



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA
DEPARTMAN ZA ENERGETIKU I PROCESNU
TEHNIKU



Đorđije Doder

Uticaj prekidnih režima na fenomene prenosa mase i toplote pri sušenju materijala sfernog oblika

Doktorska disertacija

Novi Sad, 2019.



КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР:	
Идентификациони број, ИБР:	
Тип документације, ТД:	Монографска публикација
Тип записа, ТЗ:	Текстуални штампани материјал
Врста рада, ВР:	Докторска дисертација
Аутор, АУ:	Ђорђевије Додер, мастер инжењер
Ментор, МН:	Ванр. проф. др Дамир Ђаковић
Наслов рада, НР:	Утицај прекидних режима на феномене преноса масе и топлоте при сушењу материјала сферног облика
Језик публикације, ЈП:	Српски латиница
Језик извода, ЈИ:	Српски/Енглески
Земља публиковања, ЗП:	Србија
Уже географско подручје, УГП:	Војводина
Година, ГО:	2019.
Издавач, ИЗ:	Ауторски репринт
Место и адреса, МА:	21000 Нови Сад, Трг Доситеја Обрадовића 6
Физички опис рада, ФО: (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	5/105/109/20/78/56/1
Научна област, НО:	Машинско инжењерство
Научна дисциплина, НД:	Процесна техника
Предметна одредница/Кључне речи, ПО:	Прекидно сушење, конвективно сушење, феномени преноса
УДК	
Чува се, ЧУ:	Библиотека Факултета техничких наука у Новом Саду
Важна напомена, ВН:	
Извод, ИЗ:	Приказана је процедура моделовања прекидног сушења материјала сферног облика у танком слоју, након чега је покренута рачунарска симулација процеса на основу предложеног модела. Затим, одрађено је експериментално истраживање, за шта су коришћени свјеже убрани ораси у љусци, без комине. Након што је статистички потврђена поузданост модела, он је искоришћен као база формирање модела за симулацију сушења у дебелом слоју. После тога су урађени експерименти и за друге материјале различитих особина (кромпир, бундева и кестење), да би се извели закључци о могућности енергетске уштеде у процесима конвективног сушења у зависности од физичких особина материјала. Овим истраживањем показано је да су са становишта уштеде енергије прекидни режими конвективног сушења препоручљивији код материјала који имају већу ефективну дифузивност.
Датум прихватања теме, ДП:	
Датум одбране, ДО:	
Чланови комисије, КО:	Председник: Др Раде Дорословачки, редовни професор Члан: Др Тодор Јанић, редовни професор Члан: Др Јелена Јаневски, ванредни професор Члан: Др Мирослав Кљајић, доцент Члан: Др Александар Анђелковић, доцент Члан, ментор: Др Дамир Ђаковић, ванредни професор
	Потпис ментора



KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	Monography
Type of record, TR :	Printed text
Contents code, CC :	Doctoral dissertation
Author, AU :	Đorđije Doder, MSc
Mentor, MN :	Associate professor Damir Đaković, PhD
Title, TI :	Influence of intermittent drying on mass and heat transport phenomena during drying of spherical shaped material
Language of text, LT :	Serbian, Latin script
Language of abstract, LA :	Serbian / English
Country of publication, CP :	Serbia
Locality of publication, LP :	Vojvodina
Publication year, PY :	2019.
Publisher, PB :	Author's reprint
Publication place, PP :	21000 Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	5/105/109/20/78/56/1
Scientific field, SF :	Mechanical engineering
Scientific discipline, SD :	Process engineering
Subject/Key words, S/KW :	Intermittent drying, convective drying, transport phenomena
UC	
Holding data, HD :	Library of the Faculty of Technical Sciences Novi Sad
Note, N :	
Abstract, AB :	This research shows the procedure of modeling the intermittent drying of sphere-shaped materials in a thin-layer, after which the computer simulation was done, based on the proposed model. The experimental investigation has been done, where the fresh collected in-shell walnuts had served as the main drying material. As the model reliability was experimentally confirmed, it was used as a basis for creating a model for deep-bed drying simulation. Afterwards, the experimental investigation was done for other materials as well (potato, pumpkin and chestnuts), in order to draw the conclusions concerning the possibility of energy saving in convective drying processes, as it depends on physical properties of a material. This research showed that, from the perspective of energy saving, it is more advisable to use an intermittent regime if a material has a higher effective diffusivity.
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	
Defended on, DE :	
Defended Board, DB :	President: Dr Rade Doroslovački, Professor
	Member: Dr Todor Janić, Professor
	Member: Dr Jelena Janevski, Associate Professor
	Member: Dr Miroslav Kljajić, Assistant Professor
	Member: Dr Aleksandar Anđelković, Assistant Professor
	Member, Mentor: Dr Damir Đaković, Associate Professor
	Mentor's sign

Predgovor

Izbor ove teme rezultat je mog višegodišnjeg angažmana u izvođenju vježbi na različitim predmetima iz oblasti toplotne i procesne tehnike, kao i zainteresovanosti za probleme iz fenomena prenosa pri neustaljenim uslovima.

Mentor rada je profesor Damir Đaković, kome dugujem izuzetno veliku zahvalnost zbog strpljenja, posvećenosti, a prije svega stručnosti kojom me je vodio kroz cjelokupan proces izrade disertacije – od izbora teme, preko definisanja problema i samog istraživanja, do objavljivanja naučnih radova i pisanja same disertacije.

Zahvaljujem se i ostalim članovima komisije, kao i svima onima koji su na bilo koji način pomogli u realizaciji istraživanja.

Zahvaljujem se porodici na pomoći i podršci.

Rad je napisan u pet poglavlja. U prvom poglavlju se diskutuje aktuelno stanje u oblasti, definiše problem i navode se ciljevi istraživanja i hipoteze, dok je u drugom poglavlju detaljno prikazan eksperimentalni postupak. U trećem i četvrtom poglavlju analiziraju se definisani problemi, pa je kroz ova dva poglavlja prikazan suštinski naučni doprinos disertacije. U petom poglavlju su sumirani najvažniji zaključci istraživanja.

Prekidno konvektivno sušenje ne predstavlja nov koncept u ovoj naučnoj disciplini, ali njegovo izučavanje i dalje je veoma aktuelno, upravo zbog različite manifestacije ovakvog tretmana kod sušenja u različitim uslovima, a pogotovo ako se radi o različitim materijalima.

Nadam se da je ovim radom bar djelimično bačeno novo svjetlo na pomenutu problematiku, a da će inženjerima i naučnicima koji se ovom oblašću bave, koristiti u daljem istraživanju, projektovanju i konstruisanju.

Аутор

Sadržaj

Poglavlje 1.	1
Predmet i cilj istraživanja. Preliminarna analiza i hipoteze	1
1.1 Uvod	1
1.2 Materijali	1
1.3 Mehanizam konvektivnog sušenja	2
1.4 O sušenju oraha.....	3
Postojeća tehnika sušenja	7
Osobine oraha prema postojećoj literaturi	9
Postojeći rezultati kinetike sušenja oraha.....	13
1.5 O sušenju ostalih materijala	14
1.6 Prekidno sušenje	15
1.7 Hipoteze i ciljevi istraživanja	17
Ciljevi istraživanja	17
Hipoteze	18
Literatura	20
Poglavlje 2.	23
Detaljan opis eksperimentalnog postupka.....	23
2.1 Uvod	23
2.2 Određivanje početnog sadržaja vlage	23
Pokazatelji distribucije vlage	29
2.3 Doprema, skladištenje i izvođenje eksperimenta	30
Opis postrojenja i instrumenata.....	33
Kontinualni režim	34
Prekidni režim.....	34
Konstruktivni detalji postrojenja	34
Način mjerenja i opis instrumenata	37
Mjerni uslovi kod prekidnih režima.....	40
2.4 Sušenje ostalih materijala	42
2.5 Greške mjerenja	42
Literatura	45
Poglavlje 3	46
Modelovanje prekidnog procesa. Analiza sušenja oraha.....	46
3.1 Matematičko modelovanje	46

3.2 Sušenje u tankom sloju.....	46
Modelovanje kinetike sušenja.....	49
Modelovanje distribucije temperature	50
Određivanje toplotnih i fizičkih svojstava oraha za proračun	51
Procedura rješavanja.....	53
3.3 Rezultati i analiza sušenja u tankom sloju	56
3.4 Modelovanje sušenja u debelom sloju.....	62
Postavka modela	62
Bilansiranje mase vlage	64
Strujanje vadauha kroz porozan sloj. Forhajmerova jednačina	66
Bilansiranje energije	66
Postupak rješavanja.....	70
Analiza osjetljivosti na parametre simulacionog algoritma	71
3.5 Rezultati i analiza za simulaciju sušenja u debelom sloju	72
3.6 Osvrt na prvu hipotezu	76
Literatura	77
Poglavlje 4.	80
Energetski aspekti. Analiza sušenja ostalih materijala	80
4.1 Uvod	80
4.2 Opis modela i procedura proračuna.....	82
Fizička pozadina i vizuelizacija procesa difuzije.....	82
Parametri uštede energije	85
4.3 Rezultati i diskusija	86
4.4 Osvrt na drugu hipotezu.....	93
Literatura	94
Poglavlje 5.	96
Zaključci	96
Prilog – Matlab programski kodovi	98

Lista slika

<i>Slika 1-1</i>	Mehanizam procesa konvektivnog odvođenja vlage sa površine
<i>Slika 1-2</i>	Krive relevantnih parametara u procesu kontinualnog konvektivnog sušenja
<i>Slika 1-3</i>	Orah u komini i bez komine
<i>Slika 1-4</i>	Fotografija korišćenih uzoraka oraha: a) Prije sušenja; b) Nakon sušenja
<i>Slika 1-5</i>	Primjerci koji nisu sušeni i koje je zahvatila buđ: a) Unutrašnji izgled; b) Spoljašnji izgled
<i>Slika 1-6</i>	Dijagram toka tretmana oraha
<i>Slika 1-7</i>	Postrojenje za sušenje sa nizom pregrada („bin“ sušare) napunjenih orasima
<i>Slika 1-8</i>	Šema komore za sušenje kod „bin“ sušara. Na dnu se nalazi perforirani pod kroz koji se ubacuje vazduh, koji zatim struji kroz sloj materijala
<i>Slika 1-9</i>	Šema komore za sušenje kod a) Vertikalne cilindrične sušare i b) Sušare sa lijevcima
<i>Slika 1-10</i>	Predviđeni i eksperimentalno dobijeni rezultati odnosa sadržaja vlage jezgra i ljuske
<i>Slika 1-11</i>	Sadržaj vlage u Tulare orahu sa i bez spoljašnje ljuske
<i>Slika 1-12</i>	Sadržaj vlage u Howard orahu sa i bez spoljašnje ljuske
<i>Slika 1-13</i>	Sadržaj vlage u Chandler orahu sa i bez spoljašnje ljuske
<i>Slika 1-14</i>	Profil koncentracije vlage: a) Prije sušenja (idealizovan); b) Nakon određenog vremena sušenja
<i>Slika 1-15</i>	Klasifikacija načina primjene prekidnog sušenja
<i>Slika 2-1</i>	Ispitivani uzorci prije određivanja početnog sadržaja vlage
<i>Slika 2-2</i>	a) Silika gel; b) Desikator; c) Termometar
<i>Slika 2-3</i>	a) Uzorci u autoklavu; b) Svjež uzorak u korpici
<i>Slika 2-4</i>	Uzorak nakon postupka određivanja početnog sadržaja vlage; b) Autoklav
<i>Slika 2-5</i>	a) Uređaj „Precisa“ u radu; b) Uređaj „Precisa“ u pripremi sa usitnjenim materijalom; b) Precizna vaga „Radwag“
<i>Slika 2-6</i>	Udjeli uzoraka sa različitim početnim sardžajima vlage prilikom prikupljanja
<i>Slika 2-7</i>	Promjena sadržaja vlage jezgre i kore u toku 8h sušenja oraha manje početne vlažnosti
<i>Slika 2-8</i>	Promjena sadržaja vlage jezgre i kore u toku 8h sušenja oraha veće početne vlažnosti
<i>Slika 2-9</i>	Šematski prikaz logistike izvođenja eksperimenta: 1- Doprema; 2- Skladištenje - FTN; 3- određivanje karakteristika (dimenzije, sušenje)

	– Poljoprivredni fakultet; 4- Eksperimentalni postupak (FTN – Mašinski institut); 5-Skladištenje osušenih uzoraka za eventualnu ponovnu upotrebu
<i>Slika 2-10</i>	Šema eksperimentalnog postrojenja: 1-Ulaz vazduha; 2-Jedinica za kontrolu temperature (grijač sa malim ventilatorom); 3-Jedinica za kontrolu protoka (glavni aksijalni ventilator sa potenciometrom); 4- Glavni potisni cjevovod; 5-Jedinica za ujednačavanje profila brzine; 6- Mjerenje temperature i brzine vazduha ispred sloja materijala; 7- Sloj materijala koji se suši; 8- Vaga sa data loggerom; 9- Računarska jedinica za procesuiranje podataka
<i>Slika 2-11</i>	„Equalizer“ toka vazduha: a) Spoljašnji pogled pred montažu; b) Unutrašnji pogled
<i>Slika 2-12</i>	Elementi u montaži: a) Vazdušni kanal i osnovica radnog dijela pred montažu; b) Radni dio postrojenja
<i>Slika 2-13</i>	Priprema vazduha: a) Vazdušni kanal sa ventilatorom i grijačem; b) Potenciometar
<i>Slika 2-14</i>	Postrojenje u toku rada sa prikazom izvoza podataka
<i>Slika 2-15</i>	Postrojenje u toku rada
<i>Slika 2-16</i>	Priprema vazduha: a) Mjerenje temperature i brzine vazduha; b) Programabilni uređaj za prekid dovoda struje
<i>Slika 2-17</i>	Displej na vagi u toku rada postrojenja
<i>Slika 2-18</i>	a) Stabilizacija pokretnog dijela postrojenja b) Pokretni dio postrojenja sa materijalom nakon pripreme; b) Uzorci u toku sušenja
<i>Slika 2-19</i>	Izmjerene vrijednosti brzine i temperature vazduha po poluprečniku cilindra u toku probnog mjerenja
<i>Slika 2-20</i>	Električna šema termoanemometra
<i>Slika 2-21</i>	a) Termoanemometar i sonda sa toplim krajem; b) Termoanemometar i logger za relativnu vlažnost (na displeju se učitava ista temperatura vazduha čime se potvrđuje tačnost mjerenja)
<i>Slika 2-22</i>	Relevantni parametri svih izvedenih eksperimenata
<i>Slika 2-23</i>	Izmjerene temperature u prekidnom režimu 60/30
<i>Slika 2-24</i>	Izmjerena relativna vlažnost okolnog vazduha u prekidnom režimu 60/30
<i>Slika 2-25</i>	Izmjerene temperature za jedan period relaksacije (negativne vrijednosti predstavljaju period do početka prekida)
<i>Slika 2-26</i>	Bundeva: a) Prije sušenja; b) Nakon sušenja
<i>Slika 2-27</i>	Temperatursko odstupanje za 40°C – najpovoljniji slučaj
<i>Slika 2-28</i>	Temperatursko odstupanje za 40°C – najnepovoljniji slučaj
<i>Slika 2-29</i>	Temperatursko odstupanje za 30°C – najpovoljniji slučaj
<i>Slika 2-30</i>	Temperatursko odstupanje za 30°C – najnepovoljniji slučaj
<i>Slika 2-31</i>	Nanepovoljniji slučajevi odstupanja za: a) 30°C; b) 40°C

<i>Slika 3-1</i>	Analiza sušenja u tankom sloju
<i>Slika 3-2</i>	Dimenzionisanje uzorka
<i>Slika 3-3</i>	Fotografija uzoraka u opsegu dimenzija za čiju vrijedost je uzeta osrednjena vrijednost korišćena u proračunu
<i>Slika 3-4</i>	Princip određivanja efektivne difuzivnosti materijala, na primjeru sušenja oraha pri brzini od 1 m/s i temperaturi 40°C
<i>Slika 3-5</i>	Eksperimentalni podaci i krive dobijene modelom za brzinu od 1 m/s
<i>Slika 3-6</i>	Eksperimentalni podaci i krive dobijene modelom za brzinu od 3 m/s
<i>Slika 3-7</i>	Brzine sušenja za kontinualno sušenje – pojedinačni slučajevi
<i>Slika 3-8</i>	Brzine sušenja za kontinualno sušenje – svi eksperimenti zajedno
<i>Slika 3-9</i>	Promjena temperature tokom prekidnog sušenja
<i>Slika 3-10</i>	Eksperimentalni podaci i krive dobijene modelom za prekidno sušenje u režimu: a) 60/30; b) 30/15
<i>Slika 3-11</i>	Eksperimentalni podaci i krive dobijene modelom za prekidno sušenje u varijabilnom režimu
<i>Slika 3-12</i>	Promjena brzine sušenja za sva tri režima tokom prekidnog sušenja
<i>Slika 3-13</i>	Bilansiranje jednog sloja (elementa) u višeslojnoj sredini; b) Grafički prikaz numeričke šeme
<i>Slika 3-14</i>	Algoritam računarske simulacije za debeli sloj
<i>Slika 3-15</i>	Promjena sadržaja vlage u vremenu u slojevima na različitim visinama (prekidni režim)
<i>Slika 3-16</i>	Promjena temperature vazduha u vremenu na različitim visinama (prekidni režim)
<i>Slika 3-17</i>	Promjena brzine sušenja u vremenu na različitim visinama (prekidni režim)
<i>Slika 3-18</i>	Promjena temperature vazduha u vremenu na različitim visinama u prvih 200 min (prekidni režim)
<i>Slika 3-19</i>	Promjena brzine sušenja u vremenu na različitim visinama u prvih 200 min (prekidni režim)
<i>Slika 3-20</i>	Promjena sadržaja vlage u vremenu u slojevima na različitim visinama (kontinualni režim)
<i>Slika 3-21</i>	Promjena temperature vazduha u vremenu na različitim visinama (kontinualni režim)
<i>Slika 3-22</i>	Promjena brzine sušenja u vremenu na različitim visinama (kontinualni režim)
<i>Slika 4-1</i>	Trodimenzijski grafici za: a) Kontinualno sušenje i b) Period relaksacije
<i>Slika 4-2</i>	Slika 4-2. Trodimenzijski grafici za: a) Period relaksacije sa nižom efektivnom difuzivnošću materijala i b) Period relaksacije sa višom efektivnom difuzivnošću materijala
<i>Slika 4-3</i>	Rezultati kontinualnog i prekidnog sušenja oraha

<i>Slika 4-4</i>	Princip određivanja vremenskog produžetka u grafičkoj interpretaciji
<i>Slika 4-5</i>	Rezultati kontinualnog i prekidnog sušenja bundeve
<i>Slika 4-6</i>	Rezultati kontinualnog i prekidnog sušenja krompira
<i>Slika 4-7</i>	Rezultati kontinualnog i prekidnog sušenja kestena bez ljuske
<i>Slika 4-8</i>	Rezultati kontinualnog i prekidnog sušenja kestena sa ljuskom
<i>Slika 4-9</i>	a)-e) Ušteda energije u zavisnosti od različitih odnosa konzumacije energije “ventilator:grijač” za kesten u ljusci, kesten bez ljuske, orah, krompir i bundevu, respektivno; f) Poređenje uštede energije za sve navedene efektivne difuzivnosti
<i>Slika 4-10</i>	Ušteda energije u zavisnosti od različitih odnosa konzumacije energije “ventilator:grijač” za krompir i bundevu

Lista tabela

<i>Tabela 1-1</i>	Podaci za različite tipove sušara
<i>Tabela 1-2</i>	Relacije za određivanje sadržaja vlage za orahe
<i>Tabela 1-3</i>	M_e podaci koji su eksperimentalno dobijeni za orahe na 25°C
<i>Tabela 1-4</i>	Mase i gustine nekih sorti oraha
<i>Tabela 1-5</i>	Prosječan sastav i specifična toplota oraha
<i>Tabela 1-6</i>	Efekti temperature i brzine vazduha na brzinu sušenja
<i>Tabela 1-7</i>	Efektivna difuzivnost za pojedine slučajeve
<i>Tabela 2-1</i>	Preliminarno ispitivanje početnog sadržaja vlage za sortu Šejново
<i>Tabela 2-2</i>	Rezultati ispitivanja početnog sadržaja vlage za sortu Novosadski kasni
<i>Tabela 2-3</i>	Kontrolna mjerenja početnog sadržaja vlage za orahe
<i>Tabela 2-4</i>	Mjerenje početnog sadržaja vlage za ostale materijale
<i>Tabela 2-5</i>	Obavljeni eksperimenti na glavnom eksperimentalnom postrojenju
<i>Tabela 3-1</i>	Najčešće korišćeni modeli sušenja u tankom sloju
<i>Tabela 3-2</i>	Sastav i termofizičke osobine oraha
<i>Tabela 3-3</i>	Dobijene efektivne difuzivnosti i rezultati statističke obrade
<i>Tabela 3-4</i>	Parametri prekidnog sušenja i rezultati statističke obrade
<i>Tabela 3-5</i>	Konstantne vrijednosti usvojene u proračunu za debeli sloj
<i>Tabela 4-1</i>	Karakteristike vazduha za sušenje
<i>Tabela 4-2</i>	Karakteristike materijala korišćenih za analizu mogućnosti uštede energije
<i>Tabela 4-3</i>	Efektivne difuzivnosti i energetska ušteda

Pregled korišćenih oznaka

Znakovi alfabeta:

C – srednji specifični toplotni kapacitet [J/(kgK)]

D – difuzivnost [m²/s]

d – prečnik [m]

G – maseni fluks [kg/(s·m²)]

h_{cv} – volumetrijski koeficijent prelaza toplote [W/(m³K)]

h_{fg} – latentna toplota isparavanja [J/kg]

h_m – koeficijent prelaza mase (vlage) [m/s]

k – konstanta sušenja [-]

L, L_1, L_2 – dimenzije elipsoida [m]

M – sadržaj vlage u materijalu [% , kg/kg]

m – masa [kg]

MR – bezdimenzijski sadržaj vlage [-]

r – poluprečnik sfere, koordinata u sfernom sistemu [m]

R – koeficijent korelacije [-]

rh – relativna vlažnost [%]

$RMSE$ – srednja korjena kvadratna greška [-]

T – temperatura [°C]

t – vrijeme [min]

V – zapremina [m³]

v – brzina [m/s]

W – širina [m]

X – saržaj vlage u agensu (apsolutna vlažnost) [kg/kg]

x, y, z – prostorne koordinate [m]

z – prostorni korak

Znakovi grčkog alfabeta:

α – koeficijent prelaza toplote [W/(m²K)]

β – koeficijent prelaza mase [m/s]

ε – poroznost [-]

Φ – koeficijent sferičnosti [-]

φ – zapremiski udio [-]

λ – toplotna provodljivost [W/(mK)]

ρ – gustina [kg/m³]

θ – bezdimenzijska temperatura [-]

χ – “ki” kriterijum [-]

ω – maseni udio [-]

Indeksi:

a – vazduh

ash – mineralni ostatak

CH – ugljeni hidrati

$d.b.$ – suva osnova (“dry basis”)

e – ravnotežni (“equilibrium”)

eff – efektivno/a

exp – eksperimentalno

fat – masti

$fiber$ – vlakna

g – materijal

i – prostorni indeks

j – vremenski indeks

lj – ljuska

p – proizvod, materijal

pre – predviđeno (modelom)

$protein$ – proteini

v – vodena para

w – vlaga

$w.b.$ – vlažna osnova (“wet basis”)

0 – početni, inicijalni

∞ - okolina

Kriterijumi:

Bi - Biot broj ($=ar/\lambda$) [-]

Re - Reynolds broj ($=vdp/\mu$) [-]

Nu - Nusselt broj [-]

Fo - Fourier broj ($=\lambda t/(\rho C_p r^2)$) [-]

Pr - Prandtl broj [-]

Poglavlje 1.

Predmet i cilj istraživanja. Preliminarna analiza i hipoteze

1.1 Uvod

Sušenje je, prema nekim izvorima, najstarija i najzastupljenija operacija u procesnom inženjerstvu. Podrazumijeva procesnu operaciju u kojoj se obavlja izdvajanje vlage iz materijala, sa ciljem poboljšanja kvaliteta i širih mogućnosti konzervacije i transporta. Preko 400 vrsta sušara predstavljeno je u literaturi pri čemu ih je oko 100 široko dostupno za izbor i upotrebu [1]. Pored destilacije, sušenje predstavlja jedan od energetske najintenzivnijih procesa, kako zbog relativno visoke vrijednosti latentne toplote isparavanja tako i zbog relativno niske efikasnosti procesa koji koriste vazduh kao agens sušenja. Različite studije izvještavaju o visokoj potrošnji energije za procese sušenja: od 10-15 % ukupne industrijske potrošnje energije u SAD, Kanadi, Francuskoj i UK, pa do 20-25 % u Njemačkoj i Danskoj [1,2]. Zbog svih ovih razloga od izuzetnog je značaja poznavanje matematičkog modela ovakvih procesa radi mogućnosti projektovanja, optimizacije i vođenja što energetske efikasnijih procesa.

Analiza procesa sušenja najčešće se izvodi iz nekoliko razloga: intenzifikacija procesa, povećanje energetske efikasnosti, optimalno projektovanje postrojenja, optimizacija troškova investicije i rada, kao i poboljšanje kvaliteta proizvoda (materijala koji se suši). Svi navedeni razlozi, direktno ili indirektno su oblast izučavanja termodinamike i prenosa toplote i mase, kao fundamentalnih naučnih disciplina, odnosno inženjerske termodinamike, procesne tehnike i tehnike sušenja kao primjenjenih naučnih disciplina. Specijalno, kvalitet proizvoda izučava se pod okriljem biotehnoških nauka, stoga neće biti predmet naročite analize u ovom radu i pominjaće se u onoj mjeri ukoliko postoji potreba se opravda postupak i obrazloži svrha sušenja kao termodifuzione operacije.

Način sušenja koji će biti analiziran jeste konvektivno sušenje vazduhom. Cilj rada je da se istraži mogućnost energetske uštede u ovakvim procesima korišćenjem prekidnih režima sušenja, kao i da se napravi shodan matematički model koji će ovakvu analizu omogućiti.

1.2 Materijali

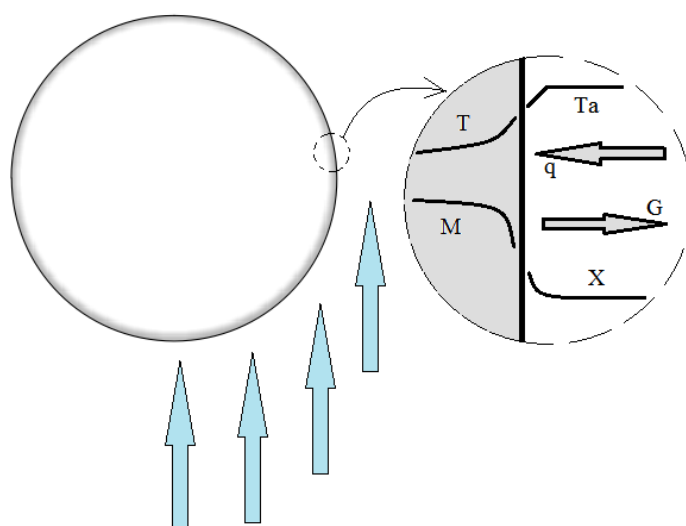
U ovom radu, orah je odabran kao osnovni materijal, na osnovu koga će biti izvedeni zaključci o procesu sušenja materijala sfernog oblika, sa posebnim osvrtom na tzv. prekidne režime i njihovo poređenje sa uobičajenim, kontinualnim režimima.

Pored oraha, obavljeno je istraživanje i analiza dobijenih rezultata i za oguljen i neoguljen kesten, sitniji krompir (cijeli) i bundevu (u djelićima). Ovakav izbor materijala za sušenje biće objašnjen prilikom konstituisanja hipoteza u nekom od narednih poglavlja. Obavljeni su brojni eksperimenti i sa drugim materijalima, ali za krajnju formu koju je ovo istraživanje dobilo, ovi rezultati nisu od

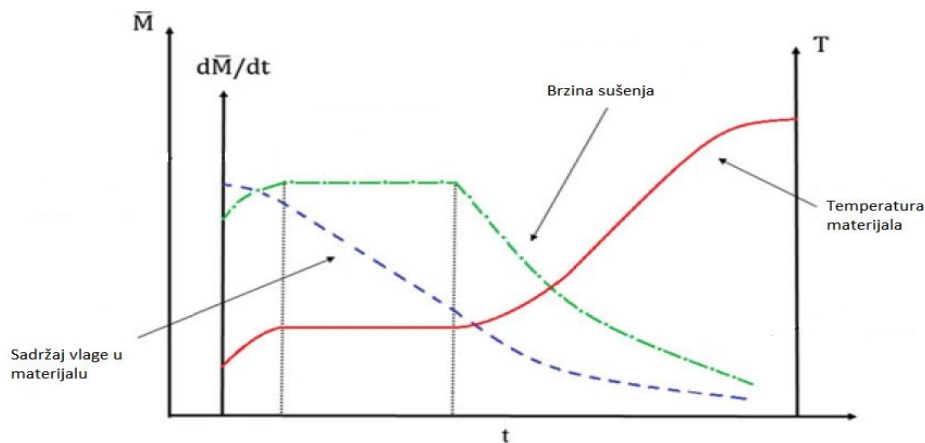
posebnog značaja, pa će u narednom poglavlju biti spomenuti samo u svrhu opisa eksperimentalnog postupka.

1.3 Mehanizam konvektivnog sušenja

Sušenje poljoprivrednih proizvoda predstavlja zapravo prenošenje vlage u koloidno-kapilarno-poroznim materijalima [3]. Prema pomenutom izvoru, oblici kretanja vlage koji se javljaju u ovakvim tijelima, uslovljeni su difuziono-osmotskim, kao i kapilarnim silama, tj. javlja se difuzija tečnosti i pare, kao i kapilarno kretanje tečnosti. Kretanje vlage je načelno uzrokovano postojanjem gradijenta koncentracije vlage, a temperaturski gradijent unutar materijala izaziva dopunsko kretanje vlage (termodifuzija). Ipak, efekte termodifuzije je najčešće moguće zanemariti, naročito kod materijala manjih dimenzija (više o ovome u Poglavlju 3 koje se bavi modelovanjem procesa). Prilikom zagrijavanja materijala, u početnoj fazi sušenja, najviša temperatura biće na površini. U toku procesa, ove temperature će se ujednačiti, ali načelno smjer toplotnog fluksa ostaje isti, tj. suprotan od smjera masenog fluksa vlage (ova okolnost se u smislu doprinosa termodifuzije može posmatrati kao negativna, što ide u prilog argumentaciji za upotrebu prekidnih režima, kod kojih se u periodima relaksacije smjer toplotnog fluksa promjeni). Nakon difuzije vlage kroz materijal, ona se u vidu isparene vlage sa površine odnosi konvektivno sa strujom toplog vazduha, pa je ovaj faktor često ograničavajući u smislu efikasnosti procesa. Kao pokretačka sila konvektivnog sušenja može da se uzme razlika apsolutnih vlažnosti vazduha iz graničnog sloja uz material i na nekoj određenoj udaljenosti od materijala. U ovoj situaciji, apsolutna vlažnost u graničnom sloju se poistovjećuje sa sadržajem vlage na površini materijala, a apsolutna vlažnost na nekoj većoj udaljenosti se može izjednačiti sa ravnotežnim sadržajem vlage za materijal pri datim uslovima. Ovi uslovi, ilustrovani su na slici 1-1, za neko sferno tijelo. Na slici 1-2 prikazana je kriva sušenja, tj. promjena sadržaja vlage u vremenu, kao i brzina sušenja i promjena temperature materijala u vremenu.



Slika 1-1. Mehanizam procesa konvektivnog odvođenja vlage sa površine



Slika 1-2. Krive relevantnih parametara u procesu kontinualnog konvektivnog sušenja [2]

Opštija analiza konvektivnog sušenja vazduhom zahtjeva veoma opširan pristup (vidjeti npr. [4]) i u ovom radu joj se neće posvetiti posebna pažnja, prvenstveno zbog toga što je fokus rada na modelovanju kinetike prekidnog sušenja i energetskim karakteristikama procesa prekidnog sušenja. Za nastavak, važno je istaći da je kod modelovanja akcenat na temperaturi vazduha kao uticajnom parametru, ali ne i na relativnoj vlažnosti. Ovakva okolnost prvenstveno je stvar izbora pristupa problemu, a relativna vlažnost zavisice svakako od temperature vazduha, jer su svi eksperimenti izvedeni u sličnim laboratorijskim uslovima. Ipak, da bi rezultati bili korisni za dalju upotrebu, za svaki eksperiment je izmjerena i relativna vlažnost vazduha, u svim relevantnim tačkama procesa.

1.4 O sušenju oraha

Uzgoj oraha (*Juglans regia L.*), kao veoma važne i u ishrani zastupljene namirnice, predstavlja veliki proizvodni i izvozni potencijal u mnogim zemljama, a naročito u Kini, SAD, Turskoj i Iranu [5]. Iako slabo iskorišćen, ovaj potencijal nije zanemarljiv ni u Srbiji (21547 t godišnje ili 2 kg po stanovniku za bivšu državnu zajednicu Srbije i Crne Gore, podaci preuzeti iz [6]). Zasadi su kod nas rijetko podizani na većim površinama, a uglavnom se podižu u kombinaciji sa kajsijom, breskvom i lijeskom. Kod nas se uzgaja desetak sorti oraha, a one su uglavnom svrstane u dvije grupe: za vinogradarsku i za nevinogradarsku kontinentalnu zonu. Sorte za vinogradarsku zonu su: *Šejnovo* (bugarska sorta), *Šampion* (sorta selekcionisana na Poljoprivrednom fakultetu u Novom Sadu), *Ibar* (selekcionisana na Institutu za voćarstvo u Čačku), *Srem* (Poljoprivredni fakultet Novi Sad), *Tisa* (Poljoprivredni fakultet Novi Sad). Sorte za nevinogradarsku zonu: *Novosadski kasni* (Poljoprivredni fakultet Novi Sad), *Elit sorta* (stvorena u Mariboru) i *Sibišel 44* (rumunska sorta). Sorte Poljoprivrednog fakulteta u Novom Sadu, *Novosadski kasni* i *Srem* klasifikovane su kao sorte dobrog kvaliteta (prva klasa), a sorta *Tisa* kao sorta odličnog kvaliteta [6]. Više o domaćim sortama oraha može da se vidi kod [7].

Berba, skladištenje i transport, moraju biti izvedeni prema unaprijed utvrđenoj strategiji, u cilju očuvanja kvaliteta. Ovaj postupak uključuje i sušenje kao neizostavan korak. Tradicionalan način sušenja podrazumjeva izlaganje suncu na velikim površinama. Iako orasi sušeni na ovaj način imaju odličan kvalitet, dinamika proizvodnje većeg obima zahtjeva učešće procesnih postrojenja za sušenje, tj. sušara.

U ovom radu, govori se o orahu u ljusci, sa prethodno odstranjenom spoljašnjom opnom (kominom). Na slici 1-3a) prikazan je orah u spoljašnjoj ljusci, a na slici 1-3b) orah kome je spoljašnja ljuska odstranjena.



a)



b)

Slika 1-3. Orah u komini i bez komine [8]

Sorta koja korišćena kao osnovni material je Novosadski kasni, a uzorci su prikupljeni u okolini Novog Sada krajem septembra.

Potreba za sušenjem oraha, dakle, proizilazi iz potrebe da se postigne predviđeni kvalitet (prvenstveno nutricionistički, ali i fizički, pri čemu se misli na boju ljuske, čvrstoću ljuske, kompaktnost i određenu vlažnost jestivog jezgra). Preporučeni kvalitet oraha je propisan standardom koji je formiran od strane organa Ujedinjenih Nacija [9] („UNECE STANDARD DDP-01, INSHELL WALNUTS“), a kojim se predviđaju sve relevantne karakteristike proizvoda, način pakovanja, plasmana na tržište i kontrole kvaliteta proizvoda, kao i pripadnost nekoj od tri kategorije kvaliteta.

Bez obzira u kojoj su klasi kvaliteta, orasi u ljusci treba da su neotvoreni, neoštećeni insektima i pesticidima, očišćeni od prisustva stranih materija, očišćeni od spoljašnje ljuske, suvi. Manja spoljašnja mehanička oštećenja ne smatraju se defektom. Unutrašnje jezgro treba takođe da bude čisto i bez prisustva insekata ili parazita, ne smije biti užeglo, ne smije biti prisustva truleži, bez prisustva stranih mirisa i ukusa, kao i normalno razvijena jer skupljena jezgra se odbacuju. Zahtjevi takođe propisuju da se berba oraha vrši kada oni dostignu propisanu zrelost.

Ono što je od posebne važnosti za temu jeste propisani krajnji sadržaj vlage: osušeni orasi, ne smiju da imaju sadržaj vlage veći od 12% (po suvoj osnovi) dok samo jezgro ne smije imati više od 8% (po suvoj osnovi) vlage. Modelovanje procesa u ovom radu vršiće se prema propisanom maksimalnom sadržaju vlage od 8% (po suvoj osnovi). Poznavanje polja rasporeda vlage u orahu ključno je za modeliranje efikasnih sistema za dobijanje proizvoda visokog kvaliteta. Početni sadržaj vlage može da varira u relativno širokom dijapazonu, što prvenstveno zavisi od datuma kada je sprovedena berba. Bitno je naglasiti i to da orasi koji su sami otpali prije berbe imaju znatno manju vlažnost od ostalih [10]. Zbog ove pojave postoji opasnost da neki orasi mogu da se presuše koristeći iste one parametre procesa koji su potrebni da bi se drugi orasi osušili na 8% sadržaja vlage. Naročit oprez je potreban u slučaju mogućnosti pojave presušivanja jer pored toga što dolazi do smanjenja kvaliteta proizvoda proces sušenja u ovakvim okolnostima nepotrebno konzumira relativno veliku količinu energije. Na slici 1-4a) prikazan je svjež, standardan uzorak koji je korišćen u sušenju, dok su na slici 1-4b) prikazani uzorci nakon sušenja.



a)



b)

Slika 1-4. Fotografija korišćenih uzoraka oraha: a) Prije sušenja; b) Nakon sušenja

Na slici 1-5 prikazane su unutrašnjost, odnosno spoljašnjost oraha koji nakon berbe nisu propisno osušeni. Treba naglasiti da se ovo ne dešava uvijek, jer će orasi bliži površini ipak da se osuše prirodnim putem (izloženi suncu ili promaji). Ipak, velika količina je ugrožena pa je propisno sušenje korak koji ne treba zaobilaziti.



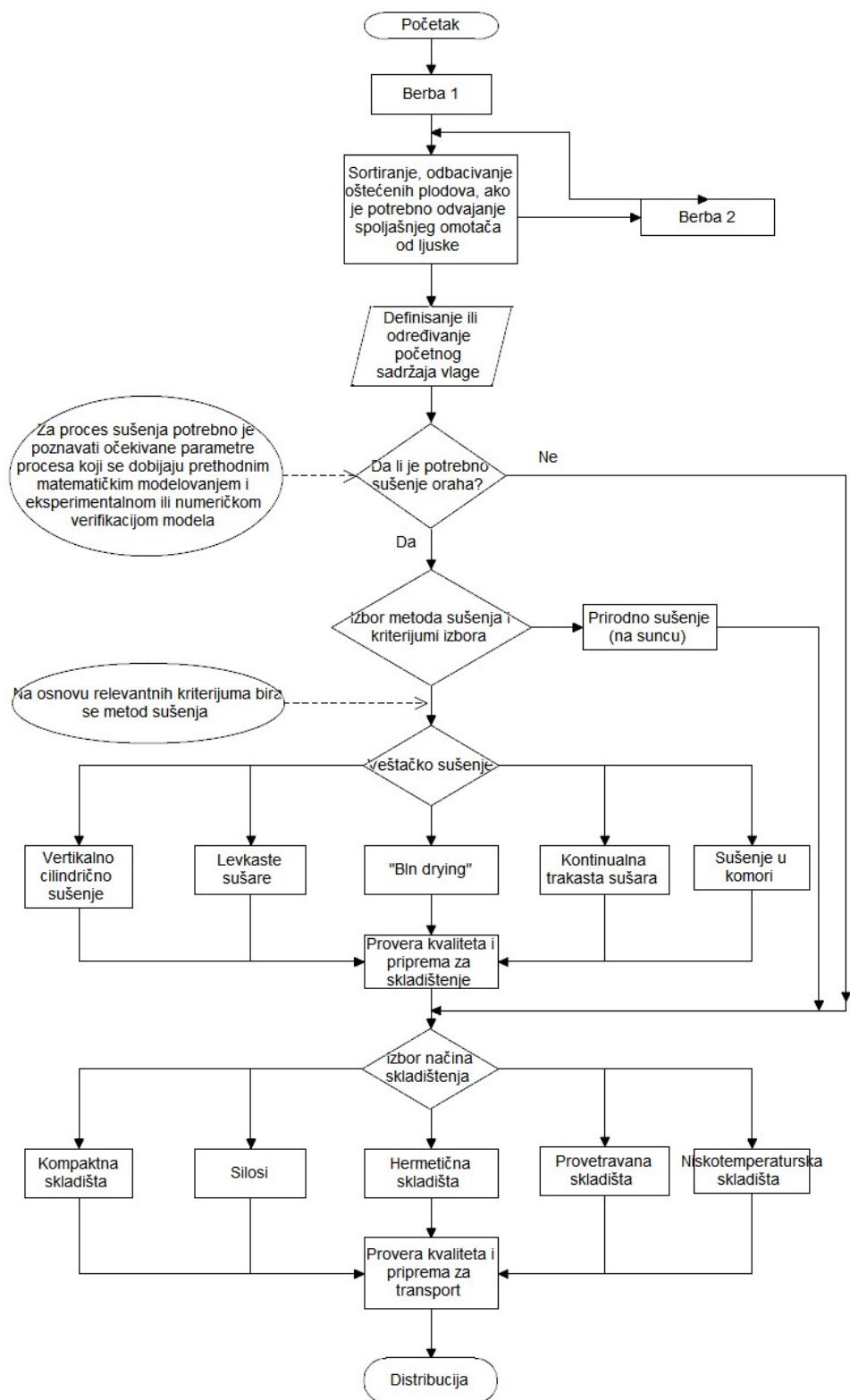
a)



b)

Slika 1-5. Primjerci koji nisu sušeni i koje je zahvatila buđ: a) Unutrašnji izgled; b) Spoljašnji izgled

Kompletan proces od berbe do distribucije, kao i poziciju sušenja u takovom procesu, najbolje je prikazati grafički, kroz dijagram toka. Dijagram toka tretmana oraha je prikazan slici 1-6.



Slika 1-6. Dijagram toka tretmana oraha [11]

Očigledno je da postoji čitav niz mogućih rješenja u pogledu tehničke izvedbe postrojenja za sušenje. U ovom radu analizira se sušenje u tankom sloju, kao podloga za dalju analizu sušenja u debelom sloju, pa je “bin drying”, tj. sušenje u nepokretnom sloju (eng. bin - korpa) predmet analize u ovom radu. Rezultati sušenja u tankom sluju mogu svakako da se koriste i kod analize drugih principa sušenja, ali ovakva analiza bi bila preobimna i činila bi posebnu tematsku cjelinu.

Postojeća tehnika sušenja

Tehnika sušenja jezgrastih plodova je relativno stara (datira još iz 19. vijeka). Autori [12] su napravili komparativnu analizu poznatih tehnika sušenja plodova pistača, pa se ovakvo saznanje može primjeniti i na ostale jezgraste plodove. Slična zapažanja navode i autori [13].

Pomenute tehnike su sledeće:

- sušenje na suncu
- solarno sušenje (indirektno korišćenje sunčeve energije)
- sušenje u silosima („bin drying“)
- vertikalno kontinualno sušenje
- vertikalno cilindrično sušenje
- sušenje u cilindričnom uređaju sa lijevcima
- sušenje u kontinualnoj mobilnoj sušari
- šaržno sušenje
- sušenje u kontinulanoj trakastoj sušari

Razmatrajući prednosti i mane različitih metoda sušenja došlo se do zaključka da se sušenje direktnim sunčevim zračenjem može koristiti u kombinaciji sa drugim metodama kao što su sušenje u sloju i solarno sušenje. Koristiti solarno sušenje kao jedinu metodu nije preporučljivo zbog nepredvidivosti performansi sušare koje veoma zavise od vremenskih uslova. Iako sušenje na suncu rezultuje najboljim kvalitetom proizvoda ovaj metod iziskuje puno vremena i povoljne klimatske uslove. Sušare koje troše samo fosilna goriva ili električnu struju neodgovarajuće su sa stanovišta investicionih i energetskih troškova a zahtjevaju i stručno osoblje za rukovanje i održavanje. U grupi ovih sušara „bin“ sušare su se pokazale najboljim rješenjem. Stoga su pomenuti autori u opštem slučaju kao najbolje rješenje predložili kombinaciju „bin“ sušara sa sušenjem na suncu ili sa solarnim sušenjem.

Takođe, autor [14] eksplicitno preporučuje da se koriste „bin“ sušare zbog „ekonomičnosti i jednostavnosti konstrukcije, rada i održavanja“. Na slici 1-7 prikazan je „bin-drying“ sistem sušenja.



