

Optimiranje i modeliranje procesa sušenja voća i povrća

Velić, Darko

Doctoral thesis / Disertacija

2006

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, FACULTY OF FOOD TECHNOLOGY / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Prehrambeno-tehnološki fakultet Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:109:702465>

Rights / Prava: [Attribution-NonCommercial 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-12**

REPOZITORIJ

PTF OS

PREHRAMBENO-TEHNOLOŠKI FAKULTET OSIJEK



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Food Technology Osijek](#)



**PREHRAMBENO TEHNOLOŠKI FAKULTET
SVEUČILIŠTA J. J. STROSSMAYERA U OSIJEKU**

Darko Velić, dipl. ing.

**OPTIMIRANJE I MODELIRANJE PROCESA
SUŠENJA VOĆA I POVRĆA**

DOKTORSKI RAD

Osijek, srpanj 2006.

UDK:	66.047: 634.1+635.1
Znanstveno područje:	Biotehničke znanosti
Znanstveno polje:	Prehrambena tehnologija
Institucija u kojoj je rad izrađen:	Prehrambeno tehnološki fakultet Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Voditelj:	Dr. sc. Mate Bilić, izv. prof.
Broj stranica:	155
Broj slika:	90
Broj tablica:	31
Broj priloga:	1
Broj literaturnih referenci:	171
Datum obrane:	17. srpnja 2006.

Sastav Povjerenstva za obranu:

1. Dr. sc. Drago Šubarić, izv. prof. - predsjednik
2. Dr. sc. Mate Bilić, izv. prof. - voditelj
3. Dr. sc. Srećko Tomas, red. prof. - član
4. Dr. sc. Branko Tripalo, red. prof. - član
5. Dr. sc. Dragan Kovačević, red. prof. - član
6. Dr. sc. Bernarda Šeruga, red. prof. - zamjena člana

Rad je pohranjen u:

Knjižnici Prehrambeno tehnološkog fakulteta Sveučilišta J. J. Strossmayera u Osijeku, Kuhačeva 20; Nacionalnoj i sveučilišnoj Knjižnici u Zagrebu, Hrvatske bratske zajednice bb; Sveučilište u Rijeci, Riječke revolucije 7; Sveučilište u Splitu, Livanjska 5.

UDK: 66.047: 634.1+635.1

Scientific Area: Biotechnical Sciences

Scientific Field: Food Technology

Thesis performed at: Faculty of Food technology
Josip Juraj Strossmayer University of Osijek

Supervisor: Dr. sc. Mate Bilić, associated professor

Number of pages: 155

Number of figures: 90

Number of tables: 31

Number of supplements: 1

Number of references: 171

Date of the thesis defence: 17th July 2006.

Reviewers:

Dr. sc. Drago Šubarić, associated professor
Dr. sc. Mate Bilić, associated professor
Dr. sc. Srećko Tomas, full professor
Dr. sc. Branko Tripalo, full professor
Dr. sc. Dragan Kovačević, full professor
Dr. sc. Bernarda Šeruga, full professor

Thesis deposited in:

Library of Faculty of Food Technology Josip Juraj Strossmayer University of Osijek,
Kuhačeva 20; National and University Library, Hrvatske bratske zajednice bb; University
of Rijeka, Riječke revolucije 7; University of Split, Livanjska 5.

Tema rada je prihvaćena na VIII. (osmoj) redovitoj sjednici Fakultetskog vijeća Prehrambeno tehnološkog fakulteta, Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, akademske 2004./2005. god., održanoj 11. svibnja 2005. godine.

OPTIMIRANJE I MODELIRANJE PROCESA SUŠENJA VOĆA I POVRĆA

Sažetak

Provedeno je optimiranje i modeliranje procesa sušenja voća i povrća na osnovi praćenja kinetike sušenja i pokazatelja o očuvanju nutritivnih i organoleptičkih svojstava. Kinetika sušenja odabranih uzoraka voća i povrća determinirana je kontinuiranim praćenjem: promjene mase uzoraka, temperaturnog profila materijala i medija za sušenje, te profila vlage. Istraživanje je provedeno primjenom termogravimetrijske tehnike s laboratorijskim uređajima koji su u svrhu ovog istraživanja posebno nadograđeni i opremljeni: tunelski sušionik (TD), vakuum sušionik (VK), infracrveni sušionik (IC), te sušionik za sušenje s fluidiziranim slojem (FBD). U svrhu ubrzanja kinetike sušenja, sprečavanja enzimske aktivnosti kao i neenzimskih promjena tijekom procesa sušenja, primijenjeni su različiti fizikalno-kemijski postupci prethodne obrade uzoraka, te su ovisno o metodi sušenja predložena odgovarajuća rješenja. Za procjenu pojedine metode, te za praćenje utjecaja procesnih parametara na svojstva osušenih uzoraka, primijenjene su standardne analitičke metode termogravimetrija, rehidratacija, kolorimetrija, volumetrija, te tekućinska kromatografija visokog učinka (HPLC). Modeliranjem eksperimentalnih podataka promjene vlažnosti za uzorke marelice i jabuke sušene u tunelskom sušioniku pri različitim temperaturama sušenja (50 °C, 60 °C, 70 °C i 80 °C) i brzinama strujanja zraka (1,4 m s⁻¹; 2,1 m s⁻¹; 2,8 m s⁻¹) utvrđeno je da najbolje slaganje s eksperimentalnim podacima daje Midilli i Kucukov model. Izrađeni su i novi poluempirijski modeli koji mogu poslužiti za simuliranje kinetike sušenja uzoraka marelice i jabuke unutar granica ispitanih procesnih parametara, temperature i brzine strujanja zraka. Ispitan je utjecaj temperature sušenja i različitih metoda sušenja na sadržaj β-karotena u uzorcima mrkve. Najmanja degradacija β – karotena izmjerena je u neobrađenim uzorcima mrkve koji su sušeni u tunelskom sušioniku pri temperaturi sušenja 70 °C i brzini strujanja zraka 2,8 m s⁻¹. Najveći rehidrationski omjer izmjeren je kod uzoraka marelice koje su sušene u tunelskom sušioniku pri temperaturi 80 °C i brzini strujanja zraka 1,4 m s⁻¹. Najbolji rezultati (visoka vrijednost rehidrationskog omjera i najmanja ukupna promjena boje) dobiveni su u slučaju sušenja uzoraka jabuke u tunelskom sušioniku (TD) pri temperaturi sušenja 50 °C, te kod sušenja uzoraka mrkve i peršina u tunelskom sušioniku (TD) pri temperaturi sušenja 60 °C i brzini strujanja zraka od 2,8 m s⁻¹. Dobivena je i ovisnost utjecaja različitih postupaka prethodne obrade na kinetiku sušenja i parametre kvalitete osušenih proizvoda.

Ključne riječi: modeliranje, optimiranje, kinetika sušenja, voće, povrće, prethodna obrada, poluempirijski modeli

OPTIMISATION AND MODELLING OF FRUITS AND VEGETABLES DRYING PROCESSES

Abstract

The influence of the process parameters on the drying kinetics of different food products, fruits and vegetables, using different dryers was investigated. The dehydration kinetics of samples was determined by continuous recording of mass changes, temperature profile of material and drying media as well as moisture profile using computer process control. To speed up the dehydration kinetics, and to eliminate the enzymatic browning activity as well as non enzymatic changes during dehydration process different physical and chemical procedures of samples pre-treatment were applied, depending on method used, related technical solutions were proposed. Evaluation of each method and the influence of the process parameters on the properties of dried materials were performed using standard analytical methods: thermo-gravimetric, rehydration, colorimetric, volumetric and high pressure liquid chromatography – HPLC. The changes in colour and volume as well as rehydration rate (reconstitution characteristic) for each of the drying methods were studied. After defining the optimal drying process parameters, different pre-treatment methods were investigated. The existing mathematical models (thin-layer equations) were tested and new semi-empirical models that describe drying processes of fruits and vegetables using different driers were defined.

When modelling the experimental data for apricot and apple samples which were dried in the tunnel dryer at drying temperatures of 50 °C, 60 °C, 70 °C and 80 °C and air flow velocities of 1,4 m s⁻¹; 2,1 m s⁻¹ and 2,8 m s⁻¹, Midilli–Kucuk model proved to be the best and showed a good agreement with the experimental data. A new semi-empirical models were developed for the simulation of apricot and apple drying at temperature range 50–80 °C and velocity range 1,4–2,8 m s⁻¹ of drying air. Furthermore, the influence of the drying temperature and drying methods on the content of the main nutritive components was studied. The degradation of β – carotene was the smallest when non-treated carrot samples were dried in the tunnel dryer (TD) at temperature of 70 °C and at airflow velocities of 2,8 m s⁻¹. The highest rehydration ratio was observed when apricot samples were dried at temperature of 80 °C and airflow velocities of 1,4 m s⁻¹. The best results (good rehydration ratio and colour) were achieved when apple samples were dried in the tunnel dryer (TD) at temperature of 50 °C. As for carrot and parsley root samples, the best results were achieved when drying in the tunnel dryer (TD) at temperature of 60 °C and airflow velocities of 2,8 m s⁻¹. The influence of the different sample pre-treatment procedures on the drying kinetics and the properties of dried materials was determined.

Key words: modelling, optimisation, drying kinetics, fruits, vegetables, pre-treatment, semi-empirical models

Iskreno se zahvaljujem svima koji su mi na bilo koji način pomogli u izradi ovog doktorskog rada.

Hvala prof. dr. sc. Mati Biliću i prof. dr. sc. Srećku Tomasu na savjetima, podršci i logističkoj pomoći.

Od srca hvala kolegama, suradnicima i prijateljima na ukazanom povjerenju, razumjevanju i pomoći bilo koje vrste.

Veliko HVALA mojoj obitelji koja mi je davala snagu onda kada je to bilo potrebno!

Sadržaj

	<i>str.</i>
1. UVOD	1
2. TEORIJSKI DIO	2
2.1. TEORIJA SUŠENJA.....	2
2.2. VLAŽNE TVARI.....	3
2.2.1. Oblici vlažnih tvari.....	3
2.2.2. Oblici veze vlage i tvari u namirnicama.....	4
2.2.3. Procesi pri kontaktu vlažne čvrste tvari i plina.....	5
2.2.4. Uloga aktiviteta vode u procesima sušenja.....	6
2.3. KINETIKA SUŠENJA TVARI.....	7
2.3.1. Period konstantne brzine sušenja.....	9
2.3.2. Period konstantne brzine sušenja.....	10
2.4. MATEMATIČKI MODELI KOJIMA SE OPISUJE KINETIKA SUŠENJA BIOLOŠKIH MATERIJALA.....	13
2.5. METODE SUŠENJA I NAČINI ZAGRIJAVANJA.....	17
2.5.1. Konvekcijsko sušenje.....	17
2.5.2. Infracrveno sušenje.....	17
2.5.3. Fluidizacijsko sušenje.....	19
2.5.4. Vakuum sušenje.....	20
2.6. STRUKTURA TKIVA BIOLOŠKIH MATERIJALA.....	21
2.7. METODE OBRADJE BIOLOŠKIH MATERIJALA NAMIJENJENIH SUŠENJU.....	23
2.7.1. Kemijske metode.....	24
2.7.1.1. <i>Anorganske tvari</i>	24
2.7.1.2. <i>Organske tvari</i>	26
2.7.1.2.1. <i>Ugljikohidrati</i>	26
2.7.1.2.2. <i>Biopolimeri</i>	27
2.7.1.3. <i>Površinski aktivne tvari</i>	28
2.7.1.4. <i>Ostala sredstva za prethodnu obradu</i>	28
2.7.2. Nekemijske (fizikalne) metode obrade.....	29
2.7.2.1. <i>Blanširanje</i>	29
2.7.2.2. <i>Zamrzavanje</i>	30

2.8. PROMJENE IZAZVANE SUŠENJEM	31
2.8.1. Promjena volumena	31
2.8.2. Poroznost	32
2.8.3. Promjena boje (posmeđivanje)	33
2.8.3.1. Enzimsko posmeđivanje	33
2.8.3.2. Neenzimsko posmeđivanje	33
2.9. REHIDRATACIJSKA SVOJSTVA	35
2.10. VOĆE	39
2.10.1. Jabuka (<i>Malus domestica</i>)	41
2.10.2. Marelica (<i>Prunus armenica</i>).....	42
2.10.3. Sušeno voće	43
2.11. POVRĆE	45
2.11.1. Značajke i prehrambena vrijednost korjenastog povrća	46
2.11.2. Mrkva (<i>Daucus carota L.</i>)	47
2.11.3. Peršin (<i>Petroselinum hortense</i>).....	48
3. EKSPERIMENTALNI DIO	49
3.1. ZADATAK.....	49
3.2. MATERIJALI.....	50
3.3. METODE	51
3.3.1. Termogravimetrijske metode.....	51
3.3.2. Uređaji za sušenje.....	52
3.3.2.1. Konvekcijski tunelski sušionik	52
3.3.2.2. Sušionik s fluidiziranim slojem	53
3.3.2.3. Vakuum sušionik	55
3.3.2.4. Uređaj za analizu vlage	56
3.3.3. Određivanje apsolutno suhe tvari	58
3.3.4. Određivanje boje.....	58
3.3.5. Mjerenje promjene volumena tvari pri sušenju	60
3.3.6. Provedba rehidracije	61
3.3.7. Mjerenje temperature i relativne vlažnosti	62
3.3.8. Određivanje β – karotena	62
3.3.8.1. Ekstrakcija.....	62
3.3.8.2. Priprema otopine standarda	63

3.3.8.3. <i>Kromatografska analiza – metoda vanjskog standarda</i>	63
3.3.8.4. <i>Identifikacija i kvantifikacija β – karotena</i>	64
3.3.9. Postupci prethodne obrada uzoraka	65
4. REZULTATI	66
4.1. TABLIČNI PRIKAZ REZULTATA MATEMATIČKOG MODELIRANJA	68
4.2. GRAFIČKI PRIKAZ DOBIVENIH REZULTATA	81
4.3. REZULTATI KROMATOGRAFSKE ANALIZE	118
5. RASPRAVA	123
6. ZAKLJUČCI	136
7. LITERATURA	140
8. PRILOG	153
9. ŽIVOTOPIS	

1. UVOD

Sušenje je jedna od najstarijih i vjerojatno najraširenija metoda konzerviranja prehrambenih materijala, te kao takva zauzima važnu ulogu u prehrambenoj industriji.

