



**UNIVERZITET U NOVOM SADU
POLJOPRIVREDNI FAKULTET**

**KINETIKA KOMBINOVANOG SUŠENJA
DUNJE (*Cydonia oblonga* Mill.)
DOKTORSKA DISERTACIJA**

**Mentor:
Prof. dr Mirko Babić**

**Kandidat:
Mr Čedomir Stojanović**

Novi Sad, 2014

**UNIVERZITET U NOVOM SADU
POLJOPRIVREDNI FAKULTET**

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:
RBR

Identifikacioni broj:
IBR

Tip dokumentacije: Monografska dokumentacija
TD

Tip zapisa: Tekstualni štampani materijal
TZ

Vrsta rada (dipl., mag., dokt.): Doktorska disertacija
VR

Ime i prezime autora: Mr Čedomir Stojanović
AU

Mentor (titula, ime, prezime, zvanje): Dr Mirko Babić, redovni profesor
MN

Naslov rada: Kinetika kombinovanog sušenja
NR
dunje (Cydonia oblonga Mill.)

Jezik publikacije: Srpski
JP

Jezik izvoda: Srpski / engleski
JI

Zemlja publikovanja: Republika Srbija
ZP

Uže geografsko područje: AP Vojvodina
UGP

Godina: 2014
GO

Izdavač: Autorski reprint
IZ

Mesto i adresa: Novi Sad, Departman za poljoprivrednu tehniku,
MA Poljoprivredni fakultet, Trg Dositeja Obradovića 8

Fizički opis rada: 9 poglavlja / 144 strana / 23 tabele / 41 slike/ 114
FO navoda literature/ 2 priloga/ biografija

Naučna oblast: Biotehničke nauke
NO

Naučna disciplina: Poljoprivredna tehnika
ND

Predmetna odrednica, ključne reči: Kombinovano sušenje, kinetika sušenja, dunja,
PO osmotsko sušenje, konvektivno sušenje, matematičko modelovanje

UDK 631.563:581.823:641.13

Čuva se: Biblioteka Poljoprivrednog fakulteta, Novi Sad
ČU

Važna napomena: Rezultati su deo Projekta Ministarstva za prosvetu
VN i nauku Republike Srbije, broj TR – 03158, pod nazivom “Sušenje voća i povrća iz integralne i organske proizvodnje kombinovanom tehnologijom”

Izvod:
IZ

Sušenje dunje kao voćne vrste u praksi nije uobičajeno, zbog povišene vrijednosti tvrdoće i čvrstoće. Prethodna istraživanja sušenja dunje, pokazala su da se osmotskim sušenjem u okviru kombinovane tehnologije sušenja dobijaju povoljnije mehaničke osobine sušenih proizvoda. Na osnovu plana obavljani su eksperimenti osmotskog i konvektivnog sušenja dunje u obliku četvrtina. Eksperiment osmotskog sušenja je obavljen kao trofaktorni, gdje su uticajni faktori: temperatura rastvora, koncentracija rastvora i vrijeme trajanja sušenja. Takođe, eksperiment konvektivnog sušenja je obavljen kao trofaktorni, a uticajni faktori su: primjenjeni predtretman, temperature vazduha za sušenje i brzina strujanja vazduha ispred sloja.

Na osnovu rezultata mjerenja eksperimenta osmotskog sušenja, zaključeno je da sa porastom temperature i koncentracije rastvora postiže se veća brzina sušenja, što se i očekivalo. Disperzionom analizom osmotskog sušenja je ispitan uticaj faktora na brzinu sušenja i zapreminsko skupljanje četvrtina dunje. Sa statističkom vjerovatnoćom od 99%

je dokazano da postoji uticaj svih faktora na brzinu sušenja uzoraka. Dokazano je sa statističkom vjerovatnoćom od 99% da vrijeme trajanja osmotskog sušenja ima uticaj na zapreminsko skupljanje četvrtina dunje, dok uticajni faktori temperatura i koncentracija rastvora imaju uticaj sa statističkom vjerovatnoćom od 95%.

Analizom rezultata mjerenja veličina tokom eksperimenta konvektivnog sušenja evidentno je da se sa višom temperaturom vazduha postiže brže sniženje vlažnosti četvrtina dunje. Povećanjem vremena trajanja osmotskog predtretmana, smanjuje se brzina konvektivnog sušenja. Utvrđeno je da korišćenje osmotskog predtretmana sa višom temperaturom rastvora i većom koncentracijom rastvora dovodi do smanjenja brzine konvektivnog sušenja. Na osnovu disperzione analize konvektivnog sušenja sa statističkom vjerovatnoćom od 99% dokazano je da postoje uticaji predtretmana i temperature vazduha na brzinu sušenja i zapreminsko skupljanje četvrtina dunje. Uticaj faktora brzine vazduha ispred sloja materijala nije dokazan disperzionom analizom, ali je na osnovu kinetički krivih evidentan uticaj ovog faktora na brzinu sušenja, pri višim vlažnostima materijala i višoj temperaturi konvektivnog sušenja. Najvjerovatniji razlog ovakvih rezultata disperzione analize su male vrijednosti brzine vazduha za sušenje, odnosno njihova mala razlika vrijednosti (0,5 m/s).

Kinetika prenosa mase tokom kombinovane tehnologije sušenja dunje u formi četvrtine je matematički opisana, modelovanjem kinetike osmotskog sušenja i kinetike konvektivnog sušenja. U okviru kinetike osmotskog sušenja četvrtina dunje, obavljeno je matematičko modelovanje promjene vlažnosti u odnosu na suhu bazu i modelovanja zapreminskog skupljanja. Za kinetiku konvektivnog sušenja četvrtina dunje, obavljeno je matematičko modelovanje promjene vlažnosti u odnosu na suhu bazu tokom vremena konvektivnog sušenja. Za svaku veličinu koja se modeluje usvojeno po tri matematička modela, a modeli su prošireni uticajnim faktorima u bezdimenzionom obliku. Izvedeni modeli su imali dobro slaganje sa eksperimentalnim rezultatima, što pokazuju visoke vrijednosti koeficijente korelacije. Primjena svih modela je jednostavna, gdje je uz pomoć standardnih računara moguće brzo izračunavanje svih modelovanih veličina.

Primjenom osmotskog predtretmana u kombinovanoj tehnologiji sušenja dunje, dobijaju se neke pozitivne osobine sušenog proizvoda. Smanjenje zapremine je manje izraženo, nego primjenom samo konvektivnog sušenja. Vlažnost u voćnom tkivu je ravnomjernije raspoređena i manje je presušivanje spoljnjih slojeva voćnog tkiva. Stvaraju se manji unutrašnji naponi između slojeva tkiva, uslijed čega nastaju manje deformacije oblika. U površinskom sloju voćnog tkiva postoje adsorpcione veze vlage, rastvorka i suve materije, a ove veze utiču na povećanje vrijednosti vlažnosti pri kojima se osušeni proizvod bezbjedno skladišti.

Datum prihvatanja teme od strane 09. 03. 2010.

NN veća:

DP

Datum odbrane:

DO

Članovi komisije:
(ime i prezime / titula / zvanje /
naziv organizacije / status)

KO

Dr Mirko Babić, redovni profesor
uža NO Poljoprivredna tehnika,
Poljoprivredni fakultet, Novi Sad, - mentor

Dr Ljiljana Babić, redovni profesor,
uža NO Poljoprivredna tehnika,
Poljoprivredni fakultet, Novi Sad, - član

Dr Milovan Veličković, redovan profesor,
uža NO Opšte voćarstvo,
Poljoprivredni fakultet, Beograd - član

**UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF AGRICULTURE**

KEY WORD DOCUMENTATION

Accession number:
ANO

Identification number:
INO

Document type: Monograph documentation
DT

Type of record: Textual printed material
TR

Contents code: PhD thesis
CC

Author: Čedomir Stojanović, MSc
AU

Mentor: Mirko Babić, PhD, Full Professor
MN

Title: Kinetics of combined drying
quince (*Cydonia oblonga* Mill.)
TI

Language of text: Serbian
LT

Language of abstract: Serbian/English
LA

Country of publication: Republic of Serbia
CP

Locality of publication: Vojvodina
LP

Publication year: 2014
PY

Publisher: Author's reprint
PU

Publication place:
PP Novi Sad, Department of Agrochemical Engineering,
Faculty of Agriculture, Trg Dositeja Obradovića 8

Physical description:
PD 9 chapters / 144 pages / 23 tables / 41 figures
1114 references / 2 enclosures / bibliography

Scientific field
SF Biotechnical Sciences

Scientific discipline
SD Agrochemical Engineering

Subject, Key words
SKW Combined drying, drying kinetics, quince, osmotic
drying, convective drying, mathematical modelling

UC 631.563:581.823:641.13

Holding data:
HD Library of the Faculty of Agriculture,
University of Novi Sad

Note:
N The results are part of the Scientific project of Ministry
Education and Science Republic of Serbia, Grant no TR
- 03158, under the name "Drying of fruits and
vegetables from integrated and organic production with
combined technology"

Abstract:

AB

Abstract

Drying of the quince as a fruit species is not common in practice due to its increased hardness and firmness. Previous researches on quince drying have indicated that osmotic drying, within the combined drying technology, enables favourable mechanical properties of dried products. Planned experiments of the osmotic and convective drying of quince quarters were conducted. The osmotic drying experiment was based on three significant experimental factors: the temperature of osmotic solution, the concentration of osmotic solution, and the duration of osmotic drying. The convective drying experiment was also based on three experimental factors entailing the applied pretreatment, the temperature of drying air and the velocity of drying air in front of material layers.

The measurement results obtained during the osmotic drying experiment indicate that an increase in the temperature and the concentration of osmotic solution accelerates the drying process, as expected. A dispersion analysis of the osmotic drying indicated the effects of experimental factors on the drying speed and the volume shrinkage of quince quarters. With a statistical probability of 99%, it was proven that all factors influence the speed of drying. Moreover, with a statistical probability of 99%, it was proven that the duration of osmotic drying influences the volume shrinkage of quince quarters, whereas the significant factors such as the temperature and the concentration of osmotic solution exert influence with a statistical probability of 95%.

The analysis of measurement results obtained during the convective drying experiment shows that an increase in the air temperature accelerates a decrease in the moisture content of quince quarters. An increase in the duration of osmotic pretreatment decelerates the convective drying process. It was determined that the application of the osmotic pretreatment with higher solution temperature and concentration decelerates the convective drying. On the basis of a dispersion analysis of the convective drying with a statistical probability of 99%, it was proven that the pretreatment and the air temperature affect the speed of drying and the volume shrinkage of quince quarters. The effects of the air velocity in front of the material layer was not determined by means of the dispersion analysis, nevertheless kinetic curves indicate the influence of this factor on the drying speed, especially in the instance of higher moisture content of the material and higher temperature of the convective drying. The most probable causes of such dispersion analysis results are low values of the drying air velocity, i.e. a slight difference in the values (0.5 m/s).

The kinetics of mass transfer during the combined drying of quince quarters was mathematically described by means of the modelling of the kinetics of osmotic drying and the kinetics of convective drying. The kinetics of osmotic drying of quince quarters was expressed via the mathematical modelling of moisture content change in relation to dry basis and the modelling of volume shrinkage. The kinetics of convective drying of quince quarters was expressed via the mathematical modelling of moisture content change in relation to dry basis during the convective drying. Three mathematical models were established for every modelled value, and the models were extended by significant non-dimensional experimental factors. The developed models had a good fit with the experimental results, which was indicated by the high values of the correlation coefficient. The application of all models is simple and standard personal computers can be used for rapid calculations of modelled values.

The application of the osmotic pretreatment in the combined quince drying enables favourable properties of dried products. Volume shrinkage is slighter in comparison with the convective quince drying. The moisture content in the fruit tissue is more evenly distributed and the dehydration of the outer layers of the fruit tissue is lower. The tension between the layers of the tissue is reduced thus reducing the shape defects. Within the surface layers of fruit tissues, the adsorption bonds of moisture, solute and dry matter are formed. These bonds increase the moisture content value, which enables the safe storage of dry products.

Accepted on Scientific Board on: 09. 03. 2010.

AS

Defended:

DE

Thesis Defend Board:

DB

Mirko Babić, PhD, Full Professor,
major in Agricultural Engineering,
Faculty of Agriculture, Novi Sad, - mentor

Ljiljana Babić, PhD, Full Professor,
major in Agricultural Engineering,
Faculty of Agriculture, Novi Sad, - member

Milovan Veličković, PhD, Full Professor,
major in Fruitgrowing,
Faculty of agriculture, Beograd - member

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. CILJ RADA.....	3
3. PREGLED LITERATURE.....	4
3.1 Biljna ćelija i tkivo.....	4
3.2. Način vezivanja vlage sa suvom matrijom.....	6
3.3. Energija veze vlage i suve materije.....	7
3.4. Proizvodnja dunje.....	8
3.4.1. Privredni značaj dunje.....	10
3.4.2. Hemijski sastav dunje.....	10
3.5. Fizičke i termofizičke osobine voća.....	11
3.6. Ravnotežna vlažnost.....	14
3.7. Osnove sušenja poljoprivrednog materijala.....	15
3.8. Osmotsko sušenje.....	18
3.9. Konvektivno sušenje.....	23
3.10. Matematičko modelovanje kinetike sušenja.....	25
4. RADNA HIPOTEZA.....	30
5. MATERIJAL I METOD ISTRAŽIVANJA.....	31
5.1. Materijal istraživanja.....	31
5.2. Metod istraživanja.....	32
5.2.1. Izbor uticajnih faktora za eksperiment osmotskog sušenja.....	32
5.2.2. Izbor uticajnih faktora za eksperiment konvektivnog sušenja.....	34
5.2.3. Priprema biomaterijala (dunje) za osmotsko sušenje.....	36
5.2.4. Priprema osmotske sušare i osmotskog rastvora.....	39
5.2.5. Priprema biomaterijala za konvektivno sušenje.....	42
5.2.6. Priprema konvektivne sušare za sušenje.....	42
5.2.7. Metod mjerenja mjerodavnih veličina i tačnost mjerenja.....	46
5.2.8. Postupak obrade podataka.....	55
6. REZULTATI ISTRAŽIVANJA.....	60
6.1. Rezultati mjerenja osnovnih fizičkih osobina.....	60
6.2. Rezultati mjerenja tokom osmotskog sušenja četvrtina dunje.....	61

6.3. Rezultati mjerenja tokom konvektivnog sušenja četvrtina dunje.....	70
6.4. Matematičko model. kombinovane tehnologije sušenja četvrtina dunje.....	83
6.4.1. Matematičko modelovanje osmotskog sušenja četvrtina dunje.....	84
6.4.2. Matematičko modelovanje konvektivnog sušenja četvrtina dunje.....	87
7. DISKUSIJA ISTRAŽIVANJA.....	91
7.1. Osmotsko sušenje dunje u obliku četvrtina.....	91
7.2. Konvektivno sušenje četvrtina dunje.....	95
7.3. Matematičko model. kombinovane tehnologije sušenja četvrtina dunje.....	99
8. ZAKLJUČAK.....	105
9. LITERATURA.....	107
SPISAK SLIKA.....	117
SPISAK TABELA.....	120
PRILOZI.....	122
BIOGRAFIJA.....	145

UPOTREBLJENI SIMBOLI I INDEKSI

Simboli:

Oznaka	Jedinica	Naziv
A	-	Koeficijent koji zavisi od uslova vođenja eksperimenta
a	mm	Najveća dimenzije četvrtine dunje
A_{ks}	m^2	Površina kanala konvektivne sušare ispred sloja materijala
A_{pl}, B_{pl}, C_{pl}	mm	Karakteristične dimenzije plodova voća
a_t	m^2/s	Koeficijent temperaturne provodnosti
a_w, a_s	-	Koeficijent difuzije molekula vode i ratvorka
C	$\%, \text{ }^\circ Bx$	Koncentracija osmotskog rastvora
c_p	kJ/kgK	Srednja izobarska specifična toplota materijala
c_0	kg_s/kg_w	Koeficijent rastvorljivosti na liniji zasićenja pri zadatoj temperaturi
C_s	$\%, \text{ }^\circ Bx$	Koncentracija iskorišćenog osmotskog rastvora
c_s	kg_s/kg_w	Koeficijent rastvorljivosti iskorišćenog rastvora
c_{sm}	kJ/kgK	Srednja specifična toplota suve materije
c_w	kJ/kgK	Srednja specifična toplota vlage
d_c	mm	Prečnik cijevi kod eksperimentalne konvektivne sušare
D_{eff}	m^2/s	Efektivni koeficijent difuzije
D_{ew}	m^2/s	Koeficijent difuzije vode
D_{es}	m^2/s	Koeficijent difuzije rastvorka
E	J/mol	Energija veze vlage
F	m^2	Površina
F_{ks}	m^2	Površina svijetlog otvora ispred sloja materijala u konvektivnoj sušari
F_o	-	Fourier-ov broj
K_s, K_w	-	Konstante funkcije koje reflektuju vrijednost inteziteta prenosa mase
K_{SG}	-	Konstanta brzine povećanja suve materije
K_{WL}	-	Konstanta brzine gubitka vode
l	m, mm	Polovina debljine beskrajne ploče
M, m	kg, g	Masa
MBE	-	Srednja greška pristrasnosti
MR	-	Bezdimenziona vlažnost konvektivnog sušenja
M_r	kg_w	Difundovana voda
m_w	kg_w/m^2s	Materijalni fluks molekula vode
n_1, n_2, n_3	-	EkspONENTI funkcije
p	Pa	Pritisak vlažnog vazduha
p_d	Pa	Dinamički pritisak vazduha
p_m	Pa	Parcijalni pritisak vodene pare na površini vlažnog materijala
p_{ps}	Pa	Parcijalni pritisak vodene pare u vlažnom vazduhu
p_z	Pa	Parcijalni pritisak zasićene vodene pare nad slobodnom površinom vode

q_n	-	Numerička konstanta (Van't Hoff-ov koeficijent)
R	$8,314 \text{ J/molK}$	Univerzalna gasna konstanta
r_m	kJ/kg	Toplota isparavanja vode iz biljnog tkiva
$RMSE$	-	Srednja greška kvadrata
r_w	kJ/kg	Toplota isparavanja vode sa slobodne površine
S	-	Koeficijent skupljanja
s	kg_{sm}/kg	Sadržaj suve materije
SG	kg_{sm}/kg	Povećanje suve materije u odnosu na početnu masu
S_r	kg_{sm}	Difundovan rastvorak
SV	-	Zapreminsko skupljanje
S_x	-	Standardna devijacija
T	K	Temperatura
t	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura
V	m^3	Zapremina
v	m/s	Brzina strujanja vazduha za konvektivno sušenje
W	kg	Masa vlage u materijalu
WL	kg_w/kg	Gubitak vode
WR	$\%$	Redukcija mase
x, y, z	-	Kordinate
$Y_{ec}, Y_{eMW},$	-	EkspONENTI funkcija
K_t, K_d, K_{MW}	-	EkspONENTI funkcija
$y_{eC}, y_{eT}, k_v,$	-	EkspONENTI funkcija
k_d, k_{MW}	-	Koeficijenti funkcija
Y_{eo}, K_o	-	Koeficijenti funkcija
y_{eo}, k_o	-	Koeficijenti funkcija
$\bar{N}_{\omega o}^s$	$\text{kg}_w/\text{kg}_{sm}\text{min}$	Srednja brzina osmotskog sušenja
$\bar{N}_{\omega k}^s$	$\text{kg}_w/\text{kg}_{sm}h$	Srednja brzina konvektivnog sušenja
\bar{X}	-	Srednja vrijednost (aritmetička sredina
∇_C	-	Skalarna veličina gradijenta koncentracije
∇_p	-	Skalarna veličina gradijenta ukupnog pritiska
∇_t	-	Skalarna veličina gradijenta temperature

Grčki simboli:

Oznaka	Jedinica	Naziv
α	-	Odnos brzine vazduha u mernoj tački i srednje brzine vazduha u usisnom kanalu konvektivne sušare
β_w	$\text{kg}_w/(\text{m}^2 \text{ s Pa})$	Koeficijent prelaza vlage
δ	$\text{kg}_w/\text{kg}_{sm}\text{K}$	Termogradijentni koeficijent materijala
ε	$\%, -$	Poroznost
φ	$\%$	Relativna vlažnost vazduha
λ	W/mK	Koeficijent toplotne provodljivosti
λ_w	$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$	Koeficijent provođenja vlage u vlažnom biomaterijalu
ρ	kg/m^3	Gustina
σ	Kg/cm^2	Čvrstoća

τ	h, min, s	Vrijeme
ω	kg_w/kg	Vlažnost u odnosu na vlažnu osnovu
ω_r	%	Ravnotežna vlažnost materijala
ω^s	kg_w/kg_{sm}	Vlažnost u odnosu na suhu osnovu
$\nabla\omega$	-	Skalarna veličina gradijenta vlažnosti
ψ	Pa	Potencijal vode u biljnom tkivu
χ^2	-	Hi - kvadrat
∇^2	m^{-2}	Laplace-ov operator

Indeksi:

i	Stanje u i - tom vremenskom trenutku
k	Konvektivno sušenje
m	Materijal
o	Osmotsko sušenje
p	Posudica
pl	Plod
pre	Proračunska vrijednost
r	Rastvor
s	Rastvorak, saharoza
sm	Suva materija
st	Suvi termometar
tk	Tkivo
u	Ukupno
v	Vazduh
vt	Vlažan termometar
w	Vlaga, voda
0	Očetno stanje
1	Krajnje stanje

1. UVOD

Voće u svježem stanju sadrži preko 80% vlage, pa se iz tog razloga svježe voće tretira kao kvarljiv proizvod. Da bi se ono moglo skladištiti na duži vremenski period, neophodno je odvesti višak vlage iz voćnog tkiva. Najčešći način za odvođenja vode iz poljoprivrednih materijala je sušenje. Sušenje predstavlja složen proces razmjene toplote i vode (vlage), između proizvoda koji se suši i radnog medijuma (*Babić, Ljiljana i Babić, M, 2000*). Pored toga, sušenjem je potrebno očuvati niz prirodnih osobina i postići što bolji kvalitet finalnog proizvoda. Za postizanje dobrog kvaliteta sušenog proizvoda, moraju se poznavati promjene koje se dešavaju u tkivu prilikom procesa sušenja. Veliki broj faktora utiču na proces sušenja i promjene koje se dešavaju unutar sušenog materijala. Analizom uticajnih faktora i matematičkim uobličavanjem rezultata mjerenja dobijaju se esencijalne inženjerske informacije o pomenutim mehanizmima (*Pavkov, I, 2007*).

Sušenje voća ima sve veći značaj kako u prehrambenoj industriji tako i u naučno istraživačkom radu. Najrasprostraniji način sušenja voća je klasičnom metodom, odnosno konvektivno sušenje. Međutim, zbog potrebe postizanja što boljeg kvaliteta sušenog voća i eliminisanja pojedinih nedostataka konvektivnog sušenja, u upotrebi su i neke druge tehnologije sušenja voća. Pored toga, koristi se kombinovanje više tehnologija sušenja, pa se ovo naziva kombinovana tehnologija sušenja. Najčešće se u praksi i istraživačkom radu koristi kombinovanje osmotskog i konvektivnog sušenja. Osmotsko sušenje u kombinovanoj tehnologiji sušenja utiče na poboljšanje pojedinih osobina sušenog voća.

Matematički modeli kinetike osmotskog i konvektivnog sušenja definišu karakter odvijanja procesa u zavisnosti od uticajnih faktora. Danas postoje razvijeni kompleksni teorijski i poluteorijski modeli koji opisuju kinetiku osmotskog i konvektivnog sušenja voćnog tkiva. U projektovanju, kao i u kontroli procesa neophodni su jednostavniji analitički modeli. Pored jednostavnosti modeli trebaju da ispunjavaju zahtjevanu tačnost, kako bi se mogli izvoditi relevantni proračuni. Empirijske jednačine dobijene uopštavanjem rezultata eksperimenta su rješenja za pomenute probleme.

Sušenje dunje kao voćne vrste u praksi nije uobičajeno, zbog povišene tvrdoće i čvrstoće. Konvektivno sušenje intenzivira ove nedostatke, tako da u praksi nije uobičajeno sušenje dunje,

osim u veoma malim količinama za voćne čajeve. Međutim, u ranijim eksperimentalnim ispitivanjima dokazano je da osmotsko sušenje u okviru kombinovanog sušenja, povoljno utiče na smanjenje čvrstoće dunje (Babić, M, i saradnici, 2008). Sva prethodna istraživanja tokom sušenja dunje, dovela su do zaključka da se osmotskim sušenjem dobijaju povoljnije mehaničke osobine sušenih proizvoda. Osmotsko sušenje je povoljno, jer smanjenje zapremine je manje izraženo u odnosu na konvektivno sušenje (Koc, B, i saradnici, 2008). Kada se uzmu u obzir navedene činjenice, postoji opravdana potreba za istraživanjem promjena fizičkih i hemijski osobina ovog nepravedno potisnutog voća.

Na osnovu postavljenog plana izrade disertacije urađeni su eksperimenti osmotskog sušenja i konvektivnog sušenja dunje u formi četvrtina. Mjerenjem mjerodavnih veličina tokom izvođenja eksperimenata, dobijeni su rezultati pomoću kojih se može odrediti uticaj pojedinih faktora na kinetiku sušenja četvrtina dunje. Eksperimentalni rezultati osmotskog i konvektivnog sušenja su poslužili za matematičko modelovanje. Dobijeni matematički modeli treba da predstavljaju jednostavna rješenja za praktičnu primjenu i da budu korisni u budućim naučnim istraživanjima.

2. CILJ ISTRAŽIVANJA

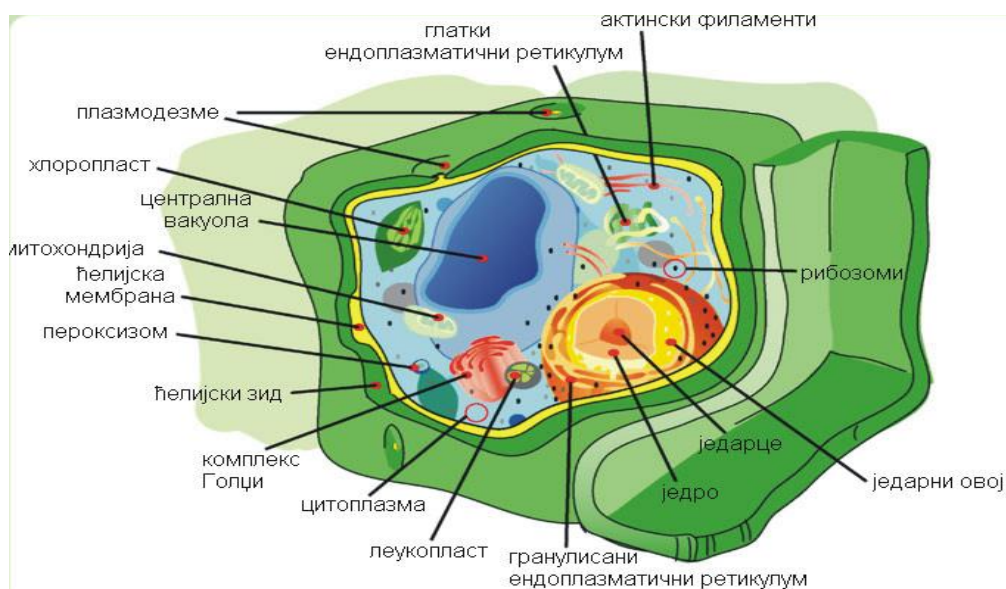
Cilj istraživanja doktorske disertacije je pronalaženje odgovarajućih matematičkih modela kinetike osmotskog i konvektivnog sušenja dunje u obliku četvrtina. Dobijeni matematički modeli će biti jednostavni za praktičnu upotrebu i uz pomoć standardnog računara biće moguće brzo izračunavanje željene veličine. Modeli će predstavljati osnovu za projektovanje novih i optimizaciju postojećih procesa sušenja dunje kombinovanom tehnologijom.

3. PREGLED STANJA ISTRAŽIVANJA

3.1. Biljna ćelija i tkivo

Osnovni element biljnog tkiva predstavlja biljna ćelija. Strukturne osobine biljnih ćelija (slika 3.1), značajni su za razumijevanje procesa sušenja voća. Strukturne razlike na ćelijskom nivou, koje postoje između biljnih i životinjskih organizama, nastale su kao rezultat načina života biljaka budući da su one pričvršćene za podlogu.

Pod elektronskim mikroskopom se prvo može uočiti da je svaka ćelija opkoljena ćelijskim zidom, koji zatvara unutrašnji sadržaj ćelije. Ćelijski zid je čvrsti, jedinstven omotač koji opkoljava svaku biljnu ćeliju. Svojim osobinama štiti membranu biljnih ćelija. Izgrađen je od polisaharida, ali je slojevit, vlaknast, elastičan, savitljiv i izuzetne čvrstoće. Ćelijski zid propušta neke supstance, a drugima ne omogućava ulazak u ćeliju. Debljina ćelijskog zida zavisi od vrste tkiva koje formiraju ćelije. Postoje dva sloja ćelijskog zida, primarni i sekundarni zid, dok se srednja lamela nalazi između primarnih zidova susjednih ćelija.



Slika 3.1. Struktura biljne ćelije (www.bionet-skola.com)

Unutrašnji sadržaj ćelije je opkoljen ćelijskom membranom, a u njemu se razlikuju jedro i citoplazma. Spoljašnja i unutrašnja površina membrane obavljaju različite funkcije pa se razlikuju i po sastavu. Membranski sistemi biljne ćelije imaju značajnu ulogu u transportu vode i hranjivih materija unutar ćelije, između samih ćelija i između ćelija i sredine koja ih okružuje. U citoplazmi se nalaze brojne organele i citoskelet. Jedro je obavijeno dvojnomo membranom na kojoj se nalaze otvori, nuklearne pore, preko kojih se ostvaruje komunikacija između unutrašnjeg sadržaja jedra i okolne citoplazme.

Neposredni fizički kontakt između unutrašnjeg sadržaja dvije ćelije je nemoguć, jer se ćelije naslanjaju jedna na drugu svojim ćelijskim zidovima. Ipak, fizička veza između postoji tako što su oni povezani plazmodezmama odnosno citoplazmatičnim nitima (*slika 3.1*). Plazmodezme služe za efikasan transport molekula vode, šećera i aminokiselina od ćelije do ćelije dok veliki molekuli (proteini) i organele ne mogu da se prenesu na taj način. Iz navedenog razloga plazmodezme imaju ključnu ulogu u prenosu materija i signala između ćelija (*Kojić, M, i Pekić, S, 1998; Kastori, R, 1998; Jančić, R, 2004*).

Vakuola je ćelijska organela ograničena membranom i ispunjena ćelijskim sokom. Kod razvijene ćelije 90% njene zapremine zahvata vakuola, pa povećanje ćelije u suštini predstavlja povećanje vakuole. Osnovni sastojak ćelijskog soka je voda, a ostale komponente variraju u zavisnosti od tipa i fiziološkog stanja ćelije. U vakuoli se skladišta različitih metabolita: ugljenih hidrata, organskih kiselina i njihovih soli, zatim rezervi proteina, pigmenta, fitohormona.

Prilikom sušenja, postoje dva oblika transporta molekula vode, šećera i aminokiselina unutar tkiva. Prvi oblik predstavlja transport između susjednih ćelija, gdje učestvuju plazmodezme. Drugi oblik predstavlja transport kroz apoplast (serija mikro i makro kapilara), kroz koje se brzo i lako provode molekuli vode i drugih materija unutar tkiva i između udaljenih ćelija.

Tkiva predstavljaju skupove ćelija koja imaju isto porijeklo, obavljaju istu funkciju i imaju sličnu građu. Većina tkiva pored glavne (primarne) funkcije može da obavlja i jednu ili više dopunskih (sekundarnih) funkcija. Vrste tkiva se razlikuju po funkciji, obliku, sadržaju i svojstvima membrana ćelija od kojih su izgrađene. Tkiva su izgrađena od ćelija zbijenih jedna uz drugu, a između ćelija nalaze se manje ili veće šupljine, međućelijski prostor ili intercelulari.

Difuzija u biljnoj ćeliji i tkivu predstavlja kretanje molekula neke materije iz područja višeg hemijskog potencijala u područje nižeg hemijskog potencijala, sve dok ne dođe do izjednačavanja njihove koncentracije. Brzina difuzije zavisi od razlike u koncentraciji, od molekulske mase i lokalnog pritiska. Sa povećanjem mase molekula brzina difuzije opada.

Brzina difuzije raste sa porastom temperature, a smanjuje se sa povećanjem viskoznosti (*Kastori, R, 1998; Jančić, R, 2004*).

Difuzija vlage u biljnom tkivu zavisi od razlike u “potencijalima vlage” susjednih ćelija i sredine koja ih okružuje. “Potencijal vlage” jedne ćelije ($\psi_{\text{ćelije}}$) je u zavisnosti od količine osmotski aktivnih materija (“osmotski potencijal“ ψ_{π}), bubrenja i kapilarnih sila (“matriks potencijal” ψ_{matrix}) i hidrostatičkog pritiska (“potencijal pritiska” ψ_p). Iz navedenog slijedi da je “vodni potencijal” ćelije jednak:

$$\psi_{\text{ćelije}} = -\psi_{\pi} + \psi_p + \psi_{\text{matrix}} \quad (3.1)$$

Povišenjem mehaničkog pritiska i povišenjem temperature povećava se “vodni potencijal”, a smanjuje se prisustvom rastvorene materije ili nekog matriksa, koloida ili površine sa električnim nabojem. Prisustvo rastvorenih materija smanjuje koncentraciju odnosno udio molekula vode u rastvoru. Koliko se koncentracija vode smanjuje toliko opada i njen hemijski potencijal (*Kojić, M. i Pekić, S, 1998; Kastori, R, 1998; Jančić, R, 2004*).

3.2. Način vezivanja vlage sa suvom materijom

Prisustvo molekula vode u ćeliji je u dva oblika, kao vezana voda i kao slobodna voda. Na vezanu vodu otpada svega 4-7% od ukupne količine vode u ćeliji, a uglavnom je vezana za proteinske molekule. Velika količina vode nalazi se u protoplazmi ćelija, a sposobnost protoplazme da održava veliku količinu vode uslovljena je uglavnom hidrofornošću ćelija. (*Kojić, M. i Pekić, S, 1998*).

Način obrazovanja različitih veza vlage sa materijalom i energija veze uslovljavaju mehanizam njenog uklanjanja pri sušenju, kao i energiju potrebnu za njeno uklanjanje. Od velikog značaja je poznavanje stanja vlage u materijalu kao i zakonitosti njenog uzajamnog djelovanja sa suvim skeletom materijala koji se suši.

Klasifikacija vlažnih biomaterijala na osnovu njihovih koloidno-fizičkih osobina, svrstava plod dunje u grupu kapilarno-porozno koloidnih tijela. Klasifikacija vrsta veza u ovakvim materijalima uzima u obzir kako prirodu obrazovanja različitih veza, tako i energiju koju je potrebno uložiti da bi se odgovarajuća veza razgradila. Saglasno klasifikaciji *Rebinder*-a, sve vrste veza vode i suve materije dijele se na tri grupe (*Babić, Ljiljana, Babić, M, 2000; Voronjec, D, 1979*):

1. hemijski vezana vlaga,
2. fizičko-hemijski vezana vlaga i
3. fizičko-mehanički vezana vlaga.

Hemijski vezana vlaga je sa suvim materijalom vezana jonskim ili molekularnim silama. Jonska veza obrazuje se prilikom hemijskih reakcija, kada se voda jedini sa nekim jedinjenjem prema određenoj stehiometrijskoj jednačini. Za kidanje, na ovaj način stvorenih veza vlage i materijala, potrebno je utrošiti značajnu količinu energije, pri čemu se bitno mijenja i struktura materijala.

Fizičko-hemijski vezana vlaga javlja se u dva oblika: adsorbiciono i osmotski vezana. Adsorpcija predstavlja vezivanje molekula gasne faze jedne materije za čvrstu fazu druge materije. Osmotski vezana vlaga nalazi se u ćeliji i slobodna je u smislu slabe energije veze, a po svojstvima se ne razlikuje od slobodne vode. Ona se premješta kroz polupropustljive membrane ćelija i ulaze u njihov sastav. Premještanje vlage u tečnoj fazi obavlja se zbog razlika u koncentracijama ove materije u ćelijama i međućelijskom prostoru.

Fizičko-mehanički vezana vlaga sa materijalom može da bude površinska vlaga i kapilarna vlaga. Kapilarno vezana vlaga može se pojaviti u makrokapilarama i u mikrokapilarama. Površinska vlaga nastaje kada je poljoprivredni materijal u neposrednom kontaktu sa vodom u tečnoj fazi, gdje se prilijepi za površinu materijala ako su kapilari puni vode. Ova vrsta vlage se najlakše odstranjuje iz materijala.

3.3. Energija veze vlage i suve materije

Energija veze vlage sa skeletom suvog materijala, se određuje iz *Rebinder*-ovog izraza za izračunavanje izotermnog rada potrebnog za premještanje jednog mola pare na rastojanju od jednog angsterma, iz gasne faze na površinu tečne faze (*Babić, Ljiljana, Babić, M, 2000*):

$$E = R \cdot T \cdot \frac{P_z}{P_m} = -R \cdot T \cdot \ln \varphi \quad (3.2)$$

Energija veze (E), predstavlja smanjenje slobodne energije (R) pri konstantnoj temperaturi materijala (T), izraženo radom koji treba utrošiti da bi se 1 *kmol* vode izdvojio iz materijala, bez promjene sastava i određuje se na osnovu izraza (*jednačina 3.2*). Zbog vezivanja vlage sa suvom materijom, parcijalni pritisak zasićene vodene pare (p_z) se snižava na vrijednost (p_m), uz odgovarajuće smanjenje slobodne energije (*Nedeljkov, M, i Stakić, M, 1994*).

Količina toplote potrebna za isparavanje vlage iz biljnog tkiva je veća od količine toplote potrebne za isparavanje vlage sa slobodne površine. Prilikom isparavanja vode iz biljnog tkiva, sile međusobnih molekularnih veza (molekuli vode i biljnog tkiva) tako djeluju da je potrebna dodatna energija isparavanja (*Katić, Z, 1997*).

3.4. Proizvodnja dunje

Dunja kao voćna vrsta gaji se u mnogim zemljama svijeta od davnina, a poznata je još od prije 4000 godina. Porijeklom je sa Kavkaza, odakle se prvo širila na istok, zatim i na jug u Malu Aziju, a odatle u Grčku. Latinski naziv roda dunje je *Cydonia*, a dobila je naziv od mjesta Cydon na Kritu (*Mratinić, E, 2010*).

Na raširenost dunje utiču najviše njene biološke osobine. U našim krajevima cvijeta kasno, od kraja aprila do sredine maja, pa tako izbjegava kasne prolječne mrazeve. Sa druge strane i sazrijeva dosta kasno, 160 – 170 dana od faze punog cvijetanja, pa je njeno gajenje vezano za krajeve gdje je duga i topla jesen. Slično je kad je u pitanju nadmorska visina, ne preporučuje se gajenje preko 700 metara. Dunja je raprostranjena i na visinama do 2500 metara u Tadžikistanu (*Milošević, Z, 2010*).

Danas je proizvodnja dunje u Srbiji najmanja u poslednjih pola vijeka. Prema podacima Republičkog zavoda za statistiku prosječna proizvodnja dunje u periodu 2003-2007, je oko 11.800 tona sa oko 900.000 rodnih stabala. Nažalost ova proizvodnja se i dalje smanjuje, pa se procenjuje da je u poslednje dvije godine proizvedeno manje od 10.000 tona, što ne zadovoljava ni domaće potrebe. Proizvodnja dunje se zadržala na manjim parcelama i okućnicama širom Srbije, a većih zasada ima sporadično na nekoliko lokaliteta u Vojvodini, Centralnoj i u Južnoj Srbiji u okolini Vranja. Razlozi opadanja proizvodnje dunje su brojni, a među njima su najvažniji: ugroženost ove vrste od opakog bakterioznog oboljenja plamenjače kruške i dunje, čiji je izazivač bakterija *Erbinia amylovora* i strah proizvođača od ovog oboljenja. Jedan od razloga male proizvodnje su niske cijene plodova na tržištu tokom devedesetih godina, a samim tim i otežan plasman i bolji komercijalni efekat drugih gajenih vrsta u istom području. Svakako najveći problem u gajenju dunje bio je napad bakteriozne plamenjače. Ubrzano širenje bolesti, podstaknuto povoljnim spoljnim činiocima, prije svega visokom vlažnošću vazduha i pogodnim temperaturama vazduha, zahvatilo je početkom devedesetih čitavo područje Srbije. Proizvođači nisu reagovali blagovremeno, pa su štete bile ogromne. Brojni dunjici su desetkovani, a kasnije i

iskrčeni. Mnogi nikada nisu ni obnavljani već su zamjenjivani najčešće šljivom ili jabukom. Cijenu napada bakteriozne plamenjače platila je i mušmula koja je gotovo uništena u Srbiji (Nikolić, M, 2009). Od sorti dunja kod nas su najzastupljenije *leskovačka* i *vranjska*. *Leskovačka* dunja je domaća sorta raširena po dolinama Velike, Južne i Zapadne Morave i u Vojvodini. Prorodi relativno rano, a potom rađa redovno i obilno. Oblik ploda je jabučast, okrugao, ravan ili rebrast (*slika 3.2*), krupan do vrlo krupan (200-500 grama). Pokožica ploda u punoj zrelosti je limunasto žuta, meso ploda je sitnozrno, kiselkasto i fine arome. Sazrijeva sredinom oktobra.



Slika 3.2. Leskovačka dunja (www.agrolib.rs)

Vranjska dunja je naša stara sorta raširena u slivu Južne, Zapadne i Velike Morave, a manje u ostalim dijelovima Srbije. Ova sorta u narodu je poznata pod nazivom dunjac. Plod je krupan do vrlo krupan. Masa ploda se kreće od 400 – 1500 grama, a ponekad je i veća. Oblik ploda je kruškolik, a pokožica je glatka, žute boje, pokrivena finim maljama sa izraženim mirisom u punoj zrelosti (*slika 3.3*). Bere se od sredine oktobra za direktnu potrošnju, a za preradu bere se i kasnije. Glavni nedostatak ove sorte je što se meso ploda brzo raspada prilikom kuvanja i što oblik ploda nije najpogodniji za industrijsku preradu.



Slika 3.3. Vranjska dunja (www.agrolib.rs)

3.4.1. Privredni značaj dunje

Dunja (*Cydonia oblonga mill.*) je voće koje ima prijatnu aromu. Nedostatak ovog voća je njena oporost, velike čvrstoća i tvrdoća voćnog tkiva sa prisustvom „kamenih“ ćelija. Iz ovoga razloga dunja se malo koristi za potrošnju u svježem stanju. Ova voćna vrsta se najčešće koristi prerađena u slatka, kompote, želea, džem, sok i rakiju (*Veličković, M, 2002*). Nasuprot maloj potrošnji ovog ploda kao stonog voća, u industriji prerade dunja je izuzetno cijenjena zbog velike biološke vrijednosti ploda, odnosno vrlo povoljnog hemijskog sastava za različite vidove prerade. Posebno je pogodna za proizvodnju želea, zbog velike količine pektina (*Veličković, M, 2002*).

Gajenje dunje kao alternativne voćne vrste, u odnosu na druge voćne vrste koje se nalaze u trenutnoj krizi zbog hiperprodukcije, otvara nove mogućnosti. Dunja traži znatno manja ulaganja u proizvodnji od drugih voćnih vrsta. Ukupni troškovi proizvodnje dunje u rodu pri prinosu od 40 t/ha, iznose do 40% manje u odnosu na jabuku i neke druge voćne vrste (*Stančević, A, 1986*).

3.4.2. Hemijski sastav dunje

Plodovi dunje su trpkog kiselkastog ukusa (zbog sadržaja veće količine tanina) i veće čvrstoće sa dosta „kamenih“ ćelija (što govori i o većem sadržaju celuloze).

Nasuprot maloj potrošnji ovog ploda kao stonog voća, industrija prerade dunju izuzetno cijeni zbog velike biološke vrijednosti ploda, odnosno vrlo povoljnog hemijskog sastava za različite vidove prerade. Posebno je pogodna za proizvodnju želea, zbog velike količine pektina (1,97-3,25%).

Plod je bogat ugljenim hidratima (šećerima 7-15%), sa većim učešćem monosaharida (glukoze i fruktoze do 11%). Organske kiseline se kreću od 0,35 do 1,85%. One daju plodu specifičnu aromu i osvežavajući ukus. Tanina ima u količini od 0,08 do 1,14%, a mineralnih materija od 0,4 do 0,9%. Plod dunje je bogat vitaminima, prije svega: karotinima (71-112 mg%), (0,03-0,38 mg%), B2 (0,01-0,05 mg%), B3, PP (1,60-0,48 mg%), nešto manje vitaminom B6, vitaminom C koga ima nešto više nego kod jabuke (10-17 mg%) i drugih materija (*Mratinić, E, 2010*). *Veličković, M, i saradnici* (2000 i 2001) su došli do sličnih rezultata.

Ovakav hemijski sastav uslovljava hranljivu, profilaktičku i terapijsku vrijednost ploda dunje. Plod je bogat i sa fermentima, kao i sa aromatičnim materijama. Sve navedeno plod dunje svrstava u red veoma korisnih ljekovitih plodova, koji pomažu ljudskom organizmu u liječenju ili sprečavanju mnogih bolesti. Konzumiranjem dunje u svježem stanju, pečene, kuvane ili sa šećerom prerađene na neki drugi način, sprečavaju oboljenja krvnih sudova i srca i razne miokardioskleroze. Takođe, ona blagotvorno utiče na oboljenje od nefritisa, čisti mokraćne kanale, sprečava razne oblike diareje, odlive krvi, sprečava infekcije i slično. Ova ljekovita svojstva se uglavnom pripisuju velikoj količini tanina, pektina i protopektina, kao i velikoj količini kalijumovih soli koje sadrži plod.

3.5. Fizičke i termofizičke osobine voća

Poznavanje fizičkih i termofizičkih osobina voća je izuzetno važno prilikom prenosa mase i toplote u procesu sušenja voća. Od fizičkih osobina razmatraće se: oblik i dimenzije, zapremina, poroznost. Termofizičke osobine koje će biti razmatrane su: koeficijent difuzije vlage, specifična toplota, koeficijent provođenja toplote i koeficijent temperaturne provodnosti.

Oblik i dimenzije predstavljaju nerazdvojne osobine nekog poljoprivrednog materijala i obje osobine su neophodne da bi se materijal opisao na zadovoljavajući način. Za sve poljoprivredne proizvode se može reći da imaju neregularan oblik, te bi za potpuno definisanje bio potreban veliki broj mjerenja. Sa praktičnog stanovišta, dovoljno je raspolagati rezultatima mjerenja dimenzija po pravcima tri normalnih osa ili površina poprečnog presjeka normalnih na iste ose. Spomenute tri dimenzije materijala su: dužina, širina i debljina (*Babić, Ljiljana, Babić, M, 2000*).

Zapremina poljoprivrednih materijala predstavlja osobinu materijala koju je potrebno često poznavati i predstavlja važan podatak prilikom projektovanja različite opreme. Metode za određivanje zapremine poljoprivrednih materijala su: zapremnska metoda, masena metoda i

piknometrijska metoda. Najjednostavniji metod za određivanje zapremine voćnih plodova je zapremnska metoda zasnovana na Arhimedovom zakonu (Babić, Ljiljana, Babić, M, 2000).

Zapreminsko skupljanje predstavlja promjenu zapremine biljnog tkiva tokom procesa sušenja, a nastaje uslijed gubitka vlage. Voćno tkivo tokom sušenja znatno mijenja zapreminu sa promjenom vlažnosti. Neujednačenost vlažnosti po presjeku materijala izaziva pojavu neujednačene promjene dimenzija zbog unutrašnjih naprezanja (Urošević, M, 1986). Unutrašnja naprezanja nastala na ovaj način, mogu prouzrokovati niz nepoželjnih efekata po kvalitet osušenog materijala, kao što su pojava deformacija ili gubitak forme i pojavu naprslina po površini ili unutar tkiva.

Skupljanje se može izraziti na dva načina: koeficijentom skupljanja i zapreminskim skupljanjem. Međusobna korelacija je:

$$SV = \frac{V_0 - V}{V_0} = \frac{\Delta V}{V_0} = 1 - S[-] \quad \text{ili} \quad SV(\%) = \frac{\Delta V}{V_0} 100(\%) = 100\% - S[\%] \quad (3.3)$$

gdje je: S - koeficijent skupljanja [-], SV - zapreminsko skupljanje [%], V_0 - zapremina uzorka na početku sušenja [m^3]; V - zapremina uzorka na kraju sušenja [m^3].

Poroznost se definiše kao odnos zapremine međupostora i ukupne zapremine materijala (Reppa, A, 1998):

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_p}{V}, \quad \varepsilon = 1 - \frac{V_p}{V} \cdot 100 \quad (3.4)$$

gdje je: ε - poroznost [-, %]; V_p - zapremina samog proizvoda [m^3]; V - zapremina proizvoda i međuprostora [m^3].

Poroznija tkiva imaju bolje strukturne osobine i mekša su. Primjenjen metod sušenja utiče na poroznost tkiva. Konvektivno sušena voćna tkiva imaju manju poroznost u poredenju sa voćnim tkivima koja su sušena: liofilizacijom, mikrotalasnim sušenjem i vakum sušenjem (Ramos, I. N. i saradnici, 2003).

Koeficijent difuzije vlage predstavlja jedan od najvažnijih parametara za analizu, projektovanje i optimizaciju procesa sušenja voćnog tkiva. Prilikom sušenja voćnog tkiva karakterističan je koeficijent difuzije vode (D_{ew}), a kod osmotskog sušenja prisutan je i koeficijent difuzije rastvorka (D_{es}). Koeficijent difuzije predstavlja kompleksnu funkciju, koja zavisi od gradijenata temperature i vlažnosti materijala. Pored ovih veličina, ovaj koeficijent zavisi i od hemijskog sastava materijala, energija veza i mehanizma prenosa vlage (jednačina 3.5). Zbog toga je veoma

teško utvrditi makar i približnu analitičku vezu koja bi važila u širem intervalu promjene temperature i vlažnosti materijala (*Babić, Ljiljana i Babić, M, 2000*).

$$D_{ew} = f(\omega, t, E, \text{sastav materijala,}) \quad (3.5)$$

Tokom osmotskog sušenja voćnog tkiva karakteristični su koeficijenti difuzije vode (D_{ew}) i rastvorka (D_{es}). Koeficijent difuzije rastvorka je u funkciji temperature voćnog tkiva, koncentracionog polja rastvorka u tkivu i oko njega, osobina ćelijskih membrana i hemijskog sastava tkiva (*Pavkov, I, 2012*).

Često se koeficijent difuzije vode i rastvorka tokom osmotskog i konvektivog sušenja računa na osnovu drugog *Fick* - ovog zakona, pri konstantnim procesnim uslovima. Poluempirijski pristup matematičkom modelovanju kinetike osmotskog sušenja nudi modele koji su uglavnom dobijeni pojednostavljenim rješenjem drugog *Fick* - ovog zakona. Prednost ovih modela je što ne zahtjevaju mnogo vremena za proračun, ali se mogu primjenjivati samo u opsegu parametara sušenja za koji su izvedeni. Takav primjer su jednačine (3.6) i (3.7) (*Rastogi, N, K, i saradnici 2002*).

$$M_r = 1 - 4 \cdot \left(\frac{D_{ew} \cdot \tau}{\pi \cdot l^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.6)$$

$$S_r = 1 - 4 \cdot \left(\frac{D_{es} \cdot \tau}{\pi \cdot l^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.7)$$

gdje je: M_r – difundovana voda [kg_w]; S_r – difundovani rastvorak [kg_{sm}], τ – vrijeme [s],
 l – polovina debljine beskrajne ploče [m], D_{ew} i D_s - vrijednosti koeficijenata difuzije vode i rastvorka [m^2/s]

Spefična toplota je osobina materijala koja prvoshodno zavisi od njegove vlažnosti i temperature (*Židko 1982*):

$$c = (1 - \omega) \cdot c_{sm} + \omega \cdot c_w \quad (3.8)$$

gdje je: c – srednja izobarska specifična toplota materijala [kJ/kgK]; ω – vlažnost materijala [kg_w/kg_{sm}]; c_{sm} – srednja specifična toplota suve materije [kJ/kgK]; c_w – srednja specifična toplota vlage [kJ/kgK].

Pri analizi procesa razmjene toplote i mase koji se dešavaju u poljoprivrednim materijalima, pretpostavlja se da su promjene stanja izobarske, zato je ovdje riječ o izobarskoj specifičnoj toploti.

Koeficijent provođenja toplote je kompleksna veličina koja zavisi od sastava materijala, njegove temperature, vlažnosti i nasipne gustine, te se može napisati (Babić, Ljiljana, Babić, M, 2000):

$$\lambda = f(\rho, \text{sastav materijala}, \omega, t) \quad (3.9)$$

Toplotna provodljivost vlažnih materijala ima znatno veću vrijednost od toplotne provodljivosti suvog materijala. Toplotna provodljivost u biljnom tkivu zavisi od toplotne provodljivosti čvrstog skeleta, toplotne provodljivosti vlage (vode i vodene pare), poroznosti tkiva i provodljivosti vazduha ukoliko se nalazi zarobljen u porama. Promjena temperature i vlažnosti biljnog tkiva tokom sušenja i stalna fazna transformacija koja se dešava tokom procesa konvektivnog sušenja izazivaju stalnu promjenu toplotne provodljivosti (Babić, Ljiljana i Babić, M, 2000; Nedeljkov, M, i Stakić, M, 1994).

Koeficijent temperaturne provodnosti je takođe funkcija koja je proporcionalna koeficijentu provođenja toplote, a obrnuto proporcionalna srednjoj specifičnoj toploti i nasipnoj gustini materijala (Babić, Ljiljana, Babić, M, 2000):

$$a_t = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad (3.10)$$

gdje je: a_t – koeficijent temperaturne provodnosti [m^2/s]; λ - koeficijent provođenja toplote [W/mK]; c – srednja izobarska specifična toplota materijala [kJ/kgK]; ρ - nasipna gustina materijala [kg/m^3].

Heterogeni sastav i struktura voćnog tkiva, kao i različite veze vlage sa suvim skeletom, utiču da su svi navedeni koeficijenti koji karakterišu proces prenosa vlage i toplote promjenljive veličine tokom procesa sušenja (Pavkov, I, 2007).

3.6. Ravnotežna vlažnost voćnog tkiva

Svi poljoprivredni materijali su higroskopni zbog svoje kapilarno-porozne strukture, što znači da upijaju ili odaju vlagu okolnom vlažnom vazduhu. Hemijski sastav i građa materijala najviše utiču na intezitet razmjene vodene pare sa okolinom.

Poljoprivredni materijali pri određenoj vlažnosti imaju određenu vrijednost parcijalnog pritiska vodene pare u porama i kapilarima. Kada je taj pritisak u ravnoteži sa parcijalnim pritiskom vodene pare u vlažnom vazduhu, pri određenoj temperaturi i pritisku vlažnog vazduha, onda se vlažnost materijala naziva ravnotežna vlažnost. Ravnotežna vlažnost zavisi od vrste materijala i od stanja vlažnog vazduha koji ga okružuje (Babić, Ljiljana i Babić, M., 2000):

$$\omega_r = f(t, p_{ppv}, p) \quad (3.11)$$

gdje je: ω_r – ravnotežna vlažnost materijala [%]; t – temperatura vazduha [$^{\circ}$ C], p_{ppv} – parcijalni pritisak vodene pare u vlažnom vazduhu [Pa], p – pritisak vlažnog vazduha [Pa].

Vrijednosti ravnotežne vlažnosti za određeni materijal određuje se eksperimentalnim putem. Poznavanje vrijednosti ravnotežne vlažnosti za neki materijal je od izuzetnog značaja za proces sušenja i bezbjednost skladištenja. Ravnotežno stanje poljoprivrednog materijala i vlažnog vazduha može da se ostvari na dva načina: navlaživanjem (sorpcijom) i sušenjem (desorpcijom) (*Babić, Ljiljana i Babić, M, 2000*).

Kod voćnog tkiva je zastupljen termin aktivnost vode. Aktivnost vode predstavlja iskaz relativne količine slobodne vlage u tkivu koja može poslužiti kao osnova za život različitim nepoželjnim mikroorganizama. Aktivnost vode ima uticaj na hemijske i enzimatske promjene voćnog tkiva. Povišene vrijednosti aktivnosti vode utiču na tamnjenje tkiva, oksidaciju vitamina, razgradnju proteina i razgradnju vlakana. Tamnjenje tkiva postaje intenzivnije sa povećanim vrijednostima aktivnosti vode, dostižući maksimum u granicama između 0,6 i 0,7 (*Ratti, Cristina i Mujumdar, A, S, 2005*).

Aktivnost vode (*jednačina 3.12*) predstavlja odnos parcijalnog pritiska vodene pare na površini biomaterijala (p_m) i parcijalnog pritiska zasićene vodene pare nad slobodnom površinom vode (p_z) (*Rahman, M. S, 2009*).

$$a_w = \frac{p_m}{p_z} [-] \quad (3.12)$$

Veoma je zastupljena upotreba vrijednosti aktivnosti vode za modelovanje izoterme adsorpcije i desorpcije vode kod različitih poljoprivrednih materijala. Postoji veliki broj modela koji se mogu podijeliti na: teorijske (*Lewicki, P. P, 2000*), poluempirijske (*Lewicki, P. P, 1998*) i empirijske.

3.7. Osnove sušenja poljoprivrednog materijala

Sušenje poljoprivrednih materijala predstavlja složen proces razmjene toplote i materije između poljoprivrednog materijala i radnog medijuma. Kretanje vlage u materijalu nastaje uslijed postojanja gradijenata potencijala prostiranja vlage, a vlaga se prostire u obliku pare ili tečnosti od dijela sa višim potencijalom do dijela sa nižim potencijalom. Migracija vlage u kapilarno-porozno koloidnim materijalima zavisi od potencijala prenosa vlage. Potencijal

prostiranja vlage u materijalu zavisi od: oblika veze vlage sa suvim skeletom, gradijenta vlažnosti, gradijenta temperature, gradijenta ukupnog pritiska, gradijenta koncentracije rastvorljivih organskih komponenti u vodi, gradijenta kapilarnog potencijala i intenziteta fizioloških i biohemijskih procesa u materijalu. Masa vlage koja u jedinici vremena prolazi kroz jedinicu izopotencijalne površine je složena funkcija nabrojanih faktora, koja se u opštem obliku može napisati (*Babić, Ljiljana, 1989; Babić, Ljiljana i Babić, M, 2000*):

$$m_w = f(\text{način vezivanja vlage}, \nabla\omega, \nabla t, \nabla p, \nabla c, \text{biološka aktivnost}) \quad (3.13)$$

gdje je: m_w – materijalni fluks, masa vlage koja u jedinici vremena (dt) prolazi kroz jedinicu izopotencijalne površine (F) upravne na pravac transporta materije [kg_w/m^2s]; $\nabla\omega$ – skalarna veličina gradijenta vlažnosti u pravcu normale na izopotencijalnu površinu; ∇t – skalarna veličina gradijenta temperature u pravcu normale na izotermnu površinu; ∇p – skalarna veličina gradijenta ukupnog pritiska u pravcu normale na izobarsku površinu i ∇c – skalarna veličina gradijenta koncentracije u pravcu normale na izopotencijalnu površinu.

Zbog jednostavnosti kod konvektivnog sušenja, pretpostavlja se da potencijal prenosa vlage zavisi samo od gradijenta vlažnosti i gradijenta temperature u materijalu. Na osnovu ove pretpostavke, prethodna jednačina napisana u skalarnom obliku za konvektivno sušenje će biti (*Babić, Ljiljana, 1984; Babić, Ljiljana i Babić, M, 2000*):

$$m_w = -\lambda_w \cdot (\nabla\omega \pm \delta \cdot \nabla t) = D_{ew} \cdot \rho_{sm} \cdot (\nabla\omega \pm \delta \cdot \nabla t) \quad (3.14)$$

gdje je: m_w – materijalni fluks molekula vode [kg_w/m^2s]; λ_w – koeficijent provođenja vlage u vlažnom biomaterijalu [kg/m^2s]; δ - termogradijentni koeficijent materijala [$kg_w/kg_{sm}K$], D_{ew} – koeficijent difuzije vode [m^2/s]; ρ_{sm} – gustina suve materije [kg/m^3].

Prikazana jednačina u diferencijalnom obliku predstavlja osnovni izraz za molekularnu difuziju u čvrstim tijelima ili prvi *Fick* - ov zakon (*Voronjec, D, 1979*), koji je analogan sa *Fourier*-ovim zakonom provođenja toplote.

Da bi se jednačina 3.14 riješila potrebno je definisati polje vlažnosti i polje temperature u materijalu, koje je promenljivo u vremenu, kao i termofizičke osobine materijala. Ako se pođe od dva osnovna zakona, zakon o održanju materije i zakon o održanju energije, nakon niza transformacija dolazi se do analitičkog izraza koje opisuje polje vlažnosti i polje temperature u materijalu (*Likov, A. V, 1968*).

$$\nabla\omega = \frac{\partial\omega}{\partial\tau} = D_{ew} \cdot \nabla^2\omega + D_{ew} \cdot \delta \cdot \nabla^2 t \quad (3.15)$$

$$\nabla t = \frac{\partial t}{\partial \tau} = a_t \cdot \nabla^2 t + \frac{\varepsilon \cdot r_w}{c} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial \tau} \quad (3.16)$$

gdje je: a_t – koeficijent temperaturne provodljivosti [m^2/s]; c – specifična toplota materijala [kJ/kgK]; r_w – toplota isparavanja vode sa slobodne površine [kJ/kg]; ε – kriterijum faznog prelaza; $\nabla^2 = \Delta$ - Laplace–ov operator [m^{-2}]

Sistem jednačina predstavlja parcijalne nelinearne jednačine drugog reda. Dobijena rješenja doprinijela su daljem razumijevanju i shvatanju uzajamno povezanih procesa prenosa toplote i materije, međutim ona imaju i niz nedostataka. Da bi se jednačine riješile, potrebno je definisati: granične uslove, početne uslove, geometrijski oblik, dimenzije materijala termofizičke osobine materijala.

Diferencijalna jednačina koja sa odgovarajućim graničnim i početnim uslovima definiše takvo polje vlažnosti u posmatranom biomaterijalu naziva se drugi Fick–ov zakon (Voronjec, D, 1979):

$$\nabla \omega = \frac{\partial \omega}{\partial \tau} = D_{ew} \cdot \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} \right) = D_{ew} \cdot \nabla^2 \omega = D_{ew} \cdot \nabla \omega \quad (3.17)$$

Drugi Fick –ov zakon, se koristi kao jedan od teorijskih pristupa za razmatranje molekularne difuzije komponenata sistema, koji se javljaju tokom osmotskog sušenja bioloških materijala. Ovaj zakon se zasniva na pretpostavci o nezavisnoj difuziji komponenata sistema, izotropnosti materijala i njegovog neskupljanja (Shi, J, Maguer, M. L, 2002).