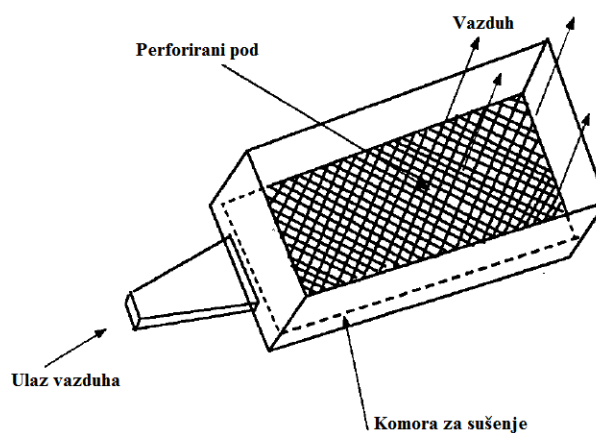
Slika 1-7. Postrojenje za sušenje sa nizom pregrada („bin“ sušare) napunjenih orasima [15]

Rezultati otpora strujanju vazduha kroz sloj oraha dati su u [16]. Ovakvi podaci su takođe od velike važnosti, prvenstveno zbog dimenzionisanja komora za sušenje i pravilnog izbora ventilatora koji se koristi za potiskivanje vazduha za sušenje. Tabela 1-1 prikazuje najvažnije parametre nabrojanih sistema za sušenje [13]:

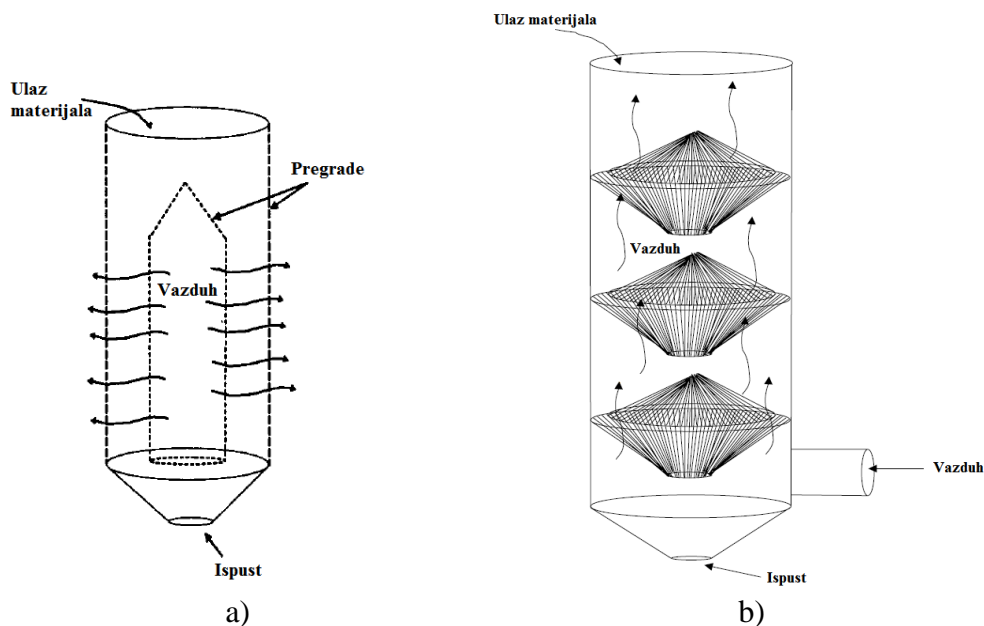
Tabela 1-1: Podaci za različite tipove sušara za sušenje jezgrastog voća [13]:

Metode sušenja	Početni sadržaj vlage [w.b. %]	Krajnji sadržaj vlage [w.b. %]	Srednja temperatura vazduha [°C]	Srednja relativna vlažnost vazduha [%]	Vrijeme sušenja [h]
Sušenje na suncu	36,9	3,807	26,5	18	48
“Bin” sušenje	37	3,727	65	4,5	8
Vertikalno kontinualno sušenje	36,9	2,293	45-40	8-10	10
Vertikalno cilindrično sušenje	36,9	2,427	55	6	8
Sušenje u sušari sa cilindričnim lijevkom	37,1	3,780	80	3	5,5

Na slikama 1-8 i 1-9 prikazane su skice komora za sušenje kod nekih od nabrojanih sistema, a koje se najčešće koriste.



Slika 1-8. Šema komore za sušenje kod „bin“ sušara. Na dnu se nalazi perforirani pod kroz koji se ubacuje vazduh, koji zatim struji kroz sloj materijala [12]



Slika 1-9. Šema komore za sušenje kod a) Vertikalne cilindrične sušare i b) Sušare sa lijevcima [12,13]

Osobine oraha prema postojećoj literaturi

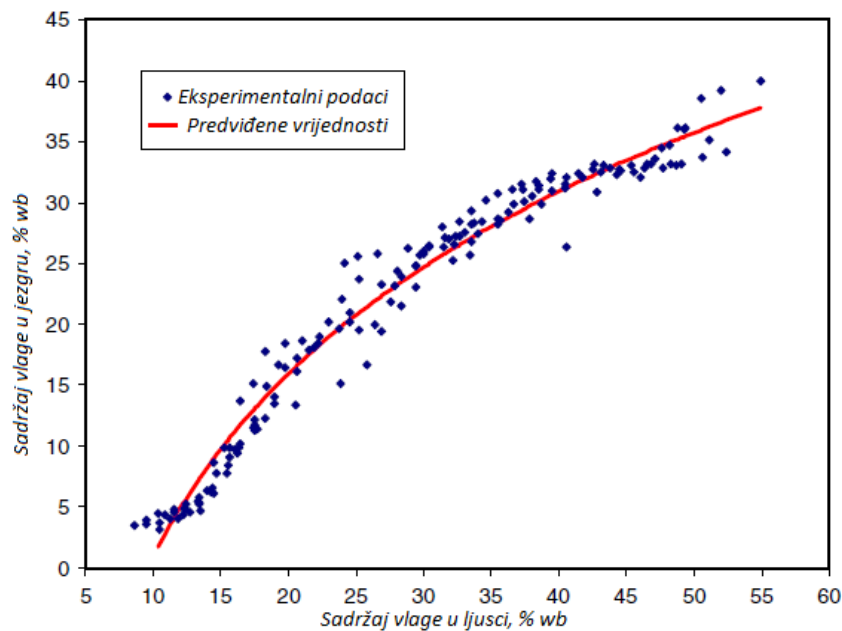
Postoji značajna varijacija u sadržaju vlage između jezgra i ljuske. Autori [17] predložili su korelacije koje za različite slučajeve dovode u vezu sadržaj vlage, jezgra i ljuske. U tabeli 1-2 se prikazuju dobijene relacije za odnos sadržaja vlage u jezgru i ljusci različitih sorti oraha. Neke sorte su tretirane hemikalijom etefon $C_2H_6ClO_3P$, koja se koristi za ubrzavanje rasta biljke. Pokazalo se da tretman etefonom utiče i na karakteristike sušenja, pa su autori [18, 19] ukazali i na različita svojstva ploda u zavisnosti od toga da li je i tretman uključen.

Tabela 1-2: Relacije za određivanje sadržaja vlage za orahe [17]:

Vrsta	Odnos	R ²
Tulare-h1	$M_j = 3,994 + (0,674 \cdot M_{lj})$	0,92
Tulare-h2	$M_j = -4,051 + (0,914 \cdot M_{lj})$	0,95
Howard-h1-tretirano	$M_j = -4,408 + (0,770 \cdot M_{lj})$	0,90
Howard-h1-netretirano	$M_j = -4,401 + (0,859 \cdot M_{lj})$	0,96
Howard-h2-tretirano	$M_j = -0,0204 + (0,653 \cdot M_{lj})$	0,90
Howard-h2-netretirano	$M_j = 1,422 + (0,578 \cdot M_{lj})$	0,92
Chandler-tretirano	$M_j = -1,825 + (0,796 \cdot M_{lj})$	0,92
Chandler-netretirano	$M_j = -9,972 + (1,214 \cdot M_{lj})$	0,94

Na osnovu prikazanog, može da se izvuče opšta korelacija, na osnovu koje je prikazana tendencija krive na slici 1-9, uz eksperimentalne rezultate:

$$M_j = 21,564 \ln(M_{lj}) - 48,646 \quad ; \quad R^2 = 0,97 \quad (1-1)$$



Slika 1-10. Predviđeni i eksperimentalno dobijeni rezultati odnosa sadržaja vlage jezgra i ljuske [17]

Ovo zapažanje potvrđeno je i ovom istraživanju, prilikom određivanja početnog sadržaja vlage. Detaljnije o ovome biće izloženo u narednom poglavlju, ali važno je naglasiti da je prilikom proračuna korišćen srednji sadržaj vlage u materijalu, jer je model za analizu kinetički i ne „poznaje“ razlike u trenutnom rasporedu koncentracije vlage u materijalu.

Veoma važan podatak za sušenje oraha jeste poznavanje ravnotežnog sadržaja vlage M_e . Relacije između M_e i relativne vlažnosti vazduha poznate su kao sorpcione izoterme [4]. Važnost ovih podataka ogleda se prvenstveno u određivanju sadržaja vlage koji je bezbjedan sa stanovišta skladištenja bez mogućnosti razvoja mikroba. Eksperimentalno su utvrđeni M_e za različite sorte oraha od strane autora [20], što je prikazano u tabeli 1-3. Podaci sa zvjezdicom su proglašeni kao nepouzdan, a oznaka m govori da se pojavila buđ (eng. “mold”).

Tabela 1-3: Eksperimentalni podaci o ravnotežnom sadržaju vlage M_e za orahe na 25°C [20]

Sorta	Relativna vlažnost [%]								
	11	22	33	43	53	64	75	84	97
Chandler	2,7		5,2	6,4	7,7		8,8		
Hartley	2,7	4,0	5,4	6,7	7,4	8,1	9,4	11,1	m
Franquette	2,8	4,2	5,6	6,9	7,4	8,5	9,7	10,8	m
Eureka	3,4	4,2	5,2	6,0	6,9	8,1	9,5	11,6	m
Vina	3,6	4,5	5,3	6,5	7,0	8,4	10,0	11,8	m
Vina A	2,9	3,7	4,3	5,4	6,6	7,7	9,1	10,8	
Ashley	m		m		m	m	m	m	
Ashley A	2,5		4,3		5,9	6,4*	9,0	10,5	
Chandler #2	2,4		5,0	6,2	7,4	7,8*	9,4		

Na osnovu iznesenih podataka, dobijena je relacija za računanje tzv. dinamičkog M_e u funkciji rh , koja je korišćena za proračune i u ovom radu:

$$\log \left[\log \left(\frac{1}{1-rh} \right) \right] = 1,77 \log(M_e) - 2,05 \quad (1-2)$$

Prema [21], temperature koje su više od 43°C mogu da izazovu pojavu užeglosti biljnih ulja u orahu ako su oni dugoročno izloženi takvim temperaturama, pa je ovo najvažniji razlog koji je uticao na to da se temperatura vazduha za sušenje ograniči na predviđenih 40°C. Međutim, kratkotrajno izlaganje znatno višim temperaturama neće uticati na ovakvu pojavu a teoretski bi moglo značajno da skрати vrijeme sušenja („Flash“ sušenje visokim temperaturama, vršeni su ekperimenti čak i sa temperaturama od 1000°C). Pokazalo se ipak da ovakav pristup nije dao željene rezultate, da su se pojavila oštećenja ljuske zbog visokih temperatura, a da vlažnost nije značajnije smanjena pa se taj metod nije pokazao kao svrsishodan.

Od suštinskog značaja za proračun ovakvih sušara jeste poznavanje i termofizičkih osobina vlažnog vazduha, jer sušenje zagrijanim vazduhom implicira njegovo vlaženje i hlađenje, tj. razmjenu energije i vlage sa vlažnim materijalom.

U tabeli 1-4 prikazane su mase i gustine nekih sorti oraha, prema [22], a u tabeli 1-5 su dati nutritivni podaci i specifična toplota oraha prema [23].

Tabela 1-4: Mase i gustine nekih sorti oraha [22]:

	Vrsta	Masa 1000 uzoraka [kg]	ρ [kg/m ³]
Orah cijeli	Z67	14795,6	643,830
	Z60	12313,4	593,757
	Chandler	10675,6	603,495
	Isfahan genotype	11135	656,890
Jezgra	Z67	7351	1280,498
	Z60	5905,6	1350,744
	Chandler	4949,8	1363,017
	Isfahan genotype	5758,2	1179,854

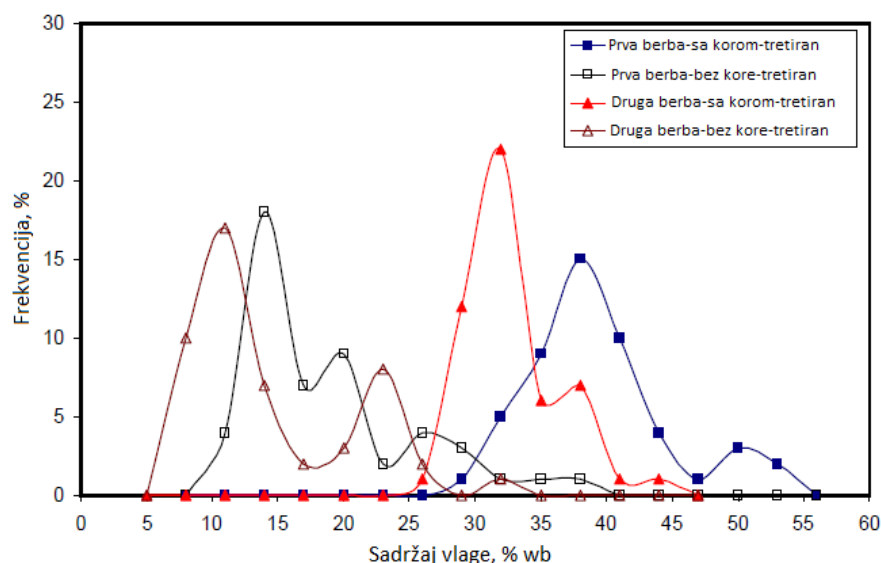
Tabela 1-5: Prosječan sastav i specifična toplota oraha [23]:

Proteini	14,29 %
Masti	61,87 %
Ugljeni hidrati	18,34 %
Vlakna	4,80 %
Minerali	1,86 %
Srednja specifična toplota	2,09 kJ/(kg*K)

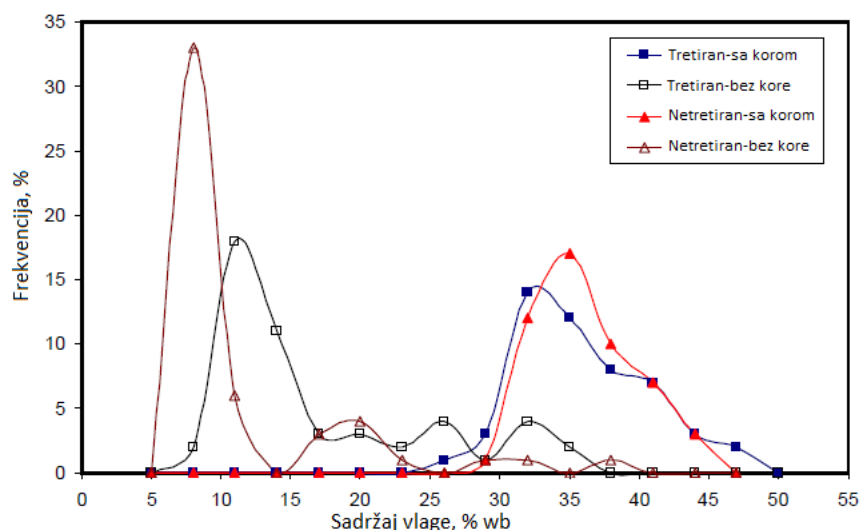
Povećanje energetske efikasnosti postrojenja za sušenje oraha može da se ostvari i prethodnim sortiranjem u cilju razdvajanja oraha sa različitim početnim sadržajem vlage. S tim u vezi važno je pomenuti načine određivanja sadržaja vlage. Sadržaj vlage može da se odredi mjerenjem mase uzorka, što je najjednostavniji metod. Takođe je primjenljiv metod određivanja boje pri čemu se na osnovu boje uzorka određuje i sadržaj vlage. Nešto naprednija metoda jeste detektovanje vlage

koristeći x-zrake, pri čemu se vrši digitalno mapiranje računarskom opremom [24]. Očigledno, dva poslednja metoda zahtjevaju sofisticiranu opremu, prema tome skupu. Takođe, pokazalo se da detektovanje vlage koristeći x-zrake kod oraha nije dalo očekivane rezultate. Standardna greška je prevelika i ne daje realnu sliku rasporeda vlage. Kako bilo, pokazalo se da postoji velika varijacija u sadržaju vlage individualnih uzoraka. Takođe, sadržaj vlage oraha u ljusci (spoljašnjoj) mnogo je veći nego kod onih bez ljuske. Pomenuta zapažanja prikazana su kroz grafike na narednim dijagramima [24].

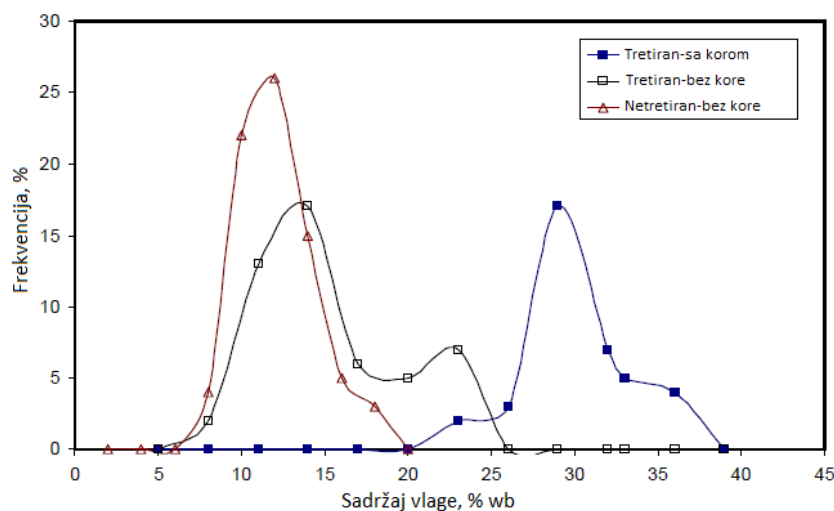
Na slikama 1-11 – 1-13, prikazana je učestalost pojave određenog sadržaja vlage za različite sorte oraha, i u zavisnosti od toga da li su tretirane ili nisu tretirane etefonom.



Slika 1-11. Sadržaj vlage u Tulare orahu sa i bez spoljašnje ljuske [17]



Slika 1-12. Sadržaj vlage u Howard orahu sa i bez spoljašnje ljuske [17]



Slika 1-13. Sadržaj vlage u Chandler orahu sa i bez spoljašnje ljuske [17]

Postojeći rezultati kinetike sušenja oraha

Nakon svega iznesenog, a prije nastavka u kome će se definisati neophodni parametri daljeg proračuna, potrebno je osvrnuti se i na konkretne rezultate istraživanja iz oblasti na koju se tematika ovog rada primarno odnosi. Model sušenja oraha u tankom sloju u kontinualnom režimu, zajedno sa eksperimentalnim rezultatima, predstavljen je u radu [25]. U tabeli 1-6 mogu da se vide najvažniji rezultati pomenutog rada, koji se tiču kinetike sušenja nekih sorti oraha.

Tabela 1-6: Efekti temperature i brzine vazduha na brzinu sušenja [25]:

Vrijednost	Temperatura [°C]	Brzina [m/s]	Vrijeme sušenja [h]
Pedro	43	1	31,66
	43	3	24,33
	32	1	34,33
	32	3	32,33
Serr	43	1	22,66
	43	3	22,00
	32	1	30,66
	32	3	28,66
Z67	43	1	22,66
	43	3	18,66
	32	1	27,00
	32	3	25,66
K82	43	1	16,00
	43	3	15,00
	32	1	22,00
	32	3	19,00

Koristeći prethodne rezultate, izračunate su vrijednosti efektivne difuzivnosti D_{eff} za sve eksperimentalne podatke dobijene u radu i prikazane su u narednoj tabeli. Za određivanje D_{eff} korišćen je empirijski Pejdžov model.

Tabela 1-7: Efektivna difuzivnost za pojedine slučajeve [25]:

Temperatura [°C]	Brzina [m/s]	Pedro		Serr		Z67		K82	
		$D_{eff} \cdot 10^7$ [m ² /s]	R ²	$D_{eff} \cdot 10^7$ [m ² /s]	R ²	$D_{eff} \cdot 10^7$ [m ² /s]	R ²	$D_{eff} \cdot 10^7$ [m ² /s]	R ²
43	1	4,96	0,9690	6,06	0,9897	5,90	0,9878	9,30	0,9972
43	3	6,54	0,9886	6,91	0,9959	6,93	0,9927	9,92	0,9967
32	1	3,54	0,9879	4,53	0,9849	4,85	0,9847	6,84	0,9941
32	3	4,87	0,9855	4,56	0,9672	4,88	0,9797	8,04	0,9955

Koristeći regresionu analizu izvedena je sledeća jednačina za efektivnu difuzivnost prilikom sušenja oraha vazduhom u funkciji temperature vazduha, brzine vazduha i početnog sadržaja vlage [25]:

$$D_{eff} = 1,0810^{-4} v^{0,1275} \exp\left(-\frac{2633,6}{T+273,15}\right) \quad ; R=0,9193 \quad (1-3)$$

Takođe, bitno je pomenuti i dobijenu relaciju za određivanje kinetičkog koeficijenta k prilikom sušenja u tankom sloju, koja je predstavljena u radu [10]:

$$k = \exp(-0,681 + 0,11M_o, 0,952 \ln M_o + 0,000152(1,8T + 32,2)^2) \quad (1-4)$$

1.5 O sušenju ostalih materijala

Pod "ostalim materijalima" misli se na kesten (oguljen i neoguljen), krompir (oguljen) i bundevu. Drugi materijali sa kojima su eksperimenti izvođeni ne učestvuju u modelima koji su predstavljeni u ovom radu, pa su njihove osobine irelevantne za ovakav kontekst. Pošto su rezultati sušenja ovih materijala predstavljeni sa ciljem međusobnog poređenja, zbog analize mogućnosti energetske uštede kod materijala različitih osobina, pregled postojeće literature biće znatno skromnije obrađen nego za orahe. Naime, kod njihovog sušenja nije se išlo u pravcu dobijanja širokog opsega rezultata koji mogu da budu predmet nelinearne regresione metode, koja je kod oraha upotrebljena za određivanje neke vrste univerzalne relacije za opseg temperatura i brzina vazduha u kojima su mjerenja obavljena. Dimenzije, najvažnije osobine i dobijene vrijednosti efektivnih difuzivnosti date su u poglavlju 4, gdje se upotreba ovih materijala i analizira. Od velike važnosti je bilo prikupiti podatke o njihovim vrijednostima ravnotežnog sadržaja vlage Me . Podaci za kestenje preuzeti su iz [26], za krompir iz [27], a za bundevu iz [28]. Uopšteno govoreći, rezultati konvektivnog sušenja kestenja su u literaturi veoma rijetki. Prilikom izrade ovog rada nije pronađena nijedna druga referenca koja se bavi sušenjem pomenutog materijala. Prilikom

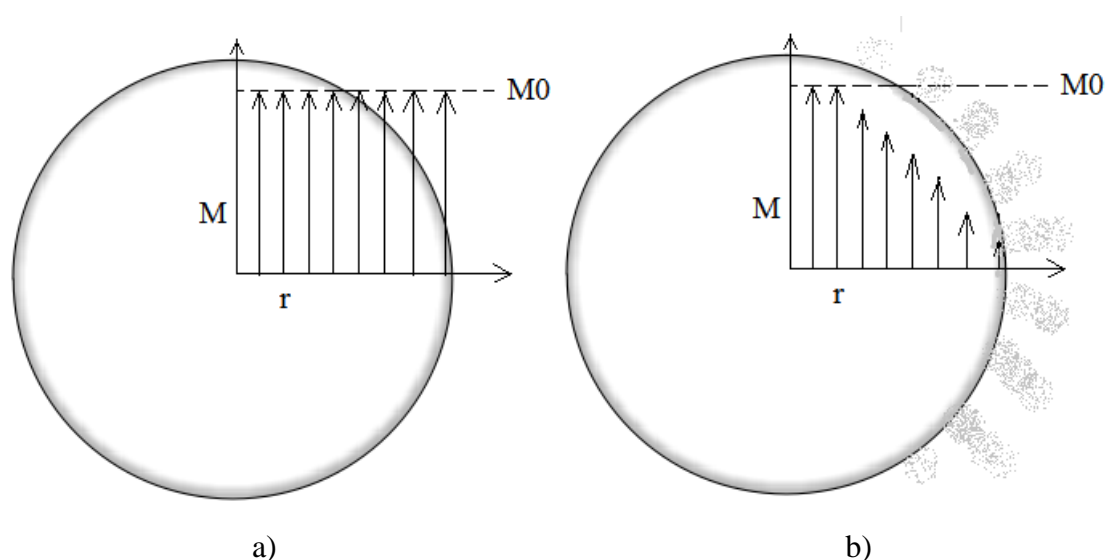
određivanja početnog sadržaja vlage, uočen je takođe visok sadržaj vlage u kori kestjenja (slično kao kod oraha), ali kora kestjenja je znatno manje ukupne zapremine pa je i ovaj uticaj zanemarljiv. Razlog iz koga se kesten upotrijebio kao i oguljen i kao neoguljen jeste da bi se dodatno naglasio uticaj kore (ljuske) na proces sušenja.

Za razliku od kestjenja, sušenje krompira i bundeve je u postojećoj literaturi opisano veoma opširno. Za ove materijale mogu da se nađu različiti modeli, kako empirijski tako i difuzioni, a neke od najvažnijih referenci upotrebljenih za razrađivanje modela u Poglavlju 3 tiču se upravo sušenja krompira. Ovi materijali se u pomenutim radova uglavnom suše u tankim kriškama.

Izbor režima u kojima su pomenuti materijali suše zasnovan je na režimima za sušenje oraha, a na isti način je odabran i referentni prekidni režim u odnosu na koji je pravljeno poređenje energetske uštede (više o tome u narednom poglavlju).

1.6 Prekidno sušenje

Režim prekidnog konvektivnog sušenja predstavlja koncept u kome se materijal koji se suši izlaže konvektivnom uticaju agensa u više navrata, sa povremenim prekidima. Osnovna ideja proističe iz zapažanja da u toku procesa kontinualnog sušenja, u određenom trenutku profil distribucije vlage unutar tijela postane neujednačen, tako da je pri površini i na samoj površini koncentracija vlage veoma mala. Ovako, na površini opada potencijal evaporativnog odvođenja vlage. Promjena profila koncentracije vlage prikazana je na slici 1-14 (u ovom radu su zanemarene razlike u početnoj koncentraciji vlage duž poluprečnika tijela).



Slika 1-14. Profil koncentracije vlage: a) Prije sušenja (idealizovan); b) Nakon određenog vremena sušenja

Kada dođe do pada koncentracije vlage na površini, proces postaje neefikasan, pa se može doći u situaciju da se energija nepotrebno troši. Ovdje se proces može zaustaviti na izvjesno vrijeme, u cilju omogućavanja ujednačavanja, tj. relaksacije profila vlage. Ovo vrijeme se zato u literaturi često naziva period relaksacije. Dakle, prekida se proces sušenja u kraćim vremenskim intervalima, u cilju postizanja energetski efikasnijeg režima rada [29]. Premisa je da u periodu opadajuće brzine

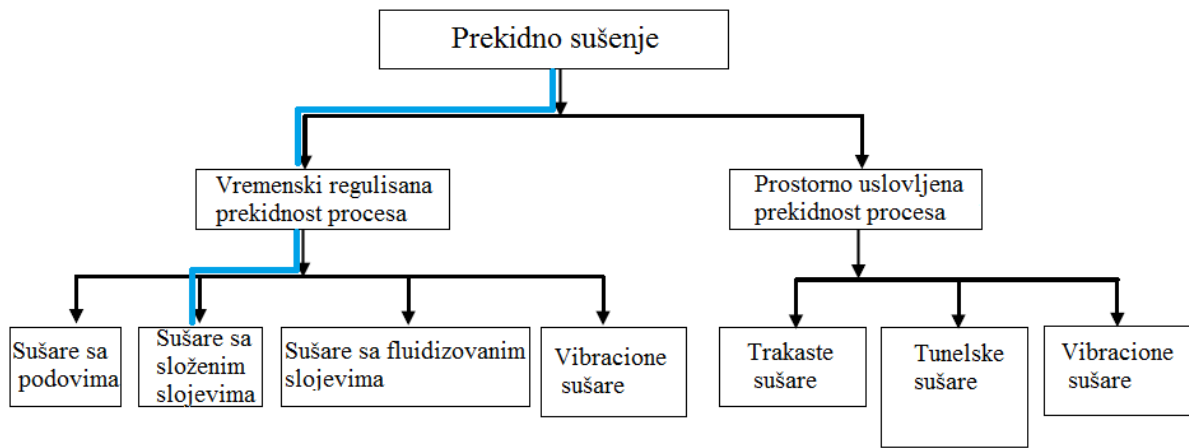
sušenja nije opravdano trošiti energiju za održavanje kontinualnog režima sušenja. Treba napomenuti da se prekidno sušenje često koristi i za isključivo poboljšanje kvaliteta materijala (vidjeti npr. [30 - 31]), što u ovom radu nije predmet analize. Pomenuće se ipak da su autori [32] pravili poređenje uticaja na kvalitet oraha pri različitim metodama sušenja i da se prekidno sušenje pokazalo kao jedan od najboljih metoda za očuvanje njihovog kvaliteta.

Prekidni režim može da se izvede sa potpunom obustavom toka (dakle isključuju se i ventilator i grijač, pri čemu se ostvaruju veće energetske uštede), ili samo snižavanjem temperature vazduha (dakle smanjivanjem snage grijača ili njegovim potpunim isključivanjem).

Načelno, ovakvi režimi sušenja ne moraju da se odnose samo na prekid toka vazduha i/ili snižavanje njegove temperature. Pod prekidnim režimima mogu da se podrazumijevaju i varijacije radnog pritiska ili relativne vlažnosti vazduha [33]. U principu, svi procesi sušenja u kojima se varira bilo koji parametar koji utiče na kinetiku sušenja, direktno ili indirektno, spadaju pod zajednički naziv "prekidno sušenje". Dodatno, prekidno sušenje može da se odnosi i na druge metode sušenja (ne samo konvektivno), pa osim opsežnog pregleda rezultata datih kod [33], gdje se daje i klasifikacija sistema za prekidno sušenje i načina njihovog tehničkog izvođenja i regulacije, teško je reći gdje je granica skupa ovih metoda, koje za cilj svakako imaju ono što je već pomenuto.

Ne postoji naročita klasifikacija niti posebna pravila o vrstama materijala koji mogu da se suše prekidnim režimima. Kod bilo kog materijala može da se analizira ušteda energije ili da se provjerava pouzdanost predloženog modela. Ako se govori o očuvanju mehaničkog i estetskog kvaliteta, tj. o nastojanju da se sačuva boja ili spriječi pojava pukotina u materijalu zbog dugotrajne izloženosti visokim temperaturama, u pitanju su mahom radovi koji se bave prekidnim sušenjem drveta ili građevinskih materijala [34]. Ako se pak radi o očuvanju nutritivnog kvaliteta, analiziraju se poljoprivredni proizvodi. Autori u [35] su dali pregled primjene prekidnog sušenja kukuruza, kikirikija, ovasi i pšenice, kao i odgovarajući model koji ga opisuje. U pogledu prekidnog sušenja jezgrastog voća, izvještava se kod [36] o sušenju makadamije. Istraživanja su rađena i za neke vrste ljekovitog bilja, uglavnom bez naročitog matematičkog opisa procesa [37].

U praksi ovakav režim može da se realizuje u različitim sistemima za sušenje (npr. sušenje u sloju sa isključivanjem i uključivanjem rada uređaja ili višestepene trakaste sušare u kojima se u većem broju prolaza materijal izlaže –ili ne izlaže- nastrojavanju agensa). Često se prekidno sušenje izvodi u sistemima sa toplotnom pumpom [38]. Na slici 1-15 [39] može da se vidi klasifikacija različitih mogućnosti primjene prekidnog sušenja. U tom smislu pravi se razlika između procesa sušenja u kojima se intermitencija (prekidnost) izaziva regulacijom sa unaprijed zadatom vremenskom zavisnošću (to su uglavnom sušare bez pokretnih dijelova u kojima je sav materijal koji se suši unaprijed ubačen u sušaru) i onih kod kojih je intermitencija uslovljena prostorno-konstruktivnom dispozicijom elemenata i principom rada (to su uglavnom sušare sa pokretnim dijelovima u kojima postoji protok vlažnog materijala). Analiza iznesena u ovom radu primjenu može naći kod sušenja u fiksnom, složenom sloju, pa je relevantna putanja označena plavom bojom.



Slika 1-15. Klasifikacija načina primjene prekidnog sušenja [39]

U ovom radu, pod prekidnim sušenjem podrazumijeva se periodična varijacija temperature vazduha, u unaprijed predviđenim sekvencama koje su izabrane na osnovu očekivanog ponašanja materijala u ovim uslovima. Vrijeme trajanja perioda relaksacije i tehnička izvedba ovakvih procesa biće detaljnije objašnjeni u narednom poglavlju.

Prekidno sušenje se u ovom istraživanju spominje u dva konteksta - jedan je modelovanje kinetike (što je prikazano na primjeru sušenja oraha), a drugi je potencijalna ušteda energije (što je prikazano na primjeru sušenja drugih materijala). Dakle, na modelovnje sličnih procesa treba napraviti poseban osvrt. U cilju veće preglednosti, relevantan pregled literature koja se odnosi na samo modelovanje ovih procesa biće dat u Poglavlju 3, gdje je ovo i osnovna tema analize.

Analogno, pregled radova koji su se bavili uštedom energije u prekidnim procesima, dat je u Poglavlju 4.

1.7 Hipoteze i ciljevi istraživanja

Ciljevi istraživanja

Predloženi i verifikovani matematički model, u opštem slučaju može da obezbjedi pouzdanu inženjersku podlogu za projektovanje sistema za sušenje. Pored toga, nakon implementacije modela može da se otvori pristup optimizaciji geometrije postrojenja za sušenje, vremena sušenja i potražnje energije, a sve pod imperativom očuvanja propisanog kvaliteta proizvoda. Sa aspekta energetike i procesne tehnike kao naučne discipline, od posebnog je značaja upravo upravljanje energetske tokovima u ovakvim procesima, sa ciljem razvoja i realizacije sistema koji će da imaju visok stepen energetske efikasnosti, što bi bio konkretan doprinos u naučnom smislu, a istovremeno potencijalni pozitivan uticaj na opšte unapređenje tehničkih rješenja, očuvanje životne sredine i održivi razvoj.

Kao što se može zaključiti iz prethodno iznesenog, ovakva problematika je multidisciplinarnе prirode i za njeno potuno razumijevanje, a da se tom prilikom ne naruši ekonomičnost samog procesa naučnog rada, neophodno je osloniti se na literaturu u kojoj su već predstavljeni rezultati

opsežnih istraživanja, naročito odnoseći se na biološke karakteristike pomenutih biljnih vrsta. Ovakve informacije su od neprocenjivog značaja za mogućnost konstruktivnog pristupa problemu iz inženjerskog ugla.

Strategija izrade rada koncipira se na takvom pristupu da se nakon pregleda literature i utvrđivanja postojanja određenih modela, kroz hipoteze predlože konkretni koraci u unapređenju modela. Zatim se pristupa formiranju matematičkog modela, koji je potrebno interpretirati numeričkom simulacijom, a zatim potvrditi eksperimentom. Prilikom analize rezultata numeričkih simulacija i eksperimenata, treba da se potvrde (ili opovrgnu) postavljene hipoteze i model koji je na njima zasnovan. Na kraju je potrebno izvesti zaključke formirane na osnovu dobijenih rezultata i komentarisati kakvi koraci treba da se preduzmu da bi se proces mogao voditi u domenu poželjnih parametara.

Hipoteze

Na osnovu pregleda literature, utvrđeno je da se postojeća istraživanja o konvektivnom sušenju oraha (osim onih koja se bave isključivo aspektima nutritivnog kvaliteta) odnose na kontinualno sušenje i nisu nađeni podaci o tome da su se neki autori bavili primjenom prekidnog (diskontinualnog) režima sušenja. U ovom radu poseban osvrt je napravljen u pravcu analize različitog vremena trajanja perioda relaksacije i uticaja na brzinu sušenja oraha, kao i dobijanja pozdanog modela za analiziranje kinetike prekidnog sušenja materijala sfernog oblika u tankom sloju uopšte. Ovaj model čini i sastavni dio modela prekidnog sušenja u debelom sloju, kojim treba da se ispita mogućnost upotrebe prekidnih režima u realnim uslovima. Poznato je da matematički model koji je zasnovan na bilansu mase, bilansu energije, konstitutivnim relacijama difuzije mase i prenosa toplote, kao i termofizičkim svojstvima koja su eksperimentalno dobijena ili data kroz empirijske i polu-empirijske relacije, može sa dovoljnom preciznošću da opiše procese i pojave nastale prilikom sušenja oraha i drugih upotrebljenih materijala.

Nakon identifikacije parametara putem analize eksperimentalnih rezultata, regresionom analizom može da se dođe do izraza koji će temperaturu i brzinu vazduha dovesti u vezu sa kinetikom procesa sušenja u opštem slučaju.

Takođe, pregledom literature nije utvrđeno da su objavljeni rezultati koji se tiču uticaja različitih vrsta materijala na mogućnost energijske uštede prilikom sušenja u prekidnom režimu, u odnosu na kontinualni.

U skladu sa prethodno iznesenim, formirane su sledeće hipoteze:

- 1) Matematički model opisanih osobina, a u čijoj osnovi je tzv. Njutnov model sušenja u tankom sloju, može da se upotrijebi i za opisivanje prekidnih režima sušenja sa dovoljnom tačnošću. Na takvoj osnovi, može da se formira i pouzdan model prekidnog sušenja u debelom sloju.
- 2) Periodičnim variranjem temperature agensa može da se ostvari ušteda energije u odnosu na režim kontinualnog sušenja (što je poželjno i daje praktičan smisao širem kontekstu teme). S druge strane, to može da uzrokuje i određeno produženje trajanja procesa (što je nepoželjno). Opravdanost upotrebe prekidnih režima u ovom smislu zavisi od efektivne difuzivnosti materijala.

Ovako definisani ciljevi i hipoteze zahtijevaju i dodatno objašnjenje u pogledu metodologije.

Naime, efektivna difuzivnost je izabrana jer zapravo može da se interpretira kao set važnih parametara od kojih kinetika sušenja zavisi. Ovo ostavlja mogućnost upotrebe rezultata za široku paletu materijala, jer se iste efektivne difuzivnosti mogu dobiti međusobnim usklađivanjem dimenzija i radnih uslova sušenja.

Glavna razlika u formalnom zapisu matematičkog modela kontinualnog i prekidnog režima sušenja, jeste u graničnim uslovima koji se koriste u modelu. U periodu prekidnog sušenja određuje se profil sadržaja vlage u vremenu pretpostavljajući da je površina tijela nepropusna. Pod ovim novim uslovima varijacija prosječnog sadržaja vlage je zanemarljiva i pojavljuje se jedino promjena distribucije vlage unutar tijela. U toku "perioda mirovanja" ili „relaksacije“, difuzijom vlage ujednačiće se raspored sadržaja vlage. Idealno vrijeme mirovanja dobija se kroz pretpostavku krajnjeg uniformnog profila distribucije vlage. Da bi mogao da se simulira proces prekidnog sušenja mora biti poznat profil vlage unutar tijela na kraju perioda kontinualnog sušenja. Važno je napomenuti i to da se temperaturski profil posmatranih tijela smatra inicijalno uniformnim zbog veoma kratkog vremena temperaturske relaksacije.

U periodima relaksacije, pored grijača, može da se isključi i mehanički uređaj (ventilator) koji potiskuje agens kroz sloj, te nema nikakve potrošnje energije. Zbog toga bi se energijska ušteda ostvarila i kod sušenja vazduhom koji je na ambijentalnoj temperaturi, a kod sistema sa zagrijavanjem vazduha ušteda je „dvostruka“. U ovom radu, pak, izučavaće se slučaj u kome se ventilator ne isključuje, nego samo grijač, čime se dobija varijacija temperature agensa sušenja, a ideja je da se istraže uslovi u kojima se, pored uštede energije (tj. smanjenja efektivnog vremena sušenja), zahtjeva i to da se ukupno vrijeme sušenja smanji koliko god je moguće.

Literatura

- [1] Mujumdar, A.S. *Handbook of Industrial Drying*, 4th edition, CRC Press - Taylor & Francis Group, Boca Raton 2015.
- [2] Barbosa de Lima, A.G., et al., Drying of Bioproducts: Quality and Energy Aspects, In Barbosa de Lima A.G., Delegado, J.M.P.Q (Eds.), *Drying and Energy Technologies* (pp. 1-18). Springer, Switzerland, 2016.
- [3] Topić R., Sušenje i sušare, SMEITS, Beograd, 2014.
- [4] Keey, R.B., *Introduction to Industrial Drying Operations*, 1st edn., Pergamon Press, New York, 1978.
- [5] ***, Food and Agricultural Commodities Production, <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>, 2017 (Pristupljeno 10.07.2018.)
- [6] ***, Moć Prirode, Edicija Priroda i zdravlje – *Jezgrasto voće, Gajenje i upotreba*, “Potez” Novi Beograd, 63 (2006), pp 14-27
- [7] Cerović S., et al., Pet decenija rada na selekciji oraha (*Juglans regia* L.) u Srbiji, *Letopis naučnih radova Godina* 38 (2014), p 19
- [8] <https://www.yalcafruittrees.com.au/shop/walnut-trees/chandler-walnut/> (Pristupljeno 05.04.2019.)
- [9] ***, UNECE STANDARD DDP-01 concerning the marketing and commercial quality control of INSHELL WALNUTS, 2010 edition, UNITED NATIONS New York and Geneva, 2010.
- [10] Rumsey, T., Thompson, J., Ambient air drying of English walnuts, *Transactions of ASAE* 27(3) (1984), pp 942-945
- [11] Doder Đ., Đaković D., Walnut drying process. *Procesing konferencija*, Beograd 2016.
- [12] Shakerardekani A., et al., Types of dryers and their effect on the pistachio nuts quality - a review, *Journal of Agricultural Science* 3(4) (2011), pp 13-21
- [13] Kashani Nejad M., et al., Effect of drying methods on quality of pistachio nuts, *Drying Technology* 21(5) (2003), pp 821–838
- [14] Wiegand E.H., *Walnut Drying and Packing in Oregon*, Oregon State Agricultural College, 1927. Station Bulletin
- [15] <http://www.websterltd.com.au/images/walnuts> (pristupljeno u septembru 2016)
- [16] Rajabipour A., Shahbazi F., Airflow resistance in walnuts, *Journal of Agricultural Science and Technology* 3 (2001), pp 257-264
- [17] Khir R., et al., Size and moisture distribution characteristics of walnuts and their components, *Food and Bioprocess Technology* 6 (2013), pp 771-782
- [18] Sibbett G.S., et al., Is walnut drying time affected by ethephon? *California Agriculture* 30(6) (1976), p 7

- [19] Sibbett G.S., et al., Effects of prolonged drying and harvest delay following ethephon on walnut kernel quality, *California Agriculture* 32(6) (1978) pp 12-13
- [20] Rumsey T., et al., Equilibrium moisture of walnut cultivars, *Sacramento, CA: Walnut Research Reports*.Walnut Marketing Board, 1997.
- [21] Rumsey T., Lu Z., High temperature walnut drying, *Sacramento, CA: Research report*. Walnut Marketing Board, 1991.
- [22] Altuntas E., Erkol M., Physical properties of shelled and kernel walnuts as affected by the moisture content, *Czech Journal of Food Science*, 28(6) (2010), pp 547–556
- [23] Mamani I., Modeling of thermal properties of Persian walnut kernel as a function of moisture content and temperature using response surface methodology. *Journal of Food Processing and Preservation* 39(6) (2015), pp 2762-2772
- [24] Pan Z., et al., Improving processing and energy efficiencies of walnut drying, Sacramento, CA:Walnut Research Reports. California Walnut Board, 2009
- [25] Hassan-Beygi S.R., et al., Drying characteristics of walnut (*Juglans Regia L.*) during convection drying, *International Agrophysics* 23 (2009), pp 129-135
- [26] Vázquez G., et al., Modeling of desorption isotherms of chestnut: influence of temperature and evaluation of isosteric heats, *Drying Technology* 19(6), (2001) pp 1189–1199
- [27] Naderinezhad S., et al., Mathematical modeling of drying of potato slices in a forced convective dryer based on important parameters, *Food Science & Nutrition*, 4(1) (2016), pp 110–118
- [28] Perez N.E., Schmalko M.E., Convective drying of pumpkin: influence of pretreatment and drying temperature, *Journal of Food Process Engineering*, 32 (2009), pp 88–103.
- [29] Barbosa de Lima A.G., et al., Intermittent Drying: Fundamentals, Modeling and Applications, In Barbosa de Lima A.G., Delegado, J.M.P.Q (Eds.), *Drying and Energy Technologies* (pp. 19-41). Springer, Switzerland, 2016.
- [30] Ramallo L.A., et al., Effect of the application of intermittent drying on *Ilex paraguariensis* quality and drying kinetics, *Journal of Food Engineering* 97 (2010), pp 188–193
- [31] Kumar C., et al., Intermittent drying of food products: A critical review. *Journal of Food Engineering* 121 (2014), pp 48–57
- [32] Qu Q., et al., Effects of three conventional drying methods on the lipid oxidation, fatty acids composition, and antioxidant activities of walnut (*Juglans regia L.*), *Drying Technology*, 34(7) (2016), pp 822-829
- [33] Chua K.J., et al., Intermittent drying of bioproducts - an overview, *Bioresource Technology* 90 (2003), pp 285–295.
- [34] Kowalski S.J., Pawłowski A., Modeling of kinetics in stationary and intermittent drying, *Drying Technology* 28 (2010), pp 1023–1031
- [35] Chou S.K., et al., On the intermittent drying of agricultural product, *Transactions of IChemE* 78 (2000), pp 193-203

- [36] Borompichaichartkul C., et al., Improving quality of macadamia nut (*Macadamia integrifolia*) through the use of hybrid drying process, *Journal of Food Engineering* 93 (2009), pp 348–353
- [37] Holowaty S.A., et al., Intermittent drying simulation in a deep bed dryer of yerba mate, *Journal of Food Engineering* (111) 2012, pp 110–114
- [38] Zhu Z., et al., Experimental research on intermittent heat pump drying with constant and time-variant intermittency ratio, *Drying Technology* 34(13) 2016, pp 1630–1640
- [39] Karim A., Law C-L., *Intermittent and Nonstationary Drying Technologies - Principles and Applications*, CRC Press - Taylor & Francis Group, Boca Raton 2017.