Različiti prehrambeni materijali suše se za potrebe izravne potrošnje ili pak kao sirovina za daljnju proizvodnju. Uslijed toga su i zahtjevi koji se postavljaju u pogledu kakvoće sušenih proizvoda veoma različiti.

Konzerviranje sušenjem provodilo se od davnina, pri tome su se energija Sunca i prirodno strujanje zraka najčešće koristili za provedbu sušenja. Sušenje u kontroliranim uvjetima ili «umjetno sušenje» se kao postupak značajnije počinje koristiti u 18. stoljeću i do danas je razvijeno više metoda, a svima je zajedničko da se u svježoj sirovini sušenjem smanji sadržaj vode, poveća koncentracija ostalih sastojaka, a time i osmotski tlak, te na taj način spriječi kvarenje uzrokovano mikroorganizama, enzimima ili kvarenje izazvano kemijskim reakcijama. Sušenjem se također postiže smanjenje mase i volumena hrane, što pridonosi ekonomičnijem pakiranju, skladištenju i transportu gotovih proizvoda.

Rehidracijom bi proizvod trebao poprimiti kvalitetu i značajke svježe hrane u što većoj mjeri. U slučaju voća i povrća, kvaliteta osušenog proizvoda se ocjenjuje prvenstveno prema sličnosti boje, okusa i podsjećanju na svježi proizvod.

Tijekom sušenja prehrambenih materijala odvijaju se složeni fizikalni procesi koji u sebi objedinjuju prijenos tvari i topline u višefaznom sustavu. Iz tih razloga u vrlo složenim procesima sušenja prehrambenih materijala još i danas postoji cijeli niz problema i pitanja koja nisu u potpunosti objašnjena¹⁻⁹.

Različiti matematički modeli nastoje opisati i definirati kompleksne procese transporta vode u namirnicama, kao i parametre sušenja kojima se postiže optimalno očuvanje nutritivnih i organoleptičkih (senzorskih) svojstava.

Matematičkim modeliranjem odabiru se poluempirijski modeli koji u što većoj mjeri odgovaraju stvarnim radnim uvjetima, te se kao takvi koriste za modeliranje, simulaciju i optimiranje procesa sušenja.

2.1. TEORIJA SUŠENJA

U užem smislu riječi sušenje predstavlja operaciju procesnog inženjerstva kojom se uklanjaju manje ili veće količine tekućine iz čvrstih ili gotovo čvrstih materijala, dovodenjem topline, tj. hlapljenjem ili otparavanjem. Otparavanje se provodi kod temperature vrelišta tekućine, a hlapljenje ispod temperature vrelišta. Sušenje se u najvećem broju slučajeva provodi ispod temperature vrelišta. U tom slučaju moraju biti prisutni plinovi (najčešće zrak) koji daju razliku parcijalnog tlaka tekućine do ukupnog tlaka, odnose otparenu tekućinu, a ujedno mogu služiti kao donosioci topline potrebne za sušenje¹⁻³. Uklanjanje vode, tj. dehidratiranje je u mnogome sastavni dio procesa proizvodnje hrane.

Općenito postoje dva načina provedbe sušenja :

- *adijabatski*
- *neadijabatski*

Kod adijabatskog načina sušenja toplina isparavanja se dovodi osjetnom toplinom zraka kojim se provodi sušenje. Kod neadijabatskog načina sušenja toplina isparavanja se dovodi toplinom zračenja ili toplinom koja se provodi kroz stjenke u kontaktu s materijalom koji se suši. Također, dehidratacija se može provoditi i mehaničkim odvlaživanjem.

Prema načinu dovodenja topline materijalu koji se suši razlikuju se slijedeće metode sušenja^{2,6,8}:

- *konvekcijsko sušenje*, kod kojeg se materijal suši u doticaju sa strujom plina (najčešće zrakom);
- *kondukcijsko ili kontaktno sušenje*, kod kojeg se materijal suši u doticaju sa zagrijanom površinom;
- *sublimacijsko sušenje*, kod kojeg se materijal suši u zamrznutom stanju pod visokim vakuumom. Po načinu prijenosa topline ovo sušenje je analogno kontaktnom sušenju i
- *radijacijsko sušenje*, kod kojeg se materijal suši posredstvom polja visoke učestalosti.

U inženjerskoj se praksi i pored velikog broja vrlo različitih metoda sušenja prehrambenih proizvoda ipak najčešće primjenjuju uređaji za konvekcijsko sušenje^{1-6,9}.

2.2. VLAŽNE TVARI

2.2.1. Oblici vlažnih tvari

Vlažnost nekog materijala obuhvaća sve one sastojke koji pri zagrijavanju isparavaju i dovode do smanjenja mase uzorka. Gubitak mase utvrđuje se pomoću vage i predstavlja kao sadržaj vlage. Ne prave se dakle razlike između vode i drugih tekućih komponenti^{4,6-10}.

Voda, čiji sadržaj u namirnicama varira od 60-95 %, dominantna je i izuzetno bitna komponenta hrane. S druge strane, mnogi spojevi sadržani u hrani vežu na sebe vodu na različite načine, te tako povećavaju njenu ulogu kao sastavnog elementa namirnica. Stanje vode kao i njena cjelokupna distribucija od izuzetne je važnosti za normalno funkcioniranje svih bioloških sustava⁷. Bitno svojstvo vode jeste i njen visoki specifični toplinski kapacitet, što znači da voda može primiti ili predati velike količine topline pri relativno malim promjenama temperature⁷⁻¹⁰.

Vlažne tvari se mogu naći u različitim oblicima. Vlažne čvrste tvari se ovisno o strukturno-fizikalnim osobinama dijele u dvije skupine:

- *kristalne tvari*
- *koloidno disperzni sustavi*

Kristalne tvari su uglavnom anorganskog porijekla. Uklanjanje vode i režim sušenja u širokom opsegu temperature i vlažnosti nema utjecaja na strukturno-fizikalne osobine ovih tvari.

Koloidno disperzni sustavi su tvari organskog porijekla, kod kojih vlaga predstavlja dio strukture čvrste tvari. Dijelimo ih u tri podskupine:

- *tipično koloidne tvari*, kod kojih se uklanjanjem vlage javljaju kontrakcije, uz očuvanje elastičnih osobina;
- *kapilarno-porozne tvari*, kod kojih se uklanjanjem vlage javljaju neznatne kontrakcije. Istovremeno tvar postaje krhka i može se pretvoriti u prah; te
- *koloidno kapilarno-porozne tvari*, kod kojih su stjenke kapilara elastične i pri sušenju dolazi do njihovog skupljanja bez da se narušava osnovna prostorna struktura tvari^{7,8}. Primjer su zrna žitarica, gljive i sl.

2.2.2. Oblici veze vlage i tvari u namirnicama

Uloga vode u namirnici ovisi o kemijskom sastavu i fizičkoj strukturi same namirnice, kao i obliku u kojem je voda prisutna. Oblik veze između tvari i vode može se odrediti po sadržaju (*veličini*) energije koju takva veza ima⁷. Sadržaj energije određuje se mjerenjem količine dovedene topline potrebne za otparavanje određene količine vode iz tvari koja se podvrgava sušenju^{2,10}.

Voda u nekoj tvari može biti vezana na četiri različita načina:

- ***kemijski vezana voda***. To je voda koju tvari sadržavaju u točno određenim stehiometrijskim odnosima. Kemijski vezanu vodu nije moguće ukloniti uobičajenim postupcima sušenja zbog jakosti veze.
- ***adsorpciono vezana voda***. To je voda vezana na površini koloidnih čestica pod djelovanjem polarnih molekularnih sila. Ovakva veza vode i tvari spada u red fizikalno-kemijskih veza, koje imaju manji sadržaj energije od kemijskih veza. Adsorpciono vezanje vode je praćeno izdvajanjem topline.
- ***osmotski vezana voda***. Ovako vezana voda difuzijom prodire kroz polupropusne membrane koje grade skelet gela. Ova veza vode i tvari spada također u red fizikalno-kemijskih veza.
- ***kapilarno vezana voda***. To je voda vezana u kapilarama s polumjerom $r \geq 10^{-7}$ m. Voda je vezana fizikalno-mehaničkim vezama koje imaju manji sadržaj energije, tj. slabije su od fizikalno-kemijskih veza. Veza vode u kapilarama uvjetovana je silama površinske napetosti⁷⁻¹⁰.

2.2.3. Procesi pri kontaktu vlažne čvrste tvari i plina

Pri kontaktu vlažne čvrste tvari i plina javljaju se dva procesa:

- *adsorpcija vode*
- *desorpcija vode*

Hoće li se neka tvar sušiti ili vlažiti ovisi o ravnotežnim uvjetima. Da bi se neka tvar sušila mora se zagrijati do temperature pri kojoj će parcijalni tlak vodene pare na površini sušene tvari biti veći od parcijalnog tlaka vodene pare u plinu. Ako je taj tlak manji, vlaga iz plina će se adsorbirati u tvari.

Kada je tlak pare na površini jednak parcijalnom tlaku pare u zraku, neće doći do adsorpcije niti do desorpcije vlage, te se može reći da je postignuta ravnotežna vlažnost.

Prijelazom vlage u zrak raste njegova vlažnost. Vlažnost zraka kojim se suši može se izraziti kao apsolutna ili relativna vlažnost^{2,5}:

$$X = \frac{m_{vp}}{m_{sz}} \quad (1)$$

$$RH = \frac{p_g}{p_e} \cdot 100 \quad (2)$$

$$RH = \frac{H_g}{H_e} \cdot 100 \quad (3)$$

2.2.3.1. Uloga aktiviteta vode u procesima sušenja

Promatrajući ulogu vode, potrebno je znati da s biološkog stajališta praktični značaj ima prvenstveno raspoloživa ili «slobodna» voda, a ne ukupna količina prisutne vode. Stanje vode se obično definira relativnim sadržajem vlažnosti. Vrijednost relativne vlažnosti se može izraziti preko relativnog sadržaja vodene pare (*odnosno relativnim parcijalnim tlakom vodene pare*). Ravnotežni relativni sadržaj vlage pri danim uvjetima ovisi o količini raspoložive slobodne vode u dotičnoj namirnici. Ako je sva količina prisutne vode slobodna, odnosno stoji na raspolaganju, tada će vrijednost relativnog sadržaja vlažnosti iznositi 100%.

U praksi se omjer parcijalnog tlaka vode u namirnici i tlaka čiste vode pri određenoj temperaturi definira kao aktivitet vode (a_w). Pomoću vrijednosti aktiviteta vode može se procijeniti koliki dio slobodne vode stoji na raspolaganju za odvijanje biološke aktivnosti u hrani prisutnih mikroorganizama^{3,8,11}.

Vrijednost aktiviteta vode može se izraziti slijedećom jednačinom:

$$a_w = \frac{p}{p_0} = \frac{RH}{100} \quad (4)$$

S obzirom na izuzetnu važnost vode za rast i razvoj mikroorganizama, jasan je i selektivni utjecaj vrijednosti aktiviteta vode (a_w) na mikrobiološko kvarenje bioloških materijala. Također, postoji i veliki broj znanstvenih radova koji dovode u vezu aktivitet vode s brzinom odvijanja raznih, često neželjenih, kemijskih i biokemijskih promjena u namirnicama. Tako, na primjer, za normalnu aktivnost velikog broja bakterija potrebna vrijednost a_w iznosi od 0,92 do 0,96.

