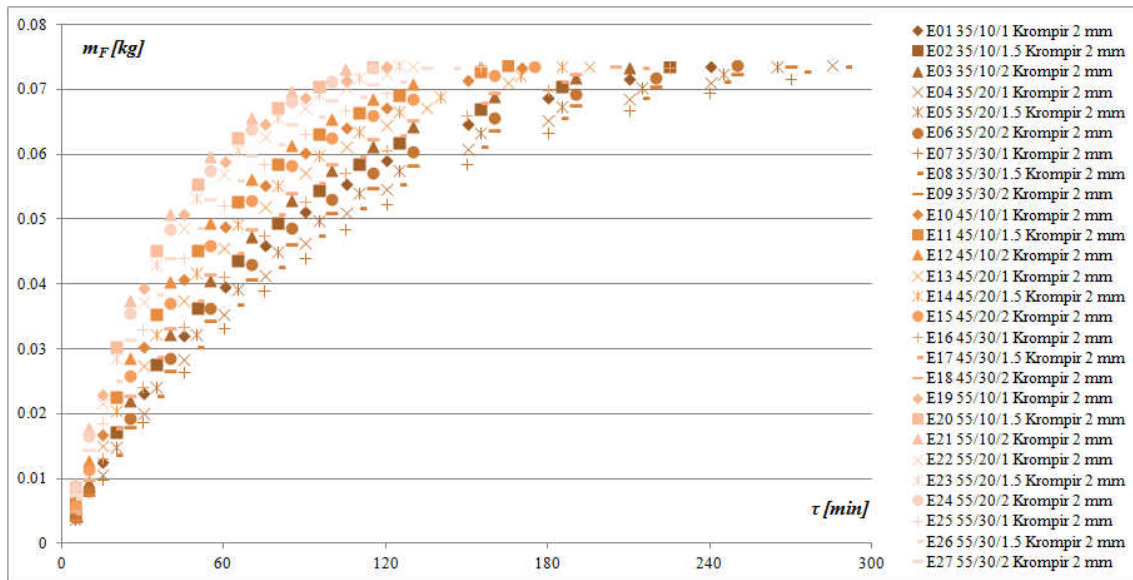


Slika 9.10.2b Temperature vazduha i vode na ulazu/izlazu grejača (Banana, cilindar 7 mm)

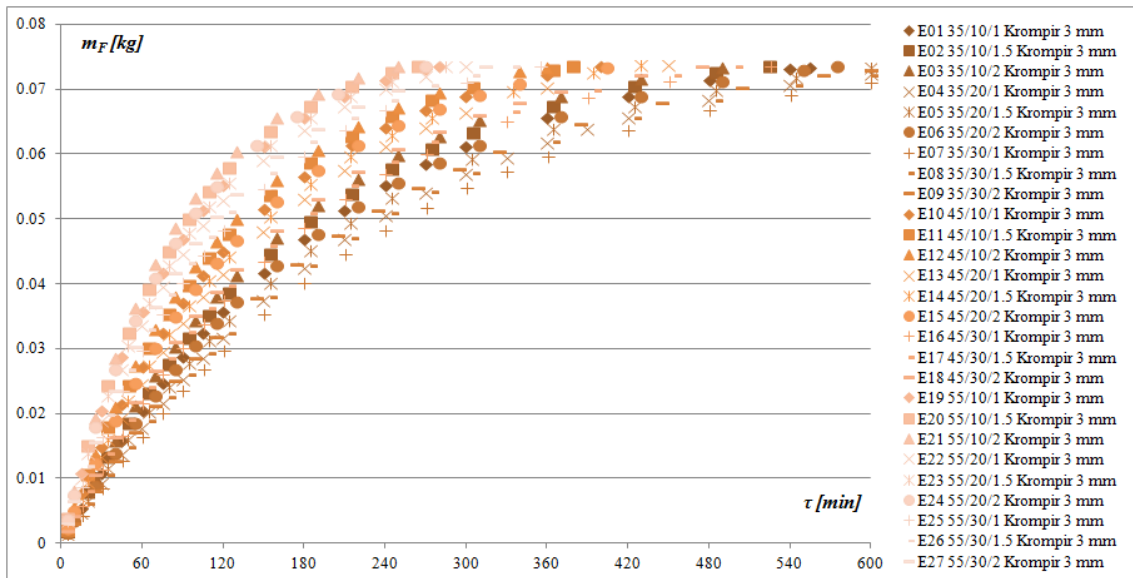
PRILOG 9.11

Masa vlage uklonjene iz sistema tokom procesa (Krompir i Banana)

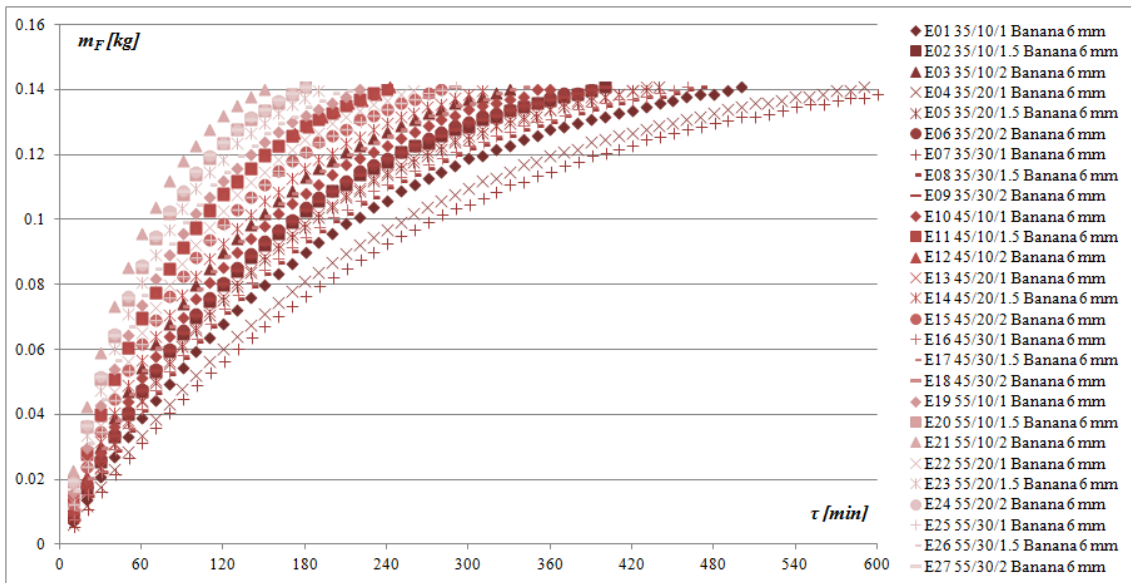
Rezultati merenja prikazani u ovom prilogu nadovezuju se na **Poglavlje 4.3.4.**



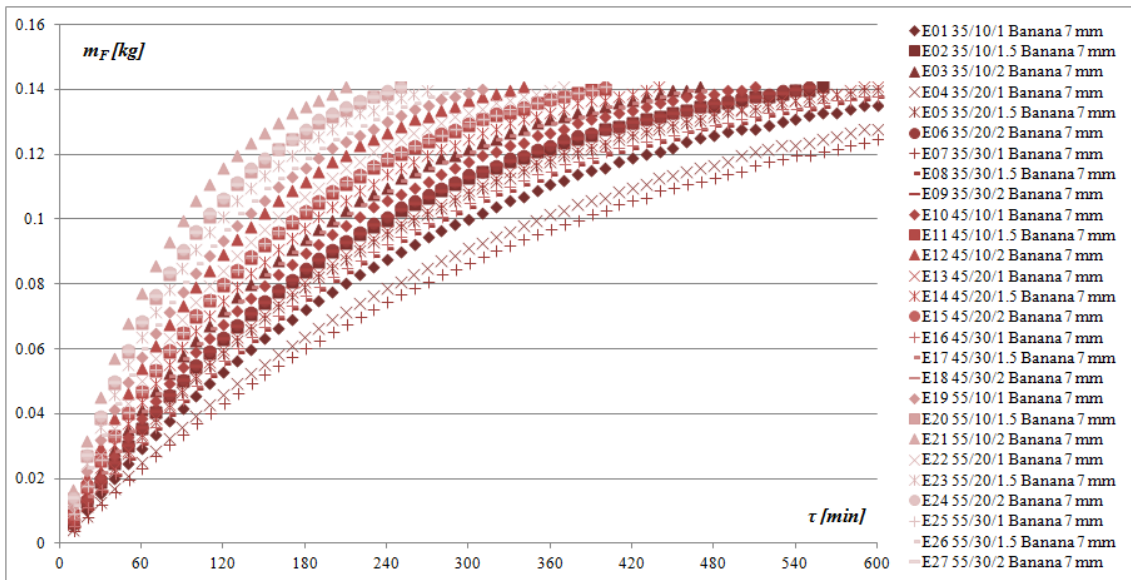
Slika 9.11.1a Masa vlage uklonjene iz sistema tokom procesa (Krompir, list 2 mm)



Slika 9.11.1b Masa vlage uklonjene iz sistema tokom procesa (Krompir, list 3 mm)



Slika 9.11.2a Masa vlage uklonjene iz sistema tokom procesa (Banana, cilindar 6 mm)

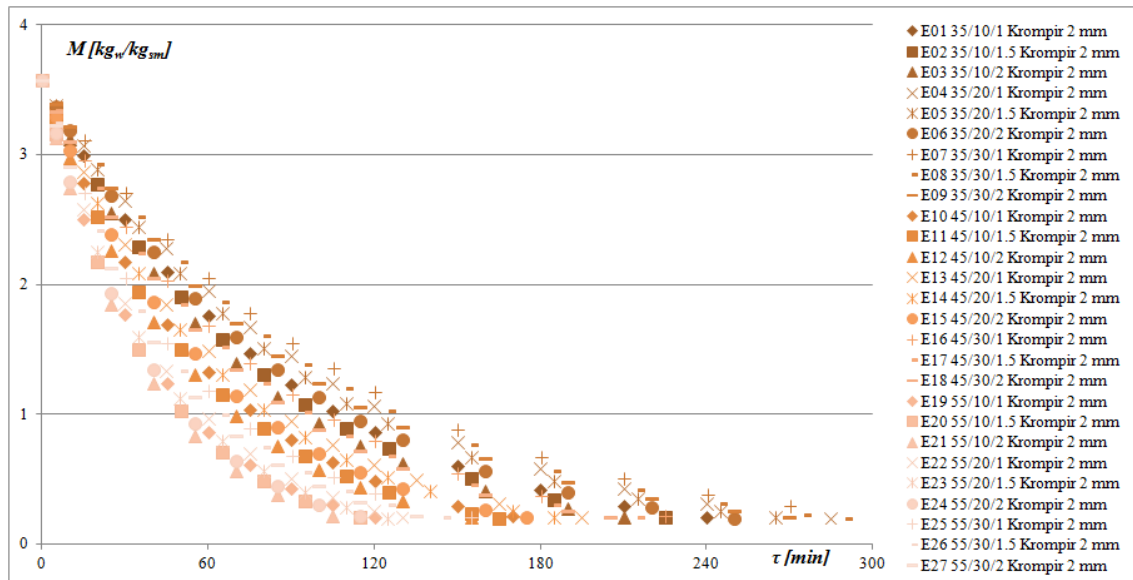


Slika 9.11.2b Masa vlage uklonjene iz sistema tokom procesa (Banana, cilindar 7 mm)

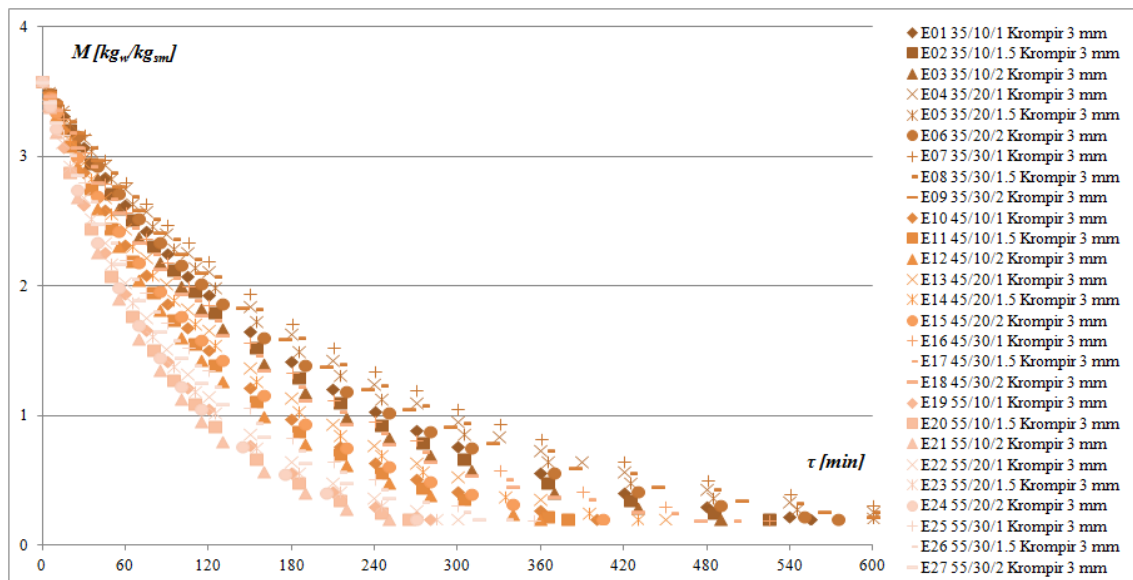
PRILOG 9.12

Srednja vlažnost materijala (Krompir i Banana)

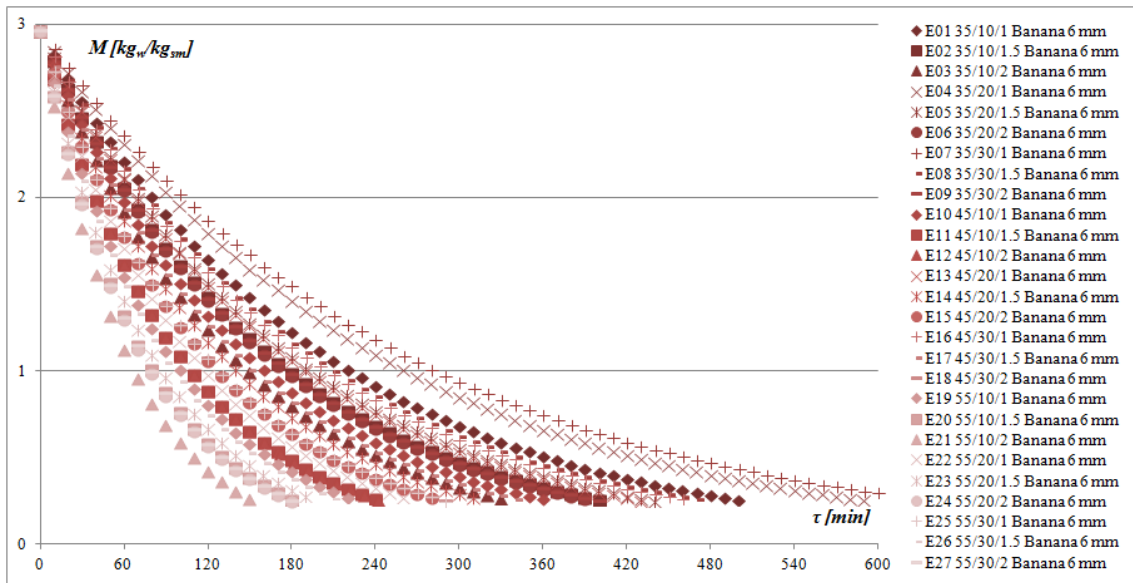
Rezultati merenja prikazani u ovom prilogu nadovezuju se na **Poglavlje 5.1**.