Poglavlje 2.

Detaljan opis eksperimentalnog postupka

2.1 Uvod

Eksperimentalna mjerenja obavljena su na Mašinskom institutu Fakulteta tehničkih nauka, Univerzitet Novi Sad, u laboratoriji za Toplotnu i procesnu tehniku. Pomoćna mjerenja koja se odnose na određivanje početnog sadržaja vlage materijala koji je upotrebljavan prilikom ispitivanja, obavljena su na Poljoprivrednom fakultetu, Univerzitet Novi Sad, u laboratoriji za Poljoprivrednu tehniku.

Slijedi detaljan opis eksperimentalnog postrojenja, mjernih uređaja koji su korišćeni, kao i načina izvođenja eksperimenta i prikupljanja i obrade podataka.

2.2 Određivanje početnog sadržaja vlage

Početni sadržaj vlage oraha određivan je metodom koji je propisan standardom [1]. Prema ovom standardu potrebno je izmjeriti masu svježeg materijala, a zatim ga sušiti najmanje 24h na temperaturi od $105 \pm 2^\circ\text{C}$, u autoklavu. Nakon toga se materijal ostavlja u tzv. desikator dok se ne ohladi, posle čega mu se masa ponovo mjeri. U desikator se prethodno ubaci adsorbens, da materijal, koji je postao veoma higroskopan zbog svoje niske vlažnosti, ne bi preuzimao vlagu iz vazduha. Postupak se ponavlja u jednakim vremenskim periodima od npr. 4h [2]. Kada promjena mase prilikom provjere u uzastopnim mjerenjima iznosi 0,05% ili manje, može se smatrati da je materijal osušen toliko da je odstranjena sva vlaga koja konvektivnim sušenjem može da se izdvoji. Ova masa uzima se za masu suve osnove materijala.

Nakon što je određena masa suve osnove, ova masa poredi se sa početnom masom. Njihov odnos predstavlja početni sadržaj vlage materijala, izražen po suvoj osnovi.

Kako je ukupna masa vlažnog materijala:

$$m = m_{sm} + m_w \quad (2-1)$$

a pored toga definišemo sadržaj vlage po vlažnoj osnovi (eng. „wet basis“):

$$M_{w.b.} = \frac{m_w}{m} = \frac{m_w}{m_{sm} + m_w} \quad (2-2)$$

i sadržaj vlage po suvoj osnovi materijala (eng. „dry basis“):

$$M_{d.b.} = \frac{m_w}{m_{sm}} \quad (2-3)$$

na ovaj način biće određen i početni sadržaj vlage, s obzirom da se opisanim postupkom određuje upravo početna masa vlažnog materijala i masa suve materije:

$$M_{od.b.} = \frac{m_{0w}}{m_{sm}} = \frac{m_0 - m_{sm}}{m_{sm}} \quad (2-4)$$

Jednostavnim postupkom dovodimo u vezu trenutni sadržaj vlage materijala po suvoj osnovi sa početnim sadržajem vlage po suvoj osnovi, trenutnom masom materijala i masom sve osnove:

$$M_{d.b.} = \frac{m}{\left(\frac{1}{M_0} + 1\right) m_{sm}} \quad (2-5)$$

Pomenuto preliminarno sušenje obavljalo se pomoću autoklava koji je prethodno podešen na pomenutu temperaturu. Korišćen je autoklav proizvođača „Instrumentaria“ – tip ST-05. Na slici 2-1 prikazane su vrste oraha koji su korišćeni za eksperiment. Uzorak koji je korišćen u kasnijem eksperimentalnom postupku je drugi u donjem redu gledajući s lijeva na desno, jer su to uzorci koji su najučestaliji.



Slika 2-1. Ispitivani uzorci prije određivanja početnog sadržaja vlage

Na slici 2-2 prikazani su adsorbens koji je korišćen u postupku (silika gel, sa deklaracijom), zatim adsorbens u improvizovanom desikatoru bez poklopca, kao i termometar koji služi za indikaciju temperature u autoklavu. Na slici 2-3 prikazani su uzorci u fazi ispitivanja, kao i svjež uzorak pred ispitivanje. Na slici 2-4 prikazani su uzorak nakon ispitivanja (suv uzorak) i autoklav koji je korišćen.



a)

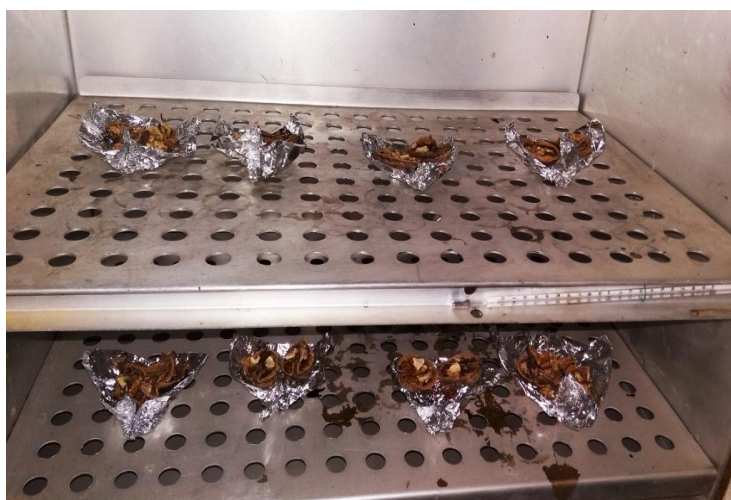


b)



c)

Slika 2-2. a) Silika gel; b) Desikator; c) Termometar



a)



b)

Slika 2-3. a) Uzorci u autoklavu; b) Svjež uzorak u korpici



a)



b)

Slika 2-4. a) Uzorak nakon postupka određivanja početnog sadržaja vlage; b) Autoklav

Improvizovani desikator sastoji se od posude sa dobrim zaptivanjem u koju je nasut silika gel koji ima funkciju adsorbensa. Upotrebljen je indikatorski silika gel plave boje, koji ovu boju ima dok je njegov sadržaj vlage nizak. Kako postaje vlažniji, gel sve više poprima ružičastu boju. Izlaganjem tzv. "temperaturi oporavka" (obično oko 100°C), silika gelu se vraćaju pređašnje osobine.

Na isti način određen je i početni sadržaj vlage ostalih materijala. Za potvrdu ovih rezultata, kao i za kasnije provjere početnog sadržaja vlage materijala koji je bio uskladišten za upotrebu u narednim eksperimentima, korišćen je uređaj sa halogenom sijalicom, proizvođača „Precisa“ – tip XM60. Ovaj uređaj radi na principu brzog podizanja temperature pripremljenog uzorka. Uređaj je podešen da radi na temperaturi od 130±2°C. Ovim uređajem su potvrđeni rezultati koji su dobijeni korišćenjem autoklava, jer su odstupanja bila zanemarljiva. Vaga koja je bila korišćena za ove svrhe je od proizvođača „Radwag“ – tip PS 600.R2. Na slici Na slici 2-5 a)-c) prikazani su uređaj „Precisa“ za brzo određivanje početnog sadržaja vlage, u radu i u pripremi (uzorak mora da se usitni da bi halogena sijalica emitujući toplotno zračenje mogla da ispari vlagu iz materijala u relativno kratkom vremenskom periodu), kao i precizna vaga „Radwag“ na kojoj su mjerene mase uzoraka prije i posle tretmana u autoklavu.



a)

b)

c)

Slika 2-5. a) Uređaj „Precisa“ u radu; b) Uređaj „Precisa“ u pripremi sa usitnjenim materijalom; b) Precizna vaga „Radwag“

Držeći se ovih procedura, određeni su početni sadržaji vlage svih korišćenih materijala, po suvoj osnovi materijala.

Za prvo mjerenje (testiranje procedure) početnog sadržaja vlage biće prikazana tabela sa detaljnim podacima, da bi se što jasnije prikazao postupak. Ovi podaci dati su u tabeli 2-1, a to preliminarno mjerenje rađeno je sa sortom Šejново. Ostali rezultati će biti sumirani u narednim tabelama zbog bolje preglednosti. U tabeli 2-2 prikazani su rezultati za osnovni materijal, tj. sortu Novosadski kasni.

Tabela 2-1: Preliminarno ispitivanje početnog sadržaja vlage za sortu Šejново

Uzorak br.	Poč. masa[g]	Poč. masa sa posudom [g]	Posle 24h[g]	Posle još 4h[g]	Razlika [%]	Masa vlage [g]	Sadržaj vlage d.b.	Vrsta uzorka
1	10,748	13,018	11,913	11,903	0,083	1,115	0,115	sitniji*
2	12,590	14,720	13,658	13,654	0,029	1,066	0,092	sitniji*
3	13,215	14,219	12,951	12,942	0,069	1,277	0,106	krupniji*
4	14,293	15,690	14,319	14,319	0	1,371	0,106	krupniji*
5	16,698	16,579	16,079	16,074	0,031	0,505	0,031	sitniji, suvlji**
6	15,307	17,830	15,052	15,061	-0,059	2,769	0,220	sitniji, suvlji***
7	16,049	17,105	15,392	15,390	0,012	1,715	0,119	krupniji*
8	17,352	18,384	16,557	16,553	0,024	1,831	0,117	krupniji*
*	Korišćeni u eksperimentu							
**	Vjerovatna greška pri mjerenju							
***	Evidentna greška pri mjerenju							

Tabela 2-2: Rezultati ispitivanja početnog sadržaja vlage za sortu Novosadski kasni

Uzork br.	Poč. masa [g]	Poč. masa sa posudom [g]	Posle još 28h	Masa vlage [g]	Sadržaj vlage d.b.	Objašnjenje
1	12,621	13,282	11,066	2,216	0,213	otvoren svježiji, sa zemlje*
2	26,378	27,086	20,572	6,514	0,328	krupniji otvoren, sa zemlje
3	16,875	17,639	12,126	5,513	0,485	otvorena komina, sa drveta*
4	15,738	16,385	8,994	7,391	0,885	napukla komina**
5	7,865	8,572	7,750	0,822	0,117	sitniji, suvlji, sa zemlje
6	13,324	13,951	8,871	5,080	0,616	tek napukla komina, sa drveta
7	14,520	15,086	9,905	5,181	0,555	zatvorena komina, sa drveta
8	12,949	13,526	8,860	4,666	0,563	tek napukla komina, sa drveta
9	13,005	13,679	12,456	1,223	0,104	sitan, otvoren, sa zemlje
10	13,306	14,139	12,567	1,572	0,134	napukla komina, suvlji, sa zemlje
11	10,678	11,665	9,852	1,813	0,205	otvorena komina, sa zemlje*
12	13,260	14,025	10,196	3,829	0,406	otvorena komina, sa drveta*
13	12,012	13,451	10,408	3,043	0,339	standardan uzorak odstajao*
14	10,728	11,682	8,776	2,906	0,372	standardan uzorak odstajao*
*	Korišćeni u eksperimentu					
**	Evidentna greška pri mjerenju					

Vlažnost koja je korišćena za proračun je osrednjena vlažnost izabranih uzoraka koji su okarakterisani kao „standardni uzorci“. Osrednjavanjem su dobijeni sledeći početni sadržaji vlage po suvoj osnovi: Novosadski kasni 34%, Šejново 11%, Tisa 12%. U narednim tabelama prikazani su rezultati kontrolnih mjerenja dobijeni korišćenjem autoklava i uređaja sa halogenom sijalicom. Pored kontrolnih mjerenja za orahe, dati su i saržaji vlage za ostale materijale.

Tabela 2-3: Kontrolna mjerenja početnog sadržaja vlage za orahe

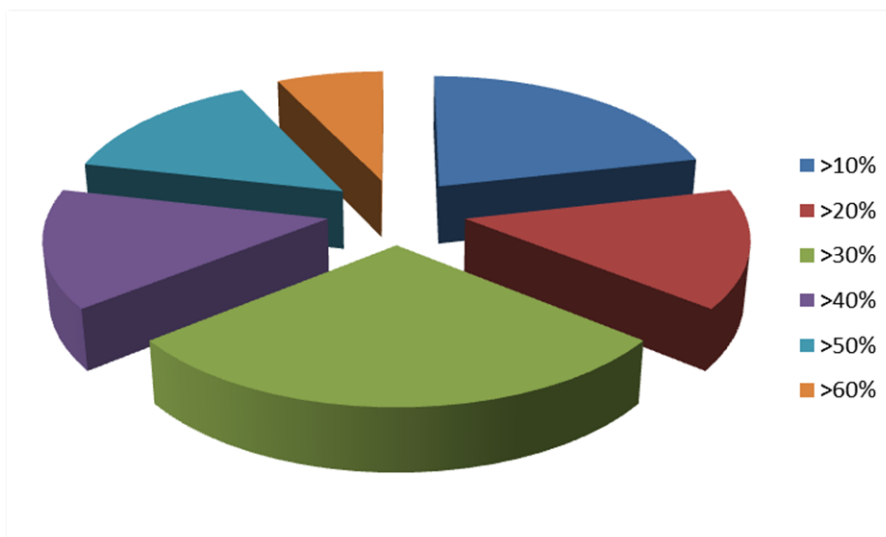
Uzorak br.	Sadržaj vlage d.b.	Objašnjenje
1	0,3273	Novosadski kasni, standardan uzorak - provjera u uređaju sa halogenom sijalicom
2	0,3561	Novosadski kasni, standardan uzorak - provjera u autoklavu posle 7 dana
3	0,117	Sorta Tisa - uređaj
4	0,82	Komina standardnog uzorka - uređaj
5	0,3588	Kora standardnog uzorka - uređaj
6	0,2536	Jezgra standardnog uzorka - uređaj
7	0,056	Krajnja vlažnost standardnog uzorka - uređaj
8	0,033	Krajnja vlažnost jezgre standardnog uzorka - uređaj
9	0,076	Krajnja vlažnost kore standardnog uzorka- uređaj
10	0,301	Jezgra standardnog uzorka koji je duže odstojao, vlažniji primjerak - uređaj
11	0,313	Kora standardnog uzorka koji je duže odstojao, vlažniji primjerak - uređaj
12	0,147	Jezgra standardnog uzorka koji je duže odstojao, suvlji primjerak - uređaj
13	0,162	Kora standardnog uzorka koji je duže odstojao, suvlji primjerak - uređaj

Tabela 2-4: Mjerenje početnog sadržaja vlage za ostale materijale

Uzorak br.	Sadržaj vlage d.b.	Objašnjenje
1	0,389	Kesten suvlji - autoklav
2	0,592	Kesten svježiji - autoklav
3	0,421	Žir - autoklav
4	0,330	Kesten suvlji - uređaj
5	0,525	Kesten svježiji - uređaj
6	0,322	Žir - uređaj
7	0,360	Kesten suvlji jezgra - uređaj
8	0,557	Kesten svježiji jezgra - uređaj
9	0,327	Kesten jezgra posle sušenja 20h - autoklav
10	6,407	Čeri paradajz - uređaj
11	2,703	Krompir oguljen - uređaj
12	5,667	Bundeva oguljena - uređaj

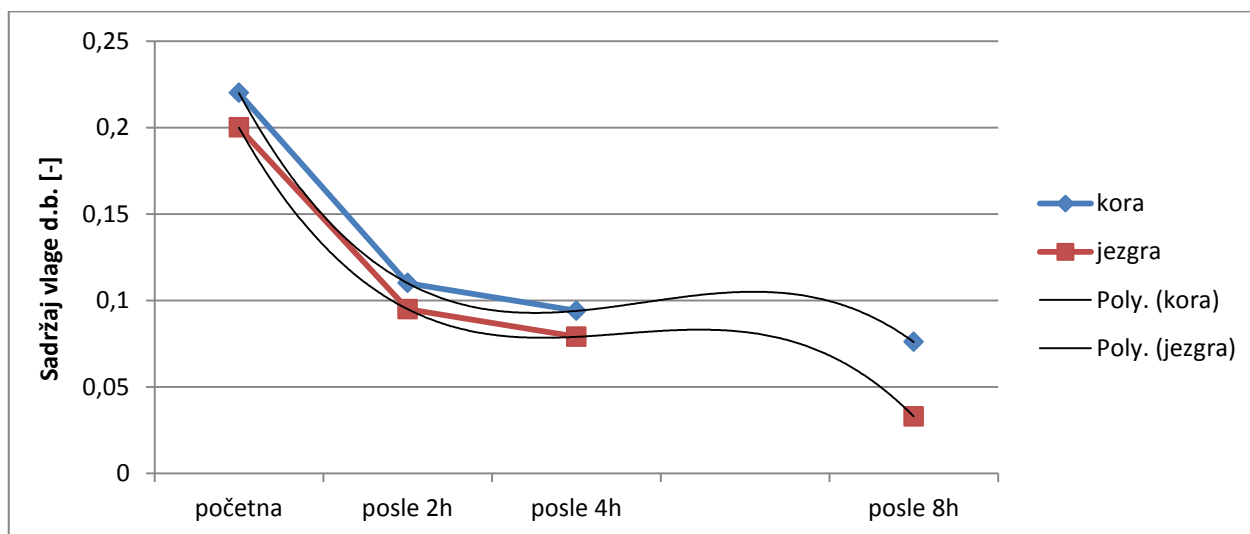
Pokazatelji distribucije vlage

Na slici 2-6 prikazan je udio različitih sadržaja vlage u prikupljenim uzorcima. Kao što se može vidjeti, dominantnani su uzorci sadržaja vlage od 30-40%. Ovaj podatak je bio od presudnog značaja za izbor početnog sadržaja vlage koji će kasnije biti korišćen u proračunu i simulaciji procesa sušenja.

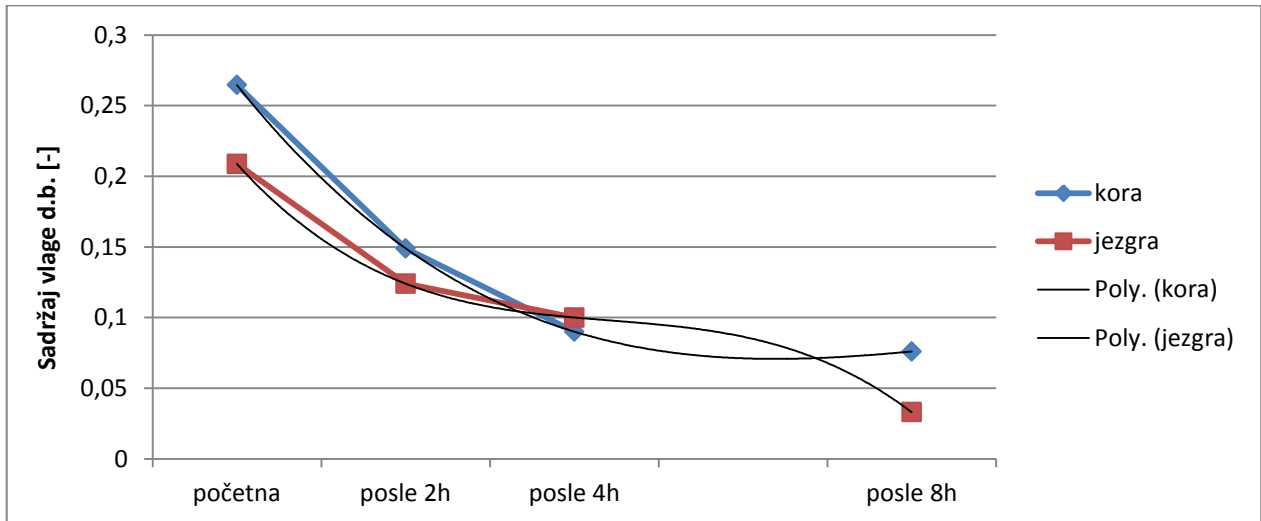


Slika 2-6. Udjeli uzoraka sa različitim početnim sadržajima vlage prilikom prikupljanja

U uvodnom poglavlju, uvidom u postojeću literaturu, pokazalo se da se kod oraha može očekivati veći sadržaj vlage u ljusci nego u jezgri, kod svih testiranih sorti [3]. U ovom istraživanju potvrđeno je da je distribucija profila sadržaja vlage upravo ovakva. Ovdje je obavljeno i zasebno eksperimentalno mjerenje da bi se moglo odvojeno vidjeti ponašanje kore i jezgre u smislu promjene sadržaja vlage u toku procesa. Rezultati su prikazani kroz dijagrame na slikama 2-7 i 2-8, za uzorke sa različitim početnim sadržajem vlage. Tendencija promjene sadržaja vlage aproksimirana je odgovarajućim polinomom.



Slika 2-7. Promjena sadržaja vlage jezgre i kore u toku 8h sušenja oraha manje početne vlažnosti



Slika 2-8. Promjena sadržaja vlage jezgre i kore u toku 8h sušenja oraha veće početne vlažnosti

2.3 Doprema, skladištenje i izvođenje eksperimenta

Nakon što su orasi dopremljeni, određivan im je početni sadržaj vlage (za karakteristične uzorke). Nakon toga, ovi uzorci čuvani su u u frižideru u plastičnim kesama, da bi se minimiziralo sušenje na oklonom vazduhu prije nego što uzorci uđu u postrojenje za sušenje. Iskorišćeni uzorci ponovo su vraćani u prostor za skladištenje. Dok su bili u pripremi za eksperimentalno mjerenje, uzorci su se privremeno čuvali u tzv. „prenosnom hladnjaku“, u kome se rashladni efekat postiže pomoću rashladnih pločica, koje sadrže zamrznut fluid. Prenosni hladnjak sa uzorcima prikazan je na slici 2-9. Slika 2-10 šematski prikazuje proces dopreme, skladištenja, pripreme i izvođenja eksperimenta.

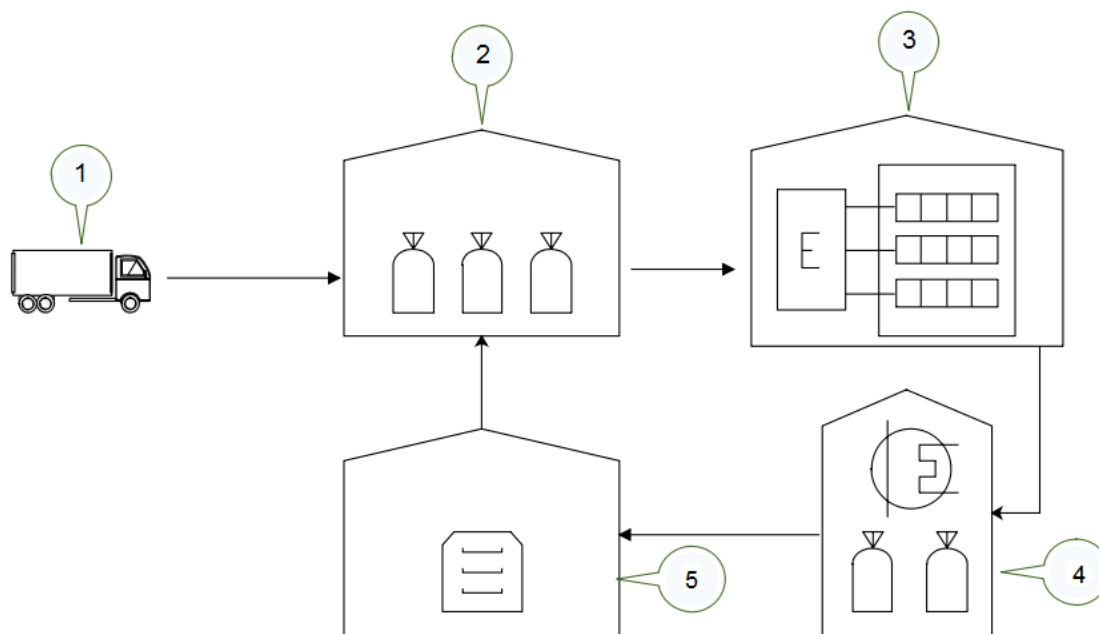


a)



b)

Slika 2-9. Prenosni hladnjak: a) Spoljašnji izgled; b) Način čuvanja uzoraka



Slika 2-9. Šematski prikaz logistike izvođenja eksperimenta: 1- Doprava; 2- Skladištenje - FTN; 3- određivanje karakteristika (dimenzije, sušenje) – Poljoprivredni fakultet; 4- Eksperimentalni postupak (FTN – Mašinski institut); 5-Skladištenje osušenih uzoraka za eventualnu ponovnu upotrebu

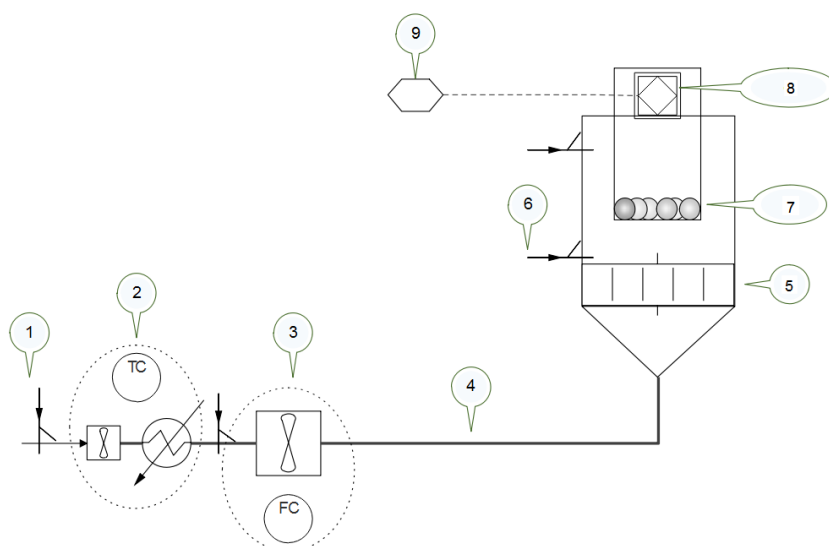
U glavnom eksperimentalnom postupku, odrađeno je 25 eksperimenata, od kojih nisu svi korišćeni za analizu koja je u fokusu ovog rada. Ipak, svi eksperimenti prikazani su u tabeli 2-5. Tu spadaju eksperimenti sa sušenjem oraha (njihovih različitih sorti), sušenja posebno jezgra i kore, sušenje ostalih nabrojanih materijala, a sve to u kontinualnom i u prekidnom režimu. Za vrstu Novosadski kasni, odrađeni su eksperimenti sa kontinualnim sušenjem za različite brzine i temperature vazduha, sa ciljem da se dobiju što širi rezultati i time veća mogućnost primjene matematičkih regresionih metoda.

Tabeli 2-5: Obavljeni eksperimenti na glavnom eksperimentalnom postrojenju

Redni broj	Materijal (ili sorta)	Režim	Opis režima (T-v)	Osrednjeni prečnik	Objašnjenje
1	Šejново	Kontinualan	40°C, 1 m/s	35 mm	Probno mjerenje
2	Novosadski kasni	Kontinualan	40°C, 1 m/s	29,8 mm	
3	Novosadski kasni	Kontinualan	30°C, 1 m/s	29,8 mm	
4	Novosadski kasni	Prekidan	40°-25°C, 3 m/s	29,8 mm	on/off - 60/30 min
5	Novosadski kasni	Kontinualan	40°C, 3 m/s	29,8 mm	
6	Novosadski kasni	Prekidan	40°-25°C, 3 m/s	29,8 mm	on/off - 30/15 min
7	Novosadski kasni	Kontinualan	30°C, 3 m/s	29,8 mm	
8	Tisa	Kontinualan	40°C, 3 m/s	38 mm	
9	Novosadski kasni	Prekidan	40°-25°C, 3 m/s	29,8 mm	greška u mjerenju*
10	Novosadski kasni	Prekidan	40°-25°C, 3 m/s	29,8 mm	varijabilni prekidi**
11	Kesten	Prekidan	40°-25°C, 3 m/s	26 mm	on/off - 60/30 min
12	Kesten	Kontinualan	40°C, 3 m/s	26 mm	
13	Novosadski kasni (jezgra)	Kontinualan	40°C, 3 m/s	24,9 mm	
14	Novosadski kasni (kora)	Kontinualan	40°C, 3 m/s	-	
15	Novosadski kasni (jezgra)	Prekidan	40°-25°C, 3 m/s	24,9 mm	on/off - 60/30 min
16	Kesten (oguljen)	Prekidan	40°-25°C, 3 m/s	25,8 mm	on/off - 60/30 min
17	Kesten (oguljen)	Kontinualan	40°C, 3 m/s	25,8 mm	
18	Čeri paradajz	Prekidan	40°-25°C, 3 m/s	25,6 mm	on/off - 60/30 min
19	Žir (oguljen)	Prekidan	40°-25°C, 3 m/s	22,4 mm	on/off - 60/30 min
20	Žir (oguljen)	Kontinualan	40°C, 3 m/s	22,4 mm	
21	Krompir (oguljen)	Prekidan	40°-25°C, 3 m/s	46 mm	on/off - 60/30 min
22	Krompir (oguljen)	Kontinualan	40°C, 3 m/s	46 mm	
23	Paprika	Kontinualan	40°C, 3 m/s	-	
24	Bundeva (komadići)	Prekidan	40°-25°C, 3 m/s	42 mm	on/off - 60/30 min
25	Bundeva (komadići)	Kontinualan	40°C, 3 m/s	42 mm	
	* Tokom izvođenja eksperimenta došlo je do krupnije greške u izvozu podataka sa vage				
	** Ovaj eksperiment je izveden sa kraćim (60/15 min), pa dužim prekidima (60/30 min, 60/45 min)				

Opis postrojenja i instrumenata

Radni dio postrojenja sastoji se od fiksnog radnog cilindra u koji se umeće pokretni nosač na kome se nalazi materijal. Za toplotnu izolaciju korišćen je elastomerni izolacioni materijal proizvođača „Armacell“ – tip Armaflex ACE PLUS 13 mm. Na dnu cilindra nalazi se rešetka i konus koji služe za ujednačavanje profila brzine po cijelom presjeku cilindra. Sa strane se nalaze impulsni izvodi za mjerenje radnih parametara procesa. Strujenje vazduha se ostvarilo pomoću aksijalnog ventilatora proizvođača „AB Electrolux Sweden“ – tip KS 5242/110, snage 480 W. Brzina vazduha (protok) je regulisana promjenom snage ventilatora, koja je opet regulisana promjenom napona na potenciometru. U ove svrhe korišćen je potenciometar proizvođača „Iskra“ – tip HSN 0300. Budući da su za proces korišćene dvije različite brzine vazduha ispred sloja materijala ($1\pm 0,2$ m/s i $3\pm 0,2$ m/s), bitno je istaći to da je za postizanje srednje brzine po poprečnom presjeku od 1 m/s bilo potrebno podesiti potenciometar na napon od 90 V, dok ga je za postizanje srednje brzine od 3 m/s bilo potrebno podesiti na 125 V. Za realizaciju prekidnih režima korišćen je digitalni vremenski prekidač proizvođača „Prosto“ – tip TM03, koji podnosi maksimalno opterećenje od 16A/3680W za omske potrošače. Na ovaj tajmer je u stvari bila priključena električna grijalica, pa se prema njegovom prethodnom programiranju grijalica gasila/palila u zadatim vremenskim intervalima. Električna grijalica je od proizvođača „NR Electric Ltd.“ – tip SH-804, maksimalne snage 2000 W i sa mogućnošću redukcije snage na 1000 W. Upravo ovim putem je na postrojenju regulisana temperatura, a eksperimentalna postavka je namještena tako da se snagom od 1000 W postiže temperatura od $30\pm 1,5^{\circ}\text{C}$, a snagom od 2000 W temperatura od $40\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ ispred sloja materijala koji se suši. Grijalica sadrži i mali ventilator zanemarljive snage, pomoću koga je vazduh ubacivan u glavni ventilator. Ventilator je spojen sa radnim dijelom postrojenja pomoću aluminijske cijevi, koja je takođe izolovana. Vaga je podešena da izvozi stabilne vrijednosti u zadatkom vremenskom intervalu (5 ili 10 min, u zavisnosti od režima sušenja) direktno na računar, gdje su podaci prvo skladišteni, a onda slati na dalju obradu i upotrebu. Na slici 2-10 prikazana je šema eksperimentalnog postrojenja.



Slika 2-10. Šema eksperimentalnog postrojenja: 1-Ulaz vazduha; 2-Jedinica za kontrolu temperature (grijač sa malim ventilatorom); 3-Jedinica za kontrolu protoka (glavni aksijalni ventilator sa potenciometrom); 4- Glavni potisni cjevovod; 5-Jedinica za ujednačavanje profila brzine; 6- Mjerenje temperature i brzine vazduha ispred sloja materijala; 7- Sloj materijala koji se suši; 8- Vaga sa data loggerom; 9- Računarska jedinica za procesuiranje podataka

Kontinualni režim

Kontinualni režimi izvođeni su u četiri varijante: brzina vazduha 1 m/s - temperatura ispred sloja materijala 40°C; brzina vazduha 1 m/s - temperatura ispred sloja materijala 30°C; brzina vazduha 3 m/s - temperatura ispred sloja materijala 40°C i brzina vazduha 3 m/s - temperatura ispred sloja materijala 30°C. Ove temperature i brzine postizane su na pomenuti način odgovarajućim naponom na potenciometru ventilatora i odgovarajućom snagom grijača na grijalici. U nekoliko prvih mjerenja ovi parametri su stalno kontrolisani, da bi se mogla uočiti enetualna varijacija. Pokazalo se da se parametri nisu značajno mijenjali. Najveće odstupanje temperature iznosilo je do 1,5°C, a najveće odstupanje srednje brzine oko 0,2 m/s (ne uzimajući u obzir lokalne promjene brzine na različitim poluprečnicima). Važno je napomenuti se ustaljena brzina vazduha postizala već nakon približno 15 sekundi, a ustaljena temperatura nakon približno 10 minuta, koliko je bilo potrebno da se postrojenje progrije, ako se u pogon puštalo iz potpuno hladnog stanja. Progrijavanje gornjih dijelova postrojenja (stalak za vagu), trajalo je i do 1h, ali uticaj ovih temperatura na temperaturu ulaznog vazduha bio je zanemarljivo mali.

Prekidni režim

Kod prvog izvođenja eksperimenta sa prekidnim režimom, stalno je obavljan nadzor duže od 18h, da bi se utvrdilo za koliko vremena temperatura vazduha opadne na sobnu temperaturu, kao i za koliko vremena može da se vrati na vrijednosti radne temperature nakon ponovnog uključivanja postrojenja. U ovom slučaju prekidi (isključivanje grijalice) obavljani su ručno. Svi naredni prekidi obavljani su pomoću prekidača sa tajmerom koji je prethodno opisan.

Dakle, prekidni režimi su izvođeni tako što je u određenim vremenskim intervalima grijalica isključivana. Ovi vremenski intervali su isprogramirani na tajmeru. Zbog potrebe za racionalnim raspolaganjem vremenom, opremom i materijalom prilikom izvođenja eksperimenta, svi prekidni režimi su izvođeni u odnosu na jedan referentni kontinualni režim, a to je režim sa brzinom vazduha od 3 m/s i temperaturom od 40°C, zbog pretpostavke da ovaj režim rezultuje najintenzivnijim sušenjem (što je eksperimentima i dokazano), da bi se potom mogla pokazati ušteda energije u odnosu na najintenzivniji proces (mogućnost uštede energije upotrebom nižih parametara procesa je očigledna). Prekidi su izvođeni u odnosu „on/off“ (sušenje/relaksacija) od 60/15 minuta, 60/30 minuta, a jedan eksperiment je izveden i sa promjenljivim trajanjem prekida.

U svim slučajevima isključivao se samo grijač, a ventilator je ostavljen da radi. Važno je istaći da je u periodima relaksacije kod materijala niske efektivne difuzivnosti intenzitet sušenja bio nizak, a u pojedinim slučajevima je, usled dostizanja ravnotežnog sadržaja vlage M_e za datu temperaturu, dolazilo čak i do povećanja sadržaja vlage, jer je materijal u ovim uslovima skloniji apsorpciji vlage iz vazduha, ako je vlažnost već dovoljno niska. Ovo nije slučaj kod materijala sa visokom efektivnom difuzivnošću, ali detaljnija analiza ovih pojava rezervisana je za naredna poglavlja.

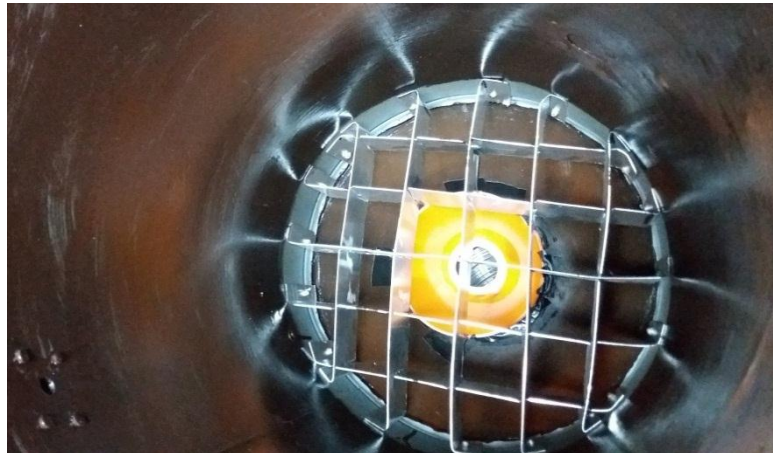
Konstruktivni detalji postrojenja

Na narednim slikama prikazani su konstruktivni detalji eksperimentalnog postrojenja. Na slici 2-11 a) i b) vidi se tzv. „equalizer“ profila brzine vazdušnog toka, slika 2-12 a) i b) prikazuje montažne

dijelove i unutrašnjost radnog dijela postrojenja, dok su na slici 2-13 a) i b) prikazan aksijalni ventilator sa grijačem, odnosno pontenciometar, respektivno. Na slikama 2-14 i 1-15 vidi se radni dio eksperimentalnog postrojenja nakon što je montiran i spreman za upotrebu. Može se vidjeti i vaga koja je priključena na računar radi predviđenog kontinualnog izvoza podataka u toku procesa.



a)



b)

Slika 2-11. „Equalizer“ toka vazduha: a) Spoljašnji pogled pred montažu; b) Unutrašnji pogled



a)



b)

Slika 2-12. Elementi u montaži: a) Vazdušni kanal i osnovica radnog dijela pred montažu; b) Radni dio postrojenja

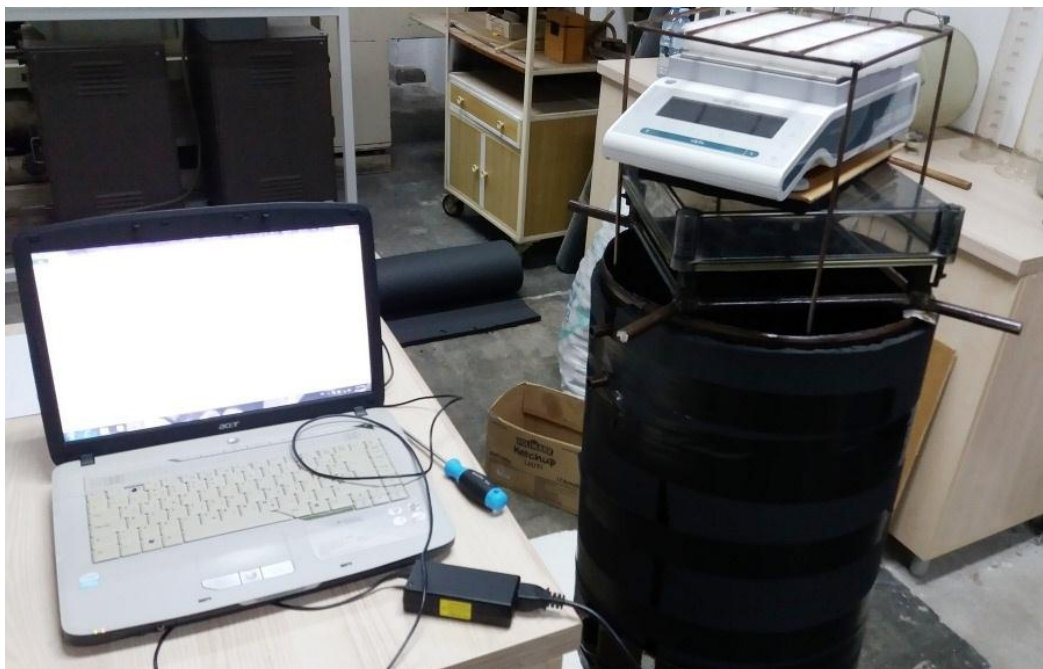


a)



b)

Slika 2-13. Priprema vazduha: a) Vazdušni kanal sa ventilatorom i grijačem; b) Potenciometar



Slika 2-14. Postrojenje u toku rada sa prikazom izvoza podataka



Slika 2-15. Postrojenje u toku rada

Način mjerenja i opis instrumenata

Pokretni dio postrojenja sastoji se od nosača sa četiri šipke na koje je pričvršćena mreža na koju se postavlja materijal, a koji se na drugoj strani kači na vagu. Ovaj dio postrojenja je fizički odvojen od radnog cilindra (nema fizičkog kontakta radnih elemenata). U slučaju da nosač dođe u kontakt sa zidom cilindra, vaga posredno registruje sile koje je sprječavaju da izveze stabilnu vrijednost.

Za određivanje mase korišćena je vaga proizvođača „Mettler Toledo AG“ iz serije „PHS models“ – tip PH204S sa ugrađenim „data loggerom“. Ova vaga ima mogućnost mjerenja mase do 4200 g, sa preciznošću od 0,01 g. Međutim, preciznost vage u radu je podešena (smanjena) na 0,1 g zbog problema u postizanju stabilne vrijednosti sa preciznošću od 0,01 g u radnim uslovima. Naime, strujanje vazduha je stvaralo turbulenciju u oblasti oko rešetke na kojoj je smješten materijal, što je uzrokovalo značajne oscilacije nosača. Pored pomenute preduzete mjere, urađeno je i sledeće: mreža je podignuta na sredinu visine šipki, da bi se smanjio moment u odnosu na krajnje tačke šipki; na krajevima šipki pričvršćena su dva tanka metalna profila koja su imala ulogu stabilizatora; na mjestu dodira nosača i vage ubačen je sloj pomenute izolacije da bi se zbog njene „vazdušaste“ strukture smanjile vibracije. Na slikama 2-16 – 2-18 su, po datom redoslijedu, prikazani termoanemometar u toku mjerenja sa sondom ubačenom u radni dio postrojenja kroz impulsni izvod, programabilni uređaj za prekid dovoda električne energije, vaga u toku rada i izvoza podataka, stabilizator pokretnog dijela postrojenja i pokretni dio sa ubačenim materijalom, prilikom pripreme za ubacivanje u radni dio postrojenja i materijal u radnom dijelu postrojenja u toku rada postrojenja.



Slika 2-16. Priprema vazduha: a) Mjerenje temperature i brzine vazduha; b) Programabilni uređaj za prekid dovoda struje



Slika 2-17. Displej na vagi u toku rada postrojenja



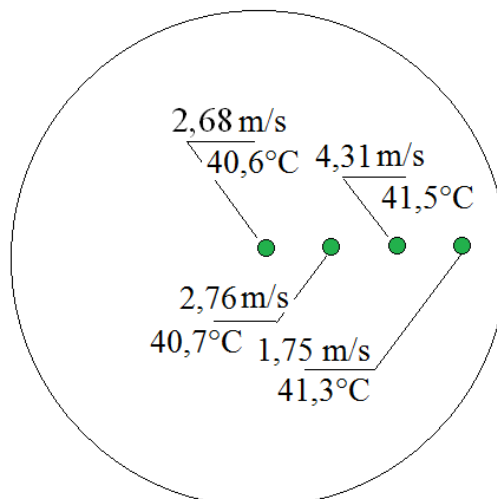
a)

b)

c)

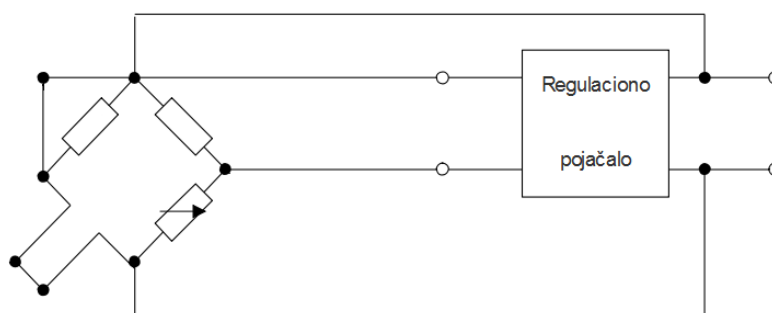
Slika 2-18. a) Stabilizacija pokretnog dijela postrojenja b) Pokretni dio postrojenja sa materijalom nakon pripreme; b) Uzorci u toku sušenja

Za mjerenje temperature i brzine vazduha korišćen je multifunkcionalni anemometar proizvođača „Testo“ – tip 435 sa sondom sa toplim krajem. Princip mjerenja brzine vazduha zasniva se na određivanju brzine hlađenja žice konvekcijom. Za očitavanje stabilnih rezultata mjerenja temperature, bilo je potrebno zadžati sondu u gasnoj struji najmanje 5 min. Određivanje brzine vaduha bilo je pak, nešto složenije. Naime, zbog velike osjetljivosti mjernog elementa, očitana brzina značajno varira (u nekim momentima i do 1 m/s, a najčešće oko 0,4 m/s). Praktična opcija za ovakvu situaciju jeste ugrađena funkcija „mean“ koja očitava srednju brzinu u mjernoj tački, u zadatom vremenskom periodu. Sonda je tako očitavala srednju brzinu u datoj tački u periodu od 1 min. Pored toga, brzina vazduha i temperatura vazduha određivane su na 4 različite tačke duž poluprečnika kružnog presjeka za koji se brzina vazduha određivala. Na slici 2-19 prikazan je poprečni presjek radnog dijela postrojenja sa mjernim tačkama, za slučaj sušenja u režimu 40°C / 3 m/s.