Za većinu kvasaca neophodna vrijednost a_w iznosi oko 0,88, dok za plijesni vrijednost a_w se kreće od 0,75 do 0,80. Najmanju potrebu za vodom imaju osmofilni kvasci koji mogu rasti u uvjetima u kojima je a_w ispod vrijednosti 0,62^{9,11-16}.

Na vrijednosti aktiviteta vode za pojedine namirnice utječu faktori kao što su temperatura, pH sredine, različite komponente kemijskog sastava (*npr. udio vode u odnosu na ugljikohidrate i proteine*), količina dodane soli i dr^{15,16}.

2.3. KINETIKA SUŠENJA TVARI

Kinetika sušenja tvari se bavi određivanjem brzine sušenja, proučavanjem transporta vlage, te analizom krivulja tijekom sušenja (kinetičkih krivulja)¹⁷⁻²³.

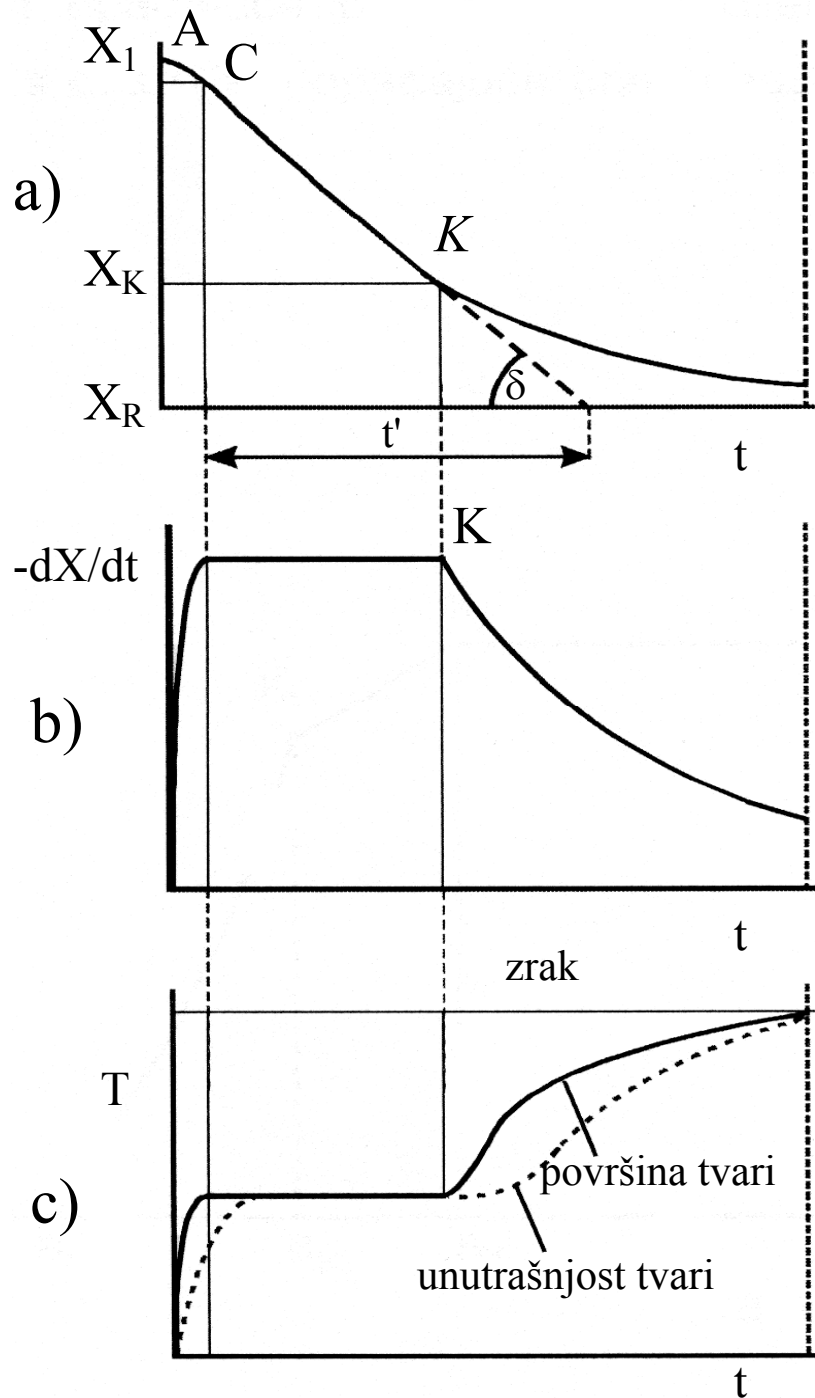
Na slici 1. prikazane su krivulje tijekom sušenja (kinetičke krivulje) za općeniti proces sušenja kod konstantnih vanjskih uvjeta plina koji se koristi za sušenje. Krivulje tijekom sušenja su:

- a) *krivulja sušenja (vlažnosti tvari)*
- b) *krivulja brzine sušenja*
- c) *ovisnost temperature tvari koja se suši o vremenu sušenja*

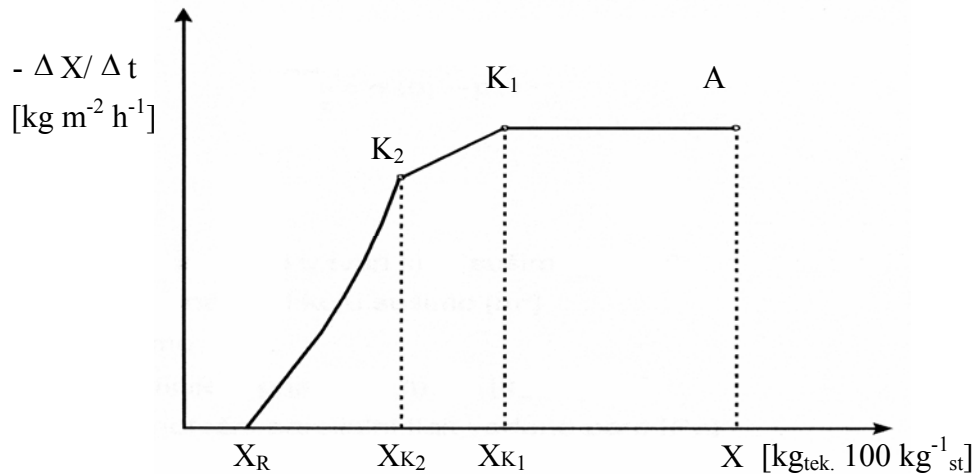
Krivulja sušenja predstavlja ovisnost sadržaja vlage u proizvodu i vremena trajanja sušenja, a krivulja brzine sušenja predstavlja ovisnost brzine sušenja o vremenu.

Promatra li se krivulja ovisnosti temperature tvari koja se suši o vremenu sušenja uočava se kratki segment $A - C$ koji predstavlja zagrijavanje tvari. U ovom periodu se temperatura površine tvari približava konstantnoj vrijednosti. Segment $C - K$ odgovara periodu konstantne brzine sušenja. U ovom periodu je cijela površina tvari koja se suši pokrivena slojem tekućine konstantne temperature. U točki K (kritična točka), u kojoj se završava ovaj period, tvar koja se suši ima kritični sadržaj vlage (X_k). Dio krivulje brzine sušenja iza točke K odgovara periodu opadajuće brzine sušenja.

U ovom primjeru proces sušenja je podijeljen na dva dijela. Dio krivulje brzine sušenja $A - K$ predstavlja period konstantne brzine sušenja, a dio krivulje iza točke K predstavlja period opadajuće brzine sušenja^{1,19,23}. Međutim, postoje autori koji period opadajuće brzine sušenja dijele na dva dijela, kao što je prikazano na slici 2²³.



Slika 1. Općeniti prikaz krivulja tijekom sušenja



Slika 2. Krivulja brzine sušenja sa dva perioda opadajuće brzine sušenja i dvije kritične točke (K_1 i K_2)

2.3.1. Period konstantne brzine sušenja

Brzina sušenja u ovom periodu ne ovisi o prirodi tvari koja se suši. Ovisna je o mokroj površini, razlici parcijalnih tlakova para tekućine uz samu površinu tekućine i u glavnoj masi plina koji služi za sušenje, te o koeficijentu prijenosa tvari, koji se mijenja u ovisnosti o procesnim parametrima. Takva ovisnost je dana slijedećom jednačinom^{2,17,20}:

$$-\frac{dX}{Adt} = \sigma'(p_e - p_g) \quad (5)$$

Ako se u jednačinu umjesto razlike parcijalnih tlakova uvrsti razlika vlažnosti plina na površini tekućine (gdje je plin u ravnoteži s tekućinom) i u glavnoj masi plina, dobiva se slijedeći oblik jednačine:

$$-\frac{dX}{Adt} = \sigma(H_e - H_g) \quad (6)$$

Koeficijent prijenosa tvari σ' ovisi o koeficijentu difuzije i debljini graničnog sloja. Za slučaj sušenja vlažne tvari zrakom Sherwood je preporučio slijedeću jednadžbu za izračunavanje:

$$\sigma' = 6 \cdot 10^{-8} (w \cdot \rho)^{0,8} \quad (7)$$

Jednadžba vrijedi za brzine strujanja zraka od 1 do 6 m s⁻¹ kod uobičajenih tlakova i temperatura.

Plin kojim se suši neka tvar kod konvekcijskog sušenja služi kao donositelj topline i odnositelj vlage. Ovi procesi se odvijaju istovremeno, u suprotnim smjerovima, i utječu jedan na drugi.

Količinu tekućine koja ispari u jedinici vremena po jedinici površine moguće je izračunati iz količine topline (Q) koja se prenosi s medija kojim se suši na površinu tekućine uz poznat koeficijent prijelaza topline (α) ili poznatu latentnu toplinu isparavanja vode (r). Za otparavanje $X/t \cdot A$ potrebna je toplina $X \cdot r/t \cdot A$ za čiji prijenos vrijedi:

$$\frac{Q}{t \cdot A} = \frac{r \cdot X}{t \cdot A} = \alpha \cdot (T_g - T_l) = \sigma (H_e - H_g) \cdot r \quad (8)$$

2.3.2. Period opadajuće brzine sušenja

Period opadajuće brzine sušenja počinje kada se dostigne kritični sadržaj vlage X_{K1} (slika 2.). Brzina sušenja u području opadajuće brzine sušenja ovisi o debljini sušenog materijala, jer ta brzina pada s porastom puta što ga mora prevaliti tekućina unutar sušenog materijala. Iza kritične točke K_1 tekućina se povlači u pore materijala, tj. na površini se javljaju dijelovi koji nisu pokriveni tekućinom. Kako se ide prema točki K_2 , tekućina se sve više povlači u pore i dodirna površina između zraka i tekućine se sve više smanjuje. Nakon točke K_2 , gdje je vlaga povučena iz svih površinskih pora na brzinu sušenja najviše utječe difuzija para tekućine iz unutrašnjosti na površinu tvari.

U periodu opadajuće brzine sušenja oblik krivulje sušenja ovisi o strukturi materijala koji se suši, brzini sušenja u periodu konstantne brzine sušenja i o kritičnom sadržaju vlage. Brzina strujanja medija koji se koristi za sušenje u ovom periodu ima sve manji

utjecaj na brzinu sušenja, za razliku od perioda konstantne brzine sušenja gdje je utjecaj značajan. Razlog takvoj promjeni je sve veća ovisnost brzine sušenja o brzini konduktivnog prijenosa topline i brzini difuzije para tekućine kroz poroznu tvar.

U posljednjem stadiju sušenja, difuzioni put prijenosa topline i mase sve je duži i temperatura tvari se približava temperaturi medija kojim se provodi sušenje. Intenzitet prijenosa vlage, koja iz unutrašnjosti tvari dolazi difuzijom do površine, proporcionalna je gradijentu vlažnosti u materijalu, a mehanizam prijenosa je određen strukturom tvari^{2,17,48}.

U homogenim, čvrstim tvarima prijenos vlage prema površini se najvjerojatnije odvija molekularnom difuzijom tekućine. Brzina prijenosa vlage je određena drugim Fickovim zakonom:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \cdot \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (9)$$

Integracija ove jednadžbe se vrši pod pretpostavkom da je D_{eff} konstantno, a tvar koja se suši oblika ravne ploče, čija je jedna strana u kontaktu s medijem za sušenje, a baze i druge strane su izolirane.