Masa vlage koja je migracijom došla do granične površine, transportovaće se u okolni vlažan vazduh na osnovu Dalton-ovog modela. Prema Dalton-ovom modelu, masa vlage koja se u jedinici vremena predaje vlažnom vazduhu sa granične površine za konvektivno sušenje definisana je jednačinom 3.18, a za osmotsko sušenje jednačinom 3.19.

$$m_{w(k)} = \beta_{w(k)} \cdot (p_m - p_{ps}) \quad (3.18)$$

$$m_{w(o)} = \beta_{w(o)} \cdot (\omega_m - \omega_r) \quad (3.19)$$

gdje je: $m_{w(k)}$ – masa vlage koja se u jedinici vremena preda sa granične površine vlažnom vazduhu pri konvektivnom sušenju [$kg_w/m^2 s$]; $\beta_{w(k)}$ – koeficijent prelaza vlage prilikom konvektivnog sušenja [$kg_w/m^2 s Pa$]; p_m – parcijalni pritisak vodene pare na površini vlažnog materijala [Pa]; p_{ps} – parcijalni pritisak vodene pare u vlažnom vazduhu [Pa]; $m_{w(o)}$ – masa vlage koja se u jedinici vremena preda sa granične površine u osmotski rastvor pri osmotskom sušenju [$kg_w/m^2 s$]; $\beta_{w(o)}$ – koeficijent prelaza vlage prilikom osmotskog sušenja [$kg_w/m^2 s Pa$]; ω_m i ω_r – vlažnost materijala i osmotskog rastvora prilikom osmotskog sušenja [kg_w/kg].

Na osnovu jednačine 3.18 se može zaključiti da potencijal prelaza vlage sa granične površine u vlažan vazduh zavisi od razlike parcijalnih pritisaka vodene pare i koeficijenta prelaza materije. Kod jednačine 3.19 zaključuje se da potencijal prelaza vlage sa granične površine u osmotski rastvor zavisi od razlike vlažnosti materijala i osmotskog rastvora i od koeficijenta prelaza materije. Navedene jednačine samo približno definišu pojavu prelaza materije sa granične površine materijala u radni fluid, a razlog je u promjenljivoj vrijednosti koeficijenta β_w .

3.8. Osmotsko sušenje

Voda predstavlja glavni sastojak u tkivu voća i povrća. Istraživači su tragali za novim rješenjima koja bi omogućila da se poveća upotreba voća i povrća, a pri tome zadrže hranjive i organoleptičke osobine. Jedna od metoda se sastoji u potapanju voća ili povrća u rastvore soli, šećera ili neki drugi miješani rastvorak. Ova pojava se naziva osmotsko sušenje ili tretman, jer je ustanovljeno da je svaka impregnacija hrane nekim rastvorom praćena transportima mase. Osmotsko sušenje predstavlja jedan od najboljih načina da se produži rok upotrebe voću i povrću, gdje bi se u što većoj mjeri zadržale prvobitne osobine (Shi, J, Xue, J. S, 2009). Ovaj proces ima prednosti u odnosu na druge zbog zadržavanja vitamina, boje, arome i ukusa (Yadav, A. K, Singh, S. V, 2012). Tek su nedavno počela proučavanja migracije vlage koja se pri tome dešavaju, a interesovanje je naročito izraženo u poslednjih pedesetak godina u svijetu (Babić, Ljiljana, i saradnici, 2003, 2004).

Osmotsko sušenja materijala predstavlja prolaženje molekula vode kroz polupropustljive ćelijske membrane, sa mjesta višeg koncentracionog potencijala na mjesto nižeg koncentracionog potencijala molekula vode (Rastogi, N. K, i saradnici, 2002; Shi, J, Xue, J. S, 2009). Pravljenjem zasićenih rastvora saharoze ili kuhinjske soli kao najdostupnijih rastvoraka, ostvaruje se niži koncentracioni potencijal molekula vode. Potapanjem voće ili povrće u ovaj rastvor odvija će se proces osmotskog sušenja zbog postojanja koncentracione neravnoteže u sistemu „materijal za sušenje - rastvor“. Transport molekula vode iz materijala u rastvor će se završiti kada se u sistemu uspostavi koncentraciona ravnoteža (Babić, Ljiljana, Babić, M, 2000).

Odvođenje vlage nastaje direktnim kontaktom voća ili povrća sa rastvorom, kao što su koncentrovani rastvori šećera ili soli. Vлага se iz voća uklanja kroz ćelijske membrane, gdje se zidovi ćelija ponašaju se kao polupropustljive opne koje propuštaju molekule vode, a istovremeno zadržavaju veće molekule kao što su saharidi. Protok vlage kroz membranu traje do

uspostavljanja ravnotežne koncentracije vlage sa obje strane ćelijske membrane (*Shi, J, Le Maguer, M, 2002*).

Tokom osmotskog sušenja prelazak vlage iz tkiva je mnogo intenzivniji u odnosu na ulazak osmotskog rastvorka u tkivo. Prelazak molekula vode iz tkiva u osmotski rastvor praćen je i prelaskom ćelijskog soka u osmotski rastvor. (*Rastogi, N. K, i saradnici, 2002*).

Sva dosadašnja istraživanja su dovela do zaključka da vrsta osmotskog rastvora, temperatura osmotskog rastvora i koncentracija rastvora imaju najveći uticaj na brzina prelaska vlage iz voćnog tkiva u rastvor i krajnji kvalitet finalnog proizvoda. Pored navedenih faktora, istraživanja su pokazala da postoje i drugi faktor koji utiču na osmotsko sušenje na brzina prelaska vlage iz voćnog tkiva u rastvor i krajnji kvalitet finalnog proizvoda.

Vrsta osmotskog rastvora je važan faktor koji utiče na brzinu prelaza vlage iz voćnog tkiva u osmotski rastvor i brzinu prodiranja rastvorka u voćno tkivo. Najčešće korišćeni koncentrovani rastvori su: saharoza, rastvori soli, glukoza, kukuruzni sirup, sorbitol, glicerol. Osnovno je da manja molekularna masa osmotskog rastvora lakše prodire u ćelije voća (*Phisut, N, 2012*).

El-Aouar, A. A, i saradnici (2006) su proučavali uticaj osmotskih rastvora saharoze i kukuruznih sirupa na difuziju vlage u rastvor i prodiranje rastvorka u tkivo, tokom osmotskog sušenja papaje. Autori su na osnovu ispitivanja došli do zaključka da su uzorci sušeni u rastvoru saharoze imali veći gubitak vlage i veće prodiranje rastvorka u tkivo. Razlog ovome je što kukuruzni sirup ima veću viskoznost i molekularnu masu od saharoze.

Ispir, A. E, Togrul, I. T, (2009) su proučavali efekat različitih osmotskih rastvora na osmotsko sušenje kajisije. Korišćeni su slijedeći rastvori: saharoza, glukoza, fruktoza, maltodekstrin i sorbitol. Najveće odvođenje vlage tokom osmotskog sušenja je sa saharozom, a najmanji sa orbitolom. Najmanje prodiranje osmotkog rastvora u tkivo kajisije su imali maltodekstrin i fruktoza. Na osnovu brzine transporta vlage iz tkiva u rastvor i transporta rastvorka u tkivo za osmotsko sušenje kajisije, autori preporučuju saharozu i glukozu.

Koncentracija osmotskog rastvora i temperatura osmotskog rastvora imaju najveći uticaj na brzinu prelaska molekula vode iz voćnog tkiva u osmotski rastvor. Porastom temperature i koncentracije rastvora dolazi do bržeg transporta vode iz voćnog tkiva u osmotski rastvor.

Lazarides, H. N, i saradnici, (1995) je proučavali uticaj različitih koncentracija rastvora na brzinu prelaska vlage iz voćnog tkiva u rastvor, kod osmotskog sušenja jabuke. Korišćen je rastvor sa sadržajem šećera 45%, 55% i 65%. Rezultati su pokazali da sa povećanjem koncentracije rastvora dolazi do bržeg transporta vode iz voćnog tkiva u osmotski rastvor.

Falade, O. K, i saradnici (2007) su ispitivali uticaj koncentracije rastvora na kinetiku osmotskog sušenja lubenice u obliku pločica. Korišćene su tri različite koncentracije rastvora (40°Bx, 50°Bx i 60°Bx), a najveći gubitak vode i prirast suve materije je bio kod osmotskog sušenja sa rastvorom od 60°Bx.

Devic, E, i saradnici (2010) su ispitivali uticaj različitih temperatura (45°C i 60°C), na kinetiku osmotskog sušenja jabuke u osmotskom rastvoru koncentracije 60°Bx. Rezultati su pokazali da transport vode iz tkiva jabuke raste sa dužinom vremena osmotskog sušenja i sa porastom temperature rastvora.

Babić, Ljiljana i saradnici, (2007, 2004) su istraživali uticaj parametara osmotskog sušenja na kinetiku sušenja polutki kajisija. Korišćene su temperature rastvora 45 i 55°C, a koncentracije rastvora 55 i 65°Bx. Dužina trajanja osmotskog sušenja je iznosila 120 minuta. Rezultati ispitivanja su pokazali da sa porastom temperature i koncentracije osmotskog rastvora raste brzina prelaska molekula vode iz polutki kajisija u osmotski rastvor.

Khoyi, M. R, Hesari, J, (2006) su ispitivali uticaj različitih temperatura rastvora i različitih koncentracija rastvora na sušenje kriški kajisija, debljine 5 mm. Temperature rastvora su varirane na četiri nivoa (30, 40, 50 i 60°C), a korišćen je rastvor sa sadržajem šećera 50%, 60% i 70%. Proces osmotskog sušenja je trajao 6 sati. Na osnovu dobijenih rezultata autori su zaključili da sa povišenjem temperature i povećanjem koncentracije rastvora dolazi do bržeg odvođenja vode iz kriški kajisija. Pored toga, autori su došli do zaključka da brzina odvođenja vode najviše zavisi od temperature rastvora kod sušenja sa rastvorom koji u sebi sadrži 60% saharoze. Oni su predložili kao najekonomičnije osmotsko sušenje kriški kajisija sa temperaturom rastvora 50°C i koncentracijom rastvora sa 60% saharoze.

Sharma, H. K, i saradnici (2003) su ispitivali uticaj različitih koncentracija osmotskog rastvora i masenih odnosa, na odvođenja vode i povećanje suve materije tokom osmotskog sušenja kruške. Korišćen je osmotski rastvor sa koncentracijom 35 i 45°Bx, a maseni odnosi 1:1 i 2:1. Povećanjem koncentracije i masenog odnosa rastvora porastao je transport vode sa 18,09% na 23,18%, a udio suve materije je porastao sa 13,59% na 16,38%.

Prilikom osmotskog sušenja bitno je odrediti najpovoljniju temperaturu rastvora. Više temperature rastvora dovode do veće rastvorljivosti rastvorka osmotskog rastvora, a posledica toga je porast osmotskog pritiska i intenzivniji transport molekula vode. Pri dužim izlaganjima voća na višoj temperaturi rastvora, ćelijska membrana gubi svoju selektivnost, što dovodi do povećane difuzije osmotskog rastvorka u tkivo voća i narušavanja kvaliteta (*Saputra, D, 2001*).

Izbor vrste i koncentracije osmotskog rastvora tokom osmotskog sušenja, predstavlja jedan od najvažnijih zadataka. Koncentrovani rastvor tokom osmotskog sušenja utiču na ukus i hranjive vrijednosti sušenog voća (*Reppa, A, i saradnici, 1998; Saputra, D, 2001*).

Moraga, M. J, i saradnici (2011) su ispitivali uticaj korišćenja istog osmotskog rastvora tokom osmotskog sušenja grejpfuta. Nakon osmotskog tretmana, grejpfut je ostavljan u klimatizovanu prostoriju, na temperaturu vazduha 10°C. Autori su došli do zaključka da se isti osmotski rastvor može koristiti do pet puta, pri čemu ne dolazi do promjene hemijskih osobina tretiranog grejpfuta.

Brzina prenosa mase vode i rastvorenih organskih materija, raste sa porastom brzine strujanja osmotskog rastvora (*Stefanović, M, Urošević, M, 1995*). Zavisnosti brzine osmotskog sušenja od brzine relativnog kretanja osmotskog rastvora i plodova voća, dovodi do zaključka da treba ići na maksimalne brzine sirupa koje dato voće može da podnese, a da se ne razori.

Moreira, R, i saradnici, (2007) su proučavali uticaj brzine kretanja osmotskog rastvora (glicerol) tokom osmotskog sušenja kestena. Praćen je gubitak vode iz voćnog tkiva u statičkom rastvoru i gubitak vode u dinamičkom rastvoru. Na osnovu rezultata ispitivanja, autori su došli do zaključka da je značajnije odvođenje molekula vode iz tkiva kestena bio kod osmotskog sušenja u dinamičkom rastvoru.

Vrijeme trajanja osmotskog sušenja ima uticaj na ukupnu količinu odvedene vode iz voćnog tkiva u osmotski rastvor. Sa dužim vremenom osmotskog sušenja povećava se količina odvedene vode iz voćnog tkiva u osmotski rastvor. Nakon određenog vremena osmotskog sušenja dolazi do opadanja brzine difuzije vode iz voćnog tkiva u osmotski rastvor (*Chaudhari, A. P, i saradnici, 1993*).

Oblik i veličina uzorka imaju uticaj na kinetiku osmotskog sušenja. Uobičajeni oblici prilikom osmotskog sušenja voćnog tkiva su: cilindri, kocke, diskovi, sfere itd. Ako su dimenzije tretiranog tkiva veće, sušenje će biti sporije zbog povećanja dužine putanje molekula vode, sa druge strane tkiva manjih dimenzija se brže suše.

Primjena podpritiska u rastvoru, tokom osmotskog sušenja voća utiče na brži prenos mase. *Fito, P, Pastor, R, (1994)* su objasnili ovu pojavu preko gradijenta pritiska i kapilarnog toka. Sniženje pritiska prouzrokuje ekspanziju i izlazak gasa zarobljenog u porama voćnog tkiva. Povratkom na atmosferski pritisak u pore ulazi osmotski rastvor, na taj način povećava aktivnu površinu za odvijanje procesa prenosa mase. Tretman podpritiskom može se primenjivati tokom čitavog procesa osmotskog sušenja, ali njegova upotreba je uobičajena na početku procesa,

pogotovo ako se radi o potrebi izmene sastava materijala. Ovaj proces u literature se naziva vakum impregnacija (Taiwo, A. K, i saradnici, 2001).

Pored primjene podpritiska, postoje još neke tehnike koje ubrzavaju proces prenosa mase tokom osmotskog sušenja voća i povrća. Najčešće korišćene tehnike su: podvrgavanje voća i povrća blanširanju, smrzavanju, visokom pritisku, pulsirajućem električnom polju, ultrazvuku i centrifugalnoj sili. Primjena ovih metoda ubrzava proces prenosa mase, međutim vrlo često dovode do oštećivanja i promjene u strukturi voćnog tkiva. Osmotsko sušenje voća i povrća se vrlo često koristi kao predtretman konvektivnom sušenju. Upotrebom osmotskog sušenja kao predtretmana dobija se bolji kvalitet osušenog voća i povrća, a to se ogleda u slijedećem: smanjuju se gubici hranjivih vrijednosti, manje su promjene boje i dobija se bolji ukus (Lenart, A. i Lewicki, P, P, 1988).

Babić, M. i saradnici, (2007, 2008) su istraživali uticaj osmotskog predtretmana na mehaničke osobine kockica sušene dunje. Mehaničke osobine osušene dunje se značajno poboljšavaju primjenom osmotskog sušenja kao predtretmana konvektivnom sušenju. Osušeni materijal ima malu promjenu modula elastičnosti u odnosu na svježi materijal.

Radojčin, M, i saradnici, (2010) istražili su uticaj osmotskog sušenja kockica dunje u rastvoru sahara na promjenu boje. Kockice dunje dimenzija 15 x 15 x 15 mm sorte *leskovčka* su osmotski sušene na različitim temperaturama osmotskog rastvora (40 i 60°C) i koncentracijama osmotskog rastvora (50 i 65°Bx). Kockice su dosušivane u konvektivnoj sušari sa ljesama na temperaturi vazduha za sušenje 60°C. Boja je mjerena tokom osmotskog sušenja i na kraju konvektivnog sušenja. Na osnovu rezultata mjerenja autori zaključuju da primjenom osmotskog sušenja kao predtretmana konvektivnom sušenju, pozitivno utiče na očuvanje prirodne boje tkiva dunje.

Babić, M, i saradnici, (2004, 2005) su ispitivali maseni i energetski bilans kombinovane tehnologije sušenja voća. Osmotskim sušenjem voća sa 85% na 75% vlažnosti, odstranjuje se polovina vlage iz voća koju je potrebno ukloniti do krajnje vlažnosti. Na osnovu urađenog masenog i energetskog bilansa autori zaključuju da primjena osmotskog sušenja smanjuje potrošnju toplotne energije u procesu sušenja voća za najmanje 30%.

Na osnovu dosadašnjih istraživanja, može se zaključiti da postoji veliki broj faktora koji utiču na brzinu prenosa mase i očuvanje kvaliteta voća tokom osmotskog sušenja. Temperatura i koncentracija osmotskog rastvora su dva najuticajnija faktora koja utiču na brzinu prenosa mase tokom ovog procesa. Pored njih na brzinu prenosa mase utiču: vrijeme trajanja procesa, brzina

kretanja rastvora, dimenzije materijala, osobine rastvorka, maseni odnos materijal-rastvor i upotreba dodatnih tehnika prije i tokom osmotskog sušenja.

3.9. Konvektivno sušenje voća

Konvektivno sušenje pripremljenog voća se obavlja radnim fluidom koji može da bude čist vazduh ili mješavina vazduha i produkata sagorjevanja. Voće se ređa u ravnomjernom tanjem sloju na perforirane površine - tave, lese ili tacne od nerđajućeg čelika (sušare sa lesama). Ako su u pitanju kriške ili kolutovi, stavlja se 6 - 9 kilograma voća na kvadratni metar radne površine. Ako se suše cijeli prodovi, bobice grožđa, šljive ili smokve, opterećenje na tavama je 12-16 kg/m² (Babić Ljiljana, Babić M, 2000).

Temperatura i brzina kretanja vazduha za sušenje ispred sloja su najuticajni faktori kod konvektivnog sušenja voća u tankom nepokretnom sloju. Porastom temperature i brzine vazduha raste i brzina sušenja. Urađen je znatan broj eksperimentalnih ispitivanja konvektivnog sušenja voća, sa i bez prethodnog osmotskog sušenja.

Barroca, M. J, Guine, R. P. F, (2012) su istraživali uticaj temperature i brzine kretanja vazduha na sušenje dunje. Dunja je konvektivno sušena u obliku listića debljine 3 mm. Korišćene su temperature vazduha 40, 50 i 60⁰C, a brzine vazduha 0,7; 0,9 i 1,2 m/s. Na osnovu rezultata istraživanja autori su zaključili da sa povećanjem temperature vazduha za sušenje povećava se brzinu transporta vlage iz materijala, odnosno skraćuje se vrijeme sušenja. Veći uticaj na brzinu sušenje ima promjena temperature od 50 do 60⁰C, nego od 40 do 50⁰C. Povećanjem brzine vazduha za sušenje povećava se brzina sušenja. Sušenjem na konstantnoj temperaturi od 60⁰C, povećanjem brzine kretanja vazduha za sušenje značajno se povećavala brzina sušenja. Kod sušenja sa temperaturom vazduha od 40⁰C i promjenom brzine vazduha za sušenja, promjena brzine sušenja je bila zanemarljiva.

Togrul, I. T, Pehlivan, D. (2003) su konvektivno sušili svježe tkivo kajsije u obliku cijelog ploda. Temperatura vazduha je varirana na četiri nivoa (50, 60, 70 i 80⁰C), kao i brzina vazduha ispred sloja materijala (0,2; 0,5; 1,0 i 1,5 m/s). Na osnovu izračunatih efektivnih koeficijenta difuzije vode ocjenjeno je da sa porastom vrijednosti oba parametra procesa, raste i brzina sušenja tkiva kajsije u obliku cijelog ploda.

Kaya, A, Aydin, O, (2007) su obavili konvektivno sušenje svježe višnje, gdje su ispitivali uticaj temperature vazduha i relativne vlažnosti vazduha na kinetiku konvektivnog sušenja.

Prosječna početna vlažnost plodova višnje je bila 77,78%, korišćene su četiri različite vrijednosti temperatura vazduha za sušenje (35, 45, 55, 65°C). Relativna vlažnost vazduha je takođe varirana na četiri nivoa (40, 55, 70 i 85%). Brzina vazduha ispred sloja materijala je iznosila 0,3 m/s). Na osnovu rezultata ispitivanja autori su zaključili da povećanje temperature vazduha za sušenje, pri istoj relativnoj vlažnosti vazduha, raste brzina sušenja. Sa povećanjem vrijednost relativne vlažnosti vazduha dovodi do smanjenja brzine sušenja.

Autor *Pavkov, I, i saradnici*, (2010 i 2011) su uradili eksperimente sušenja ploda kruške i nektarine u obliku četvrtina kombinovanom tehnologijom. Kombinovana tehnologija se sastojala od osmotskog i konvektivnog sušenja. Eksperimenti konvektivnog sušenja su trajali 24 časa, temperatura vazduha varirana je na dva nivoa (40 i 60°C), kao i brzina kretanja vazduha ispred sloja (1 i 1,5 m/s). Najveće sniženje vlažnosti postignuto je pri temperaturi vazduha 60°C i brzini 1,5 m/s.

Perez, N, E, Shmalko, M. E, (2007) su konvektivno sušili bundevu u obliku cilindra prečnika 20 mm i visine 25 mm. Temperature vazduha za konvektivno sušenje su bile 50, 60 i 70°C, a brzina vazduha ispred sloja materijala je iznosila 2,5 m/s. Konvektivno sušenje je obavljano bez predtretmana i sa predtretmanom (blanširanje u ključaloj vodi u vremenu 1 i 2 minuta). Porastom temperature vazduha za sušenje dovodi do bržeg sniženja vlažnosti i skraćivanja vremena sušenja. Uptreba blanširanja kao predtretmana nije imala uticaj na brzinu sušenja.

Efekat osmotskog predtretmana na kinetiku sušenja jabuke u obliku listića je istraživao strane *Azoubel, M. P, i saradnici*, (2009) Na osnovu rezultata istraživanja, autori su došli do zaključka da sa porastom sadržaja šećera u tkivu jabuke snižava se brzina sušenja. Takođe, osmotski predtretman poboljšava teksturu, aromu, spoljašnji izgled.

Park, K. J, i saradnici, (2002) su istražili uticaj osmotskog predtretmana na kinetiku sušenja kockica kruške ($\approx 1 \text{ cm}^3$). Osmotsko sušenje je obavljeno u rastvoru saharoze koncentracije 55°Bx, temperaturi 40°C i vremenu trajanja sušenja od 310 minuta. Temperatura vazduha za konvektivno sušenje varirana je na tri nivoa (40, 60 i 80°C), a brzina vazduha na dva nivoa (1 i 2 m/s). Na osnovu rezultata mjerenja, autori su zaključili da brzina sušenja raste sa porastom temperature vazduha za sušenje i brzine vazduha za sušenje ispred sloja materijala. Kockice kruške koje su osmotski sušene imaju veću brzinu sušenja od svježih iznad vlažnosti 1 kg/kg_{sm}, a ispod naznačene vlažnosti brzina sušenja se brže snižava od brzine sušenja svježih kockica.

Giraldo-Zuñiga, A. D, i saradnici, (2004) su ispitivali uticaj osmotskog predtretmana na kinetiku sušenja “jackfruit”, u obliku pločica (debljina 10 mm). Osmotski rastvor je bio u obliku saharoze, a koncentracija rastvora je varirana na tri nivoa (40, 50 i 60⁰Bx). Temperatura rastvora je bila konstantna (35⁰C), a osmotski predtretman je trajao tri sata. Nakon osmotskog predtretmana materijal je konvektivno sušen. Temperatura vazduha je varirana na tri nivoa (50, 60 i 70⁰C), a brzina je bila konstantna (1,5 m/s). Na osnovu rezultata istraživanja, autori su došli do zaključka da brzina sušenja raste sa povišenjem temperature vazduha. Upotrebom veće koncentracije rastvora prilikom osmotskog predtretmana, brzina konvektivnog sušenja je bila manja. Takođe, primjećeno je da ne postoji konstantna brzina sušenja.

Sankat, C. K, i saradnici (1996) su ispitivali uticaj dimenzija voćnog tkiva i osmotskog predtretmana na kinetiku sušenja tkiva banane. Kolutovi oljuštene banane isječeni su na debljinu 20, 10 i 5 mm. Osmotski predtretman je urađen sa rastvorom saharoze koncentracije 35, 50 i 65⁰Bx. Temperatura je bila 25⁰C, a vrijeme osmotskog predtretmana je 36 sati. Svježi kolutovi i osmotski predtretirani kolutovi su sušeni u konvektivnoj sušari gdje je varirana temperatura vazduha za sušenje (40, 50, 60, 70 i 80⁰C) na konstantnoj brzini vazduha 0,62 m/s. Na osnovu analize rezultata kinetike sušenja autori zaključuju da sa porastom temperature vazduha za sušenje i smanjenjem debljine koluta, raste brzina sušenja. Takođe, autori navode da sa porastom sadržaja šećera u tkivu banane smanjuje se brzina sušenja.

Na osnovu dosadašnjih istraživanja, većina autora je zaključila da su temperatura vazduha i brzina vazduha dva najuticajnija faktora kinetike konvektivnog sušenja. Uticaj na brzinu sušenja imaju još: apsolutna vlažnost vazduha, dimenzije materijala, osobine tkiva, vrsta primenjenog predtretman. Upotreba predtretmana ima uticaj na kinetiku konvektivnog sušenja, a u velikoj mjeri utiče na kvalitet sušenog voća. Osmotski predtretman poboljšava mnoga hraniva i organoleptička svojstva voća, tokom konvektivnog sušenja.

3.10. Matematičko modelovanje kinetike sušenja voća

Matematičko modelovanje predstavlja proces od velikog značaja za optimizaciju kinetike sušenja voća i povrća i bolju energetska efikasnost u procesu sušenja. Matematički modeli kinetike osmotskog i konvektivnog sušenja voća definišu karakter odvijanja procesa u zavisnosti od uticajnih faktora. Tokom osmotskog sušenja kinetika prenosa mase je najčešće opisana preko termina: gubitak vode (*jednačina 3.20*) i povećanje suve materije (*jednačina 3.21*). Gubitak vode

predstavlja promjenu mase uzorka u odnosu na početnu, a povećanje suve materije predstavlja povećanje suve materije na kraju sušenja u odnosu na početnu masu (*Bchir, B, i saradnici, 2009; Kaleta, A, Gornicki, K, 2010; Korsrilabut, J, i saradnici, 2010; Saputra, D, 2001; Taiwo, A. K, i saradnici, 200; Togrul, T. I, i Ispir, A, 2007; Alam, S, Singh, A, 2010*)

$$WL = \frac{(m_o - m_{smo}) - (m - m_{sm\tau})}{m_o} \quad (3.20)$$

$$SG = \frac{m_{sm\tau} - m_{smo}}{m_o} \quad (3.21)$$

gdje je: WL – gubitak vode [kg_w/kg]; SG – priraštaj suve materije [kg_{sm}/kg]; WR – redukcija mase [%]; m_o – masa svežeg uzorka [kg]; m – masa uzorka nakon vremena τ [kg]; $m_{sm\tau}$ – masa suve materije u uzorku nakon vremena τ [kg_{sm}]; m_{smo} – masa suve materije u svežem uzorku [kg_{sm}].

Pregledom literature se mogu konstatovati tri pristupa modelovanju kinetike osmotskog i kinetike konvektivnog sušenja voćnog tkiva: teorijski, poluteorijski i empirijski (*Togrul, I. T, 2010; Diamante, L. M, i saradnici, 2010*).

Većina teorijskih pristupa matematičkom modelovanju prenosa mase je zasnovano na diferencijalnoj jednačini drugog *Fick*-ovog zakona (*jednačina 3.23*). Ova jednačina definiše nestacionarno polje posmatrane komponente sistema u prostoru.

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

gdje je: C – koncentracija posmatrane komponente sistema [%], oBx], τ – vrijeme trajanja procesa [min], D_{es} – koeficijent difuzije posmatrane komponente sistema [m^2/s]; x, y, z – koordinate posmatrane tačke

Da bi se jednačina jednoznačno riješila potrebno je definisati: granične uslove, početne uslove, geometrijske uslove i fizičke karakteristike materijala, koje su mjerodavne za proces transporta posmatrane komponente sistema (*Shi, J, Le Maguer, M, 2002; Rastogi, N. K, i saradnici, 2002*). Rješavanje jednačina ovog tipa zahtjeva dosta složen matematički postupak.

Poluteorijski pristup matematičkog modelovanje kinetike osmotskog i konvektivnog sušenja, nudi modele koji su uglavnom dobijeni pojednostavljenim rješenjem drugog *Fick*-ovog zakona. Prednost ovih modela je što ne zahtjevaju mnogo vremena za proračun, ali se mogu primjenjivati samo u opsegu parametara sušenja za koji su izvedeni. Primjer ovakvog pristupa su jednačine (3.23 i 3.24) (*Rastogi, N. K, i saradnici, 2002*).

$$M_r = 1 - 4 \cdot \left(\frac{D_{ew} \cdot \tau}{\pi \cdot l^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.23)$$

$$S_r = 1 - 4 \cdot \left(\frac{D_{es} \cdot \tau}{\pi \cdot l^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.24)$$

gdje je: M_r – difundovana voda [kg_w]; S_r – difundovani rastvorak [kg_{sm}], τ – vrijeme, l – polovina debljine ravne ploče, a_w i a_s - vrijednosti koeficijena difuzije vode i rastvorka [m^2/s].

Empirijski modeli se dobijaju na osnovu rezultata laboratorijskih mjerenja promjene mase uzorka tokom vremena, koji se obavljaju pod kontrolisanim uslovima. Ovakvi modeli direktno povezuju vlažnost sa vremenom sušenja, a koeficijenti u funkcijama nemaju fizičko značenje. Prikazi ovih modela u literaturi su brojni, a uobičajen naziv za njih je korelaciona jednačina. Većina istraživača poredi veći broj različitih modela sa ciljem pronalaženja modela koji će najbolje aproksimirati eksperimentalne rezultate.

Najjednostavniji od ovih modela je *Hawkes*–ov. Upotrebljen je za korelaciju sa eksperimentom dobijenih podataka gubitka vode, osmotski sušenih uzoraka jabuke. Vrijednosti koeficijena korelacije, za različite eksperimentalne jedinice kretali su se: $r_1 = 0,972$, $r_2 = 0,967$ i $r_3 = 0,944$, a korelacioni izraz je slijedeći (*Reppa, A, i saradnici, 1998*):

$$WL = K_w \cdot t^{\frac{1}{2}} \quad (3.25)$$

gdje je: WL – gubitak vode [kg_w/kg]; K_w – koeficijent prenosa molekula vode, τ – vrijeme [min].

Chaffer, M, i saradnici, (1998) su modifikovali *Hawkes* –ov model i ispitili njegovo slaganje sa eksperimentalnim podacima osmotski sušene kore pomorandže (*jednačine 3.26 i 3.27*). Korišćene su dvije vrste rastvorka. Rastvor je zagrijavan na tri različite vrijednosti temperature. Praćen je gubitak vode i povećanje suve materije tokom 180 minuta trajanja svake eksperimentalne jedinice. Rezultati su pokazali veliko odstupanje predložene funkcije od eksperimentalnih vrijednosti.

$$WL = K_w \cdot t^{\frac{1}{2}} + K_{w0} \quad (3.26)$$

$$SG = K_s \cdot t^{\frac{1}{2}} + K_{s0} \quad (3.27)$$

gdje je: WL – gubitak vode [kg_w/kg]; SG – priraštaj suve materije [kg_{sm}/kg]; K_w , K_s - konstante funkcije koja reflektuju vrijednost intenzitet prenosa mase; K_{w0} - konstanta funkcije koja predstavlja vrijednosti sniženja vlažnosti uzorka tokom kratkih vremenskih intervala; K_{s0}

– konstanta funkcije koje predstavlja vrijednost suve materije uzorka tokom kratkih vremenskih intervala; τ – vreme [min]

Babić, Ljiljana i saradnici, (2004) su ispitali dva modela eksponencijalnih jednačina, u kojima su uticajni faktori osmotskog sušenja temperatura rastvora i koncentracija rastvora, u nekom vremenu trajanja procesa (*jednačine 3.28 i 3.29*). Obavljeno je testiranje modela. Koeficijenti korelacije iznosili su $r = 0,9672$ (*jednačina 3.28*) i $r = 0,685$ (*jednačina 3.29*)

$$\Delta\omega = \omega_0 - \omega_\tau = A \cdot \tau^n \left(\frac{t}{t_0}\right)^{n_2} \cdot \left(\frac{c}{c_0}\right)^{n_3} \quad (3.28)$$

$$\Delta\omega = \omega_0 - \omega_\tau = A \cdot e^n \tau \cdot \left(\frac{t}{t_0}\right)^{n_2} \cdot \left(\frac{c}{c_0}\right)^{n_3} \quad (3.29)$$

gdje je: $\Delta\omega$ – promjena srednje vrijednosti vlažnosti uzorka [%]; ω_0 – početna vlažnost uzorka [%]; ω_τ – važnost uzorka nakon vremena τ [%]; τ - vrijeme [min]; t_0 – referentna temperatura [$^{\circ}$ C]; t - temperatura rastvora [$^{\circ}$ C]; C - koncentracija rastvora [%]; C_0 - maksimalno zasićenje rastvora pri izabranoj temperaturi [%]; A - koeficijent koji zavisi od uslova vođenja eksperimenta; $n1, n2, n3$ - eksponenti funkcije.

Prikazi modela kinetike konvektivnog sušenja u tankom sloju u literaturi su brojni. U tabeli (3.4) je dat prikaz poluteorijskih i empirijskih modela koji se najčešće koriste za matematičko modelovanje konvektivnog sušenja voćnog tkiva sa opšte prihvaćenim literaturnim nazivom modela.

Osnovna jednačina poluteorijskih modela konvektivnog sušenja biomaterijala u tankom sloju je *Lewis* -ova. Model *Lewis* -a nije precizan, u početnim fazama sušenja precjenjuje brzinu sušenja, dok sa druge strane podcjenjuje vrijednosti pri kraju procesa sušenja. Kao korekcija predloženi su modeli: *Page*-a, modifikovana *Page*-a, *Henderson and Pabis*, *Midilli* i drugi. U literaturi pojedini autori nabrojane modele koji su pokušaj unapređenja *Lewis* modela, nazivaju i empirijskim modelima (*Vega-Galvez, A, i saradnici, 2008; Panagiotou, N. M, i saradnici, 1998; Singh, B, Gupta, A. K, 2007; Simal, S, i saradnici, 2005; Park, K. J, 2002*).

Tabela 3.4. Pregled poluteorijskih i empirijskih modela kinetike konvektivnog sušenja voća u tankom sloju (Pavkov, I. 2012)

R.br	Jednačina modela	Naziv modela	Literatura
Poluteorijski modeli			
1.	$MR = \exp(-k\tau)$	Lewis (Newton)	Lewis, W.K, 1921
2.	$MR = \exp(-k\tau^n)$	Page	Page, G. E, 1949
3.	$MR = \exp(-(k\tau)^n)$	Modifikovani Page	Overhults, D. G, i sar. 1973
4.	$MR = a \exp(-k\tau)$	Henderson and Pabis	Henderson S.M, Perry R..L, 1976.
5.	$MR = a \exp(-k\tau) + c$	Logaritamski	Yagcioglu, A, i sar. 1999.
6.	$MR = a \exp(-k_0\tau) + b \exp(-k_1\tau)$	“Two – term”	Henderson, S. M, 1974.
7.	$MR = a \exp(-k\tau)^n + b\tau$	Midilli	Midilli, A, i sar. 2002.
8.	$MR = a \exp(-k\tau) + (1 - a) \exp(-kb\tau)$	Diffusion approach	Kassem, A. S., 1998.
9.	$MR = a \exp(-k\tau) + (1 - a) \exp(-g\tau)$	Verma	Verma, L. R, i sar. 1985.
10.	$MR = a \exp(-k\tau) + b \exp(-g\tau) + c \exp(-h\tau)$	Modifikovani Henderson and Pabis	Karathanos, V. T. 1999.
11.	$MR = a \exp(-k\tau) + (1 - a) \exp(-ka\tau)$	Two term exponencijalni	Sharaf-Eldeen, Y. I, i sar. 1980.
12.	$MR = a \exp(-c(\tau / L^2))$	Simplified Ficks diffusion (SFFD) equation	Diamante, L. M, Munro, P, A., 1991
13.	$MR = a \exp(-c(\tau / L^2))$	Modifikovani Page equation - II	Diamante, L, M, Munro, P, A., 1993
Empirijski modeli			
14.	$\ln(-\ln MR) = a + b(\ln \tau) + c(\ln \tau)^2$	Diamante	Diamante, L, M. i saradnici, 2010.
15.	$MR = 1 + a\tau + b\tau^2$	Wangh and Singh	Wang, C, Y, Singh, R, P, 1978
16.	$MR = a - b \cdot \exp[-(k \cdot \tau^n)]$	Weibull	Babalıs, S, J, i sar. 2006

Veliki broj autora matematički opisuje kinetiku prenosa mase tokom konvektivnog sušenja voćnog tkiva. Matematičkim modelovanjem za svaku kombinaciju uticajnih faktora sušenja računaju se koeficijenti za predložene modele. Veliki broj matematičkih modela ne donosi direktnu informaciju o vlažnosti voćnog tkiva u posmatranom vremenskom trenutku. Takođe, kod većine modela koji opisuju kinetiku osmotskog sušenja potrebno je za svaku kombinaciju faktora računati koeficijente za predložene modele.

4. RADNA HIPOTEZA

Osmotsko i konvektivno sušenje voćnog tkiva predstavljaju složene procese koji zavise od velikog broja uticajnih faktora. Pojedini uticajni faktori utiču na promjene fizičkih osobina voćnog tkiva tokom osmotskog i konvektivnog sušenja. Na osnovu ovih konstatacija postavljene su hipoteze istraživanja.

Pretpostavlja se da brzina sušenja i zapreminsko skupljanje četvrtina dunje zavise od temperature osmotskog rastvora, koncentracije osmotskog rastvora tokom osmotskog sušenja i ukupnog vremena trajanja procesa. Značajnost uticaja ovih faktora na osmotsko sušenje će biti provjerena disperzionom analizom rezultata faktornog eksperimenta osmotskog sušenja četvrtina dunje. Regresionom analizom utvrdiće se matematički modeli kinetike osmotskog sušenja.

Kod konvektivnog sušenja četvrtina dunje, pretpostavka je da brzina sušenja i zapreminsko skupljanje zavise od slijedećih uticajnih faktora: faktora osmotskog predtretmana, temperature i brzine kretanja vazduha za konvektivno sušenja. Značajnost uticajnih faktora na konvektivno sušenje će biti provjerena disperzionom analizom rezultata faktornog eksperimenta konvektivnog sušenja četvrtina dunje. Regresionom analizom utvrdiće se matematički modeli kinetike konvektivnog sušenja.

5. MATERIJAL I METOD ISTRAŽIVANJA

5.1. Materijal istraživanja

U eksperimentalnom dijelu istraživanja kao osnovni materijal korišćeni su plodovi voćne vrste dunje, sorte *leskovačka*. Svježi plodovi dunje su nabavljeni iz okoline Novoga Sada. Za eksperimentalni dio istraživanja plodovi su korišćeni u obliku četvrtina. Četvrtine dunje su bile oljuštene, sa odstranjenom sjemenom ložom. Srednja masa cijelog ploda u prvoj godini istraživanja je bila $m_{sr1} = 179,95$ g, a u drugoj godini $m_{sr2} = 289,8$ g. Plodovi su bili u fazi pune tehnološke zrelosti, sa pokožicom limunasto žute boje, a meso je bilo kiselkasto sa finom aromom (*slika 5.1*).



Slika 5.1. Plod dunje sorte leskovačka (foto: Stojanović, Č, 2010)

Osmotski rastvor je pravljen od saharoze kao rastvorka i destilovane vode kao rastvarača. Saharozu je bila u obliku konzumnog šećera koji je komercijalno najdostupniji. Osmotski rastvor je korišćen kao radni fluid tokom osmotskog sušenja.

Kao antioksidaciona i antibakterijska zaštita korišćen je sumpor dioksid, koji je generisan sagorijevanjem tehničkog sumpora u prahu.

5.2. Metod istraživanja

Eksperimentalni dio istraživanja je podijeljen na eksperiment osmotskog i eksperiment konvektivnog sušenja dunje u obliku četvrtina, što je predstavljalo dvije međusobno povezane cijeline. Posebna pažnja je posvećena izboru uticajnih faktora i određivanju njihovih nivoa tokom osmotskog i konvektivnog sušenja. Prilikom izvođenja eksperimenata osmotskog i konvektivnog sušenja korišćen je višefaktorni metod.

Na osnovu prikupljenih informacija o dunji kao voćnoj vrsti, tehnologiji njene pripreme za sušenje, uticaju osmotskog i konvektivnog sušenja na promjenu fizičkih osobina voćnog tkiva i na osnovu niz drugih informacija napravljen je plan istraživanja. Planom istraživanja je obuhvaćeno slijedeće:

- izbor uticajnih faktora i određivanje njihovih nivoa za eksperiment osmotskog sušenja,
- izbor uticajnih faktora i određivanje njihovih nivoa za eksperiment konvektivnog sušenja,
- priprema biomaterijala za osmotsko sušenje,
- priprema osmotske sušare i osmotskog rastvora,
- priprema biomaterijala za konvektivno sušenje,
- priprema konvektivne sušare,
- metod mjerenja mjerodavnih veličina i
- postupak obrade podataka.

5.2.1. Izbor uticajnih faktora i plan eksperimenta osmotskog sušenja

Eksperiment je isplaniran tako da se za svaku eksperimentalnu jedinicu osmotskog sušenja rade dva ponavljanja. Zbog prirode eksperimenta i nemogućnosti očuvanja originalnih svojstava dunje, eksperimenti su obavljeni u dvije godine u periodu nakon sazrijevanja dunja, u prvoj polovini novembra.

Na osnovu literaturnih podataka koja su nastala ispitivanjem osmotskog sušenja može se primjetiti da postoji veliki broj faktora koji utiču na osmotsko sušenje. Najuticajni faktori su: temperatura rastvora, koncentracija rastvora, vrijeme trajanja osmotskog sušenja, brzina strujanja rastvora, početna vlažnost voćnog tkiva, vrsta voćnog tkiva, oblik i dimenzija voćnog tkiva i drugi faktori koji u manjoj mjeri utiču na kinetiku osmotskog sušenja. Na osnovu dosadašnjih ispitivanja osmotskog sušenja dunje (*Babić, M, i saradnici, 2007 i 2008; Stojanović, Č, 2010*) i drugih literaturnih izvora, kao uticajni faktori izabrani su temperatura rastvora, koncentracija

rastvora i vrijeme sušenja. Svaki od navedenih faktora je variran na dva nivoa. Korišćene temperature rastvora za osmotsko sušenje su 40°C i 60°C. Takođe, koncentracija rastvora je varirana na dva nivoa, 50°Bx i 65°Bx. Vrijeme trajanja procesa osmotskog sušenja je usvojeno 100 i 180 minuta.

Mjerenje osnovnih fizičkih osobina prilikom osmotskog sušenja obavljeno je po jednom u svakoj godini ispitivanja, za svaku moguću kombinaciju uticajnih faktora. Za mjerenje veličina bitnih za kinetiku osmotskog sušenja odabrano je po 8 četvrtina ploda, za svaku eksperimentalnu jedinicu. Ostatak pripremljenih četvrtina se koristio za jednu eksperimentalnu jedinicu konvektivnog sušenja. U svakoj godini eksperimentalnog ispitivanja obavljano je mjerenje po 8 eksperimentalnih jedinica, odnosno za dvije godine je urađeno mjerenje fizičkih osobina za 16 eksperimentalnih jedinica osmotskog sušenja. Plan rada eksperimentalnih jedinica osmotskog sušenja na osnovu usvojenih nivoa uticajnih faktora je dat u tabeli (5.1).

Tabela 5.1. Raspored eksperimentalnih jedinica osmotskog sušenja na osnovu uticajnih faktora

Eksperimentalna jedinica	Temperatura rastvora (°C)	Koncentracija rastvora (°Bx)	Vrijeme trajanja procesa (min)	Godina izvođenja eksperimenta
EO ₁	40	50	100	2009
EO ₂	40	50	180	2009
EO ₃	60	50	100	2009
EO ₄	60	50	180	2009
EO ₅	40	65	100	2009
EO ₆	40	65	180	2009
EO ₇	60	65	100	2009
EO ₈	60	65	180	2009
EO ₉	40	50	100	2010
EO ₁₀	40	50	180	2010
EO ₁₁	60	50	100	2010
EO ₁₂	60	50	180	2010
EO ₁₃	40	65	100	2010
EO ₁₄	40	65	180	2010
EO ₁₅	60	65	100	2010
EO ₁₆	60	65	180	2010

5.2.2. Izbor uticajnih faktora i plan eksperimentalnih jedinica konvektivnog sušenja

Svaka eksperimentalna jedinica konvektivnog sušenja je ponavljana dva puta, pa je ovaj process obavljan u dvije godine. Literaturna istraživanja su pokazala da je veliki broj faktora koji utiču na kinetiku konvektivnog sušenja voćnog tkiva u tankom sloju. To su: temperature vazduha za sušenje, brzina vazduha ispred sloja materijala, primjenjeni predtretman, vrsta voćnog tkiva, dimenzije i oblik voćnog tkiva i početna vlažnost voćnog tkiva. Na osnovu dosadašnjih rezultata ispitivanja konvektivnog sušenja voćnog tkiva, eksperiment konvektivnog sušenja dunje u obliku četvrtina je izveden kao trofaktorni. Odabrani uticajni faktori su: primjenjeni predtretman, temperature vazduha za sušenje i brzina strujanja vazduha ispred sloja.

Primjenjeni predtretman voćnog tkiva za konvektivno sušenje variran je na četiri nivoa: Predtretman I, II, III i IV sa dodatkom kontrolne grupe (tabela 5.2). Kontrolna grupa čini voćno tkivo koje je posle sumporisanja postavljeno u eksperimentalnu konvektivnu sušaru, bez osmotskog sušenja.

Tabela 5.2. Vrste predtretmana za konvektivno sušenje

Predtretman	Vrsta predtretmana
I	Sumporisanje + Osmotsko sušenje ($t_r = 40^{\circ}\text{C}$, $C_r = 50^{\circ}\text{Bx}$, $\tau = 100$ min)
II	Sumporisanje + Osmotsko sušenje ($t_r = 40^{\circ}\text{C}$, $C_r = 50^{\circ}\text{Bx}$, $\tau = 180$ min)
III	Sumporisanje + Osmotsko sušenje ($t_r = 60^{\circ}\text{C}$, $C_r = 65^{\circ}\text{Bx}$, $\tau = 100$ min)
IV	Sumporisanje + Osmotsko sušenje ($t_r = 60^{\circ}\text{C}$, $C_r = 65^{\circ}\text{Bx}$, $\tau = 180$ min)
Kontrolna grupa	Sumporisanje - (Bez osmotskog sušenja)

Temperatura vazduha za sušenje ispred sloja materijala varirana je na dva nivoa, 40°C i 60°C . Brzina vazduha ispred sloja materijala je takođe varirana na dva nivoa, 1 i 1,5 m/s. Početna vlažnost voćnog tkiva jednaka je vlažnosti posle primjenjenog predtretmana. Apsolutna vlažnost vazduha za sušenje ista je apsolutnoj vlažnosti okolnog vazduha, odnosno apsolutnoj vlažnosti vazduha prostorije u kojoj je postavljena sušara. Vrijeme trajanja jedne eksperimentalne jedinice konvektivnog sušenja je 23 časa.

U svakoj sezoni obavljeno je po 20 eksperimentalnih jedinica konvektivnog sušenja. Od toga, 16 eksperimentalnih jedinica sa osmotskim predtretmanom i 4 eksperimentalne jedinice bez predtretmana (kontrolna grupa). Plan eksperimentalnih jedinica konvektivnog sušenja prema uticajnim faktorima je prikazan u tabeli (5.3).

Tabela 5.3. Plan eksperimentalnih jedinica konvektivnog sušenja na osnovu uticajnih faktora

Eksperimentalna jedinica	Korišćeni predtretman	Temperatura vazduha za sušenje (°C)	Brzina vazduha ispred sloja materijala (m/s)	Godina izvođenja eksperimenta
EK ₁	I	40	1	2009
EK ₂	I	40	1,5	2009
EK ₃	I	60	1	2009
EK ₄	I	60	1,5	2009
EK ₅	II	40	1	2009
EK ₆	II	40	1,5	2009
EK ₇	II	60	1	2009
EK ₈	II	60	1,5	2009
EK ₉	III	40	1	2009
EK ₁₀	III	40	1,5	2009
EK ₁₁	III	60	1	2009
EK ₁₂	III	60	1,5	2009
EK ₁₃	IV	40	1	2009
EK ₁₄	IV	40	1,5	2009
EK ₁₅	IV	60	1	2009
EK ₁₆	IV	60	1,5	2009
EK ₁₇	Kontrolna grupa	40	1	2009
EK ₁₈	Kontrolna grupa	40	1,5	2009
EK ₁₉	Kontrolna grupa	60	1	2009
EK ₂₀	Kontrolna grupa	60	1,5	2009
EK ₂₁	I	40	1	2010
EK ₂₂	I	40	1,5	2010
EK ₂₃	I	60	1	2010
EK ₂₄	I	60	1,5	2010
EK ₂₅	II	40	1	2010
EK ₂₆	II	40	1,5	2010
EK ₂₇	II	60	1	2010
EK ₂₈	II	60	1,5	2010
EK ₂₉	III	40	1	2010
EK ₃₀	III	40	1,5	2010
EK ₃₁	III	60	1	2010
EK ₃₂	III	60	1,5	2010
EK ₃₃	IV	40	1	2010
EK ₃₄	IV	40	1,5	2010
EK ₃₅	IV	60	1	2010
EK ₃₆	IV	60	1,5	2010
EK ₃₇	Kontrolna grupa	40	1	2010
EK ₃₈	Kontrolna grupa	40	1,5	2010
EK ₃₉	Kontrolna grupa	60	1	2010
EK ₄₀	Kontrolna grupa	60	1,5	2010

5.2.3. Priprema uzoraka za osmotsko sušenje

Za obavljanje eksperimenta osmotskog sušenja dunje bilo je potrebno izvršiti slijedeće operacije:

- prijem dunje,
- pranje i mjerenje mase dunje,
- uklanjanje ljuske plodova, rezanje na četvrtine i odstranjivanje sjemene lože,
- sumporisanje,
- mjerenja mase uzoraka i
- postavljanje četvrtina dunje u korpu.

Prijem dunje je obavljen u laboratoriji, gdje je potvrđivana autentičnost izabrane sorte. Nakon toga je dunja prebrana, a odvajani su truli plodovi. Ovako prebran biomaterijal je u „holandez“ gajbicama ostavljan u rashladnu komoru na temperature vazduha od $+4^{\circ}\text{C}$ ($\pm 2^{\circ}\text{C}$) i relativnoj vlažnosti vazduha $\approx 75\%$.

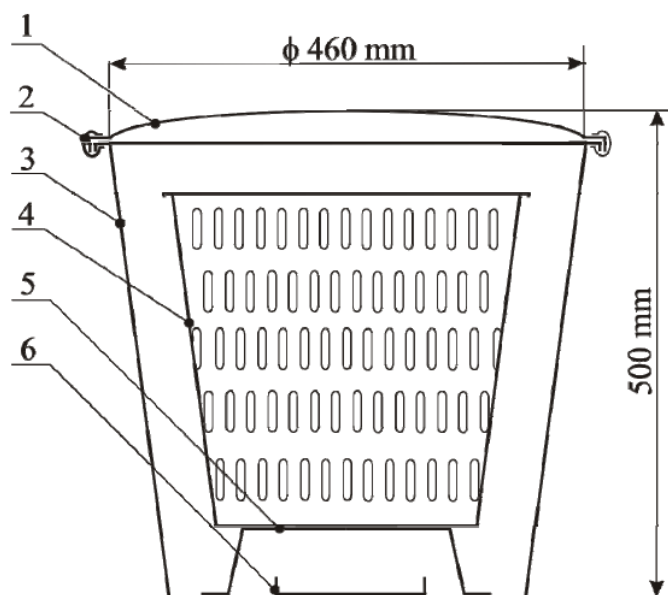
Pranje i mjernje mase dunje je obavljano pred svaku eksperimentalnu jedinicu osmotskog sušenja. Potrebna količina uzorka za jednu eksperimentalnu jedinicu stavljana je u plastičnu posudu, u kojoj je izvršeno ručno pranje pod mlazom vode. Mjerenje mase je obavljano na mehaničkoj vagi sa kružnom skalom.

Uklanjanje ljuske plodova, rezanje na četvrtine i odstranjivanja sjemene lože je obavljeno nakon mjerenja i pranja. Za uklanjanje ljuske korišćena je ručna ljuštilica za voće. Nakon toga su plodovi pomoću kuhinjskog noža sječeni na četvrtine. Najpogodniji način odstranjivanja sjemenih loža je bio pomoću male metalne kašike, koja je naoštrena po ivici.

Sumporisanje je obavljano suvim postupkom, pomoću sumpordioksida (SO_2), koji je dobijan sagorevanjem sumpora u prahu. Za sumporisanje je korišćeno 1 gram sumpor dioksida na 1000 grama uzorka. Mjerenje mase sumpora obavljeno je na elektonskoj vagi. Vrijeme izlaganja djelovanju SO_2 bilo je 2 časa. Prve godine eksperimenta, za sumporisanje je korišten pomoćni pribor prikazan na slici 5.2.

Procedura za sumporisanje je bila slijedeća: Potrebna količina sumpora sipa se ravnomjerno po dnu metalne pepeljare (poz. 6), pomoću palidrvaca se zapali i odmah nakon toga pepeljara se postavi na dno komore (poz. 3). Zatim se preko pepeljare postavlja metalni stalak (poz. 5), a na njega perforirana plastična posuda (poz. 4) u kojoj se nalaze pripremljene četvrtine dunje. Komora se zatim zatvara poklopcem (poz. 1) sa zakačaljka (poz. 2), koje obezbeđuju njenu

hermetičnost. Komora i poklopac komore su izrađeni od djelimično providne plastike. Ovo je omogućavalo vizuelnu provjeru uspješnosti sagorjevanja sumpora u prahu, pojavom dima u posudi.



*Slika 5.2. Komora za sumporisanje sa pomoćnim priborom (Pavkov, I, 2007))
(1 – poklopac komore, 2 – zakačaljka, 3 – komora, 4 – perforirana posuda,
5 – stalak, 6 – pepeljara)*

U drugoj godini eksperimenta sumporisanje materijala je obavljano u namjenskoj komori za sumporisanje KS 80 (slika 5.3.) Namjenska komora za sumporisanje voća KS 80 ima kapacitet 80 kg voća, povrća ili drugog biomaterijala (Babić, M, 2011). Osnovni elementi konstrukcije su ložište, komora za biomaterijal i ekshaustorski elemenat. Ložište se nalazi u donjem djelu uređaja, a zadatak mu je da obezbjedi kvalitetno i pouzdano sagorjevanje predviđene količine tehničkog sumpora u prahu. Komora za smještaj voća ili drugog materijala koji se tretira, nalazi se na središnjem dijelu uređaja. Poprečne dimenzije komore u koju se postavljaju „holandez” gajbice su 510x310 mm, a visina je 1700 mm. Ona je projektovana tako da se može smjestiti 20 „holandez“ gajbica, dimenzija 485x298x100 mm. Ekshaustorski uređaj, koji se nalazi na gornjem djelu ovog tehnološkog uređaja, ima zadatak da obezbjedi hermetičnost za vrijeme tretmana, te kvalitetno i potpuno odvođenje gasova iz komore, nakon završetka tretmana. Originalnost konstrukcije je iskazana u komori za smještaj materijala i konceptu ekshaustorskog uređaja.



Slika 5.3. Namjenska komora za sumporisanje voća KS 80 (Babić, M, 2011)

Sumporisanje se obavljalo tako što je potrebna količina pripremljenog materijala postavljena u „holandez“ gajbice. Nakon toga su gajbice stavljane u komoru za biomaterijal i zatvarana su vrata komore. Pošto je materijal bio spreman za sumporisanje, tehnički sumpor se pomoću palidrvca palio u malom ložištu. Korišćena količina tehničkog sumpora je bila 1 gram na 1 kilogram materijala. U toku sumporisanja svi zasuni su bili zatvoreni, što je obezbjeđivalo potpunu hermetičnost. Proces je trajao 2 sata, nakon čega je uključen ekshaustorski uređaj da bi se odveo sumpor dioksid iz komore. Nakon odvođenja sumpor dioksida četvrtine dunja su odnošene na ispiranje.

Ispiranje i priprema uzorka obavljano je po završetku sumporisanja. Skidan je poklopac komore, iz posude je ručno izuziman sumporisani biomaterijal. U toku izuzimanja vizuelno je provjeravana uspješnost sumporisanja, na osnovu boje biomaterijala. Uziman je uzorak za mjerenje vlažnosti voćnog tkiva neposredno prije osmotskog sušenja (početna vlažnost). Biomaterijal je premještan u plastičnu posudu namjenjenu za ispiranje. Posle ispiranja odmjerena je masa potrebna za jednu eksperimentalnu jedinicu osmotskog sušenja. Mjerenje mase je obavljeno na mehaničkoj vagi.

Postavljanje četvrtina dunje u korpu je bila poslednja pripremna operacija biomaterijala prije osmotskog sušenja. Četvrtine dunje su iz posude za ispiranje premještane u donji dio korpe osmotske sušare, a nakon osmotskog procesa u konvektivnu sušaru. Kod eksperimentalnih jedinica gdje su mjerene fizičke osobine tokom osmotskog sušenja, odabrano je 8 četvrtina dunja na kojim su mjerene fizičke osobine. Odabrane četvrtine su zatim obilježavane usjecanjem malih zareza oblik trougla, a zatim im je mjerena masa, najveća dimenzije i sopstvena zapremina. Odabrani uzorci se stavljaju u dva posebna dijela sa pregradama (po četiri komad), koji se prilikom osmotskog sušenja stavljaju u gornji dio korpe.

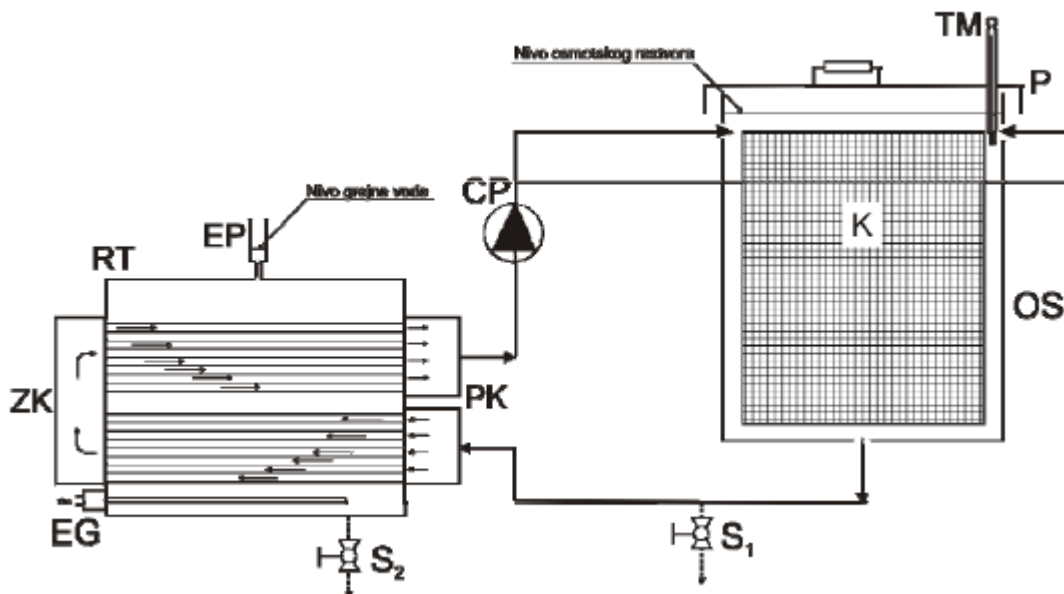
5.2.4. Priprema osmotske sušare i osmotskog rastvora

Eksperimenti osmotskog sušenja su obavljani u eksperimentalnoj osmotskoj sušari, koja je projektovana i instalisana u laboratoriji Departmana za poljoprivrednu tehniku, Poljoprivrednog fakulteta u Novom Sadu (*Babić, M, 2004*).

Prilikom projektovanja i izrade sušare sa toplotnim agregatom poštovani su slijedeći kriterijumi, koje sušara treba da ispuni:

- simulacija realnih procesa osmotskog sušenja,
- mogućnost jednostavne kontrole i održavanja uticajnih faktora eksperimenta na zadatom nivou,
- kretanje osmotskog rastvora kroz sloj materijala,
- mogućnost uzimanja uzoraka bez prekidanja procesa,
- upotreba materijala za izradu iz grupe dozvoljenih u industriji hrane,
- jednostavna separacija materijala i osmotskog rastvora na kraju procesa i
- stabilan rad i dobro zaptivanje svih spojeva.

Izvedena eksperimentalna osmotska sušara, poluindustrijskog tipa, prikazana je šematski na slici 5.4. Sušara je projektovana iz tri cijeline, koje su međusobno spojene cijevima sa pribudnicama. Prvu cijelinu čini komora za sušenje, drugu cirkulaciona pumpa, a treću razmjenjivač toplotne energije. Pored pomenutih cjelina, osmotska sušara kao nezavisni dio ima korpu za smještaj materijala za sušenje.



Sl. 5.4. Šematski prikaz eksperimentalne sušare za osmotsko sušenje, poluindustrijskog tipa (Babić, M, i saradnici, 2004)

(OS – komora za sušenje, P – poklopac sa rukohvatom, CP – cirkulaciona pumpa, RT – razmjenjivač toplote (zagrejač rastvora), TM – živin termometar, K – korpa, EG – električni grijač sa termostatom, S₁, S₂ – slavine, EP – otvorena ekspanziona posuda, PK – prednja komora razmjenjivača, ZK – zadnja komora razmjenjivača, → smer strujanja osmotskog rastvora)

Komora za sušenje je u obliku cilindričnog suda sa poklopcem. Na komori postoje tri otvora, jedan na dnu i dva u gornjem dijelu. Otvori se nastavljaju cijevima sa priрубnicama, koje su zavarene za komoru. Komora je izrađena od nerđajućeg čeličnog lima, debljine 0,5 mm.