Slika 2-19. Izmjerene vrijednosti brzine i temperature vazduha po poluprečniku cilindra u toku probnog mjerenja

Pri kontinualnim režimima, temperatura i relativna vlažnost su mjerene sporadično, jer nije bilo značajne varijacije u okolnim uslovima, naročito u dnevnom periodu. Ipak, kod prvog izvođenja prekidnog režima obavljan je stalni nadzor promjene temperature, da bi se utvrdio tempo hlađenja i ponovnog zagrijavanja vazduha ispred sloja. Bilo je potrebno približno 10 min da bi se temperatura spustila na temperaturu okoline, tj. da se postrojenje ohladi dovoljno da zidovi ne utiču na povećanje temperature. Opet, bilo je potrebno oko 10 min da se postigne temperatura vazduha od 40°C. Na slici 2-20 prikazana je principijelna šema termoanemometra [5], a na slici 2-21 se mogu vidjeti termoanemometar i logger za određivanje relativne vlažnosti vazduha u radu.



Slika 2-20. Električna šema termoanemometra [5]

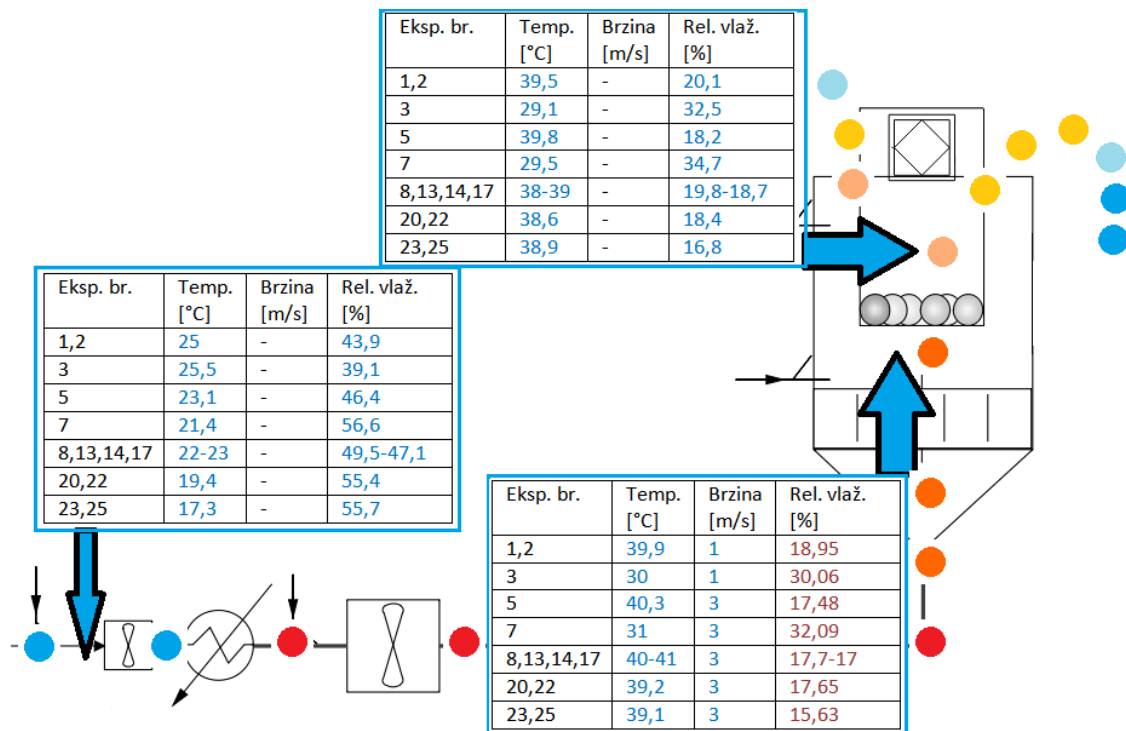


a)

b)

Slika 2-21. a) Termoanemometar i sonda sa toplim krajem; b) Termoanemometar i logger za relativnu vlažnost (na displeju se učitava ista temperatura vazduha čime se potvrđuje tačnost mjerenja)

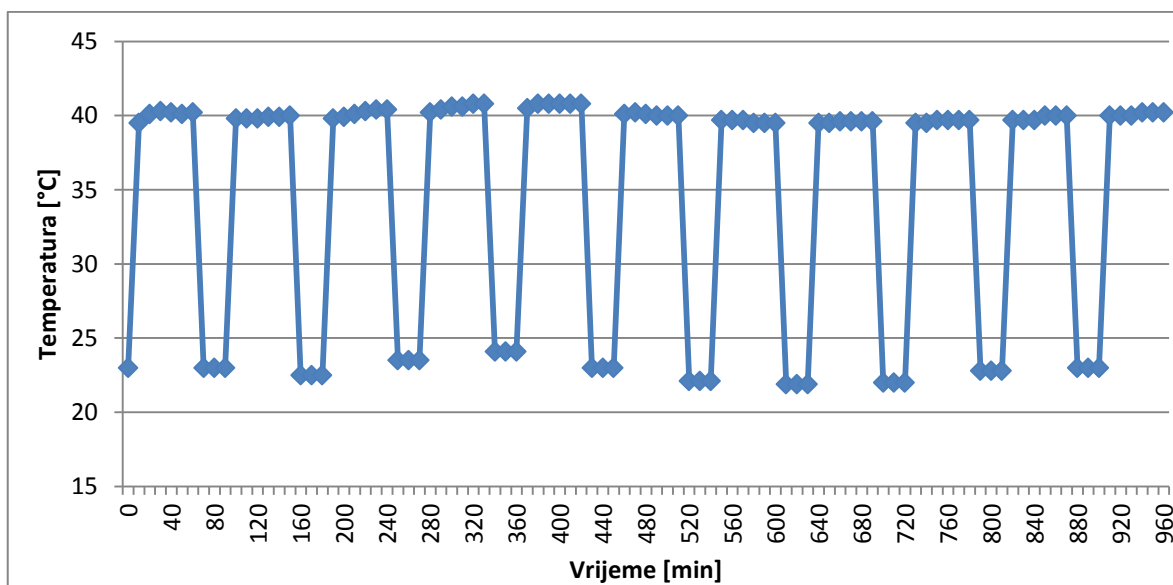
Na slici 2-22 prikazana je šema postrojenja sa svim raspoloživim parametrima vazduha, za sve izvedene eksperimente, da bi se na jednom mjestu ovi podaci objedinili i što jasnije istakli. Vrijednosti prikazane plavom bojom su direktno izmjerene, dok su vrijednosti bordo boje (relativna vlažnost ispred sloja) dobijene izračunavanjem na osnovu poznatih vrijednosti. Krugovi simbolišu kretanje vazduha, crveni simbolišu visoke temperature, dok plavi simbolišu niske temperature vazduha.



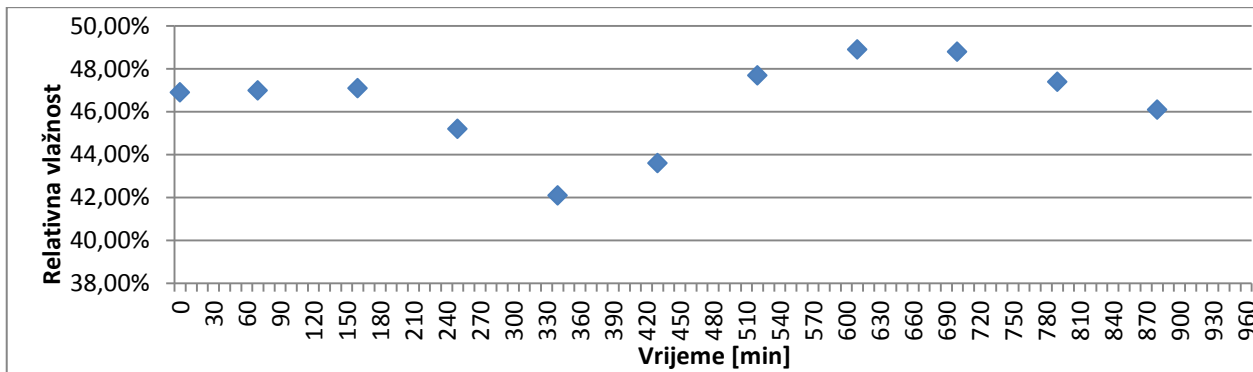
Slika 2-22. Relevantni parametri svih izvedenih eksperimenata

Mjerni uslovi kod prekidnih režima

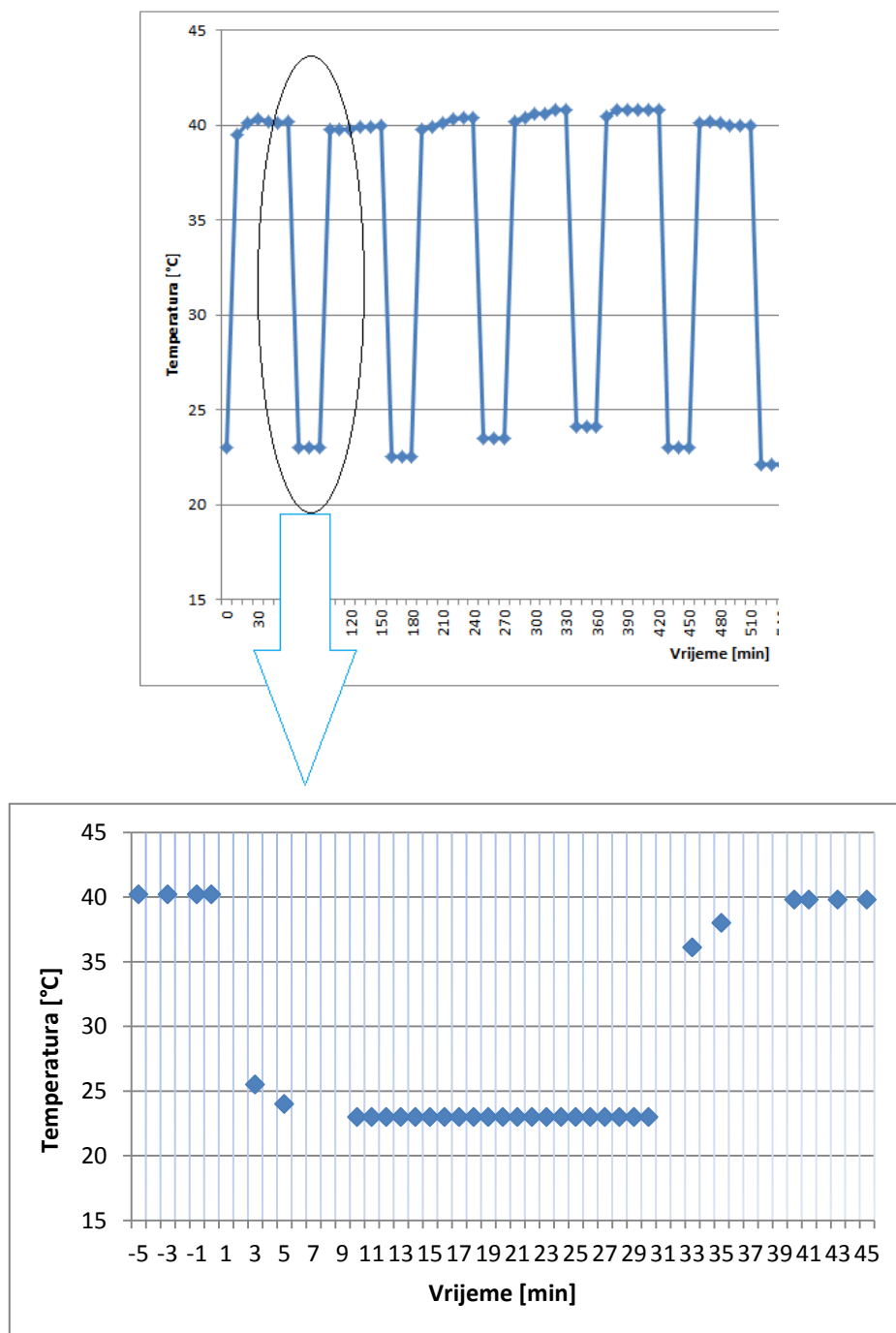
U narednom dijagramu, pored prikazanih izmjerenih temperatura u jednom prekidnom režimu, moguće je uočiti i tendenciju oscilacije temperature, kako ulazne ispred sloja, tako i okolne (ambijentalne). Partikularni režimski parametri nemaju uočljivog uticaja na ove oscilacije. Naime, ovi dijagrami prikazuju promjenu temperature kod jednog prekidnog režima koji je uzet kao reprezentativan. Smatraće se da i ostali eksperimenti sa prekidnim strujanjem vazduha podliježu varijaciji parametara na sličan način. Na slici 2-23 prikazane su očitane temperature vazduha tokom cijelog perioda trajanja ovog eksperimenta. Pored toga, na slici 2-24 prikazana je oscilacija relativne vlažnosti okolnog vazduha, a na slici 2-25 je dat detaljniji prikaz promjene temperature vazduha u toku jednog perioda prekida strujanja, tj. perioda relaksacije.



Slika 2-23. Izmjerene temperature u prekidnom režimu 60/30



Slika 2-24. Izmjerena relativna vlažnost okolnog vazduha u prekidnom režimu 60/30



Slika 2-25. Izmjerene temperature za jedan period relaksacije (negativne vrijednosti predstavljaju period do početka prekida)

2.4 Sušenje ostalih materijala

Sve što je prethodno izloženo, sa primjerima koji se odnose na orahe kao osnovni materijal, važi i za sušenje ostalih materijala. Svi ostali materijali sušeni su isključivo u kontinualnom režimu 40°C / 3 m/s, odnosno u prekidnom režimu 60/30. Kestenje i žirovi su sušeni sa i bez kore, krompiri isključivo bez kore, a bundeve su isječene na parčiće sličnih dimenzija. Na slici 2-26 može da se vidi bundeva prije i nakon procesa sušenja.



a)



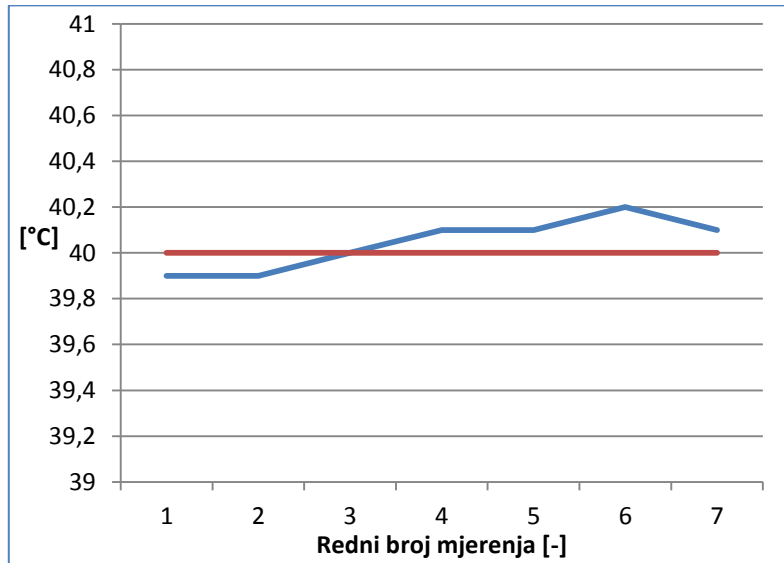
b)

Slika 2-26. Bundeva: a) Prije sušenja; b) Nakon sušenja

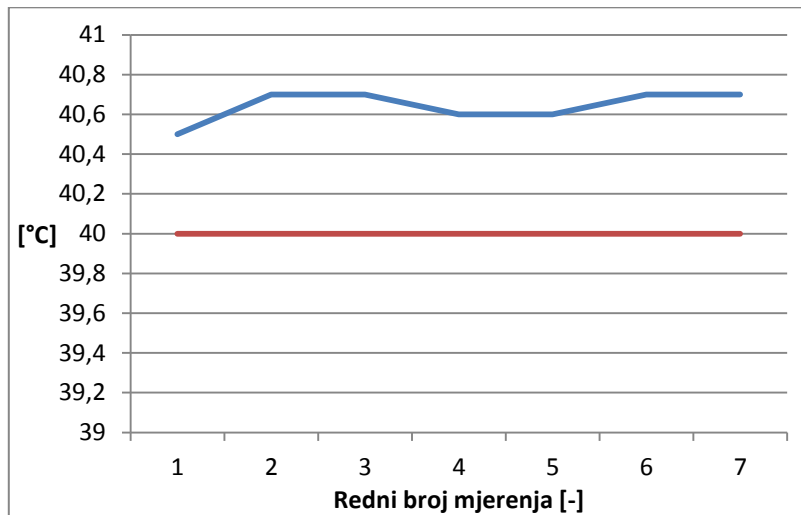
2.5 Greške mjerenja

Pretpostavljeni temperaturski režimi agensa od 40°C i 30°C u ustaljenim uslovima, zbog nemogućnosti precizne regulacije, nisu mogli da se održe stalno na tim vrijednostima. Ipak, odstupanje nakon postizanja ustaljenih uslova je iznosilo manje od $\pm 1^\circ\text{C}$. Nastojalo se da se kontrola temperature ponavlja što češće, u skladu sa mogućnostima, ali postoje i periodi u kojima ona nije obavljena, prema procjeni postojanja potrebe. Ovo znači da se iznijete tvrdnje odnose na periode u kojima je kontrola obavljena, pa se ne može u kvantitativnom smislu dokazivati da nije bilo dodatnih odstupanja. Ova odstupanja su uglavnom uzrokovana spoljašnjim fluktuacijama ambijentalne temperature. Na narednim slikama prikazani su grafici koji pokazuju izmjerena odstupanja u jednom od najpovoljnijih, kao i u najnepovoljnijem slučaju. Pomenute mjerne kontrole na osnovu kojih su dijagrami napravljeni, ponavljane su u nizu na svakih 2 min. Iz navedenih rezultata primjećuje se da je niža temperatura sušenja, tj. ona od 30°C, osjetljivija na poremećaje.

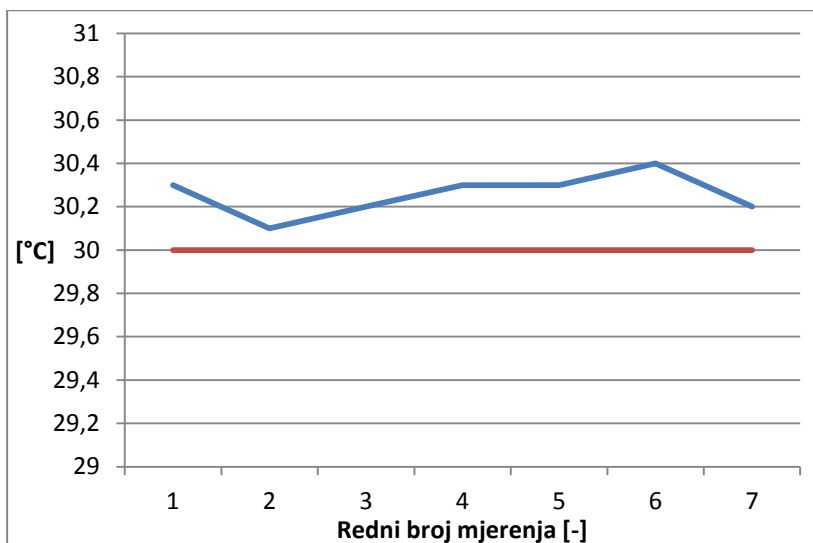
Na slikama 2-27 – 2-30 prikazana su temperaturska odstupanja u najpovoljnijim i najnepovoljnijim slučajevima za radnu temperaturu od 40°C i 30°C, respektivno. Crvena linija simbolizuje pretpostavljenu, a plava linija izmjerenu temperaturu. Specijalno, na slici 2-31 data je fotografija displeja na termoanemometru za najnepovoljnije slučajeve odstupanja.



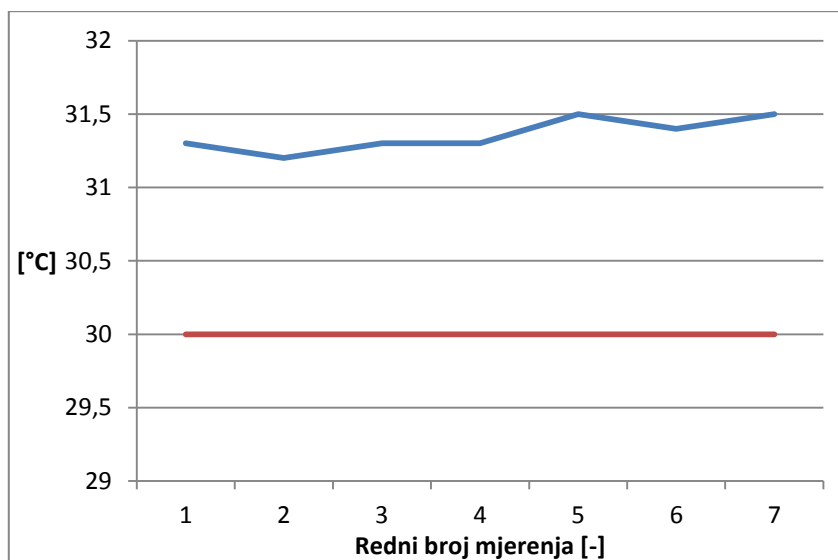
Slika 2-27. Temperatursko odstupanje za 40°C – najpovoljniji slučaj



Slika 2-28. Temperatursko odstupanje za 40°C – najnepovoljniji slučaj



Slika 2-29. Temperatursko odstupanje za 30°C – najpovoljniji slučaj



Slika 2-30. Temperatursko odstupanje za 30°C – najnepovoljniji slučaj



a)



b)

Slika 2-31. Nanepovoljniji slučajevi odstupanja za: a) 30°C; b) 40°C

Literatura

- [1] ***, AOAC International (2000) Official Methods of Analysis of AOAC International, 17th ed. AOAC International, Gaithersburg, 2000
- [2] Topić R., *Sušenje i Sušare*, SMEITS, Beograd, 2014.
- [3] Khir R., et al., Size and moisture distribution characteristics of walnuts and their components, *Food and Bioprocess Technology*, 6 (2013), pp 771-782
- [4] Costesèque P., et al., Thermodiffusion phenomena, *Comptes Rendus Mécanique* 339 (5) (2011), pp 275-279
- [5] Gvozdenc D., Kljajić M., Petrović J., *Merenje i regulisanje u termoprocesnoj tehnici*. FTN, Novi Sad, 2009.
- [6] Đaković D., *Modelovanje fenomena prenosa toplote i mase pri sušenju zrnastih materijala u sušari*, Doktorska disertacija, Novi Sad, 2011.
- [7] Coleman H.W., Glenn Steele W., *Experimentation and Uncertainty Analysis for Engineers*, John Wiley and Sons, USA, 1989.
- [8] Tripathy P.P., Kumar S., Determination of temperature dependent drying parameters for potato cylinders and slices during solar drying, *Energy Conversion and Management* 49 (2008), pp 2941–2948

Poglavlje 3

Modelovanje prekidnog procesa. Analiza sušenja oraha

3.1 Matematičko modelovanje

Problem matematičkog modelovanja procesa sušenja može da se klasifikuje na nekoliko načina. Tako možemo da napravimo razliku između modela sušenja u tankom i debelom sloju materijala, pokretnom ili nepokretnom sloju, sa različitim smjerovima nastrujavanja agensa na materijal, kao i prema tipu jednačina kojima je modelovanje izvedeno.

Uopšteno gledajući, proces sušenja opisuje se jednačinama prenosa toplote i mase, dakle parcijalnim diferencijalnim jednačinama parabolikog tipa. Za aproksimaciju oblika tijela kao sfernog (što u ovom radu jeste slučaj), koriste se sferne koordinate i u tom smislu problem može da se posmatra kao jednodimenzijski, što značajno pojednostavljuje proceduru rješavanja. Za jednačine difuzije mase kod sušenja, početni uslov predstavlja funkciju koja opisuje distribuciju vlage, tj. profil koncentracije po poluprečniku sfere (uglavnom se usvaja uniformna početna distribucija posmatranog svojstva). Granični uslov je zadat konvektivnim odvođenjem mase sa površine sfere, što se u matematičkoj fizici popularno naziva graničnim uslovom treće vrste ili mješovitim graničnim uslovom. Analogno važi i za provođenje toplote, pri čemu je temperatura uzeta kao osnovno svojstvo, umjesto koncentracije vlage.

Model je, dakle, u suštini zasnovan na jednačinama matematičke fizike, tj. prirodnim zakonima konzervacije mase i energije. Međutim, prilikom modelovanja procesa evidentna je zavisnost matematičkog modela od empirijskih parametara, pa se može konstatovati da se radi o nekoj vrsti sinteze "prirodnog" i fenomenološkog modela. Ovakvi modeli se u literaturi često nazivaju i „gray-box“ ili polu-empirijski modeli [1] (što insinuiraju da nisu ni „black-box“, ni „white-box“).

Daljom specifikacijom može se istaći da se radi o nestacionarnom, vremenski zavisnom modelu (a ne o stacionarnom). Model se inicijalno ne može nazvati niti „lumped“, niti distribuirani, jer se u zavisnosti od „skale“ posmatranja moraju primjeniti oba pristupa – modelovanje sušenja u tankom sloju, u pogledu kinetike procesa sušenja, jeste „lumped“ pristup, dok modelovanje distribucije temperature nije. Takođe, modelovanje sušenja u debelom sloju je po prirodi distribuirani model. Zbog svega iznesenog, izbjegnuta je rigorozna klasifikacija modela, pa je u radu prikazan postupak modelovanja procesa, a po potrebi su nap i digresije na prirodu modela koji je u fokusu.

3.2 Sušenje u tankom sloju

S obzirom da je tzv. sušenje u tankom sloju centralna tema analize eksperimentalnog postupka iz koga su dobijeni najvažniji parametri za konstituisanje modela sušenja u ovom radu, posebna pažnja biće posvećena njegovom opisu. Inherencija jednačine sušenja u tankom sloju sa daljim

postupkom modelovanja (bar onim pristupom koji je predložen u ovom radu), ovoj oblasti dodatno daje na važnosti.

Modeli sušenja u tankom sloju u osnovi su kinetički. Prema [2], sušenje u tankom sloju predstavlja proces u kome se sloj materijala koji se suši u potpunosti izlaže strujanju vazduha, a čija ukupna debljina ne bi trebala da bude veća od one koju obrazuju tri sloja partikula koje se suše. Za pomenuti eksperiment, zbog značajnih dimenzija svakog korišćenog materijala, pod tankim slojem podrazumijeva se jedan sloj materijala. Iako uslovljena dimenzijama materijala, ovakva situacija rezultovala je i određenim pogodnostima u izvođenju eksperimenta – zasvako izvršeno mjerenje bio je poznat tačan broj uzoraka kojisu ubačeni u sušaru, što olakšava upravljanje podacima mjerenja (npr. kod osrednjavanja mase i dimenzija uzorka).

Na početku matematičkog definisanja je važno istaći poznati model Likova [3], koji opisuje simultani prenos mase i toplote kod kapilarno-poroznih tijela:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 k_{11} M + \nabla^2 k_{12} T_g + \nabla^2 k_{13} P \quad (3-1)$$

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = \nabla^2 k_{21} M + \nabla^2 k_{22} T_g + \nabla^2 k_{23} P \quad (3-2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \nabla^2 k_{31} M + \nabla^2 k_{32} T_g + \nabla^2 k_{33} P \quad (3-3)$$

Difuzija vlage usled postojanja gradijenta pritiska generalno može da se zanemari kod sušenja poljoprivrednih proizvoda, prvenstveno zbog relativno niskih temperatura pri kojima se sušenje obavlja. Tako se prikazani sistem jednačina svodi na:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 k_{11} M + \nabla^2 k_{12} T_g \quad (3-4)$$

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = \nabla^2 k_{21} M + \nabla^2 k_{22} T_g \quad (3-5)$$

U većini slučajeva, sa dovoljnom preciznošću može da se zanemari i efekat termodifuzije, tj. difuzije uzrokovane temperaturskim gradijentima. Što su dimezije materijala manje, ova pretpostavka je pouzdanija. Zanemarujući tako i uticaj temperaturskog gradijenta, dobijamo konačno:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 k_{11} M \quad (3-6)$$

Ova jednačina može da se predstavi i u svom obliku pogodnom za rješavanje u sfernom koordinatnom sistemu kao:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \left(\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right) \quad (3-7)$$

Jednačina (3-6) istovjetna je Fikovom zakonu difuzije, koji se interpretira kao konstitutivna relacija. Oznaka k_{11} može da se zamjeni sa D kao uobučajenom oznakom za difuzivnost:

$$\frac{dM}{dt} = D \nabla^2 M \quad (3-8)$$

Prema [4], rješenje jednačine (3-8) za sferne koordinate može da se izjednači sa bezdimenzijskim sadržajem vlage MR :

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{n^2 \cdot \pi^2 \cdot D \cdot t}{r^2}\right) \quad (3-9)$$

Ova jednačina se najčešće pojednostavljuje tako što se uzima samo prvi član niza:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 \cdot D \cdot t}{r^2}\right) \quad (3-10)$$

Za pomenute eksperimentalne podatke, pokazalo se da ovaj, tzv. „difuzioni model“ (što bi značilo da je proizašao direktno iz „zakona difuzije“), ne ispunjava osnovni zahtjev – da pokazuje dobro poklapanje sa eksperimentalnim rezultatima. Drugim riječima, kriva sušenja dobijena ovim modelom, „fituje“ podatke sa niskim koeficijentom korelacije. Nešto bolji rezultati dobije se ako se uzme veći broj članova niza, ali nagib krive načelno nije odgovarajući.

Pokazalo se da tzv. Njutnov (prema nekoj literaturi Luisov – u daljem tekstu ipak Njutnov) model daje zadovoljavajuće rezultate sa visokim stepenom korelacije (determinacije). Zato, nije se ukazala potreba za ispitivanjem ostalih modela, budući da je Njutnov najjednostavniji, kako po svojoj konstrukciji tako i za dalju upotrebu. Analogija jednačine (3-9) sa Njutnovim modelom biće objašnjena u nastavku i ona je ključna kod identifikacije parametara iz eksperimentalnih rezultata. Ovdje je bitno istaći da je kod [5] za opisivanje procesa sušenja oraha kao najpovoljniji model istaknut Pejždov, pa su na osnovu njega identifikovani željeni parametri.

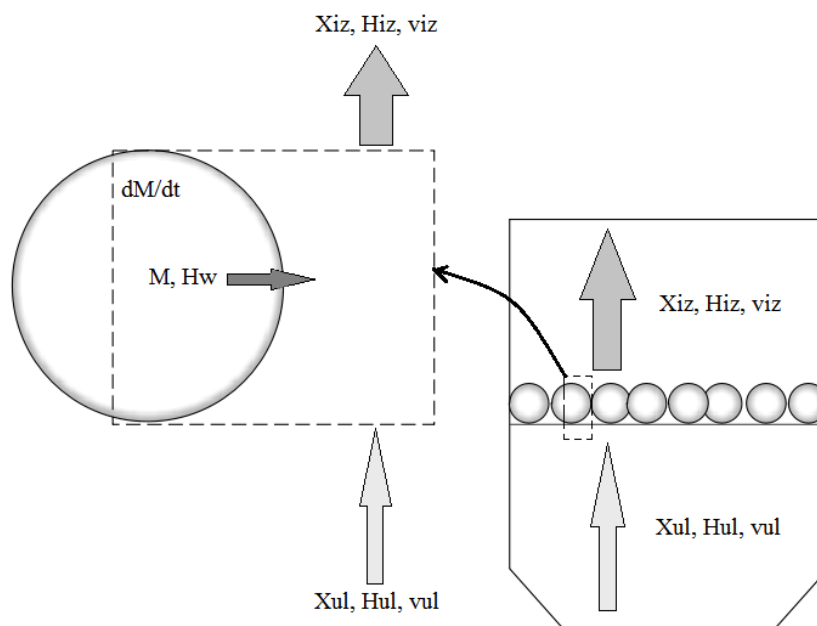
Za ovu grupu modela usvojen je naziv polu-empirijski.

Veliki broj relevantnih radova bavi se pregledom korišćenih modela za opisivanje sušenja u tankom sloju [6, 7]. Ovo jasno ukazuje na količinu obrađenih tema o sušenju u tankom sloju najrazličitijih materijala, pa se tako pojavio i veliki broj modela. Zbog obima, u ovom radu će pregled jednačina u tankom sloju biti simboličan i sveden tek na prikaz najkorišćenijih modela.

Tabela 3-1. Najčešće korišćeni modeli sušenja u tankom sloju [6, 7]

Tip modela	Jednačina
Njutn	$MR = \exp(-kt)$
Henderson i Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
Pejždž	$MR = \exp(-kt^n)$
Modifikovani Pejždžov model	$MR = \exp[-(kt)^n]$
Logaritamski	$MR = a \exp(-kt) + c$
Logaritamski sa dva člana	$MR = a \exp(-k_1 t) + b \exp(-k_2 t)$

Na slici 3-1 je prikazana osnovna ideja modelovanja jednačinom u tankom sloju. Ovakav pristup se u izvjesnom smislu može odnositi i na samo jedno tijelo koje se nalazi u sloju, pa otuda analiza difuzije za jedno sferno tijelo.



Slika 3-1. Analiza sušenja u tankom sloju

Modelovanje kinetike sušenja

Pored difuzionog modela i pomenutih kinetičkih modela, u postojećoj literaturi mogu da se nađu nekoliko pristupa modelovanja sušenja u tankom sloju, za različite materijale. Neki od istaknutih pristupa su modelovanje karakterističnom krivom ("Characteristic Curve"), ili od skora često primjenjivani "Reactive Engineering Approach - REA", koji je dao dosta dobre rezultate (vidjeti npr. [8]). Ipak, zbog pomenute jednostavnosti i neposrednosti koja odlikuje Njutnov kinetički model, kao i mogućnosti implementacije u model za debeli sloj koji će kasnije biti izložen, u ovom radu ostaje se pri pomenutom modelu. Prekidno sušenje je takođe modelovano kod [9], rigoroznom analizom difuzije vlage kroz porozni medijum. Kod [10] difuzija vlage u elipsoidu modeluje se upravo difuzionim modelom, pri čemu su korišćene krivolinijske koordinate umjesto Dekartovih. Model je riješen numeričkom metodom konačnih volumena, a pokazalo se da je dao preciznije rezultate u odnosu na jednodimenzijnsko modelovanje u sfernom koordinatnom sistemu. Polu-empirijski model prekidnog sušenja predstavljen je kod [11].

On se zapravo dobija kao rješenje obične diferencijalne jednačine prvog reda, sa zadatim početnim uslovom, oblika:

$$\frac{dM}{dt} = -k \cdot (M - M_e) \quad (3-11)$$

To je bio matematički pogled na problem. Fizički, ova jednačina predstavlja promjenu sadržaja vlage materijala u vremenu (od pomenutog možda zvuči intuitivnije termin brzina sušenja ili eng. „moisture removal rate“ ili "drying rate").

Opet, matematički gledajući, rješenje ove jednačine u granicama od početnog sadržaja vlage M_0 , pa do nekog tekućeg M , odnosno od početnog vremenskog trenutka pa do nekog tekućeg t , dobija se u obliku:

$$\ln \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = -k \cdot t \quad (3-12)$$

Fizički, prikazani odnos predstavlja bezdimenzijski sadržaj vlage koji će biti označen sa MR i tako se dobija Njutnov izraz:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-k \cdot t) \quad (3-13)$$

Dalje, potrebno je definisati i kinetičku konstantu k . Ona se, imajući u vidu analogiju jednačine (3-13) sa jednačinom (3-10), a umjesto difuzivnosti uvodeći veličinu poznatu kao „efektivna difuzivnost“, može predstaviti kao:

$$k = \frac{\pi^2 \cdot D_{eff}}{r^2} \quad (3-14)$$

Ideja je da se zapravo promjenom temperature i brzine strujanja utiče na vrijednost efektivne difuzivnosti, a ove veličine mogu da se dovedu u vezu jednačinom Arenijus tipa kao [9]:

$$D_{eff} = a \cdot v^b \cdot \exp\left(-\frac{c}{T}\right) \quad (3-15)$$

Iz najšire forme Arenijus jednačine koja može da se nađe kod [12], izostavljen je faktor prečnika sfernog tijela, jer se uzima, kao što je već rečeno, da je prečnik za sva tijela koja se suše jednak. Dakle, parametri a , b i c , predstavljaju empirijske konstante, v je brzina strujanja vazduha, a za relevantnu temperaturu je uzeta temperatura sredine sfernog tijela (oraha), kao glavni uticajni faktor na aktivaciju procesa migracije vlage iz unutrašnjosti prema površini tijela, kao i njenog isparavanja sa površine (ukratko – procesa sušenja).

Modelovanje distribucije temperature

Kod određivanja temperaturnog polja unutar tijela, prvenstveno zbog relativno niske gustine i toplotnog kapaciteta oraha, pretpostavlja se da unutrašnjost ne dostiže brzo temperaturu površine. Ova pretpostavka je potvrđena računanjem Biotovog broja za svaki vremenski korak trajanja procesa.

$$Bi = \frac{\bar{\alpha} \cdot r}{\lambda} \quad (3-16)$$

Proračun je urađen koristeći izraze za određivanje fizičkih karakteristika oraha (jednačine 3-23 do 3-31), a Matlab programski kod je dat u Prilogu. Pored toga, osrednjeni koeficijent prelaza toplote računa se prema obrascu:

$$\bar{\alpha} = \frac{\overline{Nu} \cdot \lambda}{2r} \quad (3-17)$$

a osrednjeni Nuseltov broj prema izrazu preuzetom iz [13] za sferna tijela:

$$\overline{Nu} = 2 + (0.43 \cdot Re^{1/2} + 0.06 \cdot Re^{2/3}) \cdot Pr_a^{0.4} \cdot \left(\frac{\mu_a}{\mu_s}\right)^{1/4} \quad (3-18)$$

Rejnoldsov broj se takođe računa prema poznatom obrascu:

$$Re = \frac{w_a \cdot 2r \cdot \rho_a}{\mu_a} \quad (3-19)$$

Pri čemu su Prantlov broj i viskoznost vazduha uzeti iz priručnika za poznate parametre vazduha [14]. Najmanji izračunati Biotov broj u nizu iznosio je $Bi=4,7$, a najveći $Bi=6,4$, što potvrđuje iznesenu pretpostavku. Prema tome, oraš mora biti analiziran kao tijelo sa nehomogenim temperaturnim poljem. Zato, da bismo simulirali promjenu temperature unutar oraš, koristi se približno rješenje jednačine prostiranja toplote u neustaljenom režimu. Bezdimenzijska temperatura u centru sfernog tijela, prema [13], može biti predstavljena kao:

$$\theta_0^* = C_1 \exp(-\zeta_1^2 Fo) \quad (3-20)$$

Koeficijenti C_1 i ζ su takođe uzeti iz [13]. Ova bezdimenzijska temperatura takođe može da se predstavi kao odnos:

$$\theta_0^* = \frac{T_\infty - T_i}{T_\infty - T} \quad (3-21)$$

Pri čemu Furijeov broj ima vrijednost:

$$Fo = \frac{\lambda \cdot t}{\rho \cdot C_p \cdot r^2} \quad (3-22)$$

Određivanje toplotnih i fizičkih svojstava oraš za proračun

Za izračunavanje fizičkih i toplotnih osobina oraš, preuzete su relacije iz [14]. Dobijene vrijednosti su slične onima koje su predstavljene kod [15]. Pošto se radi o malim temperaturnim razlikama, sve osobine su određene samo u funkciji promjene sadržaja vlage, a uticaj promjene temperature je zanemaren. Prilikom proračuna, svaka relacija je učestvovala u datom vremenskom trenutku sa trenutnim sadržajem vlage. Malab kod za određivanje trenutne vrijednosti pomenutih veličina, dat je u prilogu 1. Početne osobine, koje u toku proračuna variraju u zavisnosti od trenutnog sadržaja vlage, prikazane su u tabeli 3-2.

Tabela 3-2: Sastav i termofizičke osobine oraš

Osobina	Komponente u sastavu					
	Masti	Proteini	Vlakna	CH (ostali)	Minerali	Voda
ω [%]	64	14,83	4,98	14,04	1,93	prom.
φ [%]	74,48	11,87	4,27	9,29	0,84	prom.
C_p [kJ/(kgK)]	2,024	2,043	1,896	1,602	1,143	4,186
ρ [kg/m ³]	913,0	1314,3	1300,5	1589,7	2415,3	995,0
λ [W/(mK)]	0,1722	0,2122	0,2179	0,2391	0,3690	0,6150

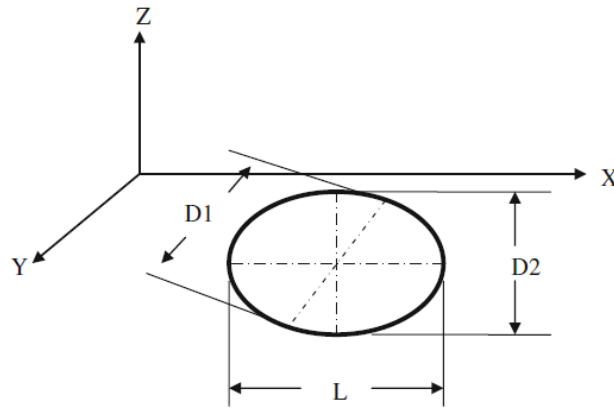
Prije nastavka, potrebno je definisati i način dimnezionisanja oraš, što će biti primjenjeno i na ostale materijale. Na slici 3-2 [16] prikazan je elipsoid u pravougaonom koordinatnom sistemu sa

pojedinačnim dimenzijama na osnovu kojih se računa osrednjeni poluprečnik elipsoida kao srednja geometrijska vrijednost:

$$r = \frac{(L \cdot D_1 \cdot D_2)^{0.333}}{2} \quad (3-23)$$

Specijalno može da se računa i „koeficijent sferičnosti“ elipsoida kao:

$$\Phi = \frac{(L \cdot D_1 \cdot D_2)^{0.333}}{L} \quad (3-24)$$



Slika 3-2. Dimenzionisanje uzorka [16]

Pošto će se svi navedeni materijali tretirati kao sfere u pogledu modelovanja, uzeće se da je sferičnost jednaka 1. Potrebno je naglasiti da su pomenute dimenzije za ostale materijale određene na isti način.

Toplotni kapacitet cijelog oraaha, kao funkcija sadržaja vlage, računa se kao:

$$Cp_{total}(M) = M_{wb} \cdot Cp_w + (1 - M_{wb}) \cdot Cp_s + \omega_a \cdot Cp_a \quad (3-25)$$

Toplotni kapacitet čvrste frakcije računa se kao suma parcijalnih toplotnih kapaciteta pomnoženih sa njihovim masenim udjelima:

$$Cp_s = \omega_{fat} \cdot Cp_{fat} + \omega_{protein} \cdot Cp_{protein} + \omega_{fiber} \cdot Cp_{fiber} + \omega_{CH} \cdot Cp_{CH} + \omega_{ash} \cdot Cp_{ash} \quad (3-26)$$

Uzimajući relaciju za poroznost iz [17], maseni udio vazduha određuje se kao:

$$\omega_a(M) = \varepsilon_a \frac{\rho_a}{\rho} = (0.6808 - 0.0278 \cdot M_{db}) \cdot \frac{1.2}{232.57 + 29.43 \cdot M_{db}} \quad (3-27)$$

Gustina čvrste frakcije može da se odredi kao suma parcijalnih gustina čvrstih komponenti pomnoženih sa njihovim zapreminskim udjelima:

$$\rho_s = \varphi_{fat} \cdot \rho_{fat} + \varphi_{protein} \cdot \rho_{protein} + \varphi_{fiber} \cdot \rho_{fiber} + \varphi_{CH} \cdot \rho_{CH} + \varphi_{ash} \cdot \rho_{ash} \quad (3-28)$$

Ukupna gustina se, kao funkcija sadržaja vlage zatim računa kao:

$$\rho_{total}(M) = \frac{1}{\frac{(1-\omega_a)}{\frac{1}{\frac{(1-M_{wb})}{\rho_s} + \frac{M_{wb}}{\rho_w}} + \frac{\omega_a}{\rho_a}}} \quad (3-29)$$

Toplotna provodljivost materijala računa se upotrebom tzv. "paralelnog modela" [14]. Prvo se određuje toplotna provodljivost čvrste frakcije, po sličnom principu kao kod već pomenutih osobina, kao suma parcijalnih toplotnih provodljivosti čvrstih komponenti pomnoženih sa njihovim zapreminskim udjelima:

$$\lambda_s = \varphi_{fat} \cdot \lambda_{fat} + \varphi_{protein} \cdot \lambda_{protein} + \varphi_{fiber} \cdot \lambda_{fiber} + \varphi_{CH} \cdot \lambda_{CH} + \varphi_{ash} \cdot \lambda_{ash} \quad (3-30)$$

Potom, prema pomenutom modelu, sa uključenim poroznim prostorom, tj. zapreminskim udjelom vlage i vazduha, ukupna toplotna provodljivost cijelog oraha određuje se kao:

$$\lambda_{total}(M) = (1-\varepsilon_a) \cdot [(1-\varphi_w) \cdot \lambda_s + \varphi_w \cdot \lambda_w] + \varepsilon_a \cdot \lambda_a \quad (3-31)$$

Na slici 3-3 prikazane su fotografije uzoraka prilikom određivanja njihovih dimenzija, pa se može vidjeti i karakteristično odstupanje dimenzija. Skala sa slike je u inčima.