Za slučaj da je vrijeme sušenja vrlo dugo, jednadžba poprima oblik:

$$\frac{X_K - X_R}{X - X_R} = \frac{8}{\pi^2} e^{-D_{eff} \left(\frac{\pi}{2\ell}\right)^2 t} \quad (10)$$

Diferenciranjem ove jednadžbe dobije se izraz za brzinu sušenja:

$$\frac{dX}{d\tau} = -\frac{\pi \cdot D_{eff}}{4\ell^2} (X - X_R) \quad (11)$$

Iz ove jednadžbe može se vidjeti da je brzina sušenja upravo proporcionalna sadržaju slobodne vlage ($X - X_R$) i koeficijentu difuzije D_{eff} , kao i da je vrijeme sušenja funkcija kvadrata debljine tvari koja se suši.

Dvije prethodne jednađbe vrijede za jednodimenzionalni prijenos tvari koji je karakterističan za čvrste tvari oblika ravne ploče, čija je debljina zanemariva u odnosu na druge dvije dimenzije. U praksi se uzima da je D_{eff} konstantno, pa jednađba (11) poprima slijedeći oblik:

$$\frac{dX}{dt} = -k(X - X_R) \quad (12)$$

Integriranjem jednađbe (12) u granicama od X_K do X i od $t = 0$ do t , dobiva se pojednostavljeni izraz za opis perioda opadajuće brzine sušenja:

$$\ln \frac{X_{(t)} - X_R}{X - X_R} = k \cdot t \quad (13)$$

2.4. MATEMATIČKI MODELI KOJIMA SE OPISUJE KINETIKA SUŠENJA BIOLOŠKIH MATERIJALA

Opisivanje kinetike sušenja predmet je velikog broja radova¹⁷⁻³³ čiji je osnovni cilj pronaći matematičke modele koji će u što većoj mjeri odgovarati stvarnim radnim uvjetima, te kao takvi poslužiti za simulaciju i optimiranje procesa sušenja.

Diferencijalne jednačbe kojima se opisuje kinetika sušenja, posebice bioloških materijala, često su vrlo složene i kao takve ograničene za upotrebu. Iz tih razloga je sve prisutnija primjena i iznalaženje različitih jednačbi tankog sloja³⁷⁻⁶¹.

Jednačbe tankog sloja mogu se podijeliti u tri grupe: empirijske, poluempirijske i teorijske. Empirijske jednačbe tankog sloja zanemaruju unutarnji otpor prijenosu tvari, dok teorijske uzimaju u obzir samo unutarnji otpor prijenosu tvari. Najšire istražen teorijski model sušenja jeste II. Fickov zakon difuzije. Empirijski modeli daju direktnu vezu između sadržaja vlage materijala i vremena sušenja. Oni zanemaruju osnove procesa koji se odvijaju tijekom sušenja, te njihovi parametri nemaju fizikalno značenje, iako uspješno koreliraju mjerne podatke. Među njima su najznačajniji Thompsonov i Wangov model^{17,40,43}

Poluempirijski modeli često su kompromis između teorije i prakse. Takvi modeli u načelu su izvedeni kao pojednostavljenje II. Fickovog zakona ili kao modifikacija jednostavnijih modela koji vrijede unutar određenog raspona radnih uvjeta za koje su razvijeni^{17,40}. Takvi modeli zahtijevaju kraće vrijeme izrade u odnosu na teorijske jednačbe tankog sloja, te ne zahtijevaju uključivanje geometrijskih karakteristika uzoraka, difuzije tvari i vodljivosti. Takve pretpostavke su uključene u jednačbe slijedećih modela: Lewis, Page, Handerson i Pabis, Logaritamskog, Aproksimacijsko-difuzijskog, te Midilli i Kucuk-ovog modela. Primjenjivost nabrojanih modela, za opisivanje kinetike i modeliranje sušenja voća i povrća, detaljno je ispitana u okviru ovog rada.

Najčešće korištene poluempirijske jednačbe su Lewisova i Pageova. Lewisova jednačba, često nazivana eksponencijalnim zakonom sušenja, pretpostavlja da je brzina sušenja proporcionalna razlici stvarnog srednjeg sadržaja vlage materijala i ravnotežne vlažnosti pri danim procesnim uvjetima. Prema Lewisu prijenos tvari tijekom sušenja može se promatrati na način analogan prijenosu topline pri hlađenju čvrstog tijela. Page modificira Lewisovu jednačbu uvodeći eksponent na vrijeme, u cilju što boljeg slaganja mjernih i računskih podataka i uvodi još jedan empirijski parametar, n .

Handerson i Pabisov model predstavlja prvi član općeg rješenja II. Fickovog zakona. Koeficijent k , u takvom modelu, povezan je s efektivnim difuzijskim koeficijentom kada se proces sušenja odvija samo u periodu opadajuće brzine sušenja, dok difuzija predstavlja kontrolirajući mehanizam prijenosa tvari^{17,34}.

Tablica 1. Matematički modeli kojima se opisuje kinetika sušenja

NAZIV MODELA	MATEMATIČKI IZRAZ
1 II. Fick-ov zakon	$\frac{X_{(t)} - X_R}{X - X_R} = X = \frac{8}{\pi^2} e^{-D_{eff} \left(\frac{\pi}{2l}\right)^2 t}$
2 Newton, Lewis	$X = e^{-k \cdot t}$
3 Page	$X = e^{-k \cdot t^n}$
4 Handerson i Pabis	$X = a \cdot e^{-k \cdot t}$
5 Logaritamski	$X = a \cdot e^{-k \cdot t} + c$
6 Aproksimacija difuzije	$X = a \cdot e^{-k \cdot t} + (1 - a) \cdot e^{-k \cdot b \cdot t}$
7 Midilli i Kucuk	$X = a \cdot e^{-k \cdot t^n} + b \cdot t$
8 Wang i Sing	$X = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$
9 Thomson, Peart i Foster	$t = a \cdot \ln(X) + b \cdot (\ln(x))^2$
10 Modificirana Page-ova jed. - II	$X = e \left(-k \left(\frac{t}{L^2} \right)^n \right)$

Procesno inženjerstvo zahtijeva numeričko interpretiranje eksperimentalnih podataka, jer uobičajeni načini njihovog prikazivanja koristeći tablice i grafikone nisu prikladni za daljnju obradu upotrebom računala. Zbog toga se problem svodi na pronalaženje kontinuiranih kvantitativnih modela na temelju eksperimentalnih podataka koji su dostupni samo u diskretnim intervalima. Nalaženjem odgovarajućih analitičkih metoda definiraju se procesi sušenja čime je omogućena simulacija i vođenje takvih procesa primjenom računala. Numerička interpretacija eksperimentalnih podataka kinetike sušenja nužna je zbog nepostojanja adekvatnih teorijskih modela^{20,63}.

Ekperimentalni matematički modeli kinetike sušenja su empirijske jednadžbe koje u sebi sadrže izmjerene vrijednosti vlažnosti materijala i vremena sušenja, procesne parametre, te neke fenomenološke koeficijente. Fenomenološki koeficijenti opisuju prirodu neke pojave i mogu dovesti do širokih predviđanja kinetike sušenja ako se povežu s najprikladnijom pokretačkom silom (razlika koncentracije, tlak, temperatura). Modeli s ovakvim koeficijentima zamjenjuju puno složenije modele, te su kao takvi pogodni za projektiranje procesne opreme i optimiranje procesa³⁴⁻⁴².

Empirijski modeli u procesu sušenja matematički definiraju:

- kinetiku sušenja, odnosno eksperimentalno dobivene krivulje sušenja koje prikazuju promjenu vlažnosti materijala s vremenom sušenja pri različitim procesnim uvjetima
- utjecaj procesnih parametara na koeficijente dobivenog kinetičkog modela

U najvećem broju slučajeva prati se utjecaj temperature (T), brzina strujanja zraka kojim se provodi sušenje (v), vlažnost zraka (H), te veličina i oblika materijala.

Vrijednosti koeficijenata računaju se linearnom ili nelinearnom regresijom (logaritamska, eksponencijalna, potencijnska), te moraju zadovoljiti određene statističke kriterije, tj. dati najmanju moguću razliku između eksperimentalno dobivenih i izračunatih vrijednosti omjera vlažnosti. Procjena modela provodi se statističkom analizom a kao najčešći kriterij uzima se koeficijent korelacije (R) između izračunatih i eksperimentalnih vrijednosti, te korijen kvadrata srednje pogreške^{34, 36, 40}.

Uticaj procesnih uvjeta na koeficijente kinetičkog modela uobičajeno se prikazuje jednim od tri modela:

1. *Polinom drugog stupnja:*

$$c = \alpha_0 + \alpha_1 L + \alpha_2 T + \alpha_3 H + \alpha_4 v + \alpha_5 L^2 + \alpha_6 LT + \alpha_7 T^2 + \alpha_8 LH + \alpha_9 TH + \alpha_{10} H^2 + \alpha_{11} Lv + \alpha_{12} Tv + \alpha_{13} Hv + \alpha_{14} v^2$$

2. *Oblik Arrheniusove jednadžbe:*

$$c = \beta_0 L^{\beta_1} H^{\beta_2} v^{\beta_3} e^{\frac{-\beta_4}{T}}$$

3. Potencijski model:

$$c = \gamma_0 L^{\gamma_1} T^{\gamma_2} H^{\gamma_3} v^{\gamma_4}$$

Koeficijenti α , β , i γ računaju se kao i kod kinetičkih modela metodom linearne ili nelinearne regresije, te moraju udovoljiti statističke kriterije^{34,41,56}.

U cilju određivanja fizikalnog značenja koeficijenta brzine sušenja k , postavljen je model

$$k = \left(\frac{1}{t_k} \right)^n$$

te je utvrđeno da je t_k vrijeme koje odgovara drugom kritičnom sadržaju vlage, odnosno vremenu u kojem dolazi do promjene mehanizma prijenosa vode u materijalu i ovisi o intenzitetu procesnih uvjeta¹⁷.

Matematički modeli kinetike sušenja voća i povrća uglavnom opisuju sušenje u periodu padajuće brzine, koje poglavito kontrolira difuzija vode kroz tkivo jer kod sušenja takvih materijala nije primijećen period konstantne brzine sušenja ili ona traje jako kratko^{35,119}. Da bi postojao stvarni, primjetni period konstantne brzine sušenja, površina materijala trebala bi biti zasićena vodom kako bi se brzina isparavanja mogla održavati stalnom. Primijećeno je da postojanje ili nepostojanje perioda konstantne brzine sušenja kod konveksijskog sušenja namirnica ovisi o brzini strujanja zraka^{24,62}. Veća brzina strujanja zraka uzrokuje trenutno isparavanje vode s površine, te se ona mora nadoknađivati vodom koja difundira iz unutrašnjosti materijala. Kod manjih brzina sušenja kinetičko ponašanje materijala ovisi i o vrsti namirnice. Različito voće i povrće osušeno zrakom brzine $1,25 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$ imalo je kraći ili duži period stalne brzine sušenja ovisno o vrsti materijala⁶². Svaka namirnica pokazuje različito ponašanje tijekom sušenja i ima svoju karakterističnu kinetičku krivulju, te je stoga važno istražiti parametre prijenosa mase sušenog materijala, kako bi se u industrijskom mjerilu dobio proizvod što bolje kvalitete, uz što manji utrošak energije.

2.5. METODE SUŠENJA I NAČINI ZAGRIJAVANJA

2.5.1. Konvekcijsko sušenje

Konvekcija predstavlja izjednačavanje temperaturnih razlika unutar tvari u molarnom razmjeru. Ona se odvija tako da se mase tvari kreću iz toplijih u hladnija područja, što je slučaj kod kapljevina i plinova (fluida).

Konvekcija može biti prirodna i prisilna. Kod prirodne konvekcije razlike u temperaturama uzrokuju razlike gustoća, koje zatim dovode do kretanja većih masa fluida. Kod prisilne konvekcije se kretanje fluida postiže mehaničkim putem. Toplina se vlažnom materijalu dovodi strujanjem zraka ili nekog drugog plina iznad njegove površine. Toplina potrebna za isparavanje konvekcijom se predaje izloženoj površini materijala, a isparena vlaga se potom odvodi pomoću medija za sušenje (uglavnom zrak, ali mogu biti i plinovi izgaranja, pregrijana para i sl.). Proces prijenosa tvari i topline odvijaju se u suprotnim smjerovima. Takvi se sušionici obično nazivaju direktni sušionici¹⁷.

U periodu konstantne brzine sušenja vlažna površina materijala ima temperaturu koja odgovara temperaturi mokrog termometra medija kojim se suši, dok se u periodu padajuće brzine sušenja temperatura materijala približava temperaturi suhog termometra medija kojim se provodi sušenje. O tome se mora voditi računa kada se suše materijali osjetljivi na povišene temperature, kao što su prehrambeni materijali^{2,17,63}.