Korpa predstavlja nezavisan dio i služi za smještaj materijala za sušenje. Ona se sa gornje strane komore spušta ili vadi iz komore za sušenje. Izrađena je od čeličnih nerđajućih profila kružnog poprečnog preseka (ϕ 4 mm), međusobno povezanih u obliku cilindra sa poklopcem. U gornjem dijelu korpe se nalaze dva nosača sa pregradama. Svaki nosač ima po četiri pregrade u koje se smješta materijal za mjerenje fizičkih osobina.

Cirkulaciona pumpa je smještena na cijevnom T-komadu sa priрубnicama i sastoji se iz radnog kola, koje je montirano na vratilo elektromotora.

Razmjenjivač toplote se sastoji iz kućišta, električnog grijača sa termostatom, prednje i zadnje komore i otvorene ekspanziona posude. U metalnom kućištu nalaze se paralelni redovi cijevi od nerđajućeg čelika, koji su kružnog poprečnog presjeka. Ispod zadnjeg poklopca nalazi se električni grijač sa termostatom, snage 1,2 kW. Ekspanziona posuda je na gornjem dijelu kućišta i služi za kompenzaciju promjene zapremine grejne vode. Zapremina vodenog dijela

razmjenjivača je 4.000 cm³. Ukupna zapremina prostora u kome se nalazi osmotski rastvor iznosi 35.000 cm³.

Princip rada eksperimentalne osmotske sušare se zasniva na cirkulaciji osmotskog rastvora kroz razmjenjivač toplote i komoru za sušenje voća. Prije procesa osmotskog sušenja, za svaki eksperiment je bilo potrebno pripremiti rastvor na zadatu koncentraciju i temperaturu.

Priprema rastvora na određene koncentracije se obavljala kao priprema svježeg rastvora ili korigovanje iskorišćenog rastvora. Svjež rastvor je dobijan rastvaranjem saharoze u destilovanoj vodi. Na osnovu poznate vrijednosti koeficijenta rastvorljivosti, iz jednačine 5.1. dobijen je odnos saharoze i destilovane vode. Za koncentraciju osmotskog rastvora 50°Bx, na 1 kg destilovane vode rastvoreno je 1 kg kristal šećera, a za koncentraciju 65°Bx na 1 kg destilovane vode rastvoreno je 1,857 kg kristal šećera. Rastvaranje je obavljano u dvije metalne posude zapremine 10 litra, gdje je nasipana izmjerena masa vode i saharoze. Rastvor je predgrijavan pomoću električnog rešoa i miješan do potpunog rastvaranja saharoze, a zatim je sipan u osmotsku sušaru. Postupak rastvaranja je ponavljan sve do postizanja radne zapremine rastvora u osmotskoj sušari .

$$C = \frac{m_s}{m_s + m_{H_2O}} \cdot 100 \quad (5.1)$$

gdje je: C – koncentracija rastvora [°Bx]; m_s – masa saharoze [kg_s]; m_{H_2O} – masa vode [kg_w];

Pošto je isti osmotski rastvor korišćen za obavljanje više eksperimentalnih jedinica bilo je potrebno korigovati koncentraciju rastvora. Korigovanje se sastojalo u razblaživanju ili ugušćavanju rastvora. Za razblaživanje rastvora je dodavana destilovana voda, a za ugušćavanje dodavana saharoza. Potrebne količine ove dvije komponente izračunavane su prema izvedenim jednačinama (*Priručnik za industriju šećera, 1980*):

$$\Delta m_s = \frac{m_{r0} \cdot (C - C_0)}{100 - C} \quad (5.2)$$

$$\Delta m_{H_2O} = \frac{m_{r0} \cdot (C_0 - C)}{C} \quad (5.3)$$

gdje je: Δm_s – razlika mase rastvorka koju je potrebno dodati u rastvor [kg_s], $+\Delta m_{H_2O}$ – višak vode u iskorišćenom rastvoru [kg_w], m_{r0} – masa svježeg rastvora u osmotskom postrojenju [kg], C_0 – koncentracija iskorišćenog rastvora [°Bx],

Koncentracija iskorišćenog rastvora (C_0) je dobijana mjerenjem pomoću digitalnog refraktometra.

Pripremljeni osmotski rastvor zagrijava se do zadate temperature u eksperimentalnoj osmotskoj sušari. Zagrijavanje osmotskog rastvora se ostvaruje indirektno, posredstvom dvoprolaznog cijevnog razmjenjivača. U kućištu razmjenjivača se nalazi voda koja se zagrijava pomoću električnog grijača. Toplota prelazi sa vode na spoljnu površinu cijevi, preko koje struji osmotski rastvor.

Nakon pripreme osmotskog rastvora na određenu temperaturu i koncentraciju, u osmotsku sušaru je postavljena korpa sa pripremljenim četvrtinama dunje. Korpa je tako postavljena da je potpuno uranjana u pripremljen osmotski rastvor. Ovo predstavlja početak osmotskog sušenja za određenu eksperimentalnu jedinicu.

5.2.5. Priprema uzoraka dunje za konvektivno sušenje

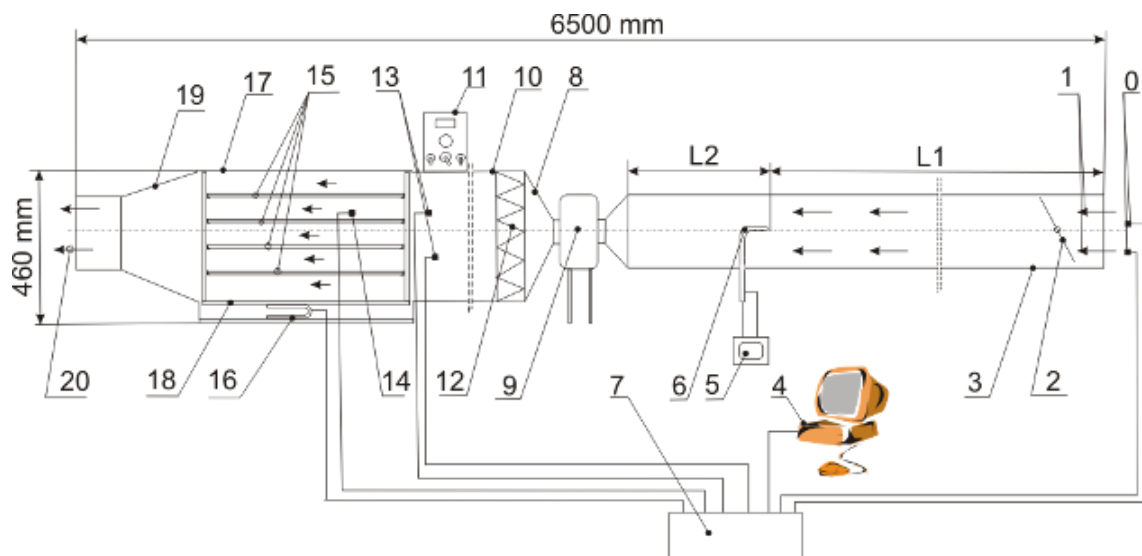
Po završetku osmotskog sušenja korpa sa četvrtinama dunje se pažljivo vadi iz osmotske sušare i priprema se za konvektivno sušenje. Prvo su četvrtine dunje namjenjene za konvektivno sušenje izvađene iz korpe. Nakon toga su odabrana tri reprezentativna uzorka za mjerenje vlažnosti, gravimetrijskom metodom. Izmjerena vlažnost je usvojena kao početna vrijednost za konvektivno sušenje. Zatim, na mehaničkoj vagi sa kružnom skalom je mjerena masa četvrtina dunje za konvektivno sušenje. Izmjerene četvrtine su ravnomjerno raspoređene na četiri ljese, sa jednakim međusobnim rastojanjima. Od poređanih četvrtina dunje odabrano je 10 uzoraka, gdje je svakom izmjerena dužina, masa i zapremina. Poslije mjerenja uzorci su vraćeni na mjesto odakle su uzeti i bilježena je pozicija izmjenjenog uzorka. Nakon konvektivnog sušenja urađena su mjerenja istih veličina sa zabilježenim uzorcima. Nakon završene pripreme, ljese sa poređanim četvrtinama dunje su odnošene na konvektivno sušenje.

5.2.6. Priprema konvektivne sušare za sušenje

Eksperimenti konvektivnog sušenja četvrtina dunje su obavljani u eksperimentalnom postrojenju za konvektivno sušenje IVA-2, koje je projektovano i instalisano na Departmanu za poljoprivrednu tehniku, Poljoprivrednog fakulteta u Novom Sadu (*Pavkov, I, 2008*). Ovo laboratorijsko postrojenje obezbjeđuje:

- kontinualno mjerenje promjene vlažnosti istraživanih materijala bez prekida procesa sušenja,
- automatsko bilježenje svih podataka bitnih za istraživanje kinetike konvektivnog sušenja i
- ostvarivanje preciznih parametara procesa sušenja u radnom prostoru sušare.

Laboratorijsko postrojenje za konvektivno sušenje IVA-2, sastoji se iz dvije cjeline. Prvu cjelinu čini laboratorijska sušara, u kojoj se obavlja proces konvektivnog sušenja. Drugu cijelinu čine senzori za mjerenje relevantnih veličina bitnih za kinetiku konvektivnog sušenja i mjerna akvizicija za sakupljanje izmjerenih podataka. Principijelna šema postrojenja prikazana je na slici 5.5.



Slika 5.5. Šema laboratorijskog postrojenja IVA-2 (Pavkov, I, 2008)

0 – termoparovi, 1 – smjer strujanja vazduha, 2 – klapna, 3 – cijev, 4 – računar, 5 – diferencijalni mikromanometar, 6 – Pitot cijev, 7 – mjerna akvizicija, 8 – difuzor, 9 – ventilator, 10 – kanal grijača, 11 – električni ormar, 12 – električni grijač, 13, 14 – termoparovi, 15 – ljesa, 16 – senzor za mjerenje mase, 17 – radna komora sušare, 18 – nosač ljesa, 19 – konfuzor, 20 – izlaz vazduha, L1 i L2 – karakteristične dimenzije, ← - smjer strujanja vazduha

Laboratorijska sušara se sastoji iz: radne komore, nosača ljesa, ljesa, ventilatora, kanala grijača, električnog grijača, cijevi, električnog ormara, difuzora i konfuzora. Sušara je u obliku kanala ukupne dužine 6500 mm. Sušara je sastavljena iz više manjih segmenata koji su spojeni razdvojitivim vezama.

Radna komora sušare je prostor u koji su smješteni nosači ljesa, na koje se ređaju ljesa. Nosač ljesa je izrađen tako da omogućuje izbor broja ljesa i različit razmak između ljesa. Ovo omogućuje sušenje materijala različitih dimenzija sa različitim rasporedom i opterećenjem po jednoj ljesi. Na nosač ljesa se može postaviti maksimalno osam ljesa. Dimenzije jedne ljesa su 440 x 290 mm. Materijal od koga su izrađene ljesa, nosač ljesa i komora za sušenje je nerđajući čelik.

Na radnu komoru sa jedne strane pomoću vijaka pričvršćen je kanal grijača, a sa druge strane konfuzor. U kanalu grijača je smješten električni induktivno otporni grijač, čija je instalisana

snaga 6,4 kW. Zagrijavanje vazduha ostvaruje se strujanjem vazduha preko električnog grijača. Dimenzije kanala grijača su 300 x 300 x 1500 mm. Kroz konfuzor, vazduh izlazi iz radne komore sušare u okolinu.

Strujanje vazduha kroz eksperimentalnu laboratorijsku sušaru ostvareno je pomoću centrifugalnog ventilatora. Na usisnoj strani ventilatora smještena je plastična cijev, prečnika $\phi 160$ mm i dužine 2500 mm u kojoj je ugrađen zasun. Ova cijev služi za homogenizovanje polja brzine vazduha, te za tačno mjerenje njene vrijednosti. Ventilator je na potisnoj strani preko difuzora povezan sa kanalom grijača. Regulacija protoka vazduha kroz sušaru, obavlja se statorskim prigušivanjem pomoću zasuna. Pored prigušivanja pomoću zasuna, postoji precizna regulacija protoka. Precizna regulacija protoka, obavlja se promjenom broja obrtaja radnog kola ventilatora pomoću električnog potenciometra.

Radom sušare se upravlja iz električnog ormara u kome su instalirani kontroler, potenciometar i ostala neophodna električna instalacija.

Drugu cjelinu laboratorijskog postrojenja čini mjerna akvizicija za snimanje izmjerenih podataka i senzori za mjerenje mase, temperature i diferencijalnog pritiska.

Mjerna akvizicija ima mogućnost istovremenog mjerenja različitih veličina. Radom mjerne akvizicije upravlja računarski program LabView 8.6, koji omogućuje veliki izbor načina snimanja podataka, frekvenciju snimanja izmjerenih podataka, softverski format snimljene baze podataka i oblik grafičkog prikazivanja izmjerenih vrijednosti. Računarski program radi pod Microsoft Windows operativnim sistemom na standardnom računaru i omogućuje trenutno praćenje izmjerenih veličina na monitoru računara.

Senzor za mjerenje mase smješten je u radnu komoru sušare i povezan je pomoću vijaka sa nosačem ljesa. Nosač ljesa prenosi masu materijala za sušenje na senzor za mjerenje mase u obliku sile pritiska.

Senzori za mjerenje temperature su termoparovi K-tipa. Na sušari je postavljeno pet termoparova koji su raspoređeni u različitim tačkama. Mjerenje temperature okolnog vazduha koji ulazi u sušaru obavlja se u dvije tačke. Takođe, temperatura zagrijanog vazduha za sušenje na ulazu u sloj materijala se mjeri u dvije tačke. Na sušari je moguće mjeriti temperature tkiva materijala koji se suši, pomoću termopara koji se postavlja u materijal ispod gornje površine na željenu dubinu. Svih pet termoparova su povezani na mjernu akviziciju, koja bilježi izmjerene vrijednosti temperature sa zadatom frekvencijom.

Za svaku eksperimentalnu jedinicu konvektivnog sušenja bilo je potrebno obaviti pripremu konvektivne sušare. Priprema se obavljala tako što su prazne ljese pažljivo postavljane na nosač ljesa, tako da ne dodiruju zidove ili vrata sušare. Nakon zatvaranja vrata komore sušare i provjeravanja zaptivenosti, uključuje se ventilator sušare. Uključivanjem ventilator sušare pristupalo se podešavanju određenih parametara konvektivnog sušenja prema zadatim vrijednostima

Prvo je podešavana brzina vazduha za sušenje, tako što u osu cijevi je postavljena Prantld – ova cijev na koju je povezan diferencijalni manometar, pomoću čega je mjereno dinamički pritisak. Na osnovu izračunate vrijednosti dinamičkog pritiska za željenu brzinu vazduha ispred sloja materijala (jednačina 5.4), urađeno je izjednačavanje izmjenjenog i računskog pritiska.

$$p_d = \frac{\left[\frac{v \cdot \rho_{v(1)} \cdot A_{ks}}{\alpha \cdot \rho_{v(0)} \cdot \frac{d_c^2 \pi}{4}} \right]^2}{2} \cdot \rho_{v(0)} \quad (5.4)$$

gdje je: p_d - dinamički pritisak vazduha [Pa], v – brzina vazduha za sušenje [m/s], d_c - prečnik cijevi kod eksperimentalne konvektivne sušare [mm], A_{ks} – površina kanala konvektivne sušare ispred sloja materijala [m²], ρ_v - gustina vazduha [kg/m³], α – odnos brzine vazduha u mernoj tački i srednje brzine vazduha u usisnom kanalu konvektivne sušare

Korekcija vrijednosti hidrauličnog pritiska je obavljena pomoću zasuna, a precizna korekcija urađena je promjenom broja obrtaja radnog kola ventilatora. Kada su se izjednačile vrijednosti izmjenjenog i računskog dinamičkog pritiska konstatovano je da je ostvarena zahtjevana brzina vazduha ispred sloja materijala.

Nakon što je podešena brzina vazduha za sušenje ispred sloja materijala, uključuju se grijači sušare. Na kontroleru je zadavana željena vrijednost temperature vazduha ispred sloja materijala. Postizanjem zadate vrijednosti temperature vazduha, ponovo je urađena provjera izmjerene vrijednosti dinamičkog pritiska vazduha, a po potrebi je urađena korekcija. Korekcije temperature vazduha i dinamičkog pritiska su izvođene sve dok se vrijednosti nisu bile identične sa planom eksperimenta.

Kad je završeno sa podešavanjem parametara sušenja, pristupalo se pripremi mjerne akvizicije za snimanje podataka. Prvi korak je bio da se obavi tariranje vage, tako što se vrijednost izmjerene mase praznih ljesa dovodi na nulu. Slijedeći korak je bio vađenje ljesa iz konvektivne sušare i postavljanje pripremljenih četvrtina dunje na ljese. Nakon toga, ljese sa postavljenim

četvrtinama dunje su vraćane u komoru za sušenje. Zadnji korak je startovanje namjenskog računarskog programa koji upravlja radom mjerne akvizicije i snima izmjerene vrijednosti parametara procesa neophodne za analizu kinetike konvektivnog sušenja.

5.2.7. Metod mjerenja mjerodavnih uticajnih fizičkih veličina i tačnost mjerenja

Planom istraživanja predviđeno je mjerenje veličina značajnih za analizu kinetike kombinovanog sušenja dunje u obliku četvrtina. Mjerenje mjerodavnih veličina se može podijeliti na tri etape:

- mjerenje mjerodavnih fizičkih veličina svježeg materijala,
- mjerenje fizičkih veličina osmotskog sušenja koji su definisani kao uticajni faktori i
- mjerenje fizičkih veličina tokom konvektivnog sušenja koji su definisani kao uticajni faktori.

Pregled svih mjerenih veličina prikazani su u tabeli 5.4. U tabeli su dati nazivi instrumenata koji su korišćeni, podaci o mjernom opsegu instrumenata, rezolucija očitavanja, tačnost mjerenja i vrijednost maksimalne slučajne greške koja je mogla nastati tokom mjerenja. Podaci o tačnosti mjernog instrumenta preuzimani su iz tehničke dokumentacije instrumenta.

Tabela 5.4. Pregled svih mjerenih veličina tokom eksperimenta kombinovanog sušenja

R. br.	Mjerena veličina	Koriš oznaka	Jedinica	Naziv instrumenta, proizvođač, model	Opseg mjerenja, rezolucija, tačnost instrumenta	Slučajna greška mjerenja maks. vrijednost
1.	Dimenzije cijelog ploda dunje	A_{pb} B_{pb} C_{pl}	mm	Pomično mjerilo, TMA INOX, D-6-1, Njemačka	0 - 200 mm, 0,1 mm, $\pm 0,05$ mm	0,103%
2.	Masa cijelog ploda dunje	m_{pl}	g	Mehanička vaga, Libela“ – Celje, tip „Maxima L“,	0 – 10 kg , ± 5 g.	-
3	Masa četvrtine dunje	$m_{\check{c}}$	g	Elektronska vaga, KERN 440-33N, Njemačka	0 - 200 g, 0,01g, $\pm 0,02$ g	0,027%
4.	Masa uzoraka za jednu eksperiment. jedinicu	m	kg	Mehanička vaga, Libela“ – Celje, tip „Maxima L“,	0 – 10 kg , ± 5 g.	-
5.	Vlažnost četvrtine dunje – metod 1	ω	%	1. Laboratorijska sušnica STERMATIC ST-11, “Instrumentaria”, Zagreb 2. Elektronska vaga, KERN 440-33N, Njemačka	0 - 200 g, 0,01g, $\pm 0,02$ g	0,2%
6.	Vlažnost četvrtine dunje – metod 2	ω	%	Uređaj za mjerenje vlažnosti, , KERN, MLB 50-3HA160N, Njemačka	0 - 50 g, 0,001 g, $\pm 0,003$ g	0,033%
7.	Najveća dimenzija četvrtine dunje – osmotsko sušenje	a_o	mm	Pomično mjerilo, TMA INOX, D-6-1, Njemačka	0 - 100 mm, 0,1 mm, $\pm 0,05$ mm	0,103%
8.	Zapremina četvrtine dunje – osmotsko sušenje	V_o	cm ³	Staklena menzura 500 ml i elektronska vaga KERN 440-47N	2000 g; 0,1 g, $\pm 0,2$ g	0,625%
9.	Temperatura osmotskog rastvora	t_r	°C	Živin termometar; TLOS, HRK-4 1001, Zagreb	0 - 110°C, 1°C, $\pm 0,5$ °C	0,5%
10.	Koncentracija osmotskog rastvora	C_r	°Bx	Digitalni refraktometar, „ATAGO“ – Japan, model PAL - α	0-85°Bx, 0,1 °Bx, $\pm 0,1$ °Bx	0,25%
11.	Gustina osmotskog rastvora	ρ_r	kg/m ³	Staklena menzura 500 ml, Elektronska vaga KERN 440-47N	0- 500 ml, 10 ml, ± 5 ml 2000 g; 0,1 g, $\pm 0,2$ g	Mjerenje zapremine: 1%, Mjerenje mase: 0,034%
12.	Zapremina osmotskog rastvora u osmotskoj sušari	V_r	dm ³	Mjerna metalna traka	0 – 5000 mm, 10 mm, ± 1 mm	0,125%
13.	Mjerenje vremena, osmotsko sušenje	τ_o	min	Digitalni ručni sat sa štopericom i alarmom	0 – 60 min, 0,1 s, $\pm 0,1$ s	0,083%

14.	Temperatura suvog termometra - okolni vazduha	t_{st}	$^{\circ}C$	Termopar K-tipa ne izolovan, Mantel, Njemačka	-40 – 375 $^{\circ}C$, 0,1 $^{\circ}C$, $\pm 0,5^{\circ}C$	5%
15.	Temperatura vlažnog termometra - okolni vazduh	t_{vt}	$^{\circ}C$	Termopar K-tipa ne izolovan sa kondicionerom – vlažnom krpicom, Mantel, Njemačka	-40 – 375 $^{\circ}C$, 0,1 $^{\circ}C$, $\pm 0,5^{\circ}C$	5%
16.	Tempertaura suvog i vlažnog termometra – okolni vazduh	t_{st} i t_{vt}	$^{\circ}C$	Psihrometar sa živinim termometrima, CF Casella and CO. LTD, London, Engleska	suvi: 0 - 110 $^{\circ}C$, 1 $^{\circ}C$, $\pm 0,5^{\circ}C$ vlažni: 0 - 110 $^{\circ}C$, 1 $^{\circ}C$, $\pm 0,5^{\circ}C$	0,5%
17.	Temperatura vazduha ispred sloja materijala – instrument 1	t_{kl}	$^{\circ}C$	Termopar K-tipa ne izolovan, Mantel, Nemačka	-40 – 375 $^{\circ}C$, $\pm 1,5^{\circ}C$	3,75%
18.	Temperatura vazduha ispred sloja materijala – instrument 2	t_{kl}	$^{\circ}C$	Živin termometar; Tlos, HRK – 4 - 1001, Zagreb	0 - 110 $^{\circ}C$, 0,1 $^{\circ}C$, $\pm 0,05^{\circ}C$	0,125%
19.	Temperatura voćnog tkiva (četvrtine) – konvektivno sušenje	t_m	$^{\circ}C$	Termopar K-tipa ne izolovan, Mantel, Njemačka	-40 – 375 $^{\circ}C$, $\pm 0,5^{\circ}C$	3,75%
20.	Dinamički pritisak vazduha	p_d	Pa	Prandtl cijev, ϕ 4mm, Digitalni diferencijalni mikromanometar, Testo 521, sa dodatkom senzora za precizna mjerenja No: 06381447	0 - 1000 Pa, 0,1 Pa, $\pm 0,2$ Pa	0,8%
21.	Mjerenje vremena, konvektivno sušenje	τ_k	h	Notebook računar HP T5470, USA, softver LabView 8.6, USA	0 – ∞ h, 0,001 s, ± 0 s	0%
22.	Najveća dimenzija četvrtine dunje – konvektivno sušenje	a_k	mm	Pomično mjerilo, TMA INOX, D-6-1, Nemačka	0 - 100 mm, 0,1 mm, $\pm 0,05$ mm	0,103%
23.	Zapremina četvrtine dunje–konvektivno sušenje	V_k	cm^3	Staklena menzura 500 ml i Elektronska vaga KERN 440-47N,	0 – 500 ml, 2000 g; 0,1 g, $\pm 0,2$ g	0,625%
24.	Masa materijala (četvrtine dunje) u konvektivnoj sušari	m_k	g	Senzor za mjerenje mase, HBM, model PW6CC3MR, Njemačka, mjerna akvizicija NI 622225, , Notebook računar HP T5470, USA, softver LabView 8.6, USA	0 – 20 kg, 0,01 g, ± 2 g.	0,18%

Mjerenje mjerodavnih fizičkih veličina svježih uzoraka dunje

Na osnovu plana istraživanja, prvo su obavljena mjerenja na svježim plodovima dunje. Svake istraživačke godine, metodom slučajnog uzorka je odabrano deset plodova na kojima su urađena planirana mjerenja. Izmjerene vrijednosti su upisivane u pripremljene tabele.

Karakteristične dimenzije svježih plodova, dužina (A_{pl}), širina (B_{pl}) i debljina (C_{pl}) su izmjerane pomoću pomičnog mjerila, (Moshenin, N, 1980; Babić Ljiljana i Babić, M, 2000).

Randman plodova određen je mjerenjem mase cijelog ploda (m_{pl}) i mase upotrebljivog tkiva-mezokarpa (m_{tk}), pomoću elektronske vage.

Vlažnost svježeg materijala mjerena je termogravimetrijskom metodom, pri tome je korišćena laboratorijska sušnica i metalne aluminijumske posudice sa poklopcem. Svježi uzorci uzimani su od više različitih plodova i sjeckani su na sitne kockice pomoću metalnog sječiva - skalpela. Radi dobijanja homogenog uzorka kockice su pomiješane i ravnomjerno raspoređene u tri metalne posudice. Mjerenje mase prazne posudice i posudice sa uzorkom je urađeno na elektronskoj vagi. Pripremljeni uzorci su postavljeni u laboratorijsku sušnicu prethodno zagrijanu na 80°C, a nakon ≈20 h otvarana je sušnica i mjerena je masa posudica sa uzorcima. Zatim su posudice ponovo vraćane na sušenje u vremenu od 2 sata, poslije toga su ponovo mjerene njihove mase. Ako se nije pojavljivala razlika u izmjerenim masama između dva mjerenja, ili je ta razlika bila manja od 0,1% sušenje je prekidano. Izmjerene vrijednosti mase svježeg materijala, bilježene su u pripremljene tabele. Vlažnost svježeg materijala izračunavana je pomoću slijedeće jednačine (Pavkov, I, i saradnici, 2007):

$$\omega_{tk} = \frac{m_0 - m_1}{m_0 - m_p} \cdot 100, \quad (5.5)$$

gdje je: ω_{tk} – vlažnost uzorka voća izražena u odnosu na vlažnu bazu [%]; m_0, m_1 – masa materijala prije i posle sušenja sa posudicom [g]; m_p – masa prazne posudice [g].

Pored standardne termogravimetrijske metode, vlažnost voćnog tkiva mjerena je povremeno pomoću uređaja sa infracrvenim zračenjem. Vrijednosti vlažnosti uzoraka urađenih na ovaj način korišćene su za upoređivanje sa vrijednostima izmjerenim pomoću termogravimetrijske metode. Za mjerenje vlažnosti svježeg voćnog tkiva korišćeni su isti uzorci koji su pripremani za termogravimetrijsku metodu. Uzorak svježeg materijala od ≈ 20 grama postavlja se u uređaj. Završetak sušenja je nakon 60 minuta od poslednje promjene mase uzorka. Po isteku zadatog vremenskog kriterijuma na displeju uređaja je ispisana vrijednost izmjerene vlažnosti uzorka svježe dunje, u odnosu na vlažnu osnovu. Izmjerena vrijednost je upisivana u pripremljene tabele i upoređivana sa vrijednostima izmjerenim termogravimetrijskom metodom.

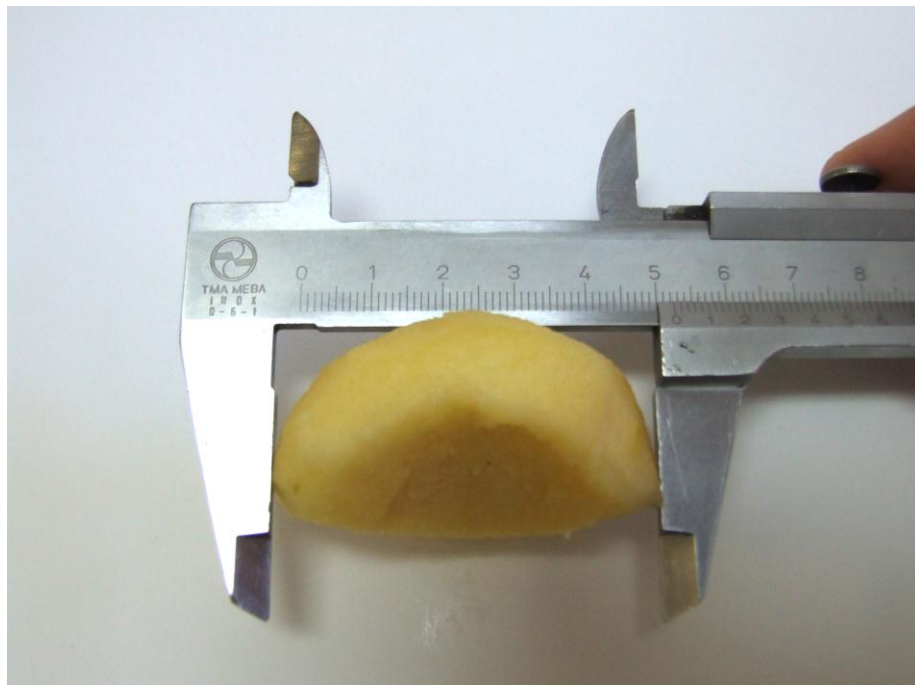
Mjerenje fizičkih veličina tokom osmotskog sušenja četvrtina dunje

Postavljenim planom istraživanja, za proces osmotskog sušenja predviđena su mjerenja osnovnih fizičkih svojstava četvrtine dunje i osmotskog rastvora.

Prije početka svake eksperimentalne jedinice osmotskog sušenja odabrani su reprezentativni uzorci četvrtina dunje, za mjerenje vlažnost termogavometrijskom metodom, opisanom u prethodnom poglavlju. Nakon pripreme četvrtina dunje za eksperimentalnu jedinicu, odabirano je 8 uzoraka koji su služili za mjerenje planiranih fizičkih osobina. Prvo je urađeno početno mjerenje planiranih fizičkih veličina na odabranim uzorcima: najveća dimenzija svježeg uzorka ($a_{o(0)}$), masa svježeg uzorka ($m_{o(0)}$) i zapremina svježeg uzorka ($V_{o(0)}$). Izmjerene vrijednosti su upisivane u pripremljenim tabelama. Nakon toga odabrani uzorci se stavljaju u dva nosača sa pregradama (po 4 uzorka), koji se prilikom osmotskog sušenja stavljaju u gornji dio korpe. Ostatak uzoraka se stavlja na dno korpe osmotske sušare.

Vremenski razmak prilikom mjerenja fizičkih osobina, koje karakterišu osmotsko sušenje je bio 20 minuta. Obavljano je mjerenje sledećih fizičkih osobina: najveća dimenzija – dužina ($a_{o(i)}$), vlažnost ($\omega_{o(i)}$) i sopstvena zapremina ($V_{o(i)}$). Mjerenje se obavljalo tako što su dva nosača sa pregradama sa odabranim uzorcima vađeni iz osmotske sušare. Po redoslijedu mjerenja, svaki uzorak se pažljivo spolja izbriše peškirom da bi se uklonio višak rastvora. Nakon mjerenja navedenih fizičkih osobina, uzorak se vraća na svoje mjesto u pregradni dio. Ovako opisano mjerenje se ponavlja svakih 20 minuta do kraja procesa.

Mjerenje najveće dimenzije uzorka - dužine se obavljalo pomoću pomičnog mjerila (slika 5.6).



Slika 5.6. Mjerenje najveće dimenzije uzorka

Izmjerene vrijednosti najveće dimenzije četvrtina dunje su upisivane u pripremljene tabele. Na osnovu izmjerene vrijednosti najveće dimenzije prije sušenja i izmjerene vrijednosti tokom sušenja izračunavana je relativna promjena dimenzije prema slijedećem izrazu (Babić, M, 2008):

$$\Delta a = \frac{(a_0 - a_i)}{a_0} \cdot 100 [\%] \quad (5.6)$$

gdje je: Δa – relativna promjena dužine uzorka [%]; a_0 – dužina uzorka na početku osmotskog sušenja [mm]; a_i – dužina uzorka nakon i – tog vremena osmotskog sušenja [mm].

Mjerenje vlažnosti uzorka tokom osmotskog sušenja se obavljalo tako što se uzorci izvađeni iz osmotske sušare stavljaju na elektronsku vagu, gdje se mjeri njihova masa. Izmjerene vrijednosti mase su upisivane u pripremljene tabele. Na osnovu poznate mase uzorka prije sušenja, mase uzorka prilikom mjerenja u toku sušenja i izmjerene vlažnosti materijala prije sušenja, izračunava se vlažnost uzorka za svako mjerenje (jednačina 5.7) (Babić, Ljiljana, Babić, M, 2000). Pored opisane metode, vlažnost četvrtina dunje je svakih 20 minuta mjerena termogavometrijskom metodom za ostatak uzoraka. Na ovaj način mjerenja, uzorak je metodom slučajnog uzorka uziman sa dna korpe iz osmotske sušare.

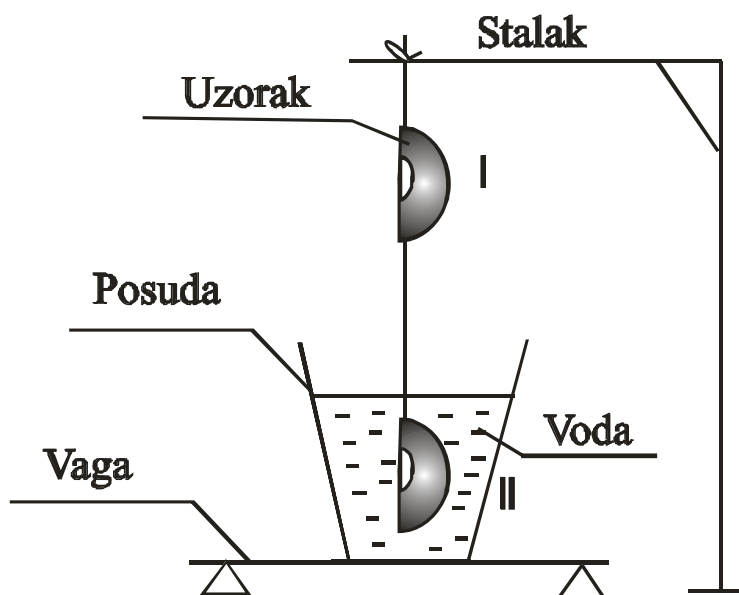
$$\omega_i = \frac{W_i}{m_i} \cdot 100 = \frac{W_0 - \Delta W_i}{m_i} \cdot 100 = \left[\frac{\left(\frac{\omega_0 \cdot m_0}{100} \right)}{m_i} - \frac{(m_0 - m_i)}{m_i} \right] \cdot 100 \quad (5.7)$$

gdje je: ω_i – vlažnost uzorka voća nakon i - tog vremena osmotskog sušenja [%]; ω_0 – vlažnost uzorka voća na početku osmotskog sušenja [%]; m_0 i m_i - masa uzorka na početku osmotskog sušenja i nakon i - tog vremena [g]; W_0 i W_i - masa vlage u uzorku na početku osmotskog sušenja i nakon i - tog vremena [g].

Mjerenje zapremine uzoraka dunje je urađen metodom uranjanja u tečnost. Za ovu metodu potrebno je elektronska vaga, staklena posuda i metalna tanka žica. U staklenu posudu sipana je destilovana voda do određenog nivoa, vodeći računa da ne dođe do preljevanja tečnosti iz menzure kada se zaroni uzorak. Posuda sa tečnošću postavljena je na elektronsku vagu i odmjerevana je masa M_I . Nakon toga, uzorak je pomoću tanke metalne žice uranjan u vodu tako da u potpunosti bude zaronjen, pri tome ne smije dodirivati dno ili bočne strane posude. Na ovaj način izmjerena je masa M_{II} (slika 5.6.). Na bazi ta dva mjerenja i na osnovu Arhimedovog zakona izračunavana je zapremina po sledećoj jednačini (Babić, M, i Babić, Ljiljana 2003; Mohsenin, 1980):

$$V_{o(i)} = \frac{M_{II} - M_I}{\rho_{H_2O}} \quad (5.8)$$

gdje je: $V_{o(i)}$ – zapremina uzorka u i – tom vremenu osmotskog sušenja [dm^3]; M_I – masa posude sa tečnošću [g]; M_{II} – masa posude sa tečnošću poslije zaranjanja uzorka [g]; ρ_{H_2O} – gustina vode [g/dm^3]



Slika 5.7. Postupak određivanja zapremine četvrtina dunje
I – položaj prije zaranjanja, II – položaj poslije zaranjanja

Promjena zapremine prilikom osmotskog sušenja je definisana terminom zapreminsko skupljanje, a izračunava se prema sledećem izrazu (Babić, M, i saradnici, 2008) :

$$SV = \frac{V_{o(0)} - V_{o(i)}}{V_{o(0)}} \cdot 100\% = \frac{\Delta V_o}{V_{o(0)}} \cdot 100\% \quad (5.9)$$

gdje je: SV – zapreminsko skupljanja [%]; $V_{o(0)}$ – zapremina uzorka na početku osmotskog sušenja [dm^3]; $V_{o(i)}$ – zapremina uzorka u i – tom vremenu osmotskog sušenja [dm^3].

Mjerenje temperature i koncentracije rastvora je obavljano da bi se postigli i održali zadati parametri sušenja.

Temperatura rastvora je mjerena pomoću živinog termometra, a mjerenja su obavljana u etapi zagrijavanja rastvora i tokom osmotskog sušenja. Tokom osmotskog sušenja mjerenje temperature rastvora obavljano je svakih 20 minuta, neposredno prije uzimanja uzoraka za mjerenje fizičkih osobina.

Mjerenje koncentracije osmotskog rastvora prije i u toku osmotskog sušenja je obavljano pomoću digitalnog refraktometra (slika 5.8). Metod mjerenja se obavljao tako što je uzorak uziman iz osmotske sušare pomoću staklene pipete, a zatim sipan u staklenu menzuru zapremine 500 ml. Kada se uzorak osmotskog rastvora ohladio na okolnu temperaturu obavljeno je mjerenje koncentracije. Koncentracija osmotskog rastvora mjerena je na početku osmotskog sušenja i na svakih 20 minuta tokom trajanja procesa.



Slika 5.8. Digitalni refraktometar "Atago", Japan

Gustina osmotskog rastvora mjerena je zapreminskom metodom pomoću graduisane staklene menzure. U staklenu menzuru rastvor je usipan iz osmotske sušare i očitavana je zapremina. Nakon toga je mjerena masa rastvora pomoću elektronske vage. Na osnovu poznavanja ovih dviju vrijednosti izračunata je gustina prema jednačini 5.10. (Babić, M, Babić, Ljiljana, 2007).

$$\rho_r = \frac{m_r}{V_r} \quad (5.10)$$

gdje je: ρ_r – gustina rastvora na posmatranoj temperaturi [g/dm^3]; m – masa rastvora u menzuri [g]; V_s – zapremina rastvora u menzuri [dm^3]

Mjerenje veličina tokom konvektivnog sušenja četvrtina dunje

Prilikom konvektivnog sušenja četvrtina dunje obavljena su mjerenja fizičkih osobina uzoraka i parametara procesa konvektivnog sušenja.

Fizičke osobine četvrtina dunje su mjerene prije i nakon procesa konvektivnog sušenja sa deset uzoraka (četvrtina dunje) izabranih slučajnom metodom. Mjerene su sledeće fizičke osobine: najveća dimenzija – dužina (a_k), vlažnost (ω_k) i sopstvena zapremina (V_k).

Mjerenje najveće dimenzije uzorka – dužine (a_k) prije i poslije konvektivnog sušenja, se obavljalo pomoću pomičnog mjerila (slika 5.6).

Zapremina uzoraka dunje (V_k) prije i poslije konvektivnog sušenja, izmjerena je metodom uranjana uzorka u tečnost, kako je već objašnjeno kod osmotskog sušenja.

Mjerenje vlažnosti uzoraka dunje poslije konvektivnog sušenja se obavljalo mjerenjem mase uzoraka na elektronskoj vagi, prije i nakon konvektivnog sušenja. Vlažnost biomaterijala prije konvektivnog sušenja je mjerena termogavometrijskom metodom, a vlažnost uzoraka nakon konvektivnog sušenja je izračunavana na isti način kao kod osmotskog sušenja.

Promjena vlažnosti biomaterijala tokom konvektivnog sušenja praćena je mjerenjem mase četvrtina dunje u laboratorijskoj konvektivnoj sušari IVA-2. Mjerenje mase biomaterijala tokom konvektivnog sušenja obavljalo se kontinualno. Izmjerene vrijednosti mase se koriste za izračunavanje promjene vlažnosti biomaterijala u posmatranom vremenskom trenutku. Masa uzoraka je mjerena pomoću ugrađenog senzora za mjerenje mase. Mjerenje mase uzoraka bilježeno je svakih 60 sekundi od početka procesa, pa do isteka predviđenog vremena konvektivnog sušenja. Računarski softver je sakupljao izmjerene vrijednosti i obavljao njihovo memorisanje. Vlažnost biomaterijala u posmatranom vremenskom trenutku izračunavana je na osnovu slijedećeg izraza (Babić, Ljiljana, Babić, M, 2000):

$$\omega_{k(i)}^s = \frac{(\omega_{k(0)} \cdot m_{k(0)}) - \Delta m_{k(i)}}{(1 - \omega_{k(0)}) \cdot m_{k(i)}} \quad (5.11)$$

gdje je: $\omega_{k(i)}^s$ – vlažnost uzorka u odnosu na suhu bazu nakon i - tog vremena konvektivnog

sušenja [kg_w/kg_{sm}]; $\omega_{(0)k}$ – vlažnost uzorka dunje prilikom odnosu na suhu bazu na početku konvektivnog sušenja [kg_w/kg_{sm}]; $m_{(0)k}$ i $m_{(i)k}$ - masa uzorka na početku konvektivnog sušenja i nakon i - tog vremena [g]; $\Delta m_{k(i)}$ – razlika mase uzorka

Veličine stanja okolnog vlažnog vazduha određivane su psihometrijskom razlikom. Temperatura suvog termometra okolnog vazduha mjerena je pomoću termopara K-tipa. Vrijednosti temperature suvog termometra okolnog vazduha snimane su svakih 60 sekundi tokom 23 h. Temperatura vlažnog termometra okolnog vazduha mjerena je istom metodom kao i

suvog, a razlikuje se po tome što je na vrh termopara postavljena pamučna krpica čiji je suprotni kraj potopljen u posudi sa destilovanom vodom. Snimljene vrijednosti temperatura suvog i vlažnog termometra okolnog vazduha su uprosječene i pomoću računarskog softvera za određivanje stanja vlažnog vazduha, izračunata je srednja apsolutna i relativna vlažnost okolnog vazduha za svaku eksperimentalnu jedinicu konvektivnog sušenja.

Temperatura vazduha ispred sloja materijala mjerena je u dvije tačke pomoću dva termopara. Mjerne tačke termoparova postavljene su neposredno ispred sloja materijala. Izmjerene vrijednosti temperature vazduha su snimane svakih 60 sekundi tokom 23 h.

Temperatura četvrtina dunje mjerena je postavljanjem mjerne tačke termopara u biomaterijal. Odabiran je jedan uzorak (četvrtina dunje) na sredini gornje ljese. Zatim je, vrh termopara pažljivo ubadan u tkivo, na sredini gornje površine, na dubini od ≈ 5 mm. Izmjerene vrijednosti temperature biomaterijala su snimane svakih 60 sekundi tokom 23 h.

Kontrolu mjerenja temperatura sa svim korišćenim termoparovima provjeravana je prije svake eksperimentalne jedinice konvektivnog sušenja. Provjera je obavljena pomoću živinog termometra, na temperaturama vazduha 40 i 60°C u trajanju od 10 minuta za svaku izabranu temperaturu.

Na početku svake eksperimentalne jedinice konvektivnog sušenja je mjerena zadata vrijednost brzina vazduha ispred sloja materijala, a kontrolisana je povremeno u toku sušenja. Mjerenje je obavljeno pomoću *Prandtl* – cijevi i diferencijalnog mikromanometra.

5.2.8. Postupak obrade podataka

Na osnovu izmjerenih vrijednosti fizičkih osobina svježih uzoraka dunje i vrijednosti tokom eksperimenta obavljena je obrada podataka. Postupak obrade podataka se sastojao iz unošenja vrijednosti u pripremljene radne tabele i niza matematičkih operacija. Matematičke operacije su omogućavale da se dođe do cilja disertacije i do provjere hipoteza disertacija. Na slici 5.17 je prikazan opšti algoritam obrade podataka. U algoritmu su ispisane sve neophodne operacije koje su urađene da bi se ostvario cilj rada.

Unošenje podataka u tabele je urađeno u računarskom programu „MS Exel”, gdje su formirana tri vrste osnovnih radnih tabela. Prva vrsta tabela se koristila za unošenje izmjerenih vrijednosti osnovnih fizičkih osobina ploda dunje. Druga vrsta tabela je korišćena za unošenje izmjerenih vrijednosti tokom eksperimenta osmotskog sušenja, dok je treća vrsta tabela korišćena za

unošenje izmjerenih vrijednosti tokom eksperimenta konvektivnog sušenja. Ukupan broj osnovnih radnih tabela nakon unošenja podataka je bilo 58.

Radi lakšeg rada, s obzirom da je ukupno formirano 58 radnih tabela, urađeno je grupisanje podataka. Radne tabele su grupisane u tri grupe:

- osnovne radne tabele fizičkih osobina svježih plodova dunje,
- osnovne radne tabele osmotskog sušenja i
- osnovne radne tabele konvektivnog sušenja.

Ukupno je formirano dvije osnovne radne tabele fizičkih osobina svježih plodova dunje (za svaku godinu istraživanja po jedna). U tabelama su unijete slijedeće izmjerene vrijednosti osnovnih fizičkih osobina plodova dunje: dimenzije cijelog ploda (A_{pl} , B_{pl} , C_{pl}), masa cijelog ploda (m_{pl}), masa korisnog dijela tkiva (m_{tk}), vlažnost svježeg tkiva u odnosu na vlažnu bazu (ω_{tk}), randman, izračunate su srednje vrijednosti i standardno odstupanje.

Osnovne radne tabele za osmotsko sušenje, su formirane po jedna za svaku eksperimentalnu jedinicu osmotskog sušenja u koje su unijete izmjerene vrijednosti fizičkih osobina uzoraka. Prvo su unijete izmjerene vrijednosti osnovnih fizičkih osobina četvrtina dunje prije osmotskog sušenja: najveća dimenzija, masa za određivanje vlažnosti, masa za određivanje zapremine. Nakon toga, unošene su izmjerene vrijednosti osnovnih fizičkih osobina tokom osmotskog sušenja, te izračunavana je promjena najveće dimenzije uzorka, promjena vlažnosti i zapreminsko skupljanje tokom osmotskog sušenja.

Osnovna obrada podataka za osmotsko sušenje je obavljena tako što su na osnovu podataka iz radnih tabela formirani dijagrami kinetike osmotskog sušenja. Svaka eksperimentalna jedinica osmotskog sušenja četvrtine dunje je imala tri dijagrama, koja pokazuju promjenu najveće dimenzije, promjenu vlažnosti, i zapreminsko skupljanje. Ukupno je formirano 48 dijagrama.

Tabela srednjih vrijednosti brzine sušenja četvrtina dunje u odnosu na suhu bazu i zapreminskog skupljanja su baza podataka za statističku obradu rezultata mjerenja osmotskog sušenja, disperzionom analizom. Tabela je formirana tako što su za svaku eksperimentalnu jedinicu osmotskog sušenja unijete srednje vrijednosti brzine sušenja četvrtina dunje u odnosu na suhu bazu (*jednačina 5.12*) i srednje vrijednosti zapreminskog skupljanja.

$$\overline{N}_{\omega_o^s} = \frac{\omega_{o(po\check{c})}^s - \omega_{o(kraj)}^s}{\tau_{o(kraj)} - \tau_{o(po\check{c})}} \left[\frac{kg_w}{kg_{sm} \min} \right] \quad (5.12)$$

gdje je: $\overline{N}_{\omega_o^s}$ - srednja vrijednost brzine osmotskog sušenja [$kg_w/kg_{sm}min$]; $\omega_{o(po\check{c})}^s$ i $\omega_{o(kraj)}^s$ -

vlažnost uzorka u odnosu na suhu bazu osmotskog sušenja na početku i na kraju osmotskog sušenja [kg_w/kg_{sm}]; $\tau_{o(kraj)}$ - vrijeme trajanja eksperimenta osmotskog sušenja [min].

Dispeziom analizom osmotskog sušenja je provjeren uticaj izabranih faktora na kinetiku osmotskog sušenja - provjera prve hipoteze. Disperziona analiza je urađena u računarskom programu Statistica 10 (*StatSoft, Inc, 2010*).

Kao baza regresione analize osmotskog sušenja služila je tabela srednjih vrijednosti promjene vlažnosti četvrtina dunja u odnosu na suhu bazu i srednjih vrijednosti zapreminskog skupljanja četvrtina dunje tokom osmotskog sušenja.

Regresiona analiza osmotskog sušenja je urađena u programskom paketu Statistica 10 (*StatSoft, Inc, 2010*). Za matematičko modelovanje promjene vlažnosti četvrtina dunje u odnosu na suhu bazu i zapreminsko skupljanje uzoraka dunje odabrana su po tri matematička modela. Modeli su prošireni sa uticajem faktora osmotskog sušenja u bezdimenzionalnom obliku za koje je disperziom analizom utvrđeno da su značajni. Za proširene matematičke modele, regresionom analizom određeni su nepoznati koeficijenti i eksponenti modela.

Matematički modeli osmotskog sušenja su služili za provjeru slaganja izračunatih rezultata i rezultata mjerenja eksperimenata osmotskog sušenja. Kao kriterijum za ocjenu preciznosti modela uzeti su: koeficijent korelacije (R), hi - kvadrat (chi-square; χ^2), srednja greška pristrasnosti (mean bias error; MBE) i greška korjena srednjeg kvadrata (RMSE). Na osnovu izračunatih statističkih kriterijuma usvojeni su najprecizniji modeli.

Osnovne radne tabele za konvektivno sušenje su formirane za svaku eksperimentalnu jedinicu po jedna. Baze podataka koje je su snimljene pomoću mjerene akvizicije su kopirane u kolone radnih tabela. Vlažnost četvrtina dunje u određenom vremenskom trenutku je računata na osnovu izmjerene mase uzorka u tom trenutku i vlažnosti na početku konvektivnog sušenja. Pored toga za svaku eksperimentalnu urađena je tabela izmjerenih vrijednosti uzoraka od deset komada voća. Izmjerene su vrijednosti uzoraka na početku i na kraju konvektivnog sušenja i to: masa uzoraka, najveće dimenzije, sopstvena zapremina.

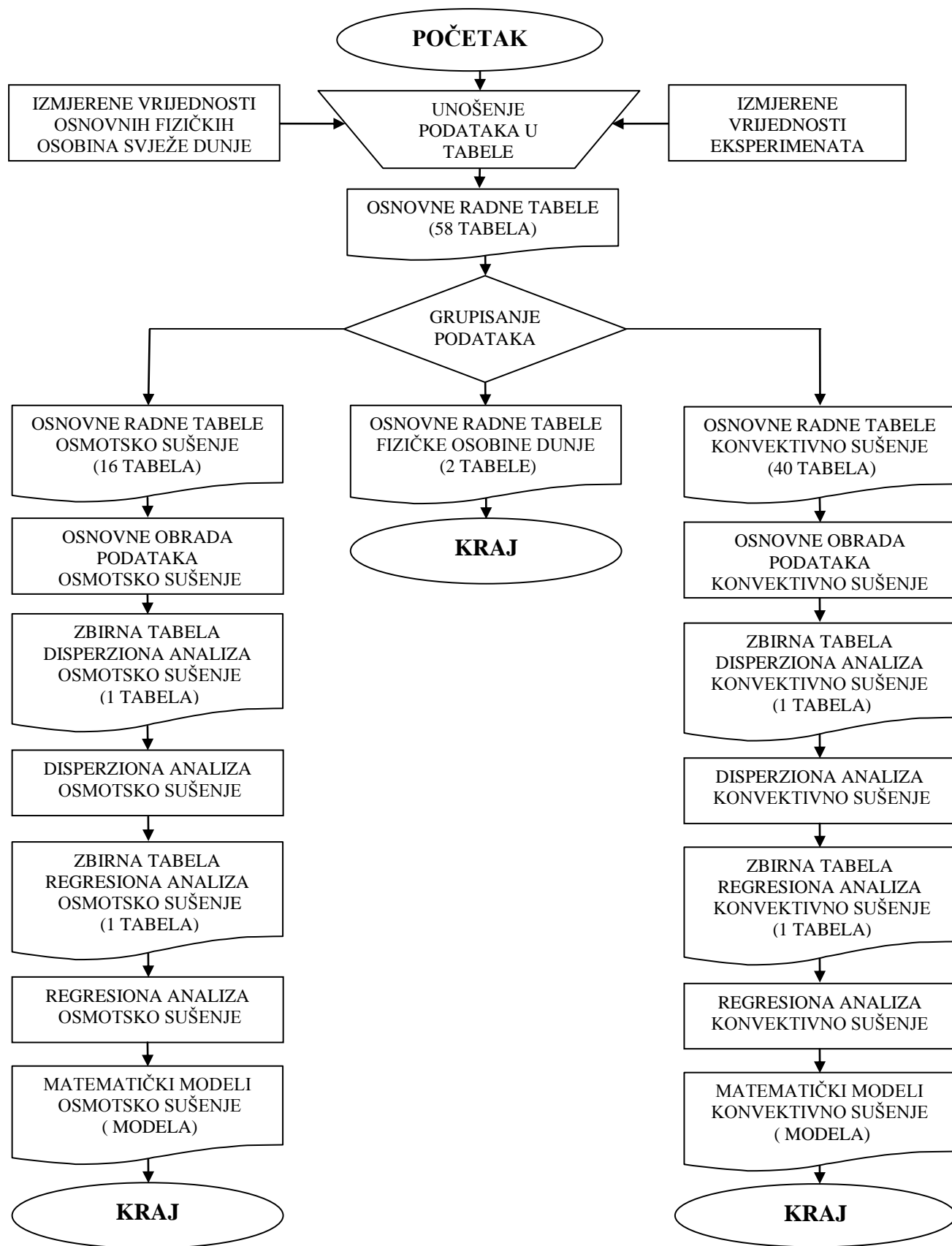
Osnovna obrada podataka za konvektivno sušenje je urađena tako što su na osnovu radnih tabela za konvektivno sušenje formirani dijagrami kinetike konvektivnog sušenja četvrtina dunje. Za svaku eksperimentalnu jedinicu formirani su dijagrami koji pokazuju promjenu vlažnosti, promjenu vlažnosti u odnosu na suhu bazu, brzinu sušenja i brzina sušenja u odnosu na suhu bazu. Ukupno je urađeno 160 dijagrama.

Tabela srednjih vrijednosti brzine sušenja četvrtina dunje u odnosu na suhu bazu i zapreminskog skupljanja su predstavljale bazu podataka za statističku obradu rezultata mjerenja eksperimenta konvektivnog sušenja, disperzionom analizom. Tabela je formirana tako što su za svaku eksperimentalnu jedinicu konvektivnog sušenja unijete srednje vrijednosti brzine sušenja četvrtina dunje u odnosu na suhu bazu i srednje vrijednosti zapreminskog skupljanja.

Disperzionom analizom konvektivnog sušenja je provjeren uticaj izabranih faktora na srednju brzinu konvektivnog sušenja u odnosu na suhu bazu i na zapreminsko skupljanje prilikom konvektivnog sušenja – provjera druge hipoteze.

Kao baza regresione analize konvektivnog sušenja služila je tabela srednjih vrijednosti promjene vlažnosti četvrtina dunja u odnosu na suhu bazu tokom konvektivnog sušenja. Odabrani su tri matematička modela za promjenu vlažnosti četvrtina dunje u odnosu na suhu bazu tokom vremena konvektivnog sušenja. Modeli su prošireni sa uticajem faktora konvektivnog sušenja u bezdimenzionalnom obliku za koje je disperzionom analizom utvrđeno da su značajni. Za proširene matematičke modele, regresionom analizom su određeni nepoznati koeficijenti i eksponenti modela.

Matematički modeli konvektivnog sušenja su služili za provjeru slaganja izračunatih rezultata i rezultata mjerenja eksperimenata konvektivnog sušenja. Kriterijumi za ocjenu kvaliteta modela su isti kao u slučaju modela koji opisuju ponašanje tokom osmotskog sušenja.



Slika 5.17 Algoritam obrade podataka

6. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Na osnovu mjerenja koja su urađena u eksperimentalnom dijelu istraživanja prikupljen je veliki broj podataka o ponašanju dunje u formi četvrtine tokom osmotskog i konvektivnog sušenja. Rezultati mjerenja se mogu svrstati u tri cijeline:

- rezultati mjerenja osnovnih fizičkih osobina dunje,
- rezultati mjerenja tokom osmotskog sušenja četvrtina dunje i
- rezultati mjerenja tokom konvektivnog sušenja četvrtina dunje.

6.1. Rezultati mjerenja osnovnih fizičkih osobina

Mjerenje osnovnih fizičkih veličina svježih plodova dunje je obavljeno prve i druge godine istraživanja, a obavljeno je na slučajnom uzorku od po 10 plodova za svaku godinu istraživanja. Rezultati mjerenja osnovnih fizičkih osobina su data u tabelama 6.1 i 6.2.

Tabela 6.1. Osnovna radna tabela fizičkih osobina svježeg ploda dunje za prvu godinu ispitivanja (2009)

Broj mjerenja	Dužina A_{pl} [mm]	Širina B_{pl} [mm]	Debljina C_{pl} [mm]	Masa cijelog ploda m_{pl} [g]	Masa korisnog tkiva m_{tk} [g]	Vlažnost voćnog tkiva ω_{tk} [%]	Randman [%]
1	78,20	73,10	59,30	171,84	135,33	83,33	78,75
2	77,30	74,50	65,30	186,96	131,46	83,42	70,31
3	76,70	73,70	64,40	181,92	121,90	83,55	67,01
4	71,80	71,70	56,10	158,17	113,90	81,72	72,01
5	75,60	71,80	61,60	187,45	138,56	81,25	73,91
6	77,40	72,10	61,00	182,51	134,50	82,56	73,69
7	81,00	78,90	62,10	205,79	160,39	81,97	77,93
8	76,10	69,50	61,60	165,56	119,79	83,55	72,35
9	75,60	72,80	59,60	163,49	123,90	82,85	75,78
10	79,30	74,50	63,00	195,89	150,90	82,60	77,03
Srednja vrijedn. \bar{X}	76,90	73,26	61,40	179,96	133,06	82,68	73,88
Standardna devijacija S_x	±2,46	±2,48	±2,65	±15,11	±14,36	±0,81	±3,64

Tabela 6.2. Osnovna radna tabela fizičkih osobina svježeg ploda dunje za drugu godinu ispitivanja (2010)

Broj mjerjenja	Dužina A_{pl} [mm]	Širina B_{pl} [mm]	Debljina C_{pl} [mm]	Masa cijelog ploda m_{pl} [g]	Masa korisnog tkiva m_{tk} [g]	Vlažnost voćnog tkiva ω_{tk} [%]	Randman %
1	77,70	74,00	68,00	204,80	150,60	83,48	73,54
2	83,00	84,00	68,90	255,80	184,40	85,05	72,09
3	83,40	83,00	76,00	269,10	205,80	84,68	76,47
4	88,60	84,80	76,00	306,40	229,00	84,55	74,74
5	82,00	80,80	72,00	258,20	188,70	83,8	73,08
6	87,80	80,40	79,20	279,90	197,50	82,35	70,56
7	96,60	94,40	83,60	422,90	318,50	83,45	75,31
8	90,20	87,20	76,20	315,50	223,50	84,25	70,84
9	90,00	83,60	75,70	310,70	232,00	83,25	74,67
10	84,60	81,40	72,50	274,40	202,20	82,24	73,69
Srednja vrijednost \bar{X}	86,39	83,36	74,81	289,77	213,22	83,71	73,5
Standardna devijacija S_x	±5,34	±5,22	±4,67	±56,98	±44,18	±0,95	±1,91

U prvoj godini istraživanja srednje vrijednosti fizičkih osobina svježih plodova su slijedeće: vlažnost voćnog tkiva, $\omega_{tk} = 82,68$ %, dužina, $A_{pl} = 76,9$ mm, širina, $B_{pl} = 73,26$ mm, debljina $C_{pl} = 61,40$ mm, masa cijelog ploda, $m_{pl} = 179,96$ g, masa korisnog tkiva, $m_{kt} = 133,06$ g i randman (73,88 %).

U drugoj godini istraživanja srednje vrijednosti fizičkih osobina svježih plodova su slijedeće: vlažnost voćnog tkiva $\omega_{tk} = 83,71$ %, dužina, $A_{pl} = 86,39$ mm, širina, $B_{pl} = 83,36$ mm, debljina, $C_{pl} = 74,81$ mm, masa cijelog ploda, $m_{pl} = 289,77$ g, masa korisnog tkiva, $m_{kt} = 213,22$ g i randman (73,5 %).

Iz prikazanih podataka se zaključuje da su plodovi bili dosta neujednačeni, gdje su u drugoj godini eksperimentalnog ispitivanja prosječne vrijednosti dimenzija i mase plodova bile veće. Srednja vlažnost svježih plodova je bila viša u drugoj godini, a randman je u obje godine bio približno isti.

6.2. Rezultati mjerenja tokom osmotskog sušenja četvrtina dunje

Svi rezultati mjerenja tokom eksperimenta osmotskog sušenja prikazani su tabelarno i grafički pomoću kinetičkih krivih. U tabele su unošene izmjerene vrijednosti mase za mjerenje vlažnosti, mase za mjerenje zapremine i najveće dimenzije. Na osnovu izmjerenih vrijednosti mase za

mjerenje vlažnosti i mase za mjerenje zapremine izračunate su vrijednosti vlažnosti uzorka i zapreminskog skupljanja uzorka u momentu mjerenja. U tabeli 6.3 prikazani su rezultati za EO₁₆, kao primjer.