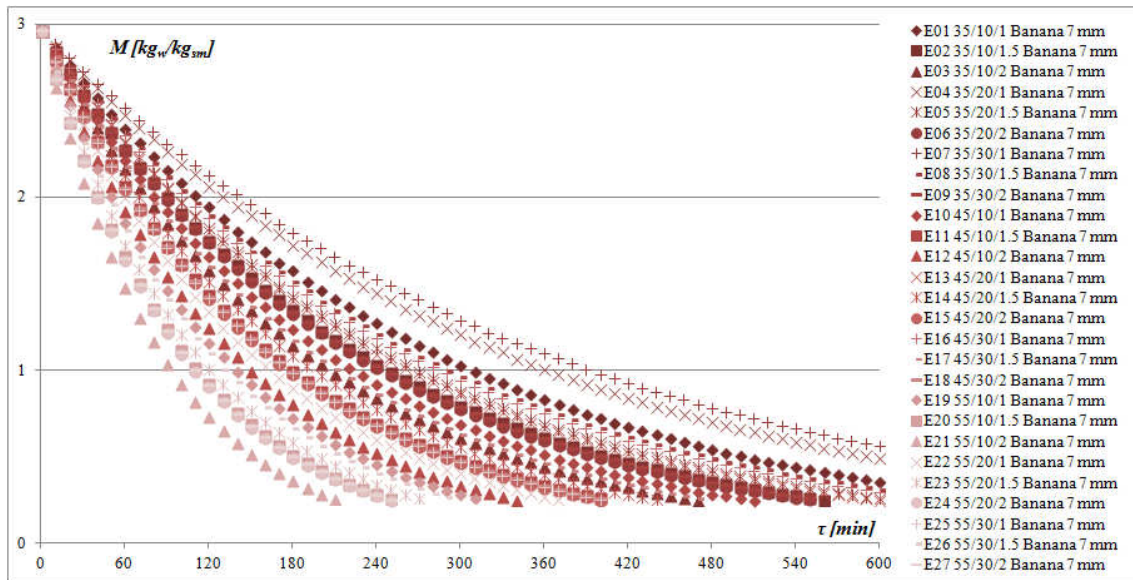
Slika 9.12.1a Promena srednje vlažnosti materijala tokom procesa (*Krompir, list 2mm*)



Slika 9.12.1b Promena srednje vlažnosti materijala tokom procesa (*Krompir, list 3 mm*)



Slika 9.12.2a Promena srednje vlažnosti materijala tokom procesa (Banana, cilindar 6 mm)

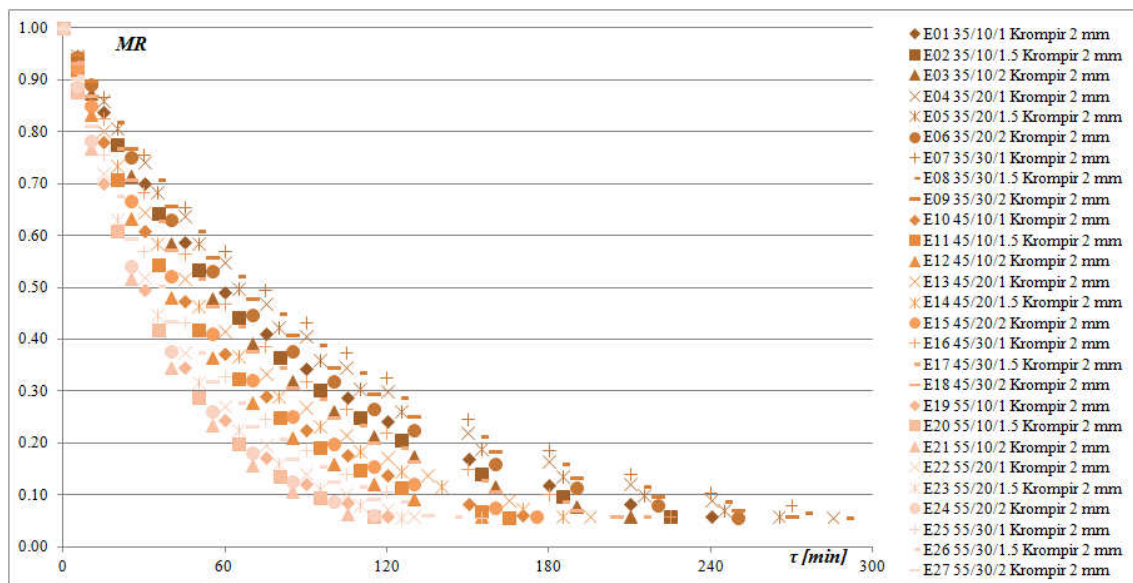


Slika 9.12.2b Promena srednje vlažnosti materijala tokom procesa (Banana, cilindar 7mm)

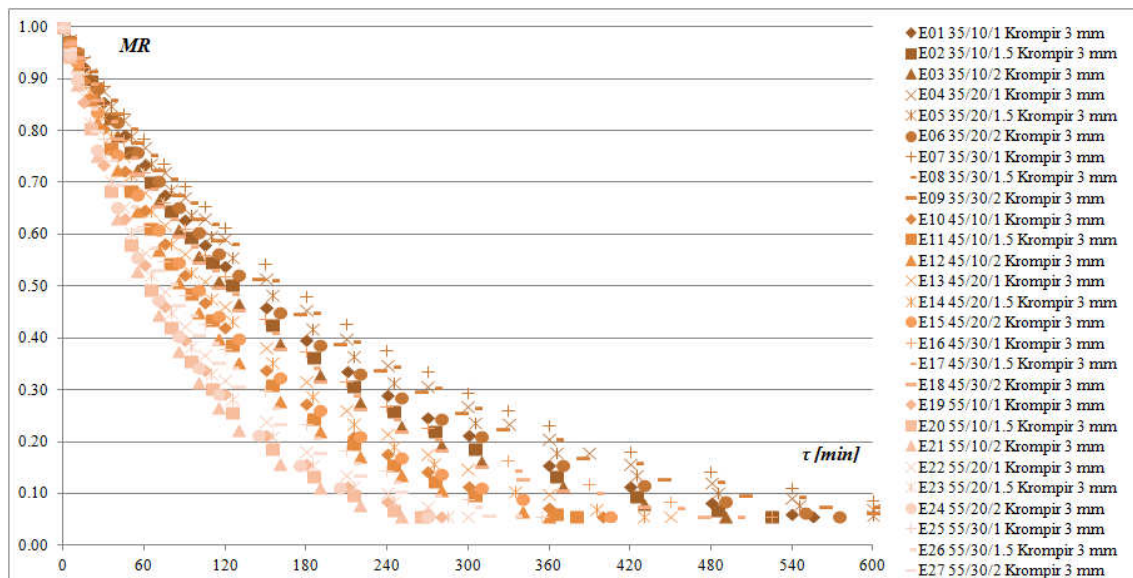
PRILOG 9.13

Srednja vlažnost materijala u bezdimenzionom obliku (Krompir i Banana)

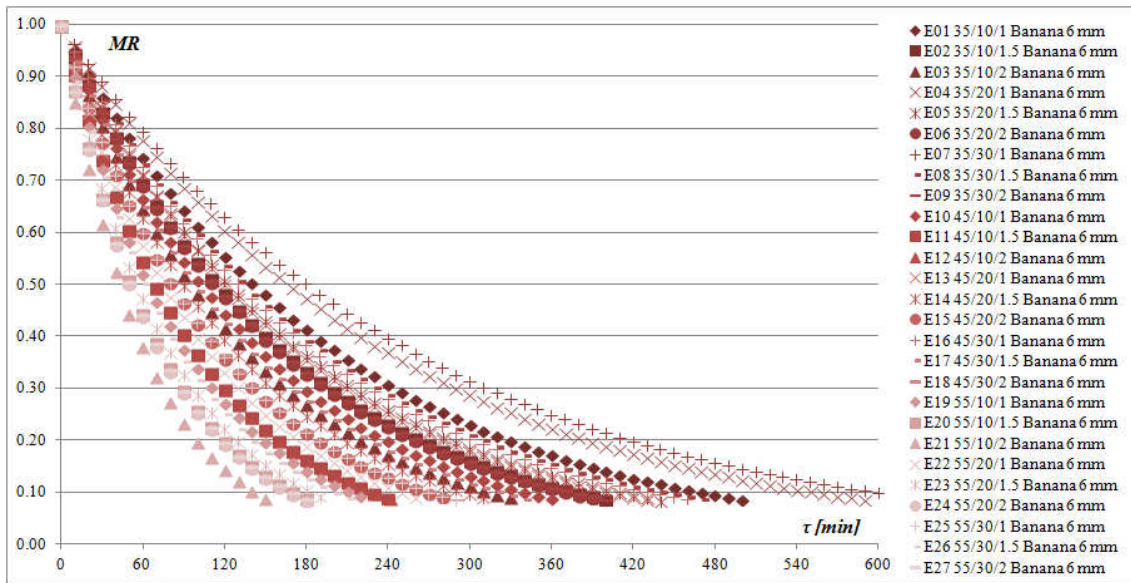
Rezultati merenja prikazani u ovom prilogu nadovezuju se na **Poglavlje 5.1**.



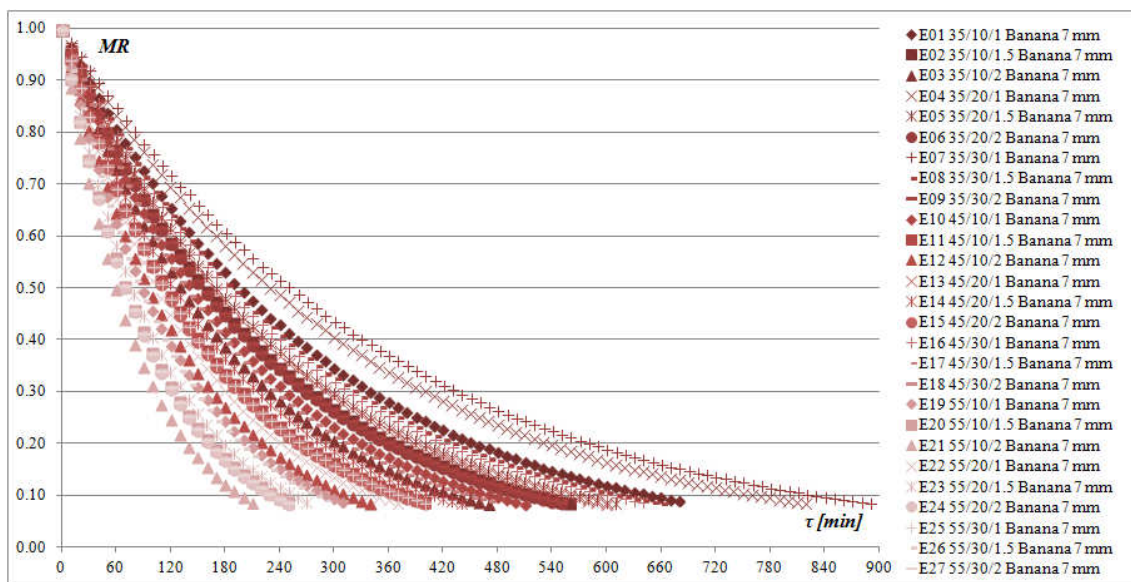
Slika 9.13.1a Promena srednje vlažnosti materijala u bezdimenzionom obliku tokom procesa (Krompir, list 2mm)



Slika 9.13.1b Promena srednje vlažnosti materijala u bezdimenzionom obliku tokom procesa (Krompir, list 3 mm)



Slika 9.13.2a Promena srednje vlažnosti materijala u bezdimenzionom obliku tokom procesa (*Banana, cilindar 6 mm*)

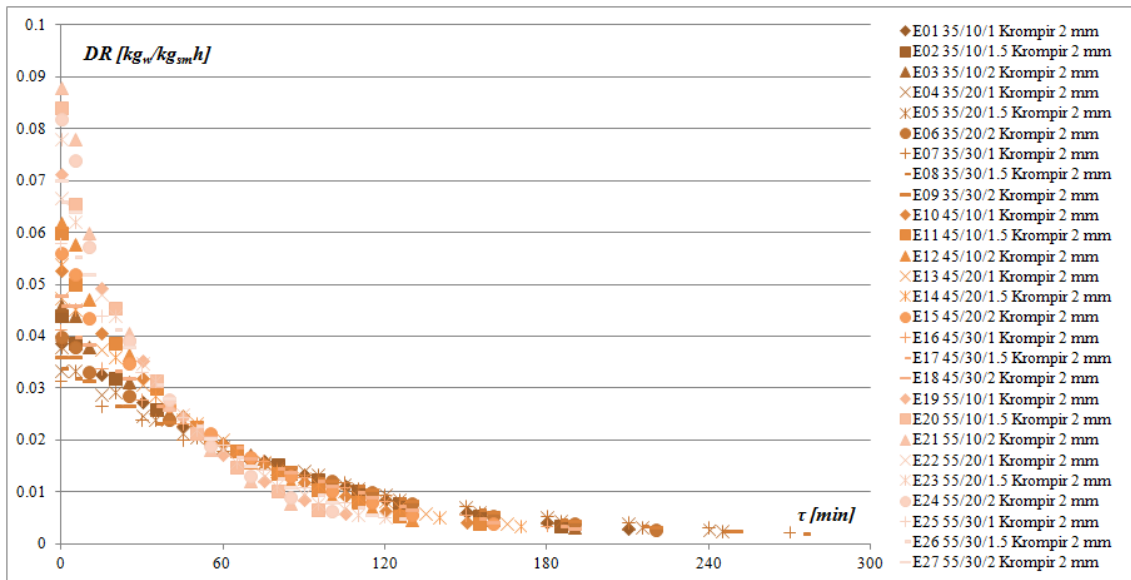


Slika 9.13.2b Promena srednje vlažnosti materijala u bezdimenzionom obliku tokom procesa (*Banana, cilindar 7mm*)

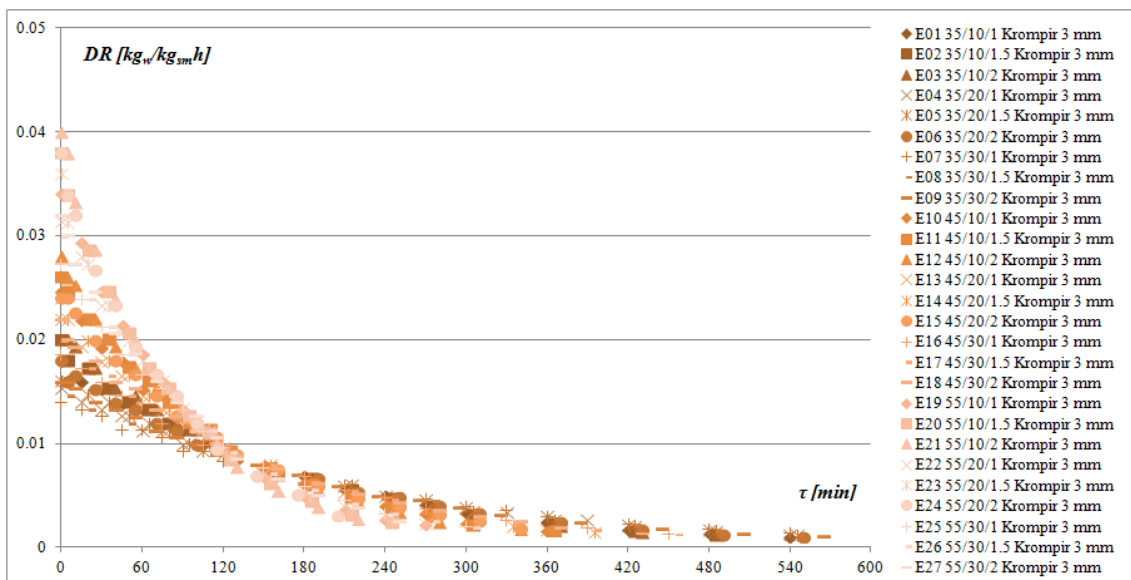
PRILOG 9.14

Brzina sušenja (Krompir i Banana)

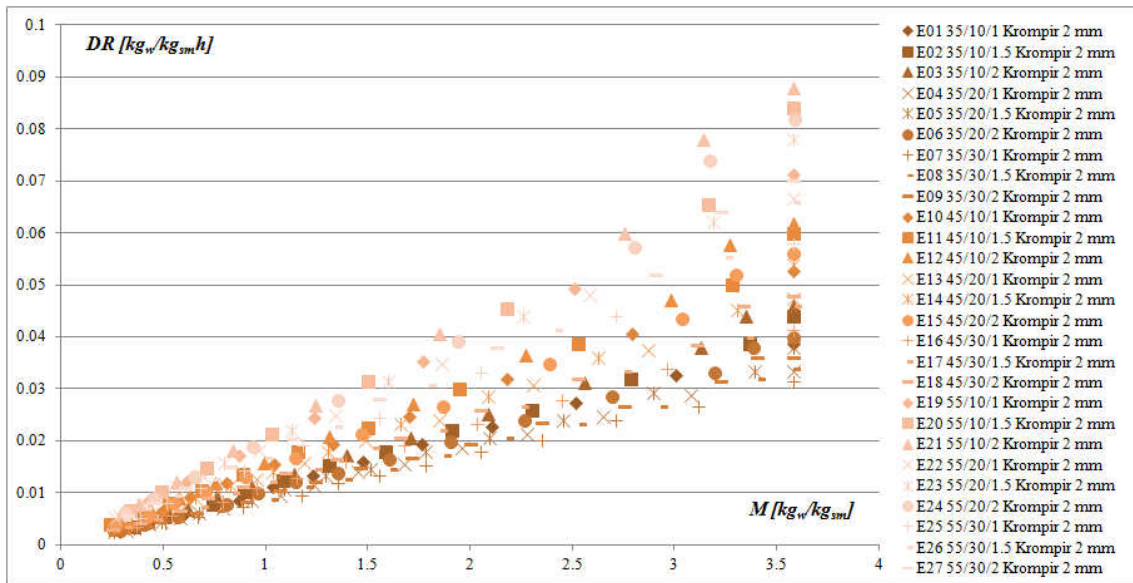
Rezultati merenja prikazani u ovom prilogu nadovezuju se na **Poglavlje 5.2**.