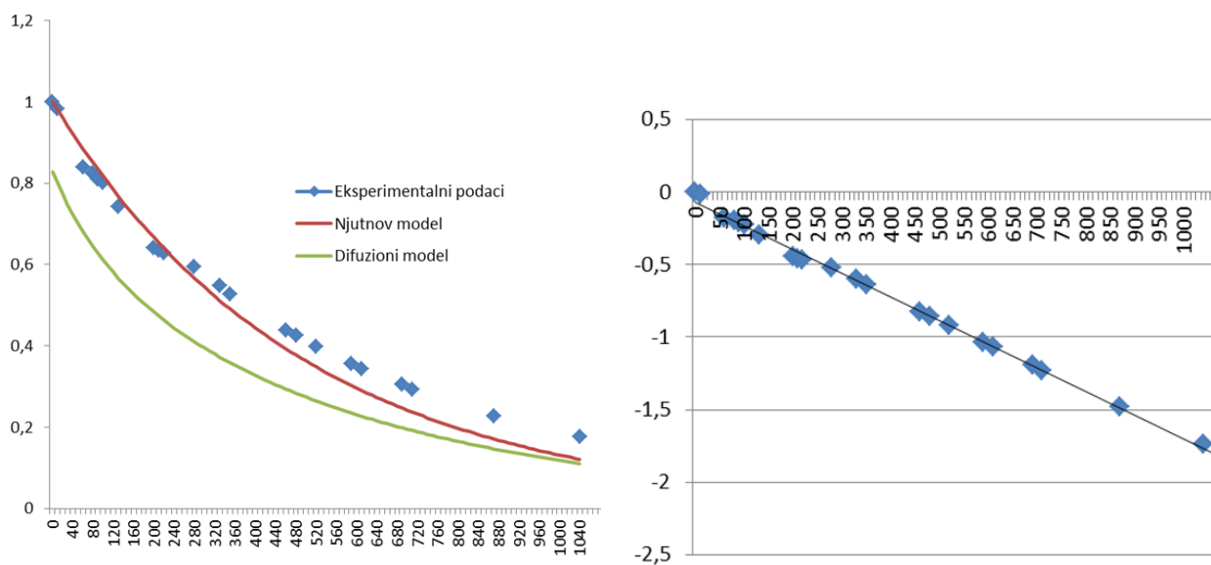
Slika 3-3. Fotografija uzoraka u opsegu dimenzija za čiju vrijedost je uzeta osrednjena vrijednost korišćena u proračunu

Prije nastavka, potrebno je naglasiti sa kakvim načinom izražavanja koncentracije vlage se operiše – u proračunu je korišćen ili bezdimenzijski sadržaj vlage MR , ili sadržaj vlage po suvoj osnovi (uglavnom za simulaciju sušenja u debelom sloju). Ovaj sadržaj vlage definiše se kao masa vlage po masi suvog ostatatka (koji podrazumijeva ostatak suve materije nakon što je odstranjena sva vlaga iz materijala osim one koja je hemijski vezana), a definisan je relacijom (2-3) iz prethodnog poglavlja.

Procedura rješavanja

Parametar k određuje se postupkom linearne regresije. Ako se prirodni logaritam bezdimenzijskog sadržaja vlage $\ln(MR)$, postavi kao funkcija vremena sušenja, prava koja se dobije imaće nagib

jednak vrijednosti k . Na slici 3-4 ilustriran je ovaj metod linearizacije (desna slika), dok je na lijevoj slici pored eksperimentalnih podataka i krive dobijene Njutnovim modelom, data i kriva dobijena difuzionim modelom, tj. jednačinom (3-9), da bi se prikazalo odstupanje koje se javlja prilikom upotrebe ovog modela.



Slika 3-4. Princip određivanja efektivne difuzivnosti materijala, na primjeru sušenja oraha pri brzini od 1 m/s i temperaturi 40°C

Slična procedura sa više detalja može da se vidi npr. kod [19]. Poznavajući prečnik oraha, iz jednačine (3-14) jednostavno se određuje D_{eff} .

Nakon određivanja D_{eff} za svaki od obavljenih eksperimenata, u cilju određivanja realcije u formi jednačine Arenijus tipa, koristi se tehnika nelinearne regresije [20]. Matlab programski kod koji je korišćen za ove potrebe može da se vidi u Prilogu.

Sa uključenim Fo , jednačina (3-20) se rješava takođe kroz svoju numeričku interpretaciju u kojoj indeks i predstavlja trenutni vremenski korak, a indeks $i+1$ naredni vremenski korak. Numerička forma za rješavanje, kao kombinacija jednačina (3-20), (3-21) i (3-22), može da se zapiše kao:

$$T_{i+1} = T_{\infty,i+1} - (T_{\infty,i+1} - T_i) \cdot C1_i \cdot \exp\left(\frac{-\zeta_i^2 \cdot \lambda_i \cdot t}{\rho_i \cdot C_{pi} \cdot r_i^2}\right) \quad (3-32)$$

Nakon određivanja relevantne temperature za svaki vremenski korak i dobijanja traženog oblika jednačine Arenijus tipa za izračunavanje efektivne difuzivnosti u funkciji pomenute temperature i brzine vazduha, može da se pristupi modelovanju promjene sadržaja vlage materijala u prekidnom režimu.

Prvenstveno, potrebno je formirati matricu koja sadži vrijednosti MR izračunate za svaku vrijednost D_{eff} , u svakom vremenskom koraku tokom trajanja procesa (uz napomenu da je svaki red u matrici vezan za jednu vrijednost D_{eff} , a svaka kolona u matrici predstavlja sledeći vremenski korak - u simulaciji je vremenski korak podešen na 10 minuta). Drugim riječima, jedan red u matrici sadži sve vrijednosti MR računane za jednu vrijednost D_{eff} , a svako sledeće mjesto, krećući se po kolonama, sadrži vrijednost MR u tom vremenskom trenutku, za isto D_{eff} :

$$\left[\begin{array}{cccc} MR_{t=t(0)}^0 = f(D_{eff0}) & MR_{t=t(1)}^0 = f(D_{eff0}) & \cdots & MR_{t=t(n-1)}^0 = f(D_{eff0}) & MR_{t=t(n)}^0 = f(D_{eff0}) \\ MR_{t=t(0)}^1 = f(D_{eff1}) & MR_{t=t(1)}^1 = f(D_{eff1}) & & & \\ \vdots & & \ddots & & \\ MR_{t=t(0)}^{n-1} = f(D_{effn-1}) & & & MR_{t=t(n-1)}^{n-1} = f(D_{effn-1}) & MR_{t=t(n)}^{n-1} = f(D_{effn-1}) \\ MR_{t=t(0)}^n = f(D_{effn}) & & & MR_{t=t(n-1)}^n = f(D_{effn}) & MR_{t=t(n)}^n = f(D_{effn}) \end{array} \right]$$

Za potrebe simulacije, formirana je matrica dimenzija 79x79, koja, računajući sa vremenskim korakom od 10 min, daje ukupno vrijeme sušenja od 800 min (početni trenutak od 0 min je takođe uključen). Proračun se, dakle, ponavlja 79 puta za 79 različitih vrijednosti D_{eff} . Ovaj izbor vremena sušenja i vremenskog koraka je proizvoljan i treba da se izabere u skladu sa potrebama proračuna i očekivanim vremenom trajanja procesa, a postupak (kao i programski kod koji je korišćen) je u tom smislu prilagodljiv.

Početno MR je jednako 1. Nakon što su izračunate sve vrijednosti u inicijalnoj matrici, kako se autor usudio da je nazove, mora da se pristupi proceduri rekalkulacije, tj. preračunavanja u nove vrijednosti. Kako je, gledajući sa racionalne osnove, jedno D_{eff} relevantno za jedan vremenski korak (ako po uzoru na te vremenske korake vršimo prekide u procesu), rekalkulacija se obavlja tako što, za početak, pomnožimo prvi element drugog reda sa drugim elementom prvog reda (koji predstavlja vrijednost MR nakon 10 minuta, tj. jednog vremenskog koraka). Ovo se radi zato što u narednom vremenskom koraku već imamo drugu vrijednost D_{eff} , ali početni uslov više nije isti – ne kreće se više od $MR=1$, već od prethodno izračunatog MR (ova okolnost mijenja vrijednost i svih ostalih članova reda, iako nam oni suštinski nisu potrebni za nastavak).

Ovaj postupak se dalje ponavlja kroz čitavu matricu po istom principu. Na kraju, uzimajući prvi i drugi element svakog reda (po opadajućem redoslijedu), formira se jedinstven red, koji zapravo predstavlja dobijenu krivu sušenja, tj. funkcionalnu zavisnost MR od vremena. Ovako može da se modeluje prekidni proces, ubacujući samo kao ulazni podatak temperaturu vazduha ispred sloja materijala. Izloženi metod je prikazan u sledećoj matrici:

$$\left[\begin{array}{cccc} MR_{t=t(0)}^0 = f(D_{eff0}) = 1 & MR_{t=t(1)}^0 = f(D_{eff0}) & \cdots & MR_{t=t(n-1)}^0 = f(D_{eff0}) & MR_{t=t(n)}^0 = f(D_{eff0}) \\ MR_{t=t(0)}^1 = f(D_{eff1}) \cdot MR_{t=t(1)}^0 & MR_{t=t(1)}^1 = f(MR_{t=t(0)}^1) & & MR_{t=t(n-1)}^1 = f(MR_{t=t(n-2)}^1) & MR_{t=t(n)}^1 = f(MR_{t=t(n-1)}^1) \\ \vdots & & \ddots & & \\ MR_{t=t(0)}^{n-1} = f(D_{effn-1}) \cdot MR_{t=t(1)}^{n-2} & MR_{t=t(1)}^{n-1} = f(MR_{t=t(0)}^{n-1}) & & MR_{t=t(n-1)}^{n-1} = f(MR_{t=t(n-2)}^{n-1}) & MR_{t=t(n)}^{n-1} = f(MR_{t=t(n-1)}^{n-1}) \\ MR_{t=t(0)}^n = f(D_{effn}) \cdot MR_{t=t(1)}^{n-1} & MR_{t=t(1)}^n = f(MR_{t=t(0)}^n) & & MR_{t=t(n-1)}^n = f(MR_{t=t(n-2)}^n) & MR_{t=t(n)}^n = f(MR_{t=t(n-1)}^n) \end{array} \right]$$

Ostaje da se provjeri pouzdanost modela, tj. da li on odgovara rezultatima koji su eksperimentalno dobijeni. Pouzdanost modela je ocjenjena nakon statističke obrade podataka, računajući koeficijent determinacije R^2 , srednju korijenu kvadratnu grešku $RMSE$ i tzv. "chi-squared" parameter χ^2 , za sve dobijene krive. Pomenuti parametri računati su korišćenjem sledećih relacija, respektivno [21, 22]:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{eksp},i} - \overline{MR}_{\text{eksp},i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{pre},i} - \overline{MR}_{\text{pre},i})^2} \quad (3-24)$$

$$RMSE = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{eksp,i})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3-25)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{eksp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - z} \quad (3-26)$$

3.3 Rezultati i analiza sušenja u tankom sloju

Primjedba autora je da nije svrsishodno (za praktične svrhe) koristiti kompleksniji model koji, iako u datom slučaju daje još bolji koeficijent korelacije, nepotrebno otežava dalju manipulaciju identifikovanim parametrima, naročito ako oni, kao u ovom radu, služe kao polazna tačka za modelovanje drugačijih procesa (prekidnih u ovom slučaju). U [2] se čak eksplicitno preporučuje korišćenje kompleksnijih modela tek ukoliko temperatura sušenja zrnastih materijala (koji se analiziraju na sličan način) pređe 40°C. Uostalom, dobri statistički pokazatelji nisu jedino mjerilo valjanosti modela, a jednostavnost u formi najčešće nagovještava univerzalnost u upotrebi.

Autori [23] tvrde da Njutnov model, uopšteno uzevši, “podcjenjuje brzinu na početku sušenja, a precjenjuje je na kraju”. Model takvih osobina isctavao bi funkciju konkavne prirode, što Njutnov svakako nije, pa bi se ovakva tvrdnja eventualno mogla uvažiti samo u potpuno obrnutom slučaju (ili je u pitanju sintaksička greška).

Ulazni podaci, zajedno sa dobijenim vrijednostima efektivnih difuzivnosti i rezultatima statističke obrade podataka za četiri eksperimenta na osnovu kojih je obavljena nelinearna regresija, dati su tabeli 3-3.

Tabela 3-3: Dobijene efektivne difuzivnosti i rezultati statističke obrade

Eksp. br.	Srednji prečnik oraha, r [mm]	Brzina vadauha, v [m/s] / temperatura, T [°C]	Ukupno vrijeme sušenja potrebno da se dostigne 8 [% d.b.], t [min]	Konstanta sušenja, k [1/min]	Efektivna difuzivnost, D_{eff} [m ² /min]	R^2	$RMSE$	χ^2
1	13,9	1 / 30	2010	0,00143	$2,80 \cdot 10^{-8}$	0,9920	0,0246	0,0006
2	14,0	3 / 30	1460	0,00190	$3,77 \cdot 10^{-8}$	0,9929	0,0371	0,0014
3	14,5	1 / 40	1120	0,00203	$4,33 \cdot 10^{-8}$	0,9947	0,0394	0,0016
4	13,9	3 / 40	790	0,00325	$6,36 \cdot 10^{-8}$	0,9903	0,0423	0,0024

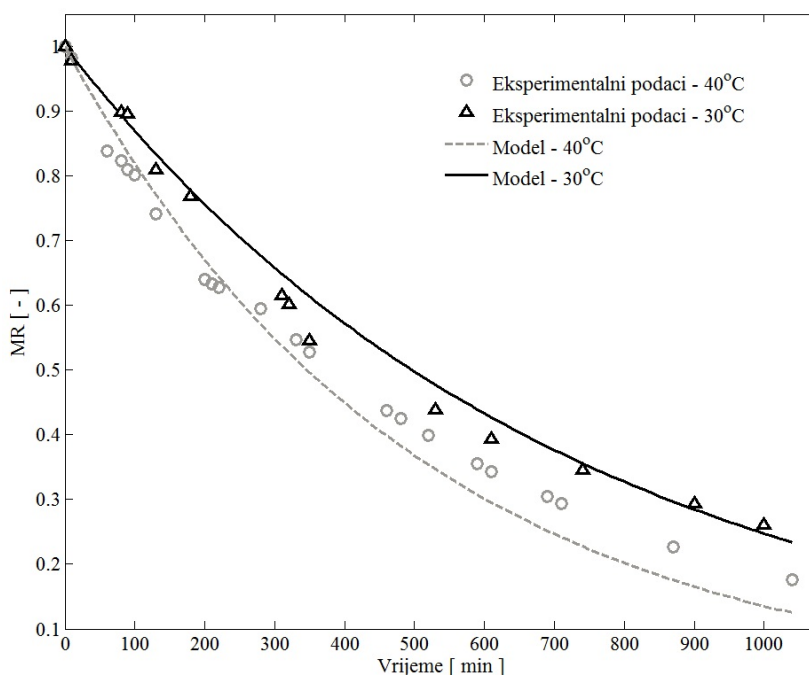
Na osnovu ovih podataka, dobijaju se potrebni koeficijenti za jednačinu (3-15), pa tražena relacija izražena u [m²/min] glasi:

$$D_{eff} = \left[9.653 \cdot 10^{-4} \cdot v^{0.327} \cdot \exp\left(-\frac{4413.67}{T}\right) \right] \cdot 60 \quad (3-33)$$

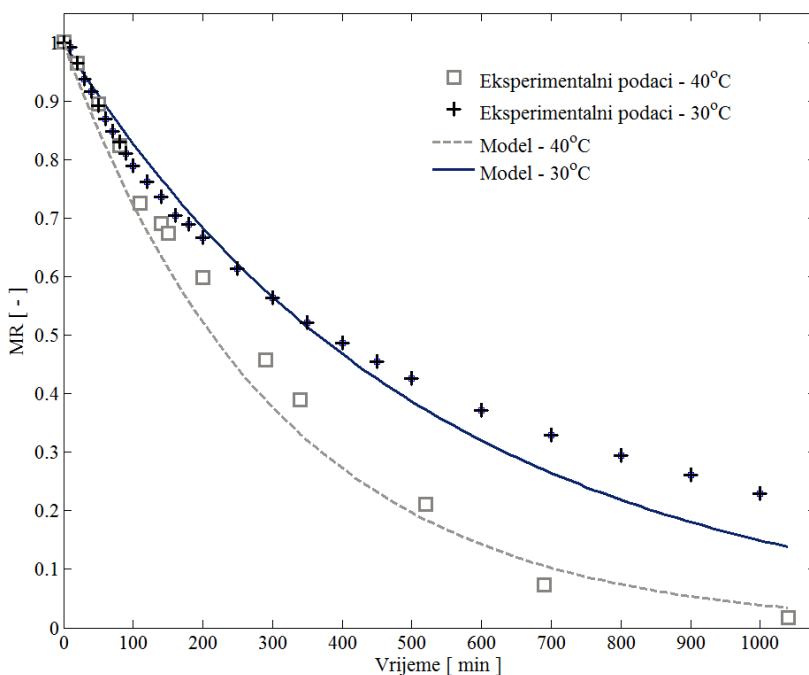
Jednačina (3-33) implicira da pri brzini od 0 m/s, nema difuzije vlage, što naravno nije tačno. Međutim, u poređenju sa brzinom sušenja koja je registrovana u eksperimentima, brzina spontanog sušenja u nekim ambijentalnim uslovima će biti mnogo manja, pa sa tog stanovišta ova implikacija

ima smisla. Prirodno, više temperature i brzine rezultovaće intenzivnijim procesom (ovo ipak, ne mora da važi bezuslovno – pri jako velikim brzinama strujanja i izraženo turbulentnim uslovima može da doći do slabljenja „kontakta“ agensa sa vlažnim materijalom, što neće povoljno uticati na proces).

Na slici 3-5 i slici 3-6 prikazani su rezultati eksperimentalnog mjerenja za kontinualne režime na 1 m/s i 3 m/s, respektivno. Rezultati su dati zajedno sa krivama sušenja koje su dobijene modelom. Rezultati statističke analize iz tabele 3-3 pokazuju da Njutnova jednačina daje zadovoljavajuće rezultate za relevantne eksperimentalne podatke.

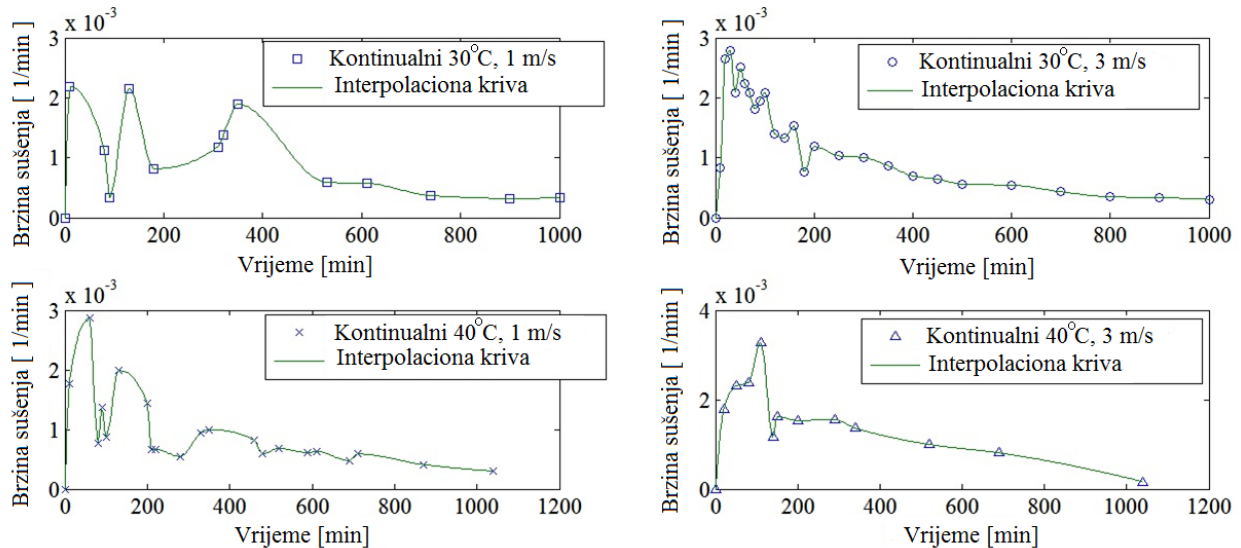


Slika 3-5. Eksperimentalni podaci i krive dobijene modelom za brzinu od 1 m/s

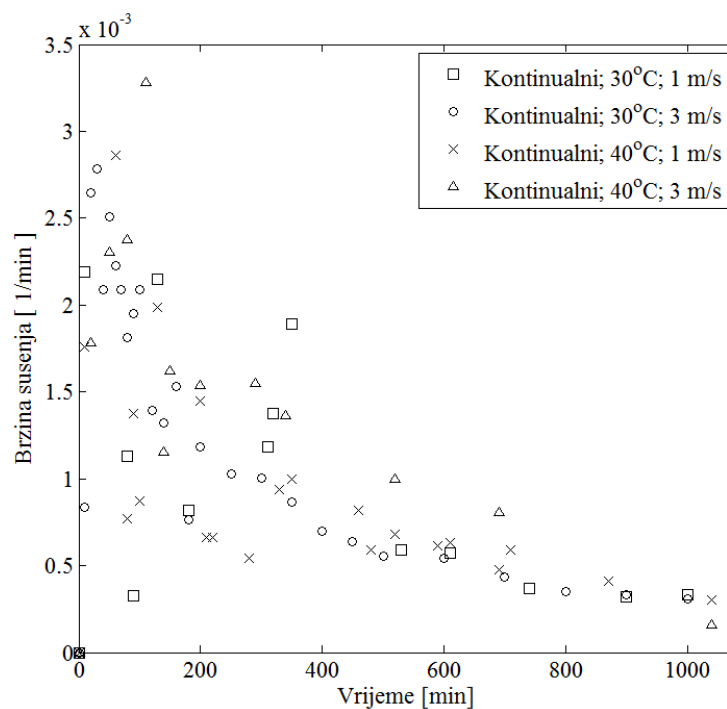


Slika 3-6. Eksperimentalni podaci i krive dobijene modelom za brzinu od 3 m/s

Slika 3-7 prikazuje brzine sušenja za kontinualne režime. Može se vidjeti da brzina sušenja fluktuiraju najviše u početku, a da u kasnijim periodima sušenja ova fluktuacija iščezava. Tendencija je generalno opadajuća (što se vidi na slici 3-8 sa podacima svih kontinualnih eksperimenata zajedno) tokom čitavog procesa, što na osnovu preporuke da se prekidni režimi uvode u periodu opadajuće brzine, opravdava njihovo uvođenje u bilo kojem trenutku [24].



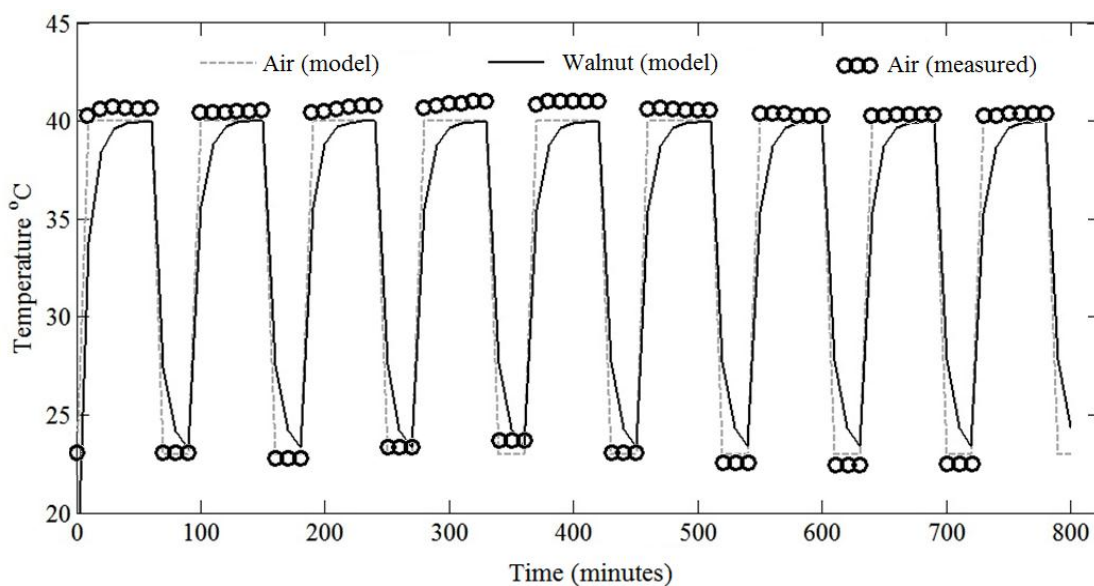
Slika 3-7. Brzine sušenja za kontinualno sušenje – pojedinačni slučajevi



Slika 3-8. Brzine sušenja za kontinualno sušenje – svi eksperimenti zajedno

Nakon što je dobijena jednačina (3-33), prekidni režim može biti modelovan pomenutim postupkom. U Matlab kod implementirana je funkcija temperaturske varijacije, zajedno sa rezultatima za nestacionarno zagrijavanje i hlađenje oraha, jednačina (3-32). Na slici 3-9 prikazana

je varijacija temperature vazduha prema modelu (isprekidana linija), ona koja je izmjerena u toku eksperimenta (kružni markeri) i temperatura centra oraha prema modelu (puna linija). Ovaj dijagram napravljen je za slučaj prekidnog sušenja oraha u režimu 60/30.



Slika 3-9. Promjena temperature tokom prekidnog sušenja

Može se vidjeti da se centar oraha ohladi za oko 80% od najveće temperaturske razlike za aproksimativno 15 min. Ovaj podatak je od velike važnosti za izbor vremena relaksacije. U tabeli 3-4 prikazani su parametri sušenja u prekidnim režimima, uključujući i krajni sadržaj vlage koji je postignut za predviđenih 800 min sušenja, kao i rezultate statističke analize poklapanja modela sa eksperimentalno dobijenim podacima.

Tabela 3-4: Parametri prekidnog sušenja i rezultati statističke obrade

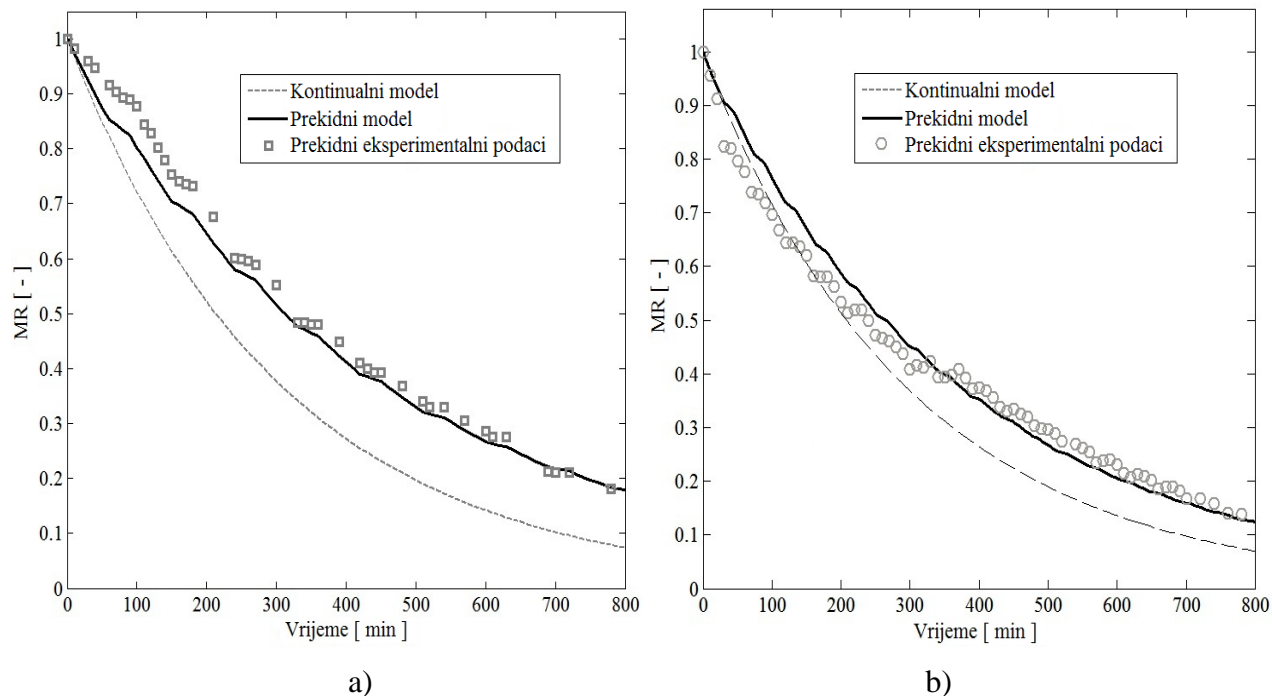
Exp.no.	Srednji prečnik oraha, r [mm]	Brzina vadauha, v [m/s] / temperatura, T [°C]	Vrijeme sušenja t [min]	Intermitencija (t_{on}/t_{off}) [min]	Krajnji sadržaj vlage M_f [% d.b.]	R^2	$RMSE$	χ^2
1	15,3	3 / varijab.	800	60/30	12,5	0,9955	0,0368	0,0013
2	13,9	3 / varijab.	800	30/15	7,18	0,9898	0,0350	0,0014
3	14,3	3 / varijab.	800	varijab*	8,00	0,9978	0,0257	0,0006

* Sledeći uklj./isklj. odnosi su korišćeni (svaki po 200 min): 45/15, 45/30, 45/45, 45/60.

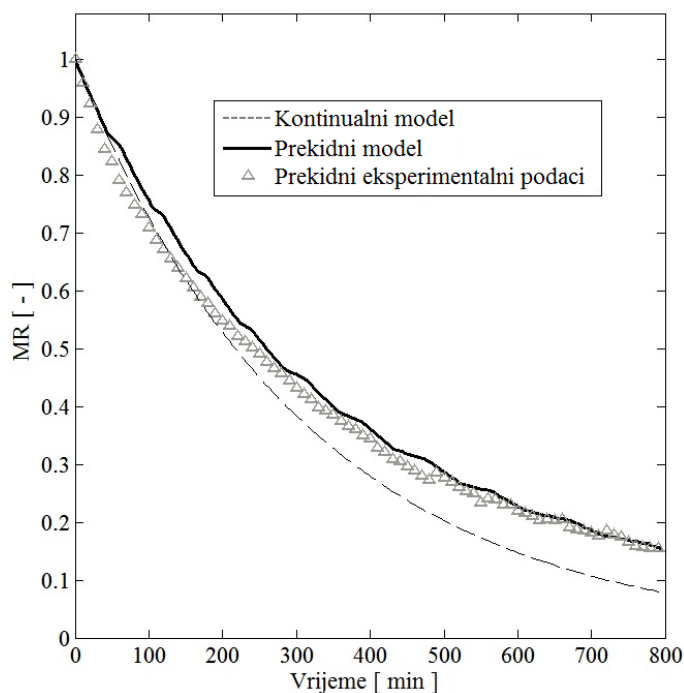
Na slici 3-10 dati su dijagrami sa eksperimentalnim podacima i krivama dobijenim modelom za prekidno sušenje sa brzinom vazduha od 3 m/s i promjenljivom temperaturom vazduha, pri režimu "60 min uključen / 30 min isključen" (u daljem tekstu "60/30") i "30 min uključen / 15 min isključen" (u daljem tekstu "30/15"), respektivno. Na slici 3-11 prikazan je isti dijagram za varijabilni režim, sa ciljem što šire potvrde modela.

Izbor intermitencije kao parametra procesa načelno je obavljen na proizvoljnoj bazi, imajući u vidu karakteristike materijala i očekivane ishode različitih intermitencijskih odnosa. Intermitencija (ili intermitencijski odnos) računa se kao odnos vremena relaksacije i za ovaj slučaj je uzet kao

$t_{\text{off}}/(t_{\text{on}}+t_{\text{off}}) = 1/3$. Ovo, dakle, znači da je period sušenja duplo duži nego peiod relaksacije (bez obzira da li je pitanju 60/30 ili 30/15 režim). Detaljna analiza uticaja različitih intermitencijskih odnosa data je kod [25], za sušenje upotrebom toplotne pumpe. Za orahe, kao materijal sa relativno niskom efektivnom difuzivnošću, ne očekuje se da se profil vlage brzo uniformiše, tj. povećanje vlažnosti površine odvija se previše sporo, da bi se birali periodi relaksacije koji su duži od perioda sušenja.



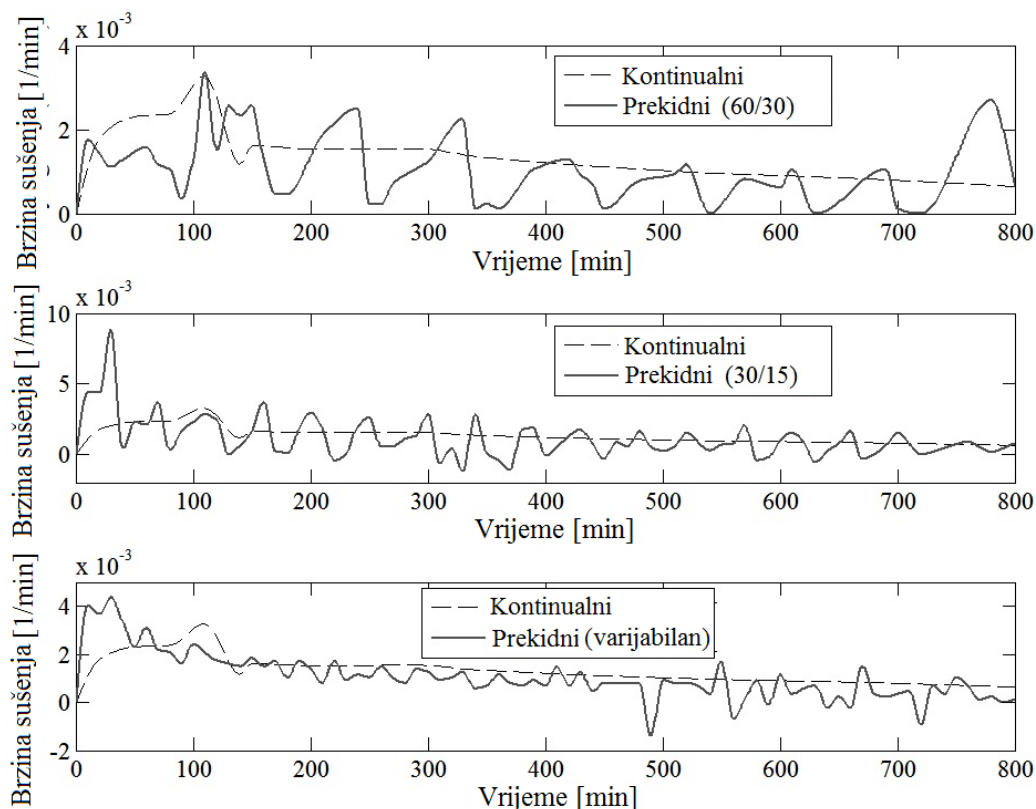
Slika 3-10. Eksperimentalni podaci i krive dobijene modelom za prekidno sušenje u režimu: a) 60/30; b) 30/15



Slika 3-11. Eksperimentalni podaci i krive dobijene modelom za prekidno sušenje u varijabilnom režimu

Može se primjetiti da krive sušenja dobijene objašnjenim postupkom modelovanja daju zadovoljavajuće poklapanje sa eksperimentalnim podacima. Najveće odstupanje javlja se u početku, što se može objasniti činjenicom da su brzine sušenja u početku veoma nepredvidive čak i kod kontinualnih režima. Prikazani pristup modelovanja postaje pouzdaniji nakon perioda u kome bi se i kod kontinualnog režima uspostavile brzine sušenja bez velikih fluktuacija.

Slika 3-12 prikazuje brzine sušenja u prekidnim režimima, kao i referentni kontinualni režim, da bi se moglo napraviti odgovarajuće poređenje.



Slika 3-12. Promjena brzine sušenja za sva tri režima tokom prekidnog sušenja

Prethodna slika pokazuje da je fluktuacija brzine sušenja za režim 60/30 nepovoljna, jer je kriva koja je ilustruje većinu vremena značajno ispod krive brzine sušenja u referentnom kontinualnom režimu. Situacija je mnogo povoljnija sa režimom 30/15, jer se kriva brzine sušenja održava veoma blizu referentne linije, odnosno raspodjela je takva da je ukupna površina koju obrazuje fluktuirajuća kriva približno jednaka sa gornje i donje strane referentne linije. Slična zapažanja mogu da se iznesu i analizirajući sliku 3-10.

Do potvrde ispravnosti ove pretpostavke, uzete i prilikom izbora trajanja perioda relaskacije, a isto tako i prethodno iznesenog zaključka, dolazi se analizirajući treću krivu, za varijabilan režim prekidnog sušenja. U prvom dijelu dijagrama, sa kratkim periodima relaskacije, kriva se održava blizu referentne. U kasnijim periodima sušenja, sa dužim periodima relaskacije, vrijednosti brzine sušenja su značajno ispod krive brzine za kontinualno sušenje.

Treba opaziti i to da se, u situacijama gdje su duži periodi relaksacije, ipak postižu visočiji “pikovi” krive, tj. brzina sušenja je značajno visočija nakon dužih perioda relaksacije, što je i očekivano. Ovo može biti važan podatak u slučaju da se nastoji izvesti proces sušenja sa malim brojem prekida.

3.4 Modelovanje sušenja u debelom sloju

Postavka modela

U cilju dobijanja rezultata sa što širom mogućnošću upotrebe, u ovom radu dat je i prijedlog primjene dobijenih rezultata na modelovanje i simulaciju procesa u debelom sloju. Za ovaj model prikazan je i prijedlog numeričke analize. Prije nego što se izloži postupak modelovanja i implementacije u programski jezik Matlab u kome je simulacija rađena, potrebno je spomenuti pod kojim pretpostavkama je postupak izveden. Pretpostavke su sledeće:

- Isti početni sadržaj vlage i početna temperatura za svako tijelo u debelom sloju;
- Iste termofizičke karakteristike, koje su pri tome i konstantne (ne mijenjaju se sa temperaturom i sadržajem vlage u materijalu, kao što je to uzeto kod modelovanja sušenja u tankom sloju);
- Sredina je izotropna, a svi pretpostavljeni slojevi koji figurišu u simulaciji imaju iste dimenzije i osobine. Zanemaruje se skupljanje materijala;
- Jedan sloj predstavlja jednu prostornu podužnu jedinicu (u smjeru od dna prema vrhu debelog sloja), a ne doslovno jedan sloj materijala (opravdano je smatrati da je materijal nemoguće homogeno rasporediti u jednom zamišljenom sloju, pa makar bio on i potpuno ujednačenih dimenzija);
- Strujanje vazduha je jednodimenzijnsko;
- Upravno na tok vazduha nema gubitaka toplote;
- Brzina strujanja vazduha kroz sloj opada u skladu sa zakonima strujanja kroz porozan sloj, što će biti detaljnije objašnjano;
- Latentna toplota isparavanja je funkcija sadržaja vlage.

U pogledu razmjene mase i toplote između tijela i okolnog vazduha, važeće su sve pretpostavke koje su uzete za sušenje u tankom sloju. Pored navedenog, neophodno je navesti i konkretne vrijednosti koje su uzete za simulaciju, uz napomenu da su uglavnom uzete srednje vrijednosti za date uslove. Ove vrijednosti prikazane su u tabeli 3-5.

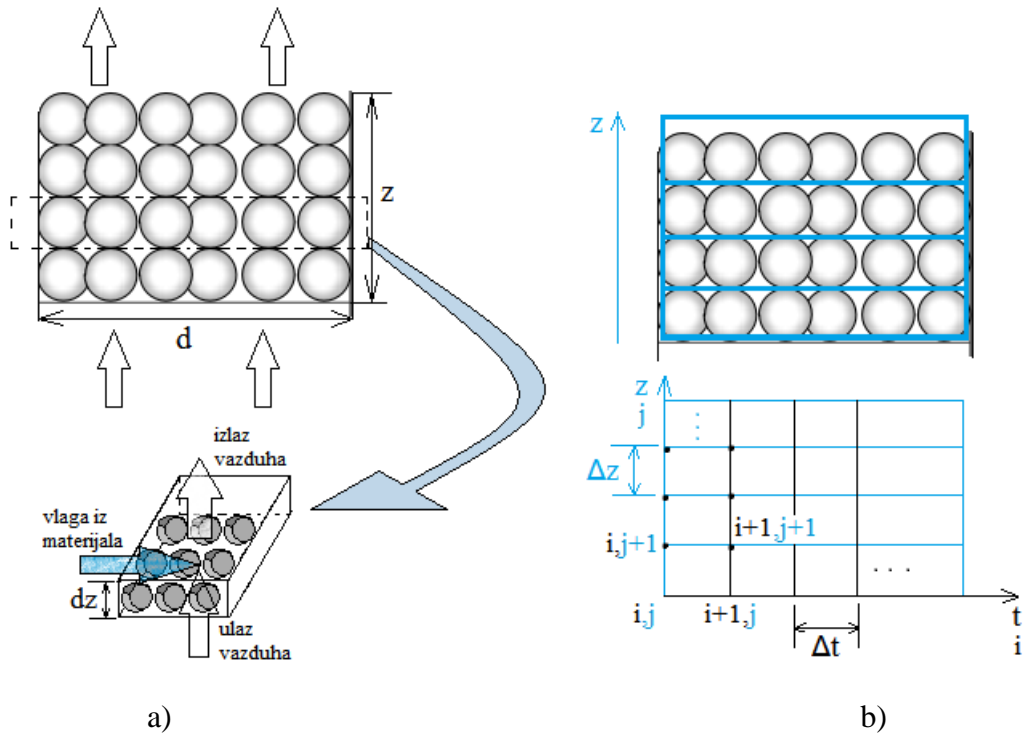
Tabela 3-5: Konstantne vrijednosti usvojene u proračunu za debeli sloj

Veličina	Oznaka	Vrijednost	Jedinica
Visina sloja	l	60	cm
Vremenski korak	Δt	1	min
Prostorni korak	Δx	1	min
Ukupno vrijeme procesa	t	1800	min
Efektivni poluprečnik oraha	r	15	mm
Specifična gustina sredine [17]	ρ_d	550	kg/m^3
Ulazna brzina vazduha	v	3	m/s
Viskoznost vazduha [21]	μ	$17,89 \cdot 10^{-6}$	$Pa \cdot s$
Poroznost sredine [17]	ε	0,58	-
Specifična toplota vazduha [18]	Cp_a	1008	J/kgK
Specifična toplota vodene pare [18]	Cp_w	1890	J/kgK
Specifična toplota oraha [14]	Cp_g	2090	J/kgK
Specifična toplota tečne vode [18]	Cp_l	4186	J/kgK
Atmosferski pritisak	p_a	101325	Pa
Parcijalni pritisak vodene pare u vlažnom vazduhu [18]	p_{s0}	7375	Pa
Početna relativna vlažnost	rh_0	40	%
Početna temperatura materijala	Tg_0	280	K
Početni sadržaj vlage materijala	$M_{0,d.b.}$	34	%

Kao što se vidi, neke veličine koje su kod modelovanja sušenja u tankom sloju figurisale kao funkcije trenutnog sadržaja vlage, ovdje su, zbog kompleksnosti modela debelog sloja, uzete kao konstante. Različiti pristupi modelovanju u debelom sloju mogu da se nađu kod [26]. Neki od najznačajnijih modela za razmjenu energije medijuma sa granulastim materijalima u poroznom sloju (što može biti primjenjeno na sušenje, zamrzavanje i sl.) dati su kod [27 - 29]. Autori [30] izložili su model sušenja u debelom sloju zasnovan na jednačini sušenja u tankom sloju.

Sada je moguće prikazati postupak modelovanja parcijalnim diferencijalnim jednačinama (sličan postupak izložen je kod [31] za modelovanje sušenja zrnastih materijala u debelom sloju pri konstantnim parametrima, odakle je, uz izvjesne modifikacije, osnovna ideja i preuzeta).

Na slici 3-13a) je šematski prikazano modelovanje u debelom sloju, a na slici 3-13b) numerička mreža za diferencne jednačine korišćene u simulaciji, kao odgovarajuće zamjene za diferencijalne jednačine. Po srijedi je, dakle, numerički metod konačnih razlika, gdje z predstavlja prostornu komponentu, a t vremensku komponentu procesa. Shodno prikazanoj šemi, j predstavlja vremenski korak (pa je $j+1$ naredni vremenski korak), a i prostorni korak (pa je $i+1$ naredni prostorni korak).



Slika 3-13: a) Bilansiranje jednog sloja (elementa) u višeslojnoj sredini; b) Grafički prikaz numeričke šeme

Bilansiranje mase vlage

Prema bilansu mase vlage za jedan sloj (uz podsjećanje da se radi o jednodimenzijском strujanju vazduha po njegovoj visini, tj. vertikalnoj komponenti), razlika mase vlage na visini z i na visini $z+dz$ jednaka je masi vlage koja je preuzeta od vlažnog materijala:

$$G_a X(z+dz) - G_a X(z) = -\rho_d \frac{\partial M}{\partial t} dz \quad (3-34)$$

Ekspanzijom u Tejlorov red i zanemarujući “više“ članove reda, dobija se:

$$G_a \frac{\partial X}{\partial z} dz = -\rho_d \frac{\partial M}{\partial t} dz \quad (3-35)$$

odnosno:

$$G_a \frac{\partial X}{\partial z} = -\rho_d \frac{\partial M}{\partial t} \quad (3-36)$$

Zapisano u formi konačnih razlika:

$$\frac{\Delta X}{\Delta z} = -\frac{\rho_d}{G_a} \left(\frac{\Delta M}{\Delta t} \right) \quad (3-37)$$

Usvoji li se da je:

$$M_{(i+1,j)} - M_{(i,j)} = \Delta M \quad (3-38)$$

može se izraziti apsolutna vlažnost u narednom vremensko-prostornom koraku u odnosu na prethodni kao:

$$X_{(i+1,j+1)} = X_{(i+1,j)} - \frac{\rho_d}{G_a} \left(\frac{M_{(i+1,j)} - M_{(i,j)}}{\Delta t} \right) \Delta z \quad (3-39)$$

pri čemu Δt i Δz predstavljaju vremenski, odnosno prostorni korak koji se koristi za proračun.