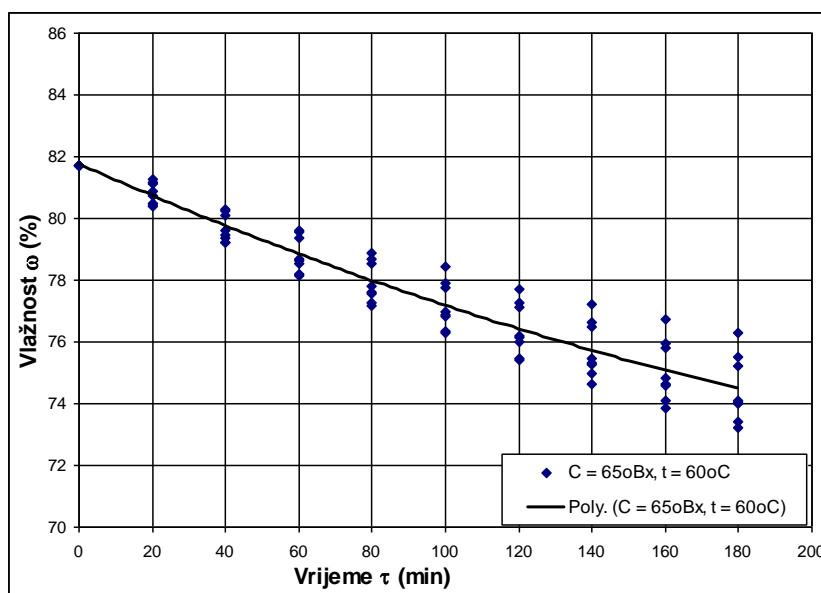
Tabela 6.3. Primjer radne tabele osmotskog sušenja četvrtina dunje, eksperimentalna jedinica EO₁₆ ($t_r = 60\text{ }^\circ\text{C}$, $C_r = 65\text{ }^\circ\text{Bx}$ i $\tau = 180\text{ min}$)

Vrijeme (min)	Redni broj	Dimenzija a [mm]	Masa za određivanje vlažnosti m_w [g]	Masa za određivanje zapremine m_v [g]	Relativno smanjenje dimenzije $(a_0 \cdot a) * 100 / a_0$ [%]	Vlažnost četvrtina dunje ω [%]	Zapreminsko skupljanje $CV = (V_0 - V) * 100 / V_0$ [%]
0	1	65,80	45,52	44,40	0	81,73	0,00
0	2	58,50	42,64	40,80	0	81,73	0,00
0	3	57,10	43,20	40,80	0	81,73	0,00
0	4	63,80	45,41	42,30	0	81,73	0,00
0	5	60,50	36,58	35,50	0	81,73	0,00
0	6	65,90	38,70	36,90	0	81,73	0,00
0	7	62,20	50,70	47,10	0	81,73	0,00
0	8	64,20	42,11	41,60	0	81,73	0,00
20	1	65,10	43,18	41,80	1,06	80,74	5,86
20	2	58,10	41,23	38,80	0,68	81,11	4,90
20	3	56,30	42,09	39,40	1,40	81,25	3,43
20	4	62,90	44,02	40,60	1,41	81,15	4,02
20	5	59,80	34,17	32,50	1,16	80,44	8,45
20	6	65,10	36,05	33,80	1,21	80,39	8,40
20	7	61,70	47,46	43,80	0,80	80,48	7,01
20	8	63,30	40,23	38,80	1,40	80,88	6,73
40	1	63,50	40,35	39,10	3,50	79,39	11,94
40	2	57,50	39,16	36,50	1,71	80,11	10,54
40	3	55,50	39,99	37,30	2,80	80,26	8,58
40	4	61,70	42,12	38,60	3,29	80,30	8,75
40	5	57,50	32,16	30,60	4,96	79,22	13,80
40	6	63,50	34,00	31,30	3,64	79,20	15,18
40	7	60,90	45,13	41,40	2,09	79,48	12,10
40	8	62,40	37,72	35,70	2,80	79,60	14,18
60	1	62,80	38,72	37,30	4,56	78,52	15,99
60	2	57,10	37,78	35,40	2,39	79,38	13,24
60	3	54,80	38,58	35,60	4,03	79,54	12,75
60	4	59,90	40,67	37,20	6,11	79,60	12,06
60	5	56,70	30,58	28,90	6,28	78,15	18,59
60	6	62,40	32,40	30,20	5,31	78,18	18,16
60	7	60,10	43,35	39,70	3,38	78,63	15,71
60	8	61,60	36,07	34,20	4,05	78,67	17,79
80	1	62,20	37,16	35,50	5,47	77,62	20,05
80	2	57,00	36,31	33,60	2,56	78,54	17,65
80	3	53,90	37,04	34,20	5,60	78,69	16,18

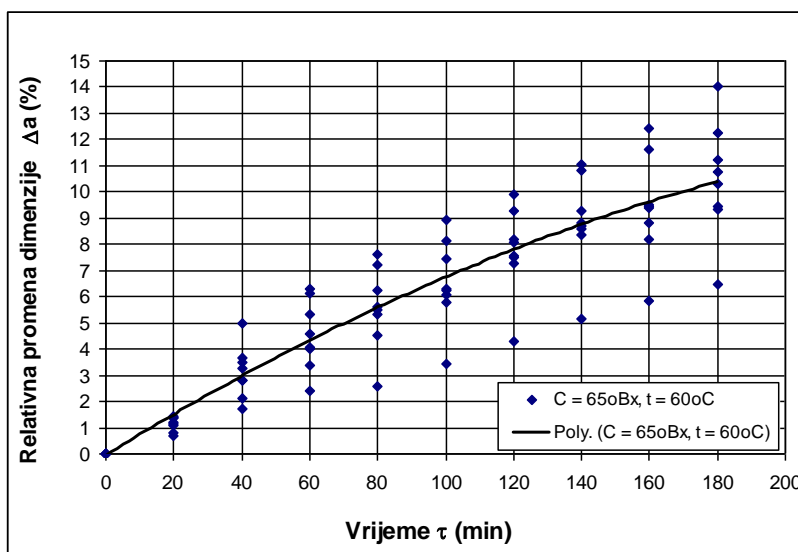
Kinetika kombinovanog sušenja dunje (Cydonia oblonga Mill.)

80	4	59,20	39,32	35,60	7,21	78,90	15,84
80	5	55,90	29,28	27,60	7,60	77,17	22,25
80	6	61,80	31,10	28,70	6,22	77,27	22,22
80	7	59,40	41,25	37,50	4,50	77,54	20,38
80	8	60,80	34,67	32,70	5,30	77,81	21,39
100	1	61,70	35,93	34,30	6,23	76,85	22,75
100	2	56,50	35,04	32,60	3,42	77,77	20,10
100	3	53,50	35,73	32,70	6,30	77,91	19,85
100	4	58,60	38,46	34,90	8,15	78,43	17,49
100	5	55,10	28,18	26,30	8,93	76,28	25,92
100	6	61,00	29,86	27,30	7,44	76,32	26,02
100	7	58,60	40,02	36,40	5,79	76,85	22,72
100	8	60,30	33,44	31,50	6,07	76,99	24,28
120	1	61,00	34,83	33,30	7,29	76,12	25,00
120	2	56,00	34,03	31,40	4,27	77,11	23,04
120	3	52,50	34,75	31,50	8,06	77,29	22,79
120	4	57,90	37,25	33,40	9,25	77,73	21,04
120	5	54,50	27,25	25,50	9,92	75,47	28,17
120	6	60,50	28,77	26,30	8,19	75,42	28,73
120	7	57,50	38,58	34,80	7,56	75,99	26,11
120	8	59,40	32,34	30,60	7,48	76,21	26,44
140	1	60,30	33,67	31,90	8,36	75,30	28,15
140	2	55,50	33,12	30,10	5,13	76,48	26,23
140	3	51,80	33,81	30,50	9,28	76,66	25,25
140	4	56,90	36,40	32,50	10,82	77,21	23,17
140	5	53,80	26,33	24,40	11,07	74,62	31,27
140	6	60,10	28,24	25,50	8,80	74,96	30,89
140	7	56,80	37,44	33,80	8,68	75,26	28,24
140	8	58,70	31,36	29,00	8,57	75,47	30,29
160	1	60,00	32,77	31,20	8,81	74,62	29,73
160	2	55,10	32,17	29,20	5,81	75,78	28,43
160	3	51,70	32,80	29,50	9,46	75,94	27,70
160	4	56,40	35,67	31,90	11,60	76,74	24,59
160	5	53,00	25,55	23,60	12,40	73,84	33,52
160	6	59,70	27,29	24,50	9,41	74,09	33,60
160	7	57,10	36,44	32,80	8,20	74,58	30,36
160	8	58,10	30,54	28,30	9,50	74,81	31,97
180	1	59,60	32,10	30,30	9,42	74,09	31,76
180	2	54,70	31,43	28,50	6,50	75,21	30,15
180	3	50,70	32,20	29,00	11,21	75,49	28,92
180	4	56,00	35,01	31,30	12,23	76,30	26,00
180	5	52,00	24,94	21,40	14,05	73,20	39,72
180	6	59,10	26,59	23,50	10,32	73,41	36,31
180	7	56,40	35,61	31,70	9,32	73,99	32,70
180	8	57,30	29,65	27,20	10,75	74,05	34,62

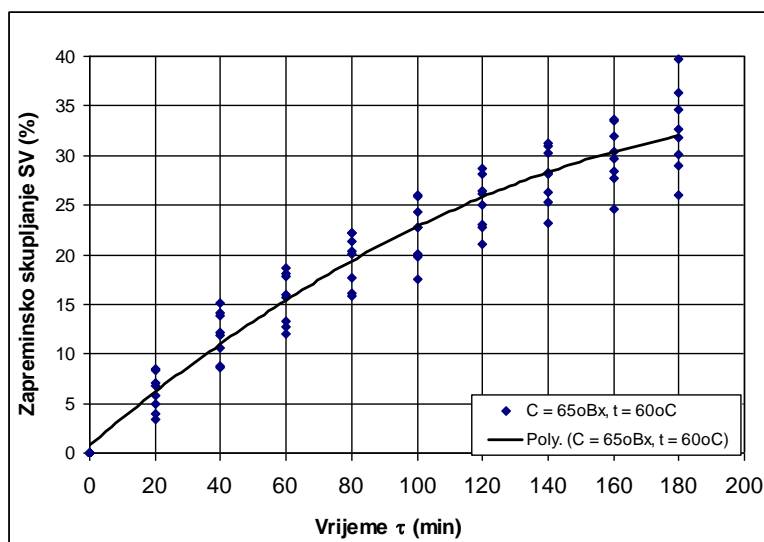
Na osnovu radnih tabela urađeni su dijagrami promjene vlažnosti, najveće dimenzije i zapreminskog skupljanja. Tako je na dijagramima, za svaku izmjerenu veličinu u određenom trenutku mjerenja dobijeno po osam vrijednosti (osam uzoraka). Kinetičke krive su urađene u obliku polinoma drugog reda. Primjer kinetičkih krivih osmotskog sušenja četvrtina dunje, za eksperimentalnu jedinicu EO₁₆ prikazane su na slikama 6.1, 6.2 i 6.3. Rezultati za sve ostale eksperimentalne jedinice osmotskog sušenja u obliku kinetičkih krivi su dati u prilogu.



Slika 6.1. Promjene vrijednosti vlažnosti na uzorku od 8 četvrtina dunje tokom osmotskog sušenja, za eksperimentalnu jedinicu EO₁₆ ($t_r = 60^\circ\text{C}$, $C_r = 65^\circ\text{Bx}$ i $\tau = 180$ min)

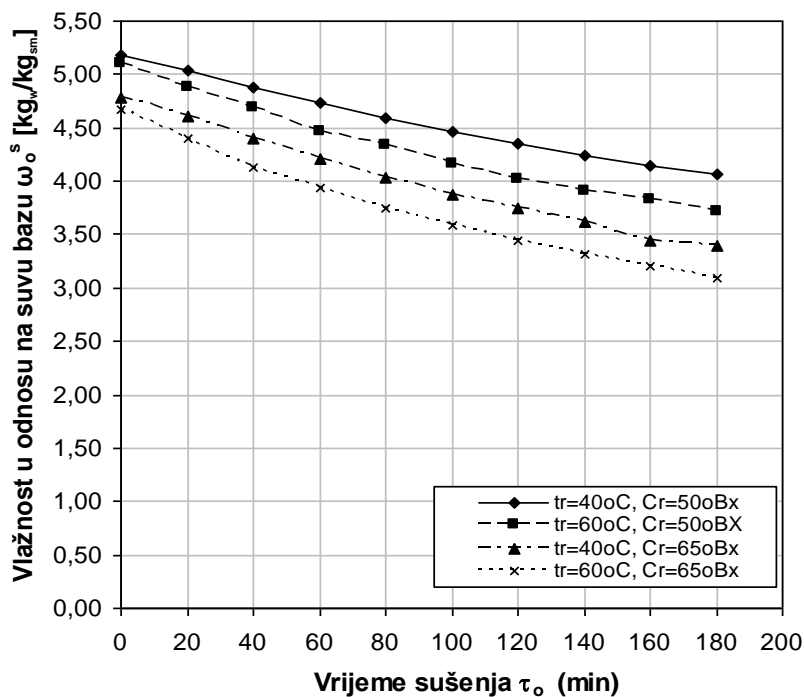


Slika 6.2. Promjene vrijednosti najveće dimenzije na uzorku od 8 četvrtina dunje tokom osmotskog sušenja za eksperimentalnu jedinicu EO₁₆ ($t_r = 60^\circ\text{C}$, $C_r = 65^\circ\text{Bx}$ i $\tau = 180$ min)



Slika 6.3. Promjene vrijednosti zapreminskog skupljanja na uzorku od 8 četvrtina dunje tokom osmotskog sušenja za eksperimentalnu jedinicu EO₁₆ (t_r = 60 °C, C_r = 65 °Bx i τ = 180 min)

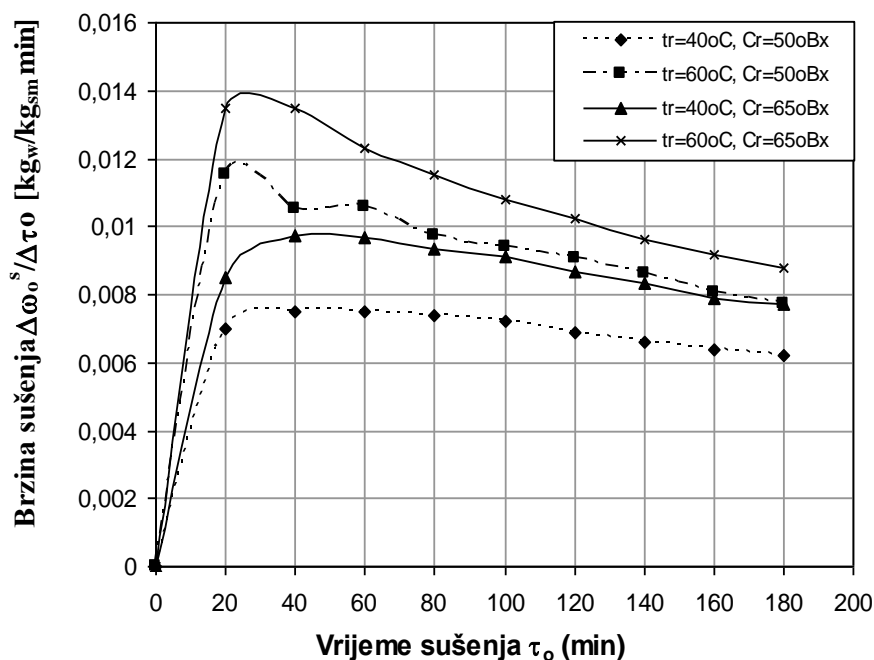
Srednje vrijednosti promjena vlažnosti četvrtina dunje tokom osmotskog sušenja u odnosu na suhu bazu prikazane su obliku kinetičkih krivih (slika 6.4).



Slika 6.4. Promjene srednje vlažnosti četvrtina dunja u odnosu na suhu bazu (ω_o^s) tokom vremena osmotskog sušenja (τ_o) u zavisnosti od temperature (t_r) i koncentracije (C_r) osmotskog rastvora

Svaka prikazana kinetička kriva predstavlja srednju vrijednost od četiri ponavljanja za istu vrijednost temperature i koncentracije osmotskog rastvora u prvih 100 minuta osmotskog sušenja, a dva ponavljanja poslije 100 minuta osmotskog sušenja. Razlog ovome je što su u svakoj godini urađeni eksperimenti sa istom koncentracijom i temperaturom rastvora za 100 i 180 minuta osmotskog sušenja (tabela 5.1). Najveća promjena vrijednosti srednje vlažnosti četvrtina dunje u odnosu na suhu bazu zabilježeno je kod kombinacije temperature osmotskog rastvora 60°C i koncentracije osmotskog rastvora 65°Bx, a najmanje kod $t_r = 40^\circ\text{C}$ i $C_r = 50^\circ\text{Bx}$.

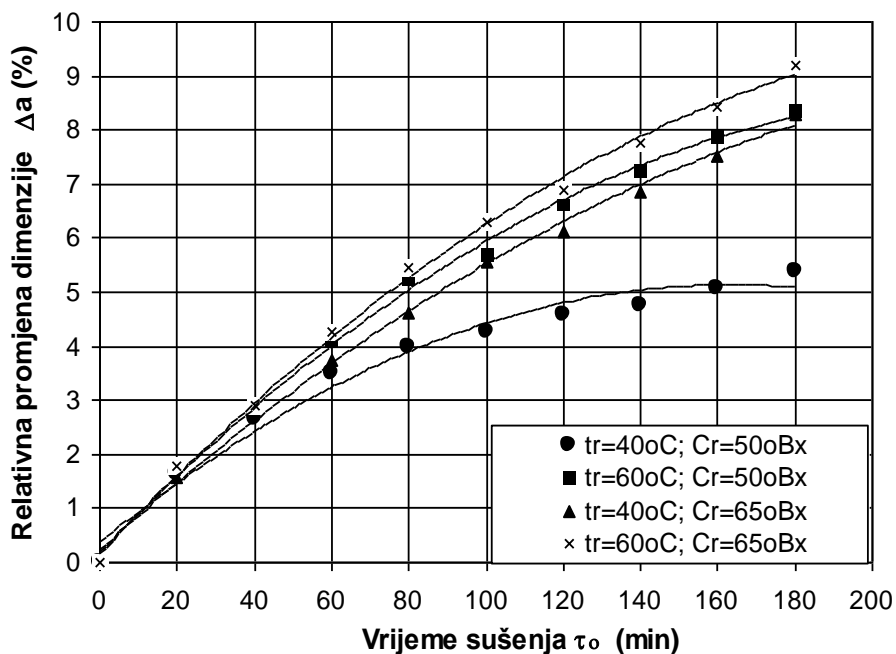
Kinetičke krive srednje brzine sušenja u odnosu na suhu bazu tokom osmotskog sušenja su prikazane na slici 6.5. Tokom procesa osmotskog sušenja četvrtina dunje, brzina sušenja je imala intezivan porast u prvih 20 -30 minuta, a nakon toga vremena dolazilo je do smanjenja ove vrijednosti. Takođe, evidentno je kombinacije faktora $t_r = 60^\circ\text{C}$ i $C_r = 65^\circ\text{Bx}$ imala najveću brzinu sušenja, a najmanja brzina sušenja je bila kod kombinacije faktora $t_r = 40^\circ\text{C}$ i $C_r = 50^\circ\text{Bx}$.



Slika 6.5. Promjene srednje brzine osmotskog sušenja četvrtina dunje u odnosu na suhu bazu ($\Delta\omega_0^s/\Delta\tau_0$) tokom vremena osmotskog sušenja (τ_0) u zavisnosti od temperature (t_r) i koncentracije (c_r) osmotskog rastvora

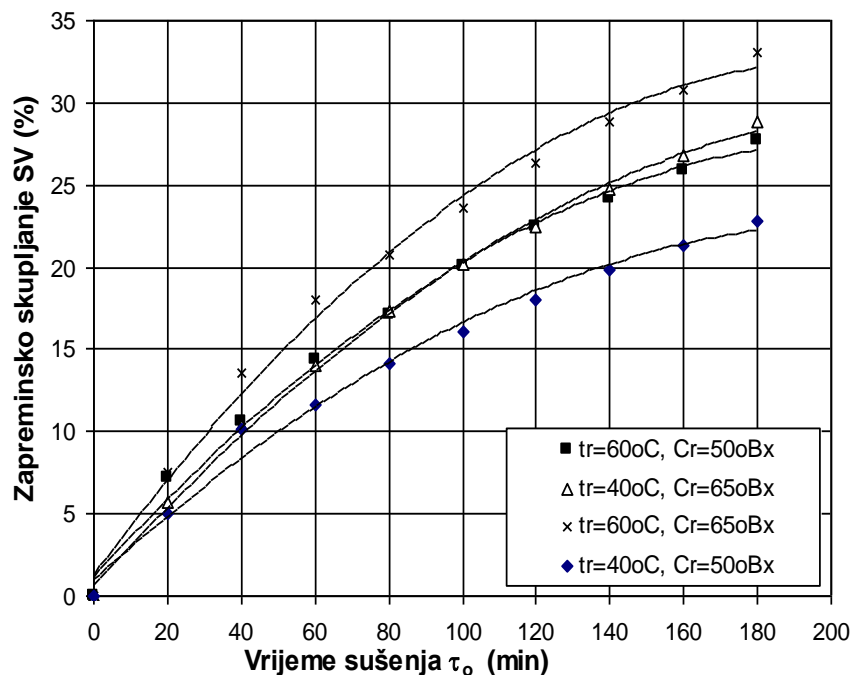
Na slici 6.6 su prikazane kinetičke krive promjene srednje vrijednosti najveće dimenzije četvrtina dunje u zavisnosti od temperature i koncentracije osmotskog rastvora. Promjena najveće dimenzije četvrtina dunje tokom osmotskog sušenja predstavlja smanjenje dužine

čtvrtna tokom osmotskog sušenja. Najznačajnija promjena najveće dimenzije je bila kod kombinacije faktora $t_r = 60^\circ\text{C}$ i $C_r = 65^\circ\text{Bx}$, gdje je poslije 180 minuta osmotskog sušenja srednja promjena bila 9,2 %. Najmanja promjenu je zabilježena kod kombinacije faktora $t_r = 40^\circ\text{C}$ i $C_r = 50^\circ\text{Bx}$, gdje je poslije 180 minuta ova vrijednost bila 5,4 %.



Slika 6.6. Promjene srednje vrijednosti najveće dimenzije četvrtina dunje (Δa) tokom vremena osmotskog sušenja (τ_0) u zavisnosti od temperature (t_r) i koncentracije (C_r) osmotskog rastvora

Na slici 6.7 prikazane su kinetičke krive srednje vrijednosti zapreminskog skupljanja četvrtina dunje u zavisnosti od temperature i koncentracije osmotskog rastvora. Analizirajući pomenute kinetičke krive, evidentno je da najveće zapreminsko skupljanje tokom osmotskog sušenja ima kombinacija faktora $t_r = 60^\circ\text{C}$ i $C_r = 65^\circ\text{Bx}$. Najveća vrijednost za ovu kombinaciju faktora je bila poslije 180 minuta osmotskog sušenja i iznosila je 33,08 %. Najmanje zapreminsko skupljanje četvrtina dunje je imala kombinacija faktora $t_r = 40^\circ\text{C}$ i $C_r = 50^\circ\text{Bx}$, gdje je poslije 180 minuta osmotskog sušenja srednja vrijednost bila 22,84 %.



Slika 6.7. Promjene srednje vrijednosti zapreminskog skupljanje četvrtina dunje (SV) tokom vremena osmotskog sušenja (τ_0) u zavisnosti od temperature (t_r) i koncentracije (C_r) osmotskog rastvora

Uticaj izabranih faktora (temperatura osmotskog rastvora, koncentracija osmotskog rastvora i vrijeme trajanja osmotskog sušenja) na kinetiku osmotskog sušenja četvrtina dunje je provjeravani disperzionom analizom (provjera prve hipoteze). Provjera je urađena za dva pokazatelja kinetike osmotskog sušenja. Prvim testom je provjeren uticaj izabranih faktora osmotskog sušenja, na srednju brzinu sušenja četvrtina dunje. Drugim testom je provjeren uticaj izabranih faktora osmotskog sušenja na zapreminsko skupljanje četvrtina dunje.

Baza podataka za disperzionu analizu osmotskog sušenja četvrtina dunje je predstavljala tabela srednjih vrijednosti brzine sušenja četvrtina dunje u odnosu na suhu bazu i zapreminskog skupljanja (tabela 6.4). Disperziona analiza trofaktornog eksperimenta je urađena u računarskom programu Statistica 10 (StatSoft, Inc, 2010). Prvi test je urađen sa statističkom vjerovatnoćom 99%, a drugi sa 99% i 95% Za prvi test korišćene su kolone za srednju brzinu sušenja, a za drugi test korišćene su kolone za zapreminsko skupljanje.

Tabela 6.4. Srednje vrijednosti brzine osmotskog sušenja četvrtina dunje u odnosu na suhu bazu i zapreminskog skupljanja

Eksperiment. jedinica	Temperatura rastvora °C	Koncentracija rastvora °Bx	Vrijeme trajanja osmotskog sušenja (min)	Sr. vrijednosti brzine osm. sušenja u odnosu na suhu bazu (kg _w /kg _{sm} min)	Srednje vrijednosti zapreminskog skupljanja %
EO ₁	40	50	100	0,008201	10,93
EO ₂	40	50	180	0,005669	15,26
EO ₃	60	50	100	0,009987	13,35
EO ₄	60	50	180	0,006513	17,58
EO ₅	40	65	100	0,008751	12,4
EO ₆	40	65	180	0,008137	19,12
EO ₇	60	65	100	0,016439	16,12
EO ₈	60	65	180	0,007111	19,33
EO ₉	40	50	100	0,006769	8,97
EO ₁₀	40	50	180	0,00588	10,83
EO ₁₁	60	50	100	0,010838	10,46
EO ₁₂	60	50	180	0,007861	15,20
EO ₁₃	40	65	100	0,009052	10,79
EO ₁₄	40	65	180	0,007575	13,90
EO ₁₅	60	65	100	0,011896	13,26
EO ₁₆	60	65	180	0,008656	19,10

Rezultati disperzione analize za prvi test su prikazani u tabeli 6.5. Na osnovu rezultata disperzione analize sa statističkom vjerovatnoćom od 99% može se zaključiti da postoje uticaji izabranih faktora na brzinu sušenja dunje u obliku četvrtine.

Tabela 6.5. Rezultati disperzione analize o uticaju izabranih faktora osmotskog sušenja četvrtina dunje, na srednju brzinu sušenja, za statističku vjerovatnoću 99%

Faktori eksperimenta	Suma kvadrata	Stepen slobode	Srednji kvadrat	Izračunata vrijednost F	p-value	Tablična vrijednost Fcrit
Temperatura rastvora	0,000023	1	0,000023	13,2198	0,006628	6,931941
Koncentracija rastvora	0,000016	1	0,000016	9,0052	0,017049	6,931941
Vrijeme trajanja	0,000038	1	0,000038	21,4381	0,001688	6,931941
Temperatura rastvora i koncentracija rastvora	0,000000	1	0,000000	0,1294	0,728326	6,931941
Temperatura rastvora i vrijeme trajanja	0,000011	1	0,000011	6,4979	0,034223	6,931941
Koncentracija rastvora i vrijeme trajanja	0,000001	1	0,000001	0,8164	0,392616	6,931941
Temperatura rastvora, konc. rastvora i vrijeme trajanja	0,000003	1	0,000003	1,9765	0,197385	6,931941
Greška	0,000014	8	0,000002			

U tabeli 6.6. su prikazani rezultati disperzione analize za uticaj izabranih faktora na zapreminsko skupljanje prilikom osmotskog sušenja. Iz tabele je evidentno, sa statističkom vjerovatnoćom od 99%, da postoji uticaj vremena trajanja procesa osmotskog sušenja na zapreminsko skupljanje četvrtina dunje. Izabrani nivoi temperature rastvora i koncentracije rastvora na zapreminsko skupljanje četvrtina dunje su značajni sa statističkom vjerovatnoćom od 95%

Tabela 6.6. Rezultati disperzione analize o uticaju izabranih faktora osmotskog sušenja četvrtina dunje, na zapreminsko skupljanje, za statističku vjerovatnoću 95% i 99%

Faktori eksperimenta	Suma kvadrata	Stepen slobode	Srednji kvadrat	Izračunata vrijednost F	p-value	Tablična vrijedn. Fcrit - 95%	Tablična vrijednost Fcrit 99%
Temperatura rastvora	30,825	1	30,825	6,5248	0,033943	4,19	6,931941
Koncentracija rastvora	28,762	1	28,762	6,0882	0,038867	4,19	6,931941
Vrijeme trajanja	72,423	1	72,423	15,3301	0,004447	4,19	6,931941
Temperatura rastvora i koncentracija rastvora	0,061	1	0,061	0,0130	0,912147	4,19	6,931941
Temperatura rastvora i vrijeme trajanja	0,247	1	0,247	0,0523	0,824870	4,19	6,931941
Koncentracija rastvora i vrijeme trajanja	0,870	1	0,870	0,1843	0,679063	4,19	6,931941
Temperatura rastvora, konc. rastvora i vrijeme trajanja	0,788	1	0,788	0,1667	0,693748	4,19	6,931941
Greška	37,794	8	4,724				

6.3. Rezultati mjerenja tokom konvektivnog sušenja četvrtina dunje

Svi rezultati mjerenja tokom eksperimenta konvektivnog sušenja obrađeni su tabelarno i dijagramski pomoću kinetičkih krivi. Za svaku eksperimentalna jedinicu konvektivnog sušenja urađene su po dvije tabele. Prva tabela predstavlja osnovnu tabelu konvektivnog sušenja, a nastajala na bazi podataka snimljenih pomoću mjerne akvizicije tokom konvektivnog sušenja. Primjer jedne ovakve radne tabele prikazan je za eksperimentalnu jedinicu EK₁ (tabela 6.7).

Tabela 6.7. Radna tabela konvektivnog sušenja četvrtina dunje za eksperiment. jedinicu E_{K1}

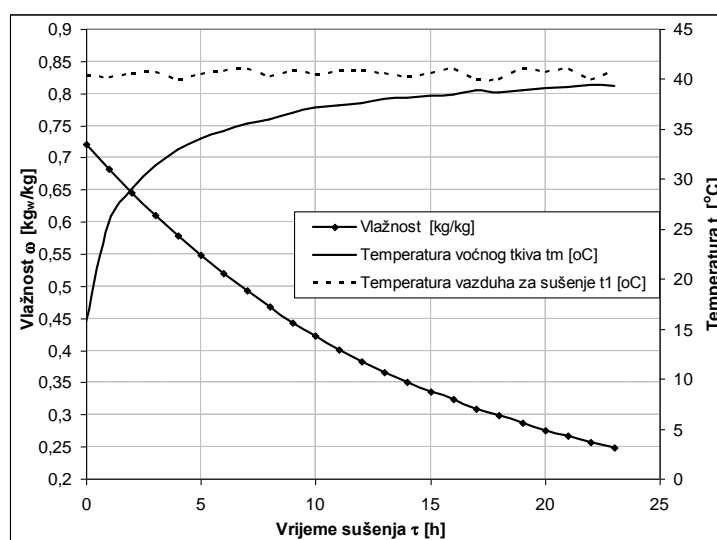
Vrijeme sušenja τ [h]	Masa materijala za sušenje m (g)	Vlažnost ω [kg _w /kg]	Temperat. četvrtina dunje t_m [°C]	Temperat. vazduha t_1 [°C]	Brzina sušenja $\Delta\omega/\Delta\tau$ [kg/kg _h]	Vlažnost četv. dunje u odnosu na suhu bazu ω^s [kg _w /kg _{sm}]	Brzina sušenja u odnosu na suhu bazu $\Delta\omega^s/\Delta\tau$ [kg _w /kg _{smh}]
0	1851,58	0,72	15,69	40,40	0	2,58	0
1	1625,85	0,68	25,58	40,10	0,0388	2,14	0,4359
2	1458,83	0,64	28,95	40,55	0,0365	1,82	0,3225
3	1331,70	0,61	31,29	40,70	0,0339	1,57	0,2455
4	1229,53	0,58	32,96	39,92	0,0323	1,37	0,1973
5	1147,48	0,55	34,06	40,52	0,0301	1,22	0,1584
6	1078,08	0,52	34,82	40,82	0,0291	1,08	0,1340
7	1021,32	0,49	35,52	41,00	0,0267	0,97	0,1096
8	972,35	0,47	35,96	40,22	0,0255	0,88	0,0946
9	930,51	0,44	36,63	40,82	0,0239	0,80	0,0808
10	896,46	0,42	37,11	40,52	0,0211	0,73	0,0658
11	865,00	0,40	37,32	40,78	0,0210	0,67	0,0607
12	839,70	0,38	37,61	40,82	0,0180	0,62	0,0488
13	817,65	0,37	37,97	40,55	0,0166	0,58	0,0426
14	796,89	0,35	38,14	40,22	0,0165	0,54	0,0401
15	779,70	0,34	38,35	40,63	0,0143	0,51	0,0332
16	765,76	0,32	38,47	41,04	0,0121	0,48	0,0269
17	749,86	0,31	38,86	39,95	0,0143	0,45	0,0307
18	738,19	0,30	38,69	39,95	0,0109	0,43	0,0225
19	726,51	0,29	38,90	40,96	0,0113	0,40	0,0225
20	715,16	0,28	39,10	40,67	0,0113	0,38	0,0219
21	706,08	0,27	39,18	41,04	0,0093	0,36	0,0175
22	696,68	0,26	39,36	39,99	0,0099	0,35	0,0182
23	688,89	0,25	39,24	40,85	0,0084	0,33	0,0150

Druga tabela predstavlja izmjerene vrijednosti reprezentativnih uzoraka (deset četvrtina dunje za svaku eksperimentalnu jedinicu) na početku i po završetku konvektivnog sušenja. Rezultati mjerenja reprezentativnih uzoraka za eksperimentalnu jedinicu E_{K1} prikazan je u tabeli 6.8.

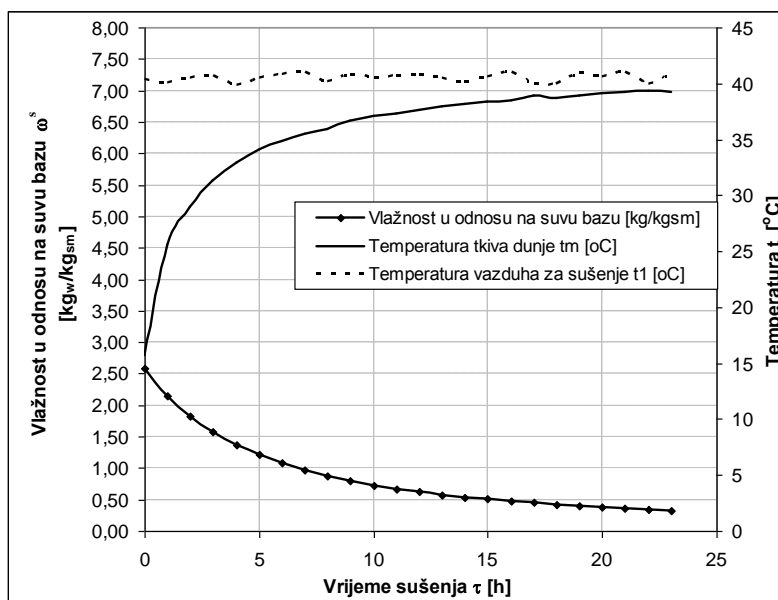
Tabela 6.8. Izmjerene vrijednosti reprezentativnih uzoraka četvrtina dunje prije i nakon konvektivnog sušenja za EK₁

Broj mjerenja	Masa uzorka prije konv. sušenja m ₁ [g]	Masa uzorka poslije konv. sušenja m ₂ [g]	Dužina uzorka prije konv. sušenja a ₁ [mm]	Dužina uzorka poslije konv. sušenja a ₂ [mm]	Relativno smanjenje dimenzije (a ₁ -a ₂) * 100/a ₁ [%]	Zaprem. prije sušenja V ₁ [cm ³]	Zaprem. nakon sušenja V ₂ [cm ³]	Zaprem. skupljanje ΔV _i /V ₀ [-]
1	34,75	13,34	58,9	45,9	22,07	32,3	11,2	0,6532
2	33,12	11,99	56,8	41,4	22,07	31,1	9,9	0,6816
3	28,58	11,21	52,5	41,7	20,57	26,6	9,6	0,6391
4	35,19	13,58	55,1	41,2	22,07	32,6	11,7	0,6411
5	28,55	10,51	52,1	38,3	26,49	26,1	8,6	0,6704
6	27,41	10,61	55,9	42,2	22,07	25,3	8,9	0,6482
7	34,93	12,85	56,1	41,8	25,49	32,9	10,8	0,6717
8	19,6	7,67	44,7	33,6	22,07	17,8	6,2	0,6516
9	24,54	10,01	46,7	38,1	18,42	22,8	8,5	0,6271
10	23,4	8,83	48,6	32,1	22,07	21,7	7,1	0,6728
Srednja vrijedn.	29,01	11,06	52,74	39,63	22,34	26,92	9,25	0,6557
Stand. devijacija	5,4368	1,9354	4,714	4,1857	2,26	5,22	1,757	0,0177

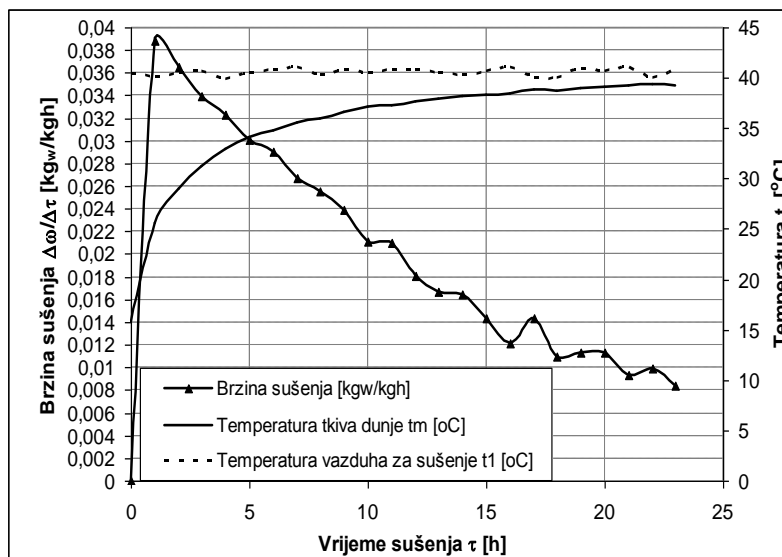
Na bazi rezultata iz osnovnih radnih tabela, urađeni su kinetičke krive za svaku eksperimentalnu jedinicu konvektivnog sušenja. Primjeri su dati za eksperimentalnu jedinicu EK₁ (t_k=40°, v_k=1m/s, predtretman 1), na slikama 6.8, 6.9, 6.10, 6.11. Kinetičke krive promjene vlažnosti četvrtina dunje i promjene srednje brzine sušenja za ostale eksperimentalne jedinice konvektivnog sušenja prikazani su u priložima.



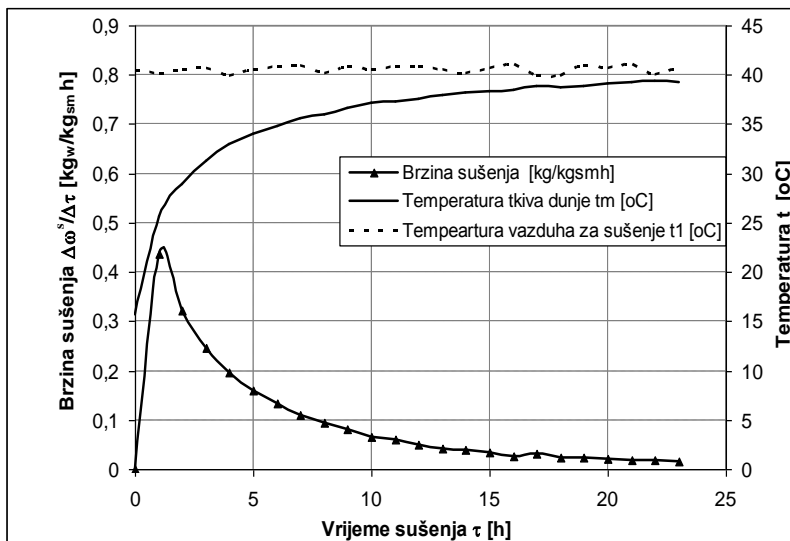
Slika 6.8. Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtine dunje tokom konvektivnog sušenja za eksperimentalnu jedinicu EK₁



Slika 6.9. Kinetička kriva promjene vlažnosti u odnosu na suhu bazu tokom konvektivnog sušenja za eksperimentalnu jedinicu EK₁



Slika 6.10. Kinetička kriva brzine sušenja četvrtine dunje tokom konvektivnog sušenja za eksperimentalnu jedinicu EK₁



Slika 6.11. Kinetička kriva brzine sušenja četvrtine dunje u odnosu na suhu bazu tokom konvektivnog sušenja za eksperimentalnu jedinicu EK₁

Analiza rezultata mjerenja konvektivnog sušenja četvrtina dunje je urađena na osnovu kinetičkih krivih sušenja četvrtina dunje i srednjih vrijednosti kinetike konvektivnog sušenja četvrtina dunje (tabela 6.9). Kinetičke krive predstavljaju srednje vrijednosti od dva ponavljanja (dvije godine ispitivanja) za vlažnost četvrtina dunja (slike 6.12, 6.13, 6.14, 6.15) i za brzinu sušenja u određenom vremenu sušenja (slike 6.16, 6.17, 6.18, 6.19). Na osnovu kinetičkih krivih i podataka iz tabele 6.9. moguće je potpuno sagledati ponašanje četvrtina dunje tokom konvektivnog sušenja u zavisnosti od analiziranih faktora.

Početne vrijednosti vlažnosti četvrtina dunje (ω_k za $\tau_k=0$ h) zavisile su od primjenjenog predtretmana. Na početku konvektivnog sušenja najveće izmjerene vrijednosti vlažnosti su bile kod četvrtina dunje bez osmotskog predtretmana, a zatim četvrtine sušene sa predtretmanom 1 ($t_r = 40^\circ\text{C}$, $C_r = 50^\circ\text{Bx}$ i $\tau = 100$ min) i predtretmanom 2 ($t_r = 40^\circ\text{C}$, $C_r = 50^\circ\text{Bx}$ i $\tau = 180$ min). Četvrtine dunje sušene predtretmanom 3 ($t_r = 60^\circ\text{C}$, $C_r = 65^\circ\text{Bx}$ i $\tau = 100$ min) i predtretmanom 4 ($t_r = 60^\circ\text{C}$, $C_r = 65^\circ\text{Bx}$ i $\tau = 180$ min) imale su na početku konvektivnog sušenja manju vrijednost početne vlažnosti, s tim što su četvrtine sušene predtretmanom 4 imale najnižu vlažnost na početku konvektivnog sušenja. Ukupno sniženje vrijednosti vlažnosti uzoraka bilo je u zavisnosti od predtretmana i temperature vazduha za sušenje, dok je promjena brzine strujanja vazduha ispred sloja materijala imala manji uticaj (tabela 6.9). Najveće snižavanje vrijednosti vlažnosti uzoraka je bilo kod konvektivnog sušenja sa kombinacijom faktora: bez osmotskog predtretmana, $t_k = 60^\circ\text{C}$ i $v = 1$ m/s ($\Delta\omega_k = 0,634$ kg_w/kg), a najmanje kod konvektivnog sušenja

sa kombinacijom faktora: primjenjeni predtretman 4, $t_k = 40^{\circ}\text{C}$ i $v = 1,5 \text{ m/s}$ ($\Delta\omega_k = 0,320 \text{ kg}_w/\text{kg}$). Najmanja vlažnost na kraju konvektivnog sušenja je iznosila $\omega_k = 0,103 \text{ kg}_w/\text{kg}$, kod kombinacije faktora: sa primjenjenim predtretmanom 3, $t_k = 60^{\circ}\text{C}$ i $v = 1,5 \text{ m/s}$. Najveću vlažnost na kraju konvektivnog sušenja ($\omega_k = 0,385 \text{ kg}_w/\text{kg}$) je imala kombinacija faktora: bez osmotskog predtretmana, $t_k = 40^{\circ}\text{C}$ i $v = 1 \text{ m/s}$.

Tabela 6.9. Srednje vrijednost izmjernih karakterističnih veličina kinetike konvektivnog sušenja četvrtina dunje

Osmotski predtretman	Temperatura vazduha za sušenje t_{k1} ($^{\circ}\text{C}$)	Brzina vazduha za sušenje v (m/s)	Početna vlažnost četvrtine dunje ω_k (kg_w/kg)	Krajnja vlažnost četvrtine dunje ω_k (kg_w/kg)	Ukupno snižavanje vlažnosti četvrtina dunje $\Delta\omega_k$ (kg_w/kg)	Masa četvrtina dunje za $m_{(0)}$ (gr)	Najveća dimenzija za $a_{k(0)}$	Zapreminsko skupljanje ΔV (-)
1 $t_r = 40^{\circ}\text{C}$ $C_r = 50^{\circ}\text{Bx}$ $\tau = 100 \text{ min}$	40	1	0,723	0,293	0,431	35,48	59,99	0,67
	40	1,5	0,724	0,314	0,410	38,40	56,96	0,66
	60	1	0,725	0,165	0,560	32,54	60,98	0,72
	60	1,5	0,734	0,211	0,523	33,88	53,93	0,71
2 $t_r = 40^{\circ}\text{C}$ $C_r = 50^{\circ}\text{Bx}$ $\tau = 180 \text{ min}$	40	1	0,727	0,385	0,342	34,84	56,05	0,60
	40	1,5	0,727	0,384	0,344	36,04	58,05	0,60
	60	1	0,705	0,240	0,465	32,65	60,67	0,67
	60	1,5	0,694	0,211	0,483	32,53	59,27	0,66
3 $t_r = 60^{\circ}\text{C}$ $C_r = 65^{\circ}\text{Bx}$ $\tau = 100 \text{ min}$	40	1	0,627	0,292	0,335	29,54	54,40	0,53
	40	1,5	0,621	0,237	0,384	28,33	56,66	0,58
	60	1	0,621	0,112	0,509	28,72	53,78	0,65
	60	1,5	0,620	0,103	0,517	29,22	54,25	0,65
4 $t_r = 60^{\circ}\text{C}$ $C_r = 65^{\circ}\text{Bx}$ $\tau = 180 \text{ min}$	40	1	0,581	0,259	0,322	30,70	54,90	0,50
	40	1,5	0,581	0,261	0,320	29,56	54,24	0,50
	60	1	0,613	0,189	0,423	33,14	60,66	0,59
	60	1,5	0,613	0,251	0,361	27,76	54,75	0,55
Bez predtretmana	40	1	0,838	0,379	0,458	30,26	53,14	0,79
	40	1,5	0,840	0,379	0,460	35,99	57,82	0,77
	60	1	0,840	0,206	0,634	42,44	66,80	0,83
	60	1,5	0,840	0,242	0,598	40,72	61,93	0,84

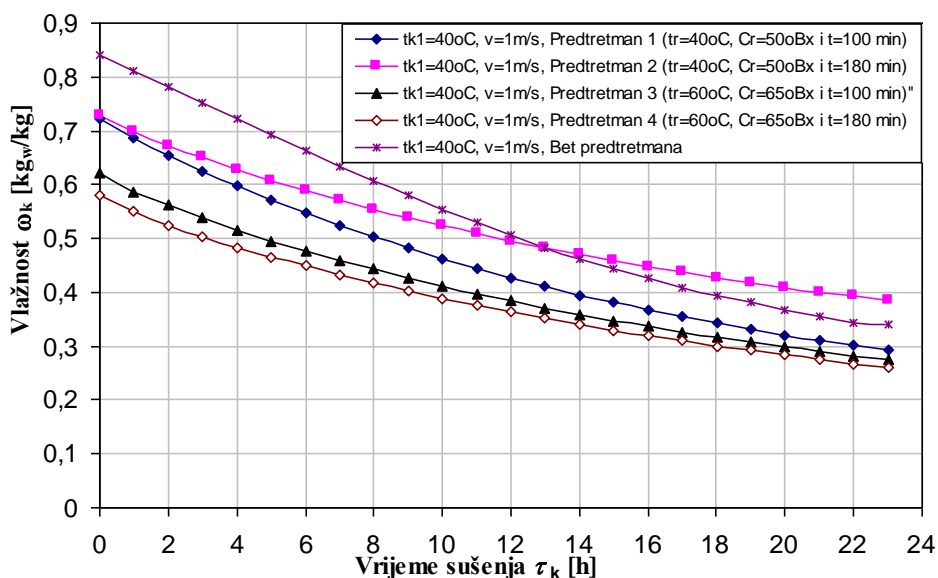
Vrijednosti mase četvrtina dunje i najvećih dimenzija na početku konvektivnog sušenja nisu bile u potpunoj zavisnosti od primjenjenog predtretmana, zbog dosta neujednačenih dimenzija i masa svježih plodova koji su korišćeni u eksperimentima.

U tabeli 6.9. su prikazane i srednje vrijednosti zapreminskog skupljanja u zavisnosti od osmotskog predtretmana, temperature vazduha (40 i 60°C) i brzine strujana vazduha ispred sloja uzoraka za sušenje (1 i 1,5 m/s). Primjenjeni osmotski predtretman i različite temperature vazduha ispred sloja materijala imaju značajan uticaj na zapreminsko skupljanje, dok različite

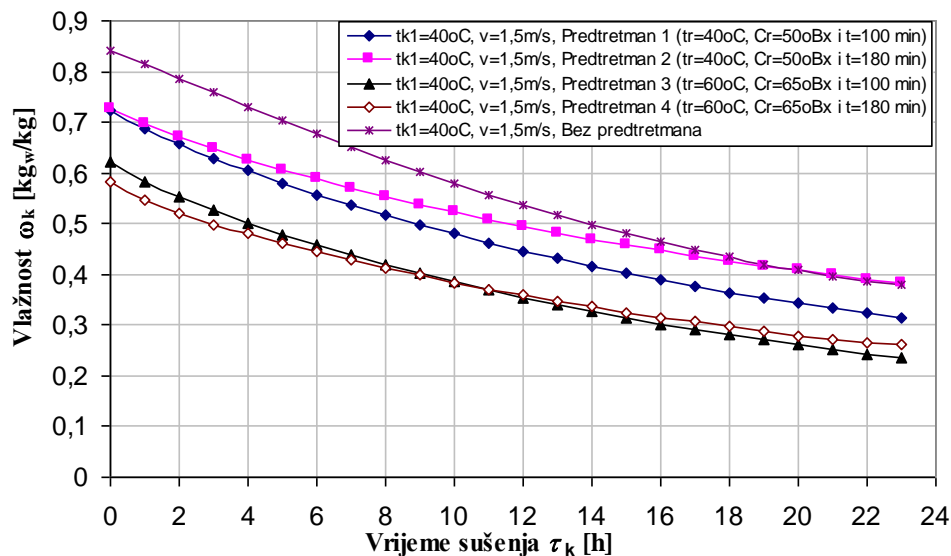
vrijednosti brzine vazduha u ovom slučaju nemaju veliki uticaj na zapreminsko skupljanje. Konvektivno sušenje bez osmotskog predtretmana ima najveće zapreminsko skupljanje, a najmanje zapreminsko skupljanje je kod konvektivnog sušenja sa osmotskim predtretmanom 4 ($t_r = 60^\circ\text{C}$, $C_r = 65^\circ\text{Bx}$, $\tau = 180$ min). Konvektivnim sušenjem sa temperaturom vazduha ispred sloja materijala od 60°C , postiže veće zapreminsko skupljanje nego sa temperaturom od 40°C .

Analizom kinetičkih krivih promjene vlažnosti, tokom procesa konvektivnog sušenja četvrtina dunje, može se zaključiti da je sniženje vlažnosti nelinearan proces (slika 6.12, 6.13, 6.14, 6.15). Početak konvektivnog sušenja odlikuje intezivnija promjena vlažnosti uzoraka, a tokom vremena intezitet promjene vlažnosti opada. Ovo je posebno uočljivo kod konvektivnog sušenja sa višom temperaturom ($t_k = 60^\circ\text{C}$).

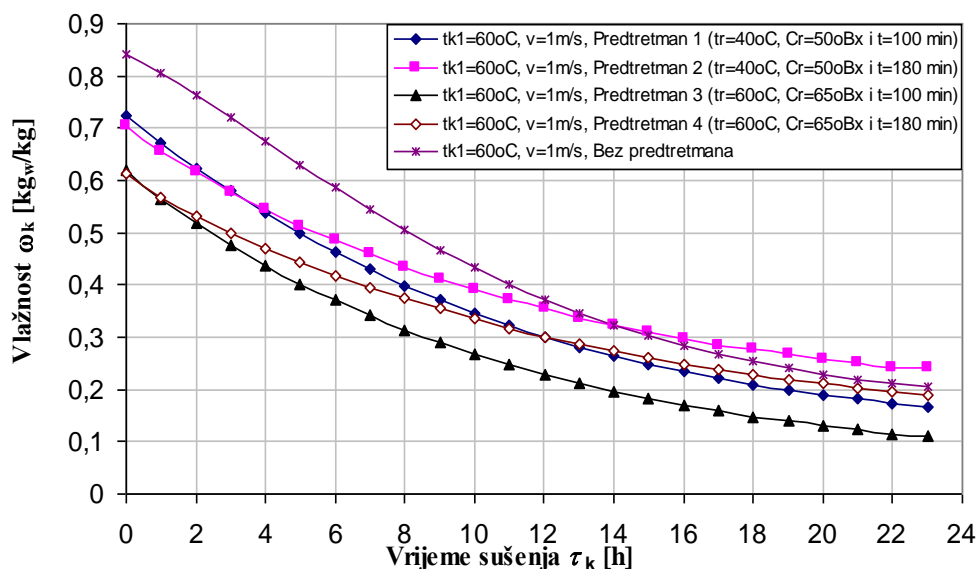
Posmatrajući kinetičke krive promjene vlažnosti tokom konvektivnog sušenja, evidentno je da najveću promjenu vlažnosti imaju uzorci bez osmotskog predtretmana. Takođe, primjetna je znatno veća promjena vlažnosti prilikom konvektivnog sušenja uzoraka koji su bili podvrgnuti osmotskom predtretmanu kraći vremenski period ($\tau_o = 100$ min). Korišćenjem više temperature i veće koncentracije osmotskog rastvora u predtretmanu, uočljiva je manja vlažnost uzoraka na početku konvektivnog sušenja i manja promjena vlažnosti tokom sušenja. Na osnovu grafikona može se primjetiti da su uzorci sušeni sa višom temperaturom vazduha imali veće sniženje vlažnosti.



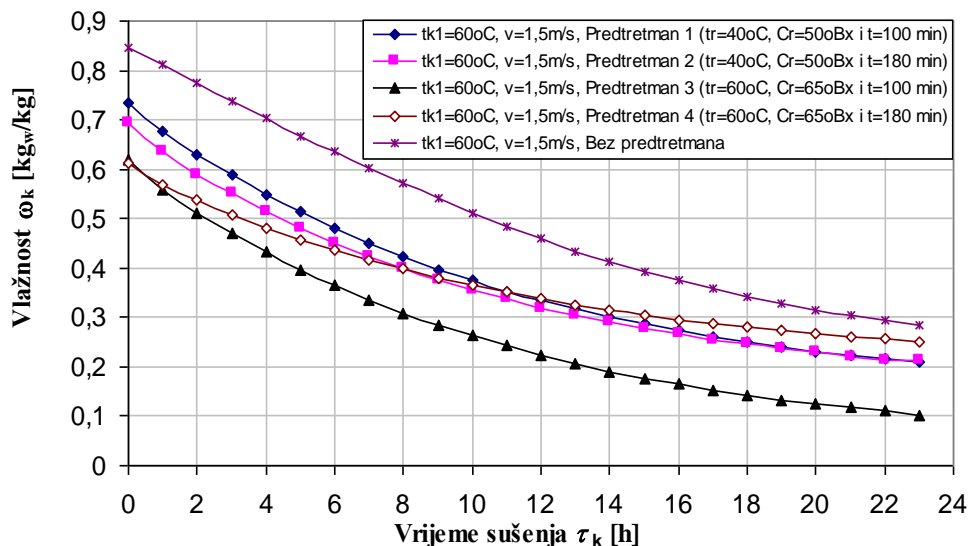
Slika 6.12. Kinetičke krive promjene srednje vlažnosti četvrtina dunje (ω_k) tokom konvektivnog sušenja, u zavisnosti od različitih predtretmana, za: $t_{kl} = 40^\circ\text{C}$, $v = 1$ m/s



Slika 6.13. Kinetičke krive promjene srednje vlažnosti četvrtina dunje (ω_k) tokom konvektivnog sušenja, u zavisnosti od različitih predtretmana, za: $t_{kl} = 40^\circ\text{C}$, $v = 1,5 \text{ m/s}$



Slika 6.14. Kinetičke krive promjene srednje vlažnosti četvrtina dunje (ω_k) tokom konvektivnog sušenja, u zavisnosti od različitih predtretmana, za: $t_{kl} = 60^\circ\text{C}$, $v = 1 \text{ m/s}$

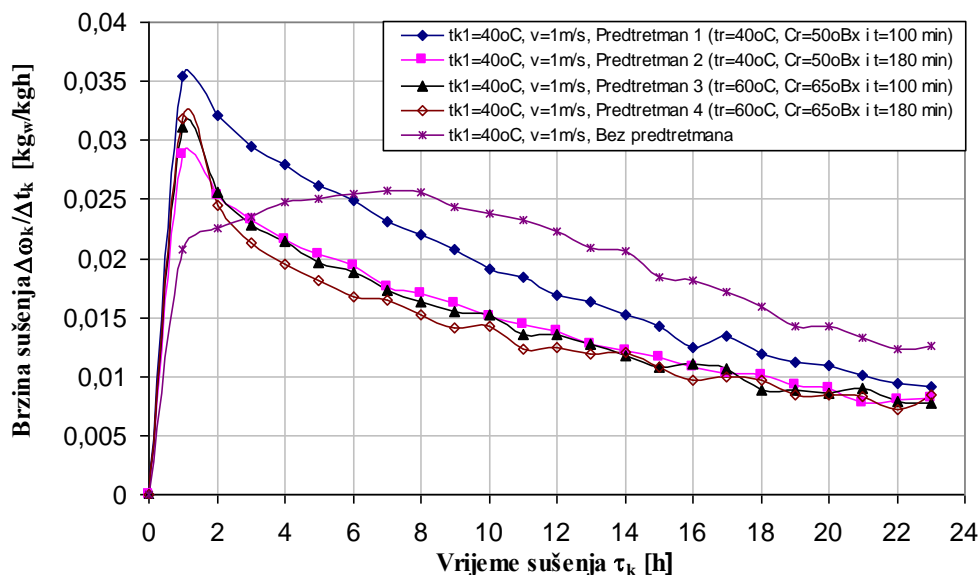


Slika 6.15. Kinetičke krive promjene srednje vlažnosti četvrtina dunje (ω_k) tokom konvektivnog sušenja, u zavisnosti od različitih pretretmana, za: $t_{k1} = 60^\circ C$, $v = 1,5 \text{ m/s}$

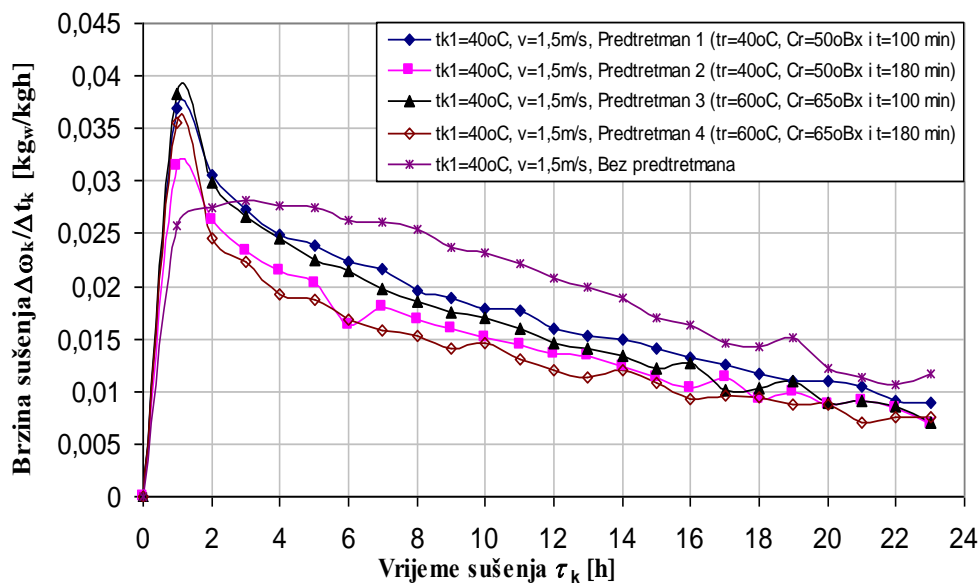
Analizom kinetičkih krivih promjene srednje brzine sušenja mogu se primjetiti dva perioda sušenja kod svih kombinacija faktora. Prvi period je karakterističan intenzivnim porastom brzine sušenja i dostizanja maksimalne brzine isparavanja vode iz materijala. Ovaj period traje u toku prvih 60 minuta procesa konvektivnog sušenja, kod uzoraka koji su osmotski pretretirani. Isparavanjem površinski vezane vlage, brzina sušenja ulazi u drugi period i počinje opadati. Kod konvektivnog sušenja bez osmotskog pretretmana, takođe u prvih 60 minuta je intezivan porast brzine sušenja. Nakon toga perioda brzina sušenja ima blagi porast još neki period, a onda počinje opadati.

U prvom periodu konvektivnog sušenja (prvih 60 minuta) veću brzinu sušenje su imali uzorci koji su osmotski pretretirani od uzoraka bez pretretmana. Nakon toga perioda kod osmotski pretretiranih uzoraka dolazi do bržeg opadanja brzine sušenja. Poslije određenog vremena, pa sve do završetka konvektivnog sušenja veću brzinu sušenja su imali uzorci bez osmotskog pretretmana.