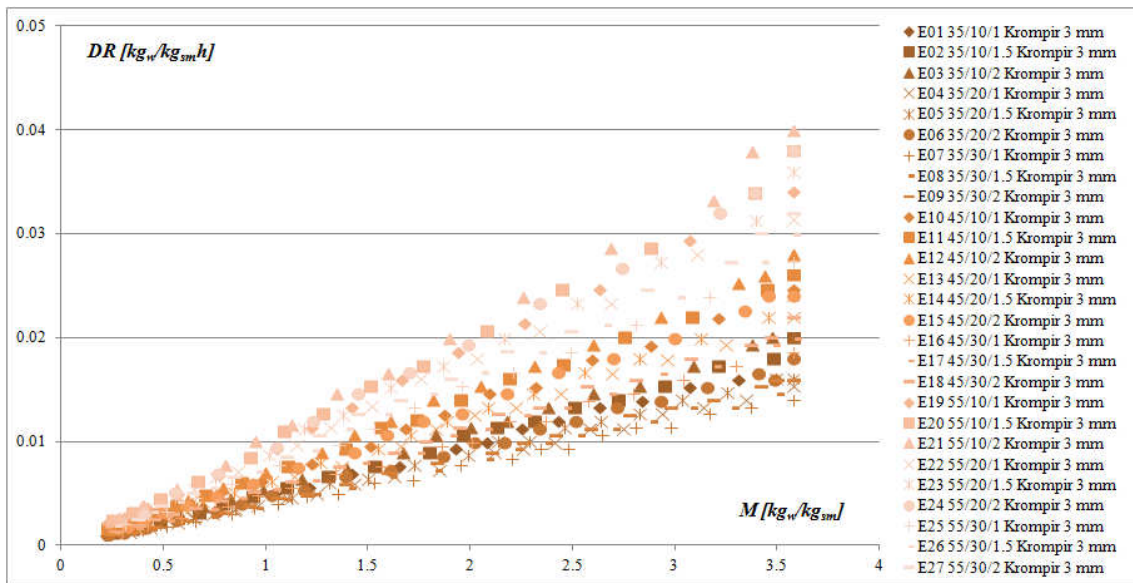
Slika 9.14.1a Promena brzine sušenja tokom procesa (*Krompir, list 2mm*)



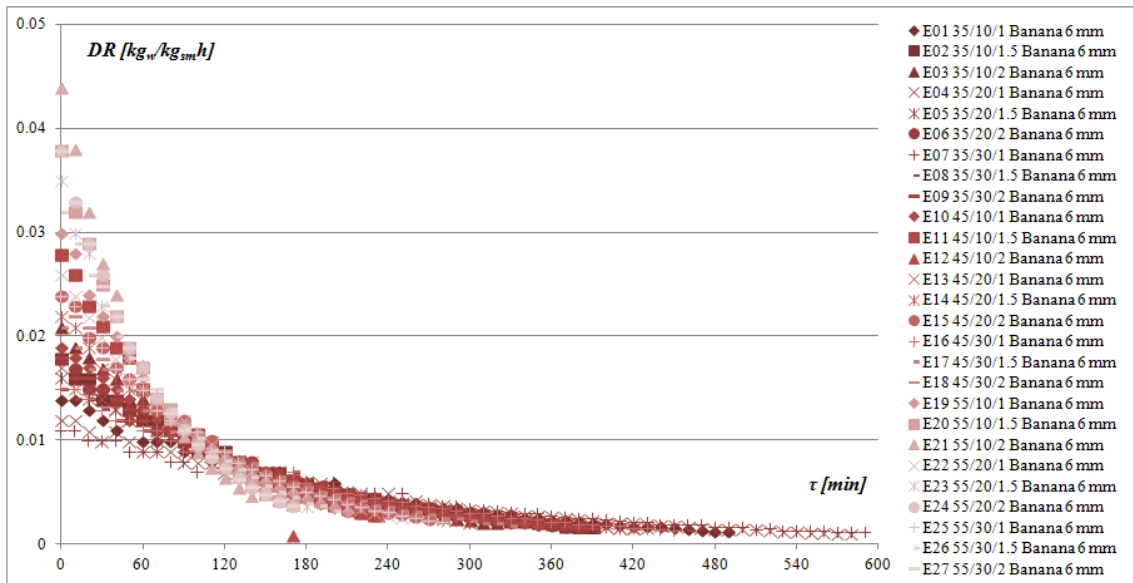
Slika 9.14.1b Promena brzine sušenja tokom procesa (*Krompir, list 3 mm*)



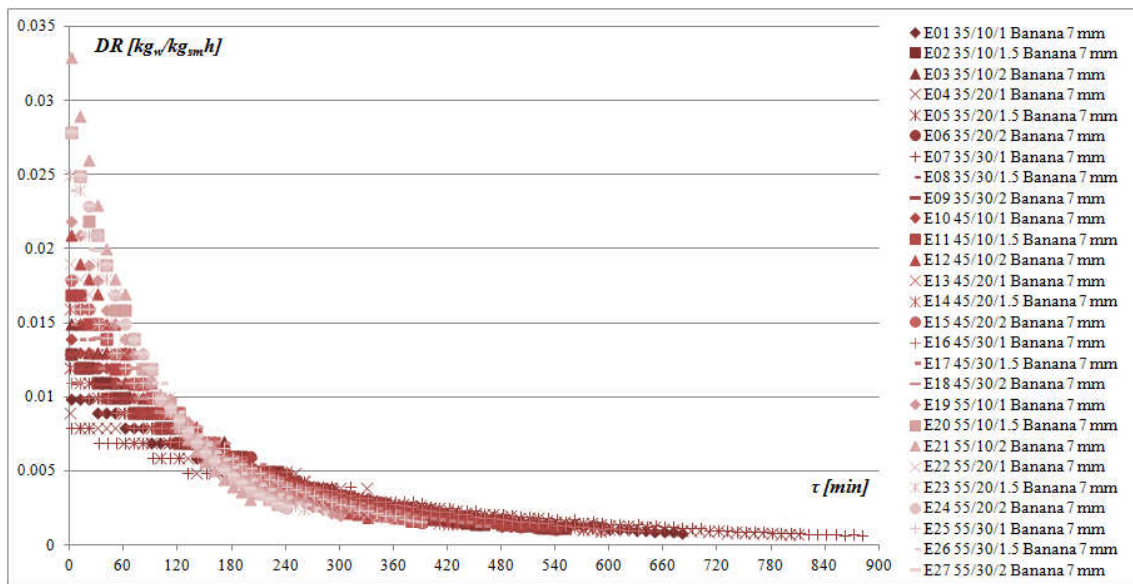
Slika 9.14.2a Promena brzine sušenja u zavisnosti od srednje vlažnosti materijala (*Krompir, list 2 mm*)



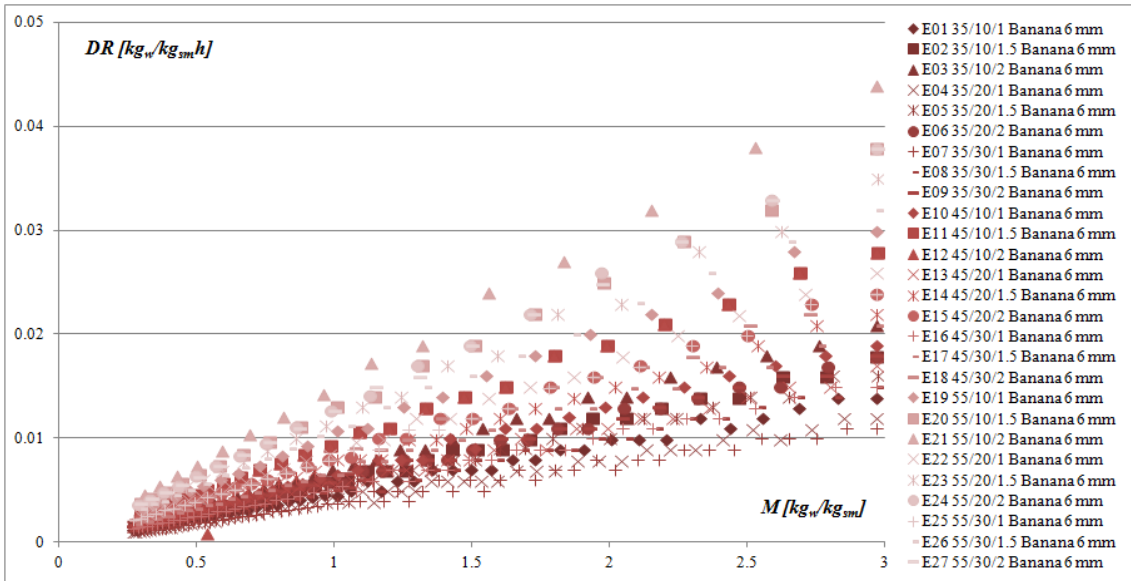
Slika 9.14.2b Promena brzine sušenja u zavisnosti od srednje vlažnosti materijala (*Krompir, list 3 mm*)



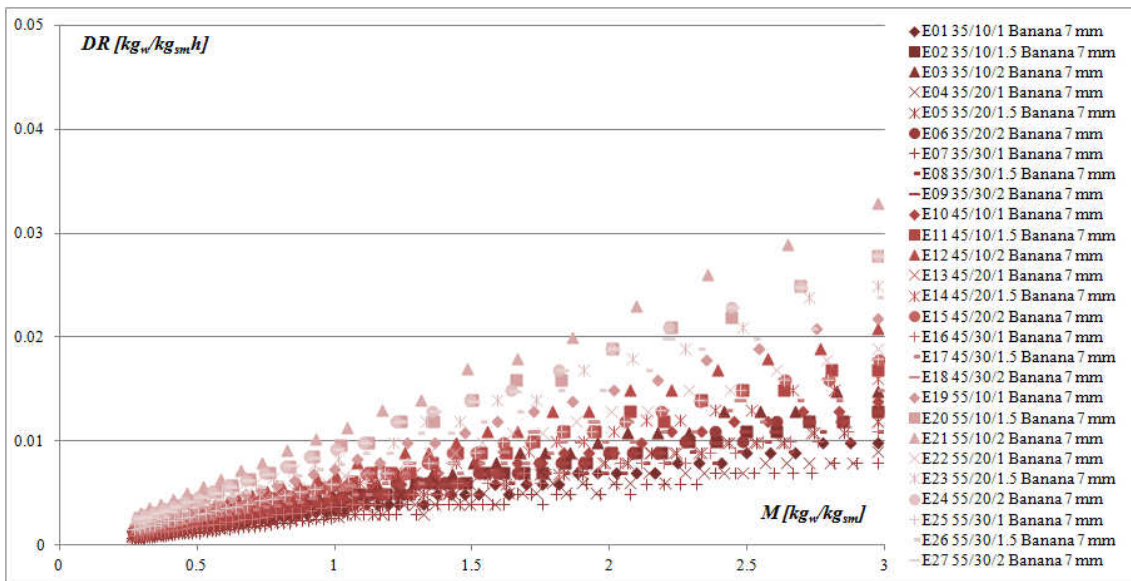
Slika 9.14.3a Promena brzine sušenja tokom procesa (*Banana, cilindar 6 mm*)



Slika 9.14.3b Promena brzine sušenja tokom procesa (*Banana, cilindar 7mm*)



Slika 9.14.4a Promena brzine sušenja u zavisnosti od srednje vlažnosti materijala (*Banana, cilindar 6 mm*)



Slika 9.14.4b Promena brzine sušenja u zavisnosti od srednje vlažnosti materijala (*Banana, cilindar 7mm*)

PRILOG 9.15

Računarski softver

U disertaciji su korišćeni softverski paketi specijalne namene čije su osnovne osobine i funkcije opisane u nastavku.

Table Curve 2D Verzija 5.01 (*Systat Software Inc. 2002*) je program za ispitivanje funkcija u dvodimenzionalnom dekartovom koordinatnom sistemu. Korišćena je besplatna verzija programa sa ograničenim trajanjem od 30 dana. Program poseduje obimnu bazu funkcija i mogućnost kreiranja novih korisničkih funkcija. Odgovarajućim modulima za analizu grešaka je moguće kompletno ispitati željenu funkciju, utvrditi odstupanja od unapred zadanog seta podataka i formirati grafičke dijagrame sa svim relevantnim veličinama. Takođe, program poseduje mogućnost statističke obrade podataka i sprovođenje jednostavnijih statističkih analiza. (Web link: <http://www.sigmaplot.com/products/tablecurve2d/tablecurve2d.php>)

Table Curve 3D Verzija 4.0 (*Systat Software Inc. 1993-2002*) je program za ispitivanje funkcija u trodimenzionalnom dekartovom koordinatnom sistemu. Korišćena je besplatna verzija programa sa ograničenim trajanjem od 30 dana. Program poseduje sve funkcije kao i prethodno navedena 2D verzija uz dodatnu mogućnost grafičkog prikazivanja dijagrama u prostoru. (Web link: <http://www.sigmaplot.com/products/tablecurve3d/tablecurve3d.php>)

VisSim Software Verzija 3.0 FAP (*Visual Solutions Inc. 2009*) je program za modeliranje i simulaciju kompleksnih dinamičkih sistema. Korišćena je besplatna akademska verzija programa koja ima ograničen izbor modula u odnosu na profesionalnu verziju programa. Program omogućuje vizuelno numeričko i grafičko predstavljanje rezultata simulacije u realnom vremenu uz mogućnost variranja uticajnih veličina i tokom trajanja simulacije. Program poseduje mogućnost izbora gotovih modula i komponenti kao i kreiranje novih korisničkih varijanti. (Web link: http://www.vissim.com/products/academic_program.html)

Interactive Thermodynamics Verzija 3.0 (*Intellipro, Inc. 2008*) je program za sprovođenje interaktivnih parametarskih termodinamičkih analiza. Softver je prateći materijal knjige *Fundamentals of Engineering Thermodynamics* (*Moran & Shapiro, 6th Ed., 2008, Wiley*). Korišćena je besplatna akademska verzija programa. Program ima mogućnost variranja pojedinih parametara složenih termodinamičkih formulacija, grafičko prikazivanje rezultata termodinamičkih analiza, rešavanje sistema jednačina koje zahtevaju iterativne postupke i slično. Program poseduje i baze podataka različitih radnih materija koje su uobičajene u termodinamici (idealni gasovi, vodena para, rashladni fluidi i slično). (Web link: <http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0471787337.html>)

PRILOG 9.16

Određivanje parametara matematičkog modela (Krompir i Banana)

Rezultati merenja prikazani u ovom prilogu nadovezuju se na **Poglavlje 5.4**.

Tabela 9.16.1

Rezultati određivanja nepoznatih parametara u jednačini matematičkog modela (*Krompir, list 2mm*)

Oznaka eksperimenta	Režim sušenja			Nepoznati parametri i statistička odstupanja						
	w [m/s]	T [°C]	RH [%]	$MR = \exp(A_0 + A_1 \cdot \tau)$		$A_1 = B_0 + B_1 \cdot T^{B_2} + B_3 \cdot RH^{B_4}$				
				A_0	A_1	B_0	B_1	B_2	B_3	B_4
E1	1	35	10	-7.73E-03	-0.01162					
E4	1	35	20	2.86E-03	-0.01015					
E7	1	35	30	4.24E-03	-0.00943					
E10	1	45	10	-6.71E-03	-0.01623	2.0535	-2.64E-9	3.8667	-2.068	-0.00122
E13	1	45	20	-1.60E-03	-0.01459					
E16	1	45	30	1.54E-03	-0.01267					
E19	1	55	10	-6.56E-03	-0.02311					
E22	1	55	20	-1.81E-03	-0.02169					
E25	1	55	30	1.02E-03	-0.01862					
E2	1.5	35	10	-9.50E-03	-0.01230					
E5	1.5	35	20	-2.70E-03	-0.01070					
E8	1.5	35	30	1.23E-03	-0.00999					
E11	1.5	45	10	-7.95E-03	-0.01700	2.0485	-7.51E-9	3.6027	-2.0644	-0.00130
E14	1.5	45	20	-3.59E-03	-0.01527					
E17	1.5	45	30	1.34E-03	-0.01327					
E20	1.5	55	10	-6.80E-03	-0.02443					
E23	1.5	55	20	-1.77E-03	-0.02295					
E26	1.5	55	30	1.63E-03	-0.01968					
E3	2	35	10	-1.38E-02	-0.01295					
E6	2	35	20	-7.11E-03	-0.01125					
E9	2	35	30	3.30E-03	-0.01067					
E12	2	45	10	-1.19E-02	-0.01772	2.0484	-3.46E-9	3.799	-2.0645	-0.001214
E15	2	45	20	-6.72E-03	-0.01590					
E18	2	45	30	1.46E-04	-0.01392					
E21	2	55	10	-8.65E-03	-0.02576					
E24	2	55	20	-7.53E-03	-0.02394					
E27	2	55	30	2.83E-04	-0.02079					

Tabela 9.16.2

Rezultati određivanja nepoznatih parametara u jednačini matematičkog modela (*Krompir, list 3mm*)

Oznaka eksperimenta	Režim sušenja			Nepoznati parametri i statistička odstupanja						
				$MR = \exp(A_0 + A_1 \cdot \tau)$		$A_1 = B_0 + B_1 \cdot T^{B_2} + B_3 \cdot RH^{B_4}$				
	w [m/s]	T [°C]	RH [%]	A_0	A_1	B_0	B_1	B_2	B_3	B_4
E1	1	35	10	-2.54E-03	-0.00512					
E4	1	35	20	2.38E-03	-0.00441					
E7	1	35	30	4.02E-03	-0.00410					
E10	1	45	10	-7.87E-03	-0.00706	2.0531	-7.11E-9	3.3979	-2.0598	-0.000581
E13	1	45	20	-8.34E-04	-0.00637					
E16	1	45	30	3.13E-03	-0.00552					
E19	1	55	10	-7.37E-03	-0.01005					
E22	1	55	20	-1.21E-03	-0.00945					
E25	1	55	30	2.02E-03	-0.00811					
E2	1.5	35	10	-4.88E-03	-0.00541					
E5	1.5	35	20	-1.72E-03	-0.00466					
E8	1.5	35	30	1.06E-02	-0.00434					
E11	1.5	45	10	-9.35E-03	-0.00738	2.0529	-2.62E-9	3.65	-2.06	-0.000583
E14	1.5	45	20	-4.07E-03	-0.00663					
E17	1.5	45	30	4.95E-04	-0.00577					
E20	1.5	55	10	-8.90E-03	-0.01058					
E23	1.5	55	20	-2.11E-03	-0.00996					
E26	1.5	55	30	1.35E-03	-0.00855					
E3	2	35	10	-1.10E-02	-0.00568					
E6	2	35	20	-7.23E-03	-0.00490					
E9	2	35	30	3.67E-03	-0.00464					
E12	2	45	10	-1.34E-02	-0.00770	2.0528	-1.17E-9	3.86	-2.06	-0.00055
E15	2	45	20	-6.87E-03	-0.00692					
E18	2	45	30	1.87E-04	-0.00605					
E21	2	55	10	-9.15E-03	-0.01123					
E24	2	55	20	-7.04E-03	-0.01045					
E27	2	55	30	4.19E-04	-0.00904					