2.5.2. Infracrveno sušenje

IC sušenje ima znatne prednosti u odnosu na konvencionalne metode. Učinkovitije je jer podrazumijeva prodiranje topline unutar uzorka koji se suši te se vrijeme sušenja može skratiti i za 12-13 % u odnosu na vrijeme zahtijevaju druge metode. Kod IC sušenja koristi se isijavanje snage 250-500 W, a izvor zračenja pri tom razvija temperaturu od 2000-2500 K. Razmak IC izvora i materijala koji se suši je kritičan parametar, jer premali razmak može uzrokovati dekompoziciju uzorka. Stoga se preporučuje razmak od oko 10 cm. Debljina materijala koji se suši ne bi trebala prelaziti 10-15 mm. Instrumenti koji rade na principu IC sušenja su prikladno opremljeni vagom i odgovarajućim mjernim instrumentom koji bilježi promjenu vlažnosti. Rezultati mjerenja su dostupni nakon nekoliko minuta. Međutim, kao i kod svih termičkih metoda moguća su oštećenja uzorka.

U pozitivna djelovanja IC zraka na prehrambene proizvode ubrajaju se:

- jednolično zagrijavanje proizvoda,
- mogućnost intenzivnog uklanjanja vode iz proizvoda na znatno nižim temperaturama nego pri uobičajenim postupcima sušenja,
- nema ostataka sagorijevanja energenta, plinova i čvrstih ostataka, koji su štetni za okoliš,
- izjednačena je vlažnost po presjeku proizvoda,
- IC zrake djeluju mikrobiocidno, te se istovremeno sa sušenjem reducira mikroflora i smanjuje kvarljivost

Izvori IC zračenja su jeftiniji u odnosu na dielektrične i mikrovalne izvore, imaju duži vijek trajanja i niže troškove održavanja. IC grijači zauzimaju malo mjesta i mogu se jednostavno ugraditi u postojeće uobičajene sušionike. Kratko vrijeme sušenja reducira potrošnju energije, što ima i ekonomski i ekološki značaj. IC zrake nisu štetne za zdravlje ljudi, te za njihovu primjenu nije potrebno pribavljati posebna odobrenja kao u primjeni drugih elektromagnetskih zraka.

IC zrake prelaze s elektromagnetskog polja na tijela čiji ih atomi prihvaćaju. Apsorbirane IC zrake izazivaju velike promjene frekvencije gibanja atoma u tijelima i to ih praktično zagrijava. Tijela visoke vlažnosti imaju veliku sposobnost apsorpcije IC zraka, jer je voda sastojak koji jako apsorbira IC zrake. Tijekom sušenja dolazi do promjene radijacijskih svojstava materijala kojeg sušimo. Sa smanjenjem udjela vode povećava se sposobnost refleksije što ima za posljedicu smanjenje sposobnosti apsorpcije. Propusnost (transmisija) raste sa smanjenjem debljine materijala kojeg sušimo, dok se apsorpcija smanjuje. U slučaju da je transmisija IC zračenja niska, najprije se zagrijevaju samo mali dijelovi na površini uzorka. Oni tada prenose svoju toplinu kontaktom sa susjednim molekulama. Odlučujući čimbenik za ovaj prijenos topline na susjedne molekule je stoga, koeficijent toplinske vodljivosti uzorka. Što je veći koeficijent toplinske vodljivosti, to se brže i homogenije zagrijava uzorak. Tijekom sušenja mijenja se koeficijent toplinske vodljivosti uzorka sa smanjenjem udjela vode. Osim toga, mora se uzeti u obzir da se odvođenjem energije potrebne za isparavanje vlage na samom početku sušenja uzorak zapravo hladi (latentna toplina isparavanja). Ako temperatura sušenja nije pažljivo odabrana, oba ova efekta mogu dovesti do raspadanja uzorka na kraju sušenja^{37,38}.

IC sušenje se može uspješno odvijati pod vakuumom. Na taj način se uklanja nastala vodena para u procesu sušenja.

Halogena metoda se temelji na IC metodi i predstavlja rezultat daljnjeg razvoja IC sušenja. Radna temperatura se uspostavlja vrlo brzo i može se s velikom preciznošću kontrolirati. Kraće je i vrijeme mjerenja i bolja je raspodjela topline kroz uzorak.

2.5.3. Fluidizacijsko sušenje (sušenje u fluidiziranom sloju)

Fluidizacija je operacija kojom se sloj čvrstih čestica, kontaktom s plinom ili tekućinom dovodi u stanje slično tekućini koja vrije. Pri tome dolazi do međusobnog miješanja kako samih čestica čvrste tvari, tako i tih čestica i sredstva za fluidizaciju (plina ili tekućine). Ovakvo ponašanje fluidiziranih slojeva čvrste tvari ispoljava neke karakteristike homogenih sustava, pa se fluidizirani sloj često naziva *pseudohomogenim sustavom*.

Zbog razmjerno velikog toplinskog kapaciteta, velike specifične površine i vrtložnog gibanja njihove čvrste tvari, fluidizirani slojevi se u tehnici prijenosa topline mogu upotrijebiti kao sredstva kako za zagrijavanje tako i za hlađenje sa specijalnim, vrlo važnim svojstvima. Tako oni omogućavaju postizanje visokih koeficijenata prijelaza topline, bilo da se taj prijelaz ostvaruje posredstvom stjenki, bilo da se ostvaruje izravnim dodirrom s medijem koji treba zagrijati, odnosno hladiti.

Kod ovakvih sušionica zrak za sušenje se tjera kroz sloj usitnjenog materijala brzinom dovoljnom da se sav materijal uzvitla, tj. potpuno suspendira u struji vrućeg zraka. Svi komadi materijala su sa svih strana oplakivani strujom zraka što rezultira velikom brzinom prijenosa topline, a time i velikom brzinom sušenja^{63,165}.

Glavni dio sušionice je cilindrični, konusni ili kombinirani prostor s perforiranim dnom kroz koje velikom brzinom struji topli zrak. Ako je napravljen stakleni prozor u prostoru fluidizacije, početak fluidizacije se može i vidjeti. Ako ovo nije moguće onda izravnavanje krivulje pada tlaka s porastom brzine ukazuje na početak fluidizacije.

Ovaj sustav je prikladniji za diskontinuirano sušenje, ali se može primijeniti i na kontinuirano sušenje.

Prehrambeni materijali namijenjeni sušenju fluidizacijom trebaju imati slijedeće karakteristike¹¹:

1. prosječna veličina čestica treba biti između 10 μm i 20 mm. Vrlo fine čestice teže aglomeriranju,
2. raspodjela veličine čestica treba biti razmjerno uska. Širina područja veličine čestica čini odabir brzine plina gotovo nemogućim. Vibracioni fluidizirajući sloj ponekad svladava ovaj problem kada je nemoguće imati jednoličnu veličinu tvari,
3. oblik čestica materijala mora biti reguliran i
4. aglomerirane čestice se moraju lako rastaviti tijekom fluidizacije.

2.5.4. Vakuum sušenje

Kod vakuum sušenja točka ključanja vode je znatno niža od 100 °C, jer je tlak niži od atmosferskog. Stupanj vakuuma, a time i temperatura sušenja, ovise o osjetljivosti materijala na brzinu sušenja i temperaturu. Inače, vakuum sušenje je jedna od skupljih metoda sušenja, pa se iz tog razloga vakuum sušionice često koriste i kao sekundarne sušionice ili u kombinaciji s nekim drugima metodama sušenja. Sadržaj vlage visoko vlažnog materijala prvo se smanji do 20-25 % nekom konvencionalnom metodom, kao što je sušenje vrućim zrakom, a onda se primjenjuje vakuum sušionica za sušenje do vlažnosti od 1-3 %.

Ovaj postupak sušenja nije čest u prehrambenoj industriji jer je dosta skup. Metoda se uspješno primjenjuje za dehidraciju limunovog soka, komadića jabuke i različitih toplinski osjetljivih proizvoda, kod kojih je važno sačuvati vitamin C. Tehnika vakuum sušenja često se koristi u procesima ekstrakcije i koncentriranja ekstrakta i aroma^{1,11}. Proizvodi se suše pod vakuumom pri nižoj temperaturi u odnosu na uobičajene postupke sušenja. Temperaturno područje sušenja iznosi od 35 °C do 60 °C. Proizvodi osušeni pod vakuumom su sasvim higroskopni, te je potrebna i posebna briga prilikom pakiranja materijala, u cilju zaštite od ponovne apsorpcije vlage. Ova metoda se može primjenjivati kako na komorni, tako i na kontinuirani sustav sušenja⁸.

2.6. STRUKTURA TKIVA BIOLOŠKIH MATERIJALA

Biljna tkiva sačinjavaju visoko kompleksne strukture koje imaju vrlo specifične i različite uloge u metabolizmu stanica od kojih je tkivo izgrađeno.

Većina normalnih metaboličkih aktivnosti u biljnim tkivima odvija se u dijelu tkiva koji se naziva parenhim. Stanice takvog tkiva su uglavnom velike, tankih stijenki i izraženih vakuola. Većina vode u parenhimskim stanicama smještena je u vakuolama. Na vodu u vakuolama otpada oko 90% od ukupne vode inkorporirane u biljna tkiva.

Stijenke biljnih stanica su semielastične strukture i većim dijelom su izgrađene od celuloze. Udio celuloze u tkivima iznosi od 60 do 90 %, te varira sa starošću tkiva. Jedan dio celuloze (50-60 %) u biljnim tkivima nalazi se u kristalnom obliku, koji međusobno povezuju amorfnе regije⁶⁴.

Strukturni skelet je izgrađen od vrlo finih i nerazgranatih vlakana koja se nazivaju mikrofibrile. Prostor između mikrofibrila popunjeni su polisaharidima kao što su hemiceluloza i pektinske tvari. Uklanjanje takvih tvari iz tkiva dovodi do značajnog skupljanja staničnih stijenki, što za posljedicu ima brojne promjene fizičkih svojstava. Sposobnost ugljikohidrata koji su inkorporirani unutar staničnih stijenki da vežu i zadržavaju vodu je izuzetno važno svojstvo u pogledu stvaranja teksture biljnih tkiva.

Stanična stijenka je propusna za vodu i niskomolekularne spojeve, te ona ne predstavlja značajan otpor u slučaju prijenosa tvari unutar ili van stanice. Prisustvo pektinskih i proteinskih tvari u staničnoj stijenci omogućava vezanje samo određene, točno definirane količine tvari. Stanična stijenka također može vezati određenu vrstu iona ili ona pak samo predstavlja barijeru njihovom prolazu. Dobro je poznato da divalentni ioni, kao što su magnezijevi i kalcijevi ioni, znatno povećavaju debljinu stanične stijenke⁶⁵.

Prostor između stanične stijenke i vakuole popunjen je proteinima i lipidima koji tvore protoplazmu. Protoplazma se nalazi u stanju viskoznog fluida i pokazuje svojstva polupropustljivosti. Protoplazma je zatvorena membranom koja se naziva plazmatska membrana ili plazmalema. Plazmatska membrana obavija stanicu, određuje njezin prostor, te djeluje poput polupropusne pregrade. Sve biološke membrane građene su po istom principu, a izgrađuju ih lipidi i proteini, te glikolipidi i glikoproteini. Proteini koji sačinjavaju staničnu membranu i protoplazmu su mjesto na kojem se veže i zadržava najveća količina vode.

Dvosloj lipida tvori strukturni matriks membrane. Membranski lipidi su amfipatske molekule (*na jednom kraju hidrofилne, a na drugom hidrofobne*) koje se spontano međusobno orijentiraju, ovisno o tome nalaze li se u vodenoj sredini ili u nekom nepolarnom otapalu ili na granici dviju faza. U vodenoj sredini mogu se spontano složiti u dvosloj. Takav dvosloj djeluje poput dvodimenzionalne tekućine u kojoj molekule mogu lateralno difundirati (*model tekućeg mozaika*)⁶⁶.

Membranski proteini su pretežno odgovorni za funkciju membrana. Oni djeluju kao specifični receptori, enzimi, prenositelji ili čine vodene kanale za prolaz hidrofилnih tvari kroz membranu. Proteini mogu biti uronjeni u lipidni dvosloj – integralni proteini, usidreni u njemu ili vezani površinski kao periferni proteini.

Šećeri su kovalentno vezani za membranske proteine ili lipide. Nalaze se s vanjske strane plazmatske membrane, a ako su u unutrašnjosti eukariotske stanice, onda su okrenuti od citoplazme (*prema unutrašnjosti membranskih vrećica npr. lizosoma*). Uloga im je višestruka i odgovorni su za međusobno prepoznavanje stanica.

Razlika između osmotskog tlaka u stanici i okolnog tlaka naziva se turgorski tlak. Ukoliko dolazi do smanjenja turgora, čemu je uzrok smanjenje količine vode u citoplazmi, smanjuje se i protoplast, te postaje vidljiva lipoproteinska membrana – plazmalema.