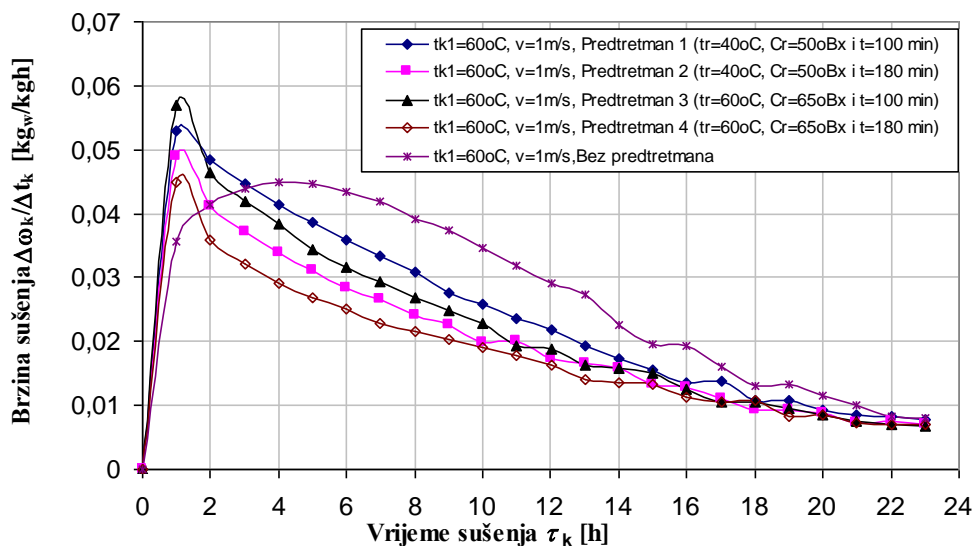
Na osnovu kinetičkih krivih brzine sušenja može se primjetiti da sa povećanjem vremena osmotskog pretretmana, dolazi do smanjenja brzine konvektivnog sušenja. Takođe, evidentno je da korišćenjem osmotskog pretretmana sa višom temperaturom rastvora i većom koncentracijom smanjuje se brzina konvektivnog sušenja.



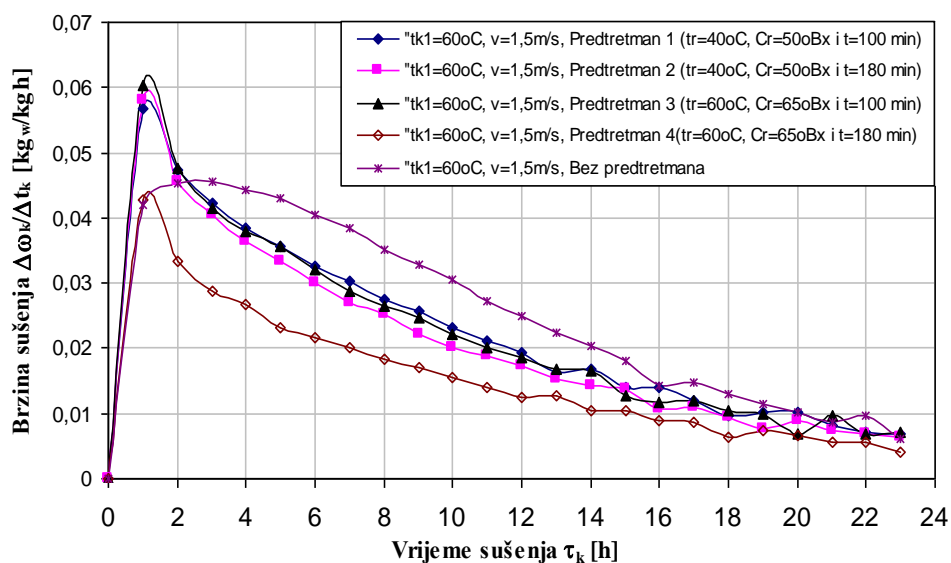
Slika 6.16. Kinetičke krive promjene srednje brzine sušenja četvrtina dunje tokom konvektivnog sušenja, u zavisnosti od različitih predtrtmana, za: $t_{kl} = 40^{\circ}\text{C}$, $v = 1 \text{ m/s}$



Slika 6.17. Kinetičke krive promjene srednje brzine sušenja četvrtina dunje, tokom konvektivnog sušenja, u zavisnosti od različitih predtrtmana, za: $t_{kl} = 40^{\circ}\text{C}$, $v = 1,5 \text{ m/s}$



Slika 6.18. Kinetičke krive promjene srednje brzine sušenja četvrtina dunje tokom konvektivnog sušenja, u zavisnosti od različitih predtrmana, za: $t_{kl} = 60^{\circ}C$, $v = 1$ m/s



Slika 6.19. Kinetičke krive promjene srednje brzine sušenja četvrtina dunje tokom konvektivnog sušenja, u zavisnosti od različitih predtrmana, za: $t_{kl} = 60^{\circ}C$, $v = 1,5$ m/s

Disperzionom analizom (provjera druge hipoteze) je provjeren uticaj izabranih faktora (primjenjeni predtretman, temperatura vazduha za sušenje, brzina vazduha ispred sloja materijala) za dva pokazatelja kinetike konvektivnog sušenja. Prvim testom je provjeren uticaj izabranih faktora konvektivnog sušenja na brzinu sušenja četvrtina dunje. Drugim testom je

provjeren uticaj izabranih faktora konvektivnog sušenja na zapreminsko skupljanje četvrtina dunje. Kao baza za izradu disperzione analize su korišćeni rezultati iz tabele 6.1

Tabela 6.10. Srednje vrijednosti brzine sušenja četvrtina dunje u odnosu na suhu bazu i srednje vrijednosti zapreminskog skupljanja

Eksperiment. jedinica	Osmotski predtretman	Temper. za sušenje °C	Brzina vazduha m/s	Srednja brzina sušenja [kg _w /kg _{sm} h]	Srednja vrijedn. zapreminskog skupljanje %
EK1	40°C, 50°Bx i 100min	40	1	0,093544	65,57%
EK2	40°C, 50°Bx i 100min	40	1,5	0,088361	63,76%
EK3	40°C, 50°Bx i 100min	60	1	0,102293	71,30%
EK4	40°C, 50°Bx i 100min	60	1,5	0,107565	71,13%
EK5	40°C, 50°Bx i 180min	40	1	0,085233	61,14%
EK6	40°C, 50°Bx i 180min	40	1,5	0,08420003	60,61%
EK7	40°C, 50°Bx i 180min	60	1	0,081132	68,76%
EK8	40°C, 50°Bx i 180min	60	1,5	0,073220	66,53%
EK9	60°C, 65°Bx i 100min	40	1	0,054852	54,91%
EK10	60°C, 65°Bx i 100min	40	1,5	0,053429	56,90%
EK11	60°C, 65°Bx i 100min	60	1	0,060459	63,51%
EK12	60°C, 65°Bx i 100min	60	1,5	0,060541	62,65%
EK13	60°C, 65°Bx i 180min	40	1	0,038767	49,53%
EK14	60°C, 65°Bx i 180min	40	1,5	0,038627	49,90%
EK15	60°C, 65°Bx i 180min	60	1	0,052356	56,17%
EK16	60°C, 65°Bx i 180min	60	1,5	0,051700	55,71%
EK17	Bez osmoze	40	1	0,181986	77,27%
EK18	Bez osmoze	40	1,5	0,183799	77,65%
EK19	Bez osmoze	60	1	0,199698	82,90%
EK20	Bez osmoze	60	1,5	0,198334	83,86%
EK21	40°C, 50°Bx i 100min	40	1	0,089226	67,62%
EK22	40°C, 50°Bx i 100min	40	1,5	0,092040	69,22%
EK23	40°C, 50°Bx i 100min	60	1	0,100999	72,70%
EK24	40°C, 50°Bx i 100min	60	1,5	0,100456	71,71%
EK25	40°C, 50°Bx i 180min	40	1	0,085028	59,85%
EK26	40°C, 50°Bx i 180min	40	1,5	0,086296	59,83%
EK27	40°C, 50°Bx i 180min	60	1	0,093451	65,68%
EK28	40°C, 50°Bx i 180min	60	1,5	0,096629	74,91%
EK29	60°C, 65°Bx i 100min	40	1	0,052975	52,01%
EK30	60°C, 65°Bx i 100min	40	1,5	0,057372	58,91%
EK31	60°C, 65°Bx i 100min	60	1	0,065683	66,88%
EK32	60°C, 65°Bx i 100min	60	1,5	0,065443	66,58%
EK33	60°C, 65°Bx i 180min	40	1	0,048722418	50,66%
EK34	60°C, 65°Bx i 180min	40	1,5	0,049372	53,41%
EK35	60°C, 65°Bx i 180min	60	1	0,059829	60,86%
EK36	60°C, 65°Bx i 180min	60	1,5	0,051991	55,07%
EK37	Bez osmoze	40	1	0,198714	80,56%
EK38	Bez osmoze	40	1,5	0,204269	76,65%
EK39	Bez osmoze	60	1	0,217891	84,04%
EK40	Bez osmoze	60	1,5	0,213621	83,43%

Prikazani rezultati predstavljaju srednje vrijednosti brzine sušenja i srednje vrijednosti zapreminskog skupljanja za svaku eksperimentalnu jedinicu. Disperziona analiza trofaktornog eksperimenta je urađena u računarskom programu Statistica 10 (*StatSoft, Inc, 2010*).

Za prvi test korišćene su kolone za srednju brzinu sušenja, a rezultati disperzione analize su prikazani u tabeli 6.11. Na osnovu rezultata disperzione analize sa statističkom vjerovatnoćom od 99% može se zaključiti da postoje uticaji predtretmana i temperature vazduha na brzinu sušenja dunje u obliku četvrtine tokom konvektivnog sušenja.

Brzine vazduha ispred sloja materijala, sa statističkom vjerovatnoćom od 99% i 95 %, nema veći uticaj na srednju brzinu sušenja četvrtina dunje tokom konvektivnog sušenja. Ovakav rezultat disperzione analize se mora uzeti sa rezervom s obzirom da su izabrane male vrijednosti brzine vazduha za sušenje (1 i 1,5 m/s), odnosno njihova mala razlika vrijednosti (0,5 m/s).

Tabela 6.11. Rezultati disperzione analize o uticaju izabranih faktora konvektivnog sušenja četvrtina dunje na brzinu sušenja, za statističku vjerovatnoću 95% i 99%

Faktori eksperimenta	Suma kvadrata	Stepen slobode	Srednji kvadrat	Izračunata vrijednost F	p-value	Tablična vrijedn. Fcrit - 95%	Tablična vrijednost Fcrit 99%
Predtretman	0,115656	4	0,028914	483,306	0,000000	4,19	6,931941
Temperatura vazduha	0,000869	1	0,000869	14,532	0,001091	4,19	6,931941
Brzina vazduha	0,000001	1	0,000001	0,013	0,910455	4,19	6,931941
Predtretman i temperature vazduha	0,000228	4	0,000057	0,952	0,454711	4,19	6,931941
Predtretman i brzina vazduha	0,000012	4	0,000003	0,049	0,995068	4,19	6,931941
Temperatura vazduha i brzina vazduha	0,000013	1	0,000013	0,221	0,643231	4,19	6,931941
Predtretman i temperatura vazduha i brzina vazduha	0,000029	4	0,000007	0,120	0,973873	4,19	6,931941
Greška	0,001197	20	0,000060				

Za drugi test korišćene su kolone za zapreminsko skupljanje, a rezultati disperzione analize su prikazani u tabeli 6.12. Iz tabele se može vidjeti da postoji uticaj predtretmana i temperature vazduha za sušenje na zapreminsko skupljanje. Rezultati disperzione analize su sa statističkom vjerovatnoćom od 99%.

Izabrane vrijednosti brzine vazduha za sušenje ispred sloja materijala, na osnovu disperzione analiza sa statističkom vjerovatnoćom od 99% i 95 %, nemaju značajan uticaj na zapreminsko skupljanje. I u ovom slučaju najvjerovatniji razlog ovakvih rezultata disperzione analize su male

vrijednosti brzine vazduha za sušenje (1 i 1,5 m/s), odnosno njihova mala razlika vrijednosti (0,5 m/s).

Tabela 6.12. Rezultati disperzione analize o uticaju izabranih faktora konvektivnog sušenja četvrtina dunje na zapreminsko skupljanje, za statističku vjerovatnoću 95% i 99%

Faktori eksperimenta	Suma kvadrata	Stepen slobode	Srednji kvadrat	Izračunata vrijednost F	p-value	Tablična vrijedn. Fcrit - 95%	Tablična vrijednost Fcrit
Predtretman	0,32699	4	0,08175	158,06	0,000000	4,19	6,931941
Temperatura vazduha	0,04790	1	0,04790	92,62	0,000000	4,19	6,931941
Brzina vazduha	0,00011	1	0,00011	0,21	0,655250	4,19	6,931941
Predtretman i temperatura vazduha	0,00278	4	0,00070	1,35	0,287894	4,19	6,931941
Predtretman i brzina vazduha	0,00143	4	0,00036	0,69	0,605238	4,19	6,931941
Temperatura vazduha i brzina vazduha	0,00020	1	0,00020	0,39	0,541136	4,19	6,931941
Predtretman, temperatura vazduha i brzina vazduha	0,00307	4	0,00077	1,48	0,244490	4,19	6,931941
Greška	0,01034	20	0,00052				

6.4. Matematičko modelovanje kinetike kombinovane tehnologije sušenja dunje u formi četvrtina

Kinetika prenosa mase tokom kombinovane tehnologije sušenja dunje u formi četvrtine je matematički opisana, modelovanjem kinetike osmotskog sušenja i kinetike konvektivnog sušenja.

U okviru kinetike osmotskog sušenja četvrtina dunje, obavljeno je matematičko modelovanje promjene vlažnosti u odnosu na suhu bazu (ω_o^s) i modelovanja zapreminskog skupljanja (SV) tokom vremena osmotskog sušenja (τ_o). Za kinetiku konvektivnog sušenja četvrtina dunje, obavljeno je matematičko modelovanje promjene vlažnosti u odnosu na suhu bazu (ω_k^s) tokom vremena konvektivnog sušenja (τ_k). U matematičkim modelima vrijeme trajanja osmotskog sušenja izraženo je u minutima, a vrijeme trajanja konvektivnog sušenja u satima.

Kao polazna osnova na osnovu pregleda literature je za svaku veličinu koja se modeluje usvojeno po tri matematička modela. Polazni modeli su prošireni u funkciji uticajnih faktora eksperimenta, kao odnos izabranog faktora i neke referentne vrijednosti. Za proširene matematičke modele su regresionom analizom određeni nepoznati koeficijenti i eksponenti modela. Regresiona analiza je urađena u programskom paketu Statistica 10 (StatSoft, Inc, 2010).

Osnovni kriterijum za procjenu preciznosti slaganja testiranih modela sa rezultatima eksperimenta i izbor najpogodnijeg modela je koeficijent korelacije (R). Pored koeficijenta korelacije za ocjenu modela kao pomoćni statistički parametri korišćeni su: hi -kvadrat (chi-square; χ^2), srednja greška pristrasnosti (mean bias error; MBE) i srednja greška kvadrata (root mean square error; RMSE). Veće vrijednosti R i manje vrijednosti χ^2 , MBE i RMSE ukazuju na veću preciznost modela.

Osnovna hipoteza u ovom radu biće dokazana na osnovu slaganja matematičkih modela sa eksperimentalnim rezultatima.

6.4.1. Matematičko modelovanje kinetike osmotskog sušenja dunje u obliku četvrtine

Na osnovu literaturnih podataka, teorijskih poluteorijskih i empirijskih modela kinetike sušenja voćnog tkiva, kao polaznu osnovu za modelovanje osmotskog sušenja usvojeni su matematički modeli (tabela 6.6).

Tabela 6.13. Izabrani matematički modeli za modelovanje kinetike osmotskog sušenja dunje u obliku četvrtine

Red. br.	Matematički model	Naziv modela
1.	$\omega_o^s = (k_1 + k_2 \cdot \tau + k_3 \cdot \tau^2)$	Wangh and Singh
2.	$\omega_o^s = k_1 \cdot \exp[-k_2 \cdot \tau]$	Henderson and Pabis
3.	$\omega_o^s = k_1 + \exp[-k_2 \cdot \tau]$	Lewis
4.	$SV = (k_1 + k_2 \cdot \tau + k_3 \cdot \tau^2)$	Wangh and Singh
5.	$SV = (k_1 \cdot \tau^{n_1})$	Eksponecijalni
6.	$SV = (k_1 \cdot \tau^{n_1}) + k_2$	Eksponecijalni prošireni

Matematički modeli prošireni su analiziranim faktorima eksperimenta osmotskog sušenja u bezdimenzionalnom obliku i dati su jednačinama: (6.1), (6.2), (6.3), (6.4), (6.5), (6.6). U eksperimentu su kao referentne vrijednosti usvojene najviše vrijednosti temperature osmotskog rastvora i koncentracije osmotskog rastvora: $t_{r(ref)} = 60^\circ\text{C}$ i $C_{r(ref)} = 65^\circ\text{Bx}$.

$$\omega_o^s = (k_1 + k_2 \cdot \tau + k_3 \cdot \tau^2) \cdot \left(\frac{t_r}{t_{r(ref)}} \right)^{n_1} \cdot \left(\frac{C_r}{C_{r(ref)}} \right)^{n_2} \quad (6.1)$$

$$\omega_o^s = k_1 \cdot \exp[-k_2 \cdot \tau_o] \cdot \left(\frac{t_r}{t_{r(ref)}}\right)^{n_1} \cdot \left(\frac{C_r}{C_{r(ref)}}\right)^{n_2} \quad (6.2)$$

$$\omega_o^s = k_1 + \exp[-k_2 \cdot \tau_o] \cdot \left(\frac{t_r}{t_{r(ref)}}\right)^{n_1} \cdot \left(\frac{C_r}{C_{r(ref)}}\right)^{n_2} \quad (6.3)$$

$$SV = (k_1 + k_2 \cdot \tau + k_3 \cdot \tau^2) \cdot \left(\frac{t_r}{t_{r(ref)}}\right)^{n_1} \cdot \left(\frac{C_r}{C_{r(ref)}}\right)^{n_2} \quad (6.4)$$

$$SV = (k_1 \cdot \tau^{n_1}) \cdot \left(\frac{t_r}{t_{r(ref)}}\right)^{n_1} \cdot \left(\frac{C_r}{C_{r(ref)}}\right)^{n_2} \quad (6.5)$$

$$SV = (k_1 \cdot \tau^{n_1}) \cdot \left(\frac{t_r}{t_{r(ref)}}\right)^{n_2} \cdot \left(\frac{C_r}{C_{r(ref)}}\right)^{n_3} + k_2 \quad (6.6)$$

Regresionom analizom su određeni nepoznati koeficijenti i eksponenti modela osmotskog sušenja. Kao baza regresione analize služila je tabela 6.14. Tabela je formirana tako što su iz osnovnih radnih tabela osmotskog sušenja, vrijednosti promjene vlažnosti četvrtina dunja u odnosu na suhu bazu i vrijednosti zapreminskog skupljanja četvrtina dunje za iste nivoe faktora i vrijeme osmotskog sušenja, usrednjenje i objedinjene.

Konačni matematički modeli kinetike osmotskog sušenja dunje sa izračunatim koeficijentima i eksponentima prikazani su u jednačinama: (6.7), (6.8), (6.9), (6.10), (6.11), (6.12).

$$\omega_o^s = (4,456486 - 0,009827 \cdot \tau + 0,000017 \cdot \tau^2) \cdot \left(\frac{t_r}{60}\right)^{-0,151206} \cdot \left(\frac{C_r}{65}\right)^{-0,494655} \quad (6.7)$$

$$\omega_o^s = 4,411578 \cdot \exp[-0,001810 \cdot \tau_o] \cdot \left(\frac{t_r}{60}\right)^{-0,151316} \cdot \left(\frac{C_r}{65}\right)^{-0,494744} \quad (6.8)$$

$$\omega_o^s = 3,24782 \cdot \exp[-0,00699 \cdot \tau_o] \cdot \left(\frac{t_r}{60}\right)^{-0,63922} \cdot \left(\frac{C_r}{65}\right)^{-2,11921} \quad (6.9)$$

$$SV = 1,230541 + (0,300303 \cdot \tau - 0,000697 \cdot \tau^2) \cdot \left(\frac{t_r}{60}\right)^{0,435199} \cdot \left(\frac{C_r}{65}\right)^{0,731925} \quad (6.10)$$

$$SV = (1,316439 \cdot \tau^{0,625573}) \cdot \left(\frac{t_r}{60}\right)^{0,435647} \cdot \left(\frac{C_r}{65}\right)^{0,730877} \quad (6.11)$$

$$SV = (1,386508 \cdot \tau^{0,616784}) \cdot \left(\frac{t_r}{60}\right)^{0,430885} \cdot \left(\frac{C_r}{65}\right)^{0,722431} - 0,247655 \quad (6.12)$$

Tabela 6.14. Srednje vrijednosti promjene vlažnosti četvrtina dunje u odnosu na suhu bazu i srednje vrijednosti zapreminskog skupljanja tokom osmotskog sušenja

Vrijeme osmotskog sušenja τ (min)	Temperatura osmotskog rastvora t (°C)	Koncentracija osmotskog rastvora °Bx	Vlažnost u odnosu na suhu bazu [kgw/kgsm]	Zaprem. skupljanje četvrtina dunje %
0	40	50	5,18	0
20	40	50	5,04	5
40	40	50	4,88	10,17
60	40	50	4,73	11,68
80	40	50	4,59	14,08
100	40	50	4,46	16,06
120	40	50	4,35	18,06
140	40	50	4,25	19,82
160	40	50	4,15	21,37
180	40	50	4,06	22,84
0	60	50	5,11	0
20	60	50	4,76	7,14
40	60	50	4,69	10,65
60	60	50	4,47	14,34
80	60	50	4,33	17,12
100	60	50	4,17	20,04
120	60	50	4,02	22,45
140	60	50	3,91	24,2
160	60	50	3,82	25,91
180	60	50	3,72	27,73
0	40	65	4,78	0
20	40	65	4,61	5,65
40	40	65	4,39	10,41
60	40	65	4,20	14,05
80	40	65	4,03	17,31
100	40	65	3,87	20,19
120	40	65	3,74	22,43
140	40	65	3,61	24,69
160	40	65	3,44	26,77
180	40	65	3,39	28,83
0	60	65	4,67	0
20	60	65	4,40	7,52
40	60	65	4,13	13,53
60	60	65	3,93	18,06
80	60	65	3,75	20,78
100	60	65	3,59	23,58
120	60	65	3,44	26,31
140	60	65	3,32	28,85
160	60	65	3,20	30,78
180	60	65	3,09	33,08

Rezultati matematičkog modelovanja kinetike osmotskog sušenja dunje su prikazani tabelarno (tabela 6.15).

Tabela 6.15. Rezultati matematičkog modelovanja osmotskog sušenja dunje u obliku četvrtine

Broj jednačine		Promjena vlažnosti u odnosu na suhu bazu			Zapreminsko skupljanje		
		(6.1)	(6.2)	(6.3)	(6.4)	(6.5)	(6.6)
Koeficijenti modela	k ₁	4,456486	4,411578	3,24782	1,230541	1,316439	1,386508
	k ₂	0,009827	-0,01810	-0,00699	0,300303	-	-0,24765
	k ₃	0,000017	-	-	0,000697	-	-
Eksponenti modela	n ₁	-0,151206	-0,151316	-0,63922	0,435199	0,625573	0,616784
	n ₂	-0,494655	-0,494744	-2,11921	0,731925	0,435647	0,430885
	n ₃	-	-	-	-	0,730877	0,722431
R		0,9874	0,9854	0,9390	0,99663	0,99824	0,99828
χ^2		0,038972	0,009488	0,00777	0,298649	0,297852	0,586758
MBE		1,92395E-09	0,00042173	0,000578087	-4,13809E-07	0,0258292	0,002332624
RMSE		0,180213	0,088918	0,082736	0,512928	0,51912	0,718962

Iz prikazane tabele se može zaključiti da su koeficijenta korelacije (R) za sve usvojene matematičke modele promjene vlažnosti u odnosu na suhu bazu tokom vremena osmotskog sušenja imaju velike vrijednosti. Najveću vrijednost koeficijenta korelacije ima *Wang and Singh* model. Svi modeli su imali dobro slaganje sa eksperimentalnim rezultatima što potvrđuju i pomoćni statistički pokazatelji (χ^2 , MBE i RMSE).

Svi izabrani matematički modeli kinetike zapreminskog skupljanja su imali izuzetno velike vrijednosti i ujednačene koeficijente korelacije (R). Navedeni modeli su imali dobro slaganje sa eksperimentalnim rezultatima što potvrđuju i pomoćni statistički pokazatelji (χ^2 , MBE i RMSE).

6.4.2. Matematičko modelovanje kinetike konvektivnog sušenja četvrtina dunje

Na osnovu pregleda i razmatranja literaturnih podataka za matematičko modelovanje konvektivnog sušenja, kao polazna osnova za matematičko modelovanje konvektivnog sušenja usvojeni su matematički modeli prikazani u tabeli 6.16.

Tabela. 6.16. Izabrani matematički modeli za modelovanje kinetike konvektivnog sušenja dunje u obliku četvrtine

Red. br.	Matematički model	Naziv modela
1.	$\omega_k^s = k_1 \cdot \exp(-k_2 \cdot \tau)$	<i>Henderson and Pabis</i>
2.	$\omega_k^s = \exp(-k_1 \cdot \tau)$	<i>Lewis (Newton)</i>
3.	$\omega_k^s = \exp(-k_1 \cdot \tau) + k_2$	<i>Lewis (Newton) prošireni</i>

Prikazani matematički modeli prošireni su analiziranim faktorima eksperimenta konvektivnog sušenja u bezdimenzionalnom obliku i dati su jednačinama: (6.13), (6.14), (6.15).

$$\omega_k^s = k_1 \cdot \exp \left[-k_2 \cdot \tau_k \cdot \left(\frac{t_{k1}}{t_{k1(ref)}} \right)^{n_1} \cdot \left(\frac{v_v}{v_{v(ref)}} \right)^{n_2} \right] \cdot \left(\frac{t_r}{t_{r(ref)}} \right)^{n_3} \cdot \left(\frac{C_r}{C_{r(ref)}} \right)^{n_4} \cdot \left(\frac{\tau_o}{\tau_{o(ref)}} \right)^{n_5} \quad (6.13)$$

$$\omega_k^s = \exp \left[-k_1 \cdot \tau_k \cdot \left(\frac{t_{k1}}{t_{k1(ref)}} \right)^{n_1} \cdot \left(\frac{v_v}{v_{v(ref)}} \right)^{n_2} \right] \cdot \left(\frac{t_r}{t_{r(ref)}} \right)^{n_3} \cdot \left(\frac{C_r}{C_{r(ref)}} \right)^{n_4} \cdot \left(\frac{\tau_o}{\tau_{o(ref)}} \right)^{n_5} \quad (6.14)$$

$$\omega_k^s = \exp \left[-k_1 \cdot \tau_k \cdot \left(\frac{t_{k1}}{t_{k1(ref)}} \right)^{n_1} \cdot \left(\frac{v_v}{v_{v(ref)}} \right)^{n_2} \right] \cdot \left(\frac{t_r}{t_{r(ref)}} \right)^{n_3} \cdot \left(\frac{C_r}{C_{r(ref)}} \right)^{n_4} \cdot \left(\frac{\tau_o}{\tau_{o(ref)}} \right)^{n_5} + k_2 \quad (6.15)$$

Regresionom analizom su određeni nepoznati koeficijenti i eksponenti modela konvektivnog sušenja. Kao baza regresione analize služila je zbirna tabela srednjih vrijednosti vlažnosti četvrtina dunje u odnosu na suhu bazu. Tabela je formirana tako što su vrijednosti vlažnosti četvrtina dunje u odnosu na suhu bazu, za iste nivoe faktora i vrijeme konvektivnog sušenja, usrednjene i objedinjene iz osnovnih radnih tabela za konvektivno sušenje. Zbog velikog broja redova (460), prikazan je samo dio tabele sa istim vrijednostima uticajnih faktora za sušenje (tabela 6.17).

U eksperimentu su kao referentne vrijednosti usvojene najviše vrijednosti koncentracije osmotskog rastvora i temperature vazduha ispred sloja materijala ($t_{k1(ref)} = 60$ °C) i brzine vazduha ispred sloja materijala ($v_{kl(ref)} = 1,5$ m/s).

Tabela 6.17. Promjene srednje vrijednosti vlažnosti četvrtina dunje u odnosu na suhu bazu, tokom konvektivnog sušenja

Vrijeme	Osmotski predtretman	Temperatura za sušenje °C	Brzina vazduha m/s	Promjena vlažnost u odnosu na suhu bazu (kg _w /kg _s)
0	40°C, 50°Bx i 100min	40	1	2,612278
1		40	1	2,202818
2		40	1	1,905834
3		40	1	1,679044
4		40	1	1,494383
5		40	1	1,343667
6		40	1	1,216498
7		40	1	1,110259
8		40	1	1,017930
9		40	1	0,938011
10		40	1	0,869385
11		40	1	0,807914
12		40	1	0,754427
13		40	1	0,705525
14		40	1	0,662525
15		40	1	0,623841
16		40	1	0,591485
17		40	1	0,558414
18		40	1	0,529703
19		40	1	0,503899
20		40	1	0,479571
21		40	1	0,457434
22		40	1	0,437891
23	40	1	0,419041	

Konačni matematički modeli kinetike konvektivnog sušenja dunje sa uvrštenim izračunatim koeficijentima i eksponentima prikazani su u jednačinama: (6.16), (6.17), (6.18).

$$\omega_k^s = 1,479 \cdot \exp \left[-0,124 \cdot \tau_k \cdot \left(\frac{t_{k1}}{60} \right)^{1,276} \cdot \left(\frac{v_v}{1,5} \right)^{-0,008} \right] \cdot \left(\frac{t_r}{60} \right)^{425,682} \cdot \left(\frac{C_r}{65} \right)^{-659,526} \cdot \left(\frac{\tau_o}{180} \right)^{0,068} \quad (6.16)$$

$$\omega_k^s = \exp \left[-0,11 \cdot \tau_k \cdot \left(\frac{t_{k1}}{t_{k1(ref)}} \right)^{1,35} \cdot \left(\frac{v_v}{v_{v(ref)}} \right)^{-0,03} \right] \cdot \left(\frac{t_r}{t_{r(ref)}} \right)^{-1352,81} \cdot \left(\frac{C_r}{C_{r(ref)}} \right)^{2087,99} \cdot \left(\frac{\tau_o}{\tau_{o(ref)}} \right)^{-0,13} \quad (6.17)$$

$$\omega_k^s = \exp \left[-0,22 \cdot \tau_k \cdot \left(\frac{t_{k1}}{60} \right)^{1,58} \cdot \left(\frac{v_v}{1,5} \right)^0 \right] \cdot \left(\frac{t_r}{60} \right)^{1077,66} \cdot \left(\frac{C_r}{65} \right)^{-1668,27} \cdot \left(\frac{\tau_o}{180} \right)^{-0,003} + 0,33 \quad (6.18)$$

Rezultati matematičkog modelovanja kinetike konvektivnog sušenja dunje u obliku četvrtine su prikazani tabelarno (tabela 6.18).

Tabela 6.18. Rezultati matematičkog modelovanja konvektivnog sušenja dunje u obliku četvrtine

		Promjena vlažnosti u odnosu na suhu bazu		
Broj jednačine		(6.13)	(6.14)	(6.15)
Koeficijenti modela	k ₁	1,479	-0,11	-0,22
	k ₂	-0,124	-	0,33
	k ₃	-	-	-
EkspONENTI modela	n ₁	1,276	13,5	1,58
	n ₂	-0,008	-0,03	0
	n ₃	425,628	-352,81	1077,66
	n ₄	-659,526	2087,99	1668,27
	n ₅	0,068	-0,13	-0,003
R		0,972	0,9330	0,979
χ^2		0,015196	0,035847	0,011102
MBE		-0,017226	-0,06678874	2,10214E-09
RMSE		0,122145	0,265305	0,104401

Koeficijenta korelacije (R) za sve usvojene matematičke modele promjene vlažnosti u odnosu na suhu bazu tokom vremena osmotskog sušenja su imali velike vrijednosti. Izraženije vrijednost koeficijenta korelacije imali su *Henderson and Pabis* i *Lewis (Newton) prošireni* modeli. Svi modeli su imali dobro slaganje sa eksperimentalnim rezultatima što potvrđuju i pomoćni statistički pokazatelji (χ^2 , MBE i RMSE).

7. DISKUSIJA ISTRAŽIVANJA

Eksperimentalni dio istraživanja je bio podijeljen na dvije međusobno povezane cijeline: eksperiment osmotskog sušenja i eksperiment konvektivnog sušenja dunje u obliku četvrtina.

Na osnovu literaturnog pregleda odabrani su uticajni faktori koji su od posebnog značaja za navedene eksperimente. Plan eksperimentalnog istraživanja je bio osmišljen da što bolje prikaže uticaj odabranih faktora na određene procese, koji se dešavaju tokom kombinovane tehnologije sušenja dunje u obliku četvrtina. Kod osmotskog sušenja kao uticajni faktori su odabrani temperatura rastvora, koncentracija rastvora i vrijeme osmotskog sušenja. Za eksperiment konvektivnog sušenja uticajni faktori su osmotski predtretman, temperatura vazduha za sušenje i brzina vazduha za sušenje.

Mjerenje osnovnih fizičkih osobina svježih plodova dunje obavljano je prve i druge godine istraživanja. Rezultati mjerenja (*tabele 6.1 i 6.2*) pokazuju da su plodovi dunje u drugoj godini ispitivanja imali veću prosječnu masu ($m_{pl} = 289,77$ gr). Plodovi dunje u prvoj godini eksperimentalnog ispitivanja su imali manju prosječnu masu ($m_{pl} = 179,96$ gr). Takođe, ostale izmjerene dimenzije su imale veću vrijednost u drugoj godini ispitivanja, dok je randman bio približno isti u obje godine ispitivanja. Razlika u izmjerenim dimenzijama je posljedica različitih klimatskih uslova u dvije godine istraživanja i različitim voćnjacima iz kojih su dunje nabavljene.

7.1. Osmotsko sušenja dunje u obliku četvrtine

Eksperimenti osmotskog sušenja su obavljeni u laboratorijskoj osmotskoj sušari, gdje je uspješno obavljena simulacija procesa osmotskog sušenja. U toku dvije godine eksperimentalnog ispitivanja (2009 i 2010), urađeno je 16 eksperimentalnih jedinica osmotskog sušenja dunje u formi četvrtina. Kao uticajni faktori tokom osmotskog sušenja su uzeti: temperature rastvora, koncentracija rastvora i vrijeme rastvora. Da bi se ispitaio njihov uticaj na ponašanje četvrtina dunje tokom osmotskog sušenja, varirani su na dva nivoa.

Na osnovu rezultata mjerenja planiranih fizičkih veličina, za svaku eksperimentalnu jedinicu su uz osnovnu radnu tabelu urađena po tri dijagrama osmotskog sušenja četvrtina dunje. Primjer dijagrama za eksperimentalnu jedinicu E_{O16} dat je na slikama 6.1, 6.2 i 6.3. Na dijagramima su

predstavljene: kinetičke krive promjene vlažnosti četvrtina dunje, kinetičke krive promjene najveće dimenzije i kinetičke krive zapreminskog skupljanja.

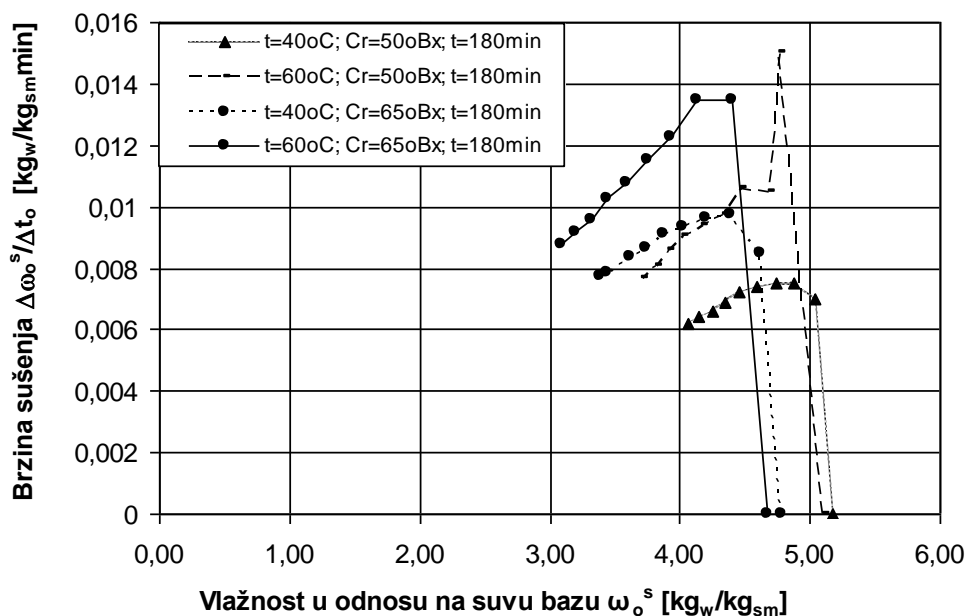
Na osnovu urađenih kinetičkih krivih promjene vlažnosti četvrtina dunje tokom osmotskog sušenja, može se zapaziti da je vlažnost dunja u direktnoj zavisnosti od koncentracije rastvora, temperature rastvora i vremena trajanja osmotskog sušenja. Osmotskim sušenjem sa koncentracijom rastvora od 65°Bx dolazilo je do bržeg smanjenja vlažnosti četvrtina dunje u odnosu na osmotsko sušenje sa koncentracijom rastvora od 50°Bx. Razlog je zato što veća vrijednost koncentracije rastvora uslovljava pojavu većih koncentracionih gradijenata molekula vode i rastvorka, između granične površine četvrtina dunje i osmotskog rastvora. Viša temperatura rastvora dovodila je do bržeg smanjenja vlažnosti dunje. Ovo se može objasniti time što je na višim temperaturama rastvora veća rastvorljivost rastvorka osmotskog rastvora, a kao posledica toga dolazi do porasta osmotskog pritiska pa i intenzivnijeg transporta molekula vode (*Saputra, D, 2001*).

Srednje vrijednosti vlažnosti četvrtina dunje u odnosu na suhu bazu tokom vremena osmotskog sušenja u zavisnosti od koncentracije rastvora i temperature rastvora prikazan je na slici 6.4. Kinetičke krive promjena vlažnosti tokom vremena osmotskog sušenja nemaju linearan oblik. One pokazuju da tokom vremena osmotskog sušenja opada intezitet promjene vlažnosti četvrtina dunje. Ovo je posebno izraženo kod osmotskog sušenja sa višim temperaturama rastvora i većim vrijednostima koncentracije rastvora. Najveća srednja vrijednost vlažnosti četvrtina dunje poslije 180 minuta osmotskog sušenja je iznosila 4,06 kg_w/kg_{sm}, kod kombinacije faktora $t_r = 40^{\circ}\text{C}$ i $C_r = 50^{\circ}\text{Bx}$. Osmotsko sušenje sa kombinacijom faktora $t_r = 60^{\circ}\text{C}$ i $C_r = 65^{\circ}\text{Bx}$ je imalo najmanju srednju vlažnost četvrtina dunje poslije 180 minuta sušenja (3,09 kg_w/kg_{sm})

Analizom kinetičkih krivih brzine osmotskog sušenja (*slika 6.5*), evidentna su dva karakteristična perioda osmotskog sušenja. Prvi je period zagrijavanja voćnog tkiva za sušenje (period rasta brzine sušenja), a drugi je period opadajuće brzine sušenja. Ovo nastaje zato što u prvom periodu sušenja najveći dio vode koja prelazi u rastvor je kapilarna vlaga i dio vlage iz ćelija koji se nalaze u slojevima tkiva neposredno uz graničnu površinu (*Rastogi, N. K, i saradnici, 2002; Barat, J. M, i saradnici, 2001; Yang, J, i saradnici, 2010*). Pošto je vlažnost uzoraka mjerena svakih 20 minuta, teško je precizno odrediti vremenski trenutak najveće brzine sušenja i početka opadanja brzine sušenja. Intenzivan rast brzine sušenja je bio u prvih 20 minuta osmotskog sušenja, ali ipak, najveća srednja brzina sušenja je bila oko 30 – tog minuta sušenja.

Različite vrijednosti temperature rastvora i koncentracije osmotskog rastvora imaju uticaj na brzinu sušenja. Najveća srednja brzina sušenja poslije 180 minuta osmotskog sušenja je iznosila 0,0087 kg_w/kg_{sm}min kod kombinacije faktora $t_r = 60^\circ\text{C}$ i $C_r = 65^\circ\text{Bx}$, a najmanja srednja brzina sušenja poslije 180 minuta osmotskog sušenja je iznosila 0,0062 kg_w/kg_{sm}min kod kombinacije faktora $t_r = 40^\circ\text{C}$ i $C_r = 50^\circ\text{Bx}$.

Na slici 7.1 prikazana je zavisnost srednje brzine osmotskog sušenja od vlažnosti četvrtina dunja izraženo u odnosu na suhu bazu. Ovdje se takođe primjećuju dva karakteristična perioda, period intenzivnog rasta brzine sušenja i period opadanja brzine sušenja. Poslije perioda zagrijavanja biomaterijala (intenzivno povećavanje brzine sušenja), sa smanjenjem vlažnosti uzoraka opada brzina sušenja. Intenzivnije opadanje brzine sušenja u zavisnosti od promjene vlažnosti je primjećeno kod osmotskog sušenja sa većom koncentracijom rastvora ($C_r = 65^\circ\text{Bx}$).



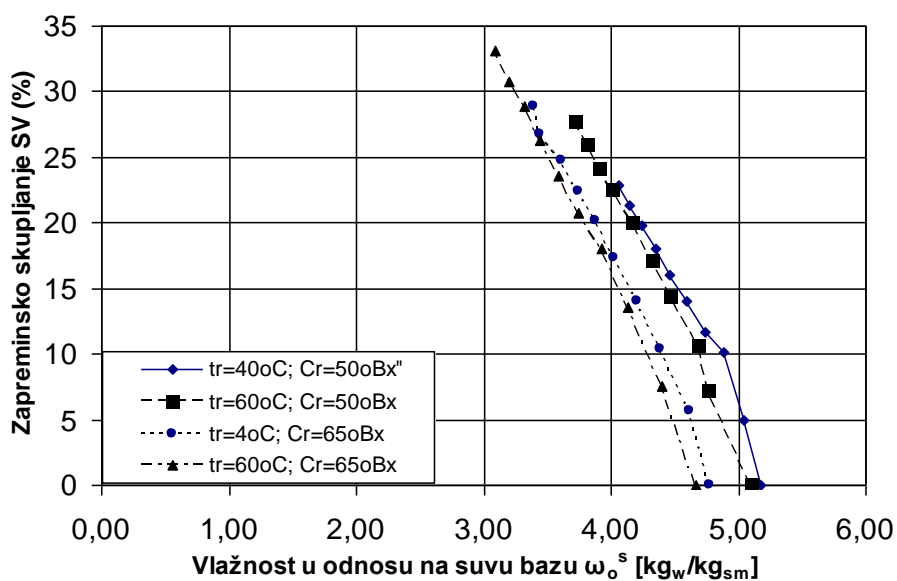
Slika 7.1. Zavisnost brzine sušenja ($\Delta\omega_0^s/\Delta\tau_0$) od vlažnosti četvrtina dunja, izraženo u odnosu na suhu bazu ω_0^s , tokom osmotskog sušenja

Zapreminsko skupljanje i smanjenje najveće dimenzije, tokom procesa osmotskog sušenja, su u direktnoj zavisnosti od temperature rastvora i koncentracije rastvora.

Smanjenje sopstvene zapremine (zapreminsko skupljanje) nastaje uslijed smanjenja vlažnosti četvrtina dunje tokom osmotskog sušenja, a posljedica je skupljanja ćelijskih zidova zbog smanjenja sadržaja vode u ćelijama. Na slici 6.7. se može vidjeti da je zapreminsko skupljanje bilo najveće kod osmotskog sušenja sa višom temperaturom rastvora i većom koncentracijom

rastvora ($t_r = 60^\circ\text{C}$ i $C_r = 65^\circ\text{Bx}$), gdje je srednja vrijednost zapreminskog skupljanja na kraju osmotskog sušenja bila $SV = 0,331$. Najmanje zapreminsko skupljanje je bilo kod osmotskog sušenja sa nižom temperaturom rastvora i manjom koncentracijom rastvora ($t_r = 40^\circ\text{C}$ i $C_r = 50^\circ\text{Bx}$), gdje je srednja vrijednost zapreminskog skupljanja na kraju osmotskog sušenja bila $SV = 0,228$. Analizirajući rast vrijednosti zapreminskog skupljanja, evidentno je opadanje brzine zapreminskog skupljanja tokom vremena osmotskog sušenja.

Na slici 7.2. prikazana je zavisnosti zapreminskog skupljanja od promjene vlažnosti četvrtina dunja iskazano na suhu bazu, tokom osmotskog sušenja. Posmatrajući kinetičke krive za različite kombinacije faktora tokom osmotskog sušenja četvrtina dunje, može se primjetiti da imaju dosta sličan oblik. To znači da različite koncentracije rastvora i temperature rastvora tokom osmotskog sušenja nisu bitno mijenjali odnos promjene vlažnosti sa zapreminskim skupljanjem četvrtina dunje.



Slika 7.2. Zavisnost zapreminskog skupljanja (SV) od vlažnosti četvrtina dunja, izraženo u odnosu na suhu bazu ω_0^s , tokom osmotskog sušenja

Provjera uticaja izabranih nivoa faktora na srednju brzinu sušenja i zapreminsko skupljanje, prilikom osmotskog sušenja četvrtina dunje, obavljena je disperzionom analizom trofaktornog eksperimenta.

U tabeli 6.5. prikazani su rezultati disperzione analize za srednju brzinu sušenja sa statističkom vjerovatnoćom od 99%. Vrijednosti Fišerovog kriterijuma za sve testirane faktore su veće od njihovih tablični, što znači da postoji uticaj ispitivanih faktora.

U tabeli 6.6. prikazani su rezultati disperzione analize za zapreminsko skupljanje, a rezultati pokazuju da od testiranih faktora jedino vrijeme trajanja procesa ima veću vrijednost Fišerovog kriterijuma od tablične vrijednosti, za statističku vjerovatnoću 99%. Vrijednost Fišerovog kriterijuma za temperature rastvora i koncentraciju rastvora su ispod tablične vrijednosti, za statističku vjerovatnoću 99%. Ove vrijednosti su veće od tabličnih vrijednosti, za statističku vjerovatnoću 95%, na osnovu čega se može zaključiti da postoji uticaj svih ispitivanih faktora.

7.2. Konvektivno sušenje četvrtina dunje

Konvektivno sušenje je obavljeno na modelskoj eksperimentalnoj sušari i ostvareni su svi parametri zadati planom eksperimenta. Ukupno je urađeno 40 eksperimentalnih jedinica konvektivnog sušenja u toku dvije godine eksperimenata. Kao uticajni faktori su uzeti: temperature vazduha za sušenje, brzina vazduha za sušenje i vrsta osmotskog predtretmana. Da bi se ispitaio uticaj faktora na proces konvektivnog sušenja, temperatura i brzina vazduha za sušenje je varirana na dva nivoa, a broj različitih osmotskih predtretmana za konvektivno sušenje je bilo četiri. Pored toga, urađene su i ekperimentalne jedinice konvektivnog sušenja bez osmotskog predtretmana.

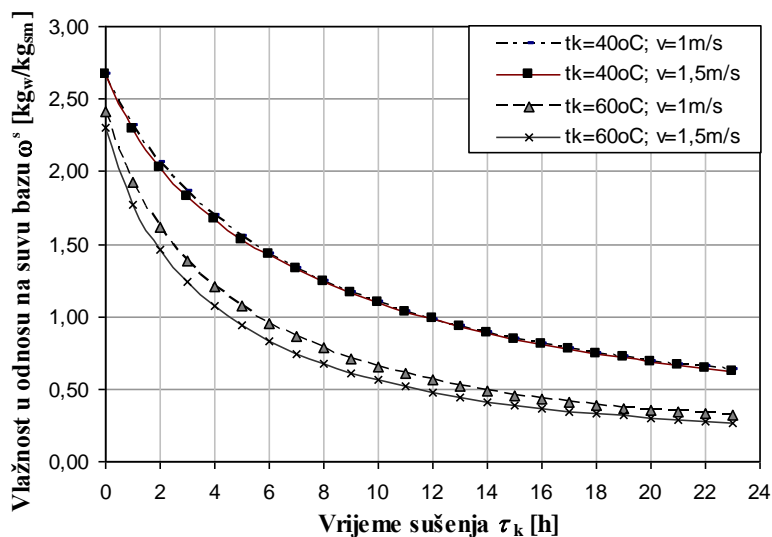
Na osnovu rezultata mjerenja koji su dobijeni pomoću mjerne akvizicije i memorisani u personalni računar, urađene su radne tabele konvektivnog sušenja. Svaka eksperimentalna jedinica je imala jednu radnu tabelu, urađenu na osnovu podataka iz personalnog računara i jednu radnu tabelu koja je napravljena na osnovu rezultata mjerenja deset slučajnih uzoraka četvrtina dunja, prije i nakon konvektivnog sušenja. Primjer radnih tabela su dati za eksperimentalnu jedinicu E_{K1} (tabele 6.7. i 6.8). Za svaku eksperimentalnu jedinicu konvektivnog sušenja na osnovu tabele urađeni su dijagrami, a primjer dijagrama za E_{K1} prikazan su na slikama 6.8, 6.9, 6.10, 6.11.

Srednje vrijednosti promjene vlažnosti četvrtine dunje tokom konvektivnog sušenja u zavisnosti od predtretmana prikazani su preko kinetičkih krivih (slika 6.12, 6.13, 6.14, 6.15). Na osnovu kinetičkih krivih konvektivnog sušenja, evidentno je da su vlažnosti četvrtina dunja na početku konvektivnog sušenja bile u zavisnosti od osmotskog predtretmana. Najveću početnu vlažnost prilikom konvektivnog sušenja su imali uzorci bez osmotskog sušenja, a najmanju uzorci sa osmotskim predretmanom 4 ($t_r=60^{\circ}\text{C}$, $C_r=65^{\circ}\text{Bx}$ i $\tau=180$ min).

Pomoću kinetičkih krivih se može konstatovati, da je promjena vlažnosti četvrtina dunje tokom procesa konvektivnog sušenja u direktnoj zavisnosti od primjenjenog predtretmana osmotskog sušenja. Najveću promjenu vlažnosti uzoraka su imale eksperimentalne jedinice konvektivnog sušenja bez osmotskog predtretmana. Veću promjenu vlažnosti četvrtina dunje tokom konvektivnog sušenja imaju eksperimentalne jedinice koje su osmotski sušene sa nižom temperaturom i manjom koncentracijom rastvora. Analizom kinetičkih krivih evidentno je da promjena vlažnosti četvrtina dunje tokom konvektivnog sušenja u zavisnosti od vremena trajanja osmotskog predtretmana. Veća promjena vlažnosti tokom konvektivnog sušenja je kod primjenjenog osmotskog predtretmana sa kraćim vremenom sušenja ($\tau_0 = 100$ min), nego kod osmotskog predtretmana sa dužim vremenom sušenja ($\tau_0 = 180$ min). Razlog ove pojave je što u slučaju dužih procesa osmotskog sušenja dolazi do značajnijeg transporta šećera u biljno tkivo. Zbog povećanog sadržaja šećera u biljnom tkivu, dolazi do usporenja procesa transporta vlage iz tkiva ka okolnom vazduhu tokom konvektivnog sušenja.

Sve navedeno se može obrazložiti pojavom, da rastvorak koji je dospio u tkivo voća tokom osmotskog sušenja utiče na smanjenje efektivnog koeficijenta difuzije vlage tokom konvektivnog sušenja do krajnje vlažnosti. Sa porastom koncentracije rastvorka u tkivu voća snižava se efektivni koeficijent difuzije vlage što vodi usporenju sušenja. Iste rezultate o uticaju osmotskog predtretmana na kinetiku konvektivnog sušenja prijavili su mnogi autori (*Park, K. J, i saradnici, 2002; Korsilabut, J, i saradnici, 2010; Riva, M, i saradnici, 2005; Singh, B, i Gupta, A. K, 2007*).

Na slici 7.3. je preko kinetičkih krivih prikazana zavisnosti promjene vlažnosti od temperature vazduha i brzine vazduha za sušenje tokom konvektivnog sušenja. Analizom kinetičkih krivih evidentno je da promjenom temperature vazduha za sušenje sa 40°C na 60°C , dovodi do većeg gubitka vlage uzoraka za sušenje. Promjenom brzine vazduha za sušenje sa 1 m/s na 1,5 m/s, pri temperaturi vazduha od 40°C , nije došlo do značajnih razlika u vlažnostima uzoraka tokom konvektivnog sušenja. Promjenom brzine vazduha sa 1 m/s na 1,5 m/s, primjetna je razlika u vlažnostima uzoraka, tokom konvektivnog sušenja sa temperaturom vazduha 60°C .



Slika 7.3. Kinetičke krive promjene vlažnosti četvrtina dunje u odnosu na suhu bazu (ω_k^s) u zavisnosti od temperature vazduha i brzine vazduha za sušenje (Predtretman 2 $t_r=40^\circ\text{C}$, $C_r=50^\circ\text{Bx}$ i $\tau_o=180$ min)

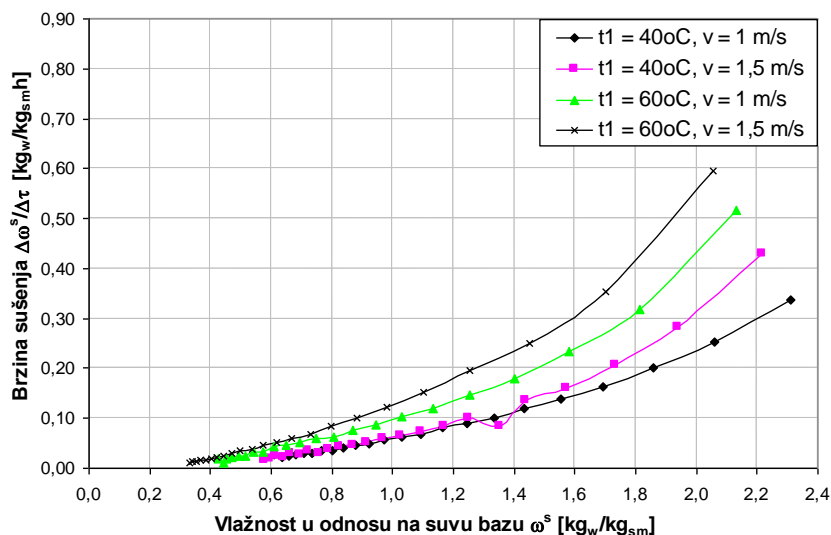
Zapreminsko skupljanje je bilo manje izraženo kod konvektivnog sušenja sa osmotskim predtretmanom (tabela 6.9). Korišćenjem osmotskog predtretmana sa višom temperaturom i većom koncentracijom osušeni uzorci imaju manje zapreminsko skupljanje. Takođe, manje zapreminsko skupljanje tokom konvektivnog sušenja je bilo kod primjenjenog osmotskog predtretmana sa dužim vremenom sušenja ($\tau_o = 180$ min), nego kod osmotskog predtretmana sa kraćim vremenom sušenja ($\tau_o = 100$ min).

Analizom kinetičkih krivih promjene srednje brzine sušenja (slika 6.9, 6.10, 6.11, 6.12), primjetna su dva perioda sušenja. Prvi period je karakterističan porastom brzine sušenja, a drugi period opadanjem brzine sušenja. Na kraju prvog perioda dostiže se maksimalna brzina isparavanja molekula vode iz voćnog tkiva za sušenja. Dostizanje maksimalne brzine isparavanja molekula vode iz voćnog tkiva za sušenje je posledica povećane koncentracije kapilarne površinske vlage. Nakon isparavanja površinski vezane vlage, brzina sušenja počinje da opada i ulazi se u drugi period. U ovom periodu brzina sušenja se snižava zbog povlačenja fronta isparavanja u unutrašnjost materijala i počinje se stvarati suvi sloj.

Na osnovu kinetičkih krivih može se vidjeti da su veće brzine sušenja u toku prvog sata konvektivnog sušenja imale eksperimentalne jedinice sa osmotskim predtretmanom, ali je nakon toga njihova vrijednost mnogo brže opadala. Na kraju konvektivnog sušenja najveću brzinu sušenja su imale eksperimentalne jedinice sa osmotskim predtretmanom, a sa predtretmanom 4

($t_r=60^\circ\text{C}$, $C_r=65^\circ\text{Bx}$ i $\tau=180$ min). Nakon jednog sata konvektivnog sušenja najveća srednja brzina sušenja je bila $0,0604 \text{ kg}_w/\text{kgh}$, pri: $t_k=60^\circ\text{C}$, $v =1,5 \text{ m/s}$ i predtretmanu 3, a najmanja je bila $0,0207 \text{ kg}_w/\text{kgh}$, pri: $t_k=40^\circ\text{C}$, $v =1 \text{ m/s}$ i bez osmotskog predtretmana.

Na slici 7.4 je prikazana zavisnost brzine sušenja od vlažnosti četvrtina dunje izražene na suhu bazu, tokom konvektivnog sušenja za predtretman 2 ($t_r=40^\circ\text{C}$, $C_r=50^\circ\text{Bx}$ i $\tau=180$ min). Analizirajući sliku evidentan je uticaj različitih vrijednosti temperatura i brzine vazduha na brzinu sušenja. ($\Delta\omega^s_k/\Delta\tau_k$). Tokom sušenja, sa smanjenjem vlažnosti biomaterijala, smanjuje se uticaj temperature i brzine vazduha za sušenje na brzinu sušenja. Naročito slabi uticaj različitih brzina za sušenje. Slične rezultate o uticaju brzine vazduha za sušenje ispred sloja materijala dobili su Park, K. J, i saradnici (2002) za sušenje kockica kruške i Togrul, I. I, i Pehlivan, D, (2003) za sušenje kajsije u obliku cijelog ploda.



Slika 7.4. Odnos brzine sušenja i vlažnosti četvrtina dunja (izraženo na suhu bazu) tokom konvektivnog sušenja u zavisnosti od temperature i brzine vazduha, za predtretman 2 ($t_r=40^\circ\text{C}$, $C_r=50^\circ\text{Bx}$ i $\tau=180$ min)

Disperzionom analizom trofaktornog eksperimenta je provjeren uticaj izabranih faktora na srednju brzinu sušenja i zapreminsko skupljanje, prilikom konvektivnog sušenja četvrtina dunje.

Rezultati disperzione analize za srednju brzinu sušenja, sa statističkom vjerovatnoćom 99%, pokazuju da postoji uticaj osmotskog predtretmana i temperature vazduha za sušenje. Uticaj faktora brzine vazduha je imao manju vrijednost Fišerovog kriterijuma od tabličnih, za statističku vjerovatnoću 95% i 99%. Najvjerovatniji razlog je zbog malih razlika njihovih vrijednosti u eksperimentima (1 m/s i 1,5 m/s).

Rezultati disperzione analize za zapreminsko skupljanje su pokazali slične rezultate kao i za srednju brzinu sušenja. Prilikom testiranja faktora, jedino brzina vazduha ispred sloja biomaterijala nema veću vrijednost Fišerovog kriterijuma od tablične vrijednosti. Najveći značaj na zapreminsko skupljanje tokom konvektivnog sušenja imao je faktor predtretman.

Na osnovu rezultata istraživanja u radovima Yang, J. i saradnici, (2010), Togrul, T. I, Ispir, A. (2007), Ramos, I. N. i saradnici (2003), Torreggiani, Danilia, Bertolo, G. (2001), Pavkov, I. (2012) i sopstvenog istraživanja u disertaciji, moguće je uočiti neke razlike u kinetici konvektivnog sušenja četvrtina dunje sa osmotskim predtretmanom i bez predtrmana.

Na početku konvektivnog sušenja uzorci osmotski predtretirani su imali manju vlažnost, bili su manjih dimenzija i zapremine. Pored toga, molekuli rastvorka su osmotskim predtretmanom ušli unutar tkiva uzoraka. Brzina sušenja u samom startu je bila veća kod uzoraka sa predtretmanom, zbog određene količine molekula vode iz osmotskog rastvora, na površini četvrtina dunje. Nakon ovoga perioda, pa sve do kraja konvektivnog sušenja, veću brzinu sušenja su imali uzorci osmotski predtretirani. Ovo se može objasniti time da rastvorak koji je tokom osmotskog sušenja ušao u slojeve tkiva četvrtina dunje, usporava difuziju vode do površine razmjene.

Molekuli rastvorka koji su ušli u tkivo četvrtina dunje potpomažu difuziju molekula vode u tkivu tokom konvektivnog sušenja, u smjeru manje koncentracije vode – produženi efekat osmoze. Na ovaj način se uspostavlja ravnomjernije polje vlažnosti u uzorcima, čime se postiže manja razlika vlažnosti između slojeva ćelija. Zbog manjih razlika vlažnosti između slojeva ćelija dolazi do ujednačenijeg intenziteta skupljanja, što umanjuje unutrašnje napone između slojeva i smanjuje deformacija tokom konvektivnog sušenja. Takođe, presušivnje površinski slojeva četvrtina dunje je manje izraženo, čime je izbjegnuto gubitak boje i arome. Zapremina uzoraka je bila veća primjenom osmotskog predtrmana. Nakon sušenja, zbog postojanja adsorpcionih veza vlage, rastvorka i suve materije, moguće je skladištiti osušeni proizvod sa većom vrijednošću vlažnosti.

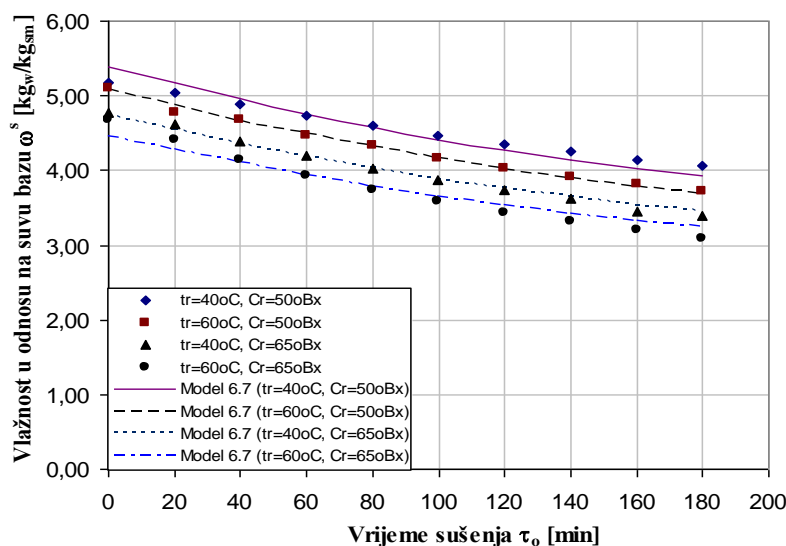
7.3. Matematičko modelovanje kinetike kombinovane tehnologije sušenja dunje u formi četvrtina

Matematičkim modelovanjem je opisana kinetika prenosa mase tokom kombinovane tehnologije sušenja dunje u formi četvrtine. Polazni modeli su služili kao polazna osnova matematičkog modelovanja, a za svaku veličinu koja je modelovana usvojena su po tri

matematička modela. Kao osnova podataka za matematičko modelovanje su služile zbirne tabele srednjih vrijednosti od dva ponavljanja za istu kombinaciju faktora dobijenih eksperimentom.