Očigledno, proračun je dalje nemoguće izvesti bez poznatog podatka o vrijednosti sadržaja vlage (za podsjećanje, koristi se sadržaj po suvoj osnovi) u narednom vremenskom koraku. Drugačije rečeno, neophodno je poznavati i kinetiku sušenja jednog sloja, na osnovu koje se može računati sadržaj vlage istog sloja posle nekog vremena. Ovakva situacija nagovještava da je trenutak za uvođenje jednačine sušenja u tankom sloju, kako je to već prethodno prikazano. Sada, u obzir moraju da se uzmu i vlažnost prethodnog sloja, kao i njegov kinetički koeficijent u datom vremenskom trenutku.

Krenuvši od pomenutog Njutnovog modela:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -k(M - M_e) \quad (3-40)$$

i predstavivši ga u integralnoj formi kao:

$$\frac{M_{(i)} - M_{e(i)}}{M_0 - M_{e(i)}} = \exp(-k_{(i)} t_{eq}) \quad (3-41)$$

za svaki naredni vremenski korak, mora u obzir da se uzme i vrijeme koje je proteklo od početka procesa, a kome odgovara početni sadržaj vlage. To vrijeme se kod [32] naziva ekvivalentno vrijeme t_{eq} , pa će taj naziv biti usvojen i ovom prilikom. Tako može da se zapiše da je u nekom vremenskom koraku $i+1$:

$$\frac{M_{(i+1)} - M_{e(i)}}{M_0 - M_{e(i)}} = \exp(-k_{(i)} (t_{eq} + \Delta t)) \quad (3-42)$$

Eliminacijom t_{eq} iz jednačina (3-41) i (3-42) dobija se:

$$M_{(i+1)} = M_{(i)} \exp(-k_{(i)} \Delta t) + M_{e(i)} (1 - \exp(-k_{(i)} \Delta t)) \quad (3-43)$$

Ostaje da se odredi kinetički koeficijent k u trenutku i , koji se računa iz jednačine (3-14), a efektivna difuzivnost se prethodno dobija iz jednačine (3-33), koju ovdje takođe možemo predstaviti u odgovarajućem vremenskom trenutku kao:

$$D_{eff,i} = \left[9.653 \cdot 10^{-4} \cdot v_i^{0.327} \cdot \exp\left(-\frac{4413.67}{T_i}\right) \right] \cdot 60 \quad (3-44)$$

Podrazumijeva se da je ulazna temperatura vazduha poznata (bila ona konstantna ili promjenljiva), a svaka sledeća temperatura se računa na način koji će biti izložen u nastavku.

U međuvremenu, ostaje još da se odredi brzina strujanja vazduha u svakom sloju, na čemu se valja još malo zadržati, bez obzira na činjanicu da brzina nije tako uticajan faktor kao temperatura (što se vidi prema eksponentu u jednačini (3-33)).

Strujanje vadauha kroz porozan sloj. Forhajmerova jednačina

Naime, ovdje se radi o strujanju kroz porozan sloj, pa će prema preporuci iz [33] kao relevantna biti uzeta “čeona” brzina (eng. “superficial velocity”). Ona se, prema Darsijevom zakonu može direktno dovesti vezu sa padom pritiska, pri čemu je potrebno poznavati i permeabilnost sloja, kao i viskoznost fluida koji struji kroz sloj [34]. Međutim, Darsijev zakon je generalno primjenljiviji na manje brzine strujanja, pa se u ovakvim prilikama radije koristi Forhajmerova jednačina (negdje nazvana Darsi-Forhajmerov zakon), koja predstavlja neku vrstu nadograđenog Darsijevog zakona, a uključenim inercijalnim komponentama toka. Inercijalni član u jednačini se zato i naziva Forhajmerov član. Kako god, i kod ovog pristupa neophodno je poznavati permeabilnost (propusnost) sloja, koja bi morala da se određuje eksperimentalno.

Pristup koji je odabran pri izradi ovog rada je sledeći – uzete su tri jednačine:

Ergunova jednačina [35],

$$f_p = \frac{150}{Re_p} + 1,75 \quad (3-45)$$

Rejnoldsov kriterijum [35],

$$Re_p = \frac{d \cdot V \cdot \rho}{(1 - \varepsilon) \cdot \mu} \quad (3-46)$$

i predložena relacija za izračunavanje koeficijenta trenja u poroznim slojevima [36],

$$f_p = \frac{\Delta p}{L} \cdot \frac{d}{V^2 \cdot \rho} \cdot \left(\frac{\varepsilon^3}{1 - \varepsilon} \right) \quad (3-47)$$

Na osnovu poznatog pada pritiska u sloju oraha kod [37] po jednom metru visine i poznate poroznosti sloja (uz naravno poznate termofizičke osobine vazduha), kombinacijom prikazanih jednačina dobija se kvadratna jednačina u kojoj kao nepoznata veličina figuriše upravo čeona brzina:

$$\frac{1}{L} \cdot \frac{\rho}{d} \cdot \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \right) \cdot v^2 - \frac{d \cdot \rho}{150 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \mu} \cdot v - \frac{1}{1,75} = 0 \quad (3-48)$$

U ovoj jednačini, jedina promjenljiva, izuzev brzine, je pad pritiska, pa se po svakoj novoj visini sloja brzina nanovo računa. Naravno, ovakva jednačina daje dva rješenja, jedno sa pozitivnim a jedno sa negativnim predznakom, pa se uzima pozitivan rezultat za dalji proračun. Pored toga, kod računanja brzine vodilo se računa i o tome da je ulazna brzina vazduha konstantna i poznata (3 m/s u većini slučajeva), pa su uključene samo one vrijednosti pada pritiska koje daju brzine manje od pomenute, jer je neopravdano očekivati povećanje brzine u ovakvom poroznom sloju.

Bilansiranje energije

Po istom principu kao kod bilansa mase vlage, analizira se i bilans energije vlažnog vazduha, prema kome će energija koja ulazi u kontrolnu zapreminu ograničenu visinama z i $z+dz$ biti:

$$Ga \left[(C_{pa} + C_{pw} X(z)) T_a(z) + L_a X(z) \right] \quad (3-49)$$

a energija koja ga napušta:

$$Ga \left[(C_{pa} + C_{pw} X(z+dz)) T_a(z+dz) + L_a X(z+dz) \right] \quad (3-50)$$

a njihova razlika jednaka je razlici konvektivno predate toplote vlažnom materijalu u sloju i toplote koja je preuzeta isparavanjem vlage sa površine vlažnog materijala:

$$\begin{aligned} & Ga \left[(C_{pa} + C_{pw} X(z+dz)) T_a(z+dz) + L_a X(z+dz) \right] - Ga \left[(C_{pa} + C_{pw} X(z)) T_a(z) + L_a X(z) \right] = \\ & = -h_{cv} (T_a - T_g) dz - \left(\rho_d C_{pw} \frac{\partial M}{\partial t} T_g + \rho_d \frac{\partial M}{\partial t} L_a \right) dz \end{aligned} \quad (3-51)$$

Opet, primjenjujući ekspanziju u Tejlorov red i zanemarujući ostale članove, dobija se:

$$\begin{aligned} & Ga \left[C_{pa} \frac{\partial T_a}{\partial z} dz + C_{pw} T_a \frac{\partial X}{\partial z} dz + C_{pw} X \frac{\partial T_a}{\partial z} dz + L_a \frac{\partial X}{\partial z} dz \right] = \\ & = -h_{cv} (T_a - T_g) dz - \left(\rho_d C_{pw} \frac{\partial M}{\partial t} T_g + \rho_d \frac{\partial M}{\partial t} L_a \right) dz \end{aligned} \quad (3-52)$$

Prema [38], volumetrijski koeficijent prelaza toplote za porozne slojeve sa partikulama sfernog oblika, prilagođen jedinicama SI sistema, računa se kao:

$$h_{cv} = \frac{12 \cdot V \cdot T^{0,3}}{d^{1,35}} \cdot 0,07 \quad (3-53)$$

Ako se jednačina (3-36) napiše kao:

$$\left(\frac{\partial X}{\partial z} \right) = - \left(\frac{\rho_d}{G_a} \right) \left(\frac{\partial M}{\partial t} \right) \quad (3-54)$$

a zatim ubaci u jednačinu (3-52), dobija se:

$$\begin{aligned} & Ga (C_{pa} + C_{pw} X) \frac{\partial T_a}{\partial z} - C_{pw} \rho_d \frac{\partial M}{\partial t} T_a - \rho_d \frac{\partial M}{\partial t} L_a = \\ & = -h_{cv} (T_a - T_g) - \rho_d C_{pw} \frac{\partial M}{\partial t} T_g + \rho_d \frac{\partial M}{\partial t} L_a \end{aligned} \quad (3-55)$$

Eksplisitno izražena promjena temperature po visini sloja sada može da prikaže kao:

$$\frac{\partial T_a}{\partial z} = \frac{\left(-h_{cv} + C_{pw} \rho_d \frac{\partial M}{\partial t} \right) (T_a - T_g)}{Ga (C_{pa} + C_{pw} X)} \quad (3-56)$$

Uvedemo li oznaku radi vizuelnog pojednostavljenja jednačina:

$$P = -\frac{\left(-h_{cv} - \rho_d C_{pw} \frac{\partial M}{\partial t}\right)}{Ga(C_{pa} + C_{pw}X)} \quad (3-57)$$

dobijamo jednostavnu diferencijalnu jednačinu:

$$\frac{\partial T_a}{\partial z} = P(T_a - T_g) \quad (3-58)$$

Ako riješimo ovu jednačinu dobijamo:

$$\frac{T_{a(i+1,j+1)} - T_g}{T_{a(i+1,j)} - T_g} = \exp(P\Delta z) \quad (3-59)$$

Eksplicitno može da se izrazi temperatura vazduha u sledećem vremenskom i prostornom koraku:

$$T_{a(i+1,j+1)} = T_{a(i+1,j)} \exp(P\Delta z) + T_{g(i+1,j)} (1 - \exp(P\Delta z)) \quad (3-60)$$

odnosno:

$$T_{a(i+1,j+1)} = T_{a(i+1,j)} \exp\left(-\frac{\left(-h_{cv} - \rho_d C_{pw} \frac{\partial M}{\partial t}\right)}{Ga(C_{pa} + C_{pw}X)} \Delta z\right) + T_{g(i+1,j)} \left(1 - \exp\left(-\frac{\left(-h_{cv} - \rho_d C_{pw} \frac{\partial M}{\partial t}\right)}{Ga(C_{pa} + C_{pw}X)} \Delta z\right)\right) \quad (3-61)$$

Neophodno je upotrijebiti i bilans energije vlažnog materijala. Vremenski energijski priraštaj, koji može da se predstavi kao razlika energija u trenutku t i $t+dt$:

$$\rho_d \left[(C_{pg} + C_{p1}M(t+dt))T_g(t+dt) - (C_{pg} + C_{p1}M(t))T_g(t) \right] \quad (3-62)$$

može da se izjednači sa sumom toplote koja je konvektivno prenesena na vlažan material od vlažnog vazduha i toplote potrebne se ispari vlaga:

$$\begin{aligned} \rho_d \left[(C_{pg} + C_{p1}M(t+dt))T_g(t+dt) - (C_{pg} + C_{p1}M(t))T_g(t) \right] = \\ = h_{cv}(T_a - T_g)dt + \rho_d \frac{\partial M}{\partial t} (C_{pw}T_g + L_g)dt \end{aligned} \quad (3-63)$$

Ponavljajući još jednom isti postupak kao u prehodnim jednačinama, može da se dobije oblik:

$$\rho_d (C_{pg} + C_{p1}M) \frac{\partial T_g}{\partial t} = h_{cv}(T_a - T_g)dt + \rho_d (L_g + (C_{pw} - C_{p1})T_g) \frac{\partial M}{\partial t} \quad (3-64)$$

Ako se eksplicitno izrazi vremenski priraštaj temperature materijala, dobija se:

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = \frac{h_{cv}(T_a - T_g)}{\rho_d (C_{pg} + C_{p1}M)} + \frac{\rho_d (L_g + (C_{pw} - C_{p1})T_g) \left(\frac{\partial M}{\partial t}\right)}{\rho_d (C_{pg} + C_{p1}M)} \quad (3-65)$$

Opet, uvodeći sledeća pojednostavljena:

$$R = -\frac{h_{cv}}{(\rho_d (C_{pg} + C_{p1}M))} \quad (3-66)$$

$$Q = \frac{\rho_d (L_g + (C_{pw} - C_{p1})T_g) \left(\frac{\partial M}{\partial t} \right)}{\rho_d (C_{pg} + C_{p1}M)} \quad (3-67)$$

dobijamo diferencijalnu jednačinu oblika:

$$\frac{dT_g}{dt} = R(T_g - T_a) + Q \quad (3-68)$$

Iz jednačine (3-68), koristeći istu diferencnu šemu kao ranije, može da se izrazi temperatura vlažnog materijala u sledećem vremenskom koraku kao:

$$T_{g(i+1,j)} = \left[T_{g(i,j)} - \frac{(RT_{a(i,j)} - Q)}{R} \right] \exp(R\Delta t) + \frac{(RT_{a(i,j)} - Q)}{R} \quad (3-69)$$

Ili

$$T_{g(i+1,j)} = T_{g(i,j)} \exp(R\Delta t) + \frac{(RT_{a(i,j)} - Q)(1 - \exp(R\Delta t))}{R} \quad (3-70)$$

odnosno:

$$T_{g(i+1,j)} = T_{g(i,j)} \exp\left(-\frac{h_{cv}}{(\rho_d (C_{pg} + C_{p1}M))} \Delta t\right) + \frac{\left(-\frac{h_{cv}}{(\rho_d (C_{pg} + C_{p1}M))} T_{a(i,j)} - Q\right) \left(1 - \exp\left(-\frac{h_{cv}}{(\rho_d (C_{pg} + C_{p1}M))} \Delta t\right)\right)}{-\frac{h_{cv}}{(\rho_d (C_{pg} + C_{p1}M))}} \quad (3-71)$$

Potrebno je još predstaviti relaciju za određivanje relativne vlažnosti u svakom koraku. Relativna vlažnost se može odrediti tako što se eksplicitno izrazi iz dobro poznate relacije za određivanje apsolutne vlažnosti. Data u numeričkoj interpretaciji za određeni korak, ona će glasiti:

$$rh_{(i+1,j+1)} = \frac{p_a}{p_s \cdot (1 + 0,622 / X_{(i+1,j+1)})} \quad (3-72)$$

Uz pomenutu relaciju, u svakom koraku je, na osnovu trenutne vrijednosti temperature, računat i pritisak zasićenja vodene pare prema relaciji [31]:

$$p_{s(i+1,j+1)} = \exp\left(52,575 - \frac{6790}{T_{(i+1,j+1)}} - 5,0281 \cdot \ln(T_{(i+1,j+1)})\right) \quad (3-73)$$

Ovim je postavka modela završena. Potrebno je sada detaljnije izložiti proceduru rješavanja.

Postupak rješavanja

Simulacija procesa obavljena je u programskom jeziku Matlab, isto kao i za sušenje u tankom sloju. Programski kod koji je razvijen i korišćen za simulaciju može da se vidi u Prilogu.

Prvo je potrebno odrediti vremenski Δt i prostorni Δz korak koji će da figurišu u simulaciji. Uzet je vremenski korak od $\Delta t = 1$ min i prostorni korak od $\Delta z = 1$ cm. Ove korake treba birati u skladu sa realnim potrebama ovakvog procesa, i kvantitativno ih podesiti tako da simulacija može nesmetano da funkcioniše. Prosta anticipacija vjerovatno neće dati dobre rezultate, pa je najbolje probati nekoliko vrijednosti dok se ne utvrdi da simulacija teče u dobrom smjeru i da su rezultati smisleni.

Pored navedenog, simulacija je ograničena na 60 cm visine sloja i 1800 min trajanja procesa.

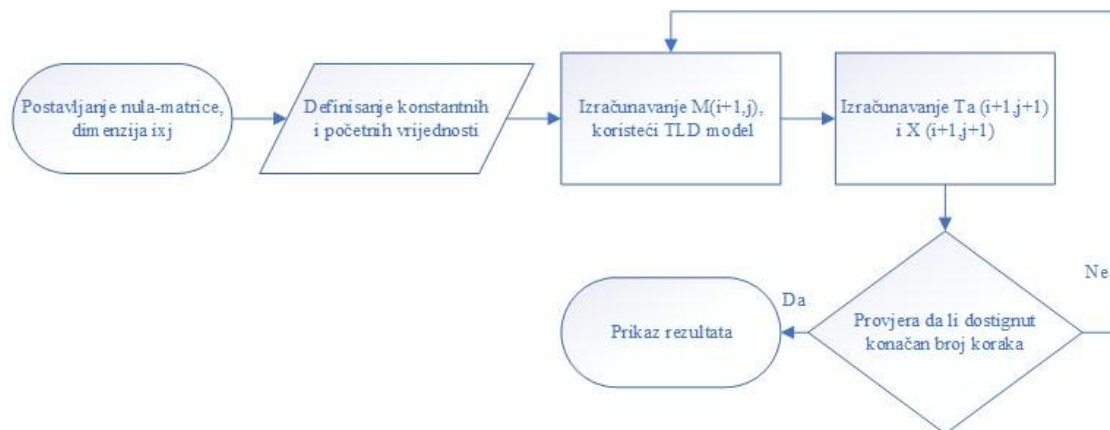
Dalje, unose se konstantne vrijednosti, što su u ovom slučaju bile dimenzije i fizičke osobine materijala. Formiraju se matrice proizvoljnih elemenata (npr. nula-matrice) koje sadrže odgovarajući broj rezervisanih mjesta za kasnije rezultate, za sve veličine koje se računaju – temperatura vazduha T_a , temperatura vlažnog materijala T_g , apsolutna vlažnost vazduha X_a , sadržaj vlage materijala po suvoj osnovi $M_{d,b}$, relativna vlažnost vazduha rh , kao i brzina sušenja dM/dt . Po uzoru na šemu sa slike 3-13, svaki red u matrici predstavlja prostorni korak, a svaka kolona vremenski korak.

Na prikazani način u svakom koraku računa se kinetička konstanta k , kao i ravnotežni sadržaj vlage M_e , koristeći srednju temeperaturu T_a i srednju relativnu vlažnost rh u datom vremenskom intervalu. Za određivanje D_{eff} i shodno tome k , potrebno je poznavati i brzinu strujanja u datom sloju. Ona se dobija usvajanjem pozitivnog rješenja polinoma (3-48). Posredstvom jednačine sušenja u tankom sloju (3-43) određuje se sadržaj vlage u tački $M(i+1,j)$, iz stanja (i,j) – za početni korak to je početni sadržaj vlage M_0 . Prije nastavka, računa se i volumetrijski koeficijent prelaza toplote h_{cv} iz jednačine (3-53), preko temperature $T_a(i+1,j)$. Koristeći jednačinu (3-71), određuje se priraštaj temperature materijala u stanju $(i+1,j)$, pri čemu se takođe uzimaju srednje vrijednosti T_a , M i dM/dt u vremenskom intervalu. Dalje, određuje se temperatura vazduha T_a u stanju $(i+1,j+1)$, koristeći jednačinu (3-61), a vrijednosti T_g , X i dM/dt iz stanja $(i+1,j)$. Priraštaj apsolutne vlažnosti vazduha X do stanja $(i+1,j+1)$ određuje se iz jednačine (3-39) pri vrijednosti dM/dt iz stanja $(i+1,j)$. Računa se nova vrijednost rh preko jednačine (3-72), na osnovu apsolutne vlažnosti vazduha $X(i+1,j+1)$ i parcijalnog pritiska vodene pare u vlažnom vazduhu p_s , koji je zavisao od temperature $T_a(i+1,j+1)$.

Prije nego što se pređe na sledeći korak, potrebno je obaviti reklakulaciju svih parametara sa “novim” osrednjenim parametrima, radi dobijanja rezultata veće tačnosti kroz drugu iteraciju.

Nakon toga, dobijeni parametri se uzimaju kao novi polazni, a procedura se ponavlja po istom principu, krenuvši ponovo od računanja M posredstvom jednačine sušenja u tankom sloju.

Proračun traje dok se ne dostignu zadata visina sloja i vrijeme sušenja, tj. dok se ne ispune sva predviđena mjesta u inicijalnoj matrici. Algoritam simulacije prikazan je na slici 3-14, po uzoru na prethodno iznesene instrukcije.



Slika 3-14. Algoritam računarske simulacije za debeli sloj

Simulacije sušenja u debelom sloju, pored prekidnih režima, izvedene su i za sušenje sa konstantnim parametrima, da bi moglo da se napravi odgovarajuće poređenje. Kod je suštinski pripremljen za prekidni režim, a jedina razlika je u tome što se za kontinualni režim postavlja jedna vrijednost ulazne temperature, dok se kod prekidnih režima u programski kod mora implementirati temperaturna varijacija na ulazu u sloj.

Simulacija je izvedena na računaru sa procesorom Intel i3-4130 3.40 GHz sa 4 GB radne memorije. Uz ovakve performanse, jedna simulacija je trajala oko 20 časova.

Analiza osjetljivosti na parametre simulacionog algoritma

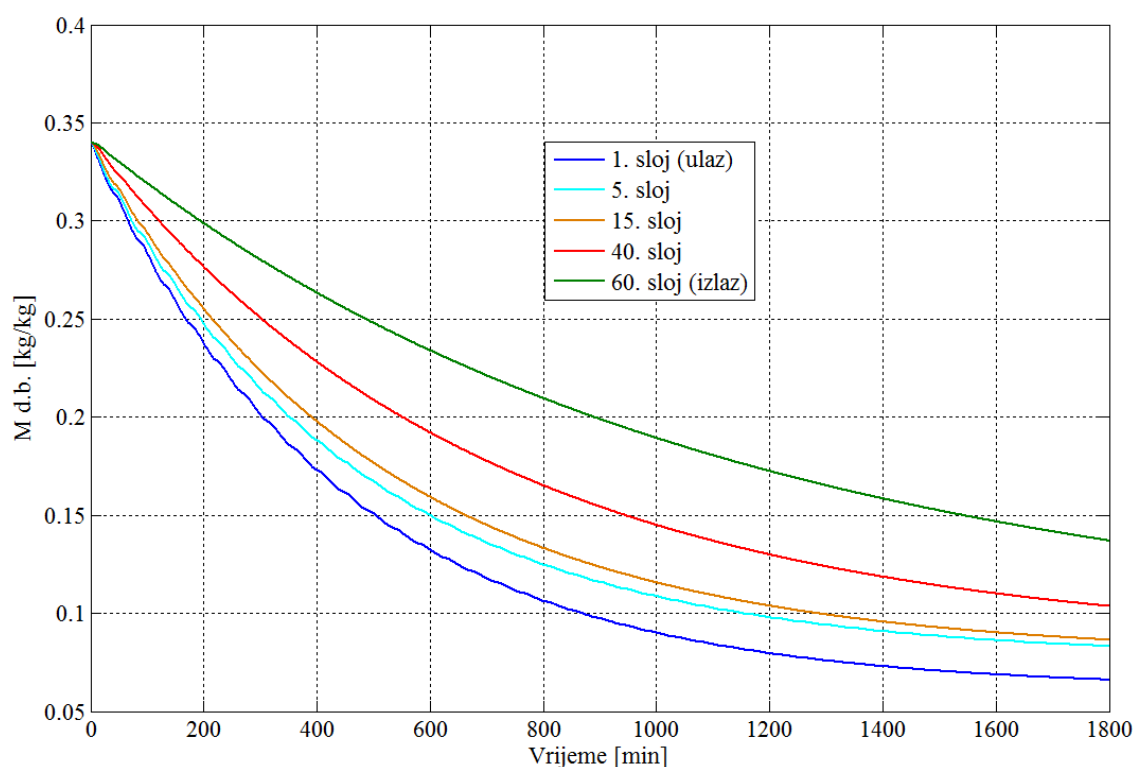
U pogledu analize osjetljivosti, izložiće se zapažanja o parametrima koji utiču na stabilnost modela, kao i o onima čiji je uticaj zanemarljiv, a ispitan je uticaj svih parametara koji se definišu na početku simulacije. Uticaj parametara je ispitan tako što je mijenjana njihova vrijednost, nakon čega je svaki put nanovo pokrenuta skraćena verzija simulacije. Uočeno je da je veoma uticajan izbor prostornog koraka. Veliki prostorni korak Δz rezultuje velikim temperaturnim gradijentom za T_a . Kod vremenskog koraka takođe treba uzeti vrijednost koja je u skladu sa prirodom posmatranog problema (npr. za proces koji traje preko 20 h, korak od 1 s neopravdano je mali, a korak od 1 h neće dati smislene rezultate). Kod kontinualnog režima sušenja, temperatura materijala brzo dostiže temperaturu vazduha, naročito u nižim slojevima (ova temperatura je kod ulaznog sloja dostignuta za 10 min, a kod izlaznog sloja za oko 50 min). Ova situacija je kod prekidnih režima drugačija zbog stalne promjene temperature vazduha, pa se javlja značajno “kašnjenje” promjene temperature materijala. U oba slučaja, uticaj početne temperature materijala je zanemarljiv. Veoma uticajan faktor na rezultate je volumetrijski koeficijent prelaza toplote h_{cv} , pa treba obratiti posebnu pažnju na izbor odgovarajuće relacije - premda kod [31] npr. autori tvrde da ovaj koeficijent nije uticajan. Moguće je da ova disonancija potiče od različitih uglova posmatranja problema – pomenuti autori se možda izjašnjavaju u smislu blage varijacije koeficijenta dok on ostaje istog reda veličine, a ovdje se misli na upotrebu drugačijih relacija za računanje h_{cv} , koje mogu da daju veoma različite vrijednosti.

Zbog specifičnosti modela, uticaj rh je zanemarljiv. Treba još jednom naglasiti da se ovdje rh računa iz dva razloga – od nje zavisi dinamičko M_e , a služi i kao indikator mogućnosti pojave kondenzacije, ako se njegova vrijednost približi 100%. To znači, da ukoliko varijacija M_e na datoj temperaturi nije naročita, izostavljanje rh neće značajno uticati na sam proračun, za razliku od drugačijih modela u kojima rh direktno figuriše kod računanja k .

Treba napomeniti i to da je u ovom postupku pretpostavljeno da ne dolazi do kondenzacije vlage u višim slojevima, pa je pored svega navedenog u programskom kodu izvedena i dodatna intervencija kojom se zabranjuje da vrijednost rh dostigne 100%. Uticaj ovog ograničenja na tačnost je utoliko veći koliko je veća i visina sloja, a početna temperatura vazduha i materijala manja.

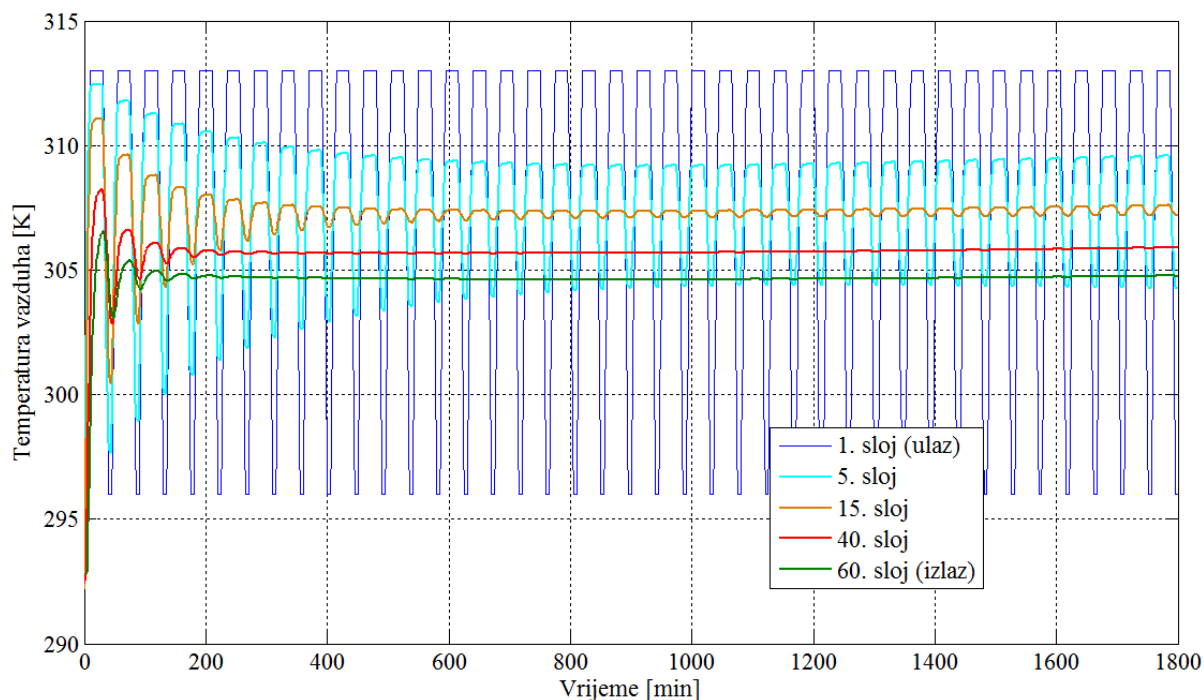
3.5 Rezultati i analiza za simulaciju sušenja u debelom sloju

U nastavku, prikazani su rezultati simulacije za režim prekidnog i kontinualnog sušenja (u objašnjenju je dat broj sloja za koji je karakteristika izvučena - prikazani su samo karakteristični slojevi, jer bi prikaz rezultata svih slojeva bio nepregledan). Slika 3-15 prikazuje promjenu sadržaja vlage po različitim visinama, pri čemu su za ilustraciju odabrane visine od 1 (ulaz), 5, 15, 40 i 60 cm (izlaz). Na ovoj slici može se vidjeti da valovitost krive sušenja, uzrokovana varijacijom ulazne temperature, već od 15 cm postaje gotovo neprimjetna, što znači da varijacija ulazne temperature pri datim uslovima ne utiče na visine veće od ove. Takođe, za čitav niz viših slojeva se vidi da u predviđenom vremenu od 1800 min ne dostižu predviđeni ravnotežni sadržaj vlage M_e , tačnije na visini od 40 cm postignut je krajnji sadržaj vlage od 10,5%_{d.b.}, a na visini od 60 cm, tj u izlaznom sloju 14%_{d.b.}.

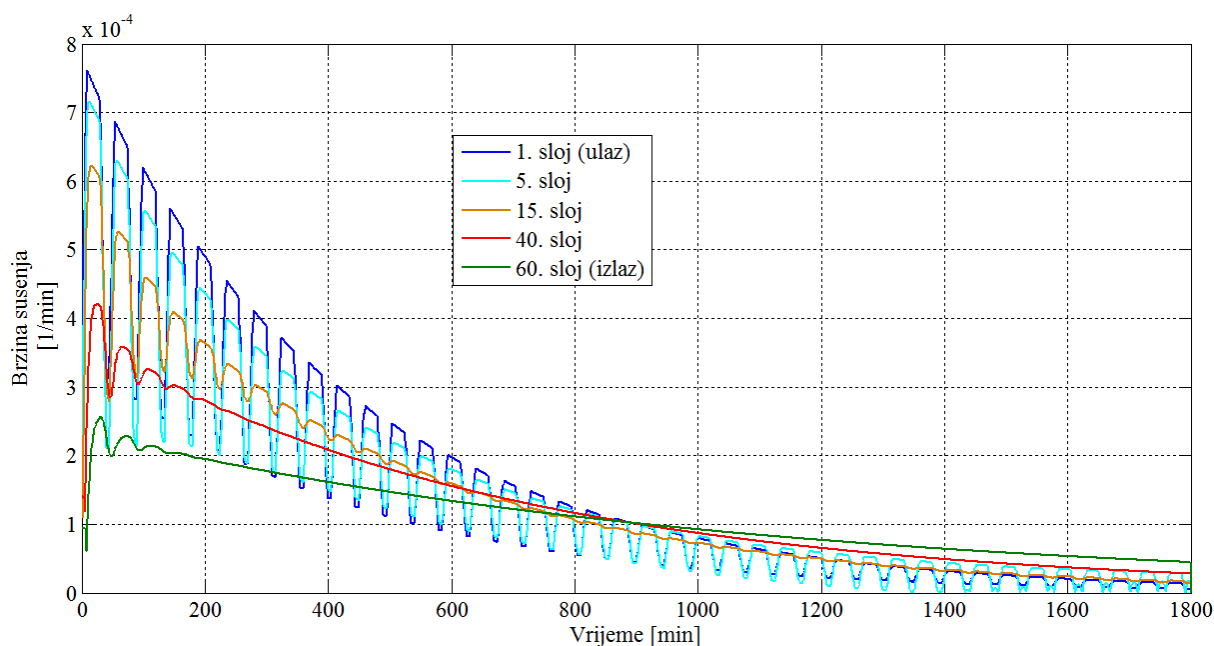


Slika 3-15. Promjena sadržaja vlage u vremenu u slojevima na različitim visinama (prekidni režim)

Slika 3-16 daje detaljniji prikaz promjene temperature vazduha. Ovdje se jasnije vidi da promjena temperature posle visine od aproksimativno 15 cm postaje zanemarljiva. Da bi se izveo precizniji zaključak, ovaj dijagram treba analizirati zajedno sa dijagramom sa slike 3-17, na kome su prikazane brzine sušenja u pojedinim slojevima. Osnovna ideja prekidnog sušenja jeste da se nakon perioda relaksacije i ponovnog podizanja temperature, brzina sušenja značajno poveća, ali ovaj efekat u višim slojevima nije postignut.



Slika 3-16. Promjena temperature vazduha u vremenu na različitim visinama (prekidni režim)

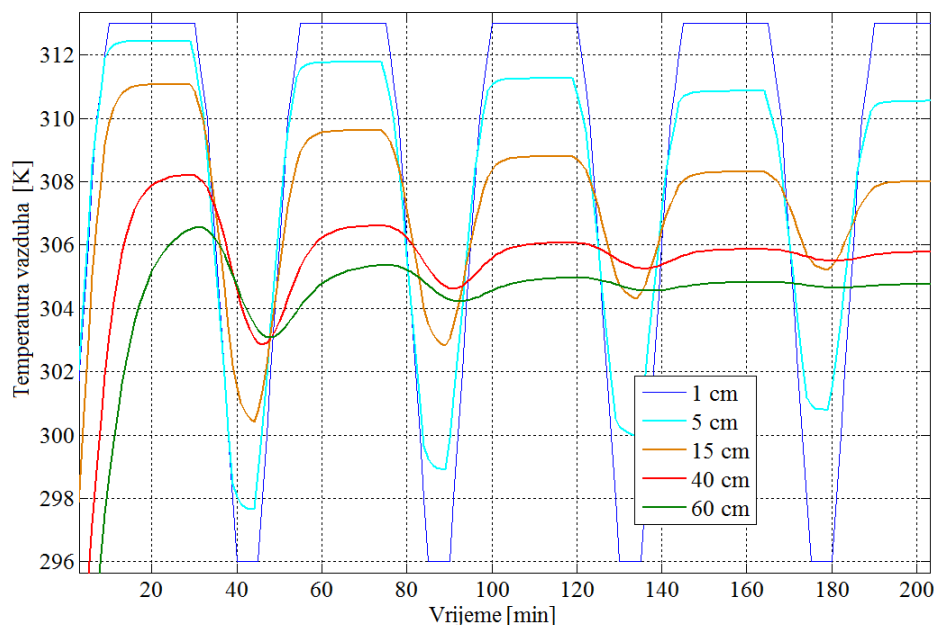


Slika 3-17. Promjena brzine sušenja u vremenu na različitim visinama (prekidni režim)

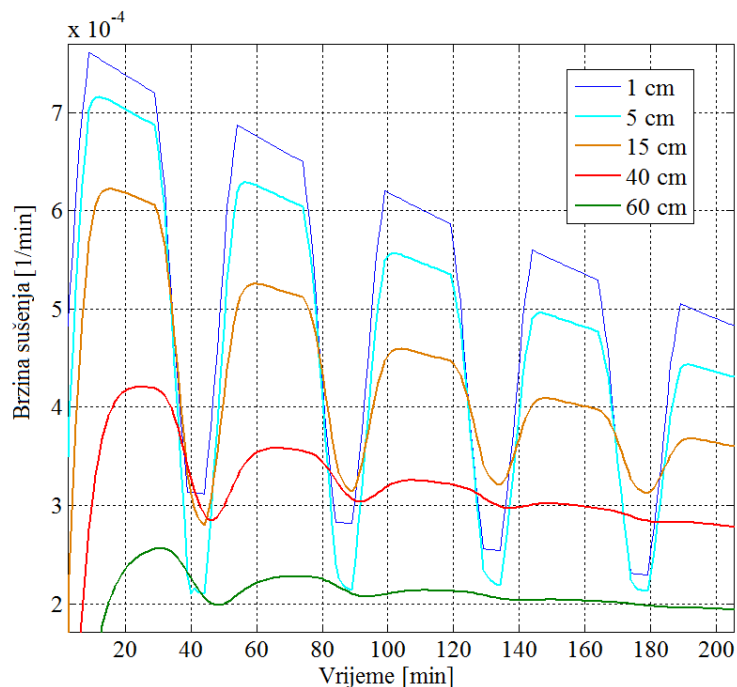
Ovo može da se objasni činjenicom da u višim slojevima parametri vazduha sve više zavise od parametara porozne sredine, a sve manje od svojih ulaznih parametara. Na isti način može da se objasni i veća brzina sušenja kod materijala u višim slojevima u kasnijem vremenskom periodu. Ova pojava do izražaja dolazi i zbog naglog pada brzine sušenja nižih slojeva. U ovim periodima niži slojevi su već dostigli dosta nizak sadržaj vlage, pa i vazduh u više slojeve dopijeva sa znatno manjom vlažnošću nego u ranijim periodima.

Na slikama 3-18 i 3-19, prikazani su isti dijagrami kao na prethodne dvije slike, s tim što su uvećani na prvih 200 min trajanja procesa, da bi se ovi efekti vidjeli što jasnije. Uočava se da oscilacija temperature posle samo 40 min na visini od 15 cm iznosi 47% od vrijednosti oscilacije

temperature na ulaznom sloju, dok je ta vrijednost u izlaznom sloju tek 20,6% od ulazne. Nakon 200 min ove temperaturske oscilacije padaju na 17,6%, odnosno na 0,5% od vrijednosti ulazne, respektivno, a nadalje je njihova promjena zanemarljiva. Treba pomenuti da se kod [31] tvrdi da pretpostavka da nema skupljanja materijala (koja je primjenjena i ovom radu) utiče na bržu propagaciju temperaturskog fronta prilikom izvođenja simulacije.



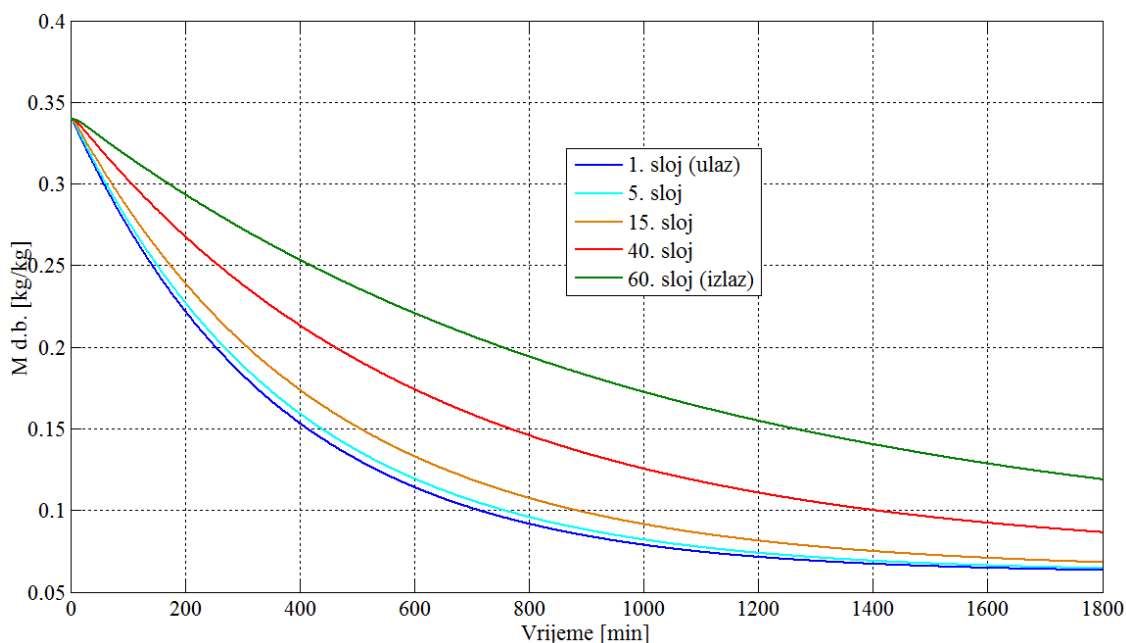
Slika 3-18. Promjena temperature vazduha u vremenu na različitim visinama u prvih 200 min (prekidni režim)



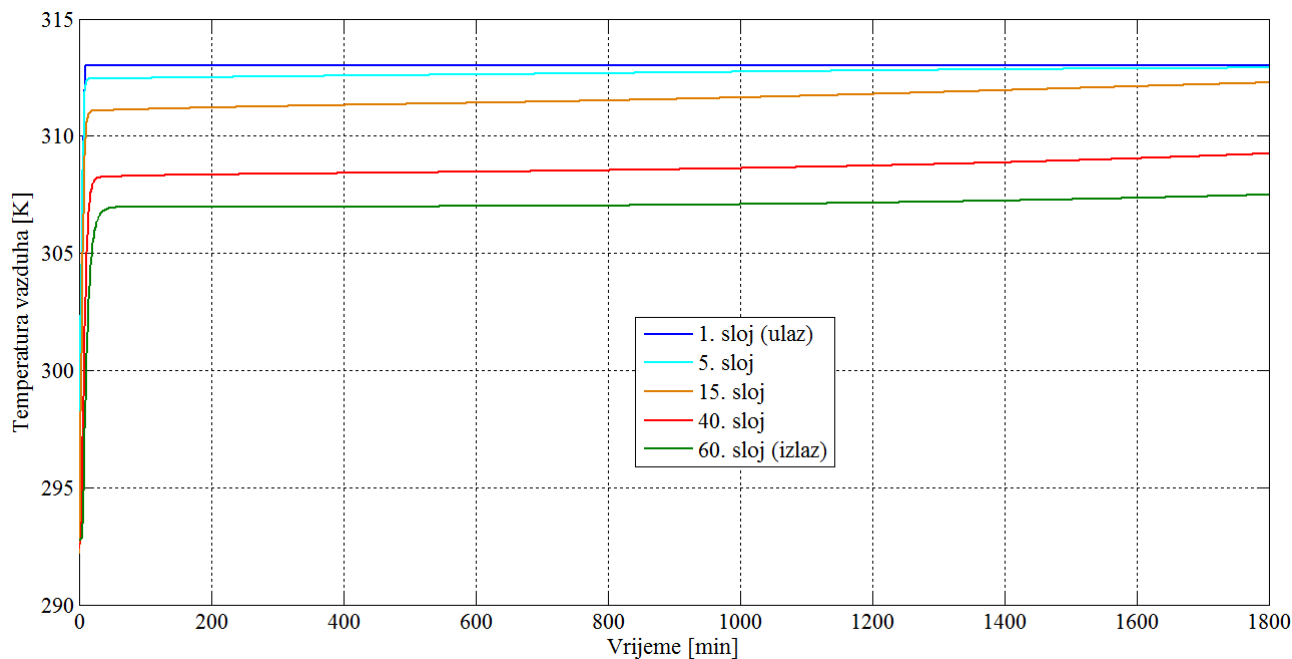
Slika 3-19. Promjena brzine sušenja u vremenu na različitim visinama u prvih 200 min (prekidni režim)

Da bi se moglo napraviti odgovarajuće poređenje, simulacija je ponovljena i za kontinualno sušenje. Isti dijagrami kao na prethodnim slikama, ali za konstantne temperaturske uslove na ulazu,

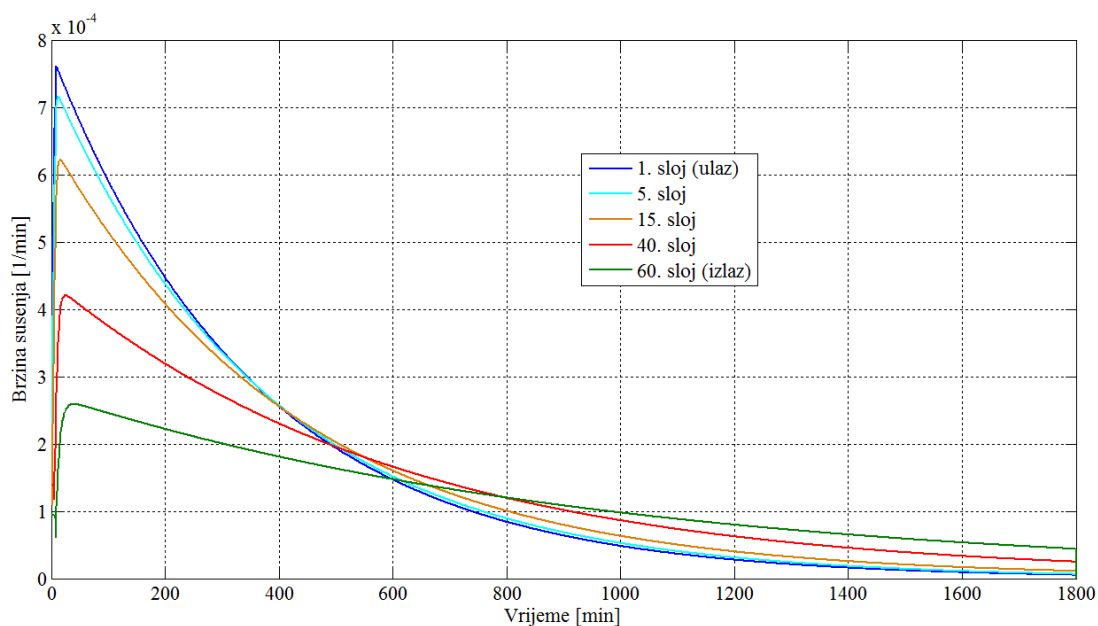
dati su na slikama 3-20 – 3-22. Može se primjetiti da su svi slojevi dostigli ravnotežni sadržaj vlage u predviđenom vremenu, osim najvišeg, koji je u ovim uslovima dostigao krajnji sadržaj vlage od 12%_{d.b.}, što nije dovoljno niska vrijednost. Nakon 30 minuta postižu se približno ustaljene vrijednosti temperature slojeva, koje se u toku procesa promjene tek za 1-2°C, i to kod viših slojeva. Brzine sušenja se u svojim opštim tendencijama ponašaju slično kao kog prekidnog režima, što samo potvrđuje objašnjenje koje je dato za prekidni režim, kao i to da hijerarhijska inverzija krivih koja se javlja posle 600 min nije povezana sa režimom sušenja.