Pod pojmom plazmolize podrazumijeva se odvajanje plazmaleme i staničnog protoplasta od stanične stijenke kad se biljna stanica nađe u hipertoničnoj otopini. Pojava je izazvana osmozom. Eksperimentalno je možemo izazvati tako da žive biljne stanice stavimo u otopinu šećera ili soli koja ima veću koncentraciju nego stanični sok (*sadržaj vakuole*). Stanični sok u tom slučaju postaje hipotoničan u odnosu na otopinu šećera, pa voda izlazi iz vakuole, te kroz protoplazmatski sloj i plazmalemu izlazi iz stanice. Vakuola se smanjuje sve dok se ne izjednači koncentracija staničnog soka s koncentracijom plazmolitika (*otopine kojom je izazvana plazmoliza*)⁶⁷.

2.7. METODE OBRADJE BIOLOŠKIH MATERIJALA NAMIJENJENIH SUŠENJU

Biljno tkivo se u većini slučajeva podvrgava različitim metodama obrade prije same provedbe sušenja u cilju smanjenja promjena izazvanih pripremom bioloških materijala, procesom sušenja, kao i promjena koje nastaju tijekom njihovog skladištenja. Nepoželjne promjene do kojih pri tom može doći su npr. enzimsko i neenzimsko posmeđivanje, površinsko stvrdnjavanje uz deponiranje topljivih sastojaka, smežuranje, gubitak tvari okusa i mirisa i dr.

Veliki broj autora u prethodnu obradu bioloških materijala namijenjenih sušenju uključuje procese kao što su: blanširanje, smrzavanje, osmotsko uklanjanje vode, sumporenje, sulfitiranje, uranjanje u različite otopine kao što je otopina askorbinske kiseline, limunske kiseline, kalcijevog klorida, škroba i sl.

Guljenje i rezanje izaziva znatne promjene biljnih tkiva koje se u prvom redu očituju u povećanju respiracije, produkciji etilena, te raznih reakcija fenolnih spojeva. Boja, tekstura i aroma oštećenih biljnih tkiva, između ostalog, su posljedica utjecaja sinteze i polimerizacije fenolnih spojeva⁶⁸.

Gubitak šećera i ostalih topivih tvari tijekom obrade mogu utjecati na gubitak arome što dovodi do smanjenja kvalitete osušenih proizvoda^{69,70}.

Cilj pripreme bioloških materijala je poboljšanje kvalitete konačnog proizvoda, te poboljšanje kinetike sušenja. Jedan dio metoda prethodne obrade usmjeren je na operacije općeg značenja, dok se drugi dio usmjerava na poboljšanje samog procesa dehidracije^{11,71-79}.

Metode koje se primjenjuju u cilju zaustavljanja neželjenih procesa metabolizma i poboljšanja kinetike sušenja oštećenih biljnih tkiva mogu se klasificirati u dvije grupe: kemijske i nekemijske (fizikalne) metode⁷¹.

2.7.1. Kemijske metode

2.7.1.1. Anorganske tvari

Anorganske tvari su često korištene u cilju modificiranja svojstava biljnih tkiva koja se podvrgavaju sušenju. Sulfiti su najdjelotvorniji višefunkcionalni spojevi koji sprječavaju enzimsko i neenzimsko posmeđivanje hrane, a imaju i druge pozitivne učinke.

Kao sastojci hrane, pojam sulfiti obuhvaća sumpor dioksid (SO_2), natrij metabisulfit ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$), natrij bisulfit (NaHSO_3), natrij sulfit (Na_2SO_3), kalij metabisulfit ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$) i kalij bisulfit (KHSO_3).

Funkcija sulfita u hrani je višestruka:

- a. sprječavaju enzimsko i neenzimsko posmeđivanje,
- b. kontroliraju rast mikroorganizama,
- c. djeluju kao sredstvo za izbjeljivanje,
- d. imaju antioksidativno djelovanje, te
- e. djeluju kao reducirajući posrednici

Sulfiti onemogućavaju enzimsko posmeđivanje inhibicijom monooksidaze (*polifenol-oksidaze PPO*), reagiranjem s međuproduktima reakcije, čime blokiraju daljnje posmeđivanje. Također, reduciraju obojene *o*-kinone u bezbojne i manje reaktivne fenole. Neenzimsko posmeđivanje sprječavaju djelovanjem na karbonilne spojeve reakcija adicije, esterifikacije i supstitucije.

Poznato je da dodatak sulfita izaziva promjene u propusnosti membrana. Također je uočeno da se povećanjem koncentracije SO_2 značajno smanjuje aktivnost pektin esteraze. Sumporenje izaziva inhibiciju enzima i pucanje disulfitnih, veza koje za posljedicu imaju promjenu teksture bioloških materijala.

Namakanje kolutića jabuke u otopini $K_2S_2O_5$ tijekom 5-30 minuta smanjuje njihovu čvrstoću tijekom konvekcijskog sušenja, te se znatna kontrakcija volumena uočava tek u završnom stadiju sušenja⁷⁵.

Dodatak sulfita prije sušenja uzoraka jabuka i breskvi utječe na povećanje njihove mase tijekom rehidracije u odnosu na neobrađene uzorke⁷⁶.

Prethodnom obradom svježih uzoraka jabuke 1,5 % - tnom otopinom $K_2S_2O_5$ postiže se veća brzina sušenja u odnosu na brzinu sušenja netretiranih uzoraka jabuke. 1,5 % - tna otopina $K_2S_2O_5$ pokazuje značajan utjecaj na smanjenje ukupne promjene boje osušenih uzoraka⁷⁷. Međutim, sulfiti se danas upotrebljavaju samo u nekim slučajevima jer mogu izazvati ozbiljne zdravstvene smetnje, te je stoga njihova primjena zakonski regulirana.

Biljna tkiva koja su rezana ili sjeckana pokazuju smanjenje respiracije, te intenziviranje rekonstitucijskih procesa, ako se tretiraju kalcijem^{78,79}. Dodatak kalcija pomaže povećanju integriteta staničnih membrana i staničnih stijenki. Također, kalcij koji se infiltrira unutar stanice stvara veze sa staničnom stijenkom, te gradi poprečne veze s pektinskim tvarima unutar središnje lamele^{78,80,81}.

Namakanje biljnih tkiva u otopini NaCl prije provedbe sušenja ne pokazuje značajan utjecaj na čvrstoću tkiva, ali je uočeno bitno povećanje rehidracijske sposobnosti kod osušenih proizvoda⁷⁵. Tijekom rehidracije kristali NaCl disociraju, te tvore koncentrirane nakupine natrijevih i kloridnih iona. Solvatacija tako nastalih iona omogućava bržu, a samim tim i bolju rehidraciju⁸².

Prethodna obrada s Na_2CO_3 omekšava strukturu tkiva i povećava rehidracijska svojstva osušenih uzorka celera⁸³.

2.7.1.2. *Organske tvari*

2.7.1.2.1. *Ugljikohidrati*

Literaturni pregled pruža uvid u dva osnovna modela upotrebe ugljikohidrata prije provedbe sušenja. Prvi model se zasniva na primjeni relativno niskih koncentracija šećernih otopina, uz kratko vrijeme obrade.

Drugi model se sastoji u primjeni visokih koncentracija šećera, što rezultira stvaranjem osmotskog tlaka koji je odgovoran za uklanjanje vode, te impregniranje samog tkiva⁷¹.

Obrada biljnih tkiva saharozom ili glicerolom prije operacije sušenja znatno poboljšava rehidraciju tako obrađenih bioloških materijala. Obrada saharozom pokazuje promjenu u strukturi i mehaničkoj čvrstoći biljnih tkiva. Također je uočeno da otopine polihidroksida skraćuju vodikove veze u polisaharidima biljnih stanica, što je u izravnoj korelaciji sa smanjenjem deformacija tijekom sušenja⁸³.

Utjecaj šećera na različite stanične komponente rezultira očuvanjem funkcionalnosti proteina. Stabilizacija trodimenzionalne strukture proteina izaziva povećanje hidrofobnih interakcija, kao i određenih hidrofilnih svojstava prilikom nastajanja proteinsko-šećernih kompleksa^{84,101}.

Dehidracijom membrana povećavaju se Van der Waals-ove privlačne sile između acilnih lanaca i tranzicija tekućih kristala u gel strukturu. Disaharidi, kao što su saharoza ili trehaloza, vežu vodu, te sprječavaju takvu faznu promjenu⁸⁵.

Osmotsko uklanjanje vode u većini istraživanja daje nepovoljne rezultate u pogledu rekonstitucijskih svojstva bioloških materijala. Niske vrijednosti rehidracionog omjera uočene su kod jabuke, peršina, mrkve i bundeve, a efekt osmotskog uklanjanja vode kod navedenih bioloških materijala bio je ovisan o vrsti uporabljene osmoaktivne tvari. Također je primijećeno da su brzina rehidracije, kao i konačni sadržaj vode, veći u slučaju osmo-konvekcijskog sušenja materijala koji su tretirani sa škrobnim sirupom u odnosu na one koji su tretirani otopinom saharoze⁸⁶.

Prodiranje šećera u jabučno tkivo popraćeno je omekšavanjem njegove teksture. Kockice jabuke kod kojih se voda uklanjala osmotskim putem pokazuju slabu otpornost na kompresiju, u odnosu na one koje nisu obrađene. Razlog slabljenja teksture tkiva kockica jabuke uslijed dehidratacije osmozom pripisuje se padu turgoskog tlaka, te premještanju iona iz stanične stijenke u okolni medij. Također je uočena depolimerizacija pektinskih tvari uslijed povećane enzimske aktivnosti, što dodatno slabi strukturu tkiva biljne stanice⁸⁷⁻⁹³.

Osmotsko uklanjanje vode u kombinaciji s konvekcijskim sušenjem rezultira znatnim promjenama strukture tkiva bioloških materijala, koje utječu i na mehanička svojstva osušenih proizvoda⁹³⁻¹⁰⁰.

2.7.1.2.2. Biopolimeri

Međustanični prostori predstavljaju najbrži put za prodiranje velikih molekula u biljno tkivo. Infiltracija biopolimera u međustanični prostor, kao i staničnu stijenku, povećava otpornost materijala prema promjenama koje su izazvane prethodnom obradom i sušenjem. Obrada s dekstrinima manjih molekula prije provedbe sušenja daje bolju teksturu kod rehidratirane mrkve i kockica rajčice, te povećanje kapaciteta zadržavanja vode^{101,102}.

Veći utjecaj na poboljšanje teksture i rehidrationska svojstva ima obrada uzoraka škrobom. Naime, dokazano je da namakanje rajčice prije provedbe sušenja u 2,5 %-tnoj otopini škroba tijekom dvije minute, pri sobnoj temperaturi znatno poboljšava njenu rehidraciju¹⁰³.

Za kockice mrkve obrađene sa 2,5 %-tnom otopinom škroba pri temperaturi 80 °C tijekom 30 sekundi potrebno je kraće vrijeme sušenja, te je uočeno povećanje gustoće uzoraka u odnosu na uzorke blanširane pri temperaturi 90°C tijekom 3 minute. Također je uočeno manje skupljanje uzoraka, za oko 10 %, te poboljšanje rehidracije u odnosu na blanširane uzorke^{71,104}.

2.7.1.3. Površinski aktivne tvari

Obrada bioloških materijala prije sušenja s površinski aktivnim tvarima daje različite i često kontradiktorne rezultate. Površinski aktivne tvari (*surfaktanti*) imaju znatan utjecaj u procesima sušenja u kojima se suše cijeli plodovi voća s kožicom, kao što su šljive i grožđe.

Kratkotrajnim uranjanjem voća s kožicom u zagrijane alkalne otopine uklanja se voštana ovojnica (*tzv. kutikula*), a operacija je poznata kao dipovanje^{11,105,106}.

Uranjanje boba grožđa u otopinu etilolata (*etil-9-oktadecenoat*) uz dodatak K_2CO_3 značajno smanjuje otpor kožice prema prolasku vode, te se na takav način ukupno vrijeme sušenja smanjuje za polovicu. Povećanje brzine sušenja stvara otvorenu, poroznu strukturu, koja rezultira boljim rehidrationskim svojstvima^{96,107}.

Uranjanje šljiva u zagrijanu otopinu NaOH (0,5 %) značajno skraćuje vrijeme sušenja, te je u tom slučaju ono jednako vremenu potrebnom za sušenje blanširanih uzoraka. Iako ne spada u aditive koji se dodaju u hranu, NaOH se ipak može koristiti za poboljšavanje preradbenih svojstava materijala¹⁰⁸.

2.7.1.4. Ostala sredstva za prethodnu obradu

Primjena sulfita je zakonski regulirana, te se zbog takve činjenice danas istražuju brojne mogućnosti njihove zamjene. Najpoznatija zamjena za sulfite u sprječavanju posmeđivanja hrane je L-askorbinska kiselina i njezin jeftiniji stereoizomer D-askorbinska kiselina, komercijalno poznata pod nazivom eritorbinska kiselina.