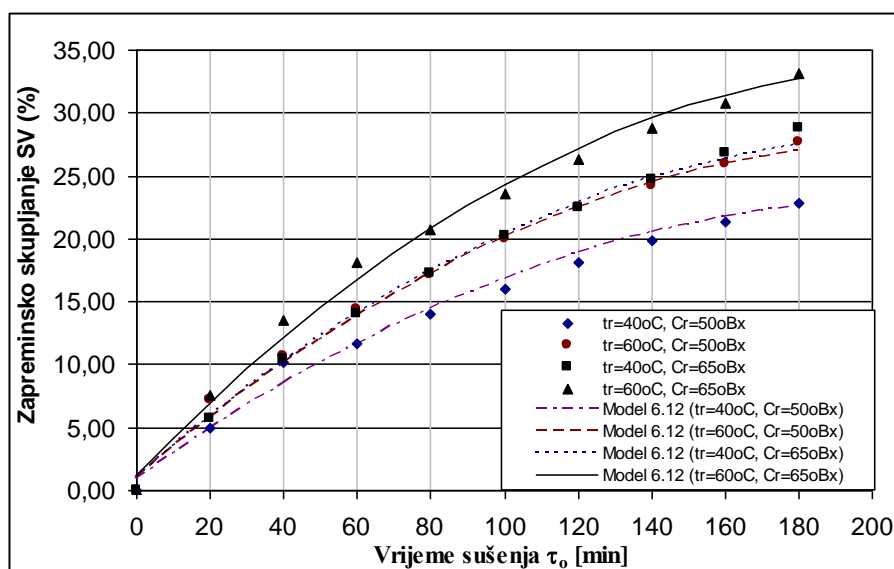
Kinetika prenosa mase tokom osmotskog sušenja četvrtina dunje je matematički opisana modelovanjem promjene vlažnosti u odnosu na suhu bazu (ω_o^s) i modelovanja zapreminskog skupljanja (SV) tokom vremena osmotskog sušenja (τ_o). Početni modeli kinetike osmotskog sušenja (jednačine 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6) su prošireni uticajnim faktorima eksperimenta u bezdimenzionalnom obliku, pa su dobijen konačani modeli (jednačine 6.7, 6.8, 6.9, 6.10, 6.11, 6.12). Za svaki model regresionom analizom su izračunati koeficijenti i eksponenti modela. Svaki model je obuhvatao promjene fizičke veličine koja se modeluje u intervalu nivoa faktora u kojima je eksperiment izveden. Dodatno pojednostavljenje modela je postignuto usvajanjem maksimalnih vrijednosti nivoa faktora za referentnu vrijednost ($t_{r(ref)} = 60^\circ\text{C}$, $C_{r(ref)} = 65^\circ\text{Bx}$).

Modelovanjem promjene vlažnosti u odnosu na suhu bazu (ω_o^s) za sve tri primjenjena modela, dobijeni su zadovoljavajuće visoke vrijednosti koeficijenta korelacije ($R = 0,9390 - 0,9874$). Najveću vrijednost koeficijenta korelacije ($R = 0,9874$) je imao prošireni model Wang i Singh. Urađena je grafička provjera rezultata pomenutog modela sa rezultatima mjerenja promjene vlažnosti u odnosu na suhu bazu četvrtina dunje tokom osmotskog sušenja (slika 7.5). Analizirajući sliku primjetno je blago rasipanje rezultata mjerenja, a izvedeni modeli sa zadovoljavajućom preciznošću predstavljaju eksperimentalne rezultate.



Slika 7.5. Grafičko upoređivanje eksperimentalnih vrijednosti promjene vlažnosti u odnosu na suhu bazu (ω_o^s) četvrtina dunje tokom vremena osmotskog sušenja sa vrijednostima izračunatim pomoću modela (6.7).

Primjenom izabranih matematičkih modela za modelovanje zapreminskog skupljanja (SV) tokom osmotskog sušenja dobijeni su izuzetno visoke vrijednosti koeficijenta korelacije ($R = 0,9966 - 0,9983$). Na slici 7.6. je prikazana upoređenje eksperimentalnih vrijednosti zapreminskog skupljanja četvrtina dunje tokom osmotskog sušenja sa vrijednostima izračunatim upotrebom modela (6.12). Analizom slike, evidentno je i ovdje blago rasipanje rezultata mjerenja, ali izvedeni modeli sa zadovoljavajućom preciznošću predstavljaju eksperimentalne rezultate. Najveća rasipanja rezultata mjerenja su pri najvišoj temperaturi i najvećoj koncentraciji osmotskog rastvora.



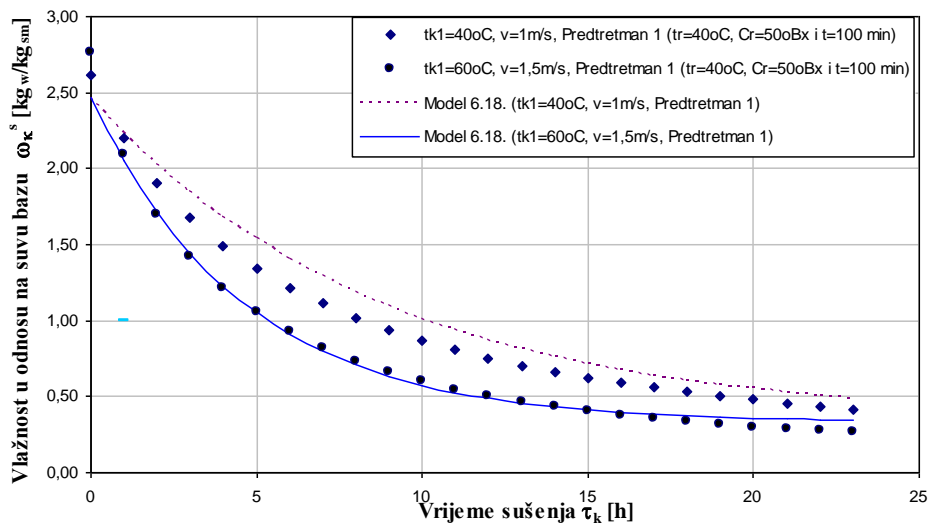
Slika 7.6. Grafičko upoređivanje eksperimentalnih vrijednosti zapreminskog skupljanja (SV) četvrtina dunje tokom vremena osmotskog sušenja sa vrijednostima izračunatim pomoću modela (6.12).

Kinetika konvektivnog sušenja je matematički opisana, modelovnjem promjene vlažnosti u odnosu na suhu bazu (ω_k^s) četvrtina dunje tokom vremena konvektivnog sušenja (τ_k). Izabrana tri matematička modela su prošireni uticajnim faktorima u bezdimenzionalnom obliku, pa su dobijeni konačni modeli (jednačine 6.16, 6.17, 6.18).

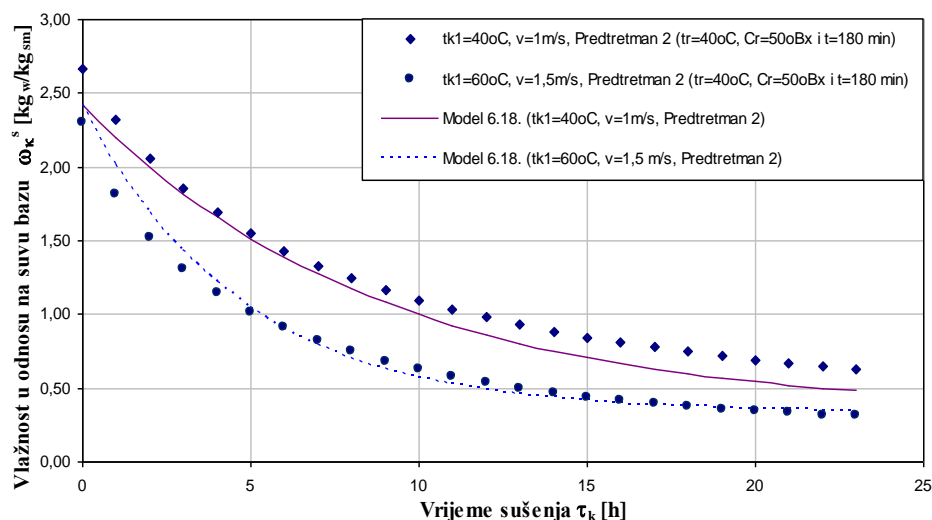
Vrijednosti koeficijenta korelacije (R) za sve modele (tabela 6.18) su zadovoljavajući visoki ($R=0,933 - 0,979$). Najveću vrijednost koeficijenta korelacije ($R = 0,979$) je imao prošireni model *Lewis* (*Newton*). Grafička provjera pomenutog modela sa eksperimentalnim rezultatima promjene vlažnosti tkiva dunje u obliku četvrtina prikazana ja na slikama 7.7, 7.8, 7.9. i 7.10.

Na osnovu slika 7.7, 7.8, 7.9. i 7.10 može se primjetiti da postoje rasipanje rezultata mjerenja i proračunskih rezultata. Ovo je posebno karakteristično kod konvektivnog sušenja sa osmotskim

predtretmanom 3 ($t_r=60^\circ\text{C}$, $C_r=65^\circ\text{Bx}$ i $\tau_o=100$ min). Najveća odstupanja proračunskih vrijednosti vlažnosti četvrtina dunje od eksperimentalnih tokom konvektivnog sušenja je u vremenskom trenutku $\tau_k=0$ h. Pored određenih odstupanja, model (6.18) sa zadovoljavajućom preciznošću aproksimira eksperimentalne vrijednosti promjene vlažnosti tokom konvektivnog sušenja.

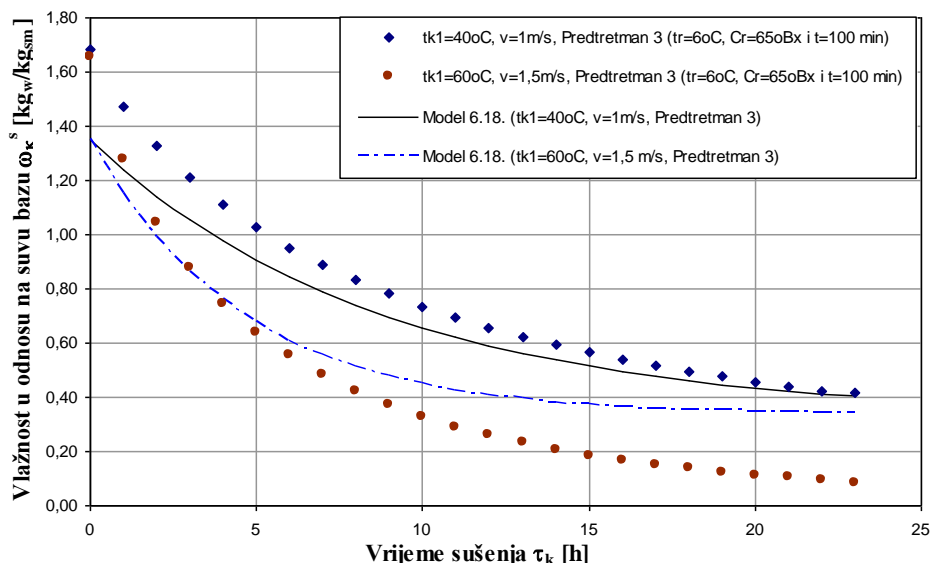


Slika 7.7. Upoređenje eksperimentalnih vrijednosti promjene vlažnosti u odnosu na suhu bazu (ω_k^s) tkiva dunje u obliku četvrtina tokom vremena (τ_k) konvektivnog sušenja, sa vrijednostima izračunatih pomoću modela (6.18) za predtretman 1 ($t_r = 40^\circ\text{C}$, $C_r = 50^\circ\text{Bx}$ i $\tau_o = 100$ min)

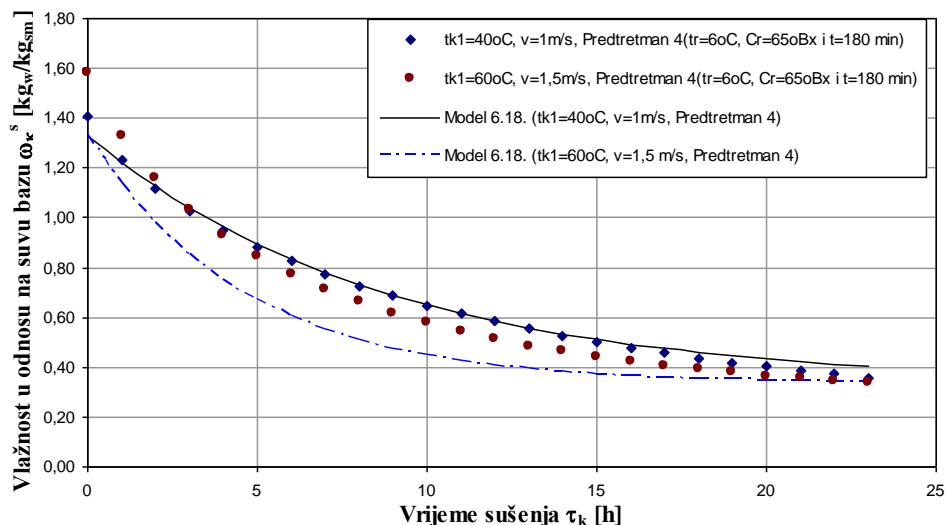


Slika 7.8. Upoređenje eksperimentalnih vrijednosti promjene vlažnosti u odnosu na suhu bazu (ω_k^s) tkiva dunje u obliku četvrtina tokom vremena (τ_k) konvektivnog sušenja, sa vrijednostima

izračunatih pomoću modela (6.18) za predtretman 2 ($t_r = 40^\circ\text{C}$, $Cr = 50^\circ\text{Bx}$ i $\tau_o = 180$ min)



Slika 7.9. Upoređenje eksperimentalnih vrijednosti promjene vlažnosti u odnosu na suhu bazu (ω_k^s) tkiva dunje u obliku četvrtina tokom vremena (τ_k) konvektivnog sušenja, sa vrijednostima izračunatih pomoću modela (6.18) za predtretman 3 ($t_r = 60^\circ\text{C}$, $Cr = 65^\circ\text{Bx}$ i $\tau_o = 100$ min)



Slika 7.10. Upoređenje eksperimentalnih vrijednosti promjene vlažnosti u odnosu na suhu bazu (ω_k^s) tkiva dunje u obliku četvrtina tokom vremena (τ_k) konvektivnog sušenja, sa vrijednostima izračunatih pomoću modela (6.18) za predtretman 4 ($t_r = 60^\circ\text{C}$, $Cr = 65^\circ\text{Bx}$ i $\tau_o = 180$ min)

Svi prikazani matematički modeli osmotskog i konvektivnog sušenja imaju visoke koeficijente korelacije (R). Pored toga, korišćeni pomoćni statistički parametri su pokazali dobro slaganje matematičkih modela sa eksperimentalnim rezultatima. Na osnovu rezultata dobijenih

matematičkim modelovanjem kinetike osmotskog sušenja i matematičkim modelovanjem kinetike konvektivnog sušenja, potvrđena je osnovna hipoteza ovoga rada.

Dobijeni modeli predstavljaju osnovu za projektovanje novih i optimizaciju postojećih procesa sušenja dunje kombinovanom tehnologijom. Modeli su jednostavni za primjenu i uz pomoć personalnog računara moguće je brzo izračunavanje željenih veličina.

8. ZAKLJUČAK

Eksperimentalna ispitivanja ogledala su se u praćenju kinetike osmotskog i konvektivnog sušenja dunje u obliku četvrtina. Eksperimenti osmotskog i konvektivnog sušenja izvedeni su kao trofaktorni.

Rezultati dobijeni osmotskim sušenjem dunje u obliku četvrtina, pokazuju da viša temperature rastvora, veća koncentracija rastvora izazivaju intenzivnije sniženje vlažnosti. Dužim osmotskim sušenjem ($\tau_o = 180$ min) postiže se manja krajnja vlažnost četvrtina dunje. Najveća srednja brzina osmotskog sušenja je bila pri višim temperaturama i većim koncentracijama rastvora ($t_r = 60^\circ\text{C}$ i $C_r = 65^\circ\text{Bx}$). Brzina sušenja je imala intezivan porast na početku osmotskog sušenja ($\tau_o \approx 20$ min.), a nakon toga dolazilo je do opadanja brzine sušenja. Zapreminsko skupljanje i promjena najveće dimenzije je bilo intenzivnije prilikom osmotskog sušenja sa višom temperaturom rastvora i većom koncentracijom rastvora. Zapreminsko skupljanje i promjena najveće dimenzije ne predstavljaju linearan proces, nego tokom osmotskog sušenja intezitet njihovih promjena opada.

Disperzionom analizom rezultata mjerenja eksperimenta osmotskog sušenja sa statističkom vjerovatnoćom 99%, dokazivan je uticaj različitih uticajnih faktora na dva pokazatelja kinetike osmotskog sušenja. Prvim testom dokazano da postoji uticaj izabranih faktora osmotskog sušenja (temperatura osmotskog rastvora, koncentracija osmotskog rastvora i vrijeme trajanja osmotskog sušenja) na brzinu sušenja dunje u obliku četvrtine. Drugim testom je dokazano da vrijeme trajanja osmotskog sušenja ima uticaj na zapreminsko skupljanje četvrtina dunje, sa statističkom vjerovatnoćom 99%. Temperatura i koncentracija rastvora imaju uticaj na zapreminsko skupljanje sa statističkom vjerovatnoćom 95%.

Eksperimentom konvektivnog sušenja je ispitivan uticaj predtretmana, temperature vazduha za sušenje i brzine vazduha ispred sloja materijala na kinetiku sušenja. Promjena vlažnosti dunje u obliku četvrtina tokom konvektivnog sušenja bila je intezivnija sa višom temperaturom vazduha za sušenje ($t_k = 60^\circ\text{C}$). Promjena brzine vazduha za sušenja nije imala značajni uticaj na promjenu vlažnosti četvrtina dunje tokm konvektivnog sušenja sa nižom temperaturom vazduha, ali je postojao uticaj pri temperaturi vazduha za sušenje od 60°C . Primjenjeni predtretman je imao uticaj na promjenu vlažnosti, a najveća promjena vlažnosti je bila kod konvektivnog

sušenja bez osmotskog predtretmana. Najveća promjena vlažnosti tokom konvektivnog sušenja sa primjenjenim osmotskim predtretmanom je bila pri nižoj temperaturi rastvora, manjoj koncentraciji rastvora i kraćim vremenom osmotskog sušenja ($t_r=40^{\circ}\text{C}$, $C_r=50^{\circ}\text{Bx}$ i $\tau=100$ min). Tokom konvektivnog sušenja brzina sušenja je bila veća pri višim temperaturama vazduha za sušenje ($t_k = 60^{\circ}\text{C}$), dok je promjena brzine vazduha za sušenje u opsegu 1 – 1,5 m/s imala uticaj pri većim vlažnostima uzoraka u toku sušenja. Najveća brzina konvektivnog sušenja, primjenom osmotskog predtretmana, bila je pri predtretmanu sa nižom temperaturom rastvora, manjom koncentracijom rastvora i kraćim vremenom osmotskog sušenja ($t_r=40^{\circ}\text{C}$, $C_r=50^{\circ}\text{Bx}$ i $\tau=100$ min). Intezivan rast brzine sušenja tokom konvektivnog sušenja je bio u prvih 60 minuta, nakon toga brzine sušenja su imale opadajuću vrijednost.

Disperzionom analizom rezultata mjerenja eksperimenta konvektivnog sušenja sa statističkom vjerovatnoćom 99% dokazivan je uticaj različitih uticajnih faktora na dva pokazatelja kinetike konvektivnog sušenja. Prvim testom dokazano da postoji uticaj izabranih faktora predtretmana i temperature vazduha na brzinu sušenja dunje u obliku četvrtine tokom konvektivnog sušenja. Drugim testom je dokazano da postoji uticaj izabranih faktora predtretmana i temperature vazduha za sušenje na zapreminsko skupljanje. Disperzionom analizom, sa statističkom vjerovatnoćom od 95% i 99% , nije dokazan uticaj faktor brzine vazduha na brzinu sušenja i zapreminsko skupljanje uzoraka tokom konvektivnog sušenja.

Primjenom osmotskog predtretmana u kombinovanoj tehnologiji sušenja dunje, dobijaju se neke pozitivne osobine sušenog proizvoda. Smanjenje zapremine je manje izraženo, nego primjenom samo konvektivnog sušenja. Tokom konvektivnog sušenja, osmotski predtretman utiče na ujednačavanje isparene količine vode sa površina koja formiraju tkiva različitih difuzionih karakteristika. Ujednačenje je skupljanje ćelija posmatrano od spoljnih slojeva ka unutrašnjim. Stvaraju se manji unutrašnji naponi između slojeva tkiva, uslijed čega nastaju manje deformacije oblika. Vlažnost u voćnom tkivu je ravnomjernije raspoređena i manje je presušivanje spoljnih slojeva voćnog tkiva. U površinskom sloju voćnog tkiva postoje adsorpcione veze vlage, rastvorka i suve materije, a ove veze utiču na povećanje vrijednosti vlažnosti pri kojima se osušeni proizvod bezbjedno skladišti. Pored toga, imale su ljepša organoleptička svojsva (boju, oblik i dimenzije) i prijatniju aromu.

Osmotsko sušenje četvrtina dunje je matematički opisano modelovanjem promjene vlažnosti u odnosu na suhu bazu (ω_b^s) i modelovanja zapreminskog skupljanja (SV) tokom vremena

osmotskog sušenja (τ_o). Konvektivno sušenje je matematički opisano modelovanjem promjene vlažnosti u odnosu na suhu bazu (ω_t^s) tokom vremena konvektivnog sušenja (τ_k). Za svaku promjenu veličina urađena su po tri modela, kod koji je povećana univerzalnost modela u nivou analiziranih faktora, proširivanjem modela uticajem faktora u bezdimenzionalnom obliku. Izvedeni modeli su imali dobro slaganje sa eksperimentalnim rezultatima, što pokazuju visoke vrijednosti koeficijente korelacije. Primjena svih modela je jednostavna, gdje je uz pomoć standardnih računara moguće brzo izračunavanje svih modelovanih veličina.

U budućim istraživanjima kombinovane tehnologije sušenja dunje, potrebno je analizirati veći broj uticajnih faktora. Na taj način došlo bi do proširivanja modela i povećanja njihove univerzalnosti. Potrebno bi bilo ispitati uticaj različitih dimenzije i različitih oblika komadića dunje na kinetiku sušenja. Značajno bi bilo ispitati uticaj brzine osmotskog rastvora, na prenos mase tokom osmotskog sušenja. Pored toga, potrebno je ispitati promjenu nekih drugih fizičkih svojstava dunje primjenom kombinovane tehnologije sušenja.

9. LITERATURA

- [1] Alam, S, i Singh, A. (2010): Optimum proces parameters for development of sweet aonla flakes, *IJRRAS* 3; 323-333.
- [2] Azoubel, P. M, El-Aouar, A. A, Tonon, R. V, Kurozawa, L. E, Antonio, G. C, Murr, F. E. X, Park, K. J. (2009): Effect of osmotic dehydration on the drying kinetics and quality of cashew apple. *International Journal of Food Science & Technology*, 44, 5; 980-986
- [3] Babalis, S. J, Papanicolaou, E, Kyriakis, N, Belessiotis, V. G. (2006): Evaluation of thinlayer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*), *Journal of Food Engineering*, 75, 205-214.
- [4] Babić, Ljiljana, (1984): Kinetika konvektivnog sušenja kukuruza u debelom sloju, Magistarska teza, Fakultet poljoprivrednih znanosti, Zagreb.
- [5] Babić, Ljiljana, (1989): Uticaj nekih hibrida kukuruza na brzinu sušenja sloja zrna debljine, 100-300 mm, Doktorska disertacija, Fakultet poljoprivrednih znanosti, Sveučilište u Zagrebu, Zagerb, 221.
- [6] Babić, Ljiljana, Babić, M. (2000): Sušenje i skladištenje, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad.
- [7] Babić, Ljiljana, Babić, M, Karadžić B, Stanivuković, B. (2002): Sušenje kajisije, *PTEP – Časopis za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi*, Novi Sad, 6; 1-2, 1-4.
- [8] Babić, Ljiljana, Babić, M. (2003): Kombinovano osmotsko i konvektivno sušenje kajisije, *PTEP – Časopis za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi*, Novi Sad, 7; 1-2, 1-3.
- [9] Babić, Ljiljana, Babić, M, Pavkov, I. (2003): Nova tehnologija pripreme i sušenja kajisije, *Savremena poljoprivredna tehnika*, Novi Sad, 29; 4, 179-184.
- [10] Babić, Ljiljana, Babić, M, Pavkov, I. (2004): Osmotsko sušenje kajisije u zavisnosti od temperature i koncentracije rastvora, *PTEP – Časopis za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi*, Novi Sad, 8; 1-2, 1-3.
- [11] Babić, Ljiljana, Babić, M, Pavkov, I. (2004): Uticajni faktori na promenu vlažnosti polutki kajisije pri osmotskom sušenju, *Savremena poljoprivredna tehnika*, Novi Sad, 30; 3-4, 117-126.
- [12] Babić, Ljiljana, Babić, M, Pavkov, I. (2007): The Quality Indicators of Osmotic Dried Apricot (*Prunus armeniaca*); *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 72; 4, 335-341.

- [13] Babić, M, Babić, Ljiljana, Pavkov, I. (2004): Domaća proizvodnja sušene kajsije, Časopis „Voćarstvo i vinogradarstvo“ Novi Sad, 2; 4, 10-14.
- [14] Babić, M, Babić, Ljiljana, Pavkov, I. (2004); Maseni i energetska bilansi sušenja kajsije, Savremena poljoprivredna tehnika, Novi Sad, 30; 3-4, 127-133.
- [15] Babić, M, Babić, Ljiljana, Pavkov, I, (2005): Energetska i maseni bilans kombinovanog sušenja voća, PTEP – Časopis za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi, Novi Sad, 9; 3-4, 54 -56.
- [16] Babić, M, Babić, Ljiljana, (2007); Fizičke osobine poljoprivrednih materijala – autorizovana predavanja Poljoprivredni fakultet, Novi Sad.
- [17] Babić, M, Babić, Ljiljana, Pavkov, I, Radojčin, M. (2008): Promene fizičkih osobina dunja tokom osmotskog sušenja, PTEP – Časopis za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi, Novi Sad, 12; 3, 101-107.
- [18] Babić, M, Babić, Ljiljana, Radojčin, M, Pavkov, I, Bogićević, M. (2011): Effect of combined technology of fruit and vegetables drying on equipment designing, Journal on Processing and Energy in Agriculture, Novi Sad, 15; 4, 244-277.
- [19] Barat, J. M, Fito, P, Chiralt, A. (2001): Modeling of simultaneous mass transfer and structural changes in fruit tissues, Journal of Food Engineering 49, 77 – 85.
- [20] Barroca, M. J, Guine, R. P. F. (2012): Study of drying kinetics of quince, ORAL – International conference of agricultural engineering, 1100-1108.
- [21] Bchir, B, Besbes, S, Attia, H, Blecker, C. (2009): Osmotic dehydration of pomegranate seeds: mass transfer kinetics and differential scanning calorimetry characterization, International Journal of Food Science and Technology, 44, 2208-2217.
- [22] Chafer, M, Ortola, M. D, Chiralt, A, Fito, P. (1998): Osmotic Dehydration of Orange Peel, Proceedings of the 11th International Drying Symposium (IDS'98), Volume A, Thessaloniki, Greece, 886-894.
- [23] Chaudhari, A. P, Kumbhar, B. K, Singh, B. P. N, Narain, M. (1993): Osmotic dehydration of fruits and vegetables - a Review. Indian Food Ind 12;1, 20–27.
- [24] Devic, E, Guyoi, S, Daudin, J, Bonazzi, C. (2010): Effect of temperature and cultivar on polyphenol retention and mass transfer during osmotic dehydration of apples. Journal of Agricultural and Food Chemistry 58, 606-614.
- [25] Diamante, L. M, Munro, P. A. (1991): Mathematical modelling of hot-air drying of sweet potato slices. International Journal of Food Science and Technology, 26, 99-109.

- [26] Diamente, L. M, Munro, P, A. (1993): Mathematical modelling of the thin layer solar drying of sweet potato slices, *Solar Energy*, 51, 271-276.
- [27] Diamente, L. M, Ihns, R, Savage, P. G, Vanhanen, L. (2010): A new mathematical model for thin layer drying of fruits, *International Journal of Food Science and Technology*, 45, 1956-1962.
- [28] El-Aouar, A. A, Azoubel, M. P, Barbosa, L. J, Murr, X. E. F. (2006): Influence of osmotic agent on the osmotic dehydration of papaya (*Carica papaya* L.). *Journal of Food Engineering* 75, 267-274.
- [29] Falade, K. O, Igbeka, J. C, Ayanwuyi, F. A. (2007): Kinetics of mass transfer and colour changes during osmotic dehydration of watermelon. *Journal of Food Engineering* 80, 979-985.
- [30] Falade, K. O, Solademi, O. J. (2010): Modeling of air drying of fresh and blanched sweet potato slices, *International Journal of Food Science and Technology*, 45, 278-288.
- [31] Fito, P, Pastor, R. (1994): Non-diffusional mechanism occurring during vacuum osmotic dehydration. *Journal of Food Engineering*, 24; 4, 513-519.
- [32] Giraldo-Zuñiga, A. D, Arévalo-Pinedo, A, Rodrigues, R. M, Lima, C. S. S, Feitosa, A. C. (2004): The air drying behaviour of osmotically dehydrated jackfruit slices, *Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004)*, vol. C, 2120-2126
- [33] Henderson, S. M, (1974): Progress in developing the thin-layer drying equation. *Transactions of ASAE*, 17, 1167-1168/1172.
- [34] Henderson, S. M., Pabis, S. (1961): Grain drying theory I: temperature effect on drying coefficient. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 6, 169-174.
- [35] Henderson, S, M, Perry, R, L. (1976): *Agricultural Process Engineering*, Connecticut: AVI Publishing Co., Inc, 302-339.
- [36] Ispir, A. E, Togrul, I. T. (2009): Osmotic dehydration of apricot: kinetics and the effect of process parameters. *Chem Eng Res Des* 87, 166–180.
- [37] Jančić, R. (2004): *Botanika farmaceutika, Drugo dopunjeno izdanje*. Javno preduzeće Službeni list SCG, Beograd, 272.
- [38] Kaleta, Agnieszka, Gornicki, K. (2010): Evaluation of drying models of apple (var. McIntosh) dried in a convective dryer. *International Journal of Food Science & Technology*, 45, 891-898.

- [39] Karathanos, V, T. (1999): Determination of water content of dried fruits by drying kinetics, *Journal of Food Engineering*, 39, 337-344.
- [40] Kassem, A, S. (1998): Comparative studies on thin layer drying models for wheat, In: 13 th International Congress on Agricultural Engineering, vol. 6, Marocco, February 2-6.
- [41] Kastori, R. (1998): Fiziologija biljaka, Feljton, Novi Sad, 527.
- [42] Katić, Z. (1997). Sušenje i sušare u poljoprivredi. Multigaf, d.o.o., Zareb, R Hrvatska, 406.
- [43] Kaya, A, Aydin, O. (2007): Experimental investigation of drying kinetics of cherry laurel Department of Mechanical Engineering ,Karadeniz Technical University, Turkey.
- [44] Khoiyi, M. R, Hesari, J. (2006): Osmotic dehydration kinetics of apricot using sucrose solution, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Tabriz University, P. O., Tabriz, Iran
- [45] Kingsly, R. P, Goyal, R. K, Manikantan, M. R., Ilyas, S. M. (2007). Effects of pretreatments and drying air temperature on drying behaviour of peach slice, *International Journal of Food Science and technology*, 42, 65 -69.
- [46] Kojić, M, Pekić Sofija, (1998): Botanika, Izdavačko preduzeće „Nauka“, Beograd, 523.
- [47] Koc, B, Eren, I, Kaymak Ertekin, F. (2008): Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: The effect of drying method, *Journal of Food Engineering*, 85; 3, 340-349
- [48] Korsrilabut, J, Borompichaichartkul, C, Duangmal, K. (2010): Effect of invert sugar on the drying kinetics and water mobility of osmosed-air dried cantalupe, *International Journal of Food Science and Technology*, 45, 1524-1531.
- [49] Lazarides, H. N, Katsanides, E, Nicolaidis, A. (1995): Mass transfer kinetics during osmotic preconcentration aiming at minimal solid uptake. *Journal of Food Engineering* 25, 151-166.
- [50] Lenart, A, Lewicki, P. P. (1988): Osmotic preconcentration of carrot tissue followed by convention drying. *J Food Proc Eng* 14,163–171.
- [51] Lewicki, P. P. (1998): A three parameter equation for food moisture sorption isotherms, *Journal of Food Engineering*, 21, 127-144.
- [52] Lewicki, P. P. (2000): Raoult's law based food water sorption isotherm, *Journal of Food Engineering*, 43, 31-40.
- [53] Lewis, W. K. (1921): The rate of drying of solid materials, *Industrial Engineering Chemistry*, 13, 427-432.

- [54] Likov, A. V. (1968). Teorija suški, Moskva.
- [55] Midilli, A, Kucuk, H, Yapar, Z. (2002): A new model for single layer drying. *Drying Technology*, 20, 1503-1513.
- [56] Milošević, Zoran (2010): Gajenje i proizvodnja dunje u plantažnim zasadima, Agrolib, Jagodina.
- [57] Moraga M. J, Moraga, G, Navarrete, N. M. (2011). Effect of the re-use of the osmotic solution on the stability of osmodehydro-refrigerated grapefruit. *LWT—Food Sci Technol* 44, 35–41.
- [58] Moreira, R, Chenlo, F, Torres, M. D, Vazquez, G. (2007): Effect of stirring in the osmotic dehydration of chestnut using glycerol solutions. *LWT-Food Science and Technology* 40, 1507-1514.
- [59] Moshenin, N. N. (1980): *Physical Properties of Plan and Animal Materials*, Gordon and Breach Science Publishers, New York, 742.
- [60] Mratinić, Evica (2010): *Dunja*, Partenon, Beograd.
- [61] Nedeljkov, M, Stakić, M. (1994): *Osnove tehnike sušenja*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 126.
- [62] Nikolić, M. (2009): *Dunja u Srbiji stanje i perspektiva*, Zbornik radova II Savetovanja „Inovacije u voćarstvu“, Beograd, 169.
- [63] Overhults, D. G, White, H. E, Hamilton, H. E, Ross, I. J. (1973): Drying soybean with heated air. *Transactions of ASAE*, 16, 112-113.
- [64] Page, G, E. (1949): Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers, MSc thesis, Prude University, 185.
- [65] Panagiotu, N. M, Karathanos, V. T, Maroulis, Z. B. (1998): Modeling of the Osmotic Dehydration of fruits, *Proceedings of the 11th International Drying Symposium (IDS'98)*, Volume A, Thessaloniki, Greece, 954-961.
- [66] Park, K. J, Bin, Adriana, Brod, F. P. R. (2002): Drying of pear dAnjou with and without osmotic dehydration, *Journal of food Engineering*, 56, 97-103.
- [67] Pavkov, I. (2007): *Kinetika osmotskog sušenja kajsije*, Magistarska teza, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad.
- [68] Pavkov, I. (2012): *Kombinovana tehnologija sušenja voćnog tkiva*, Doktorska disertacija, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad.

- [69] Pavkov, I, Babić, Ljiljana, Babić, M. (2007): Matematički model kinetike osmotskog sušenja kajsije, PTEP – Časopis za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi, Novi Sad, 11; 3, 98-101.
- [70] Pavkov, I, Babić, Ljiljana, Babić, M, Radojčin, M, (2008): Promene fizičkih osobina jabuke (*Malus domestica*) tokom kombinovane tehnologije sušenja, PTEP – Časopis za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi, Novi Sad, 12; 3, 127-131.
- [71] Pavkov, I., Babić, Ljiljana, Babić, M, Radojčin, M, Stojanović, Č. (2010): Uticaj faktora osmotskog sušenja na kinetiku konvektivnog sušenja kriški kruške (*Pyrus Communis L.*), PTEP – Časopis za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi, Novi Sad, 14; 3, 125-130.
- [72] Pavkov, I., Babić, Ljiljana, Babić, M, Radojčin, M, Stojanović, Č. (2011): Uticaj osmotskog predtretmana na kinetiku konvektivnog sušenja polutki nektarina (*Pyrus Persica*), PTEP – Časopis za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi, Novi Sad, 15; 3, 125-130.
- [73] Perez, N. E, Shmalko, M. E. (2007): Convective drying of pumpkin: Influence of pretreatment and drying temperature, Maestría en Tecnología de los Alimentos, Universidad Nacional de Misiones, Argentina
- [74] Phisut, N. (2012): Mini Review Factors affecting mass transfer during osmotic dehydration of fruits, Faculty of Agricultural Product Innovation and Technology, Srinakharinwirot University, Thailand.
- [75] Priručnik za industriju šećera (1980): Prva knjiga, Poslovna zajednica Jugoslavije, Beograd.
- [76] Radojčin, M, Babić, M, Babić, Ljiljana, Pavkov, I, Stojanović, Č. (2010): Color parameters change of quince during combined drying, Journal on Processing and Energy in Agriculture, 14; 2, 81-84.
- [77] Rahman, M. S. (1995): Food Properties Handbook, CRC Press, Taylor & Francis Group, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 1-86.
- [78] Rahman, M. S. (2009): Food Properties Handbook (Second Edition), Taylor & Francis Group, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 861.
- [79] Ramaswamy, H. S, Driscoll, R. H. (1981): Thermophysical properties of apple in relation to freezing, Journal of Food Science, 46, 724-729.
- [80] Ramos, I. N, Brando, T. R. S, Silva, C. L. M. (2003): Structural changes during air drying of fruits and vegetables, Food Science Technology International, 9; 3, 201-206.

- [81] Rastogi N. K, Raghavaro K. S, Niranjana, K, Knorr, D.(2002): Recent Developments in Osmotic Dehydration Methods to Enhance Mass transfer, *Food Science and Technology* 13, 48-59.
- [82] Ratti, Cristina, Mujumdar, A. S. (2005): *Drying of fruits, Processing fruits*, CRC press LLC.
- [83] Reppa, A, Mandala, J, Kostaropoulos, E, Saravacos, D. (1998): Influence of Solution Temperature and Concentration on the Combined Osmotic and Air Drying, *Proceedings of the 11th International Drying Symposium (IDS'98)*, Volume A, Thessaloniki, Greece, 860-867.
- [84] Riva, M, Campolongo, S, Leva, A. A, Maestrelli, A, Torreggiani, D. (2005): Structure-property relationships in osmo-air-dehydrated apricot cubes, *Food Research International*, 38, 533-542.
- [85] Sankat, K. C, Castaigne, F, Maharaj, R. (1996): The air drying behaviour of fresh and osmotically dehydrated banana slices, *International Journal of Food Science and Technology*, 3, 123-135.
- [86] Saputra, D. (2001): Osmotic Dehydration of Pineapple, *Drying Technology*, 19; 2, 415 -425.
- [87] Sharaf-Eldeen, Y. I, Blaisdell, J. L, Hamdy, M. Y. (1980): A model for air corn drying, *transactions of ASAE*, 23, 1261-1265/1271.
- [88] Sharma H. K, Pandey, H, Kumar, P. (2003): Osmotic dehydration of sliced pears. *J Agric Eng* 40; 1, 65–68
- [89] Shi, J, Le Maguer, M. (2002): Osmotic Dehydration of Foods: Mass Transfer and Modeling Aspects, *Food Reviews International* , Vol. 18 , No. 4, 305-335.
- [90] Shi, J, Xue, J. S. (2009): Application and development of osmotic dehydration technology in food processing. In Ratti, C. (Ed). *Advances in food dehydration*. CRC Press. USA.
- [91] Simal, S, Femenia, A, Garau, M. C, Rossello, C. (2005): Use of exponential, Pages and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit, *Journal of Food Engineering*, 66, 323-328.
- [92] Singh, B, Gupta, A. K. (2007): Mass transfer kinetics and determination of effective diffusivity during convective dehydration of pre-osmosed carrot cubes, *Journal of Food Engineering*, 79, 459-470.
- [93] Singh, B, Sanjev, M. (2008): Effect of osmotic pretreatment on equilibrium moisture content of dehydrated carrot cubes. *International Journal of Food Science and Technology*, 43, 532-537.

- [94] Stančević, A. (1986): Dunja – mušmula – oskoruša, Nolit, Beograd
- [95] StatSoft, Inc, (2010): STATISTICA (data analysis software system), version 10.
www.statsoft.com
- [96] Stefanović, M, Urošević, M. (1995): Praktična primena osmotskog sušenja poljoprivrednih proizvoda, Reavija “Agronomska saznanja”, Vol 5, str. 2-7.
- [97] Stojanović, Č, Babić, M, Pavkov, I, Radojčin, M, Lončarević, V. (2010): Osmotsko sušenje dunje u rastvoru saharoze, PTEP – Časopis za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi, Novi Sad, 14; 1, 44-48.
- [98] Taiwo, A. K, Angersbach, A, Knorr D. (2001): Effects of Pretreatments on the Diffusion Kinetics and Some Quality Parameters of Osmotically Dehydrated Apple Slices, Food Chemistry, Vol 49, 2804 – 2811.
- [99] Togrul, I. T, Pehlivan, D. (2003): Modeling of drying kinetics of single apricot, Journal of Food Engineering, 58, 23-32.
- [100] Togrul, I. T. (2010): Modeling of heat and moisture transport during black grapes, International Journal of Food Science and Technology, 45, 1146-1152.
- [101] Torgul, I. T, Ispir, A. (2007): Effect on effective diffusion coefficients and investigation of shrinkage during osmotic dehydration of apricot, Energy Conversion and Management, 48, 2611-2621.
- [102] Torreggiani, Danila, Bertolo, G. (2001). Osmotic pre-treatments in fruit processing: chemical, physical and structural effects. Journal of Food Engineering, 49, s. 247-253.
- [103] Urošević, M. (1986): Uticaj veličina amplitude i perioda promene parametara režima sušenja u sistemima gustog sloja. Doktorska disertacija. Tehnološki fakultet, Novi Sad, Srbija, 174.
- [104] Vega-Galvez, A, Miranda, M, Bilbao-Sainz, C, Uribe, E, Lemus-Mondaca, R. (2008): Empirical modeling of drying process for apple (CV. Granny Smith) slices at different air temperatures, Journal of Food processing and Preservation, 32, 972-986.
- [105] Veličković, M. (2002): Voćarstvo, Poljoprivredni fakultet, Beograd.
- [106] Veličković, M, Jelačić, S, Radivojević, D. (2000): Pomološko-tehnološka i lekovita svojstva vranjske i leskovačke dunje, Jugoslovensko voćarstvo, Vol. 34, br. 131-132, s. 125-130.

- [107] Veličković, M. i Radivojević, D. (2001): Oversea hight influence on the pomological and technological properties of “Vranjska” and Leskovačka” quince, Arhiv za poljoprivredne nauke, Vol. 62, br. 218-219, 27-32.
- [108] Verma, L. R, Bucklin, R. A, Endan, J. B, Wratten, F. T. (1985): Effect of drying air parameters on rice drying models, Transactios of ASAE, 28, 296-301.
- [109] Wang, C. Y, Singh, R. P. (1978): A single layer drying equation for rough rice. ASAE paper No: 78-3001. St Joseph, MI: ASAE
- [110] www.wikipedija.org/sr (2013): Dunja, Beograd.
- [111] Yagcioglu, A, Degirmencioglu, A, Cagatay, F. (1999): Drying characteristics of laurel under different conditions. In: Proceedings of the 7th Intrenational Congress on Agricultural Mechanization and Energy, Adana, Turkey, Maj 26-27, 565-569.
- [112] Yadav, A. K, Singh, S. V. (2012): Osmotic dehydration of fruits and vegetables: a review, Association of Food Scientists et Technologists (India) .
- [113] Yang, J, Di, Q, Jiang, Q, Zhao, J. (2010): Application of pore size analyzers in study of Chinese Angelica slices drying, Drying Technology, 28, 214-221.
- [114] Židko, V. I, Rezičkov, V. A, Ukolov, B. S. (1982): Zernosušenje i zernosušilki, Kolos, Moskva, 239.

SPISAK SLIKA

Broj slike	Naziv slike	Strana
3.1.	<i>Struktura biljne ćelije</i>	4
3.2.	<i>Leskovačka dunja</i>	9
3.3.	<i>Vranjska dunja</i>	10
5.1.	<i>Plod dunje sorte leskovačka</i>	31
5.2.	<i>Komora za sumporisanje sa pomoćnim priborom</i>	37
5.3.	<i>Namjenska komora za sumporisanje voća KS 80</i>	
5.4.	<i>Šematski prikaz eksperimentalne sušare za osmotsko sušenje, poluindustrijskog tipa</i>	40
5.5.	<i>Šema laboratorijskog postrojenja za konvektivno sušenje IVA-2</i>	43
5.6.	<i>Mjerenje najveće dimenzije uzorka</i>	50
5.7.	<i>Postupak određivanja zapremine četvrtina dunje</i>	52
5.8.	<i>Digitalni refraktometar "Atigo", Japan</i>	53
5.9.	<i>Algoritam obrade podataka</i>	59
6.1.	<i>Promjene vrijednosti vlažnosti na uzorku od 8 četvrtina dunje tokom osmotskog sušenja, za eksperimentalnu jedinicu EO₁₆</i>	65
6.2.	<i>Promjene vrijednosti najveće dimenzije na uzorku od 8 četvrtina dunje tokom osmotskog sušenja za eksperimentalnu jedinicu EO₁₆</i>	65
6.3.	<i>Promjene vrijednosti zapreminskog skupljanja na uzorku od 8 četvrtina dunje tokom osmotskog sušenja za eksperimentalnu jedinicu EO₁₆</i>	66
6.4.	<i>Promjene srednje vlažnosti četvrtina dunja u odnosu na suhu bazu (ω^s_o) tokom vremena osmotskog sušenja (τ_o) u zavisnosti od temperature (t_r) i koncentracije (C_r) osmotskog rastvora</i>	66
6.5.	<i>Promjene srednje brzine osmotskog sušenja četvrtina dunje u odnosu na suhu bazu ($\Delta\omega^s_o/\Delta\tau_o$) tokom vremena osmotskog sušenja (τ_o) u zavisnosti od temperature (t_r) i koncentracije (c_r) osmotskog rastvora</i>	67
6.6.	<i>Promjene srednje vrijednosti najveće dimenzije četvrtina dunje (Δa) tokom vremena osmotskog sušenja (τ_o) u zavisnosti od temperature (t_r) i koncentracije (C_r) osmotskog rastvora</i>	68
6.7.	<i>Promjene srednje vrijednosti zapreminskog skupljanje četvrtina dunje (SV) tokom vremena osmotskog sušenja (τ_o) u zavisnosti od temperature (t_r) i koncentracije (C_r) osmotskog rastvora</i>	69
6.8.	<i>Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtine dunje tokom konvektivnog sušenja za eksperimentalnu jedinicu EK₁</i>	73
6.9.	<i>Kinetička kriva promjene vlažnosti u odnosu na suhu bazu tokom konvektivnog sušenja za eksperimentalnu jedinicu EK₁</i>	74
6.10.	<i>Kinetička kriva brzine sušenja četvrtine dunje tokom konvektivnog sušenja za eksperimentalnu jedinicu EK₁</i>	74

6.11.	<i>Kinetička kriva brzine sušenja četvrtine dunje u odnosu na suhu bazu tokom konvektivnog sušenja za eksperimentalnu jedinicu EK₁</i>	75
6.12.	<i>Kinetičke krive promjene srednje vlažnosti četvrtina dunje (ω_k) tokom konvektivnog sušenja, u zavisnosti od različitih predtretmana, za: $t_{kl} = 40^\circ\text{C}$, $v = 1 \text{ m/s}$</i>	77
6.13.	<i>Kinetičke krive promjene srednje vlažnosti četvrtina dunje (ω_k) tokom konvektivnog sušenja, u zavisnosti od različitih predtretmana, za: $t_{kl} = 40^\circ\text{C}$, $v = 1,5 \text{ m/s}$</i>	78
6.14.	<i>Kinetičke krive promjene srednje vlažnosti četvrtina dunje (ω_k) tokom konvektivnog sušenja, u zavisnosti od različitih predtretmana, za: $t_{kl} = 60^\circ\text{C}$, $v = 1 \text{ m/s}$</i>	78
6.15.	<i>Kinetičke krive promjene srednje vlažnosti četvrtina dunje (ω_k) tokom konvektivnog sušenja, u zavisnosti od različitih predtretmana, za: $t_{kl} = 60^\circ\text{C}$, $v = 1,5 \text{ m/s}$</i>	79
6.16.	<i>Kinetičke krive promjene srednje brzine sušenja četvrtina dunje tokom konvektivnog sušenja, u zavisnosti od različitih predtrmana, za: $t_{kl} = 40^\circ\text{C}$, $v = 1 \text{ m/s}$</i>	80
6.17.	<i>Kinetičke krive promjene srednje brzine sušenja četvrtina dunje, tokom konvektivnog sušenja, u zavisnosti od različitih predtrmana, za: $t_{kl} = 40^\circ\text{C}$, $v = 1,5 \text{ m/s}$</i>	80
6.18.	<i>Kinetičke krive promjene srednje brzine sušenja četvrtina dunje tokom konvektivnog sušenja, u zavisnosti od različitih predtrmana, za: $t_{kl} = 60^\circ\text{C}$, $v = 1 \text{ m/s}$</i>	81
6.19.	<i>Kinetičke krive promjene srednje brzine sušenja četvrtina dunje tokom konvektivnog sušenja, u zavisnosti od različitih predtrmana, za: $t_{kl} = 60^\circ\text{C}$, $v = 1,5 \text{ m/s}$</i>	81
7.1.	<i>Zavisnost brzine sušenja ($\Delta\omega_0^s/\Delta\tau_0$) od vlažnosti četvrtina dunja, izraženo u odnosu na suhu bazu ω_0^s, tokom osmotskog sušenja</i>	94
7.2.	<i>Zavisnost zapreminskog skupljanja (SV) od vlažnosti četvrtina dunja, izraženo u odnosu na suhu bazu ω_0^s, tokom osmotskog sušenja</i>	95
7.3.	<i>Kinetičke krive promjene vlažnosti četvrtina dunje u odnosu na suhu bazu (ω_k^s) u zavisnosti od temperature vazduha i brzine vazduha za sušenje (Predtretman 2 $t_r=40^\circ\text{C}$, $C_r=50^\circ\text{Bx}$ i $\tau_0=180 \text{ min}$)</i>	98
7.4.	<i>Odnos brzine sušenja i vlažnosti četvrtina dunja (izraženo na suhu bazu) tokom konvektivnog sušenja u zavisnosti od temperature i brzine vazduha, za predtretman 2 ($t_r=40^\circ\text{C}$, $C_r=50^\circ\text{Bx}$ i $\tau=180 \text{ min}$)</i>	99
7.5.	<i>Grafičko upoređivanje eksperimentalnih vrijednosti promjene vlažnosti u odnosu na suhu bazu (ω_0^s) četvrtina dunje tokom vremena osmotskog sušenja sa vrijednostima izračunatim pomoću modela (6.7).</i>	101
7.6.	<i>Grafičko upoređivanje eksperimentalnih vrijednosti zapreminskog skupljanja (SV) četvrtina dunje tokom vremena osmotskog sušenja sa vrijednostima izračunatim pomoću modela (6.12).</i>	102
7.7.	<i>Upoređenje eksperimentalnih vrijednosti promjene vlažnosti u odnosu na suhu bazu (ω_k^s) tkiva dunje u obliku četvrtina tokom vremena (τ_k) konvektivnog sušenja, sa vrijednostima izračunatih pomoću modela (6.18) za predtretman 1 (tr</i>	103

	$= 40^{\circ}\text{C}$, $Cr = 50^{\circ}\text{Bx}$ i $\tau_0=100$ min)	
7.8.	Upoređenje eksperimentalnih vrijednosti promjene vlažnosti u odnosu na suhu bazu (ω_k^s) tkiva dunje u obliku četvrtina tokom vremena (τ_k) konvektivnog sušenja, sa vrijednostima izračunatih pomoću modela (6.18) za predtretman 2 ($tr = 40^{\circ}\text{C}$, $Cr = 50^{\circ}\text{Bx}$ i $\tau_0=180$ min)	103
7.9.	Upoređenje eksperimentalnih vrijednosti promjene vlažnosti u odnosu na suhu bazu (ω_k^s) tkiva dunje u obliku četvrtina tokom vremena (τ_k) konvektivnog sušenja, sa vrijednostima izračunatih pomoću modela (6.18) za predtretman 3 ($tr = 60^{\circ}\text{C}$, $Cr = 65^{\circ}\text{Bx}$ i $\tau_0=100$ min)	104
7.10.	Upoređenje eksperimentalnih vrijednosti promjene vlažnosti u odnosu na suhu bazu (ω_k^s) tkiva dunje u obliku četvrtina tokom vremena (τ_k) konvektivnog sušenja, sa vrijednostima izračunatih pomoću modela (6.18) za predtretman 4 ($tr = 60^{\circ}\text{C}$, $Cr = 65^{\circ}\text{Bx}$ i $\tau_0=180$ min)	104

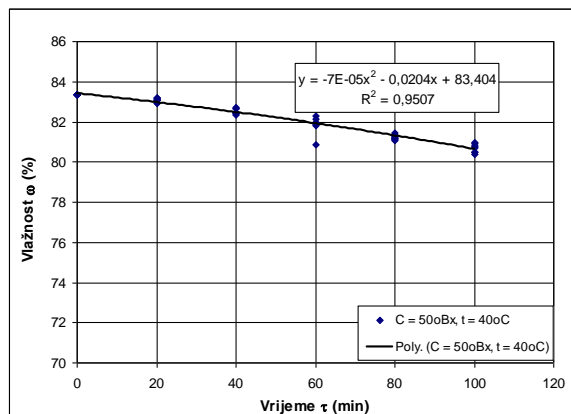
SPISAK TABELA

Broj tabele	Naziv tabele	Strana
3.1.	<i>Pregled poluteorijskih i empirijskih modela kinetike konvektivnog sušenja voća u tankom sloju</i>	29
5.1.	<i>Raspored eksperimentalnih jedinica osmotskog sušenja na osnovu uticajnih faktora</i>	33
5.2.	<i>Vrste predtretmana za konvektivno sušenje</i>	34
5.3.	<i>Plan eksperimentalnih jedinica konvektivnog sušenja na osnovu uticajnih faktora</i>	35
5.4.	<i>Pregled svih mjerenih veličina tokom eksperimenta kombinovanog sušenja</i>	47
6.1.	<i>Osnovna radna tabela fizičkih osobina svježeg ploda dunje za prvu godinu ispitivanja (2009)</i>	61
6.2.	<i>Osnovna radna tabela fizičkih osobina svježeg ploda dunje za drugu godinu ispitivanja (2010)</i>	62
6.3.	<i>Primjer radne tabele osmotskog sušenja četvrtina dunje, eksperimentalna jedinica E_{O16} ($t_r = 60\text{ }^\circ\text{C}$, $C_r = 65\text{ }^\circ\text{Bx}$ i $\tau = 180\text{ min}$)</i>	63
6.4.	<i>Zbirna tabela brzine osmotskog sušenja četvrtina dunje u odnosu na suhu bazu i zapreminskog skupljanja</i>	70
6.5.	<i>Rezultati disperzione analize o uticaju izabranih nivoa faktora osmotskog sušenja četvrtina dunje, na srednju brzinu sušenja, za statističku vjerovatnoću 99%</i>	70
6.6.	<i>Rezultati disperzione analize o uticaju izabranih nivoa faktora osmotskog sušenja četvrtina dunje, na zapreminsko skupljanje, za statističku vjerovatnoću 95% i 99%</i>	71
6.7.	<i>Radna tabela konvektivnog sušenja četvrtina dunje za eksperimentalnu jedinicu EK_1</i>	72
6.8.	<i>Imjerene vrijednosti reprezentativnih uzoraka četvrtina dunje prije i nakon konvektivnog sušenja za EK_1</i>	73
6.9.	<i>Srednje vrijednost izmjernih karakterističnih veličina kinetike konvektivnog sušenja četvrtina dunje</i>	76
6.10.	<i>Srednje vrijednosti brzine sušenja četvrtina dunje u odnosu na suhu bazu i srednje vrijednosti zapreminskog skupljanja</i>	83
6.11.	<i>Rezultati disperzione analize trofaktornog eksperimenta za statističku vjerovatnoću 95% i 99% - Ocjena uticaja izabranih nivoa faktora konvektivnog sušenja na srednju brzinu sušenja četvrtina dunje</i>	84
6.12.	<i>Rezultati disperzione analize trofaktornog eksperimenta za statističku vjerovatnoću 95% i 99% - Ocjena uticaja izabranih nivoa faktora konvektivnog sušenja na zapreminsko skupljanje četvrtina dunje</i>	84
6.13.	<i>Izabrani matematički modeli za modelovanje kinetike osmotskog sušenja dunje u obliku četvrtine</i>	85
6.14.	<i>Srednje vrijednosti promjene vlažnosti četvrtina dunje u odnosu na suhu bazu i srednje vrijednosti zapreminskog skupljanja tokom osmotskog sušenja</i>	87

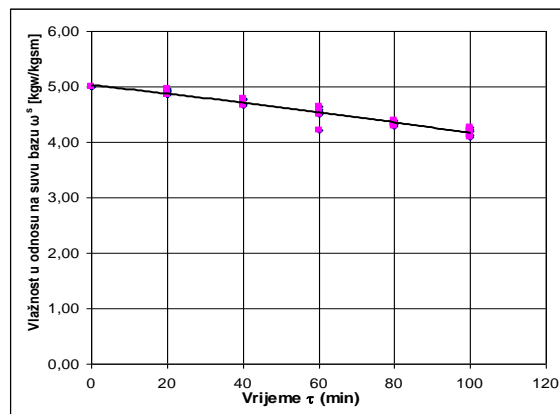
6.15.	<i>Rezultati matematičkog modelovanja osmotskog sušenja dunje u obliku četvrtine</i>	88
6.16.	<i>Izabrani matematički modeli za modelovanje kinetike konvektivnog sušenja dunje u obliku četvrtine</i>	89
6.17.	<i>Promjene srednje vrijednosti vlažnosti četvrtina dunje u odnosu na suhu bazu, tokom konvektivnog sušenja</i>	90
6.18.	<i>Rezultati matematičkog modelovanja konvektivnog sušenja dunje u obliku četvrtine</i>	91

PRILOZI

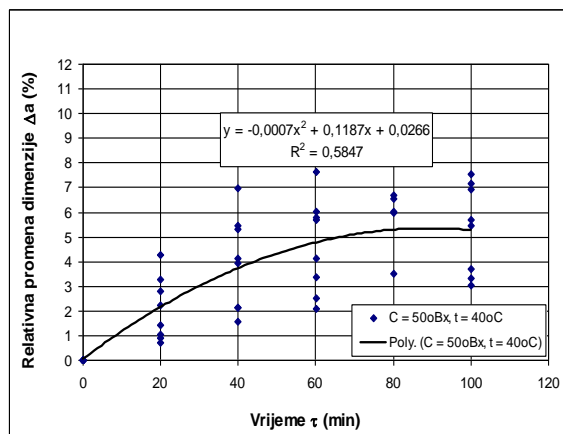
Prilog 1. Kinetički dijagrami osmotskog sušenja četvrtina dunje



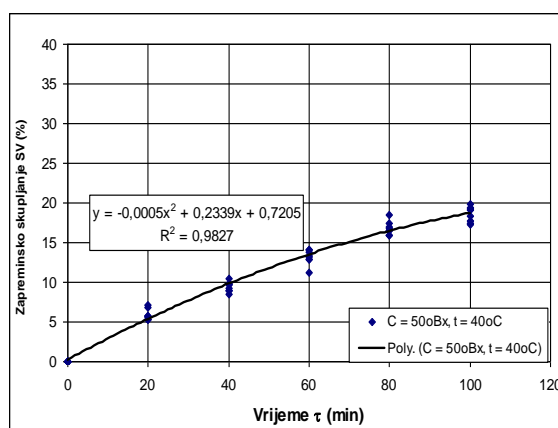
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EO₁ (t_r=40 °C, C_r=50 °Bx i τ=100 min)



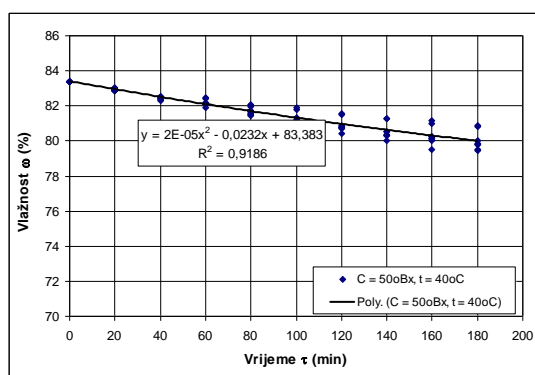
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje na suhu bazu za EO₁ (t_r=40 °C, C_r=50 °Bx i τ=100 min)



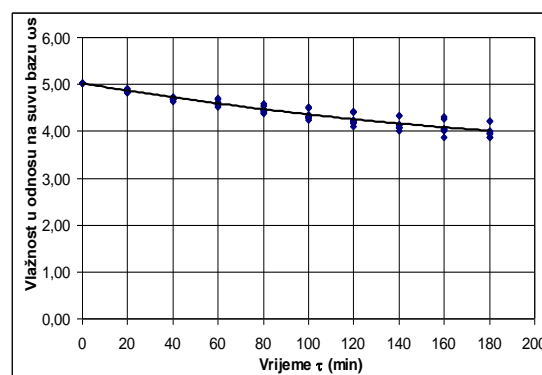
Kinetička kriva promjene najveće dimenzije četvrtina dunje za EO₁ (t_r=40 °C, C_r=50 °Bx i τ=100 min)



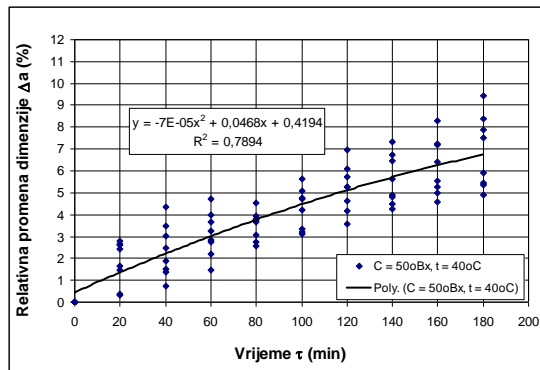
Kinetička kriva zapreminskog skupljanja četvrtina dunje EO₁ (t_r=40 °C, C_r=50 °Bx i τ=100 min)