Slika 3-20. Promjena sadržaja vlage u vremenu u slojevima na različitim visinama (kontinualni režim)



Slika 3-21. Promjena temperature vazduha u vremenu na različitim visinama (kontinualni režim)



Slika 3-22. Promjena brzine sušenja u vremenu na različitim visinama (kontinualni režim)

3.6 Osvrt na prvu hipotezu

Prilikom analize sušenja u tankom sloju, gdje je kao osnovni material korišćen orah, pristupilo se modelovanju prekidnog procesa sušenja u tankom sloju. Za ovu svrhu treba dati prednost Njutnovom modelu, koji je najjednostavniji i koji bez obzira na to što u nekim slučajevima ne ilustruje najvjerodostojnije eksperimentalne podatke, ipak služi kao najpoželjnija osnova za dalje modelovanje. U svakom slučaju, modelovanje predloženim pristupom rezultovalo je veoma dobrim statističkim pokazateljima, što ga u najvećoj mjeri preporučuje za modelovanje prekidnog sušenja velikog broja različitih materijala. Kod prekidnog sušenja, neophodno je da funkcija kojom je definisana kinetika sušenja u svakom narednom koraku mijenja početni uslov. Ovo je izvedeno korišćenjem matrice koja u toku kalkulacije najprije doživljava transformaciju, a zatim se rezultatni niz (koji će na kraju prikazati krivu sušenja u prekidnim uslovima) formira selektovanjem unaprijed zadatih elemenata. Ovakav metod ostavlja prostor za veoma široku upotrebu i programski kod se može, uz minimalnu modifikaciju, upotrijebiti za rješavanje čitavog niza fizičkih problema koji se mogu definisati običnom diferencijalnom jednačinom sa zadatim početnim uslovom. Za sve simulacije sušenja u tankom sloju, odabrano je isto vrijeme trajanja, da bi se pokazala pouzdanost modela, radije nego da se obavezno postigne željeni krajnji sadržaj vlage.

Kod simulacije sušenja u debelom sloju, odabrane su specifične dimenzije, da bi se izložila ideja. Velika prednost ovog pristupa je da može da se koristi za simulaciju u najrazličitijim uslovima, od različitih debljina (visina) sloja, preko različitih termodinamičkih uslova, do različitog vremena trajanja procesa. Kako god, simulacija je upotrebom jednačina konzervacije mase i energije, uz učešće jednačine sušenja u tankom sloju, dala smislene rezultate pa se može smatrati uspjelom. Fizička egzaktnost dobijenih rezultata može biti potvrđena samo velikim brojem različitih, dugotrajnih eksperimentalnih mjerenja sa sušenjem u debelim slojevima (što, držeći se definicije tankog sloja, može biti sve što je više od jednog reda ako su u pitanju krupniji materijali). Najvažniji rezultati izneseni u ovom poglavlju objavljeni su u radu [39].

Literatura

- [1] Velten K., *Mathematical Modeling and Simulation*, Wiley, Weinheim, 2009.
- [2] ***, ASABE standard – ANSI/ASAE S448.1 JUL2001 (R2006) – Thin-Layer Drying of Agricultural Crops, ASABE MI, 2006.
- [3] Luikov A.V. *Heat and Mass Transfer*, Mir Publishers, Moscow, 1980.
- [4] Crank J. *Mathematics of Diffusion*, Oxford University Press, London, 1975.
- [5] Hassan-Beygi S.R., et al., Drying characteristics of walnut (*Juglans Regia L.*) during convection drying, *International Agrophysics* 23 (2009), pp 129-135
- [6] Onwude D.I., et al., Modeling the thin-layer drying of fruits and vegetables: A review, *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Industry* 15 (2016), pp 599-618.
- [7] Đaković D., Gvozdenac D., Experimental determination of effective diffusivities during corn drying, *Book of abstracts, International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems ECOS 2011*; Novi Sad, Serbia 4-7 July 2011, pp 209
- [8] Baini R.; Langrish T.A.G., Choosing an appropriate drying model for intermittent and continuous drying of bananas, *Journal of Food Engineering* 79 (2007), pp 330–343
- [9] Kowalski S.J., Pawłowski A., Modeling of kinetics in stationary and intermittent drying, *Drying Technology* 28 (2010), pp 1023–1031
- [10] De Lima A.G.B.; Nebra S.A., Theoretical study of intermittent drying (tempering) in prolate spheroidal bodies, *Drying Technology* 19(8) (2001), pp 1569-1589
- [11] Nishiyama Y., et al., Grain intermittent drying characteristics analyzed by a simplified model, *Journal of Food Engineering* 76 (2006), pp 272–279
- [12] Akpinar E., et al., Single layer drying behavior of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling, *Energy Conversion and Management* 44 (2003), pp 1689–1705
- [13] Incropera F.P., DeWitt D.P., *Fundamentals of heat and mass transfer, fourth ed.*, John Wiley and Sons, New Jersey, USA, 1996.
- [14] ***, ASHRAE Handbook (2006): Refrigeration: SI edition, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, 2006.
- [15] Cerović S., et al., Pet decenija rada na selekciji oraha (*Juglans regia L.*) u Srbiji, *Letopis naučnih radova Godina* 38 (2014), p 19
- [16] Khir R., et al., Size and moisture distribution characteristics of walnuts and their components, *Food and Bioprocess Technology* 6 (2013), pp 771-782
- [17] Altuntas E., Erkol M., Physical properties of shelled and kernel walnuts as affected by the moisture content, *Czech Journal of Food Science*, 28(6) (2010), pp 547–556
- [18] Kozić Đ., et al., *Priručnik za termodinamiku*, Mašinski fakultet, Beograd, 1997.

- [19] Nadhari W.N.A.W., et al., Isothermal drying kinetics of oil palm trunk: energy and shrinkage evaluation. *Environmental Progress & Sustainable Energy* 36(4) (2017), pp 1244-1252
- [20] Young T., Mohlenkamp M., *Introduction to Numerical Methods and Matlab Programming for Engineers*, Ohio University, 2014.
- [21] Kouchakzadeh A., The effect of acoustic and solar energy on drying process of pistachios, *Energy Conversion and Management* 67 (2013), pp 351–356
- [22] Doymaz I., Evaluation of some thin-layer drying models of persimmon slices (*Diospyros kaki L.*), *Energy Conversion and Management* 56 (2012), pp 199–205
- [23] Wang D.C., et al., Development of a visual method to test the range of applicability of thin layer drying equations using MATLAB tools, *Drying Technology* 22(8) (2004), pp 1921–1948
- [24] De Lima A.G.B., Nebra S.A., Theoretical study of intermittent drying (tempering) in prolate spheroidal bodies, *Drying Technology* 19(8) (2001), pp 1569-1589
- [25] Zhu Z., et al., Experimental research on intermittent heat pump drying with constant and time-variant intermittency ratio, *Drying Technology* 34(13) (2016), pp 1630–1640
- [26] Đaković D., *Modelovanje fenomena prenosa toplote i mase pri sušenju zrnastih materijala u sušari*, Doktorska disertacija, Novi Sad, 2011.
- [27] Bakker-Arkema F.W. et al., Simultaneous heat and mass transfer during the cooling of a deep bed of biological products under varying inlet air conditions, *Journal of Agricultural Engineering Research* 12(4) (1967), pp 297-307
- [28] Srivastava V.K., John J., Deep bed grain drying modeling, *Energy Conversion and Management* 43 (2002), pp 1689–1708
- [29] Sharp J.R., A review of low temperature drying simulation models, *Journal of Agricultural Engineering Research* 27 (1982), pp 169-190
- [30] Shei H.J., Chen Y.L., Computer simulation on intermittent drying of rough rice, *Drying Technology* 20(3) (2002), pp 615–636
- [31] Bala B.K., *Drying and Storage of Cereal Grains*, 2nd edition, John Wiley & Sons, 2017.
- [32] Liu Q., Bakker-Arkema F.W., Stochastic modelling of grain drying: part 2. model development, *Journal of Agricultural Engineering Research* 66 (1997), pp 275 – 280
- [33] Cimolin F., et al., Navier–Stokes/Forchheimer models for filtration through porous media, *Applied Numerical Mathematics* 72 (2013), pp 205-224
- [34] Doder Đ., et al., Adapting the Forchheimer equation for the flow of air through wheat straw beds, *Thermal Science* 20(suppl 2) (2016), pp 463-470
- [35] Ergun S., Fluid flow through packed columns, *Chemical Engineering Progress*, 48(1) (1952), pp 89-94
- [36] Subramanian R.S., *Flow through Packed and Fluidized Beds*, Clarkson University, 2004.

- [37] Rajabipour A., Shahbazi F., Airflow resistance in walnuts, *Journal of Agricultural Science and Technology* 3 (2001), pp 257-264
- [38] Seshadri V., Silva Pereira R.O., Comparison of formulae for determining heat transfer coefficient of packed beds, *Transactions ISIJ* 26 (1986), pp 604-610
- [39] Doder Đ., Đaković D., Modeling of intermittent convective drying of walnuts in single layer and its influence on deep bed drying simulation, *Thermal Science* (2019) (rad je prihvaćen za objavljivanje)

Poglavlje 4.

Energetski aspekti. Analiza sušenja ostalih materijala

4.1 Uvod

Druga centralna tema ovog rada je analiza mogućnosti energetske uštede upotrebom prekidnog režima sušenja (u odnosu na kontinualan režim). Postupak iz prethodnog poglavlja objašnjava princip modelovanja i sugerira njegovu pouzdanost za konkretan slučaj, ali ne obećava da će se primjenom prekidnog režima zaista i postići energetska ušteda (o potrebi za efikasnošću u energetici i procesnoj tehnici izlišno je ovdje govoriti – njeno povećanje predstavlja jednu od osnovnih tendencija savremenih naučnih istraživanja iz ove oblasti, zajedno sa planiranjem održivog razvoja, upotrebe obnovljivih izvora i očuvanja životne sredine. Pomenute oblasti su uostalom povezane sa energetsom efikasnošću. Ako se ovom prilikom osvrnemo i na ono što je već rečeno u uvodnom poglavlju o procesima sušenja kao jednim od najvećih konzumenata energije u industriji, potreba za ovakvim istraživanjima je jasna).

Treba i ovdje imati u vidu da su pozitivni uticaji na kvalitet proizvoda evidentni [1], pa oni u datom smislu već opravdavaju upotrebu prekidnog režima.

U kontekstu ovog rada, problem uštede energije je u inherenciji sa problemom ukupnog vremena sušenja i efektivnog vremena sušenja (efektivno vrijeme sušenja predstavlja vrijeme u kome je grijač uključen, tj. postrojenje konzumira punu predviđenu toplotnu snagu – stoga, kod kontinualnog režima, ukupno vrijeme sušenja jednako je efektivnom). Kao što je već rečeno, u periodima smanjenja temperature agensa dopušta se ujednačavanje profila koncentracije vlage u materijalu, po njegovom poluprečniku. Ovim se postiže povećanje koncentracije vlage na površini. Kada se temperatura ponovo poveća, intenzitet sušenja (iskazan kroz brzinu sušenja), biće veći. Zbog ove činjenice opravdano je očekivati da će efektivno vrijeme sušenja biti manje u odnosu na kontinualan režim. Posledično, dolazi se do prirodnog, ali sa tehničkog aspekta neupotrebljivog zaključka, da je idealno vrijeme relaksacije beskonačno, jer će tek beskonačno dug period relaksacije obezbjediti maksimalnu koncentraciju vlage na površini. Drugačije rečeno, najveća ušteda energije ostvariće se ako postrojenje nije uopšte ni uključeno. Ovi, naizgled apsurdni i neimaginativni zaključci, ipak nas uče da su ušteda energije i ukupno vrijeme sušenja međusobno suprotstavljeni.

Uvođenje perioda relaksacije, kako se ističe kod [2], povećava ukupno vrijeme sušenja, što je potvrđeno i kod [3, 4]. Kod [3] se ističe da je ukupno vrijeme sušenja jedna od najvažnijih stavki koje se trebaju razmotriti prilikom izbora strategije prekidnog sušenja. U realnim uslovima se, dakle, eksploatacija postrojenja u prekidnim režimima koji donose produženje trajanja procesa kosi sa zahtjevima dinamike proizvodnje.

Kao što je nagovješteno u drugoj hipotezi, od vrste materijala i njegovih osobina (prije svega efektivne difuzivnosti) zavisi da li se upotreba prekidnog režima može smatrati opravdanom.

„Opravdanost“ podrazumjeva da se ostvari energetska ušteda, ali tako da se pri tome ukupno vrijeme sušenja ne produži u odnosu na kontinualan režim, ili da se produži zanemarljivo malo.

Postoji čitav niz različitih parametara koji na neki način pokazuju efikasnost procesa sušenja [5, 6]. Najindikativnija je potrebna količina toplote da se izdvoji 1 kg vlage iz materijala, a koja se dobija kao odnos razlike specifičnih entalpija i razlike apsolutnih vlažnosti vazduha za sušenje, ispred i iza sloja materijala:

$$q = \frac{\Delta h}{\Delta X} \quad (4-1)$$

Prednost ovog parametra je što može da se posmatra potpuno nezavisno od tipa konstrukcije sušare ili ulaznih i izlaznih parametara vazduha, koji mogu da zavise od brojnih faktora (npr. kvaliteta izolacije). Prema [7], specifičan utrošak energije računa se kao:

$$q = \alpha_A \cdot V \cdot (t - t_m) \quad (4-2)$$

U najopštijem smislu, energetska efikasnost, odnosno kumulativna energetska efikasnost, respektivno, mogu da se definišu kao:

$$\eta = \frac{\text{Energija utrošena na isparavanje vlage sa površine u vremenu } t}{\text{Dovedena energija u vremenu } t} \quad (4-3)$$

i

$$\eta = \frac{1}{\Delta t} \int_0^t \eta(t) dt \quad (4-4)$$

Kao najvažniji ishodi uštede energije u procesima sušenja navode se sledeći [8]:

- Metodološki: razvoj opštih metoda za uštedu energije (npr. modelovanje procesa);
- Tehničko-tehnološki: razvoj efikasnijih postrojenja, korišćenje obnovljivih izvora u određenoj mjeri, redukcija gubitaka enegije, rekuperacija toplote i sl.;
- Socioekonomski: stimulacija naučnoistaživačkog i privrednog potencijala;
- Ekološki: energetska efikasnost postrojenja umanjuju negativan uticaj na životnu sredinu.

Prva tačka od navedenih je zapravo aspekt koji je u fokusu ovog istraživanja. Očigledno je da se najveća ušteda u potrošnji primarne energije može ostvariti korišćenjem obnovljivih izvora sekundarne energije, a do danas je ova ideja podržana velikim brojem razvijenih tehničkih rješenja koja su već u širokoj upotrebi, kao što su sušare sa solarnim toplotnim kolektorima i fotonaponskim panelima, zatim sušare konvencionalne izvedbe sa rekuperacijom toplote i ugrađenim toplotnim pumpama, itd. Uglavnom sve novine iz oblasti energetike mogu da se primjene i na sušare. Sve više se primjenjuju i hibridni sistemi za sušenje (npr. kombinacija mikrotalasnog, infracrvenog i konvektivnog sušenja), koji daju odlične rezultate u pogledu energetske uštede, intenziteta procesa, kao i očuvanja kvaliteta proizvoda [9].

Ipak, konvektivno sušenje i dalje je veoma zastupljeno. Prema [10], konvektivne sušare čine 85% svih industrijskih sušara, a procenjeno je da u toku radnog vijeka ostvare troškove za energiju u vrijednosti pet puta većoj od ukupnih investicionih troškova. Razlozi njihove značajne

zastupljenosti su relativno jednostavna tehnička izvedba sušare, jednostavnost u radu, prilagodljivost postrojenja oklonim uslovima, kao i niski investicioni troškovi. Kada se uz sve navedeno uzme u obzir i niska energetska efikasnost postrojenja za konvektivno sušenje [11], preduzimanje mjera uštede energije postaje važan korak u širem kontekstu njihove eksploatacije.

4.2 Opis modela i procedura proračuna

Fizička pozadina i vizuelizacija procesa difuzije

Fikov zakon difuzije za neku komponentu A koja difunduje u komponentu B , za sferne koordinate, pri čemu je kao bilansno svojstvo zadata masena koncentracija komponente A (tačnije masena zapreminska koncentracija ρ i maseni udio komponente A ω_A , može da se prikaže kao [12]:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\rho D_{AB} r^2 \frac{\partial \omega_A}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\rho D_{AB} \frac{\partial \omega_A}{\partial \phi} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\rho D_{AB} \sin \theta \frac{\partial \omega_A}{\partial \theta} \right) + \dot{n}_A = \frac{\partial \rho_A}{\partial t} \quad (4-5)$$

Ako jednačinu aproksimiramo za jednodimezijski slučaj, pri čemu dalje koristimo masenu zapreminsku koncentraciju komponente A ρ_A , a isključimo mogućnost pojave hemijskih reakcija, jednačina (4-5) postaje:

$$\frac{\partial \rho_A}{\partial t} = D_{AB} \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \rho_A}{\partial r} \right) \quad (4-6)$$

Preostaje da se umjesto masenog svojstva ρ_A koje smo iskoristili za predstavljanje jednačine u opštem slučaju, većemo za konkretan slučaj difuzije vlage, a pri tome koristimo drugo maseno svojstvo M koje nazivamo sadržaj vlage, a zapravo predstavlja odnos mase vlage po masi suvog materijala ili ukupnoj masi dvokomponentnog sistema. Ovako se dobija često korišćena forma Fikovog zakona u svojoj geometrijskoj interpretaciji, za difuziju vlage u poroznom medijumu [13]:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial M}{\partial r} \right) \quad (4-7)$$

Rješavanjem jednačine (4-7) može da se dobije vremenska zavisnost profila koncentracije vlage po poluprečniku sfere. U ovom radu, jednačina je riješena upotrebom MATLAB® ugrađenog solvera *pdepe*. Ovaj solver koristi numeričku metodu linija zajedno sa metodom konačnih elemenata za diskretizaciju [14].

Početni uslov iskazuje da je uniforman profil koncentracij vlage na početku, kao i da je jednak početnom sadržaju vlage:

$$M(r, t_0) = M_0(r) \quad (4-8)$$

Granični uslov dat je kao tzv. uslov treće vrste, sa zadatim koeficijentom konvekcije na površini sfere:

$$-D_{eff} \frac{\partial M}{\partial r} = \beta(M_s - M_e) \quad (4-9)$$

pri čemu je koeficijent konvekcije mase sa površine sfere β jednak:

$$\beta = \frac{Sh \cdot D_{eff}}{d} \quad (4-10)$$

Šervudov broj za sferna tijela računa se, prema [10], kao:

$$Sh = 2 + 0,552 \cdot Re^{0.5} \cdot Sc^{0.333} \quad (4-11)$$

Rejnoldsov i Šmitov broj su dati kao:

$$Re = \frac{v_a \cdot d \cdot \rho_a}{\mu_a} \quad (4-12)$$

i

$$Sc = \frac{\mu_a}{D_{eff}} \quad (4-13)$$

Prije nastavka, biće objašnjen način implementacije jednačine (4-7) i graničnih uslova (4-8) i (4-9) u Matlab kod. Jednačina (4-7) u Matlab mora da se unese u obliku:

$$C \frac{du}{dt} = x^{-m} \frac{d}{dx} \left(x^m f(x, t, u, \frac{du}{dx}) \right) + S \quad (4-14)$$

pa je prvi korak da se transformiše u formu:

$$\frac{1}{D} \frac{\partial M}{\partial t} = r^{-2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial M}{\partial r} \right) + 0 \quad (4-15)$$

EkspONENT m se uzima u zavisnosti od toga u kakvom koordinatnom sistemu se problem posmatra, pa je $m=0$ za pravougaoni, $m=1$ za cilindrični, a $m=2$ za sferni koordinatni sistem.

Početni uslov se unosi u obliku

$$u(x, t_0) = u_0(x) \quad (4-16)$$

a, granični uslovi u obliku:

$$p(x, t, u) + q(x, t) f \left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x} \right) = 0 \quad (4-17)$$

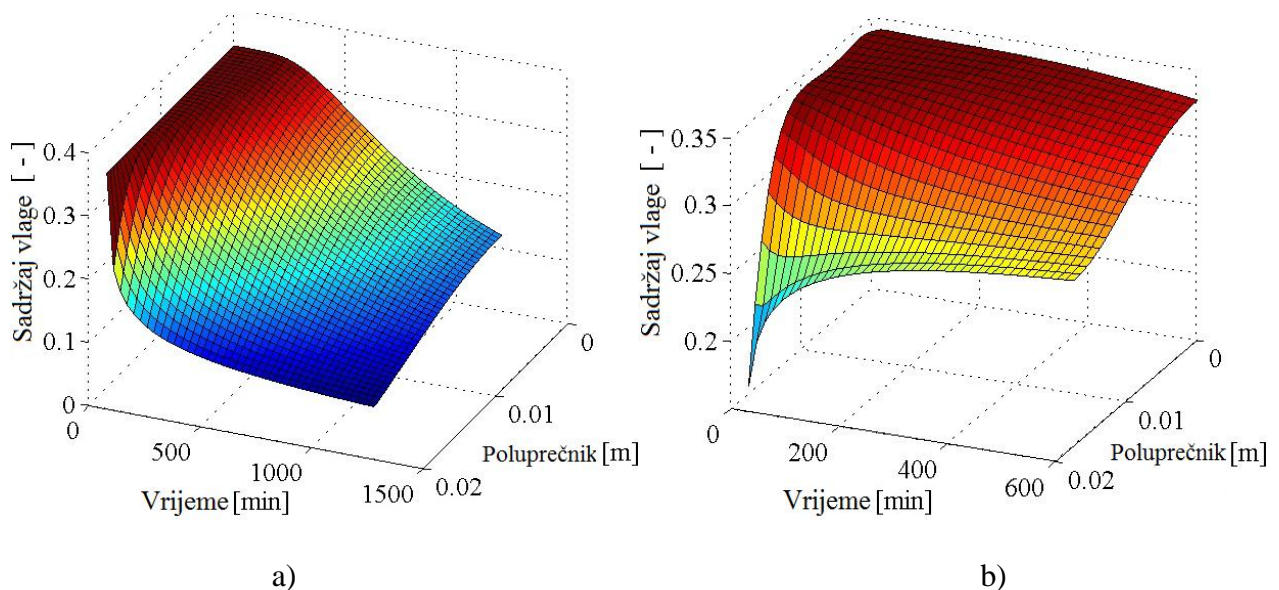
Slika 4-1a) prikazuje dobijeni trodimenzionalni grafik za kontinualni proces sušenja. Slika 4-1b) prikazuje grafik za period relaksacije. Svaka linija po vremenskoj osi predstavlja vremenski period od 15 min. Grafik relaksacije je napravljen za slučaj kada je tok vazduha potpuno zaustavljen, nakon 60 min trajanja procesa konvektivnog sušenja. U ovom trenutku površinski sadržaj vlage je već dostigao relativno nisku vrijednost (M je blizu 0,15). Novi početni uslov je sada uzet kao funkcija koja predstavlja profil sagržaja vlage u tom trenutku.

Da bi se ovakav uslov implementirao, potrebno je na neki način identifikovati ovu funkciju. Ovo je urađeno aproksimacijom date funkcije u tom trenutku polinomom četvrtog reda:

$$M = -1,1467 \cdot 10^7 \cdot r^4 + 2,57 \cdot 10^5 \cdot r^3 - 1824 \cdot r^2 + 4,1806 \cdot r + 0,33852; \text{ za } 0 \leq r \leq 0,02 \quad (4-18)$$

Pretpostavljajući da se odvođenje vlage sa površine u toku ovog perioda može zanemariti zbog obustavljanja toka vazduha, koristi se sledeći granični uslov:

$$-D_{eff} \frac{\partial M}{\partial r} = 0 \quad (4-19)$$

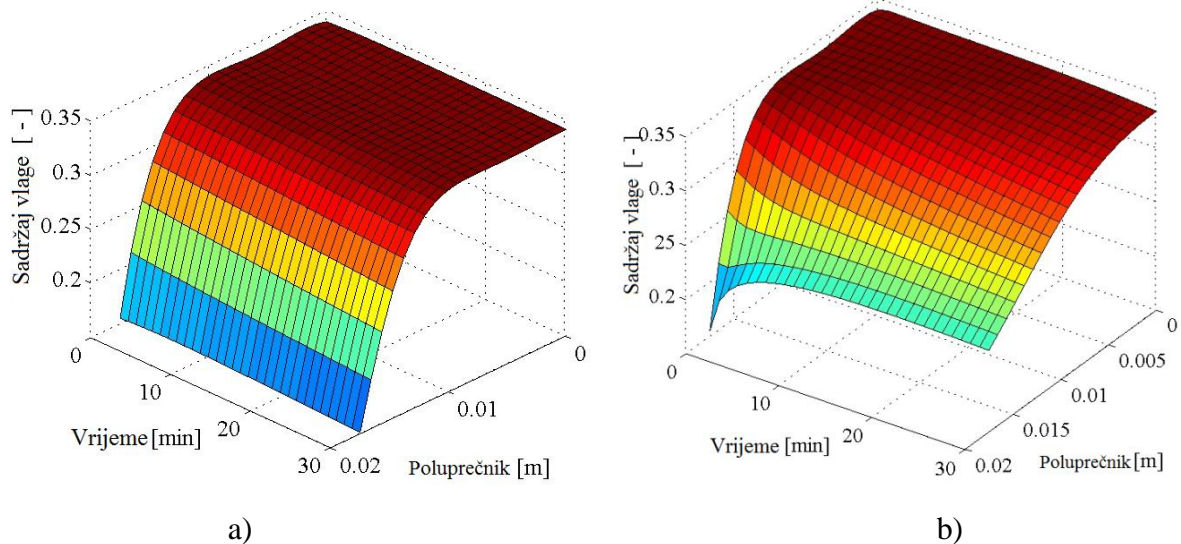


Slika 4-1. Trodimenzijski grafici za: a) Kontinulano sušenje i b) Period relaksacije

Može se vidjeti da, tokom perioda relaksacije sa zaustavljenim tokom vazduha, površinski sadržaj vlage dobija vrijednost blisku prosječnom sadržaju vlage materijala približno za 300 min. Međutim, ovaj period je u poređenju sa ukupnim vremenom sušenja u kontinualnom režimu prilično dug, pa bi se periodom relaksacije ovolikog trajanja prekomjerno povećalo ukupno vrijeme sušenja. U prvih 30 min površinski sadržaj vlage ima najveći priraštaj, pa je za dalju analizu odabran ovaj vremenski interval.

Cilj ovog istraživanja bio je da se analiziraju slučajevi u kojima je samo grijač isključen, dok se protok vazduha održava konstantnim. Ako ograničimo istraživanje na slučajeve sa prethodno pomenutih 30 min trajanja perioda relaksacije sa, a granični uslov (4-19) zamijenimo sa (4-9), ali sa niskom efektivnom difuzivnošću, neće doći do brzog ujednačavanja profila sadržaja vlage. Slika 4-2a) ilustruje ovaj slučaj, a uzeta je efektivna difuzivnost oraha od $6,36 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$. Može se primjetiti da je u ovom periodu smanjenje saržaja vlage materijala veoma malo, tj.profil sadržaja vlage ostaje gotovo isti kao na početku čak i posle 30 min.

S druge strane, ako povećamo efektivnu difuzivnost koja se koristi u simulaciji, na npr. $6,70 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, koliko iznosi efektivna difuzivnost krompira (ove vrijednosti prikazane su u tabeli 3-4 u dijelu Rezultati i diskusija), profil sadržaja vlage mijenja se značajno brže, što je i potvrđeno rezultatima simulacije prikazanim na slici 4-2b).



Slika 4-2. Trodimenzijski grafici za: a) Period relaksacije sa nižom efektivnom difuzivnošću materijala ($D_{eff}=6,36 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$) i b) Period relaksacije sa višom efektivnom difuzivnošću materijala ($D_{eff}=6,70 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$)

Matlab kodovi za pomenuti problem, sa različitim varijantama graničnih uslova, dati su u Prilogu.

Parametri uštede energije

Koncept uštede energije objašnjen je upotrebom količine energije, odgovarajuće jedinice, utrošene u definisanom vremenskom intervalu. Pošto je minut za ovaj slučaj prikladniji vremenski interval nego sekund, ta jedinica će se u daljem tekstu zvati opštim nazivom *energijska jedinica / min*. Ušteda energije je računata za nekoliko različitih slučajeva odnosa količine energije potrebne za ventilator i zagrijač vazduha. Smatrajući da je potrošnja energije (zagrijač vazduha) generalno veća od potrošnje za potrebe transporta vazduha (ventilator), pri čemu se u oba slučaja podrazumijeva potrošnja električne energije, kao granični slučajevi uzeti su odnosi potrošnje 1:1 (jednaka potrošnja električne energije za zagrijač i ventilator) i 1:5 (potrošnja električne energije za ventilator pet puta manja od potrošnje za zagrijač). Ukoliko bi odnos bio manji od 1:5, to bi moglo da rezultira veoma malim kapacitetom sušare zbog relativno male snage ventilatora u odnosu na mogućnost zagrijavanja vazduha, pa se ovakvi slučajevi nisu razmatrali.

Ekperimentalno postrojenje pomenuto u ovom radu raspolaže ventilatorom snage 480 W i grijačem snage 2000 W. Za postizanje parametara od 40°C i brzine od 3 m/s angažovani su puni kapaciteti ovih uređaja, pa će se pomenute snage i koristiti za primjer proračuna. Ovaj odnos, stoga, iznosi 1:4,16.

Nakon identifikacije parametara sa dobijenih krivih sušenja, može se postaviti sledeće pitanje: koliko vremena je potrebno da se u procesu sa varijacijom temperature postigne isti *MR* kao u procesu sa konstantnom temperaturom? Ova karakteristična tačka je odabrana tako što je učitano krajnje *MR* sa krive prekidnog režima, pa je napravljeno poređenje sa *MR* sa krive kontinualnog režima. Ovako se dobija razlika u vremenu potrebnom za postizanje istog *MR* u različitim režimima.

Rad grijača u prekidnom režimu je realizovan u odnosu “60 min uklj. / 30 min isklj.” (u daljem tekstu “60/30”), pa je nakon određivanja ukupnog produženja procesa (do dostizanja istog *MR* kao u

kontinualanom režimu), jednostavno odrediti ukupnu potrošnju energije (radi podsjećanja, proces je u prekidnom režimu i za vrijeme “produžetka”). Sada mogu da se ustanove parametri *ukupna ušteda energije (UUE)*, *osnovna ušteda energije (OUE)* i *dodatni gubici energije (DGE)*. *Ukupna ušteda energije* dobija se kao razlika *osnovne uštede energije* i *dodatnih gubitaka energije*, a svi parametri imaju jedinicu *energijska jedinica / min*:

$$UUE = OUE - DGE \quad (4-20)$$

Ustanovljeni parametri najbolje mogu biti objašnjeni kroz primjer. Ako posmatramo slučaj sušenja oraha, potrebno je 720 min da se postigne ona vrijednost MR ($MR = 0,2$), koja je u kontinualnom režimu postignuta za 550 min. Dakle, vremenski “produžetak” iznosi 170 min. S druge strane, u “60/30“ režimu, 33,3% električne energije za grijač je sačuvano u prvih 550 min, ali proces će trajati duže pa će biti konzumirana dodatna količina energije (u periodu “produžetka”, ventilator je i dalje stalno uključen, a grijač je i dalje u istom “60/30“ režimu). Ako je, na primjer, odnos konzumacije energije od strane ventilatora i grijača u odnosu 1:2, jednostavnim proračunom dolazi se do vrijednosti OUE , DGE i UUE , u *energijskim jedinicama / min*.

$$OUE = 550 \cdot \underbrace{(1/3)}_{\text{intermitencija}} = 183,3 \text{ 1/min} \quad (4-21)$$

$$DGE = \underbrace{(720 - 550) \cdot (2/3)}_{\text{grijač}} + \underbrace{(720 - 550) \cdot (1/2)}_{\text{ventilator/grijač_odnos ventilator}} = 197,2 \text{ 1/min} \quad (4-22)$$

$$UUE = OUE - DGE = -13,9 \text{ 1/min} \quad (4-23)$$

U ovom slučaju, UUE iznosi $-13,9$ *energijskih jedinica / min*. Dakle, za jedan ovakav proces, vrijednost UUE parametra je negativna. To znači da, ako je električna snaga grijača 2 kW (i time grijač potroši 2 kWmin energije u svakom minutu), ukupna ušteda energije za konkretno postrojenje iznosiće $-13,9 \cdot 2 = -27,8$ kWmin. Drugim riječima, 27,8 kWmin dodatne energije je izgubljeno u poređenju sa kontinualnim režimom koji se odvijao u istim uslovima. Zaključuje se da u ovom slučaju, sa ovakvim odnosom konzumacije energije ventilatora i grijača, nije opravdano koristiti prekidni režim sušenja. Opravdanje za njegovu upotrebu moglo bi se naći tek u slučaju drugačijeg odnosa potrošnje, tj manje potrošnje ventilatora u odnosu na zagrijač.

4.3 Rezultati i diskusija

Kod autora [15], izvještava se o smanjenju ukupnog vremena sušenja prilikom upotrebe prekidnih režima, u odnosu na kontinualne. Premda preliminarna teorijska analiza ovu mogućnost zaista i nagovještava, u ovom istraživanju (sa pratećim radnim uslovima i korišćenom opremom), ona nije potvrđena. Time što se smanjenje ukupnog vremena sušenja nije javilo u tankom sloju za bilo koji korišćeni material, za sušenje u debelom sloju se ova ideja može sa sigurnošću odbaciti.

Svi pomenuti materijali sušeni su koristeći kontinualni režim 40°C / 3 m/s kao referentni i 60/30 prekidni režim. Karakteristike vazduha koji je korišćen za sušenje date su u tabeli 4-1. Pored toga, u tabeli 4-2 prikazane su sve relevantne osobine pomenutih materijala, koje su korišćene u proračunu.

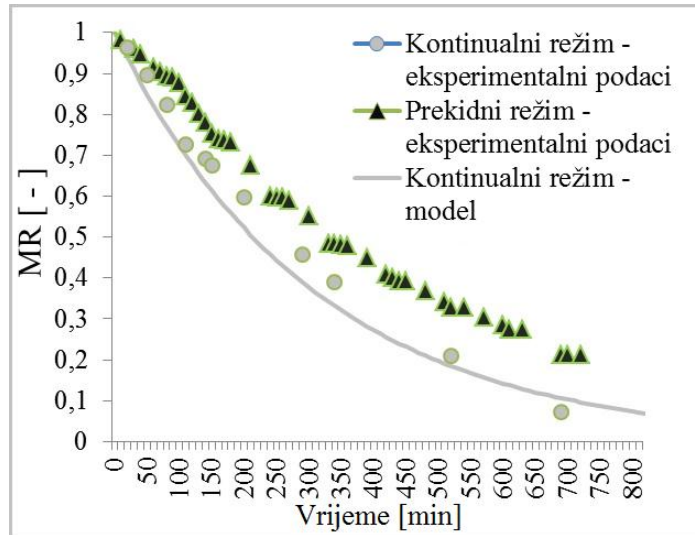
Tabela 4-1. Karakteristike vazduha za sušenje

	Orah (u ljsuci)	Kesten (u ljsuci)	Kesten (bez ljsuke)	Krompir	Bundeva	Maksimalno odstupanje
Temperatura vazduha za sušenje, T_A [°C]	40,3	40,5	40,5	39,2	39,1	±0,7
Temperatura okolnog vazduha, T_{AMB} [°C]	23	23	23,5	19,4	17,3	±1,1
Relativna vlažnost vazduha za sušenje, rh_A [%]	17,48	17,7	17,7	17,65	15,63	±1,5
Relativna vlažnost okolnog vazduha, rh_{AMB} [%]	46,4	48	48	55,4	55,7	±3,4

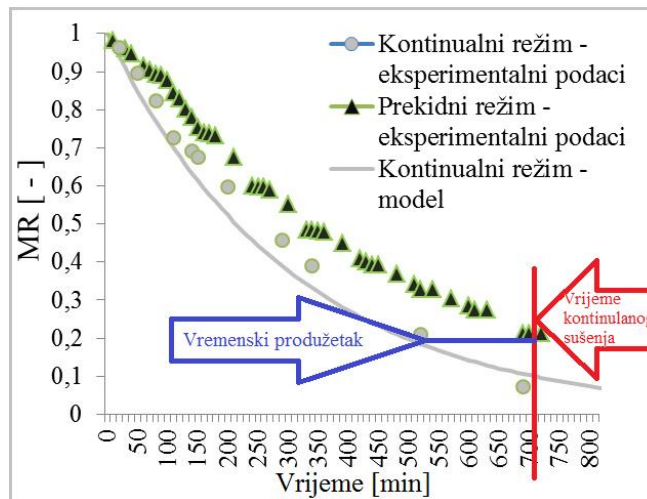
Tabela 4-2. Karakteristike materijala korišćenih za analizu mogućnosti uštede energije

	Orah (u ljsuci)	Kesten (u ljsuci)	Kesten (bez ljsuke)	Krompir	Bundeva
Efektivni poluprečnik, r [mm]	14.9	13	12.9	23	21
Početni sadržaj vlage po suvoj osnovi, M_o [%]	34	48	35	230	567
Ravnotežni sadržaj vlage po suvoj osnovi, M_e [%]	8	6	6	10	9
Broj uzoraka po jednoj turi sušenja	40	35	20	7	7

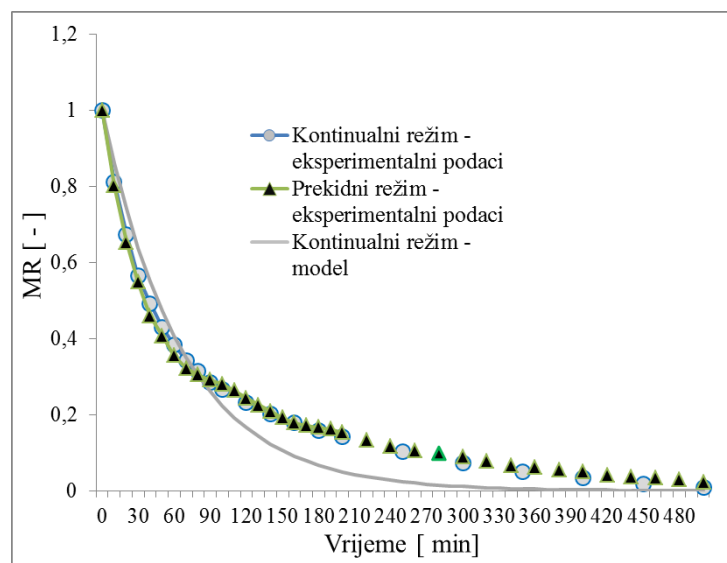
Naredni dijagrami ilustruju eksperimentalne podatke i modele za konstantne i varijabilne temperaturske uslove (prekidni režim), kao i eksperimentalne podatke za prekidni režim. Kriva sušenja za kontinualni režim koja je dobijena modelom važna je zbog određivanja efektivne difuzivnosti materijala. Njutnov model je i ovdje dao zadovoljavajuće rezultate poklapanja sa eksperimentalnim podacima, iako je koeficijent determinacije nešto niži nego kod oraha. Slika 4-3 prikazuje rezultate za orahe, a na slici 4-4 je prikazan objašnjeni postupak određivanja vremenskog produžetka. Kod određivanja vrijednosti efektivne difuzivnosti ostalih materijala (po istom postupku kao kod oraha), korišćeni su podaci o ravnotežnom sadržaju vlage preuzeti iz [16] za kestenje, odnosno [17] za krompir i [18] za bundevu. Zbog sličnosti postupka u određivanju efektivne difuzivnosti sa onim koji je kod oraha već prikazan u prethodnom poglavlju, detalji analize za pomenute materijale neće biti prikazani. Bitno je naglasiti da je početni sadržaj vlage po suvoj osnovi, za razliku od ostalih materijala, kod krompira i bundeve znatno veći od 100% (što će se vidjeti u nastavku). Rezultati istraživanja u ovom radu daju slične podatke onima koji su preporučeni u [19]. Slike 4-5 – 4-9 prikazuju podatke za bundevu, krompir, kesten bez ljsuke i kesten sa ljuskom, respektivno.