Vrlo aktivni inhibitori posmeđivanja su različiti helatni spojevi koji se ili izravno vežu s polifenol-oksidadom ili reagiraju s njezinim supstratima. Primjer inhibitora koji reagira s bakrom, koji je sastavni dio prostetske skupine polifenol-oksidade, je beta-ciklodekstrin.

Ostali inhibitori enzimskog posmeđivanja u komercijalnoj upotrebi su aminokiseline koje sadržavaju sulfhidrilnu skupinu, posebno cistein i reducirani glutation; te anorganske soli, kao što su natrijev i cinkov klorid¹⁰⁹.

2.7.2. NEKEMIJSKE (FIZIKALNE) METODE OBRADNE

2.7.2.1. *Blanširanje*

Blanširanje predstavlja jednu od najraširenijih metoda prethodne obrade bioloških materijala, posebice voća i povrća, namijenjenih sušenju. Blanširanjem se nastoji izazvati denaturacija ili inhibicija enzima koji su odgovorni za smanjenje kakvoće proizvoda kroz enzimsko posmeđivanje, oksidaciju lipida i ostale degradativne reakcije. Također, blanširanje znatno utječe na skraćivanje vremena sušenja, uklanjanje zraka iz međustaničnog prostora, te omekšavanje teksture bioloških materijala^{71,110-116}.

Blanširanje se provodi termičkom obradom materijala, pripremljenog na odgovarajući način (*oljuštenog, izrezanog, usitnjenog i sl.*), provođenjem kroz toplu vodu (*eventualno vrelu*) ili zasićenu vodenu paru u trajanju od nekoliko minuta¹¹. Biološki materijali tijekom zagrijavanja omekšaju, što je posljedica pada turgorskog tlaka i kompleksnih promjena unutar polisaharidnog matriksa stanične stijenke. Smanjenje kohezivnih sila unutar polisaharidnog matriksa, te pad adhezije unutar stanice, rezultira povećanjem adsorpcijskih i rekonstitucijskih svojstava materijala⁷¹. Nadalje, stanična tkiva gube svoju čvrstoću zbog enzimske aktivnosti što dovodi do depolimerizacije celuloznih i pektinskih tvari unutar stanične stijenke^{88,89}.

Provedba postupka blanširanja može teći kontinuirano ili diskontinuirano. Temperatura vode koja se koristi za blanširanje može se kretati između 75 °C i 100 °C, a vrijeme provedbe blanširanja od 20 sekundi do 15 minuta.

Do danas su provedena brojna ispitivanja utjecaja različitih načina blanširanja na dinamiku sušenja i kvalitetu dehidratiranih proizvoda. Koji će se postupak blanširanja bioloških materijala primijeniti ovisi prvenstveno o vrsti i sastavu konkretnog biološkog materijala namijenjenog sušenju^{111,112}.

Blanširanje ima velik utjecaj na neenzimsko posmeđivanje voća i povrća. Blanširane kockice mrkve pokazuju visoki stupanj zadržavanja β -karotena, te značajnu degradaciju askorbinske kiseline u odnosu na neobrađene uzorke^{113,114}.

Blanširanje korjenastog i lisnatog povrća u vodi pri temperaturi 95 °C može se poboljšati dodatkom sulfita, otopina soli, bikarbonata, te magnezijevog-oksida^{115,116}.

2.7.2.2. Zamrzavanje

Utjecaj zamrzavanja na strukturu tkiva bioloških materijala prije sušenja predmet je istraživanja više autora¹¹⁷⁻¹²⁰. Kockice mrkve koje su zamrznute prije sušenja pokazuju značajno skraćivanje ukupnog vremena sušenja, te za oko 30 % manje skupljanje u odnosu na blanširane uzorke. Međutim, stupanj rehidracije je bio nešto niži nego kod blanširanih kockica mrkve¹¹⁷. Zamrzavanje voća i povrća prije sušenja u vakuumu daje osušeni proizvod boljih rehidrationskih svojstava u odnosu na materijale koji se suše vrućim zrakom⁹⁶.

Očuvanje strukture stanične stijenke predmijeva i povećani prijenos mase. Kod bioloških materijala koji se zamrzavaju dolazi do značajnog oštećenja tkiva, što za posljedicu ima promjenu difuzije vode.

Uspoređujući difuziju neobrađenih i prethodno zamrznutih uzoraka mrkve došlo, se do zaključka da se tijekom njihovog sušenja difuzitet smanji na polovicu inicijalne vrijednosti za zamrznute uzorke⁷¹.

Zamrzavanje špinata rezultira smanjenjem sadržaja glikolipida, te povećanjem broja neutralnih lipida. Triacilgliceroli i slobodni steroli u neutralnim lipidima, te sterilglikozidi i monogalaktozidigliceridi u glikolipidima su stabilniji tijekom prethodne obade. Sadržaj klorofila, luteina i β -karotena u špinatu se smanjuje toplinskom obradom¹¹⁸.

Statistički značajne vrijednosti u sadržaju ukupnih fenolnih tvari uočene su kod kupina, jagoda, te kukuruza koji su nakon branja bili zamrznuti ili su pak sušeni uz prethodno zamrzavanje u odnosu na uzorke koji su sušeni samo u struji vrućeg zraka. Sekundarni fenolni metabolizam igra važnu ulogu u očuvanju raznih svojstava biljnih tkiva. Također, veliki broj različitih fenolnih spojeva je važan i za očuvanje ljudskog zdravlja¹²⁰.

2.8. PROMJENE IZAZVANE SUŠENJEM

2.8.1. Promjena volumena

Uklanjanje vode tijekom sušenja bioloških materijala izaziva mnogobrojne promjene u samom materijalu, a obim takvih promjena ovisi o svojstvima materijala, te samom načinu prethodne obrade.

U ranim fazama sušenja, dok gradijent koncentracija još nije znatan, svojstva površinskog sloja ne pokazuju bitne razlike u odnosu na svojstva unutrašnjeg dijela materijala. U tom stadiju materijal je viskoelastičan i otporan na deformacije, te se uklanjanje vode odražava kroz direktnu promjenu volumena. Količina vode koja se uklanja iz materijala skoro u potpunosti odgovara stupnju skupljanja ili kvrčenja⁷¹.

Kvrčenje mrkve u periodu konstantne brzine sušenja ekvivalentno je volumenu isparene vode u konvekcijskom sušioniku pri temperaturama 60 i 80 °C, no sušenje mrkve pri temperaturi 100 °C i krumpira pri temperaturi 60 °C rezultira manjim kontrakcijama volumena u odnosu na volumen isparene vode¹²¹⁻¹²⁵.

U živom tkivu samo voda i male molekule u otopini difundiraju kroz stanične stijenke koje imaju svojstvo visoko selektivnih permeabilnih membrana¹²⁶.

Migracija vode iz unutrašnjosti prema površini materijala uzrokuje i kretanje otopljenih tvari, te se njihova koncentracija u vanjskim slojevima sve više povećava.

Porast koncentracije otopljenih tvari na površini ima za posljedicu stvaranje velikog gradijenta vlažnosti, te se pod takvim uvjetima odvija difuzija tvari u smjeru unutrašnjosti gdje je otopina većeg razrjeđenja. Postupno koncentriranje otopljenih tvari u perifernim dijelovima bioloških materijala ima za posljedicu intenziviranje različitih degradativnih reakcija, orožnjavanje i kvrčenje površinskog sloja^{8,125-129}.

2.8.2. Poroznost

Promjena volumena tijekom provedbe sušenja ima za posljedicu stvaranje porozne strukture bioloških materijala. Materijal kod kojeg je došlo do ekstenzivnog kvrčenja pokazuje značajno smanjenje broja pora, kao i njihove prosječne veličine⁷¹.

Isparavanjem vode povećava se viskoznost preostale otopine, kojoj se smanjuje mobilnost i difuznost molekula. Nekristalni dijelovi polisaharida i proteina, kao i stanični sokovi, grade amorfnu regiju. Temperatura staklastog prijelaza, koja je inače vrlo niska, znatno se povećava sa smanjenjem sadržaja vode. Staklasto stanje koje se oblikuje u završnom periodu sušenja daje mehaničku čvrstoću materijala. Zbog toga dolazi do povećanja kvrčenja i poroznosti materijala^{130,131}.

Mnoge tehnike sušenja kao i metode prethodne obrade bioloških materijala imaju za cilj stvaranje što poroznije strukture materijala, koja pospješuje prijenos mase i povećava brzinu sušenja. Međutim, u nekim slučajevima iako dolazi do povećanja prijenosa mase koja je posljedica otvorenosti strukture materijala, ipak ne dolazi do povećanja ukupne brzine sušenja. Naime, porozna, spužvasta struktura ima dobra izolacijska svojstva, te time znatno usporava prijenos topline u sušenom materijalu. Krajnji rezultat će ovisiti o tome stvara li porozitet veći utjecaj na prijenos mase ili prijenos topline u pojedinom materijalu ili sustavu za sušenje.

Porozni proizvodi imaju prednosti koje se ogledaju u brzjoj topljivosti, boljoj sposobnosti rekonstitucije, većem prividnom volumenu, dok su nedostaci skraćeno vrijeme skladištenja zbog povećanja površine koja je izložena zraku, svjetlu itd^{8,9}.

2.8.3. Promjena boje (posmeđivanje)

Boja hrane je nesumnjivo prvi i često najznačajniji čimbenik za prihvatljivost nekog prehrambenog proizvoda od strane potrošača. Tijekom pripreme, prerade i skladištenja prehrambenih proizvoda dolazi do različitih promjena, među kojima je promjena boje svakako najuočljivija.

Promjena boje je obično izazvana pojavom koju nazivamo posmeđivanje. Posmeđivanje se općenito dijeli na enzimsko i neenzimsko.

2.8.3.1. Enzimsko posmeđivanje

Enzimsko posmeđivanje u većini slučajeva predstavlja negativnu promjenu. Vezana je za promjenu boje i sastava voća i povrća kojemu je na bilo koji način (guljenje, rezanje, drobljenje itd.) narušena osnovna struktura. Promjena boje je kompleksan proces tijekom kojeg se monofenolni spojevi u nazočnosti polifenol-oksidge i kisika, hidroksiliraju do *o*-difenola, koji se kasnije oksidiraju do *o*-kinona. Kinoni su jako reaktivni i u neenzimskim reakcijama daju smeđe do crno obojene pigmente.

Ovim procesima je zajedničko to što svi započinju kontaktom između fenolnih spojeva i enzima, koji stupaju u kontakt tek kada je narušena stanična struktura. Naime, za enzimsko posmeđivanje je potrebna nazočnost triju komponenti: kisik, enzim i supstrat. Najčešći enzim u voću i povrću koji uzrokuje ove reakcije je polifenol-oksidge (PPO). PPO pripada skupini oksidoreduktivnih enzima. Sprječavanje promjene boje je značajno kako zbog očuvanja organoleptičkih svojstava, tako i zbog činjenice da polifenoli koji sudjeluju u reakcijama enzimskog posmeđivanja imaju značajnu ulogu u ljudskom zdravlju, tj. imaju antikancerogeno djelovanje i sprječavaju oboljenja srca i krvožilnog sustava.

2.8.3.2. Neenzimsko posmeđivanje

Neenzimsko posmeđivanje u velikom broju slučajeva predstavlja negativnu promjenu koja dovodi ne samo do promjene boje, nego i drugih promjena kao što su degradacija sastojaka hrane, smanjenje probavljivosti proteina, a ponekad i do tvorbe toksičnih spojeva.

U reakcijama neenzimskog posmeđivanja nije nužna nazočnost kisika, ali kisik i svjetlo pospješuju ove procese.

Nekoliko reakcija vodi do neenzimskog posmeđivanja: reakcije između reducirajućih šećera, i slobodnih aminokiselina ili slobodnih amino-skupina na proteinskim lancima (Maillardove reakcije); degradacija šećera (zagrijavanje polihidroksikarbonskih spojeva bez nazočnosti tvari s dušikom), te različite oksidativne reakcije (npr. oksidativna degradacija askorbinske kiseline). Reakcije enzimskog posmeđivanja u svojoj drugoj fazi (nakon nastanka kinona) odvijaju se mehanizmom neenzimskog posmeđivanja (isključen utjecaj enzima)¹³².

Reakcije neenzimskog posmeđivanja dovode do smanjenja nutritivne vrijednosti hrane koja sadrži aminokiseline i šećere, a istodobno dolazi do sinteze spojeva koji mogu imati štetan utjecaj na ljudsko zdravlje. Međutim, neenzimsko posmeđivanje ne predstavlja uvijek negativnu pojavu, te se često radi na stvaranju uvjeta za njegovo nastajanje. Budući da su produkti neenzimskog posmeđivanja spojevi određene boje i arome, njihovo nastajanje u nekim slučajevima je poželjno zbog prepoznatljivih svojstava određenih prehrambenih proizvoda kao što su pekarski proizvodi, pečeno meso, pržena kava itd^{132,135,142}.