Tabela 9.16.3

Rezultati određivanja nepoznatih parametara u jednačini matematičkog modela (*Banana, cilindar 6 mm*)

Oznaka eksperimenta	Režim sušenja			Nepoznati parametri i statistička odstupanja						
				$MR = \exp(A_0 + A_1 \cdot \tau)$		$A_1 = B_0 + B_1 \cdot T^{B_2} + B_3 \cdot RH^{B_4}$				
	w [m/s]	T [°C]	RH [%]	A_0	A_1	B_0	B_1	B_2	B_3	B_4
E1	1	35	10	-8.64E-03	-0.00478					
E4	1	35	20	2.07E-02	-0.00446					
E7	1	35	30	3.29E-02	-0.00431					
E10	1	45	10	-9.99E-03	-0.00654	- 0.1284	- 4.13E-7	2.5033	0.1236	0.01283
E13	1	45	20	6.73E-03	-0.00585					
E16	1	45	30	-8.24E-05	-0.00530					
E19	1	55	10	-5.21E-03	-0.01064					
E22	1	55	20	2.10E-02	-0.00994					
E25	1	55	30	-3.62E-04	-0.00852					
E2	1.5	35	10	-4.32E-02	-0.00540	- 0.13054	- 3.01E-8	3.1509	0.12223	0.0134
E5	1.5	35	20	-2.02E-03	-0.00559					
E8	1.5	35	30	1.00E-02	-0.00537					
E11	1.5	45	10	5.17E-04	-0.01005					
E14	1.5	45	20	-1.51E-03	-0.00770					
E17	1.5	45	30	9.39E-03	-0.00739					
E20	1.5	55	10	-4.18E-03	-0.01336					
E23	1.5	55	20	3.39E-03	-0.01259					
E26	1.5	55	30	9.16E-03	-0.01187					
E3	2	35	10	3.08E-04	-0.00729	- 0.13095	-3.351E-10	4.2775	0.121132	0.01313
E6	2	35	20	-3.53E-02	-0.00558					
E9	2	35	30	-8.96E-04	-0.00613					
E12	2	45	10	-1.81E-02	-0.00951					
E15	2	45	20	-1.38E-02	-0.00818					
E18	2	45	30	1.48E-03	-0.00849					
E21	2	55	10	-1.91E-03	-0.01605					
E24	2	55	20	5.36E-04	-0.01376					
E27	2	55	30	-9.78E-04	-0.01360					

Tabela 9.16.4

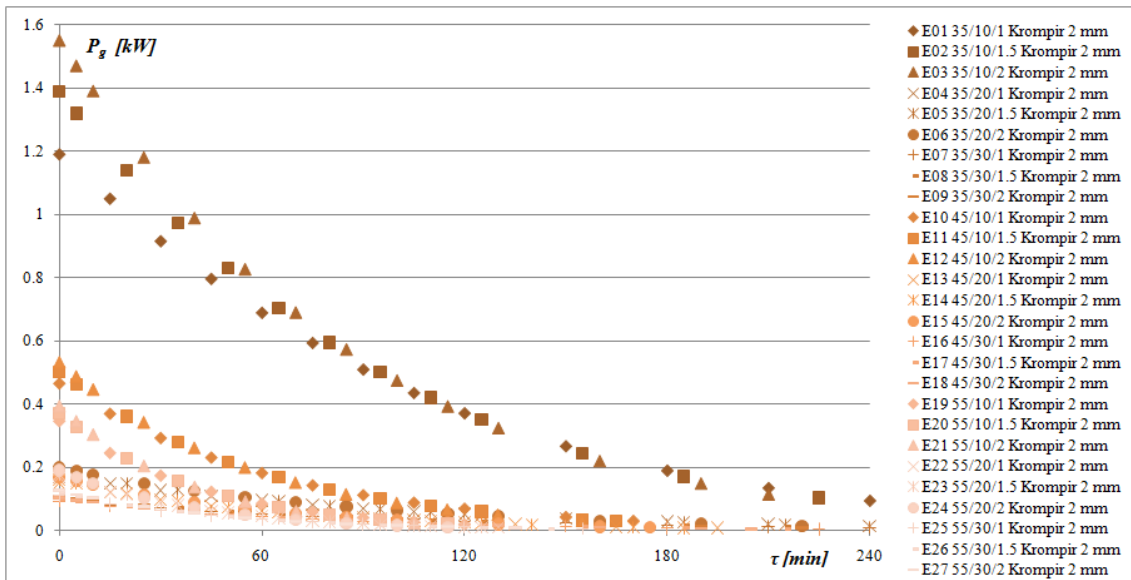
Rezultati određivanja nepoznatih parametara u jednačini matematičkog modela (*Banana, cilindar 7 mm*)

Oznaka eksperimenta	Režim sušenja			Nepoznati parametri i statistička odstupanja						
				$MR = \exp(A_0 + A_1 \cdot \tau)$		$A_1 = B_0 + B_1 \cdot T^{B_2} + B_3 \cdot RH^{B_4}$				
	$w [m/s]$	$T [^{\circ}C]$	$RH [%]$	A_0	A_1	B_0	B_1	B_2	B_3	B_4
E1	1	35	10	2.26E-02	-0.00341					
E4	1	35	20	5.40E-02	-0.00321					
E7	1	35	30	3.80E-02	-0.00285					
E10	1	45	10	3.76E-02	-0.00472					
E13	1	45	20	4.98E-02	-0.00420					
E16	1	45	30	6.25E-02	-0.00411	-0.12857	-2.52E-10	4.16329	0.12315	0.0084
E19	1	55	10	6.69E-02	-0.00760					
E22	1	55	20	9.07E-02	-0.00710					
E25	1	55	30	8.67E-02	-0.00662					
E2	1.5	35	10	2.82E-02	-0.00424					
E5	1.5	35	20	4.28E-02	-0.00407					
E8	1.5	35	30	4.80E-02	-0.00385					
E11	1.5	45	10	6.09E-02	-0.00605					
E14	1.5	45	20	5.93E-02	-0.00562					
E17	1.5	45	30	6.24E-02	-0.00531	-0.12846	-5.63E-10	4.02751	0.12319	0.00605
E20	1.5	55	10	9.29E-02	-0.00965					
E23	1.5	55	20	9.42E-02	-0.00905					
E26	1.5	55	30	9.47E-02	-0.00853					
E3	2	35	10	4.71E-02	-0.00518					
E6	2	35	20	4.10E-02	-0.00442					
E9	2	35	30	4.53E-02	-0.00443					
E12	2	45	10	6.55E-02	-0.00713					
E15	2	45	20	6.15E-02	-0.00615					
E18	2	45	30	6.33E-02	-0.00613	-0.1295	-3.42E-10	4.1919	0.12235	0.00972
E21	2	55	10	1.10E-01	-0.01150					
E24	2	55	20	9.95E-02	-0.00989					
E27	2	55	30	9.77E-02	-0.00979					

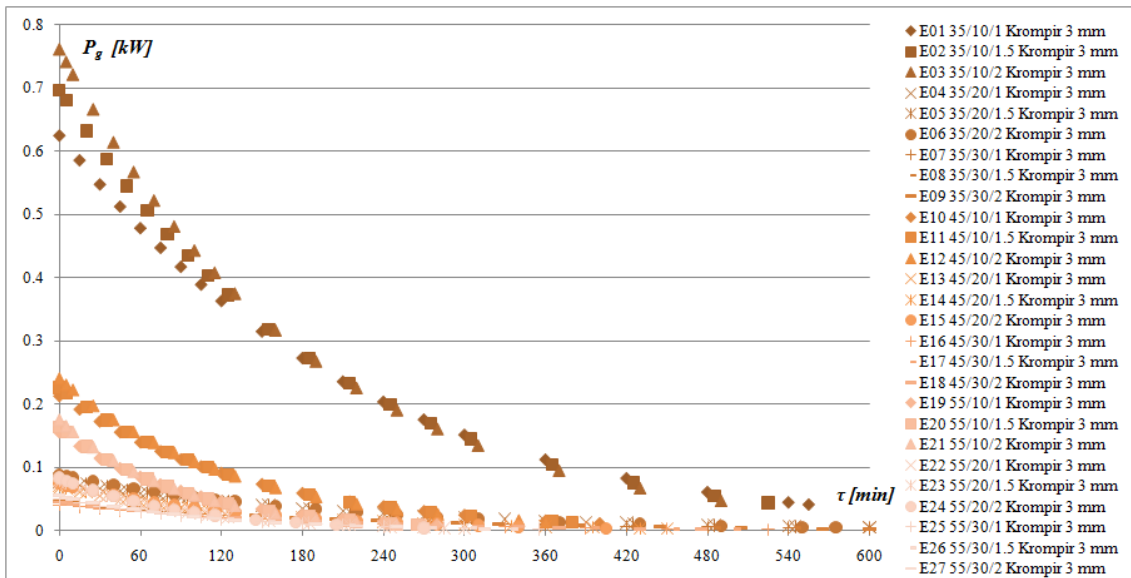
PRILOG 9.17

Energija utrošena za zagrevanje vlažnog vazduha (Krompir i Banana)

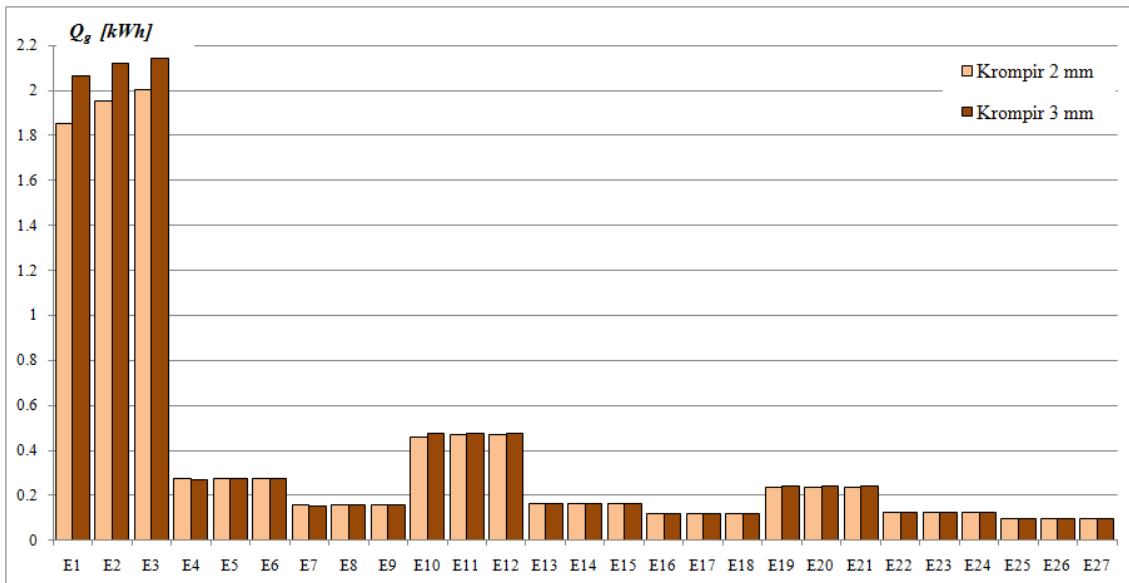
Rezultati merenja prikazani u ovom prilogu nadovezuju se na **Poglavlje 5.5**.



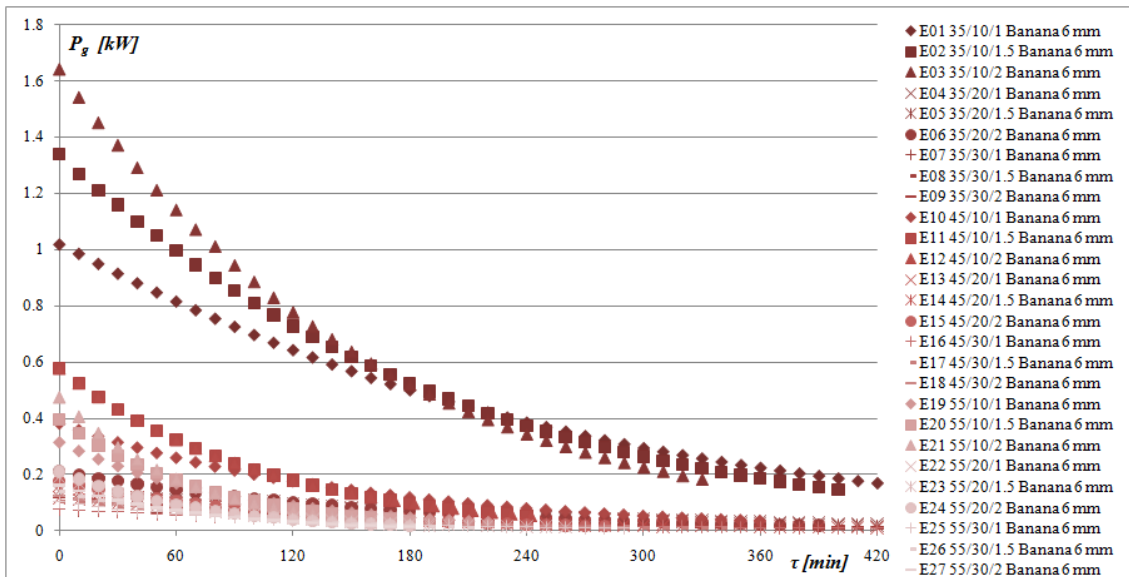
Slika 9.17.1a Toplotni protok utrošen za zagrevanje vlažnog vazduha (Krompir, list 2 mm)



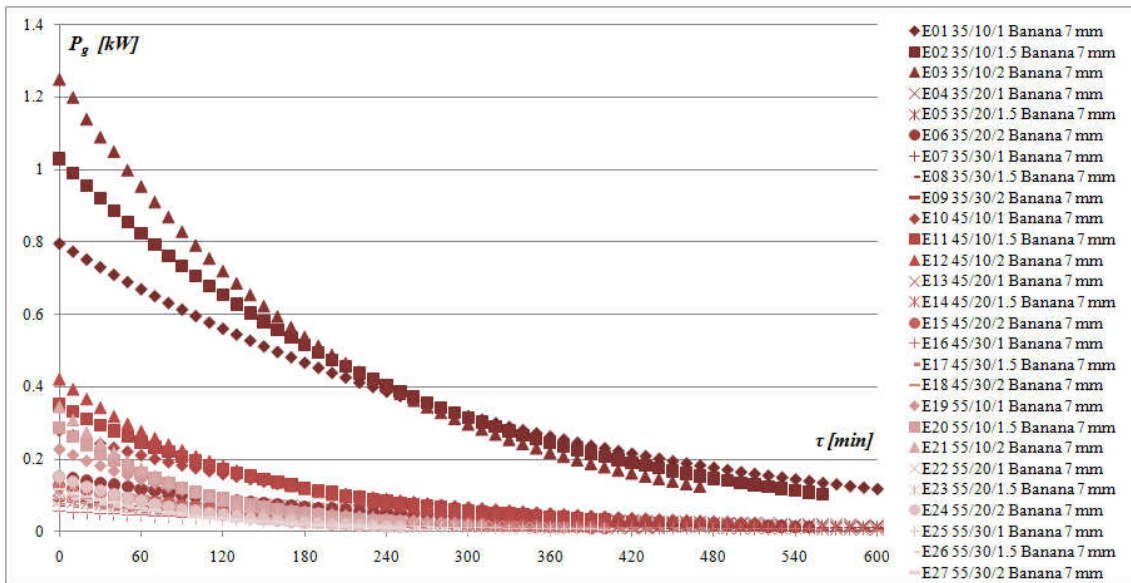
Slika 9.17.1b Toplotni protok utrošen za zagrevanje vlažnog vazduha (Krompir, list 3 mm)