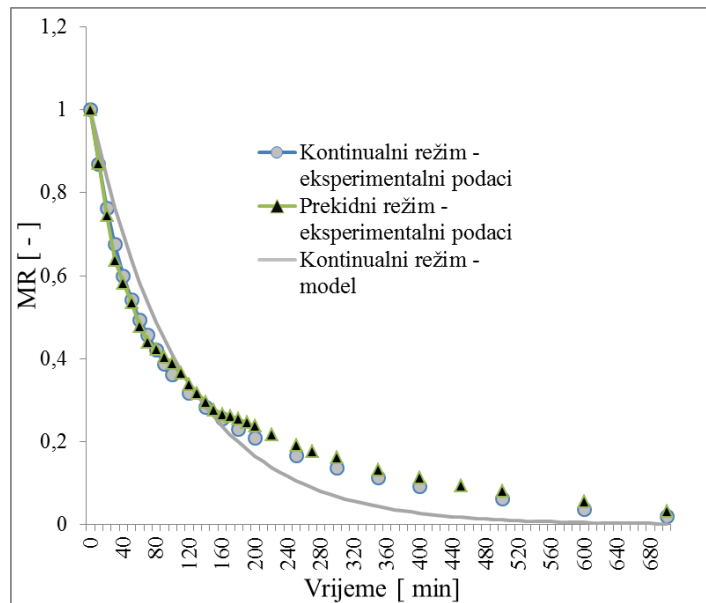
Slika 4-3. Rezultati kontinualnog i prekidnog sušenja oraha



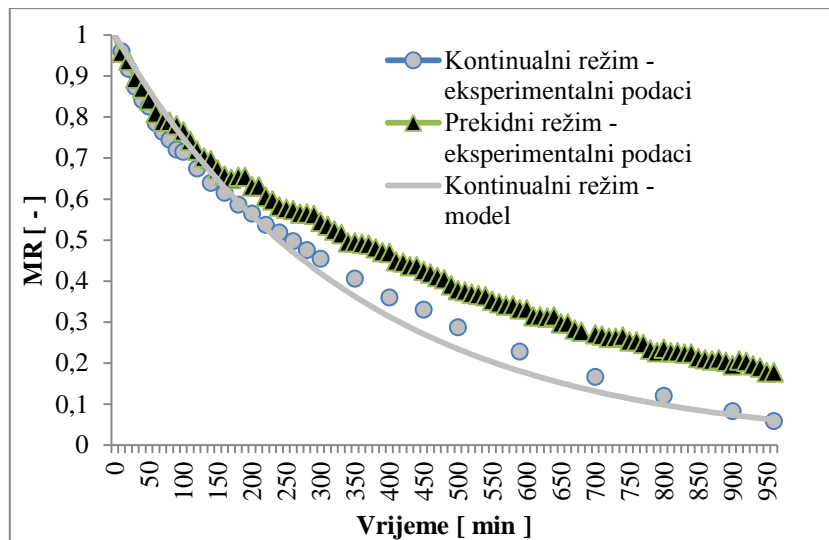
Slika 4-4. Princip određivanja vremenskog produžetka u grafičkoj interpretaciji



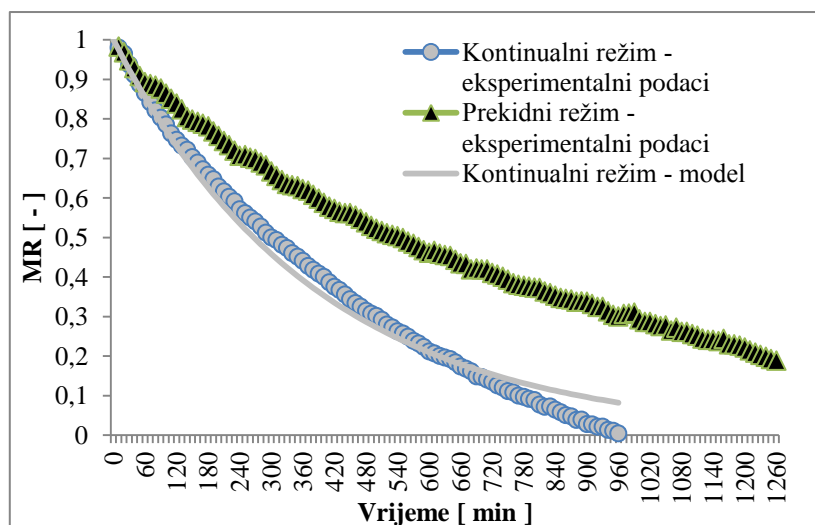
Slika 4-5. Rezultati kontinualnog i prekidnog sušenja bundeve



Slika 4-6. Rezultati kontinualnog i prekidnog sušenja krompira



Slika 4-7. Rezultati kontinualnog i prekidnog sušenja kestena bez ljuske



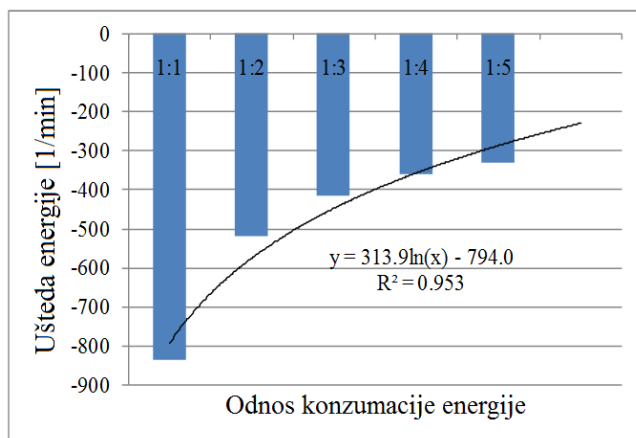
Slika 4-8. Rezultati kontinualnog i prekidnog sušenja kestena sa ljuskom

Prema ovim dijagramima određene su vremenski produžeci za prekidni režim. Naime, vrijeme potrebno da se dostigne $MR=0,2$ tokom prekidnog režima upoređeno je sa vremenom potrebnim da se ista vrijednost dostigne prilikom izvođenja kontinualnog režima. Ova vrijednost je odabrana zbog činjenice da je za svaki predstavljeni eksperiment, vrijeme potrebno da se kod kontinualnih režima dostigne krajnji sadržaj vlage dovoljno da se kod prekidnih režima dostigne bar $MR=0,2$. Nakon toga, ušteda energije je računata koristeći jednačinu (4-20), a koristeći postupak opisan kroz dati primjer u izrazima (4-21) – (4-23). Izračunate efektivne difuzivnosti, vremenski produžeci i ušteda energije za svaki partikularni slučaj odnosa konzumacije energije, prikazani su u tabeli 4-3:

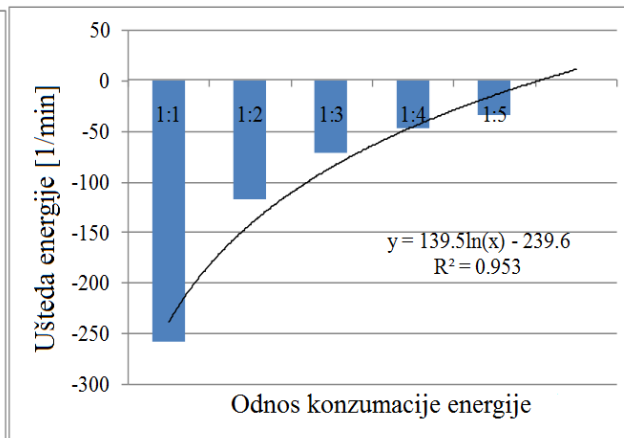
Tabela 4-3. Efektivne difuzivnosti i energetska ušteda

		Kesten (u ljusci)	Kesten (bez ljuske)	Orah (u ljusci)	Krompir	Bundeva
Efektivni poluprečnik, r [m]		0,013	0,0129	0,0139	0,023	0,021
Konstanta sušenja, k [1/min]		0,0026	0,0029	0,00325	0,009	0,015
Efektivna difuzivnost, D_{eff} [m^2/min]		$4,45 \cdot 10^{-8}$	$4,89 \cdot 10^{-8}$	$6,36 \cdot 10^{-8}$	$4,83 \cdot 10^{-7}$	$6,70 \cdot 10^{-7}$
Pouzdanost modela kontinualnog sušenja, R^2		0,9879	0,9924	0,9903	0,9813	0,9821
Vremenski produžetak, TE [%]		50	31,11	23,61	12,28	5
Energijska ušteda, [Energijskih jedinica / min] za različite odnose konzumacije energije	1:1	-835,8	-258,2	-98,9	50,46	93,4
	1:2	-520,8	-118,2	-13,9	85,46	103,4
	1:3	-415,59	-71,44	14,49	97,15	106,74
	1:4	-363,3	-48,2	28,6	102,96	108,4
	1:5	-331,8	-34,2	37,1	106,46	109,4

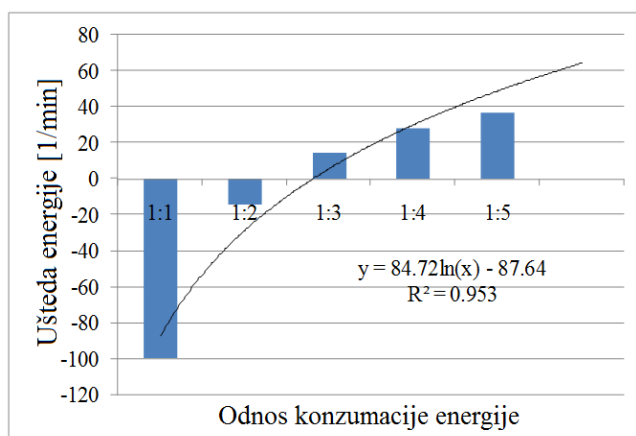
Na slici 4-9 a)-e), prikazana je zavisnost energijske uštede od vrijednosti efektivne difuzivnosti za svaki odnos konzumacije energije i za svaki pomenuti materijal, dok je na slici 4-9 f) prikazana opšta zavisnost energijske uštede od vrijednosti efektivne difuzivnosti. Dijagrami su prikazani zajedno sa logaritamskom funkcijom kojom su aproksimirani, sa jednim ekstrapoliranim periodom. Dijagrami su napravljeni u programu Microsoft Excel®. Prikazan je i koeficijent determinacije dobijen u istom programu. Ove funkcije nemaju naročitu svrhu u postupku modelovanja koji se ovdje izlaže, već samo treba da prikažu opštu tendenciju priraštaja energetske uštede sa promjenom odnosa energijske konzumacije.



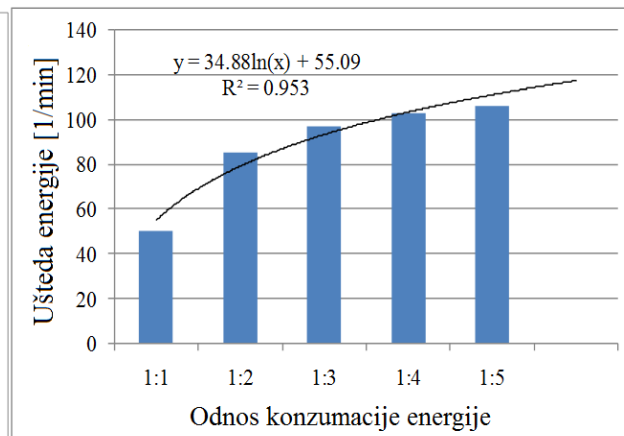
a)



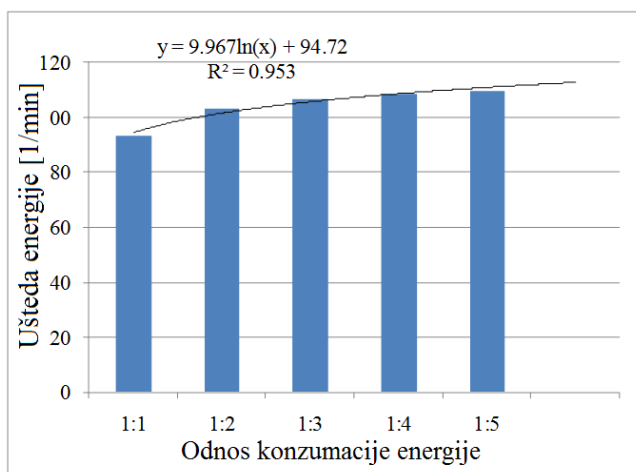
b)



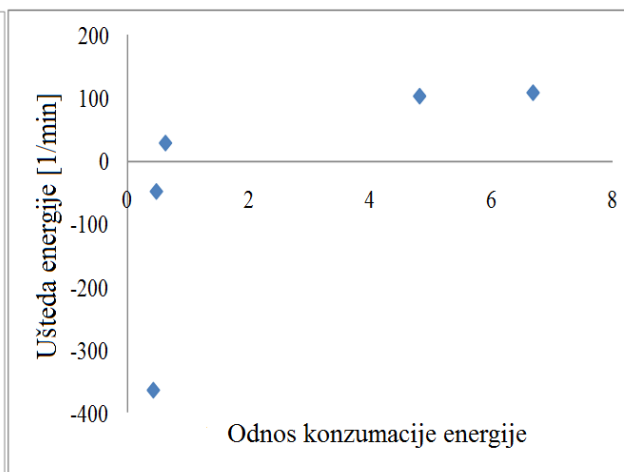
c)



d)



e)



f)

Slika 4-9. a)-e) Ušteda energije u zavisnosti od različitih odnosa konzumacije energije “ventilator:grijač” za kesten u ljusci, kesten bez ljuske, orah, krompir i bundevu, respektivno; f) Poređenje uštede energije za sve navedene efektivne difuzivnosti

Može se primjetiti da je primjena režima sa varijabilnom temperaturom na materijale sa niskom vrijednošću efektivne difuzivnosti pri datim uslovima diskutabilna. Na primjer, sušenje oraha u ovim uslovima dalo je pozitivne rezultate samo visoke odnose potrošnje energije "ventilator:grijač". Materijali sa još manjim vrijednostima efektivne difuzivnosti nisu uopšte dali pozitivne rezultate.

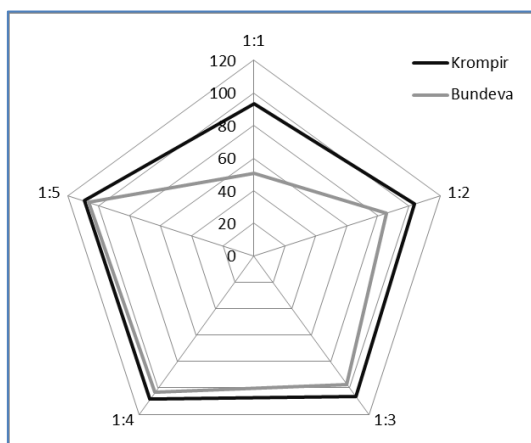
Primjena prekidnih režima za materijale koji imaju visoku pomenutu vrijednost daje pozitivne rezultate uštede energije u svim odnosima i kod ovakvih materijala primjena prekidnih režima nalazi svoj pun potencijal za primjenu.

U najboljem slučaju, tj. u slučaju sušenja bundeve, oko 100 energijskih jedinica po minuti može biti uštedeno, što bi konkretno za ovo ekeperimentalno postrojenje iznosilo 200 kWmin ukupno uštedene energije. Korisno je ovaj podatak staviti u službu poređenja potrošnje ekvivalentne količine goriva - uzimajući da je donja toplotna moć prirodnog gasa $9,26 \text{ kWh/m}^3$ (prema [20]), odnosno $555,6 \text{ kWmin/ m}^3$, ispada da se ovakvim postupkom može uštediti do $0,36 \text{ m}^3$ prirodnog gasa po jednom krugu sušenja. Pošto su energetska efikasnost postrojenja i potrošnja goriva parametri koji zavise od mnogo više faktora nego što je to samo primjena posebnog režima sušenja, možda je svrsishodnije pomenuti da procentualna ušteda energije u odnosu na kontinualni režim iznosi 26,3%. Ova ušteda je svakako manja od one o kojoj se izvještava kod autora [21], a koja iznosi i do 44%, ili one kod [1], gdje je potrošnja energije redukovana za 30%. Međutim, treba naglasiti da je u ovom slučaju produženje ukupnog vremena sušenja zanemarljivo, za razliku od pomenutih radova. Treba još jednom istaknuti da je ovo najpovoljniji slučaj od svih testiranih u tankom sloju, kao i to i da se u debljem sloju može očekivati da će ova ušteda biti manja, što je u prethodnom poglavlju za slučaj sušenja oraha i pokazano.

U pogledu dijagrama sa slike 4-9, može se primjetiti da funkcije kojima se aproksimiraju rezultati dobijeni za različite odnose energijske konzumacije teže da dostignu asimptotsku vrijednost. To znači da dalje smanjenje odnosa konzumacije energije ne donosi dodatnu uštedu, pa bi se time samo nepotrebno smanjivao kapacitet postrojenja za sušenje.

Kod [22] se, za sušenje jabuka u prekidnim režimima, izvještava o energetskej uštedi od 17% u realnim uslovima, (odnosno o mogućnosti uštede do 35% procenata u teorijskom proračunu adijabatne sušare), uz smanjenje ukupnog vremena sušenja od 35%. Uz očekivano očuvanje kvaliteta koje prekidno sušenje nudi kao jednu od najvećih prednosti njegovog korišćenja, u okolnostima koje su prezentovane u pomenutom radu ponestaje argumenata za korišćenje kontinualnih režima.

Na slici 4-10 prikazan je “radar” grafikon za dva najpovoljnija slučaja, na osnovu koga se plastičnije pokazuje u kojim zonama odnosa konzumacije energije se ostvaruje značajna ušteda. Veća udaljenost od centra simbolizuje veću energetskej uštedu. Unutrašnja skala predstavlja različite vrijednosti efektivne difuzivnosti, a na rubovima su dati odnosi konzumacije energije.



Slika 4-10. Ušteda energije u zavisnosti od različitih odnosa konzumacije energije “ventilator:grijač” za krompir i bundevu

Nakon svega iznesenog, potrebno je još jednom naglasiti smisao analize opravdanosti upotrebe prekidnih režima u zavisnosti od efektivne difuzivnosti. Kao što je rečeno u prethodnom poglavlju, efektivna difuzivnost direktno zavisi od prečnika tijela i od koeficijenta kinetike sušenja. Kinetički koeficijent opet zavisi od brzine i temperature agensa sušenja. Naravno, on će biti utoliko veći ukoliko je veća difuzivnost vlage kroz dati material, a zavisice i od početnog sadržaja vlage, iako to u ovom istraživanju nije prikazano kroz formalnu definiciju njihovog međuodnosa. Ukratko, kinetički koeficijent, a pogotovo relevantne dimenzije materijala, veličine su koje je relativno lako izmeriti, pa se lako može doći do vrijednosti efektivne difuzivnosti u datim uslovima odvijanja procesa.

Zbog toga, može se reći da efektivna difuzivnost predstavlja zapravo set parametara, koje možemo međusobno da variramo sve dok njena vrijednost za date uslove ostaje nepromjenjena. Tako dobijamo mogućnost ispitivanja opravdanosti upotrebe prekidnog procesa kod materijala različitih osobina (pri čemu može da se mijenja njihov prečnik ili kinetički koeficijent na osnovu bilo kog uticajnog faktora), gdje rezultujuća efektivna difuzivnost ostaje kao instruktivan pokazatelj opravdanosti primjene prekidnog režima sušenja.

4.4 Osvrt na drugu hipotezu

Druga hipoteza predviđa mogućnost ostvarenja energetske uštede prilikom upotrebe prekidnih režima, u odnosu na kontinualne režime sušenja. Međutim, ovakva ušteta nije bezuslovna i opravdano je očekivati izvjesno povećanje ukupnog vremena trajanja procesa. Ako je ovo povećanje značajno, postavlja se pitanje opravdanosti upotrebe prekidnih režima u realnim uslovima. U ovom radu iznesen je pokušaj kvantifikacije ovog problema, što je izvedeno kroz poređenje efektivne difuzivnosti materijala (koja može da se posmatra kao skup relevantnih parametara procesa sušenja), sa vremenskim produžecima za pojedinačne procese. Vremenski produžeci ne uzrokuju samo duže trajanje procesa – oni direktno utiču i na veću potrošnju energije (osim ako se ne radi o prekidnim režimima u kojima se postrojenje u periodu relaksacije isključuje u potpunosti, tj. isključuju se i ventilatori i grijači). Vrijednost efektivne difuzivnosti od oko $1 \cdot 10^{-7}$ je indikator područja u kome se upotreba režima sa varijabilnom temperaturom može početi smatrati opravdanom.

Kroz simulacije promjene profila sadržaja vlage u materijalu u kome dolazi do difuzije vlage do površine, moglo je da se vidi da kod materijala sa niskom efektivnom difuzivnošću površinski sadržaj vlage u periodu relaksacije raste previše sporo u kontekstu ukupnog predviđenog vremena sušenja.

Materijali visoke efektivne difuzivnosti dali su zanemarljivo mali produžetak vremena procesa i dodatnog gubitka energije. Za ove materijale izračunate su i konkretne vrijednosti uštede energije, koje mogu da posluže kao referentne u uslovima projektovanja sušara za koje su predviđeni prekidni režimi.

Najvažniji rezultati izneseni u ovom poglavlju objavljeni su u radu [23].

Literatura

- [1] Kowalski S.J., Pawłowski A., Energy consumption and quality aspect by intermittent drying *Chemical Engineering and Processing* 50 (2011), pp 384–390
- [2] Ramallo L.A., et al., Effect of the application of intermittent drying on *Ilex paraguariensis* quality and drying kinetics, *Journal of Food Engineering* 97 (2010), pp 188–193
- [3] Silva V., et al., Study of three-stage intermittent drying of pears considering shrinkage and variable diffusion coefficient, *Journal of Food Engineering* 180 (2016), pp 77–86
- [4] Yang Z., et al., A comparative study on intermittent heat pump drying process of Chinese cabbage (*Brassica campestris L.ssp*) seeds, *Food and Bioproducts Processing* 91 (2013), pp 381–388
- [5] Motevali A., et al., Comparison of energy parameters in various dryers, *Energy Conversion and Management* 87 (2014), pp 711–725
- [6] Kudra T., Energy aspects in drying, *Drying Technology* 22(5) (2004), pp 917–932
- [7] Toei R., *Course notes on drying technology*, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 1980.
- [8] Strumillo C., et al., Energy aspects in drying. In: Mujumdar A.S. (ed.), *Handbook of Industrial drying*, pp. 285–305. CRC Press, Boca Raton, 2007.
- [9] Motevali A., et al., Evaluation of energy consumption in different drying methods, *Energy Conversion and Management* 52 (2011), pp 1192–1199
- [10] Baker C.G.J., Energy efficient dryer selection—an update on developments. In: 14th International Drying Symposium (IDS'2004), vol. B, pp. 957–964. São Paulo, Brazil, 2004.
- [11] Barbosa de Lima, A.G., et al., Drying of Bioproducts: Quality and Energy Aspects, In Barbosa de Lima A.G., Delegado, J.M.P.Q (Eds.), *Drying and Energy Technologies* (pp. 1-18). Springer International Publishing Switzerland, 2016.
- [12] Incropera F.P., DeWitt D.P. *Fundamentals of heat and mass transfer 4th edition*, John Wiley and Sons, New Jersey, 1996.
- [13] Crank J., *Mathematics of Diffusion*, Oxford University Press, London, 1975.
- [14] ***, The MathWorks, Inc., *Partial Differential Equation Toolbox TM User's Guide*, Natick, MA, 2018.
- [15] Chou S.K., et al., On the intermittent drying of agricultural product, *Transactions of the Institution of Chemical Engineers* 78 (2000), pp 193-203
- [16] Vázquez G., Modeling of desorption isotherms of chestnut: influence of temperature and evaluation of isosteric heats, *Drying Technology* 19(6) (2001), pp 1189–1199
- [17] Naderinezhad S., et al., Mathematical modeling of drying of potato slices in a forced convective dryer based on important parameters, *Food Science & Nutrition* 4(1) (2016), pp 110–118

- [18] Perez N.E., Schmalko M.E., Convective drying of pumpkin: influence of pretreatment and drying temperature, *Journal of Food Process Engineering*, 32 (2009), pp 88–103
- [19] ***, ASHRAE Handbook (2006): Refrigeration: SI edition, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, 2006.
- [20] <http://www.gasruma.rs/index.php/prirodni-gas-m/specificnosti-prirodnog-gasa-m> (pristupljeno 10.12.2018)
- [21] Thakur A.K., Gupta A.K., Two stage drying of high moisture paddy with intervening rest period, *Energy Conversion and Management*, 47 (2006), pp 3069–3083
- [22] Filippina A.P., et al., Thermal intermittent drying of apples and its effects on energy consumption, *Drying Technology* 36(14) (2018), pp 1662-1677
- [23] Doder Đ., Đaković D., Energy savings in convective drying of various materials using variable temperature conditions, *Environmental Progress and Sustainable Energy* (2019) <https://doi.org/10.1002/ep.13277>

Poglavlje 5.

Zaključci

Kompleksna problematika na koju se nailazi u analizi procesa sušenja predstavlja izazov u pogledu modelovanja, simulacije, optimizacije, kao i realizacije stvarnih postrojenja za sušenje. Istraživanjem koje je u najvažnijim crtama prezentovano u ovom radu, nastojalo se da se prošire postojeća saznanja o fenomenima prenosa mase i toplote kod procesa sušenja u prekidnim režimima.

U radu su analizirani prekidni režimi sušenja, koji se izvode tako da se ne obustavlja tok agensa sušenja, već se samo isključuje grijač, čime se smanjuje temperatura agensa i tako štedi energija. Ovakvim pristupom se, pored uštede energije, ograničava i ukupno vrijeme sušenja. Postavljene su dvije hipoteze, u kojima se oslikavaju dva aspekta predstavljenog istraživanja. Zbog njihove kontekstualne uslovljenosti, odbrana prve hipoteze implicitno je iznesena u Poglavlju 3, a druge u Poglavlju 4 (što pomenutim hipotezama tematski odgovara), a na kraju ovih poglavlja, u vidu diskusije je sumirana odgovarajuća argumentacija.

Nastojalo se, takođe, da se odabere onaj metod modelovanja koji će na transparentan i jednostavan način prikazati specifičnosti procesa, a podrazumjevana je sferna geometrija materijala. U pogledu modelovanja, najupadljiviji zaključci odnose se na očiglednu zavisnost ovih modela od empirijskih parametara, potvrdu pouzdanosti modela statističkim pokazateljima, mogućnost formiranja modela za debeli sloj na osnovu modela sušenja u tankom sloju (ovdje prednost imaju jednostavniji modeli sušenja u tankom sloju), kao i na raznolikost rezultata energijske uštede kod različitih materijala. Ovakvom kritičkom analizom je postignuto da se plan upotrebe prekidnih režima sušenja prevashodno razvrsta u određene kategorije opravdanosti njihove upotrebe.

Posebna pažnja je, dakle, posvećena pitanju mogućnosti uštede energije primjenom prekidnih režima, što je u koherenciji sa fizičkim svojstvima materijala, a zapravo daje i određenu upotrebnu vrijednost, kako modelima koji služe za njihovu analizu, tako i tehničkim rješenjima sušara sa prekidnim režimima. Opravdano se može postaviti pitanje zašto je baš efektivna difuzivnost materijala određena za sredstvo poređenja materijala. Naime, upotrebom efektivne difuzivnosti kao parametra, izbjegava se opširna analiza velikog broja različitih materijala i različitih dimenzija u ovim uslovima. Poznavajući rezultate analize sušenja materijala određene efektivne difuzivnosti, može da se predvidi rezultat sušenja drugog materijala, za koji će se, prilagođavanjem prečnika i temperaturskih uslova, dobiti slična očekivana vrijednost efektivne difuzivnosti.

Pored svega pomenutog, što zapravo predstavlja raspravu o osnovnoj ideji rada i o postavljenim hipotezama, iz cjelokupnog istraživanja, modelovanja, simulacije i eksperimentalnog postupka, mogu da se izvuku i sledeći, nešto eksplicitniji zaključci:

- Jednačina (3-27) pokazuje dobro poklapanje sa eksperimentalnim podacima prekidnog sušenja u tankom sloju za orahe. Stoga može da se koristi za modelovanje prekidnog sušenja oraha za različite temperature i brzine vazduha, koje su niže ili jednake 40°C i 3

m/s. Ovako dobijen model sušenja u tankom sloju može da se iskoristi kao osnova za simulaciju sušenja u debelom sloju.

- Za sušenje oraha, poželjniji su kraći periodi relaksacije, jer učestaliji prekidi drže vrijednosti trenutne brzine sušenja veoma bliske referentnoj vrijednosti kod kontinualnih režima. Pokazalo se da režim 30/15 daje bolje rezultate u pogledu brzine sušenja u odnosu na režim 60/30. Takođe, pri sušenju u režimu 30/15 postignut je zadovoljavajući krajnji sadržaj vlage (blizak ravnotežnom sadržaju vlage), za razliku od režima 60/30.
- Pokazalo se da sušenje u svim slučajevima za koja su obavljena eksperimentalna istraživanja, odmah nakon početne faze zagrijavanja materijala (i shodno tome rasta brzine sušenja), prelazi u fazu opadajuće brzine sušenja, tj. zona konstantne brzine sušenja se ne pojavljuje. Takođe, čak i kod kontinualnih režima se javljaju značajne oscilacije brzine sušenja u prvih 200 min.
- Uticaj kore na kinetiku sušenja kod svih materijala koji imaju koru (ljusku) je evidentan. U svakom eksperimentu je proces sušenja tekao značajno brže ako se ljuska prethodno odstrani. Premda ovo može da zvuči kao očevidan zaključak, treba napomenuti da se kora pokazala kao veoma higroskopna i da njen sadržaj vlage (kada okolni uslovi to dopuštaju) raste značajno brže nego kod jezgre.
- Simulacije sušenja oraha u debelom sloju pokazuju da nije preporučljivo formirati slojeve čija visina prelazi približnih 15-20 cm. U slučaju sušenja debljih (tj. viših) slojeva, vjerovatnije je da će primjena prekidnog režima sušenja rezultovati samo sporijim sušenjem, bez ikakvih značajnih povećanja brzine sušenja u pojedinim periodima, odnosno bez ikakvih ušteda energije. U ovim uslovima, gornji slojevi će se jednostavno sušiti vazduhom niže temperature, sa blagim temperaturnim oscilacijama.
- Za sve materijale koji su upotrebljeni za sušenje u tankom sloju, javilo se bar malo produženje procesa u prekidnim režimima. Ovaj zaključak nije u saglasnosti sa određenim izvještajima iz literature (više o tome izneseno je u Poglavlju 4), gdje se pored energetske uštede javlja i smanjenje vremena sušenja.
- Iako smanjenje odnosa energijske konzumacije ventilatora i grijača omogućuje veću energijsku uštedu, treba računati i na kapacitet postrojenja. Naime, smanjenje snage ventilatora direktno utiče na smanjenje kapaciteta postrojenja, zbog niskog protoka agensa sušenja, pa ovu činjenicu treba imati u vidu prilikom projektovanja procesa.
- Za orahe, energijska ušteda može da se očekuje tek za manje odnose konzumacije energije za ventilator i grijač. Radi podsjećanja, ovaj odnos iznosi oko 1:4 za eksperimentalno postrojenje korišćeno u ovom istraživanju, pa je izvjesna ušteda energije postignuta.
- Za krompir i bundevu energijska ušteda se postiže već i kod visokih odnosa konzumacije energije.
- Za materijale niske efektivne difuzivnosti, preporučljivije je da se koristi varijanta prekidnog režima u kome se zaustavlja i rad ventilatora. U ovakvim okolnostima ukupno vrijeme trajanja sušenja biće značajno produženo, ali će se ostvariti energijska ušteda.

Disertacija predstavlja sintezu fundamentalnog i primjenjenog istraživanja u oblasti, pa prikazani rezultati i navedeni zaključci, mogu da se koriste i kao preporuke prilikom projektovanja procesa prekidnog sušenja.

Prilog – Matlab programski kodovi

Programski kodovi su razvijeni za svrhe proračuna i simulacija odrađenih u ovom istraživanju, a prikazani su po redoslijedu izvršavanja. Nastojalo se da se sve dodijeljene vrijednosti označavaju onako kako je to u literaturi uobičajeno, da bi čitaocu bili razumljiviji. Zato, neće biti naročitih napomena o tome šta koji simbol predstavlja. Programi su fleksibilni u smislu izbora konstantnih parametara, vremenskih koraka, temperaturnih uslova i slično.

Kod za sukcesivno računanje fizičkih osobina materijala u zavisnosti od sadržaja vlage:

```
Tinf=[23 40 40 40 40 40 40 23 23 23 40 40 40 40 40 23 23 23 40 40 40 40, ...
 40 40 23 23 23 40 40 40 40 40 23 23 23 40 40 40 40 40 23, ...
23 23 40 40 40 40 40 23 23 23 40 40 40 40 40 23 23 23 40 40 40, ...
40 40 40 23 23 23 40 40 40 40 40 23 23 23 40 40 40 40 40 23 23 23 40
40, ...
40 40 40 40];
% Mddb=0.097+(0.34-0.097)*MRd
Mddb=Mprek2
Mdw=Mddb./(Mddb+1)
Cp=ones(1,97)
ro=ones(1,97)
%global lambdaswa
lambda=lambdaswa
C1=1.4
zeta=1.8
alfa=40.92
T=ones(1,97)
T(1)=16
d=0.0284
r=d/2
t=10*60
for i=1:96
    Cp(i)=Mdw(i)*4186+(1-Mdw(i))*1944+((68.8-
2.78*Mddb(i))*0.012/(232.57+29.43*Mddb(i)))*1005 %odradjeno
    rot=1./((1-Mdw(i))/1115.78+(Mdw(i))/1000)
    ro(i)=1./((1-((68.8-
2.78*Mddb(i))*0.012/(232.57+29.43*Mddb(i))))/rot+(((68.8-
2.78*Mddb(i))*0.012/(232.57+29.43*Mddb(i))))/1.2)

    T(i+1)=Tinf(i+1)-(Tinf(i+1)-T(i))*C1*exp(-
zeta^2*(lambda(i)*t)/(ro(i)*Cp(i)*r^2))
end
```

Dodijeljena vrijednost M_{prek2} je uvezena iz Excel tabele sa eksperimentalnim podacima promjene sadržaja vlage u uslovima prekidnog sušenja. Uz pomenuti kod, dat je i onaj u kome se računaju Biotov broj i koeficijent prelaza toplote:

```
% Mddb=0.097+(0.34-0.097)*MRd
Mddb=Mprek2
Mdw=Mddb./(Mddb+1)
rosw=1./((1-Mdw)/1115.78+(Mdw)/995)
row=995
fiw=Mdw.*rosw/row
lambdasw=(1-fiw)*0.1979+fiw*0.618
epsilon=(68.8-2.78*Mddb)*0.01
lambdaswa=(1-epsilon).*lambdasw+epsilon*0.0267
```



```

plot(t1,MRd,'c')
% plot(tprek1,MRprek1,'s')
tprek2=linspace(0,960,length(MRprek2))
% plot(tprek2,MRprek2,'^')
tprek3=linspace(0,960,length(MRprek3))
plot(tprek3,MRprek3,'ro')
plot(t1,MRm(4,:), 'b--')
hold off

```

Napominje se da je za izvršenje programa za simulaciju sušenja u tankom sloju, za sve slučajeve, potrebno približno 15 sekundi (Intel - i3, 4 GB RAM). Mnogo više vremena (približno 20 časova) potrebno je za izvršenje koda za simulaciju sušenja u debelom sloju. Ovdje rezultati prethodnog programa učestvuju u određivanju karakteristika jednog sloja.

```

%definisanje konstantnih vrijednosti
l=0.6 %m
Dp=0.03
r=0.015;
rod=550 %kg/m3
vmin=0.406*60 %m/min
Ga=100 %Ga=rod*vmin %kg/min/m2
%hcv=25*(Ga/Dp)^0.7 %kJ/min/m3-K
cpa=1.008 %kJ/kgK
cpw=1.89 %kJ/kgK
cpg=2.09 %kJ/kgK
cpl=4.186 %kJ/kgK
ap=101.325 %kPa
ps0=7.375 %kPa

%-----

Tabr=[313 313 313 313 313 313 313 313 313 313 313 313 313 313 313 313 313 313 313 313
313 313 313 313 313 313 313 313, ...
313 313 313 313 313 313 313 313 313 313 313 313 313 313 313 313 313 313 313]
Ta0=repmat(Tabr,1,1)
Ta0(1:10)=[296 298 300 302 304 306 308 310 311 312]
%koraci
n=60
nt=length(Ta0);
deltax=1/n %m
deltat=1 %min
%-----

Tg0=280 %K
rh0=0.4 % -
M0=0.34 % -
Ta=zeros(n,nt)
Tg=zeros(n,nt)
H=zeros(n,nt)
M=zeros(n,nt)
rh=zeros(n,nt)
dMdt=zeros(n,nt)
Ta(1,:)=Ta0
Tg(:,1)=Tg0
M(:,1)=M0
rh(1,:)=rh0
H0=(0.622*rh0*ps0)/(ap-rh0*ps0)
H(1,:)=H0
matp=[1:60]
matp(1:6)=6

```



```

pdropmax=120          %Pa/0.6 m
ndrop=linspace(50,59,60)

%-----vise slojeva-----
for j=1:1:(nt-1)
    for i=1:1:(n-1)

        A=144/(120-2*ndrop(i))
        B=-22.7
        C=-0.571
        polinom=[A B C]
        v=roots(polinom)
        De=5.792*10^-2*v(1)^0.327*exp(-4413.673/Ta(i,j+1));
        k=(pi^2*De)/r^2
        Me=10^(((log10(log10(1/(1-((rh(i,j+1)+rh(i,j))/2))))))+2.05)/1.77)
        Me=Me/100
        if isreal(Me) == 0
            Me=real(Me)
        else
            end
        M(i,j+1)=M(i,j)*exp(-k*deltat)+Me*(1-exp(-k*deltat))
%M(i,j)-(M(i,j)-Me)*k*u*(teq+deltat/60)^(u-1)*deltat/60
        dMdt(i,j)=(M(i,j+1)-M(i,j))/deltat

        hcv=(12*v(1)*Ta(i,j+1)^0.3*0.07)/(Dp^1.35)          %faktor 0.07 za
pretvaranje kcal/h u kJ/min

        P=(-hcv+cpw*rod*dMdt(i,j))/(Ga*(cpa+cpw*H(i,j+1)))
        R=-hcv/(rod*(cpg+cpl*(M(i,j+1)+M(i,j))/2));
        Lg=2.32*((1094-0.026*((Ta(i,j+1)+Ta(i,j))/2)-255.72))*(1+2.4962*exp(-
21.73*(M(i,j+1)+M(i,j))/2));          %17.78-273.15
        Q=((Lg+(cpw-cpl)*Tg(i,j))*dMdt(i,j))/(cpg+cpl*(M(i,j+1)+M(i,j))/2);
        Tg(i,j+1)=Tg(i,j)*exp(R*deltat)+((R*((Ta(i,j+1)+Ta(i,j))/2)-Q)*(1-
exp(R*deltat)))/R;
        Ta(i+1,j+1)=Ta(i,j+1)*exp(P*deltat)+Tg(i,j+1)*(1-exp(P*deltat));
        H(i+1,j+1)=H(i,j+1)-(rod/Ga)*(dMdt(i,j))*deltat
        ps=exp(52.575-6790/(Ta(i+1,j+1))-5.0281*log(Ta(i+1,j+1)));
        rh(i+1,j+1)=(ap/(1+0.622/H(i+1,j+1)))/ps;

%rekalkulacija-----

        %v=1
        Del=5.792*10^-2*v(1)^0.327*exp(-4413.673/Ta(i+1,j+1));
        k1=(pi^2*De)/r^2
        Me1=10^(((log10(log10(1/(1-((rh(i+1,j+1)+rh(i,j))/2))))))+2.05)/1.77)
        Me1=Me1 /100
        if isreal(Me1) == 0
            Me1=real(Me1)
        else
            end

        M1=exp(-k1*j)*(M(1)-Me1)+Me1          %M(i+1,j)-(M(i+1,j)-
Me1)*k1*u*(teq+deltat/60)^(u1-1)*deltat/60;          %M(i+1,j+1)
        dMdt1=(M1-M(i+1,j))/deltat;
        P1=(-hcv+cpw*rod*dMdt1)/(Ga*(cpa+cpw*((H(i+1,j+1)+H(i,j+1))/2)));
        R1=-hcv/(rod*(cpg+cpl*(M1+M(i,j+1))/2));
        Lg1=2.32*((1094-0.026*((Ta(i+1,j+1)+Ta(i,j))/2)-
255.72))*(1+2.4962*exp(-21.73*(M1+M(i,j+1))/2));
        Q1=((Lg1+(cpw-cpl)*Tg(i+1,j))*dMdt1)/(cpg+cpl*(M1+M(i,j+1))/2);
        Tg(i+1,j+1)=Tg(i+1,j)*exp(R1*deltat)+((R1*((Ta(i,j)+Ta(i+1,j+1))/2)-
Q1)*(1-exp(R1*deltat)))/R1

```

```

    Ta(i+1,j+1)=Ta(i,j+1)*exp(P1*deltax)+((Tg(i,j+1)+Tg(i+1,j+1))/2)*(1-
exp(P1*deltax))

    ps=exp(52.575-6790/(Ta(i+1,j+1))-5.0281*log(Ta(i+1,j+1)));
    rh(i+1,j+1)=(ap/(1+0.622/H(i+1,j+1)))/ps

    %sredjivanje prethodne kolone
    Ta(i+1,j)=Ta(i+1,j+1);
    H(i+1,j)=H(i+1,j+1);
    rh(i+1,j)=rh(i+1,j+1);

    %-----
%iskljukuje se mogucnost pojave kondenzacije
    if Ta(i+1,j+1) < 293
        Ta(i+1,j+1)=293;
    else
    end
        if rh(i,j) >= 0.95
            rh(i,j) = 0.9;

        else
        end
        if rh(i+1,j+1) >= 0.95
            rh(i+1,j+1)=0.9;
        else
        end
    end
end

%-----
%Bira se domen za iscrtavanje grafika - pocetni (1), srednji (2,3,4) i gornji
(5) sloj

M1plot=M(1,:);
M2plot=M(5,:);
M3plot=M(15,:);
M4plot=M(40,:);
M5plot=M(59,:);
dMdt1plot=abs(dMdt(1,:));
dMdt2plot=abs(dMdt(5,:));
dMdt3plot=abs(dMdt(15,:));
dMdt4plot=abs(dMdt(40,:));
dMdt5plot=abs(dMdt(59,:));
Ta1plot=Ta(1,:);
Ta2plot=Ta(5,:);
Ta3plot=Ta(15,:);
Ta4plot=Ta(40,:);
Ta5plot=Ta(59,:);
Tg1plot=Tg(:,2);
Tg2plot=Tg(:,2);
Tg3plot=Tg(:,6);
H1plot=H(:,2);
H2plot=H(:,2);
H3plot=H(:,6);
rh1plot=rh(:,2);
rh2plot=rh(:,2);
rh3plot=rh(:,6);
xplot=linspace(0,30,length(M1plot));
tplot=linspace(0,nt,length(M1plot));

%-----

```

```

subplot(1,3,1)
plot(tplot,M1plot)
xlabel('time [min]')
ylabel('moisture content d.b. [kg/kg]')
hold on
plot(tplot,M2plot,'c')
plot(tplot,M3plot,'k')
plot(tplot,M4plot,'r')
plot(tplot,M5plot,'y')
hold off
grid on

```

```

subplot(1,3,2)
plot(tplot,Ta1plot)
xlabel('time [min]')
ylabel('air temperature [K]')
hold on
plot(tplot,Ta2plot,'c')
plot(tplot,Ta3plot,'k')
plot(tplot,Ta4plot,'r')
plot(tplot,Ta5plot,'y')
hold off
grid on

```

```

subplot(1,3,3)
plot(tplot,dMdt1plot)
xlabel('time [min]')
ylabel('moisture removal rate [1/min]')
hold on
plot(tplot,dMdt2plot,'c')
plot(tplot,dMdt3plot,'k')
plot(tplot,dMdt4plot,'r')
plot(tplot,dMdt5plot,'y')
hold off
grid on

```

Simulacija promjene unutrašnjeg profila distribucije vlage, za potrebe analize iznesene u poglavlju 4, zapravo je rješavanje parabolične PDJ po kroz poznatu Matlab rutinu:

```

function GasnaSfera
global d r roi roinf tmax m x t
d = 0.035; % m, precnik
r = d/2; % m, poluprecnik
roi = 0.34; %kg/m3
roinf = 0.04; %kg/m3
tmax = 200; %s, ukupno vrijeme posmatranja procesa

m = 2;
x = linspace(0, r, 20);
t = 0:10:tmax;

sol = pdepe(m, @pdefunc, @icfunc, @bcfunc, x, t);
u = sol;

% površinski dijagram
figure(1)
h=surf(x, t, u)
xlabel('Radius [m]')
ylabel('Time [s]')
zlabel('Moisture content d.b. [kg/kg]')
figure(2)

```

```

ha=plot(x,u)
xlabel('Radius [m]')
ylabel('Moisture content d.b. [kg/kg]')
figure(3)
hb=plot(t,u)
xlabel('Time [s]')
ylabel('Moisture content d.b. [kg/kg]')
% -----
function [c,f,s] = pdefunc(x,t,u,dudx)
global DAB
DAB = 6.3737e-08; % difuzivnost

c = 1/DAB;
f = dudx;
s = 0;
% -----
function u0 = icfunc(x)
roi = 0.34; % kg/m3, pocetna koncentracija
% na pocetku procesa u0=roi
u0 = -1.1467e+07*x^4+2.57e+05*x^3-1824.1*x^2+4.1806*x+0.33852;%nakon relaksacije
% -----
function [pl,ql,pr,qr] = bcfunc(xl,ul,xr,ur,t)
beta1=3.325434754672599e-05 %0.2981e-04 %0.003584421

pl = ur;
ql = 1;
pr = ur;%alfa*(ur-0.1)
qr = 1; %2.7737e-08

```

Prethodno je potrebno izračunati Šmitov i Šervudov broj, a zatim koeficijent prelaza mase koji je ovdje označen sa beta1.

```

%koeficijent konvekcije
T=40 %deg C
p=1 %atm
ni=18.6e-6
mi=17.89e-6
mis=17.44e-6
v=3
d=0.035
DAB=(4.2e-8)/60
Sc=ni/DAB
Re=(d*v)/ni
Sh=2+(0.4.*Re.^0.5+0.06.*Re.^0.66)*Sc^0.4*(mi/mis)^0.25
Sh1=2+0.552*Re^0.5*Sc^(1/3)
beta=(DAB.*Sh)/d
beta1=(DAB*Sh1)/d

```

Biografija autora

Đordije Doder je rođen u Trebinju 1988. godine. Osnovnu školu i gimnaziju završio je u Gacku. Diplomirao je na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu 2012. godine, na studijskom programu Energetika i procesna tehnika. Iste godine, stekao je zvanje master inženjera mašinstva, na studijskom modulu za Toplotnu i procesnu tehniku. Od 2013. zaposlen je u zvanju asistenta na katedri za Procesnu tehniku, Departmana za Energetiku i procesnu tehniku, na Fakultetu tehničkih nauka. Angažovan je u izvođenju vežbi na nekoliko predmeta iz oblasti termodinamike, prenosa toplote i procesne tehnike.

Reprezentativne reference:

M22 – Doder Đ., Đaković D.: Energy Savings in Convective Drying of Various Materials Using Variable Temperature Conditions, *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 2019.

<https://doi.org/10.1002/ep.13277>

M22 – Doder Đ., Đaković D.: Modeling of Intermittent Convective Drying of Walnuts in Single Layer and its Influence on Deep Bed Drying Simulation, *Thermal Science*, 2019. (rad je prihvaćen za objavljivanje)

M22 – Doder Đ., Miljković B., Stepanov B., Pešenjanski I.: Adapting the Forchheimer Equation for the Flow of Air through Wheat Straw Beds, *Thermal Science*, 2016, Vol 20, Suppl. 2, pp. 463-470

M33 – Doder Đ., Đaković D.: An Analysis of the Possibilities for Intermittent Walnuts Drying, 8. PSU-UNS International Conference on Engineering and Technology - ICET, Novi Sad, 8-10 Jun, 2017

M33 – Doder Đ., Đaković D.: Energy savings in drying processes with variable temperature conditions, SEE SDEWES Conference, Novi Sad 2018.

M33 – Đaković D., Doder Đ., Anđelković A.: HOW TO CHOOSE WALNUT DRYING PROCESS, Međunarodni kongres o procesnoj industriji PROCESING (30; Beograd; 2017), SMEITS, 1-2 Jun, 2017, pp. 323-328

M33 – Doder Đ., Đaković D.: WALNUT DRYING PROCESS, Međunarodni kongres o procesnoj industriji PROCESING (30; Beograd; 2017), SMEITS, , pp. 329-335

M33 - Pešenjanski I., Miljković B., Doder Đ.: Sunflower husk combustion in 18 MW boiler cyclone furnace in district heating system – Case study, 14. Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia, Soko Banja, 13-16 Oktobar, 2010.

M33 - Doder Đ., Stepanov B.: Investigation of air pressure drop through porous wheat straw bed, 7. PSU-UNS International Conference on Engineering and Technology - ICET, Phuket, 19-20 Jun, 2015.

M64 – Đaković D., Doder Đ.: Wood drying in terms of energy efficiency improvement, 10. Međunarodni forum o čistim energetske tehnologijama, Novi Sad, 27-28 Septembar, 2016, pp. 1-4

M64 – Doder Đ., Đaković D.: SOLAR ENERGY APPLICATIONS FOR WALNUT DRYING PROCESS, 11. Međunarodni forum o čistim energetske tehnologijama, Novi Sad, 26-27. Septembar, 2017.

M64 – Doder Đ., Đaković D.: KONVEKTIVNO SUŠENJE ORAHA KORIŠĆENJEM SOLARNE ENERGIJE – STUDIJA SLUČAJA ZA REGION VOJVODINE, 12. Međunarodni forum o čistim energetske tehnologijama, Novi Sad, 02-03. Oktobar, 2018.

M82 - Pešenjanski I., Miljković B., Doder Đ.: Postrojenje za ispitivanje otpora strujanju vazduha kroz porozni sloj, 2015.