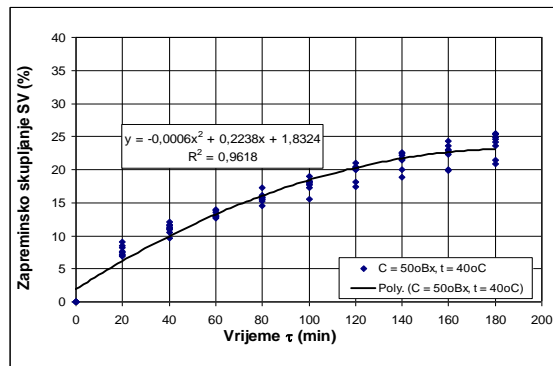
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EO₂ (t_r=40 °C, C_r=50 °Bx i τ=180 min)



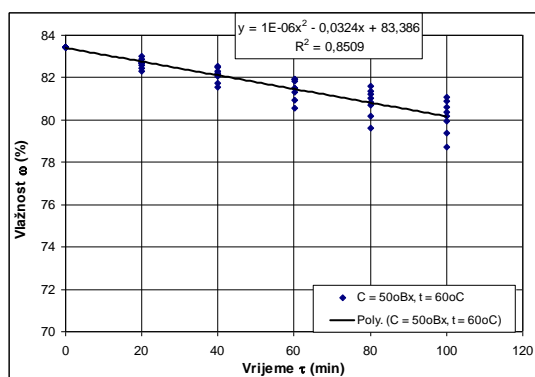
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje na suhu bazu za EO₂ (t_r=40 °C, C_r=50 °Bx i τ=180 min)



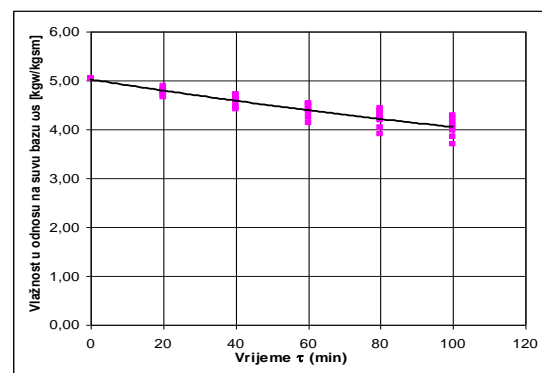
Kinetička kriva promjene najveće dimenzije četvrtina dunje za EO_2 ($t_r=40^\circ\text{C}$, $C_r=50^\circ\text{Bx}$ i $\tau=180$ min)



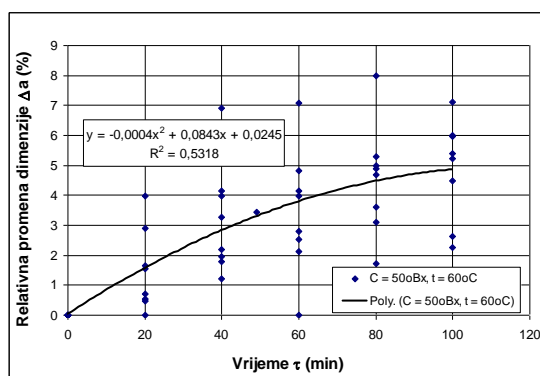
Kinetička kriva zapreminskog skupljanja četvrtina dunje za EO_2 ($t_r=40^\circ\text{C}$, $C_r=50^\circ\text{Bx}$ i $\tau=180$ min)



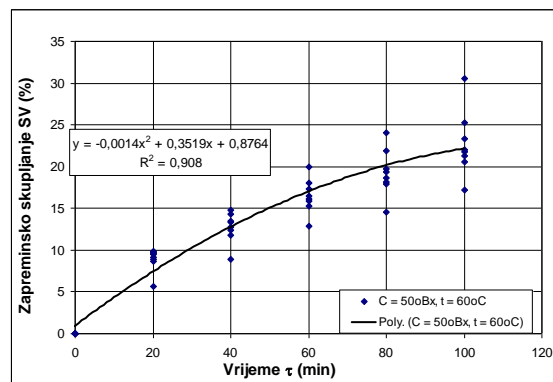
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EO_3 ($t_r=60^\circ\text{C}$, $C_r=50^\circ\text{Bx}$ i $\tau=100$ min)



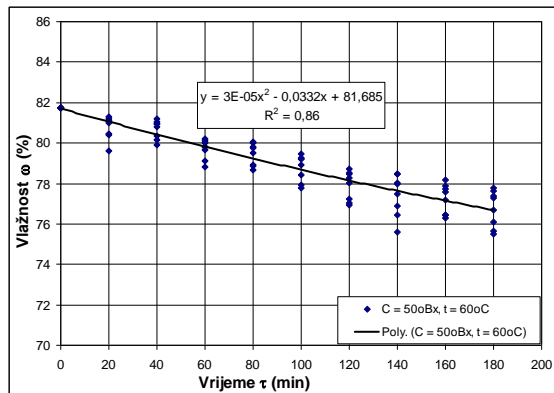
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje na suhu bazu za EO_3 ($t_r=60^\circ\text{C}$, $C_r=50^\circ\text{Bx}$ i $\tau=100$ min)



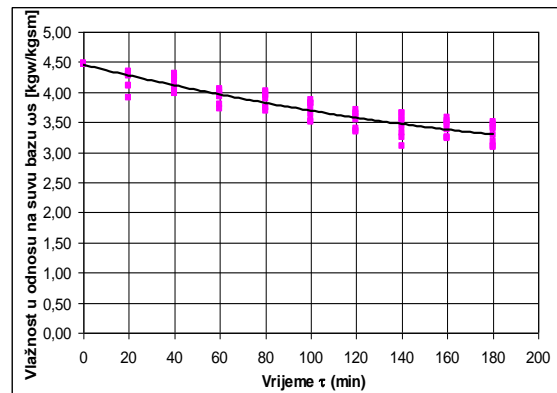
Kinetička kriva promjene najveće dimenzije četvrtina dunje za EO_3 ($t_r=60^\circ\text{C}$, $C_r=50^\circ\text{Bx}$ i $\tau=100$ min)



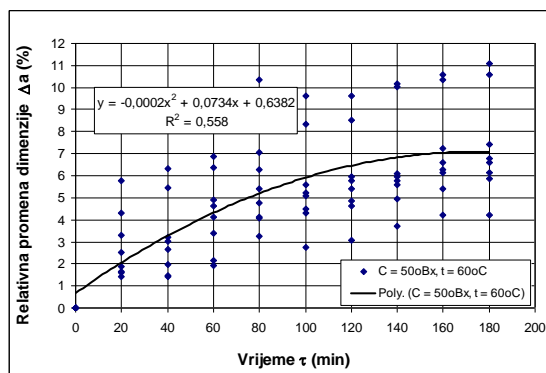
Kinetička kriva zapreminskog skupljanja četvrtina dunje za EO_3 ($t_r=60^\circ\text{C}$, $C_r=50^\circ\text{Bx}$ i $\tau=100$ min)



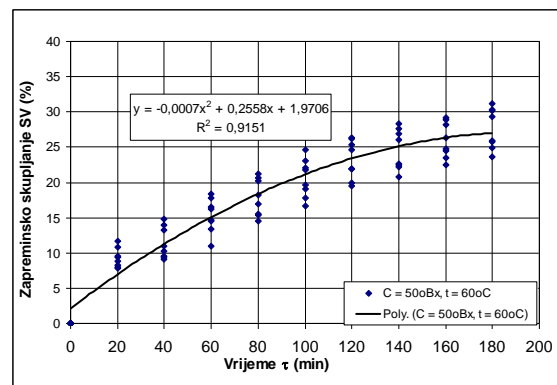
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EO₄ ($t_r=60\text{ }^\circ\text{C}$, $C_r=50\text{ }^\circ\text{Bx}$ i $\tau=180\text{ min}$)



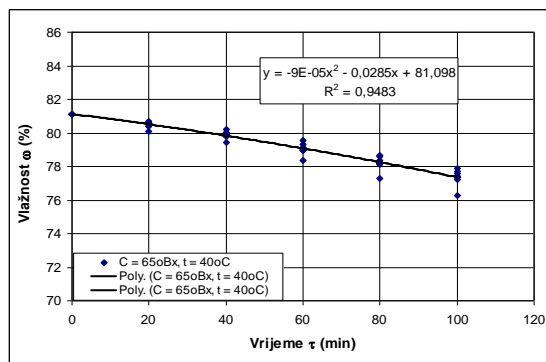
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje na suhu bazu za EO₄ ($t_r=60\text{ }^\circ\text{C}$, $C_r=50\text{ }^\circ\text{Bx}$ i $\tau=180\text{ min}$)



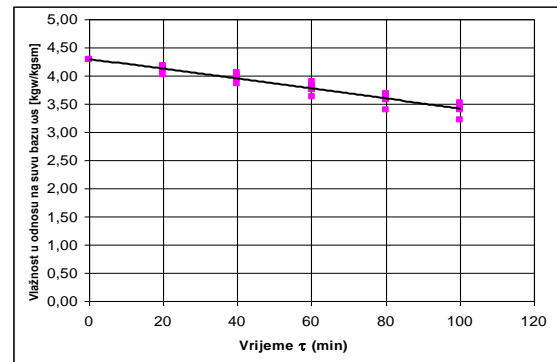
Kinetička kriva promjene najveće dimenzije četvrtina dunje za EO₄ ($t_r=60\text{ }^\circ\text{C}$, $C_r=50\text{ }^\circ\text{Bx}$ i $\tau=180\text{ min}$)



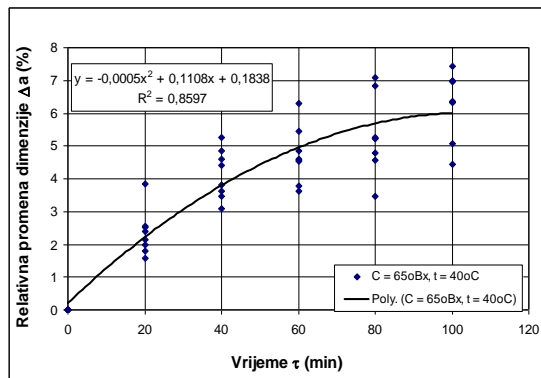
Kinetička kriva zapreminskog skupljanja četvrtina dunje za EO₄ ($t_r=60\text{ }^\circ\text{C}$, $C_r=50\text{ }^\circ\text{Bx}$ i $\tau=180\text{ min}$)



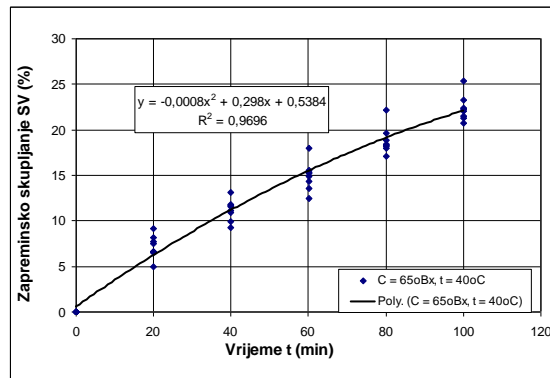
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EO₅ ($t_r=40\text{ }^\circ\text{C}$, $C_r=65\text{ }^\circ\text{Bx}$ i $\tau=100\text{ min}$)



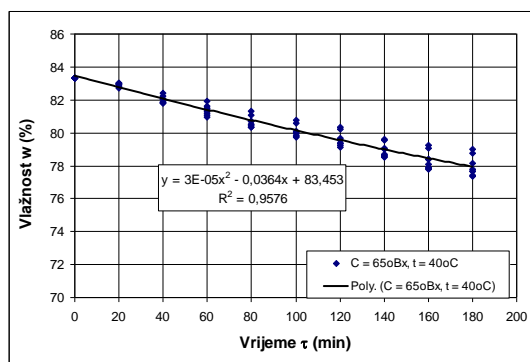
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje na suhu bazu za EO₅ ($t_r=40\text{ }^\circ\text{C}$, $C_r=65\text{ }^\circ\text{Bx}$ i $\tau=100\text{ min}$)



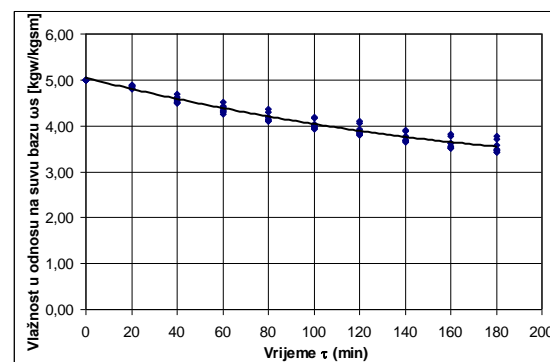
Kinetička kriva promjene najveće dimenzije četvrtina dunje za EO_5 ($t_r=40^\circ\text{C}$, $C_r=65^\circ\text{Bx}$ i $\tau=100$ min)



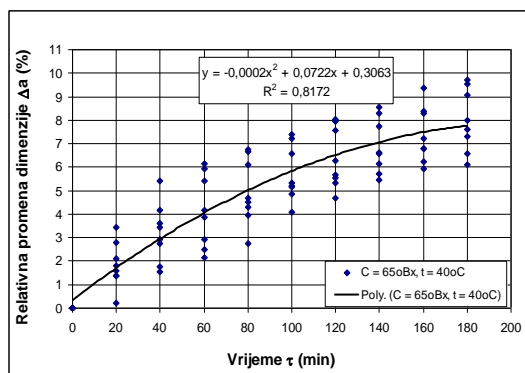
Kinetička kriva zapreminskog skupljanja četvrtina dunje za EO_5 ($t_r=40^\circ\text{C}$, $C_r=65^\circ\text{Bx}$ i $\tau=100$ min)



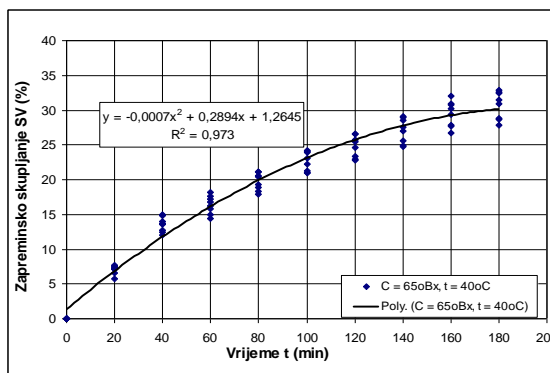
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EO_6 ($t_r=40^\circ\text{C}$, $C_r=65^\circ\text{Bx}$ i $\tau=180$ min)



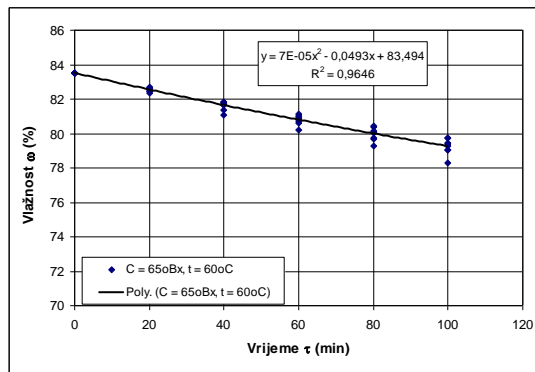
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje na suhu bazu za EO_6 ($t_r=40^\circ\text{C}$, $C_r=65^\circ\text{Bx}$ i $\tau=180$ min)



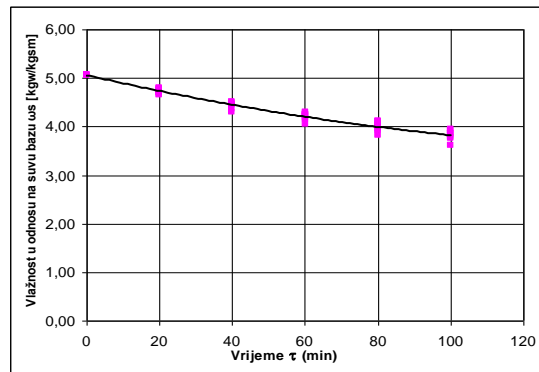
Kinetička kriva promjene najveće dimenzije četvrtina dunje za EO_6 ($t_r=40^\circ\text{C}$, $C_r=65^\circ\text{Bx}$ i $\tau=180$ min)



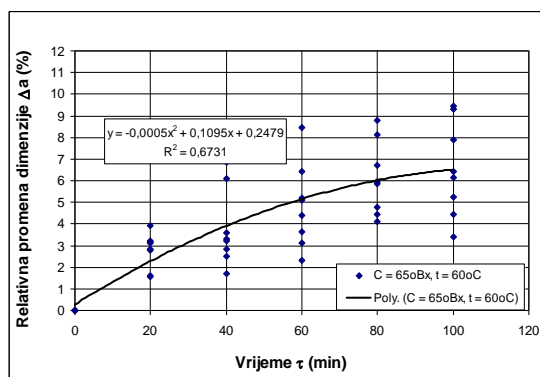
Kinetička kriva zapreminskog skupljanja četvrtina dunje za EO_6 ($t_r=40^\circ\text{C}$, $C_r=65^\circ\text{Bx}$ i $\tau=180$ min)



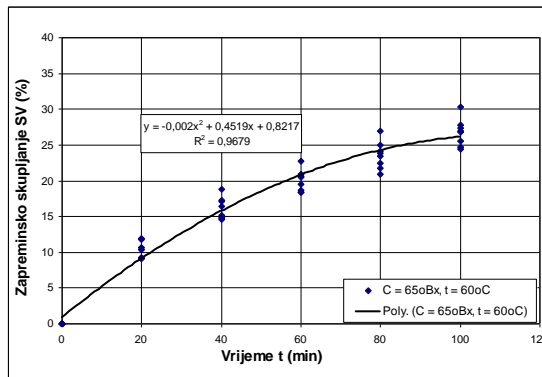
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EO₇ ($t_r=60\text{ }^\circ\text{C}$, $C_r=65\text{ }^\circ\text{Bx}$ i $\tau=100\text{ min}$)



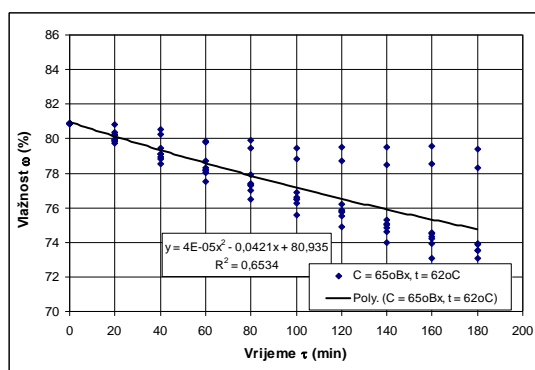
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje na suhu bazu za EO₇ ($t_r=60\text{ }^\circ\text{C}$, $C_r=65\text{ }^\circ\text{Bx}$ i $\tau=100\text{ min}$)



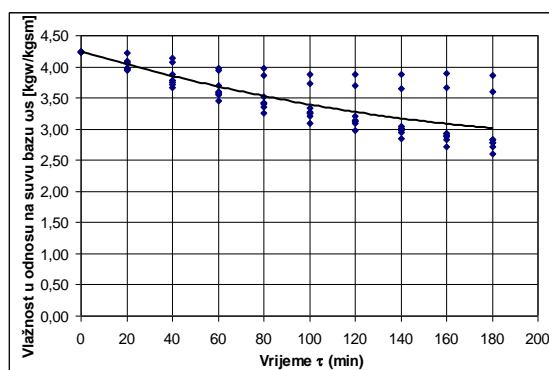
Kinetička kriva promjene najveće dimenzije četvrtina dunje za EO₇ ($t_r=60\text{ }^\circ\text{C}$, $C_r=65\text{ }^\circ\text{Bx}$ i $\tau=100\text{ min}$)



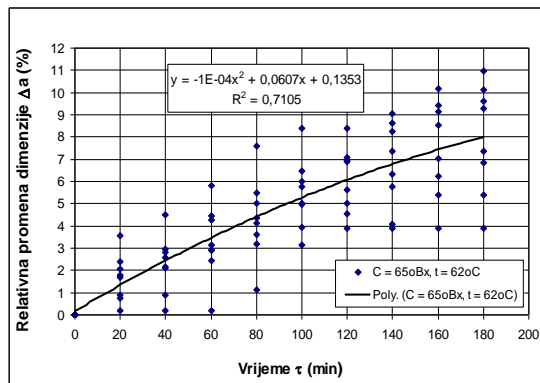
Kinetička kriva zapreminskog skupljanja četvrtina dunje za EO₇ ($t_r=60\text{ }^\circ\text{C}$, $C_r=65\text{ }^\circ\text{Bx}$ i $\tau=100\text{ min}$)



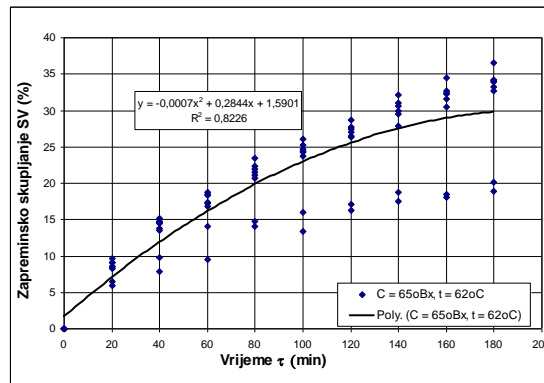
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EO₈ ($t_r=60\text{ }^\circ\text{C}$, $C_r=65\text{ }^\circ\text{Bx}$ i $\tau=180\text{ min}$)



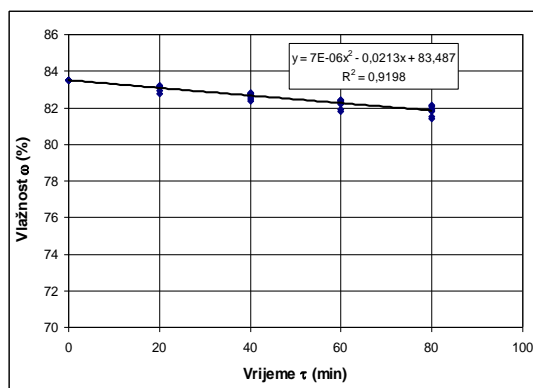
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje na suhu bazu za EO₈ ($t_r=60\text{ }^\circ\text{C}$, $C_r=65\text{ }^\circ\text{Bx}$ i $\tau=180\text{ min}$)



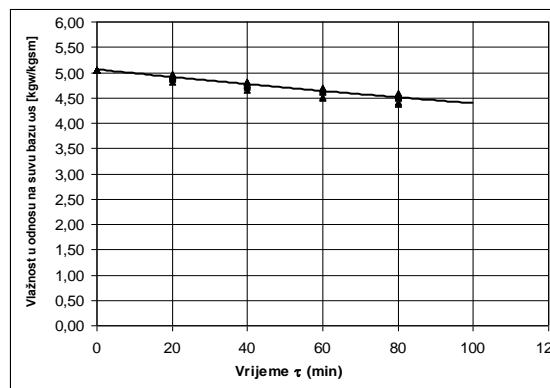
Kinetička kriva promjene najveće dimenzije četvrtina dunje za EO₈ ($t_r=60\text{ }^\circ\text{C}$, $C_r=65\text{ }^\circ\text{Bx}$ i $\tau=180\text{ min}$)



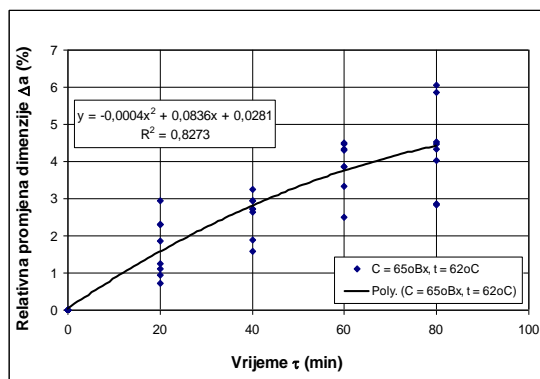
Kinetička kriva zapreminskog skupljanja četvrtina dunje za EO₈ ($t_r=60\text{ }^\circ\text{C}$, $C_r=65\text{ }^\circ\text{Bx}$ i $\tau=180\text{ min}$)



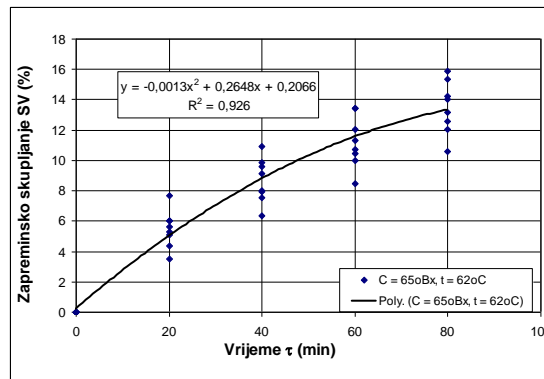
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EO₉ ($t_r=40\text{ }^\circ\text{C}$, $C_r=50\text{ }^\circ\text{Bx}$ i $\tau=100\text{ min}$)



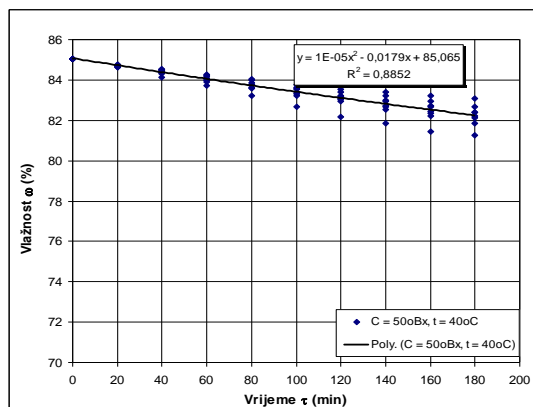
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje na suhu bazu za EO₉ ($t_r=40\text{ }^\circ\text{C}$, $C_r=50\text{ }^\circ\text{Bx}$ i $\tau=100\text{ min}$)



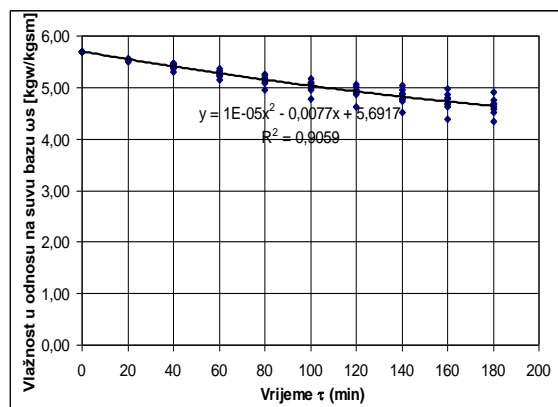
Kinetička kriva promjene najveće dimenzije četvrtina dunje za EO₉ ($t_r=40\text{ }^\circ\text{C}$, $C_r=50\text{ }^\circ\text{Bx}$ i $\tau=100\text{ min}$)



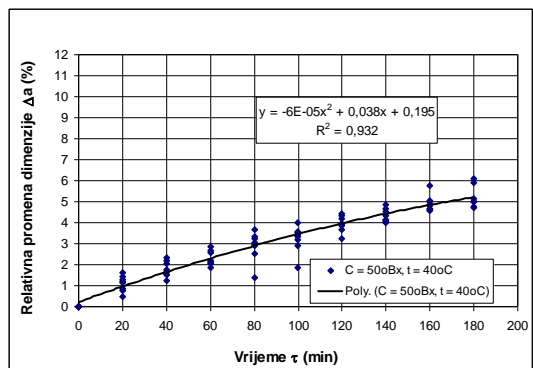
Kinetička kriva zapreminskog skupljanja četvrtina dunje za EO₉ ($t_r=40\text{ }^\circ\text{C}$, $C_r=50\text{ }^\circ\text{Bx}$ i $\tau=100\text{ min}$)



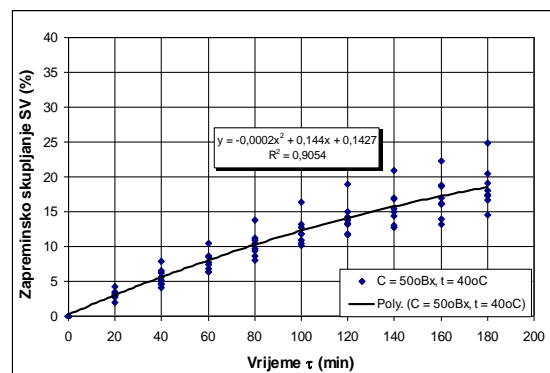
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EO_{10} ($t_r=40^\circ\text{C}$, $C_r=50^\circ\text{Bx}$ i $\tau=180$ min)



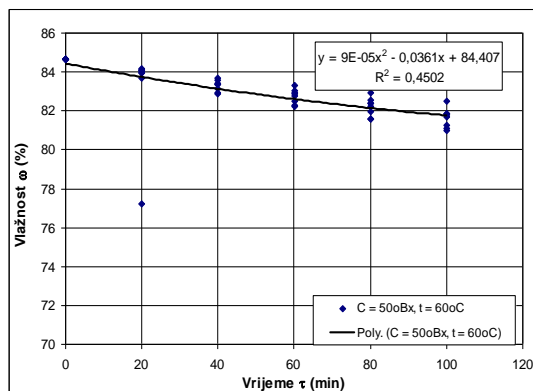
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje na suhu bazu za EO_{10} ($t_r=40^\circ\text{C}$, $C_r=50^\circ\text{Bx}$ i $\tau=180$ min)



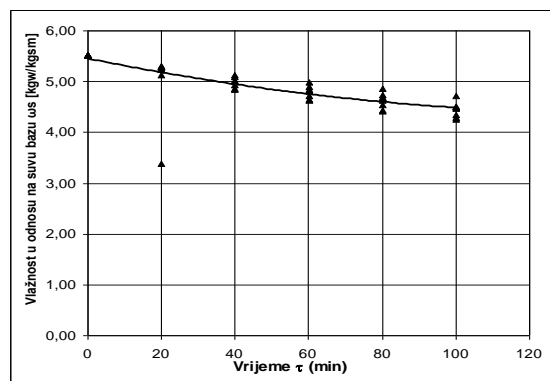
Kinetička kriva promjene najveće dimenzije četvrtina dunje za EO_{10} ($t_r=40^\circ\text{C}$, $C_r=50^\circ\text{Bx}$ i $\tau=180$ min)



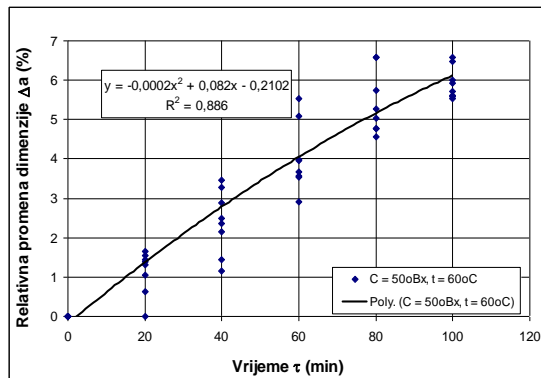
Kinetička kriva zapreminskog skupljanja četvrtina dunje za EO_{10} ($t_r=40^\circ\text{C}$, $C_r=50^\circ\text{Bx}$ i $\tau=180$ min)



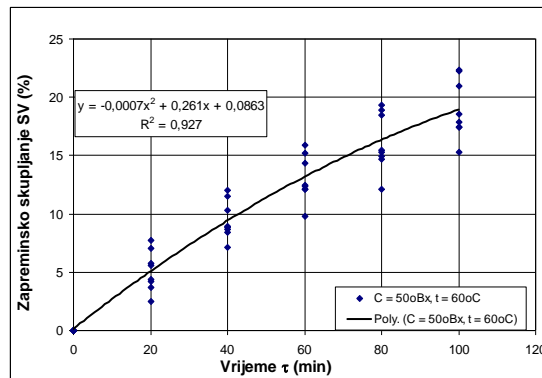
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EO_{11} ($t_r=60^\circ\text{C}$, $C_r=50^\circ\text{Bx}$ i $\tau=100$ min)



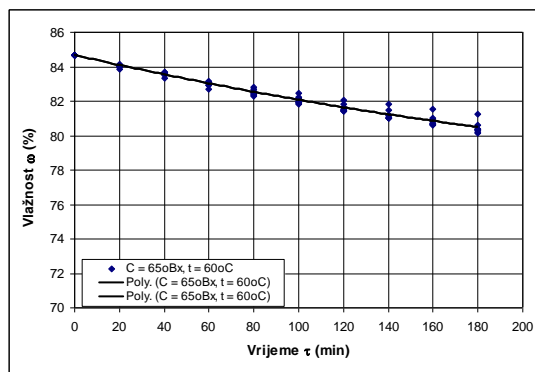
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje na suhu bazu za EO_{11} ($t_r=60^\circ\text{C}$, $C_r=50^\circ\text{Bx}$ i $\tau=100$ min)



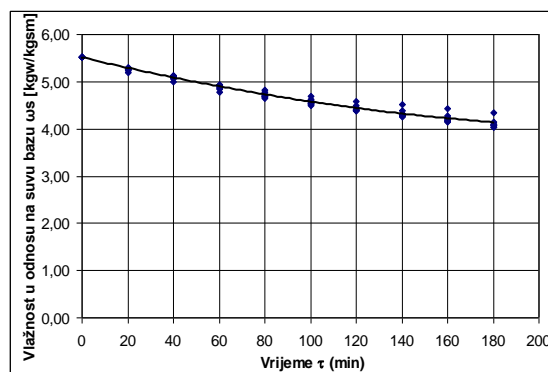
Kinetička kriva promjene najveće dimenzije četvrtina dunje za EO₁₁ ($t_r=60\text{ }^\circ\text{C}$, $C_r=50\text{ }^\circ\text{Bx}$ i $\tau=100\text{ min}$)



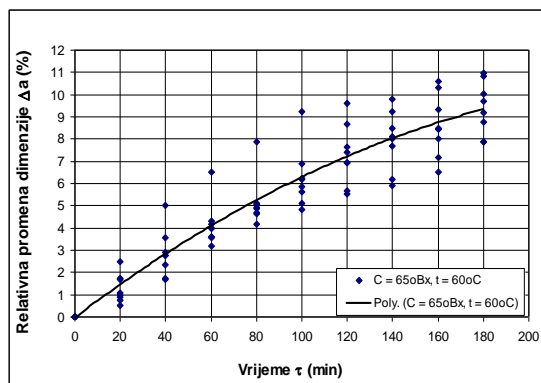
Kinetička kriva zapreminskog skupljanja četvrtina dunje za EO₁₁ ($t_r=60\text{ }^\circ\text{C}$, $C_r=50\text{ }^\circ\text{Bx}$ i $\tau=100\text{ min}$)



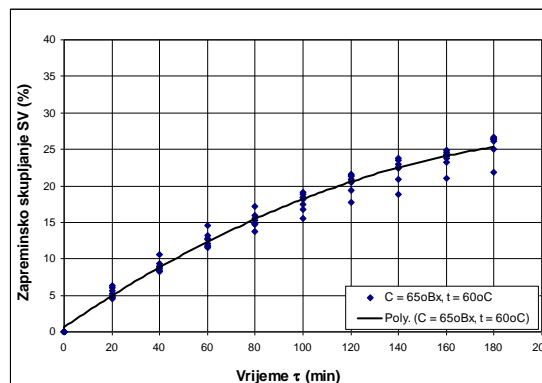
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EO₁₂ ($t_r=60\text{ }^\circ\text{C}$, $C_r=50\text{ }^\circ\text{Bx}$ i $\tau=180\text{ min}$)



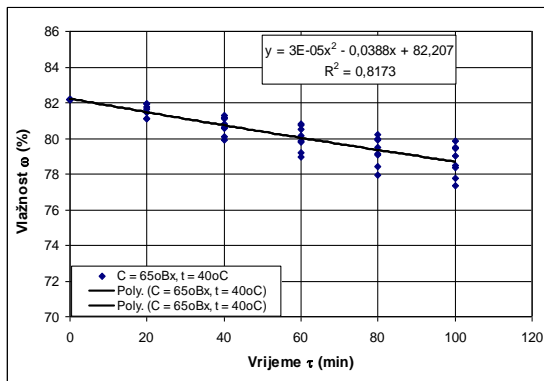
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje na suhu bazu za EO₁₂ ($t_r=60\text{ }^\circ\text{C}$, $C_r=50\text{ }^\circ\text{Bx}$ i $\tau=180\text{ min}$)



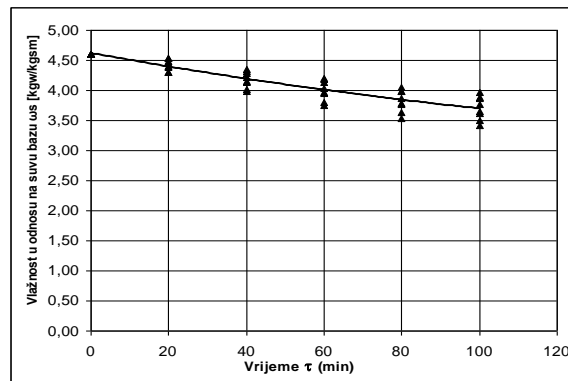
Kinetička kriva promjene najveće dimenzije četvrtina dunje za EO₁₂ ($t_r=60\text{ }^\circ\text{C}$, $C_r=50\text{ }^\circ\text{Bx}$ i $\tau=180\text{ min}$)



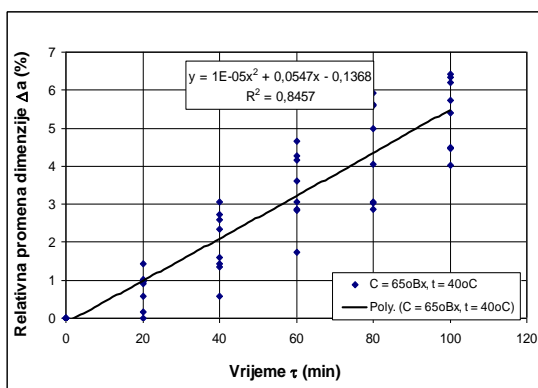
Kinetička kriva zapreminskog skupljanja četvrtina dunje za EO₁₂ ($t_r=60\text{ }^\circ\text{C}$, $C_r=50\text{ }^\circ\text{Bx}$ i $\tau=180\text{ min}$)



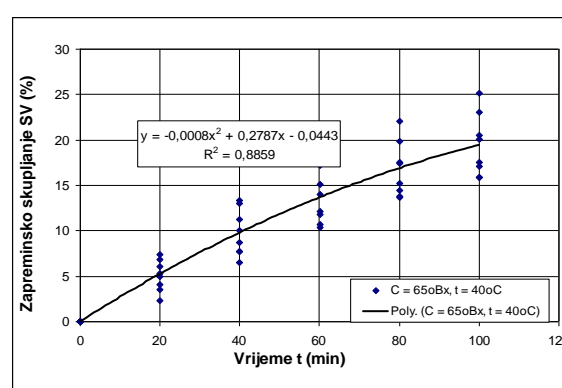
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EO_{13} ($t_r=40^\circ\text{C}$, $C_r=65^\circ\text{Bx}$ i $\tau=100$ min)



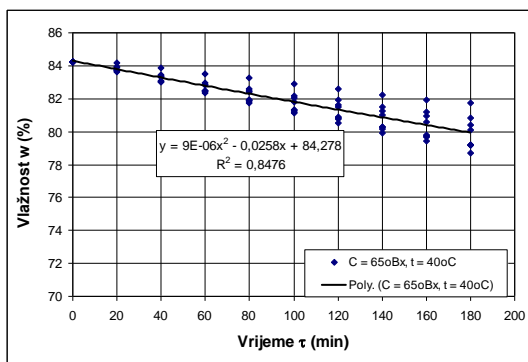
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje na suhu bazu za EO_{13} ($t_r=40^\circ\text{C}$, $C_r=65^\circ\text{Bx}$ i $\tau=100$ min)



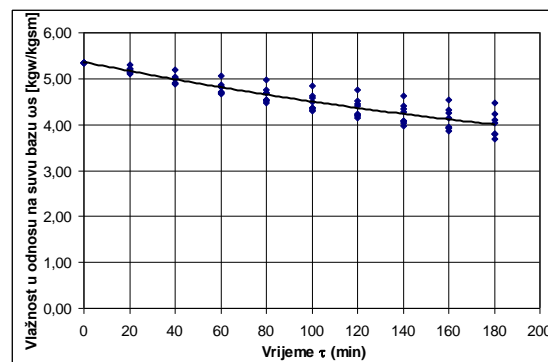
Kinetička kriva promjene najveće dimenzije četvrtina dunje za EO_{13} ($t_r=40^\circ\text{C}$, $C_r=65^\circ\text{Bx}$ i $\tau=100$ min)



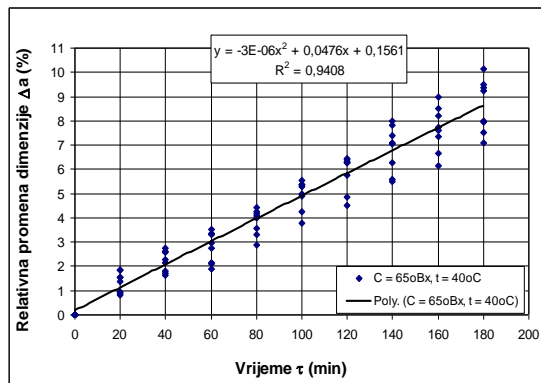
Kinetička kriva zapreminskog skupljanja četvrtina dunje za EO_{13} ($t_r=40^\circ\text{C}$, $C_r=65^\circ\text{Bx}$ i $\tau=100$ min)



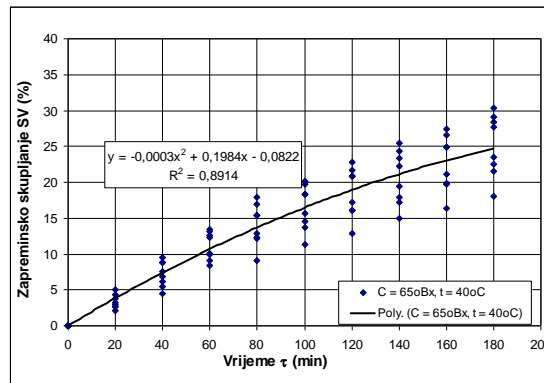
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EO_{14} ($t_r=40^\circ\text{C}$, $C_r=65^\circ\text{Bx}$ i $\tau=180$ min)



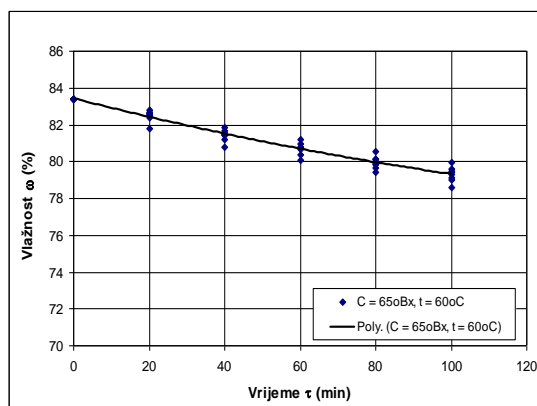
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje na suhu bazu za EO_{14} ($t_r=40^\circ\text{C}$, $C_r=65^\circ\text{Bx}$ i $\tau=180$ min)



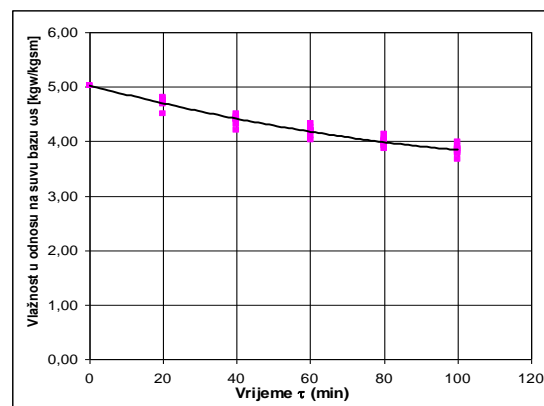
Kinetička kriva promjene najveće dimenzije četvrtina dunje za EO_{14} ($t_r=40^\circ\text{C}$, $C_r=65\%Bx$ i $\tau=180$ min)



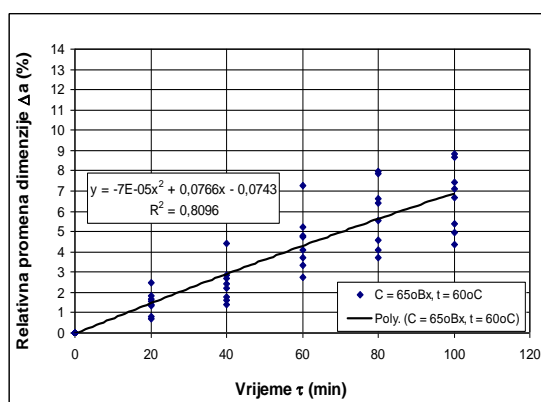
Kinetička kriva zapreminskog skupljanja četvrtina dunje za EO_{14} ($t_r=40^\circ\text{C}$, $C_r=65\%Bx$ i $\tau=180$ min)



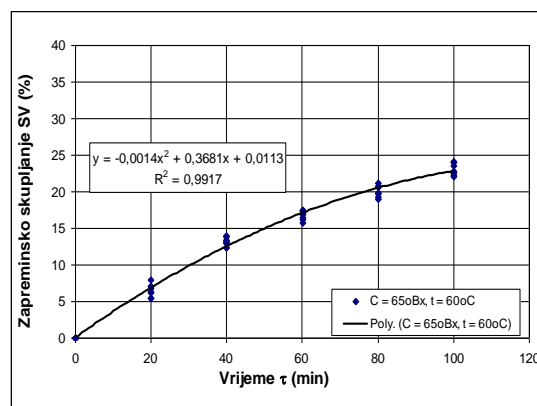
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EO_{15} ($t_r=60^\circ\text{C}$, $C_r=65\%Bx$ i $\tau=100$ min)



Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje na suhu bazu za EO_{15} ($t_r=60^\circ\text{C}$, $C_r=65\%Bx$ i $\tau=100$ min)

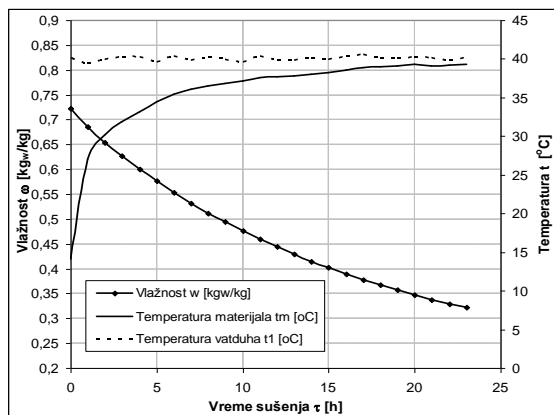


Kinetička kriva promjene najveće dimenzije četvrtina dunje za EO_{15} ($t_r=60^\circ\text{C}$, $C_r=65\%Bx$ i $\tau=100$ min)

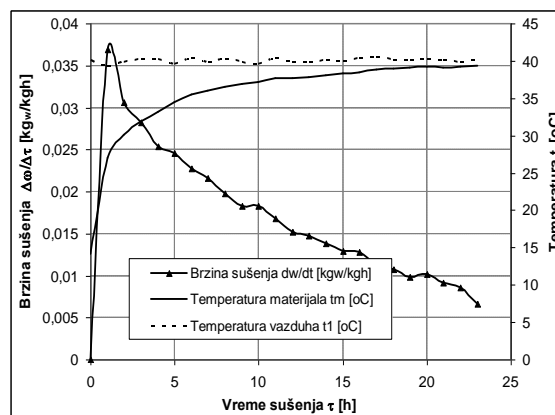


Kinetička kriva zapreminskog skupljanja četvrtina dunje za EO_{15} ($t_r=60^\circ\text{C}$, $C_r=65\%Bx$ i $\tau=100$ min)

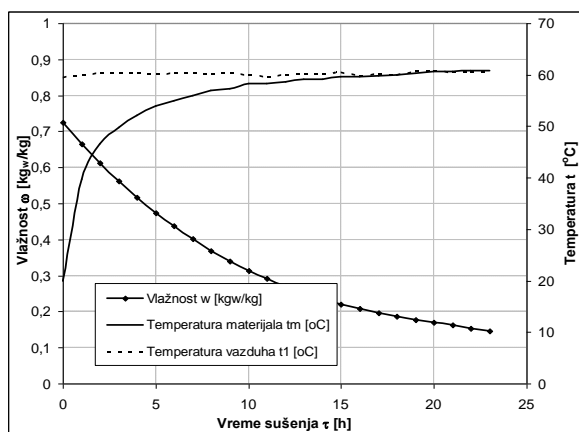
Prilog 2. Kinetički dijagrami konvektivnog sušenja četvrtina dunje



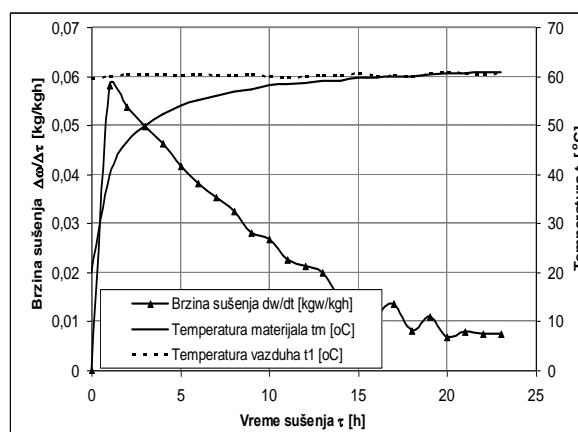
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EK₂ ($t_k=40^\circ$, $v_k=1,5$ m/s, predtretman 1)



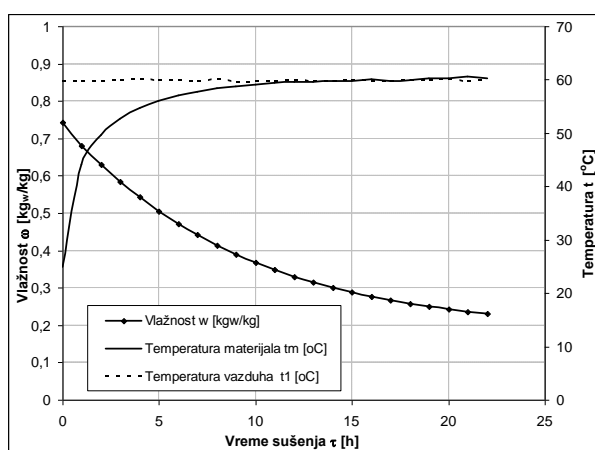
Kinetička kriva promjene brzine sušenja četvrtina dunje za EK₂ ($t_k=40^\circ$, $v_k=1,5$ m/s, predtretman 1)



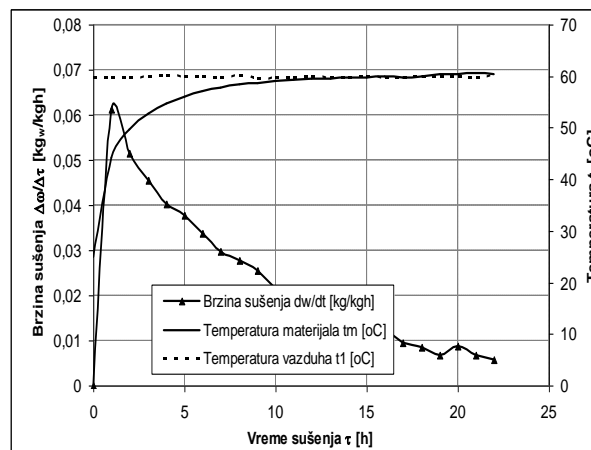
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EK₃ ($t_k=60^\circ$, $v_k=1$ m/s, predtretman 1)



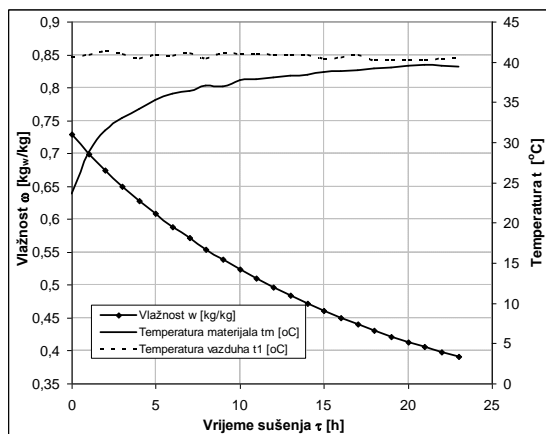
Kinetička kriva promjene brzine sušenja četvrtina dunje za EK₃ ($t_k=60^\circ$, $v_k=1$ m/s, predtretman 1)



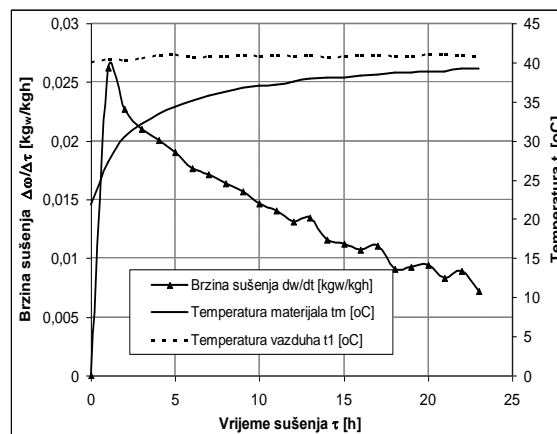
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EK₄ ($t_k=60^\circ$, $v_k=1,5$ m/s, predtretman 1)



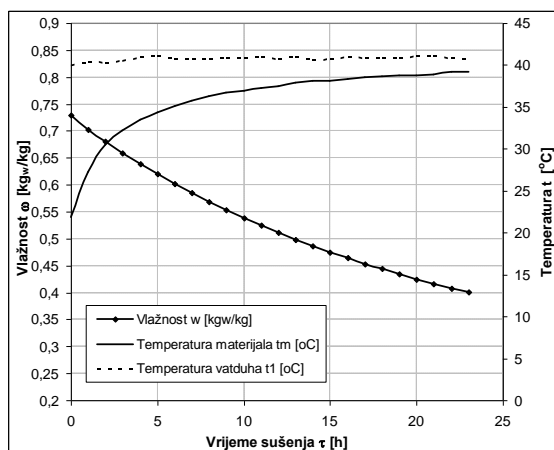
Kinetička kriva promjene brzine sušenja četvrtina dunje za EK₄ ($t_k=60^\circ$, $v_k=1,5$ m/s, predtretman 1)



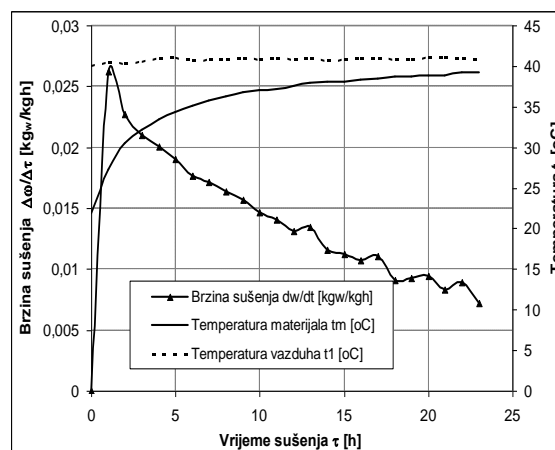
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EK_5 ($t_k=40^\circ$, $v_k=1$ m/s, predtretman 2)



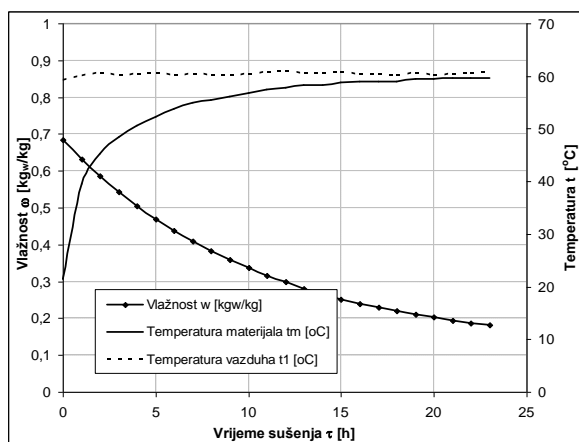
Kinetička kriva promjene brzine sušenja četvrtina dunje za EK_5 ($t_k=40^\circ$, $v_k=1$ m/s, predtretman 2)



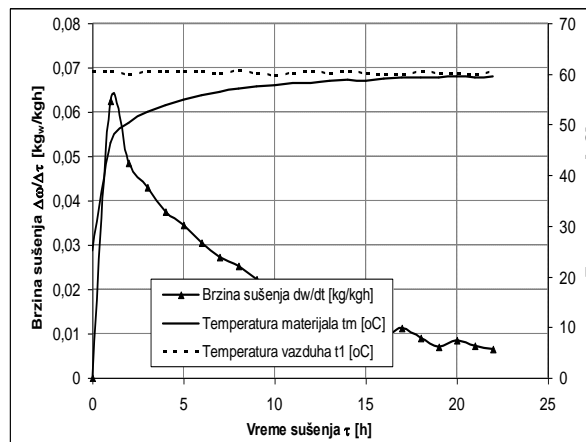
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EK_6 ($t_k=40^\circ$, $v_k=1,5$ m/s, predtretman 2)



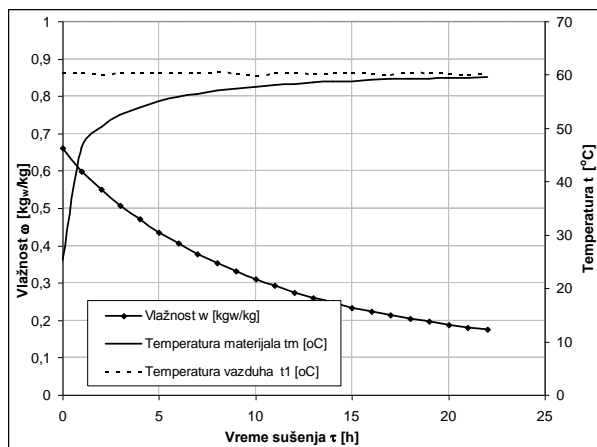
Kinetička kriva promjene brzine sušenja četvrtina dunje za EK_6 ($t_k=40^\circ$, $v_k=1,5$ m/s, predtretman 2)



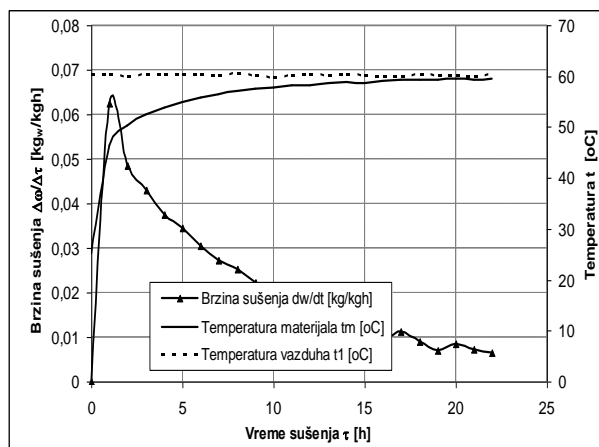
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EK_7 ($t_k=60^\circ$, $v_k=1$ m/s, predtretman 2)



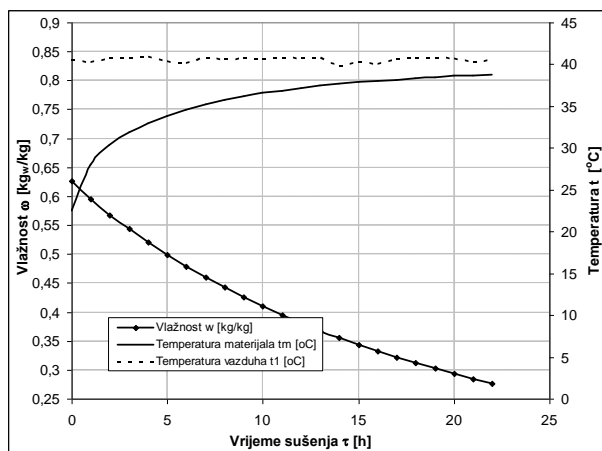
Kinetička kriva promjene brzine sušenja četvrtina dunje za EK_7 ($t_k=60^\circ$, $v_k=1$ m/s, predtretman 2)



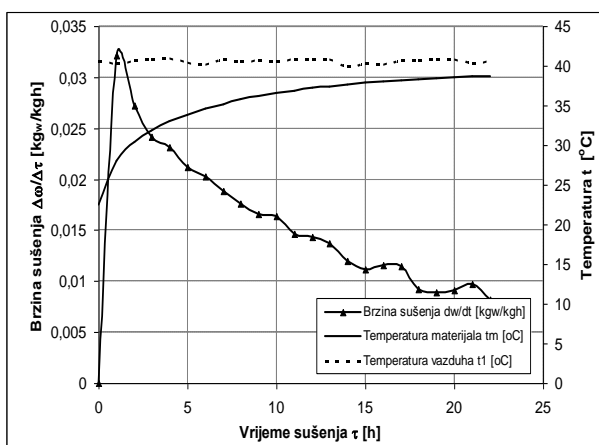
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EK_8 ($t_k=60^\circ$, $v_k=1,5$ m/s, predtretman 2)



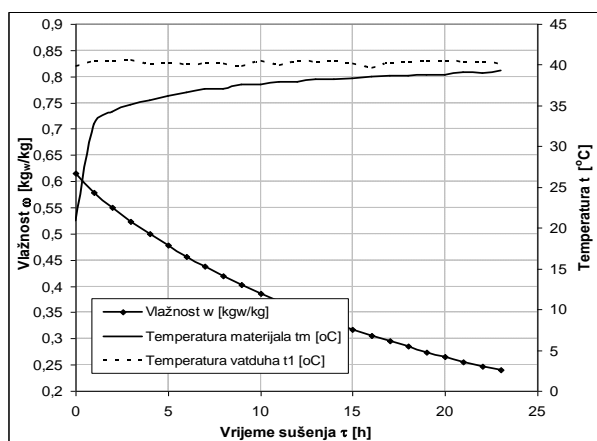
Kinetička kriva promjene brzine sušenja četvrtina dunje za EK_7 ($t_k=60^\circ$, $v_k=1,5$ m/s, predtretman 2)



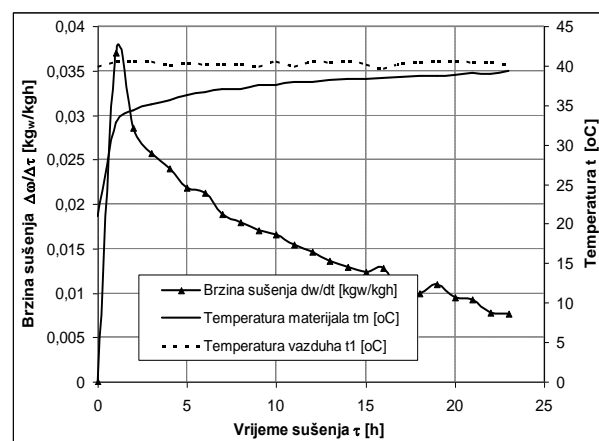
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EK_9 ($t_k=40^\circ$, $v_k=1$ m/s, predtretman 3)