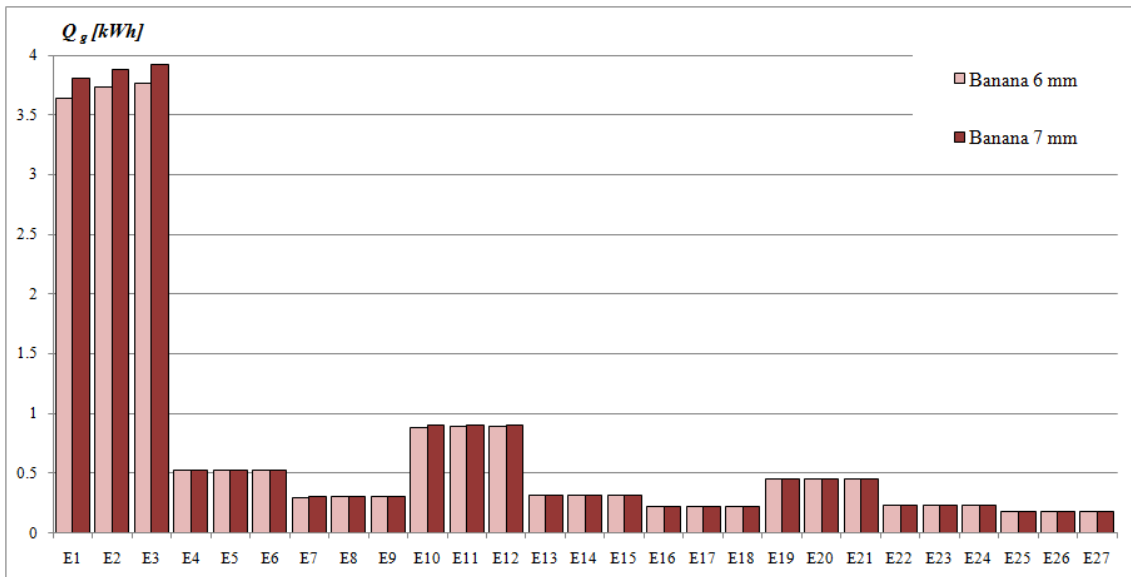
Slika 9.17.2 Količina toplote utrošena za zagrevanje vlažnog vazduha (Krompir, listovi 2 i 3 mm)



Slika 9.17.3a Toplotni protok utrošen za zagrevanje vlažnog vazduha (Banana, cilindar 6 mm)



Slika 9.17.3b Toplotni protok utrošen za zagrevanje vlažnog vazduha (*Banana*, cilindar 7 mm)

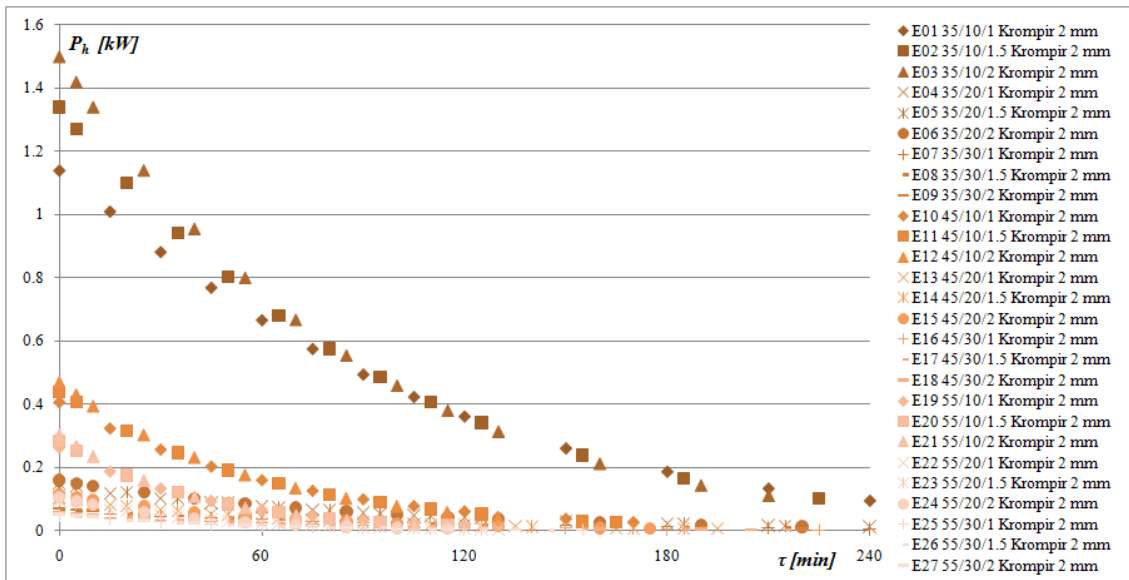


Slika 9.17.4 Količina toplote utrošena za zagrevanje vlažnog vazduha (*Banana*, cilindri 6 i 7 mm)

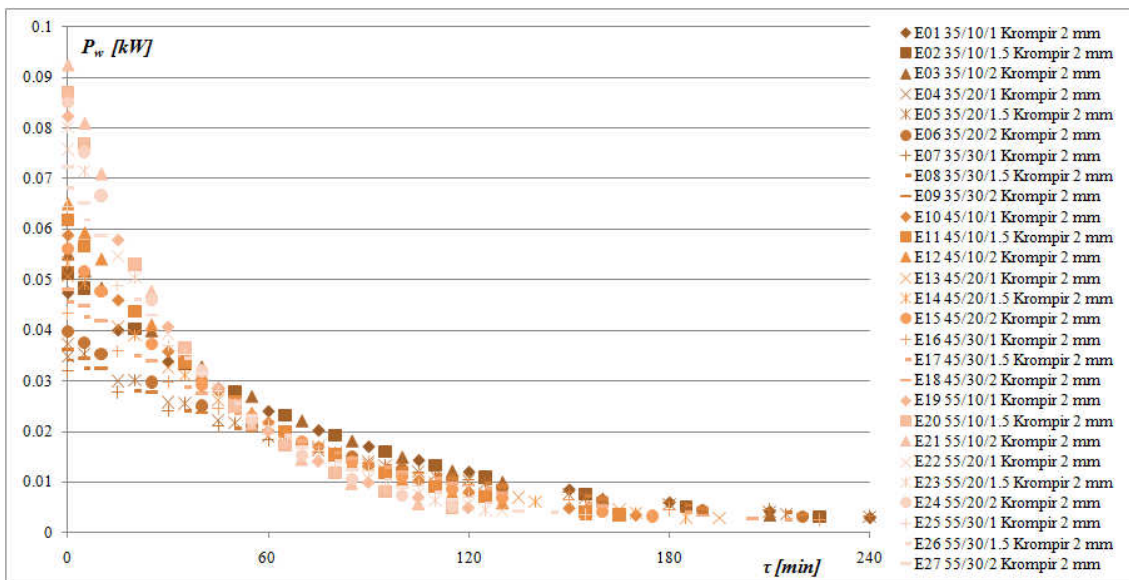
PRILOG 9.18

Energija utrošena na hlađenje vlažnog vazduha uz izdvajanje vlage (Krompir i Banana)

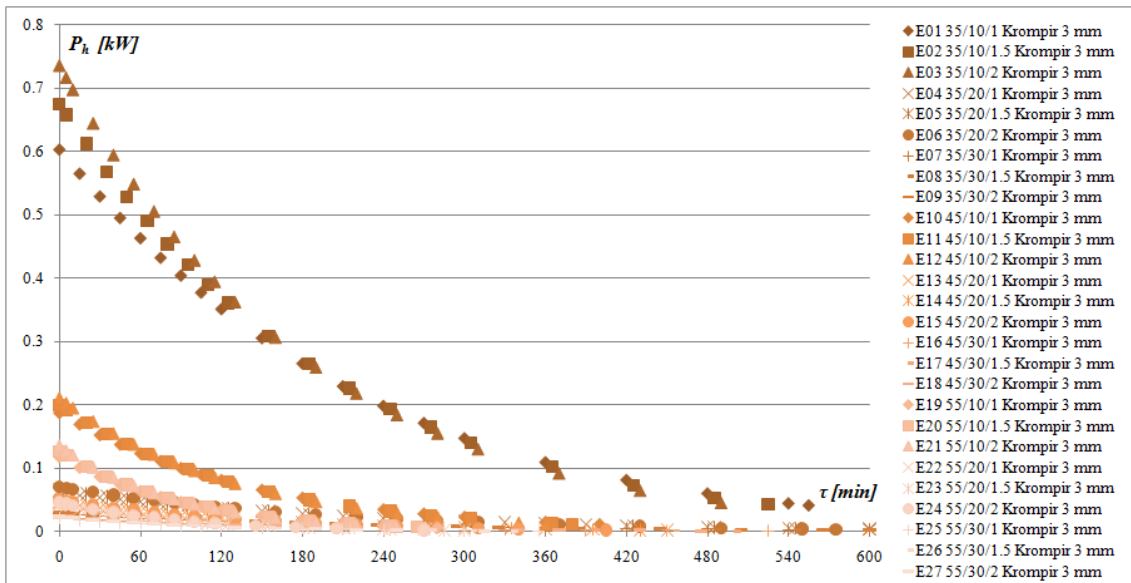
Rezultati merenja prikazani u ovom prilogu nadovezuju se na **Poglavlje 5.6**.



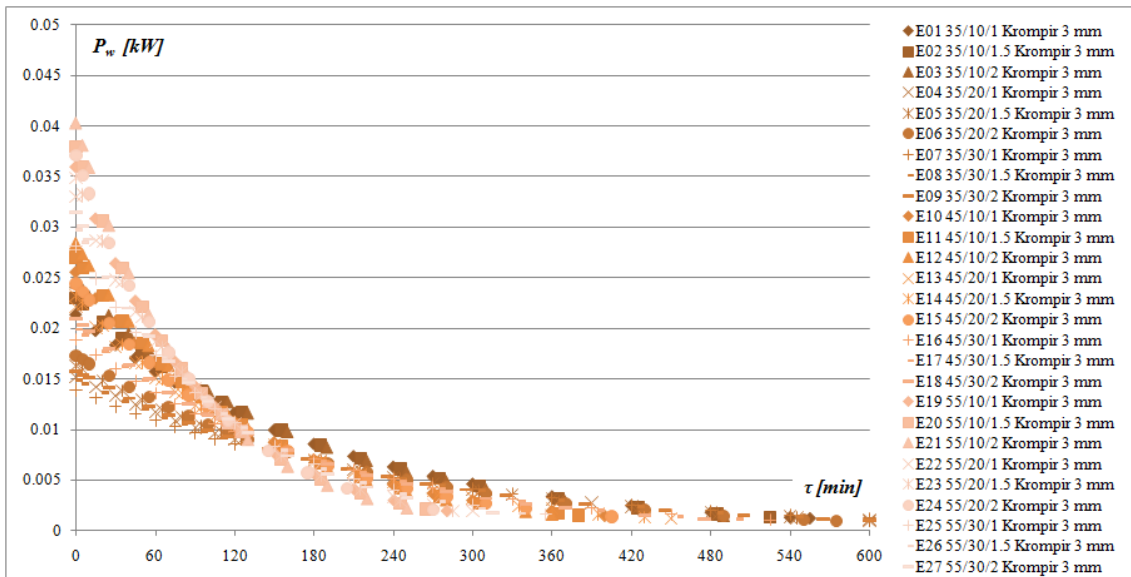
Slika 9.18.1a Toplotni protok utrošen za hlađenje vlažnog vazduha (*Krompir, list 2 mm*)



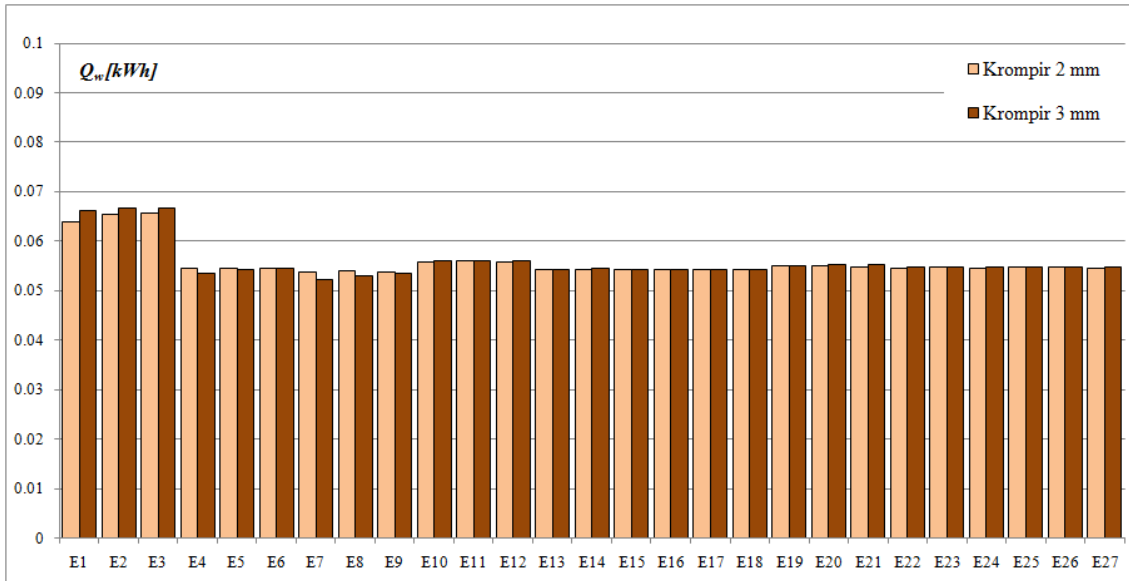
Slika 9.18.1b Toplotni protok utrošen za kondenzovanje vlage (*Krompir, list 2 mm*)



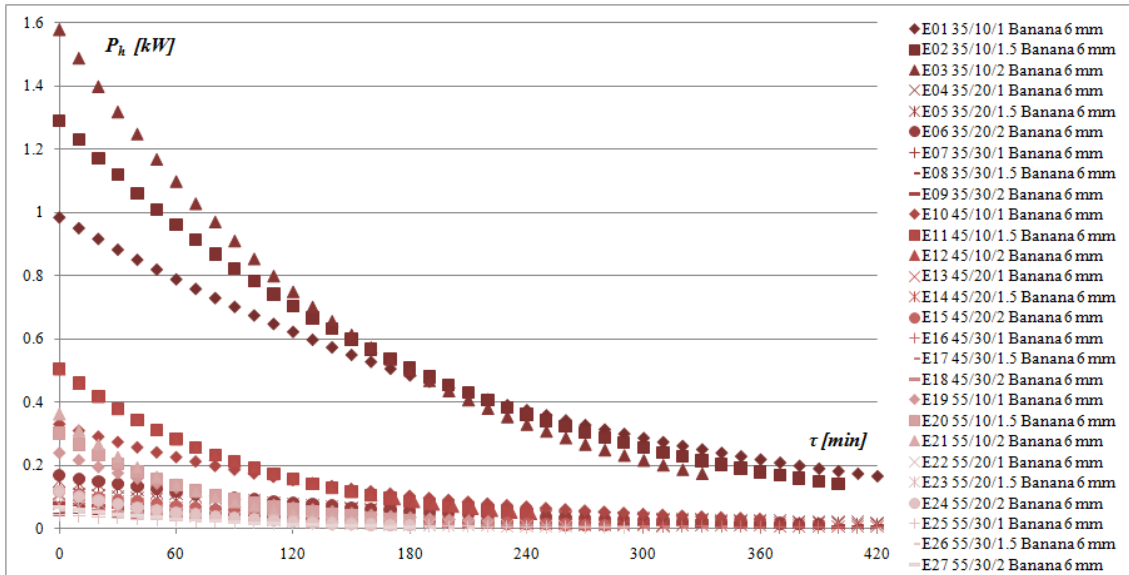
Slika 9.18.2a Toplotni protok utrošen za hlađenje vlažnog vazduha (*Krompir, list 3 mm*)



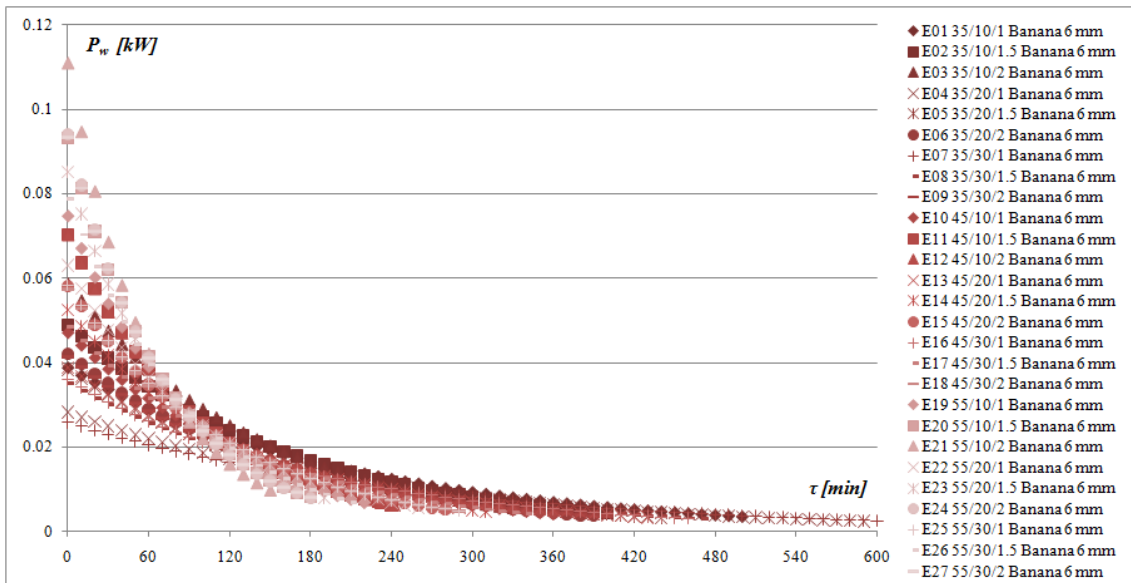
Slika 9.18.2b Toplotni protok utrošen za kondenzovanje vlage (*Krompir, list 3 mm*)



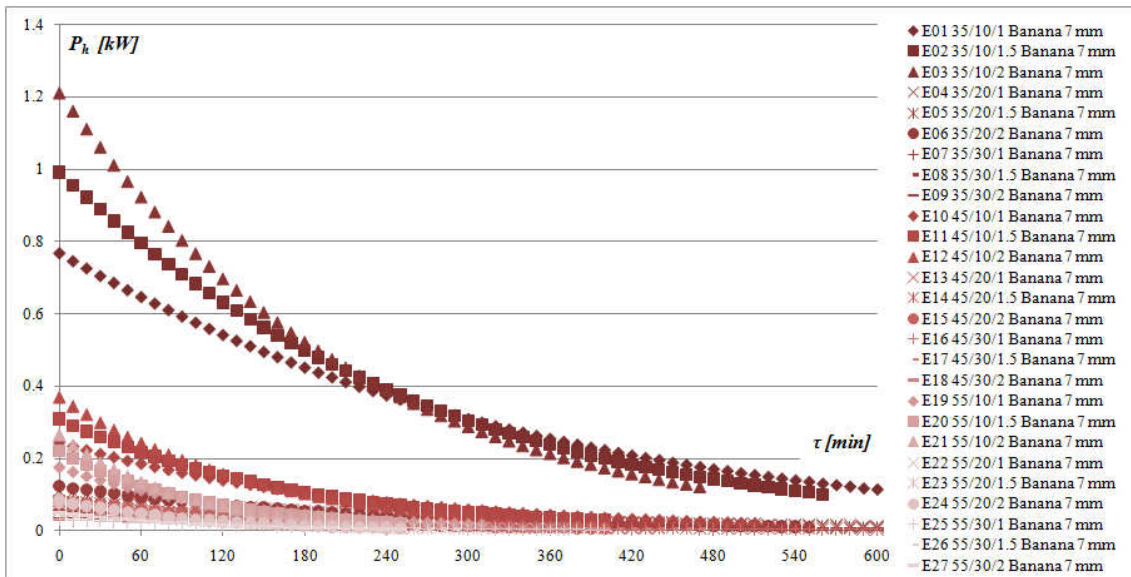
Slika 9.18.3 Količina toplote utrošena za kondenzovanje vlage (*Krompir, list 2 i 3 mm*)



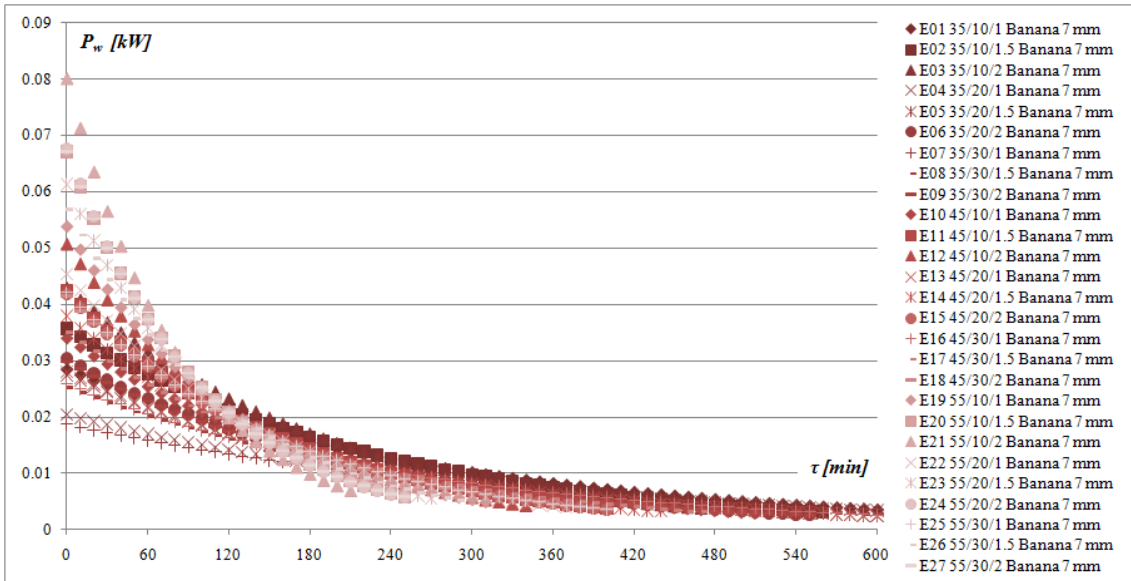
Slika 9.18.4a Toplotni protok utrošen za hlađenje vlažnog vazduha (*Banana, cilindar 6 mm*)



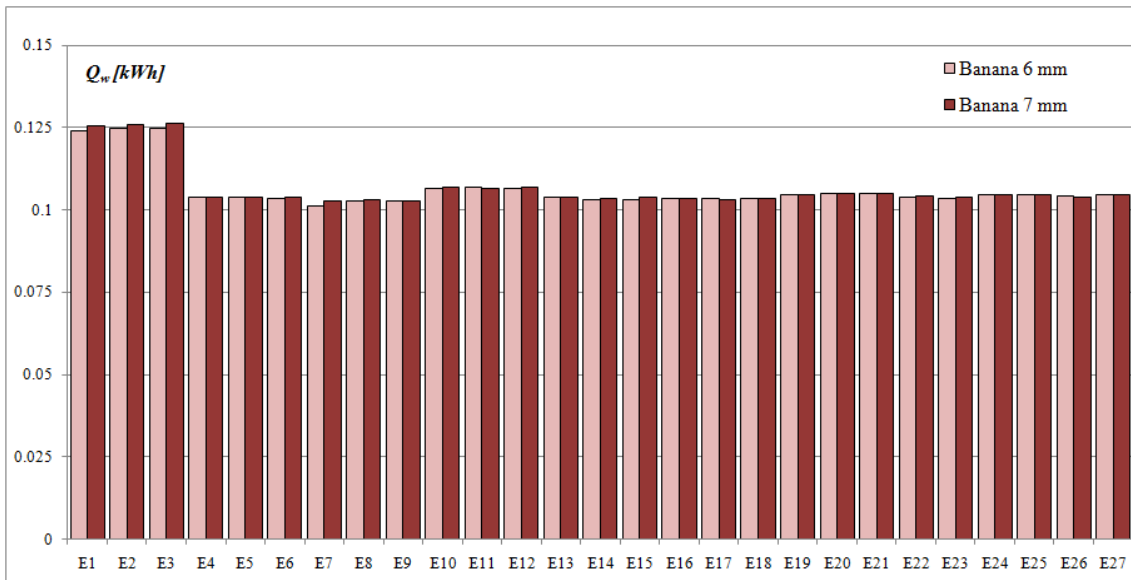
Slika 9.18.4b Toplotni protok utrošen za kondenzovanje vlage (*Banana*, cilindar 6 mm)



Slika 9.18.5a Toplotni protok utrošen za hlađenje vlažnog vazduha (*Banana*, cilindar 6 mm)



Slika 9.18.5b Toplotni protok utrošen za kondenzovanje vlage (*Banana, cilindar 7 mm*)



Slika 9.18.6 Količina toplote utrošena za kondenzovanje vlage (*Banana, cilindar 6 i 7 mm*)

PRILOG 9.19

Poređenje rezultata dobijenih sopstvenim modelom sa rezultatima modela drugih autora
(rezultati se nadovezuju na **Poglavlje 6.2**)

Eksperiment	Režim			$MR = \exp(a + b \cdot \tau)$				$MR = \exp(-k\tau)$			$MR = a \cdot \exp(-k\tau)$				$MR = 1 + a \cdot \tau + b \cdot \tau^2$				
	T	RH	w	Sopstveni model				Newton			Henderson & Pabis				Wang & Singh				
	°C	%	m/s	a	b	r ²	RMSE	k	r ²	RMSE	a	k	r ²	RMSE	a	b	r ²	RMSE	
10 mm	E1	35	10	1	8.75E-05	-0.01460	0.99999	0.00038	0.01455	0.99973	0.00400	0.99915	0.01454	0.99970	0.00400	-0.00814	1.55E-05	0.87575	0.08810
	E2	35	10	1.5	-3.27E-04	-0.01550	0.99999	0.00032	0.01551	0.99999	0.00032	0.99967	0.01550	0.99999	0.00032	-0.00990	2.40E-05	0.94137	0.06410
	E3	35	10	2	-3.74E-04	-0.01650	0.99999	0.00040	0.01652	0.99999	0.00041	0.99962	0.01650	0.99997	0.00040	-0.01060	2.76E-05	0.94358	0.06323
	E4	35	20	1	-3.74E-04	-0.01651	0.99999	0.00040	0.01652	0.99999	0.00041	0.99963	0.01651	0.99997	0.00040	-0.01061	2.76E-05	0.94358	0.06323
	E5	35	20	1.5	4.24E-04	-0.01327	0.99997	0.00145	0.01326	0.99997	0.00144	1.00042	0.01327	0.99997	0.00145	-0.00916	2.12E-05	0.96478	0.05044
	E6	35	20	2	1.09E-04	-0.01413	0.99997	0.00038	0.01413	0.99997	0.00038	1.00011	0.01413	0.99997	0.00038	-0.00981	2.44E-05	0.96666	0.04922
	E7	35	30	1	-3.29E-04	-0.01145	0.99999	0.00041	0.01146	0.99997	0.00042	0.99967	0.01146	0.99997	0.00041	-0.00868	2.02E-05	0.98403	0.03403
	E8	35	30	1.5	-1.67E-04	-0.01224	0.99999	0.00045	0.01224	0.99997	0.00045	0.99983	0.01224	0.99997	0.00045	-0.00910	2.19E-05	0.98117	0.03706
	E9	35	30	2	-1.45E-04	-0.01300	0.99999	0.00040	0.01300	0.99997	0.00039	0.99985	0.01300	0.99997	0.00040	-0.00936	2.27E-05	0.97493	0.04276
	E10	45	10	1	-4.89E-05	-0.02248	0.99999	0.00041	0.02248	0.99997	0.00041	0.99995	0.02248	0.99997	0.00041	-0.01441	5.08E-05	0.94457	0.06394
	E11	45	10	1.5	-4.77E-05	-0.02360	0.99999	0.00037	0.02363	0.99997	0.00036	0.99995	0.02363	0.99997	0.00037	-0.01516	5.63E-05	0.94501	0.06396
	E12	45	10	2	1.06E-04	-0.02487	0.99998	0.00036	0.02487	0.99997	0.00036	1.00010	0.02487	0.99997	0.00036	-0.01599	6.27E-05	0.94632	0.06352
	E13	45	20	1	2.93E-04	-0.01990	0.99998	0.00195	0.01994	0.99994	0.00193	1.00029	0.01994	0.99994	0.00195	-0.01354	4.61E-05	0.96190	0.05361
	E14	45	20	1.5	7.94E-06	-0.02090	0.99994	0.00035	0.02095	0.99998	0.00035	1.00000	0.02096	0.99994	0.00035	-0.01465	5.47E-05	0.96949	0.04836
	E15	45	20	2	-7.50E-06	-0.02204	0.99999	0.00037	0.02204	0.99998	0.00036	0.99999	0.02204	0.99994	0.00037	-0.01526	5.91E-05	0.96738	0.05009
	E16	45	30	1	1.10E-03	-0.01710	0.99999	0.00297	0.01700	0.99988	0.00295	1.00110	0.01715	0.99980	0.00297	-0.01243	4.02E-05	0.97690	0.04191
	E17	45	30	1.5	9.64E-05	-0.01799	0.99990	0.00149	0.01700	0.99990	0.00147	1.00000	0.01690	0.99980	0.00140	-0.01300	4.48E-05	0.97770	0.04117
	E18	45	30	2	2.28E-04	-0.01890	0.99997	0.00032	0.01892	0.99990	0.00033	1.00020	0.01880	0.99980	0.00033	-0.01380	5.00E-05	0.97869	0.04040
	E19	55	10	1	-4.50E-04	-0.03196	0.99997	0.00438	0.03190	0.99970	0.00432	0.99954	0.03196	0.99970	0.00438	-0.01780	7.44E-05	0.88435	0.08970
	E20	55	10	1.5	-3.17E-04	-0.03370	0.99990	0.00152	0.03380	0.99996	0.00152	0.99968	0.03379	0.99970	0.00159	-0.02100	1.08E-04	0.93967	0.06865
	E21	55	10	2	-1.46E-04	-0.03590	0.99997	0.00037	0.03590	0.99998	0.00037	0.99985	0.03592	0.99980	0.00376	-0.02310	1.31E-04	0.94969	0.06388
	E22	55	20	1	4.56E-04	-0.02960	0.99999	0.00099	0.02966	0.99998	0.00099	1.00040	0.02963	0.99980	0.00100	-0.02058	1.07E-04	0.96917	0.05015
	E23	55	20	1.5	-2.89E-04	-0.03128	0.99998	0.00290	0.03129	0.99989	0.00287	0.99970	0.03128	0.99980	0.00290	-0.02000	9.84E-05	0.94717	0.06420
	E24	55	20	2	2.00E-04	-0.03329	0.99990	0.00039	0.03328	0.99980	0.00039	1.00020	0.03330	0.99958	0.00039	-0.02220	1.24E-04	0.96080	0.05664
	E25	55	30	1	7.98E-04	-0.02520	0.99999	0.00195	0.02521	0.99989	0.00192	1.00079	0.02523	0.99954	0.00199	-0.01840	8.88E-05	0.97932	0.04091
	E26	55	30	1.5	-6.36E-05	-0.02660	0.99999	0.00191	0.02664	0.99989	0.00187	0.99993	0.02663	0.99958	0.00191	-0.01900	9.33E-05	0.97470	0.04524
	E27	55	30	2	-2.30E-04	-0.02820	0.99999	0.00041	0.02825	0.99989	0.00041	0.99976	0.02824	0.99974	0.00041	-0.02041	1.08E-04	0.99750	0.04295

Tabela 9.19.1b – Jabuka (kocka, 13 mm)

Eksperiment		Režim			$MR = \exp(a + b \cdot \tau)$				$MR = \exp(-k\tau)$			$MR = a \cdot \exp(-k\tau)$				$MR = 1 + a \cdot \tau + b \cdot \tau^2$			
		T	RH	w	Sopstveni model				Newton			Henderson & Pabis				Wang & Singh			
		°C	%	m/s	a	b	r ²	RMSE	k	r ²	RMSE	a	k	r ²	RMSE	a	b	r ²	RMSE
13 mm	E1	35	10	1	2.17E-05	-0.00663	0.99999	0.00024	0.00663	0.99999	0.00024	1.00000	0.00663	0.99999	0.00024	-0.00448	5.04E-06	0.95782	0.05354
	E2	35	10	1.5	6.18E-05	-0.00706	0.99999	0.00026	0.00706	0.99998	0.00026	1.00006	0.00706	0.99999	0.00026	-0.00463	5.29E-06	0.94779	0.05920
	E3	35	10	2	-4.48E-04	-0.00751	0.99986	0.00294	0.00752	0.99994	0.00299	0.99955	0.00751	0.99986	0.00294	-0.00477	-5.56E-06	0.93661	0.06462
	E4	35	20	1	-5.35E-05	-0.00567	0.99998	0.00089	0.00567	0.99998	0.00089	0.99994	0.00567	0.99998	0.00089	-0.00411	4.40E-06	0.97530	0.04131
	E5	35	20	1.5	1.11E-04	-0.00600	0.99999	0.00079	0.00603	0.99998	0.00080	1.00011	0.00603	0.99998	0.00080	-0.00426	4.65E-06	0.96930	0.04598
	E6	35	20	2	-4.00E-04	-0.00642	0.99987	0.00295	0.00642	0.99980	0.00299	0.99959	0.00642	0.99981	0.00296	-0.00441	4.92E-06	0.96297	0.05023
	E7	35	30	1	2.00E-04	-0.00522	0.99998	0.00111	0.00522	0.99998	0.00111	1.00020	0.00522	0.99998	0.00111	-0.00391	4.06E-06	0.98157	0.03567
	E8	35	30	1.5	1.20E-04	-0.00557	0.99998	0.00092	0.00557	0.99997	0.00093	1.00012	0.00557	0.99998	0.00092	-0.00407	4.33E-06	0.97681	0.04004
	E9	35	30	2	-7.96E-05	-0.00592	0.99999	0.00028	0.00590	0.99998	0.00028	0.99992	0.00591	0.99998	0.00028	-0.00425	4.66E-06	0.97317	0.04303
	E10	45	10	1	-1.08E-03	-0.01021	0.99960	0.00489	0.0102	0.99955	0.00498	0.99891	0.0102	0.99950	0.00499	-0.00558	7.27E-06	0.85767	0.09200
	E11	45	10	1.5	-1.29E-03	-0.01072	0.99945	0.00572	0.01074	0.99943	0.00577	0.99871	0.01072	0.99945	0.00572	-0.00588	8.09E-06	0.85949	0.09158
	E12	45	10	2	-1.80E-03	-0.01126	0.99906	0.00744	0.01129	0.99900	0.00747	0.99819	0.01127	0.99901	0.00745	-0.00618	8.92E-06	0.85768	0.09206
	E13	45	20	1	-3.62E-04	-0.00906	0.99983	0.00333	0.00907	0.99983	0.00331	0.99964	0.00906	0.99980	0.00336	-0.00580	8.25E-06	0.94007	0.06332
	E14	45	20	1.5	-1.14E-03	-0.00951	0.99965	0.00480	0.00953	0.99963	0.00488	0.99886	0.00951	0.99956	0.00490	-0.00612	9.18E-06	0.94111	0.06271
	E15	45	20	2	-2.09E-03	-0.00999	0.99940	0.00582	0.01000	0.99929	0.00681	0.99790	0.00999	0.99930	0.00683	-0.00646	1.02E-05	0.94321	0.06156
	E16	45	30	1	8.95E-04	-0.00780	0.99998	0.00374	0.00779	0.99989	0.00274	1.00089	0.00780	0.99990	0.00279	-0.00566	8.37E-06	0.97591	0.04126
	E17	45	30	1.5	4.03E-04	-0.00819	0.99997	0.00130	0.00818	0.99997	0.00131	1.00040	0.00819	0.99997	0.00131	-0.00596	9.27E-06	0.97640	0.04082
	E18	45	30	2	-1.42E-04	-0.00861	0.99999	0.00027	0.00860	0.99998	0.00028	0.99986	0.00861	0.99999	0.00273	-0.00628	1.02E-05	0.97681	0.04049
	E19	55	10	1	-1.42E-04	-0.00861	0.99999	0.00027	0.0086	0.99998	0.00027	0.99986	0.00861	0.99998	0.00272	-0.00628	1.03E-05	0.97678	0.04051
	E20	55	10	1.5	-1.05E-03	-0.01535	0.99960	0.00531	0.01537	0.99953	0.00535	0.99894	0.01535	0.99954	0.00539	-0.00859	1.73E-05	0.87547	0.08828
	E21	55	10	2	-1.08E-03	-0.01629	0.99949	0.00565	0.01631	0.99948	0.00562	0.99892	0.01629	0.99949	0.00565	-0.00910	1.94E-05	0.87471	0.08871
	E22	55	20	1	-5.95E-04	-0.01347	0.99980	0.00364	0.01348	0.99978	0.00367	0.99940	0.01347	0.99980	0.00364	-0.00868	1.85E-05	0.94377	0.06236
	E23	55	20	1.5	-8.80E-04	-0.01423	0.99977	0.00395	0.01424	0.99970	0.00395	0.99912	0.01423	0.99971	0.00396	-0.00914	2.05E-05	0.94282	0.06291
	E24	55	20	2	-1.36E-03	-0.01507	0.99959	0.00660	0.01509	0.99936	0.00566	0.99864	0.01507	0.99935	0.00661	-0.00950	2.19E-05	0.93502	0.06654
	E25	55	30	1	4.00E-04	-0.01148	0.99995	0.00220	0.01147	0.99993	0.00221	1.00040	0.01148	0.99993	0.00222	-0.00836	1.82E-05	0.97697	0.04089
	E26	55	30	1.5	2.47E-04	-0.01212	0.99996	0.00149	0.01212	0.99996	0.00148	1.00024	0.01213	0.99996	0.00149	-0.00871	1.96E-05	0.97407	0.04340
	E27	55	30	2	6.85E-05	-0.01287	0.99999	0.00028	0.01287	0.99998	0.00029	1.00007	0.01287	0.99999	0.00028	-0.00923	2.20E-05	0.97424	0.04331