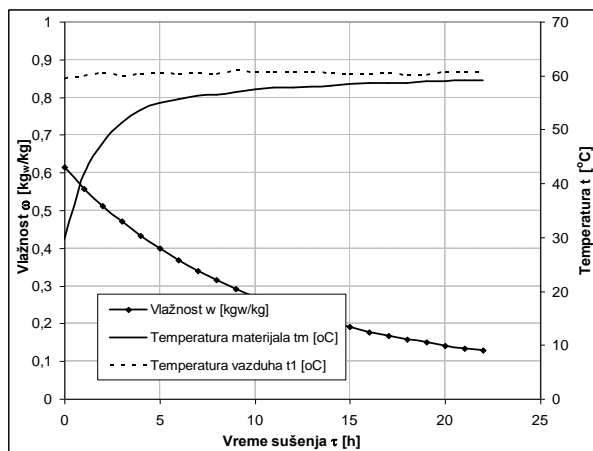
Kinetička kriva promjene brzine sušenja četvrtina dunje za EK_9 ($t_k=40^\circ$, $v_k=1$ m/s, predtretman 3)



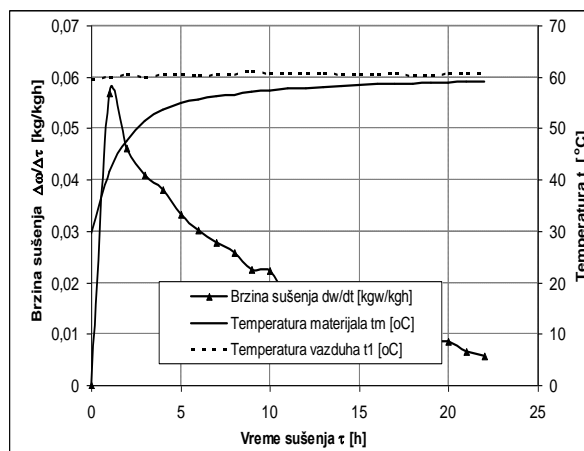
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EK_{10} ($t_k=40^\circ$, $v_k=1,5$ m/s, predtretman 3)



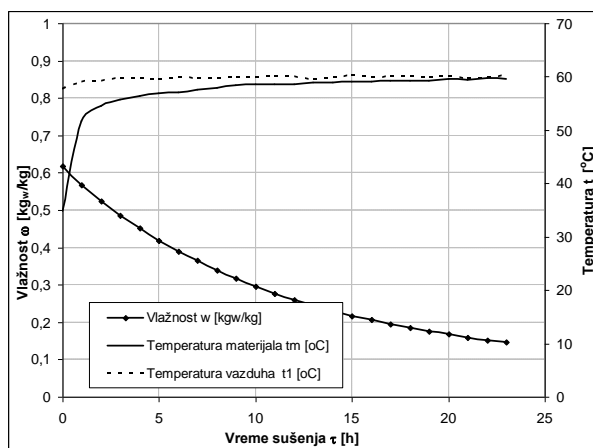
Kinetička kriva promjene brzine sušenja četvrtina dunje za EK_{10} ($t_k=40^\circ$, $v_k=1,5$ m/s, predtretman 3)



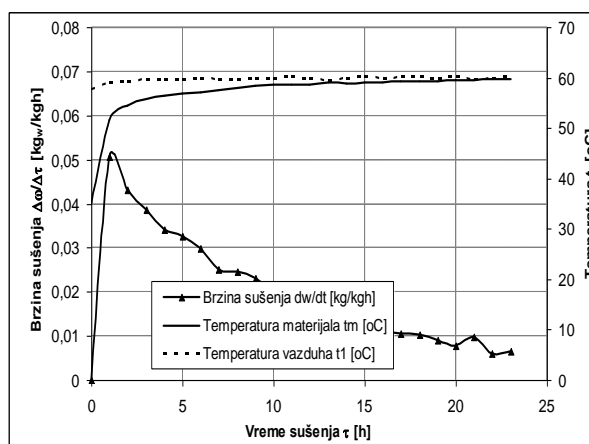
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EK_{11} ($t_k=60^\circ$, $v_k=1\text{ m/s}$, predtretman 3)



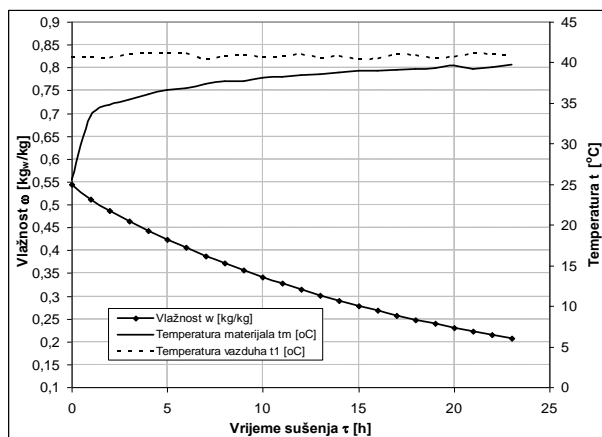
Kinetička kriva promjene brzine sušenja četvrtina dunje za EK_{11} ($t_k=60^\circ$, $v_k=1\text{ m/s}$, predtretman 3)



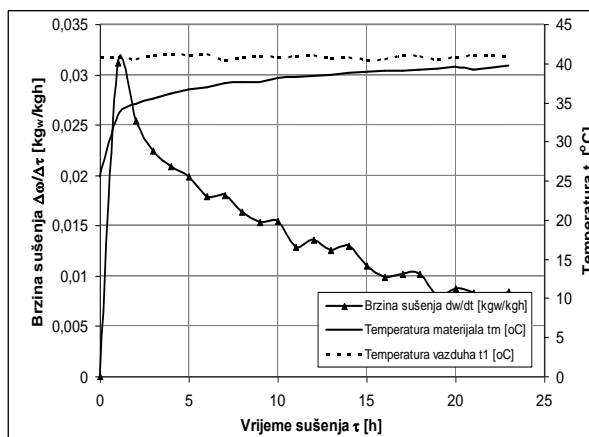
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EK_{12} ($t_k=60^\circ$, $v_k=1,5\text{ m/s}$, predtretman 3)



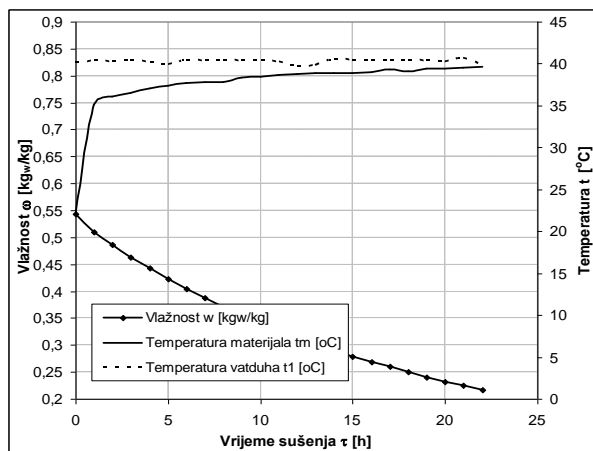
Kinetička kriva promjene brzine sušenja četvrtina dunje za EK_{11} ($t_k=60^\circ$, $v_k=1,5\text{ m/s}$, predtretman 3)



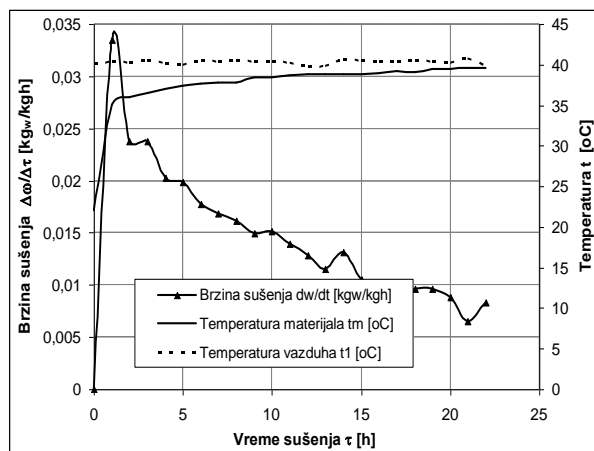
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EK_{13} ($t_k=40^\circ$, $v_k=1\text{ m/s}$, predtretman 4)



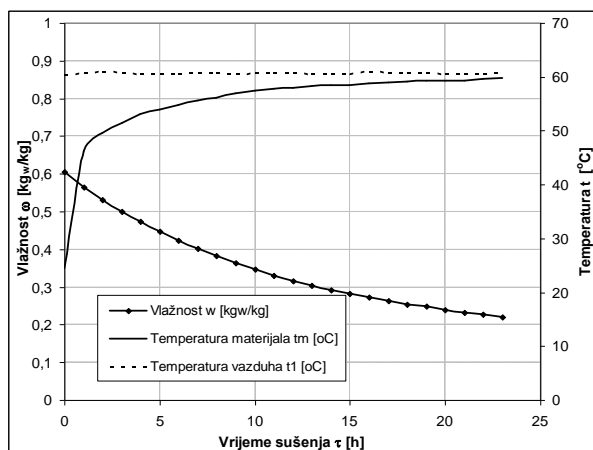
Kinetička kriva promjene brzine sušenja četvrtina dunje za EK_{13} ($t_k=40^\circ$, $v_k=1\text{ m/s}$, predtretman 4)



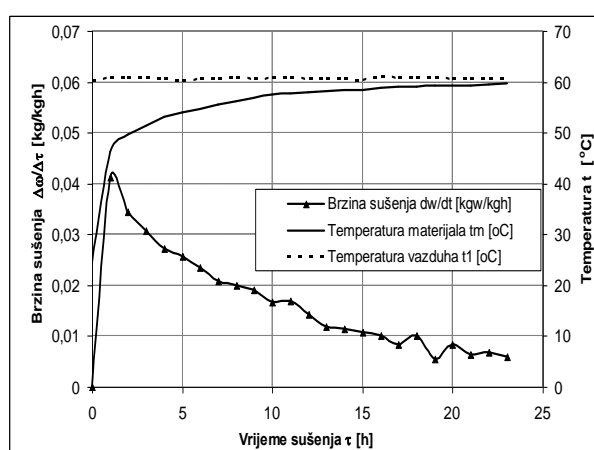
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EK_{14} ($t_k=40^\circ$, $v_k=1,5$ m/s, predtretman 4)



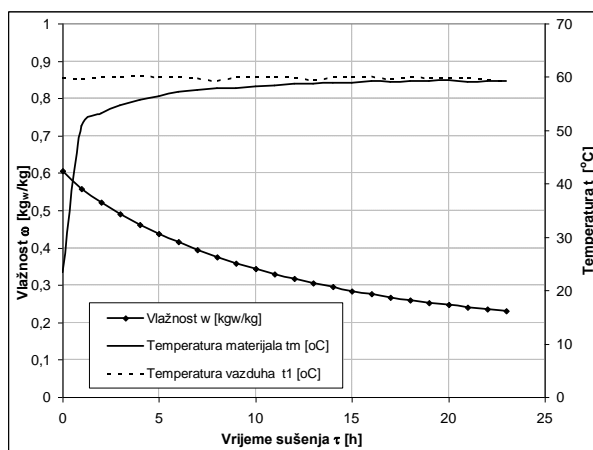
Kinetička kriva promjene brzine sušenja četvrtina dunje za EK_{14} ($t_k=40^\circ$, $v_k=1,5$ m/s, predtretman 4)



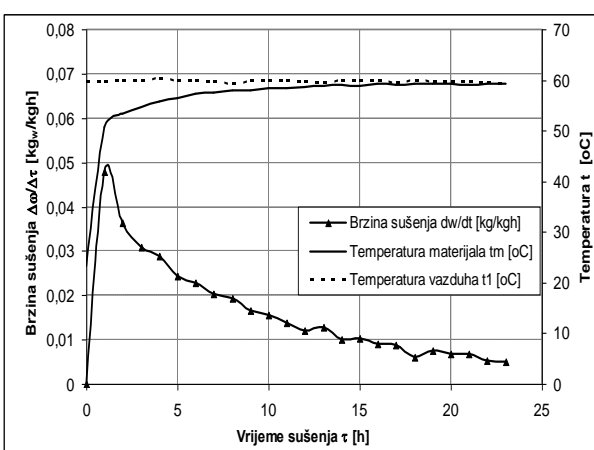
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EK_{15} ($t_k=60^\circ$, $v_k=1$ m/s, predtretman 4)



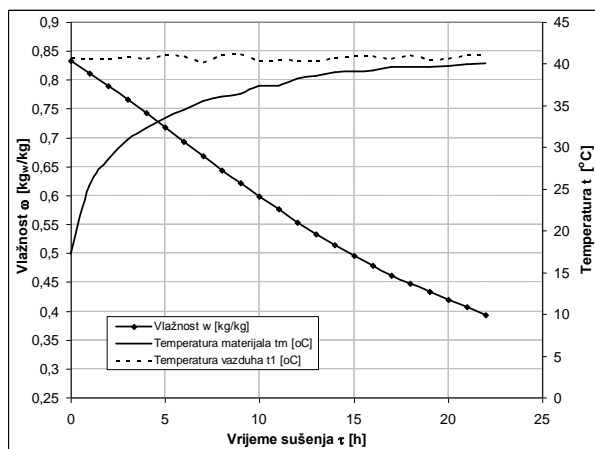
Kinetička kriva promjene brzine sušenja četvrtina dunje za EK_{15} ($t_k=60^\circ$, $v_k=1$ m/s, predtretman 4)



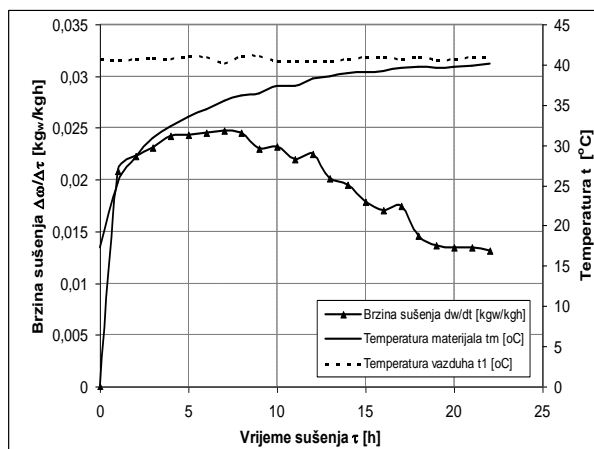
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EK_{16} ($t_k=60^\circ$, $v_k=1,5$ m/s, predtretman 4)



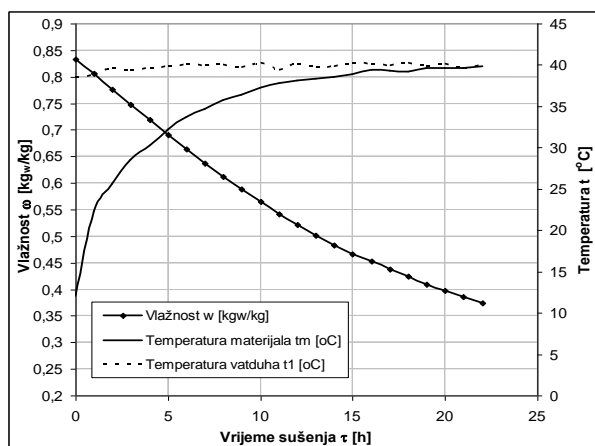
Kinetička kriva promjene brzine sušenja četvrtina dunje za EK_{16} ($t_k=60^\circ$, $v_k=1,5$ m/s, predtretman 4)



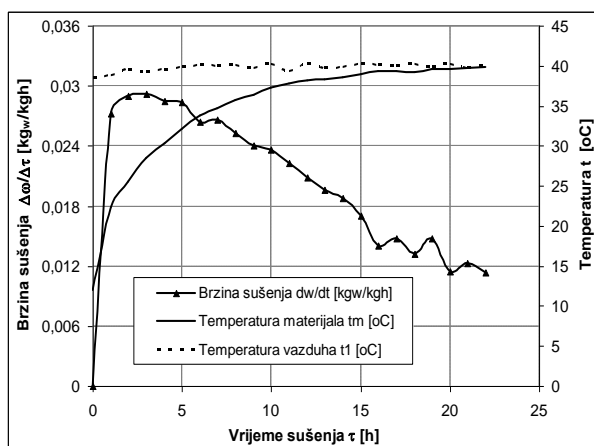
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EK₁₇ ($t_k=40^\circ$, $v_k=1\text{ m/s}$, bez osmoze)



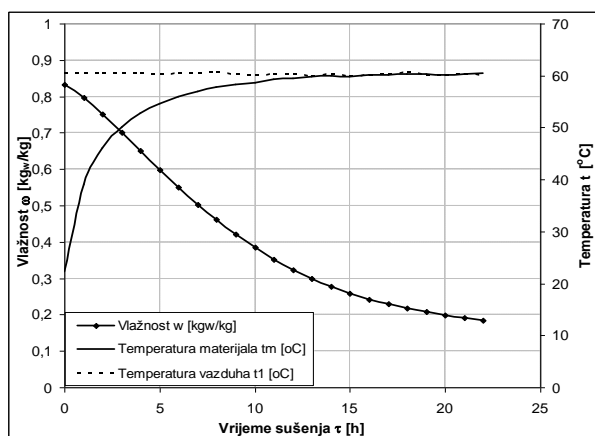
Kinetička kriva promjene brzine sušenja četvrtina dunje za EK₁₇ ($t_k=40^\circ$, $v_k=1\text{ m/s}$, bez osmoze)



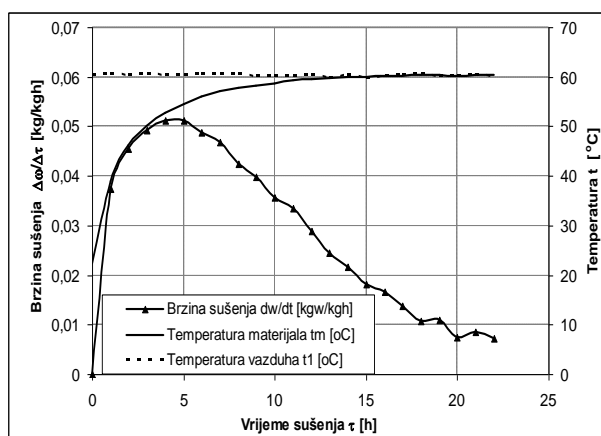
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EK₁₈ ($t_k=40^\circ$, $v_k=1,5\text{ m/s}$, bez osmoze)



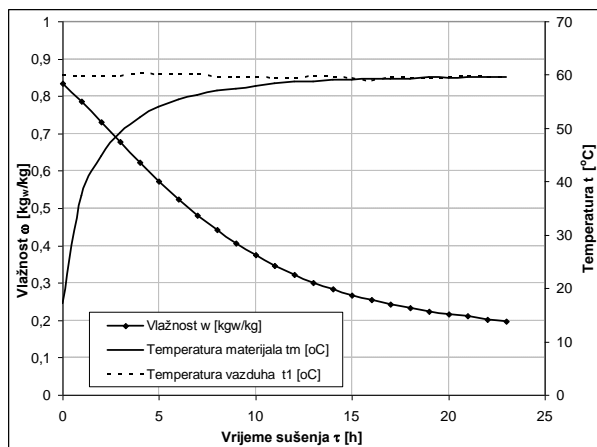
Kinetička kriva promjene brzine sušenja četvrtina dunje za EK₁₈ ($t_k=40^\circ$, $v_k=1,5\text{ m/s}$, bez osmoze)



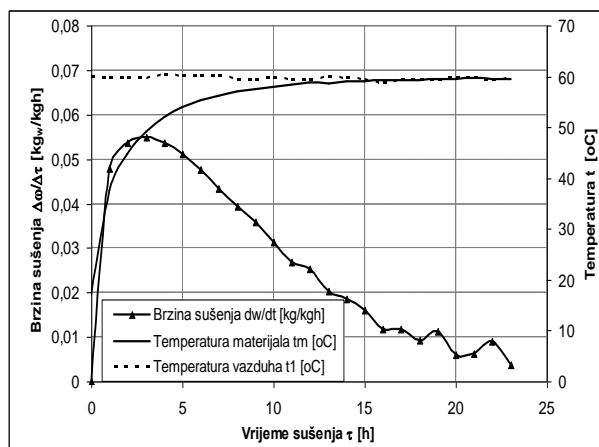
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EK₁₉ ($t_k=60^\circ$, $v_k=1\text{ m/s}$, bez osmoze)



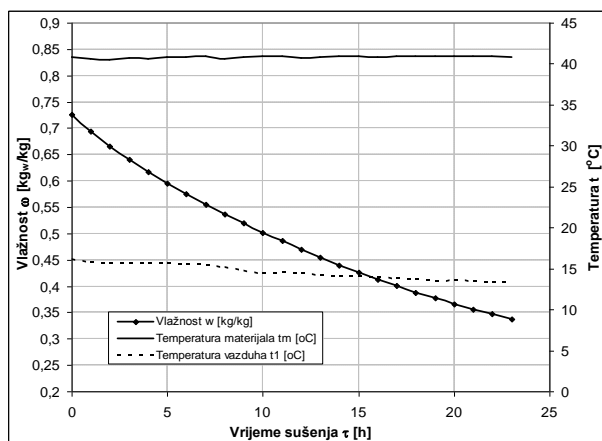
Kinetička kriva promjene brzine sušenja četvrtina dunje za EK₁₉ ($t_k=60^\circ$, $v_k=1\text{ m/s}$, bez osmoze)



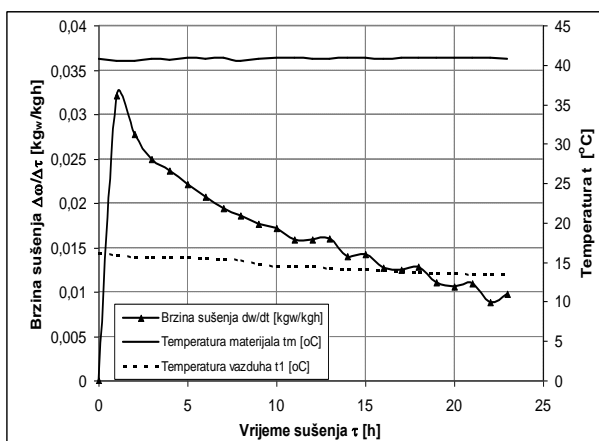
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EK₂₀ ($t_k=60^\circ$, $v_k=1,5$ m/s, bez osmoze)



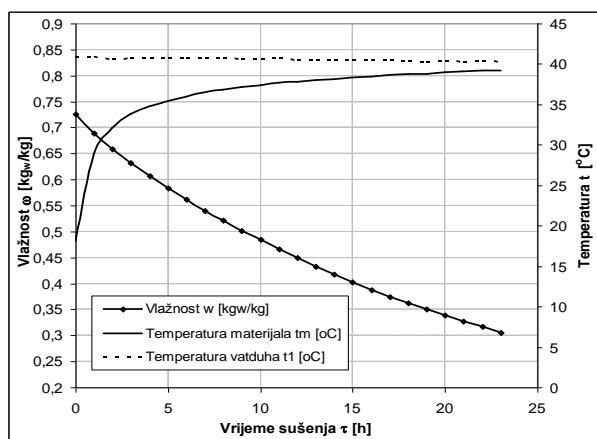
Kinetička kriva promjene brzine sušenja četvrtina dunje za EK₂₀ ($t_k=60^\circ$, $v_k=1,5$ m/s, bez osmoze)



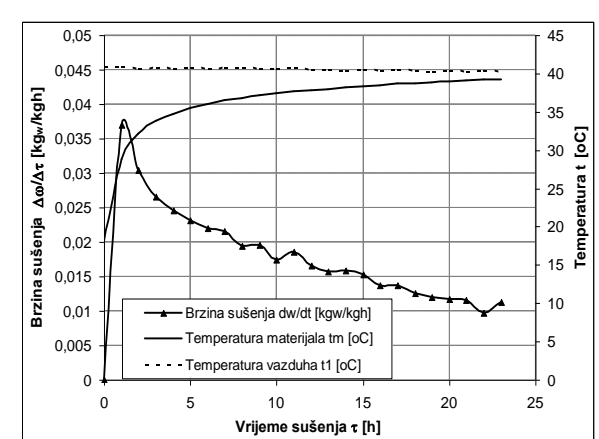
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EK₂₁ ($t_k=40^\circ$, $v_k=1$ m/s, predtretman 1)



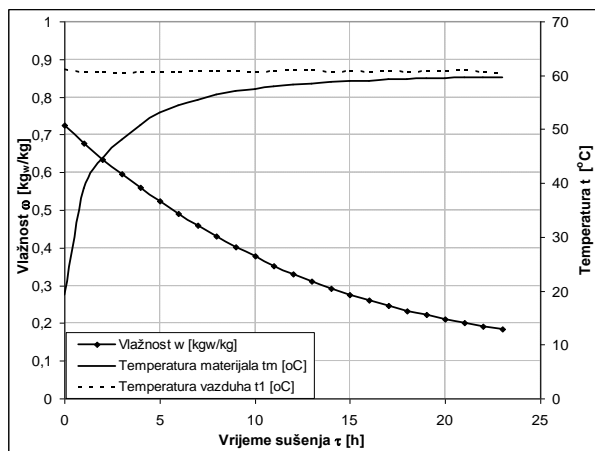
Kinetička kriva promjene brzine sušenja četvrtina dunje za EK₂₁ ($t_k=40^\circ$, $v_k=1$ m/s, predtretman 1)



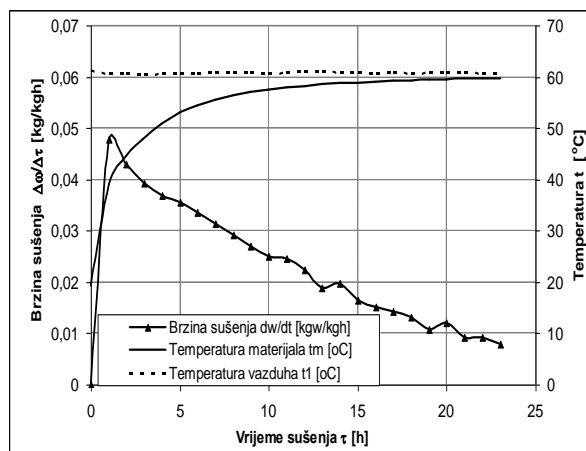
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EK₂₂ ($t_k=40^\circ$, $v_k=1,5$ m/s, predtretman 1)



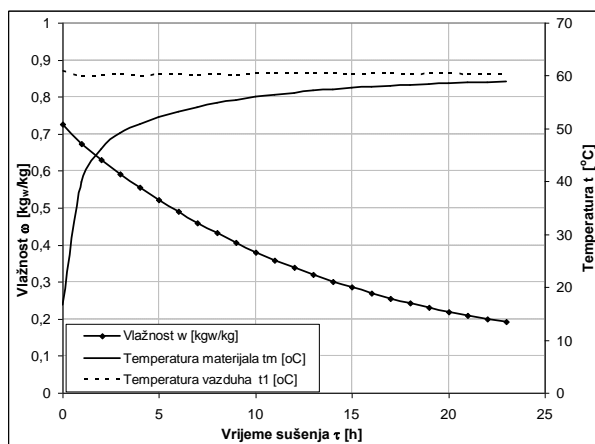
Kinetička kriva promjene brzine sušenja četvrtina dunje za EK₂₂ ($t_k=40^\circ$, $v_k=1,5$ m/s, predtretman 1)



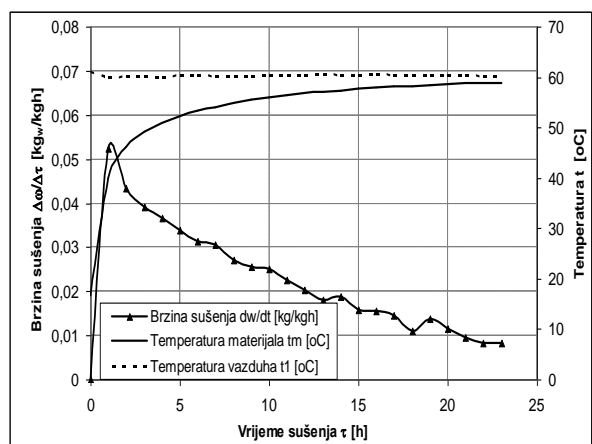
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EK₂₃ ($t_k=60^\circ$, $v_k=1$ m/s, predtretman 1)



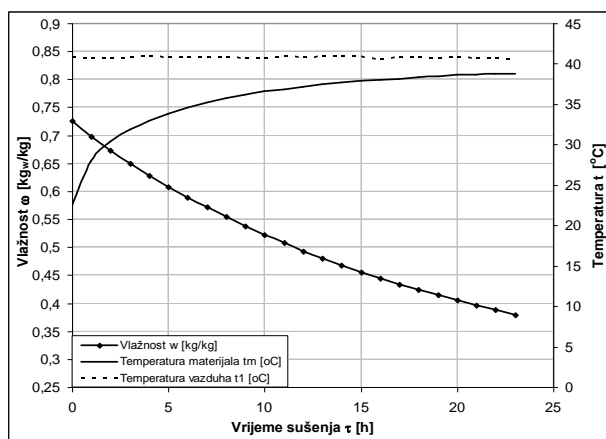
Kinetička kriva promjene brzine sušenja četvrtina dunje za EK₂₃ ($t_k=60^\circ$, $v_k=1$ m/s, predtretman 1)



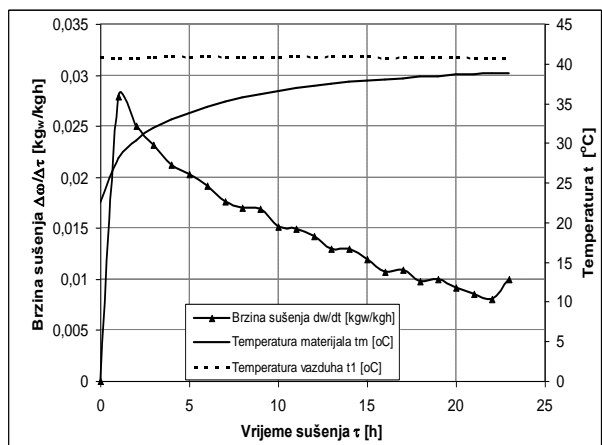
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EK₂₄ ($t_k=60^\circ$, $v_k=1,5$ m/s, predtretman 1)



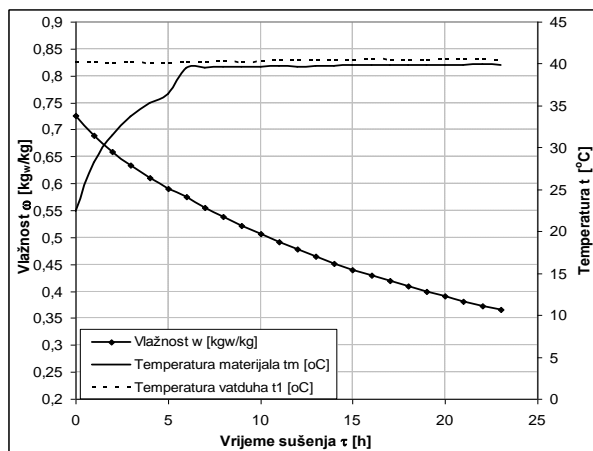
Kinetička kriva promjene brzine sušenja četvrtina dunje za EK₂₃ ($t_k=60^\circ$, $v_k=1,5$ m/s, predtretman 1)



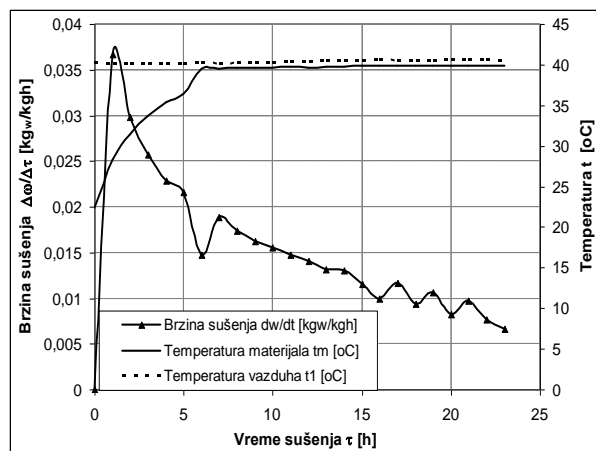
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EK₂₅ ($t_k=40^\circ$, $v_k=1$ m/s, predtretman 2)



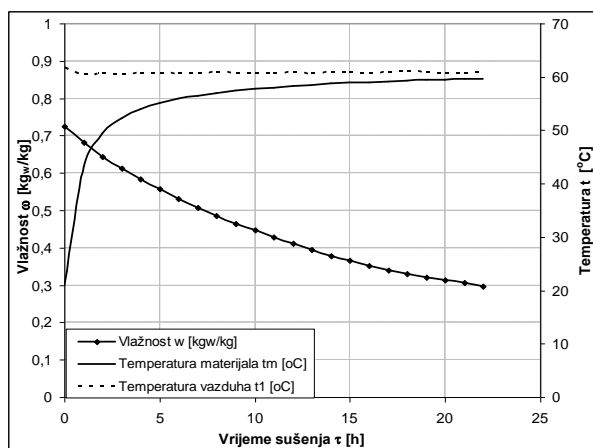
Kinetička kriva promjene brzine sušenja četvrtina dunje za EK₂₅ ($t_k=40^\circ$, $v_k=1$ m/s, predtretman 2)



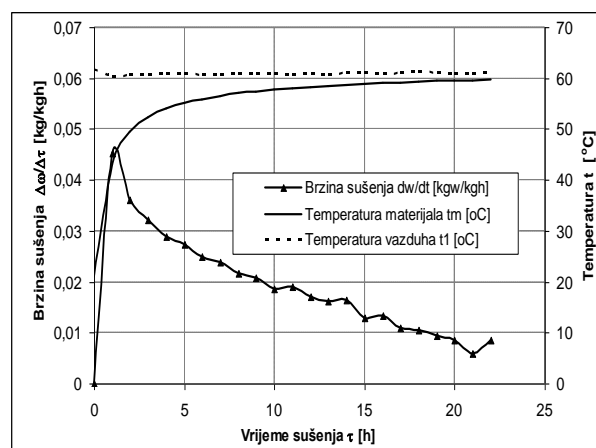
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EK₂₆ ($t_k=40^\circ$, $v_k=1,5$ m/s, predtretman 2)



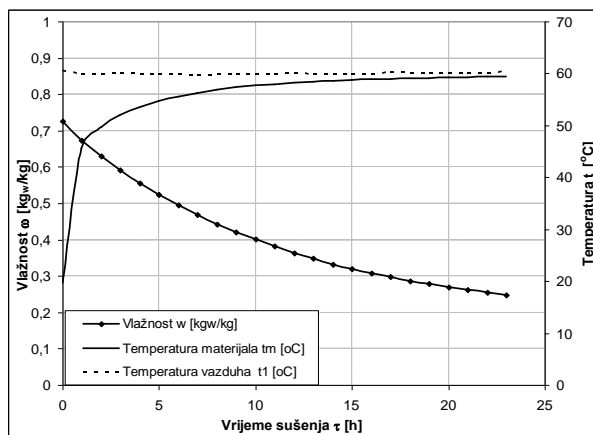
Kinetička kriva promjene brzine sušenja četvrtina dunje za EK₂₆ ($t_k=40^\circ$, $v_k=1,5$ m/s, predtretman 2)



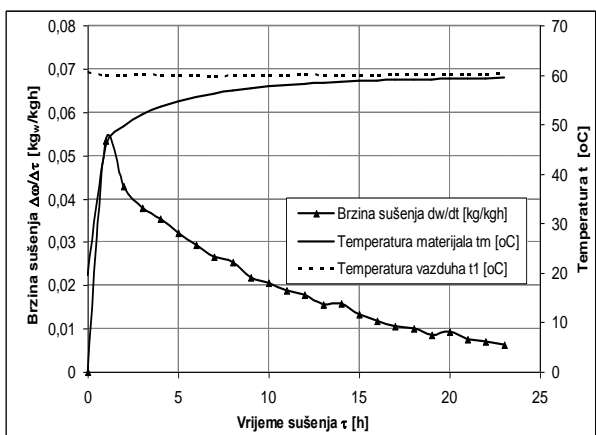
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EK₂₇ ($t_k=60^\circ$, $v_k=1$ m/s, predtretman 2)



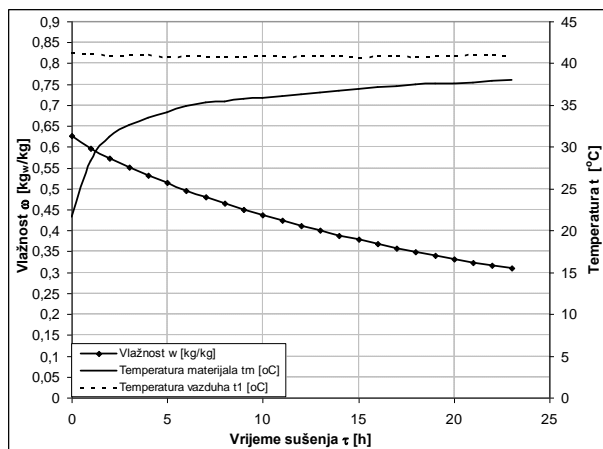
Kinetička kriva promjene brzine sušenja četvrtina dunje za EK₂₇ ($t_k=60^\circ$, $v_k=1$ m/s, predtretman 2)



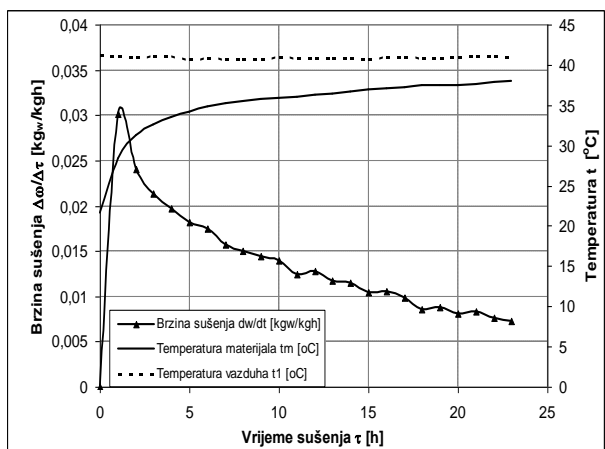
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EK₂₈ ($t_k=60^\circ$, $v_k=1,5$ m/s, predtretman 2)



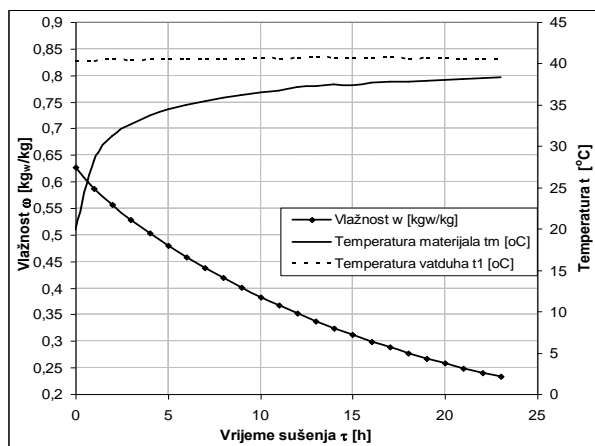
Kinetička kriva promjene brzine sušenja četvrtina dunje za EK₂₈ ($t_k=60^\circ$, $v_k=1,5$ m/s, predtretman 2)



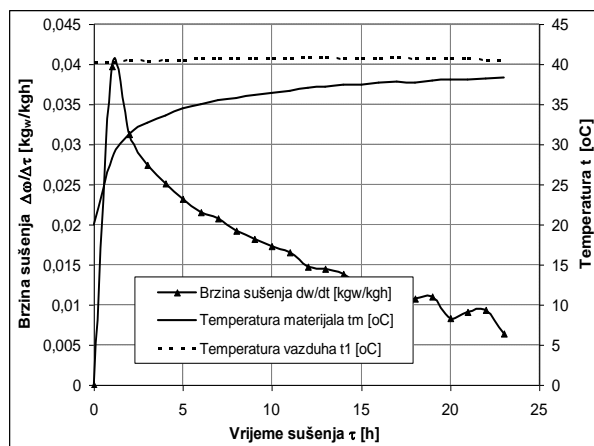
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EK₂₉ ($t_k=40^\circ$, $v_k=1$ m/s, predtretman 3)



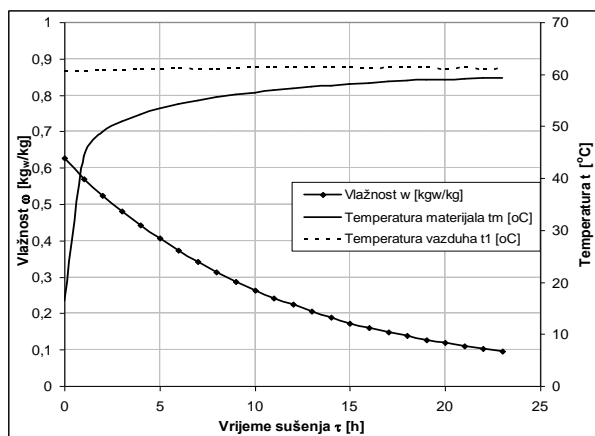
Kinetička kriva promjene brzine sušenja četvrtina dunje za EK₂₉ ($t_k=40^\circ$, $v_k=1$ m/s, predtretman 3)



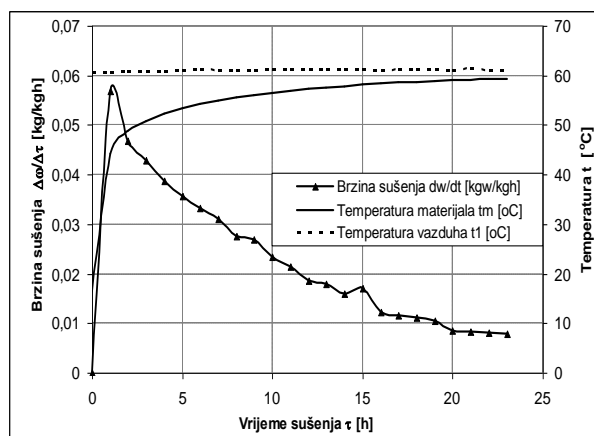
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EK₃₀ ($t_k=40^\circ$, $v_k=1,5$ m/s, predtretman 3)



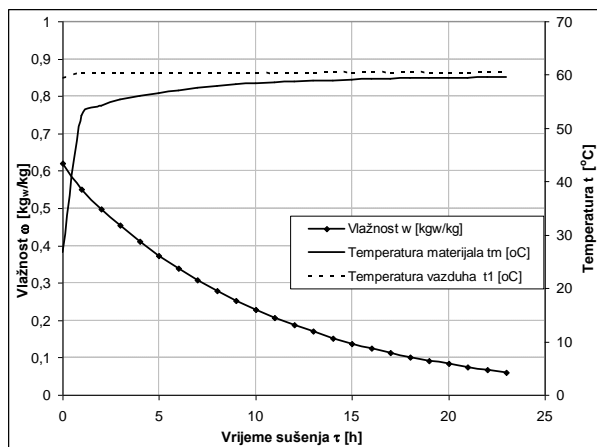
Kinetička kriva promjene brzine sušenja četvrtina dunje za EK₃₀ ($t_k=40^\circ$, $v_k=1,5$ m/s, predtretman 3)



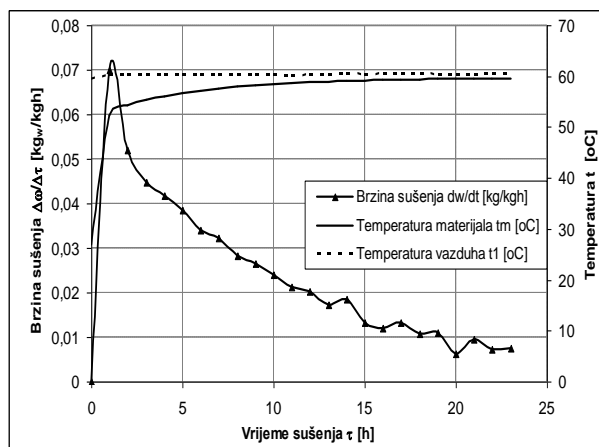
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EK₃₁ ($t_k=60^\circ$, $v_k=1$ m/s, predtretman 3)



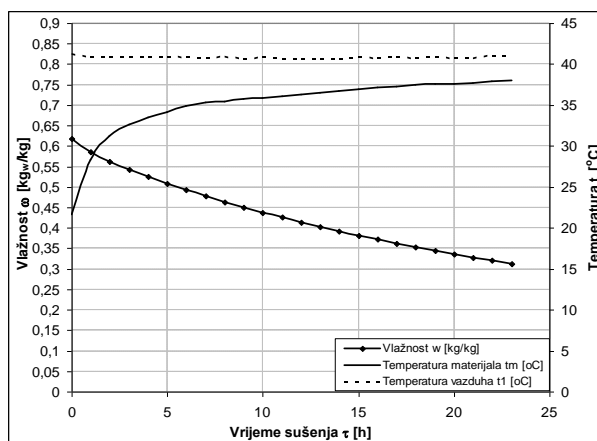
Kinetička kriva promjene brzine sušenja četvrtina dunje za EK₃₁ ($t_k=60^\circ$, $v_k=1$ m/s, predtretman 3)



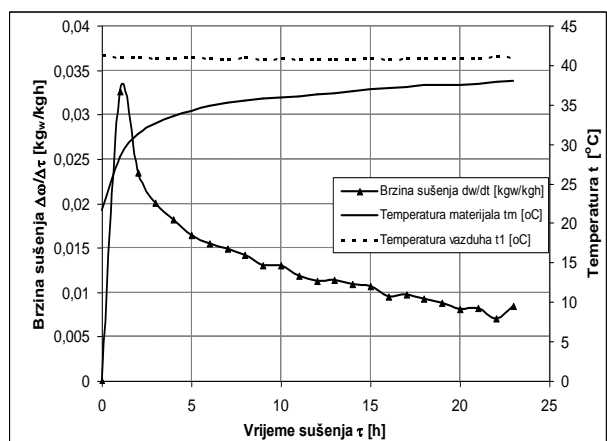
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EK₃₂ ($t_k=60^\circ$, $v_k=1,5$ m/s, predtretman 3)



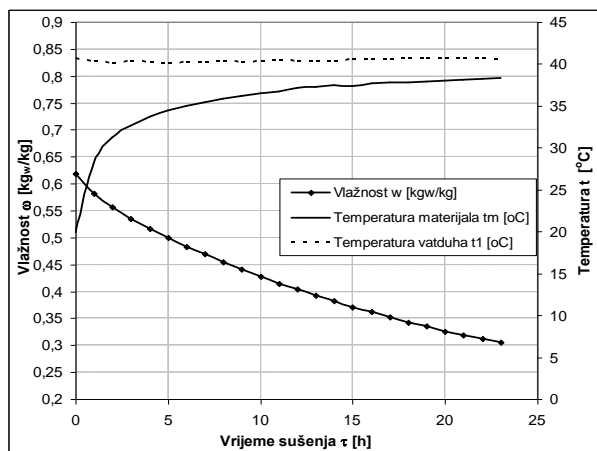
Kinetička kriva promjene brzine sušenja četvrtina dunje za EK₃₂ ($t_k=60^\circ$, $v_k=1,5$ m/s, predtretman 3)



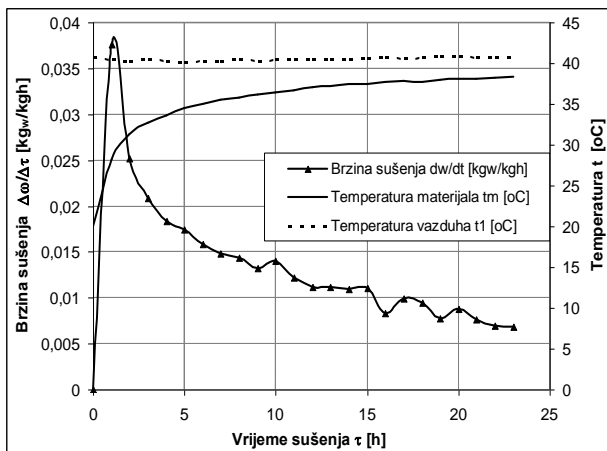
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EK₃₃ ($t_k=40^\circ$, $v_k=1$ m/s, predtretman 4)



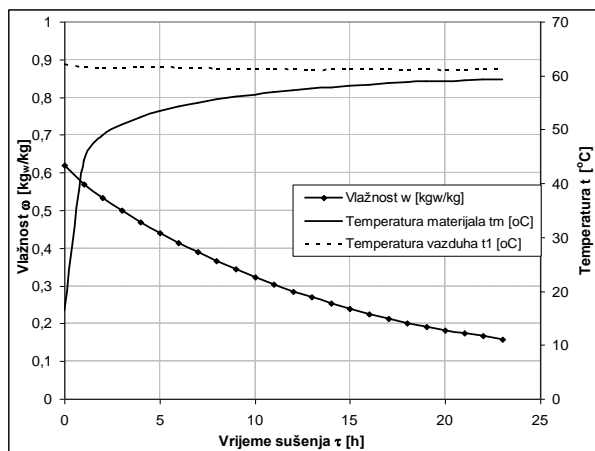
Kinetička kriva promjene brzine sušenja četvrtina dunje za EK₃₃ ($t_k=40^\circ$, $v_k=1$ m/s, predtretman 4)



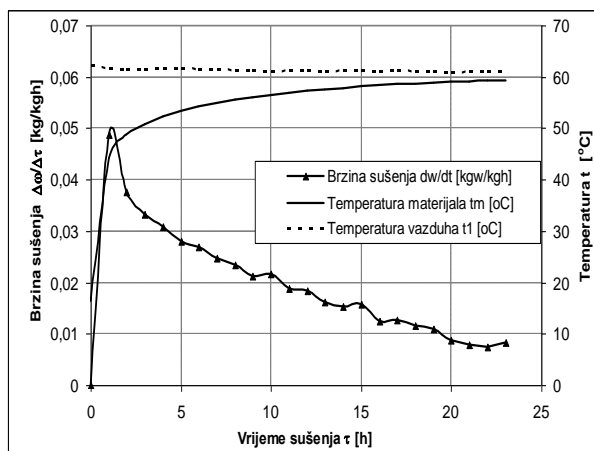
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EK₃₄ ($t_k=40^\circ$, $v_k=1,5$ m/s, predtretman 4)



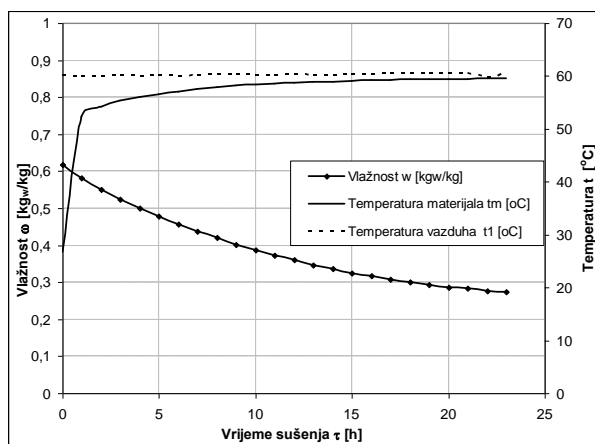
Kinetička kriva promjene brzine sušenja četvrtina dunje za EK₃₄ ($t_k=40^\circ$, $v_k=1,5$ m/s, predtretman 4)



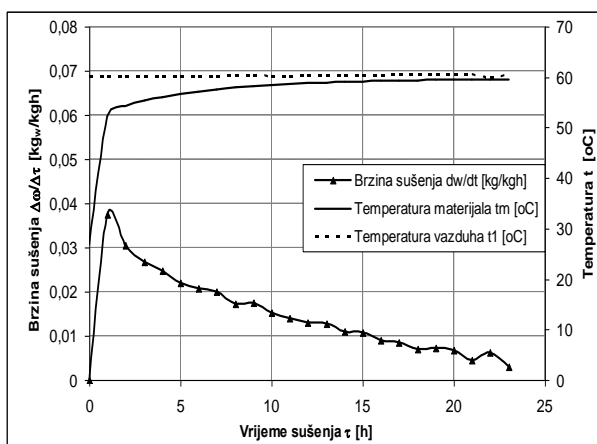
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EK₃₅ ($t_k=60^\circ$, $v_k=1$ m/s, predtretman 4)



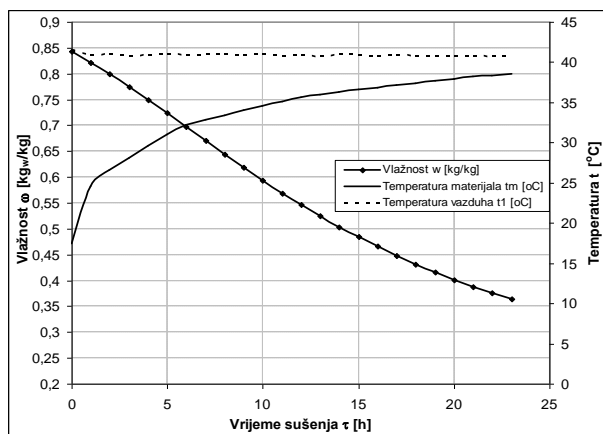
Kinetička kriva promjene brzine sušenja četvrtina dunje za EK₃₅ ($t_k=60^\circ$, $v_k=1$ m/s, predtretman 4)



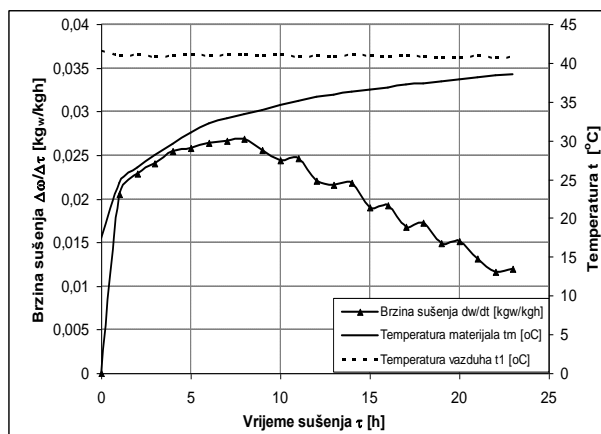
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EK₃₆ ($t_k=60^\circ$, $v_k=1,5$ m/s, predtretman 4)



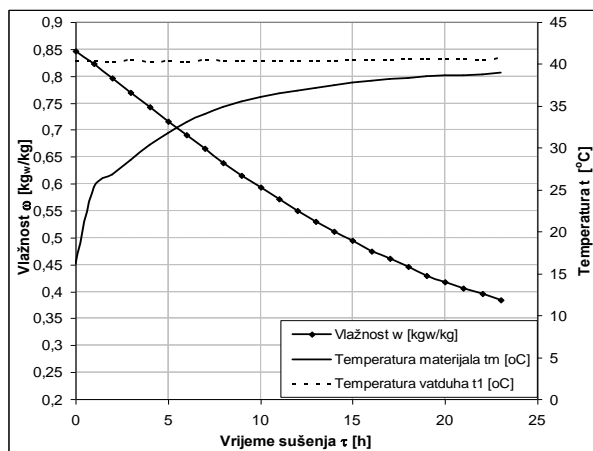
Kinetička kriva promjene brzine sušenja četvrtina dunje za EK₃₆ ($t_k=60^\circ$, $v_k=1,5$ m/s, predtretman 4)



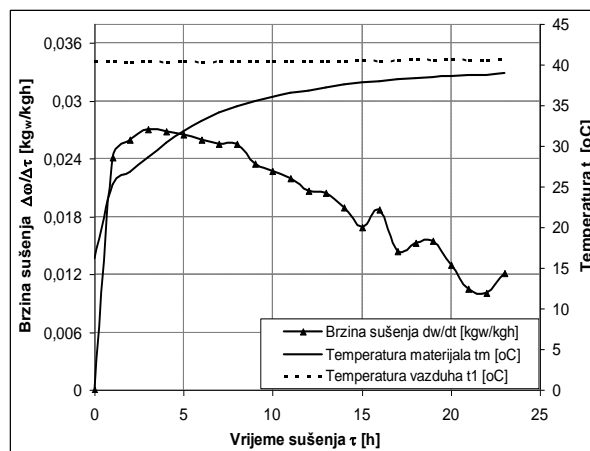
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EK₃₇ ($t_k=40^\circ$, $v_k=1$ m/s, bez osmoze)



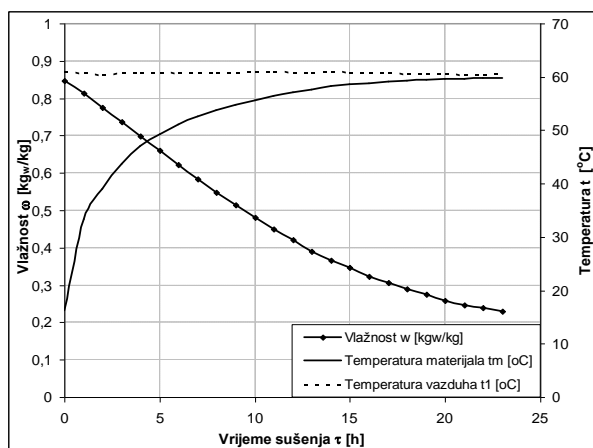
Kinetička kriva promjene brzine sušenja četvrtina dunje za EK₃₇ ($t_k=40^\circ$, $v_k=1$ m/s, bez osmoze)



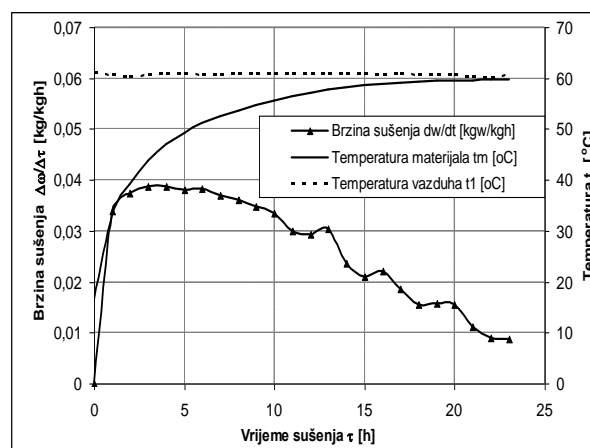
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EK_{38} ($t_k=40^\circ$, $v_k=1,5\text{m/s}$, bez osmoze)



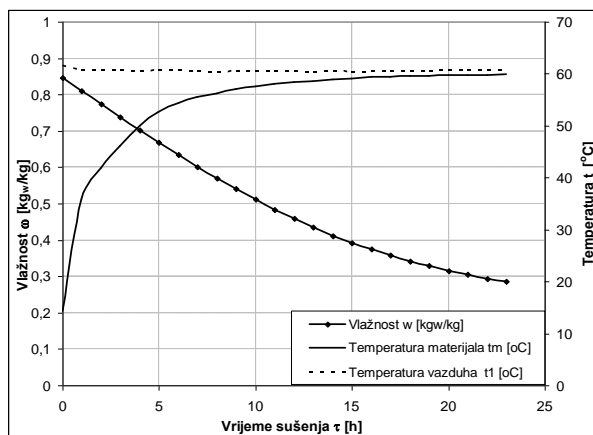
Kinetička kriva promjene brzine sušenja četvrtina dunje za EK_{38} ($t_k=40^\circ$, $v_k=1,5\text{m/s}$, bez osmoze)



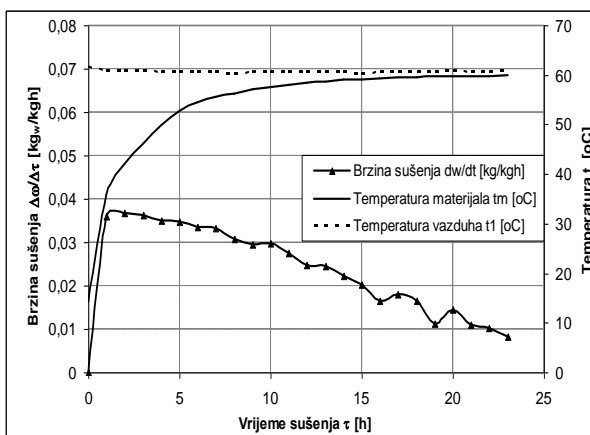
Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EK_{39} ($t_k=60^\circ$, $v_k=1\text{m/s}$, bez osmoze)



Kinetička kriva promjene brzine sušenja četvrtina dunje za EK_{39} ($t_k=60^\circ$, $v_k=1\text{m/s}$, bez osmoze)



Kinetička kriva promjene vlažnosti četvrtina dunje za EK_{40} ($t_k=60^\circ$, $v_k=1,5\text{m/s}$, bez osmoze)



Kinetička kriva promjene brzine sušenja četvrtina dunje za EK_{40} ($t_k=60^\circ$, $v_k=1,5\text{m/s}$, bez osmoze)

BIOGRAFIJA

Čedomir Stojanović, sin Radomira, rođen je 18. 08. 1974 godine u Bijeljini. Osnovnu školu završio je u Bijeljini, gdje završava i srednju mašinsko-tehničku školu. Poljoprivredni fakultet, smjer Poljoprivredna tehnika upisuje u Novom Sadu 1994 godine. Diplomirao je u septembru 1999, na temu »Sušenje duvana tipa virdžinija na malom posedu«, sa ocjenom 10. Iste godine upisuje postdiplomske studije na Poljoprivrednom fakultetu u Novom sadu, smjer »Procesna tehnika i energetika u poljoprivredi«, gdje polaže sve ispite predviđene nastavnim planom i programom. Magistarski rad “Analiza proračuna cilindričnih metalnih silosnih ćelija prilikom skladištenja zrnastog materijala” je odbranio 09.04.2008 godine.

Od 1999 godine radi u PD »Semberiju« na poslovima u Doradnom centru. Poslije odrađenog pripravničkog staža, primljen je u stalni radni odnos na mjesto glavnog tehnologa u Doradnom centru, a u februaru 2002. godine postavljen je za rukovodioca centra. U PD »Semberiji« ostaje da radi do 01. novembra 2002. godine kada odlazi da radi na mjesto rukovodioca “Privredne jedinice 3 Maj” u sklopu Okružnog zatvora Bijeljina. U PD “Semberija” Bijeljina, ponovo se vraća 20. juna 2007. godine na mjesto tehničkog direktora. Trenutno je raspoređen na mjesto pomoćnika direktora za biljnu proizvodnju u PD “Semberija”

Učesnik je svih Naučnih skupova vezanih za temu procesne tehnike i energetike u poljoprivredi, gde je bio autor i koautor više naučnih i stručnih radova. Član je naučnog udruženja “Nacionalno društvo za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi – PTEP. Oženjen je suprugom Mirjanom, otac je dva dječaka i živi u Bijeljini