Tabela 9.19.2a – Krompir (list, 2 mm)

Eksperiment	Režim			$MR = \exp(a + b \cdot \tau)$				$MR = \exp(-k\tau)$			$MR = a \cdot \exp(-k\tau^n)$					$MR = 1 + a \cdot \tau + b \cdot \tau^2$				
	<i>T</i>	<i>RH</i>	<i>w</i>	Sopstveni model				Newton			Page					Wang & Singh				
	^o C	%	m/s	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i> ²	<i>RMSE</i>	<i>k</i>	<i>r</i> ²	<i>RMSE</i>	<i>a</i>	<i>k</i>	<i>n</i>	<i>r</i> ²	<i>RMSE</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i> ²	<i>RMSE</i>	
2 mm	E1	35	10	1	-7.73E-03	-0.01162	0.99764	0.01276	0.01170	0.99757	0.01283	1.01252	0.01471	0.95349	0.99800	0.01183	-0.00846	1.86E-05	0.97281	0.04334
	E2	35	10	1.5	-9.50E-03	-0.01230	0.99653	0.01557	0.01242	0.99579	0.01685	1.01699	0.01668	0.93925	0.99589	0.01679	-0.00899	2.09E-05	0.97142	0.04431
	E3	35	10	2	-1.38E-02	-0.01295	0.99371	0.02074	0.01313	0.99213	0.02279	1.02469	0.01994	0.91283	0.99234	0.02269	-0.00983	2.23E-05	0.96263	0.05011
	E4	35	20	1	2.86E-03	-0.01015	0.99915	0.00788	0.01012	0.99910	0.00798	0.99637	0.00933	1.01623	0.99911	0.00800	-0.00793	1.72E-05	0.98938	0.02768
	E5	35	20	1.5	-2.70E-03	-0.01070	0.99892	0.00883	0.01073	0.99886	0.00890	1.00437	0.01169	0.98283	0.99887	0.00894	-0.00840	1.93E-05	0.98728	0.03004
	E6	35	20	2	-7.11E-03	-0.01125	0.99767	0.01289	0.01134	0.99724	0.01372	1.01142	0.01409	0.95545	0.99731	0.01369	-0.00900	2.23E-05	0.98777	0.02922
	E7	35	30	1	4.24E-03	-0.00943	0.99922	0.00743	0.00939	0.99905	0.00803	0.99313	0.00808	1.02985	0.99908	0.00798	-0.00768	1.68E-05	0.99278	0.02237
	E8	35	30	1.5	1.23E-03	-0.00999	0.99982	0.00355	0.00998	0.99980	0.00360	0.99806	0.00957	1.00846	0.99980	0.00362	-0.00827	1.97E-05	0.99396	0.02036
	E9	35	30	2	3.30E-03	-0.01067	0.99897	0.00863	0.01063	0.99887	0.00884	0.99467	0.00950	1.02282	0.99889	0.00888	-0.00858	2.07E-05	0.99085	0.02551
	E10	45	10	1	-6.71E-03	-0.01623	0.99779	0.01274	0.01634	0.99742	0.01345	1.01074	0.01985	0.95731	0.99747	0.01347	-0.01190	3.68E-05	0.97609	0.04145
	E11	45	10	1.5	-7.95E-03	-0.01700	0.99660	0.01577	0.01715	0.99605	0.01660	1.01321	0.02166	0.94804	0.99612	0.01665	-0.01239	3.98E-05	0.97360	0.04344
	E12	45	10	2	-1.19E-02	-0.01772	0.99434	0.02019	0.01794	0.99314	0.02169	1.01880	0.02504	0.92505	0.99330	0.02170	-0.01290	4.30E-05	0.96795	0.04747
	E13	45	20	1	-1.60E-03	-0.01459	0.99903	0.00857	0.01462	0.99900	0.00845	1.00284	0.01541	0.98866	0.99900	0.00855	-0.01141	3.55E-05	0.98818	0.02951
	E14	45	20	1.5	-3.59E-03	-0.01527	0.99864	0.01014	0.01533	0.99853	0.01024	1.00497	0.01694	0.97804	0.99855	0.01032	-0.01206	3.97E-05	0.98884	0.02863
	E15	45	20	2	-6.72E-03	-0.01590	0.99681	0.01545	0.01602	0.99640	0.01594	1.01001	0.01944	0.95705	0.99646	0.01603	-0.01280	4.53E-05	0.99018	0.02671
	E16	45	30	1	1.54E-03	-0.01267	0.99966	0.00494	0.01264	0.99963	0.00499	0.99727	0.01195	1.01217	0.99963	0.00504	-0.01055	3.24E-05	0.99428	0.01998
	E17	45	30	1.5	1.34E-03	-0.01327	0.99988	0.00295	0.01325	0.99986	0.00301	0.99862	0.01280	1.00764	0.99987	0.00302	-0.01107	3.55E-05	0.99477	0.01917
	E18	45	30	2	1.46E-04	-0.01392	0.99999	0.00069	0.01392	0.99999	0.00068	1.00021	0.01393	0.99979	0.99999	0.00070	-0.01172	4.02E-05	0.99562	0.01751
	E19	55	10	1	-6.56E-03	-0.02311	0.99725	0.01436	0.02327	0.99720	0.01426	1.00942	0.02779	0.95735	0.99759	0.01369	-0.01673	7.23E-05	0.97353	0.04462
	E20	55	10	1.5	-6.80E-03	-0.02443	0.99705	0.01498	0.02460	0.99699	0.01485	1.00912	0.02937	0.95675	0.99740	0.01431	-0.01777	8.18E-05	0.97471	0.04388
	E21	55	10	2	-8.65E-03	-0.02576	0.99599	0.01783	0.02599	0.99524	0.01868	1.01222	0.03281	0.94327	0.99533	0.01886	-0.01901	9.42E-05	0.97544	0.04328
	E22	55	20	1	-1.81E-03	-0.02169	0.99903	0.00884	0.02173	0.99900	0.00865	1.00275	0.02293	0.98723	0.99900	0.00880	-0.01701	7.90E-04	0.98889	0.02945
	E23	55	20	1.5	-1.77E-03	-0.02295	0.99918	0.00819	0.02300	0.99916	0.00797	1.00167	0.02393	0.99027	0.99916	0.00811	-0.01786	8.65E-05	0.98836	0.03033
	E24	55	20	2	-7.53E-03	-0.02394	0.99612	0.01771	0.02414	0.99559	0.01810	1.00928	0.02927	0.95259	0.99566	0.01831	-0.01908	9.97E-05	0.98872	0.02956
	E25	55	30	1	1.02E-03	-0.01862	0.99979	0.00401	0.01860	0.99977	0.00402	0.99767	0.01780	1.01018	0.99977	0.00409	-0.01555	7.04E-05	0.99485	0.01951
	E26	55	30	1.5	1.63E-03	-0.01968	0.99980	0.00392	0.01964	0.99978	0.00394	0.99844	0.01888	1.00955	0.99978	0.00399	-0.01620	7.53E-05	0.99392	0.02145
	E27	55	30	2	2.83E-04	-0.02079	0.99999	0.00061	0.02079	0.99999	0.00061	1.00034	0.02081	0.99980	0.99999	0.00063	-0.01742	8.84E-05	0.99553	0.01836

Tabela 9.19.2b – Krompir (list, 3 mm)

Eksperiment	Režim			$MR = \exp(a + b \cdot \tau)$				$MR = \exp(-k\tau)$			$MR = a \cdot \exp(-k\tau^n)$					$MR = 1 + a \cdot \tau + b \cdot \tau^2$				
	<i>T</i>	<i>RH</i>	<i>w</i>	Sopstveni model				Newton			Page					Wang & Singh				
	°C	%	m/s	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i> ²	<i>RMSE</i>	<i>k</i>	<i>r</i> ²	<i>RMSE</i>	<i>a</i>	<i>k</i>	<i>n</i>	<i>r</i> ²	<i>RMSE</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i> ²	<i>RMSE</i>	
3 mm	E1	35	10	1	-2.54E-03	-0.00512	0.99918	0.00749	0.00513	0.99911	0.00771	1.00609	0.00573	0.98077	0.99912	0.00771	-0.00392	4.12E-06	0.98507	0.03183
	E2	35	10	1.5	-4.88E-03	-0.00541	0.99828	0.01077	0.00544	0.99808	0.01132	1.01075	0.00662	0.96589	0.99810	0.01128	-0.00408	4.42E-06	0.98092	0.03583
	E3	35	10	2	-1.10E-02	-0.00568	0.99481	0.01849	0.00575	0.99384	0.01996	1.02282	0.00860	0.92871	0.99398	0.01982	-0.00427	4.79E-06	0.97612	0.03949
	E4	35	20	1	2.38E-03	-0.00441	0.99919	0.00742	0.00440	0.99915	0.00756	0.99575	0.00401	1.01569	0.99916	0.00756	-0.00349	3.37E-06	0.99014	0.02590
	E5	35	20	1.5	-1.72E-03	-0.00466	0.99899	0.00829	0.00467	0.99895	0.00837	1.00475	0.00509	0.98524	0.99895	0.00839	-0.00368	3.72E-06	0.98828	0.02812
	E6	35	20	2	-7.23E-03	-0.00490	0.99766	0.01249	0.00493	0.99723	0.01347	1.01390	0.00646	0.95313	0.99730	0.01336	-0.00392	4.24E-05	0.98780	0.02840
	E7	35	30	1	4.02E-03	-0.00410	0.99928	0.00689	0.00408	0.99913	0.00753	0.99234	0.00343	1.02951	0.99916	0.00744	-0.00334	3.20E-06	0.99264	0.02199
	E8	35	30	1.5	1.06E-02	-0.00434	0.99982	0.00364	0.00434	0.99979	0.00360	0.99676	0.00407	1.01071	0.99980	0.00360	-0.00359	3.70E-06	0.99352	0.02054
	E9	35	30	2	3.67E-03	-0.00464	0.99896	0.00839	0.00463	0.99886	0.00874	0.99369	0.00402	1.02454	0.99888	0.00870	-0.00372	3.90E-06	0.99028	0.02561
	E10	45	10	1	-7.87E-03	-0.00706	0.99758	0.01275	0.00712	0.99715	0.01372	1.01438	0.00925	0.95169	0.99722	0.01362	-0.00517	6.95E-06	0.97411	0.04157
	E11	45	10	1.5	-9.35E-03	-0.00738	0.99644	0.01541	0.00746	0.99571	0.01674	1.01988	0.01047	0.93719	0.99580	0.01664	-0.00537	7.46E-06	0.97025	0.04432
	E12	45	10	2	-1.34E-02	-0.00770	0.99405	0.01974	0.00781	0.99263	0.02175	1.02699	0.01234	0.91430	0.99282	0.02158	-0.00561	8.14E-06	0.96550	0.04732
	E13	45	20	1	-8.34E-04	-0.00637	0.99911	0.00787	0.00637	0.99910	0.00782	1.00197	0.00661	0.99348	0.99910	0.00786	-0.00496	6.72E-06	0.98766	0.02917
	E14	45	20	1.5	-4.07E-03	-0.00663	0.99827	0.01089	0.00666	0.99811	0.01125	1.00854	0.00780	0.97109	0.99814	0.00113	-0.00524	7.53E-06	0.98809	0.02847
	E15	45	20	2	-6.87E-03	-0.00692	0.99669	0.01499	0.00697	0.99622	0.01582	1.01462	0.00908	0.95110	0.99629	0.01578	-0.00557	8.59E-06	0.98988	0.02608
	E16	45	30	1	3.13E-03	-0.00552	0.99954	0.00548	0.00550	0.99946	0.00589	0.99498	0.00489	1.02104	0.99948	0.00584	-0.00456	6.01E-06	0.99373	0.02029
	E17	45	30	1.5	4.95E-04	-0.00577	0.99988	0.00283	0.00576	0.99987	0.00287	0.99806	0.00557	1.00624	0.99987	0.00288	-0.00482	6.77E-06	0.99449	0.01892
	E18	45	30	2	1.87E-04	-0.00605	0.99999	0.00064	0.00606	0.99999	0.00064	1.00009	0.00604	1.00020	0.99999	0.00064	-0.00509	7.60E-06	0.99537	0.01732
	E19	55	10	1	-7.37E-03	-0.01005	0.99744	0.01330	0.01013	0.99699	0.01422	1.01428	0.01296	0.95129	0.99705	0.01417	-0.07320	1.38E-05	0.97292	0.04296
	E20	55	10	1.5	-8.90E-03	-0.01058	0.99678	0.01490	0.01068	0.99619	0.01598	1.01550	0.01407	0.94494	0.99628	0.01591	-0.00775	1.56E-05	0.97262	0.04318
	E21	55	10	2	-9.15E-03	-0.01123	0.99643	0.01572	0.01134	0.99577	0.01685	1.01636	0.01510	0.94205	0.99586	0.01680	-0.00824	1.76E-05	0.97301	0.04295
	E22	55	20	1	-1.21E-03	-0.00945	0.99908	0.00811	0.00946	0.99906	0.00804	1.00257	0.00992	0.99088	0.99907	0.00810	-0.00740	1.49E-05	0.98805	0.02905
	E23	55	20	1.5	-2.11E-03	-0.00996	0.99880	0.00928	0.00999	0.99876	0.00927	1.00382	0.01073	0.98569	0.99876	0.00933	-0.00783	1.67E-05	0.98865	0.02832
	E24	55	20	2	-7.04E-03	-0.01045	0.99674	0.01517	0.01053	0.99635	0.01578	0.01140	0.01307	0.95648	0.99641	0.01578	-0.00826	1.86E-05	0.98760	0.02936
	E25	55	30	1	2.02E-03	-0.00811	0.99968	0.00461	0.00809	0.99965	0.00479	0.99676	0.00753	0.01395	0.99965	0.00479	-0.00674	1.31E-05	0.99418	0.01973
	E26	55	30	1.5	1.35E-03	-0.00855	0.99985	0.00321	0.00854	0.99983	0.00329	0.99816	0.00818	1.00834	0.99983	0.00329	-0.00707	1.44E-05	0.99391	0.02031
	E27	55	30	2	4.19E-04	-0.00904	0.99999	0.00064	0.00904	0.99999	0.00065	0.99996	0.00899	1.00119	0.99999	0.00063	-0.00753	1.64E-05	0.99477	0.01882

Tabela 9.19.3a – Banana (cilindar, 6 mm)

Eksperiment		Režim			$MR = \exp(a + b \cdot \tau)$				$MR = \exp(-k\tau)$			$MR = a \cdot \exp(-k\tau^n)$					$MR = 1 + a \cdot \tau + b \cdot \tau^2$			
		<i>T</i>	<i>RH</i>	<i>w</i>	Sopstveni model				Newton			Page					Wang & Singh			
		^o C	%	m/s	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i> ²	<i>RMSE</i>	<i>k</i>	<i>r</i> ²	<i>RMSE</i>	<i>a</i>	<i>k</i>	<i>n</i>	<i>r</i> ²	<i>RMSE</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i> ²	<i>RMSE</i>
6 mm	E1	35	10	1	-8.64E-03	-0.00478	0.99767	0.01272	0.00482	0.99710	0.01396	1.01384	0.00650	0.94806	0.99720	0.01384	-0.00382	4.00E-06	0.98853	0.02803
	E2	35	10	1.5	-4.32E-02	-0.00540	0.97633	0.03834	0.00570	0.96350	0.04680	1.05835	0.01818	0.79220	0.96579	0.04569	-0.00442	5.27E-06	0.95591	0.05188
	E3	35	10	2	3.08E-04	-0.00729	0.99999	0.00058	0.00729	0.99995	0.00059	1.00007	0.00727	1.00064	0.99999	0.00059	-0.00596	1.01E-05	0.99343	0.02185
	E4	35	20	1	2.07E-02	-0.00446	0.98580	0.03229	0.00436	0.98270	0.03488	0.97638	0.00203	1.13409	0.98344	0.03448	-0.00356	3.59E-06	0.98556	0.03220
	E5	35	20	1.5	-2.02E-03	-0.00559	0.99473	0.19520	0.00561	0.99469	0.01917	1.00395	0.00610	0.98485	0.99469	0.01938	-0.00455	5.82E-06	0.98894	0.02798
	E6	35	20	2	-3.53E-02	-0.00558	0.96885	0.04517	0.00581	0.96032	0.04981	1.03885	0.01453	0.83269	0.96225	0.49140	-0.00497	7.18E-06	0.95731	0.05227
	E7	35	30	1	3.29E-02	-0.00431	0.98645	0.03153	0.00414	0.97622	0.04070	0.95521	0.00087	1.27528	0.97837	0.03937	-0.00319	2.55E-06	0.99048	0.02611
	E8	35	30	1.5	1.00E-02	-0.00537	0.99722	0.01422	0.00530	0.99625	0.01610	0.98476	0.00354	1.07302	0.99642	0.01591	-0.00432	5.29E-06	0.99296	0.02234
	E9	35	30	2	-8.96E-04	-0.00613	0.99878	0.00944	0.00613	0.99877	0.00922	1.00110	0.00631	0.99475	0.99877	0.00934	-0.00502	7.17E-06	0.99352	0.02145
	E10	45	10	1	-9.99E-03	-0.00654	0.99594	0.01698	0.00661	0.99495	0.01845	1.01617	0.00941	0.93446	0.99510	0.01841	-0.00550	8.62E-06	0.99402	0.02034
	E11	45	10	1.5	5.17E-04	-0.01005	0.99997	0.00160	0.01004	0.99996	0.00155	1.00113	0.01013	0.99824	0.99996	0.00158	-0.00811	1.84E-05	0.99272	0.02366
	E12	45	10	2	-1.81E-02	-0.00951	0.99431	0.02056	0.00970	0.99152	0.02428	1.02287	0.01633	0.89567	0.99195	0.02403	-0.00746	1.50E-05	0.97509	0.04231
	E13	45	20	1	6.73E-03	-0.00585	0.99695	0.01427	0.00580	0.99607	0.01558	0.98653	0.00401	1.07020	0.99618	0.01565	-0.00483	6.60E-06	0.99335	0.02066
	E14	45	20	1.5	-1.51E-03	-0.00770	0.99916	0.00792	0.00772	0.99914	0.00774	1.00203	0.00813	0.98980	0.99914	0.00786	-0.00638	1.16E-05	0.99400	0.02082
	E15	45	20	2	-1.38E-02	-0.00818	0.98845	0.02902	0.00831	0.98678	0.02995	1.01625	0.01249	0.92000	0.98709	0.03012	-0.00700	1.45E-05	0.98411	0.03342
	E16	45	30	1	-8.24E-05	-0.00530	0.99998	0.00072	0.00530	0.99998	0.00070	1.00001	0.00531	0.99960	0.99998	0.00074	-0.00496	8.52E-06	0.99957	0.00446
	E17	45	30	1.5	9.39E-03	-0.00739	0.99651	0.01627	0.00731	0.99551	0.01778	0.98567	0.00501	1.07306	0.99567	0.01777	-0.00597	1.01E-05	0.99243	0.02352
	E18	45	30	2	1.48E-03	-0.00849	0.99978	0.00406	0.00847	0.99976	0.00408	0.99826	0.00808	1.00944	0.99976	0.00413	-0.00705	1.44E-05	0.99472	0.01965
	E19	55	10	1	-5.21E-03	-0.01064	0.99754	0.01396	0.01070	0.99721	0.01428	1.00851	0.01291	0.96152	0.99725	0.01447	-0.00868	2.10E-05	0.99309	0.02293
	E20	55	10	1.5	-4.18E-03	-0.01336	0.99470	0.02125	0.01343	0.99445	0.02057	1.00643	0.01565	0.96674	0.99448	0.02108	-0.01034	2.89E-05	0.98592	0.03369
	E21	55	10	2	-1.91E-03	-0.01605	0.99833	0.01234	0.01609	0.99825	0.01185	1.00405	0.01758	0.98004	0.99825	0.01221	-0.01241	4.17E-05	0.98694	0.03342
	E22	55	20	1	2.10E-02	-0.00994	0.98865	0.03111	0.00971	0.98479	0.03424	0.97835	0.00477	1.14633	0.98559	0.03416	-0.00778	1.67E-05	0.98865	0.03031
	E23	55	20	1.5	3.39E-03	-0.01259	0.99879	0.10191	0.01255	0.99868	0.01007	0.99644	0.01133	1.02197	0.99870	0.01027	-0.01017	2.92E-05	0.99363	0.02277
	E24	55	20	2	5.36E-04	-0.01376	0.99999	0.00077	0.01376	0.99999	0.00078	1.00050	0.01376	1.00011	0.99999	0.00081	-0.01167	4.02E-05	0.99647	0.01675
	E25	55	30	1	-3.62E-04	-0.00852	0.99998	0.00082	0.00853	0.99998	0.00082	1.00024	0.00862	0.99751	0.99998	0.00083	-0.00790	2.10E-05	0.99934	0.00603
	E26	55	30	1.5	9.16E-03	-0.01187	0.99743	0.01484	0.01175	0.99657	0.01615	0.99019	0.00873	1.06354	0.99673	0.01624	-0.00952	2.56E-05	0.99320	0.02342
	E27	55	30	2	-9.78E-04	-0.01360	0.99999	0.00077	0.01362	0.99999	0.00083	0.99996	0.01381	0.99674	0.99999	0.00067	-0.01159	3.97E-05	0.99632	0.01703

Tabela 9.19.3b – Banana (cilindar, 7 mm)

Eksperiment	Režim			$MR = \exp(a + b \cdot \tau)$				$MR = \exp(-k\tau)$			$MR = a \cdot \exp(-k\tau^n)$					$MR = 1 + a \cdot \tau + b \cdot \tau^2$				
	<i>T</i>	<i>RH</i>	<i>w</i>	Sopstveni model				Newton			Page					Wang & Singh				
	°C	%	m/s	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i> ²	<i>RMSE</i>	<i>k</i>	<i>r</i> ²	<i>RMSE</i>	<i>a</i>	<i>k</i>	<i>n</i>	<i>r</i> ²	<i>RMSE</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i> ²	<i>RMSE</i>	
7 mm	E1	35	10	1	2.26E-02	-0.00341	0.99679	0.01465	0.00333	0.99527	0.01759	1.06866	0.00574	0.91843	0.99586	0.01655	-0.00261	1.85E-06	0.98971	0.02610
	E2	35	10	1.5	2.82E-02	-0.00424	0.98693	0.02984	0.00411	0.98361	0.03291	1.10770	0.00975	0.86375	0.98454	0.03221	-0.00312	2.56E-05	0.98368	0.03309
	E3	35	10	2	4.71E-02	-0.00518	0.99732	0.01388	0.00493	0.99435	0.01976	1.07529	0.00694	0.95078	0.99702	0.01449	-0.00381	3.91E-06	0.99042	0.02599
	E4	35	20	1	5.40E-02	-0.00321	0.98694	0.03058	0.00302	0.97982	0.03743	0.99440	0.00122	1.15389	0.98439	0.03316	-0.00243	1.64E-06	0.98735	0.02986
	E5	35	20	1.5	4.28E-02	-0.00407	0.99847	0.01043	0.00388	0.99606	0.01646	1.03897	0.00383	1.00961	0.99845	0.01038	-0.00312	2.72E-06	0.99563	0.01747
	E6	35	20	2	4.10E-02	-0.00442	0.99914	0.00775	0.00422	0.99668	0.01500	1.05838	0.00537	0.96758	0.99900	0.00825	-0.00340	3.21E-06	0.99433	0.01979
	E7	35	30	1	3.80E-02	-0.00285	0.99191	0.02129	0.00270	0.98830	0.02533	0.99995	0.00141	1.11461	0.99339	0.01944	-0.00223	1.34E-06	0.99387	0.01853
	E8	35	30	1.5	4.80E-02	-0.00385	0.99742	0.01341	0.00365	0.99314	0.02148	1.01556	0.00241	1.07679	0.99673	0.01497	-0.00295	2.46E-06	0.99526	0.01801
	E9	35	30	2	4.53E-02	-0.00443	0.99922	0.00739	0.00421	0.99640	0.01562	1.04411	0.00431	1.00448	0.99922	0.00734	-0.00343	3.34E-06	0.99614	0.01634
	E10	45	10	1	3.76E-02	-0.00472	0.99963	0.01602	0.00453	0.99625	0.01602	1.08180	0.00753	0.92229	0.99543	0.01753	-0.00375	4.00E-06	0.99676	0.01475
	E11	45	10	1.5	6.09E-02	-0.00605	0.99999	0.00066	0.00566	0.99504	0.01853	1.06293	0.00606	0.99966	0.99999	0.00067	-0.00461	6.00E-06	0.99628	0.01626
	E12	45	10	2	6.55E-02	-0.00713	0.99712	0.01467	0.00664	0.99181	0.02408	1.10039	0.00975	0.94439	0.99675	0.01535	-0.00517	7.22E-06	0.99193	0.02423
	E13	45	20	1	4.98E-02	-0.00420	0.99707	0.01376	0.00394	0.99092	0.02358	1.01585	0.00245	1.09224	0.99611	0.01564	-0.00324	2.88E-06	0.99594	0.01598
	E14	45	20	1.5	5.93E-02	-0.00562	0.99850	0.01045	0.00527	0.99385	0.02073	1.05237	0.00509	1.01689	0.99847	0.01045	-0.00427	5.12E-06	0.99621	0.01645
	E15	45	20	2	6.15E-02	-0.00615	0.99999	0.00074	0.00573	0.99411	0.01974	1.06327	0.00614	1.00040	0.99999	0.00075	-0.00480	6.70E-06	0.99725	0.01369
	E16	45	30	1	6.25E-02	-0.00411	0.98801	0.02803	0.00380	0.97535	0.03917	0.98882	0.00112	1.22041	0.98338	0.03257	-0.00296	2.13E-06	0.99142	0.02340
	E17	45	30	1.5	6.24E-02	-0.00531	0.99732	0.01371	0.00494	0.99068	0.02528	1.02694	0.00328	1.08261	0.99663	0.01539	-0.00398	4.42E-06	0.99530	0.01818
	E18	45	30	2	6.33E-02	-0.00613	0.99965	0.00505	0.00572	0.99435	0.01991	1.05517	0.00548	1.01954	0.99960	0.00530	-0.00461	5.96E-06	0.99586	0.01725
	E19	55	10	1	6.69E-02	-0.00760	0.99677	0.01539	0.00708	0.99095	0.02508	1.11758	0.01173	0.92262	0.99603	0.01684	-0.00572	9.09E-06	0.99517	0.01856
	E20	55	10	1.5	9.29E-02	-0.00965	0.99614	0.01743	0.00872	0.98571	0.03223	1.11999	0.01176	0.96292	0.99599	0.01740	-0.00685	1.27E-05	0.99224	0.02421
	E21	55	10	2	1.10E-01	-0.01150	0.99773	0.01365	0.01023	0.98430	0.03435	1.14909	0.01488	0.95590	0.99748	0.01407	-0.00804	1.74E-05	0.99157	0.02573
	E22	55	20	1	9.07E-02	-0.00710	0.98775	0.03093	0.00640	0.97282	0.04446	1.02287	0.00285	1.16561	0.98509	0.03351	-0.00508	6.99E-06	0.98694	0.03136
	E23	55	20	1.5	9.42E-02	-0.00905	0.99862	0.01044	0.00818	0.98755	0.03026	1.08499	0.00793	1.02457	0.99856	0.01048	-0.00659	1.21E-05	0.99478	0.01995
	E24	55	20	2	9.95E-02	-0.00989	0.99999	0.00061	0.00883	0.98572	0.03165	1.10343	0.00978	1.00213	0.99999	0.00060	-0.00731	1.53E-05	0.99389	0.02121
	E25	55	30	1	8.67E-02	-0.00662	0.98831	0.02885	0.00593	0.96923	0.04496	1.00512	0.00188	1.23157	0.98354	0.03351	-0.00453	4.65E-06	0.99134	0.02430
	E26	55	30	1.5	9.47E-02	-0.00853	0.99745	0.01415	0.00767	0.98390	0.03413	1.05480	0.00527	1.08975	0.99662	0.01594	-0.00610	1.01E-05	0.99418	0.02094
	E27	55	30	2	9.77E-02	-0.00979	0.99999	0.00071	0.00875	0.98605	0.03118	1.10154	0.00969	1.00194	0.99999	0.00070	-0.00726	1.54E-05	0.99406	0.02083

10. BIOGRAFIJA

Ime i prezime: Ivan Zlatanović
Datum rođenja: 6. 7. 1977.
Mesto rođenja: Prokuplje, Srbija

Školovanje:

1984. – 1992. Osnovna škola „Milić Rakić Mirko“ u Prokuplju
1992. – 1996. Gimnazija u Prokuplju (prirodno-matematički smer)
1996. – 2003. Osnovne studije na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu
Odsek za vazduhoplovno mašinstvo
5. 9. 2003. Odbranjen diplomski rad na Mašinskom fakultetu u Beogradu
Odsek za vazduhoplovno mašinstvo
2005. – 2013. Doktorske studije na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu

Kretanje u poslu:

2003. – 2008. Asistent pripravnik na Katedri za tehničke nauke na Institutu za poljoprivrednu tehniku, Poljoprivrednog fakulteta Univerziteta u Beogradu
2008. - Asistent na Katedri za tehničke nauke na Institutu za poljoprivrednu tehniku, Poljoprivrednog fakulteta Univerziteta u Beogradu

Prilog 11.1

Izjava o autorstvu

Potpisani-a Zlatanobert Uban
broj indeksa D-46/04

Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

ТЕРМОМЕХАНИЧКИ ПРОЦЕСИ ПРИ СУШЕЊУ ПРЕХРАМБЕНИХ
МАТЕРИЈАЛА У СИСТЕМИМА СА РЕЦИРКУЛАЦИЈОМ ВАЗЛУХА

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predložena disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova,
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio/la autorska prava i koristio intelektualnu svojinu drugih lica.

Potpis doktoranda

U Beogradu, 10.12.2012.

Zlatanobert Uban

Prilog 11.2

Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora Златановић Урош
Broj indeksa D-46/04
Studijski program ТЕРМОМЕХАНИКА
Naslov rada ТЕРМОМЕХАНИЧКИ ПРОЦЕСИ ПРИ СУЩЕЊУ ПРЕХРАМБЕНИХ МАТЕРИЈАЛА У СИСТЕМИМА СА РЕЦИРКУЛАЦИЈОМ ВАЗДУХА
Mentor проф. др Мирко Комаћина

Potpisani/a Златановић Урош

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao/la za objavljivanje na portalu **Digitalnog repozitorijuma Univerziteta u Beogradu**.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

Potpis doktoranda

U Beogradu, 10.12.2012.

Златановић Урош

Prilog 11.3

Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

Термомеханички процеси при сушењу преградбених
материјала у системима са рециркулацијом ваздуха

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim priložima predao/la sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

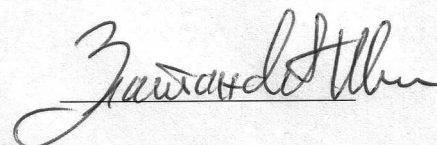
Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio/la.

1. Autorstvo
2. Autorstvo - nekomercijalno
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima
5. Autorstvo – bez prerade
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci, kratak opis licenci dat je na poledini lista).

Potpis doktoranda

U Beogradu, 10.12.2012.



1. **Autorstvo** - Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.

2. **Autorstvo – nekomercijalno**. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.

3. **Autorstvo - nekomercijalno – bez prerade**. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.

4. **Autorstvo - nekomercijalno – deliti pod istim uslovima**. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.

5. **Autorstvo – bez prerade**. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.

6. **Autorstvo - deliti pod istim uslovima**. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.