2.9. REHIDRATACIJSKA SVOJSTVA

Osušeni proizvodi se u velikom broju slučajeva konzumiraju ili dalje prerađuju nakon njihovog rehidriranja. Kao najvažniji kriterij za ocjenjivanje uspješnosti procesa dehidracije hrane obično se uzima otvorenost strukture, odnosno sposobnost rehidracije ili rekonstitucije. Kod nekih tipova dehidriranih proizvoda sposobnost rehidracije odražava njihova «instant» svojstva, što se poglavito odnosi na rekonstituciju hrane u prahu. Pri tom je važno istaknuti da se rehidracija ne može promatrati samo kao proces reverzibilan dehidraciji. Svojstva i kakvoća rehidriranog biološkog materijala uvjetovani su promjenama koje su uzrokovane prethodnom obradom prije sušenja, samim sušenjem, te rehidracionim ili rekonstitucijskim svojstvima samog biološkog materijala¹³³.

Tijek i stupanj rehidracije mjere se praćenjem porasta mase kuhanjem dehidrirane namirnice kroz određeno vrijeme, a izražavaju se kao rehidracioni omjer, koeficijent rehidracije i postotak vode u rehidriranom materijalu¹¹.

U idealnom slučaju bi se trebalo postići vraćanje potpune količine uklonjene vode, ali je jasno da izlaganje povišenoj temperaturi i uklanjanje vode tijekom sušenja, te naknadno skladištenja dovode do gubitka prvobitnih svojstava i nepoželjnih promjena.

Na rekonstituciju hrane nemaju utjecaja samo veličina i oblik čestica, već i fizičke i kemijske promjene koje su se dogodile tijekom procesa sušenja, odnosno skladištenja. To se prije svega odnosi na denaturaciju proteina i ireverzibilne promjene ostalih sastojaka koje je teško izbjeći¹³⁵⁻¹³⁸. Poseban problem predstavlja škrob koji se postupno modificira djelovanjem topline, što je naročito izraženo kod sušenja krumpira kao i nekih proizvoda na njegovoj bazi, npr. pirea^{139-141,150}.

Osušeni biološki materijali, kao što su voće i povrće, trebali bi kuhanjem u vreloj vodi, kroz najviše 20 – 30 minuta, poprimiti stalnu masu otprilike jednaku masi svježeg uzorka uzetog za sušenje.

Tijek rehidracije prati se mjerenjem porasta mase prilikom kuhanja osušene sirovine kroz određeno vrijeme koje se kreće od 2 min do 24 sata. Odnos između mase suhog materijala i potrebne količine vode kreće se od 1:5 do 1:50, a temperatura upotrijebljene vode može biti od sobne do temperature vrenja.

Rehidrationska svojstva mogu se izraziti na više načina, a neki od najčešćih su:

a) Rehidrationski omjer:

$$RO = \frac{\text{masa ocijedenog rehidratiranog uzorka}}{\text{masa suhog materijala}} \quad (14)$$

b) Koeficijent rehidrationske:

$$CR = \frac{m_2}{\frac{m_1 - 0,01 \cdot m_1 \cdot w_0}{100 - w_f}} \quad (15)$$

c) Kapacitet rehidrationske

$$KR = \frac{\%H_2O \text{ nakon rehidrationske}}{\% s.tv. uzorka} \quad (16)$$

Sposobnost i kinetika rehidrationske mogu se mjeriti i praćenjem promjene mase tijekom namakanja dehidratirane namirnice kroz određeno vrijeme u vodi, pri različitim temperaturama.

Tijekom provedbe rehidrationske može se uočiti nekoliko procesa s različitom kinetikom. U početku procesa rehidrationske apsorpcija vode je obično intenzivna, no tijekom njene daljnje provedbe dolazi do znatnog usporavanja brzine apsorpcije. Ubrzana hidrationska bioloških materijala izaziva promjene na njihovoj površini, kao i kapilarnim svojstvima koja su vezana uz poroznost^{71,143}. Stupanj rekonstitucije osušenih bioloških uzoraka ovisi o stupnju stanične i strukturne oštećenosti, koje su izravna posljedica sušenja.

Zbog različitog kemijskog sastava i strukture, različiti biološki materijali, iako osušeni i rehidratirani pod istim uvjetima, imaju različitu rehidrationsku sposobnost.

Kinetika rehidrationske osušenih uzoraka celera pokazuje veliku ovisnost o poroznosti materijala, koja je bila različita za različite metode sušenja i temperature pri kojima se sušenje provodilo¹⁴³.

Visoke temperature i dugotrajno sušenje mogu uzrokovati znatne promjene bioloških materijala. Kako bi se ipak zadovoljila potreba za što bržim sušenjem i povećanim toplinskim iskorištenjem uz što manju degradaciju nutrienata, danas se sve više primjenjuju mikrovalno sušenje, sušenje u fluidizirajućem sloju, te razne kombinirane (*hibridne*) metode sušenja^{6,144}.

Mikrovalnim sušenjem ploški kivija dobiva se osušeni proizvod malog kapaciteta rehidracije i brže apsorpcije vode, u odnosu na proizvod dobiven mikrovalnim sušenjem potpomognutim konvekcijskim sušenjem¹⁴⁵. Međutim, mikrovalnim sušenjem uzoraka krumpira dobivaju se bolja rehidrationska svojstva u odnosu na konvekcijsko sušenje¹⁴⁶.

Sušenje prethodno blanširanih uzoraka mrkve u sušioniku s fluidizirajućim slojem daje manju promjenu boje, bolja rehidrationska svojstva, te veće očuvanje β -karotena u odnosu na uzorke dobivene sušenjem u mikrovalnom sušioniku, te uzorke dobivene solarnim sušenjem¹⁴⁷.

Za uzorke koji su osušeni vrućim zrakom pokazano je da s povećanjem temperature vode pri kojoj se provodi njihova rehidracija, raste sposobnost rekonstitucije i ravnotežna vlažnost uzoraka¹⁵¹. Rehidrationski omjeri za sve osušene uzorke povrća (mrkve, peršina, bundeve, šampinjona, graška, kukuruza, crvenog i bijelog luka, poriluka, krumpira, rajčice i papra), te osušene uzorke voća (jabuka i banana) kreću se u intervalu 1-4 pri temperaturi rehidracije od 60 °C. Sposobnost vezanja vode tijekom rehidracije za sve navedene osušene uzorke može se opisati krivuljom histereze¹⁴⁸.

Provedena je komparativna studija utjecaja načina uzgoja (organskog i konvencionalnog) i temperature sušenja (60-90 °C) uzoraka mrkve i krumpira koji su sušeni u fluidizirajućem sloju, te je ispitana kinetika rehidracije osušanih uzoraka. Nakon dva sata namakanja osušanih uzoraka u destiliranoj vodi pri temperaturi 26 ± 1 °C, utvrđeno je da uzorci mrkve apsorbiraju 58-82 %, dok uzorci krumpira apsorbiraju 37-59 % vode koja je uklonjena sušenjem. Veći udio škroba kod uzoraka krumpira, te njegova znatna degradacija tijekom sušenja ima za posljedicu smanjenje količine apsorbirane vode. Stupanj rekonstitucije bio je veći za uzorke mrkve i krumpira koji su sušeni u fluidizirajućem sloju pri nižim temperaturama sušenja (60 °C). Statistička analiza pokazala je da način uzgoja nema značajan utjecaj na rehidrationska svojstva materijala. Sušenje navedenog povrća u fluidizirajućem sloju daje proizvode zadovoljavajućih rehidrationskih svojstava, te općenito dobru kakvoću proizvoda, koja se ogleda u maloj promjeni boje i oblika osušanih uzoraka u odnosu na svježije uzorke¹⁴⁹.

Vrsta termičkog tretmana kao prethodne obrade, te njegov utjecaj na brzinu dehidracije i rehidracije proveden je u dva stupnja: niska temperatura – dugo vrijeme obrade (LTLT), te nastavljen standardnom obradom: visoka temperatura – kratko vrijeme (HTST), na uzorcima mrkve, celera i zelenog graha. Sušenje tako priređenih uzorka provedeno je u konvekcijskom sušioniku pri brzini strujanja zraka od $1,7 \text{ m s}^{-1}$; pri temperaturi mokrog termometra od $62 \text{ }^\circ\text{C}$ i temperaturi suhog termometra od $32 \text{ }^\circ\text{C}$. Veća brzina dehidracije i rehidracije, veći rehidracijski omjer, te veća čvrstoća tkiva rehidratiranih uzoraka postignuta je kombiniranim blanširanjem materijala (LTLT/HTST) u dva stupnja, u odnosu na konvencionalno blanširanje koje se provodilo u jednom stupnju (HTST)¹¹⁴. Ispitana je i primjena električnog polja visoke učestalosti (*high intensity electric field pulses*) sa 20 impulsa snage 48 J kg^{-1} tijekom $400 \text{ } \mu\text{s}$, te osmotskog uklanjanja vode u 50 %-tnoj otopini saharoze kao metode prethodne obrade uzorka jabuke kod konvekcijskog sušenja. Nakon toga je provedena rehidracija osušenih uzoraka pri različitim temperaturama u rasponu od $24\text{-}90 \text{ }^\circ\text{C}$. Utvrđeno je da rehidracijski omjer raste s porastom temperature rehidracije, no da kapacitet rehidracije poprima veće vrijednosti pri nižim temperaturama rehidracije (24 i $45 \text{ }^\circ\text{C}$). Kapacitet rehidracije kod uzorka prethodno obrađenih kombinacijom električnog polja visoke učestalosti i 50 %-tne otopine saharoze daje od 10 do 30% veći kapacitet rehidracije u odnosu na uzorke koji su obrađeni samo 50%-tnom otopinom saharoze. Boja rehidratiranih uzoraka jabuke bila je tamnija s povećanjem temperature i vremena provođenja rehidracije¹⁵⁰.

U konvekcijskom sušioniku pri temperaturi $65 \text{ }^\circ\text{C}$, tijekom 4 sata sušeni su cvjetovi i stabljike brokule. Uzorci su prethodno blanširani u vodi temperature $55 \text{ }^\circ\text{C}$, tijekom 45 minuta (*prvi stupanj obrade*), te potom na $100 \text{ }^\circ\text{C}$, tijekom 4 minute (*drugi stupanj obrade*). Nakon sušenja provedena je rehidracije uzorka pri različitim temperaturama ($25 \text{ }^\circ\text{C}$, $40 \text{ }^\circ\text{C}$, $55 \text{ }^\circ\text{C}$, $65 \text{ }^\circ\text{C}$ i $80 \text{ }^\circ\text{C}$). Utvrđeno je da kapacitet sorpcije vode (WSC) poprima najveću vrijednost pri temperaturi rehidracije od $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Uočena je značajna korelacija između kapaciteta sorpcije vode i ukupnog sadržaja arabinoze u tkivu brokule^{152,153}.

2.10. VOĆE

Pod voćem se podrazumijevaju plodovi višegodišnjih, kultiviranih ili samoniklih biljaka, koje se upotrebljavaju za ljudsku prehranu. Voće ne predstavlja značajan izvor energije, ali je cijenjeno zbog osvježavajućeg djelovanja, sadrži znatnu količinu kiselina (limunska, jabučna, vinska i dr.), ugljikohidrata, vitamina i drugih važnih sastojaka¹⁵⁴.

Prema nastanku i potrebama prerade, voće se dijeli na:

- 1) Jabučasto (*jabuka, kruška, mušmula, dunja*)
- 2) Koštuničavo (*trešnja, višnja, šljiva, breskva, marelica*)
- 3) Lupinasto (*orah, lješnjak, badem*)
- 4) Bobičasto (*grožđe, borovnica, ribiz, ogrozd*)
- 5) Jagodasto (*jagoda, malina, kupina*)
- 6) Agrumi (*limun, naranča, mandarina*)
- 7) Tropsko voće (*banane, ananas, kivi, mango, avokado*)

Voće bogato vodom (jagode, višnje, trešnje i dr.), s udjelom vode od 80 do 90 %, ima malu energetska vrijednost (167 kJ do 335 kJ na 100g), dok voće bogato mastima (orasi, lješnjaci, bademi i dr.), s oko 50 % masti, ima veliku energetska vrijednost (preko 2500 kJ na 100 g)¹⁵⁵.

Tablica 2. Prosječni kemijski sastav i energetska vrijednost (u 100 g jestivog dijela) jabučastog voća¹⁵⁵

JABUČASTO VOĆE		DUNJA	JABUKA (cijela)	JABUKA (bez kore)	KRUŠKA
JESTIVI DIO	(g)	69	90	77	90
VODA	(g)	84	87	84	60
BJELANČEVINE					
(ukupne)	(g)	0,3	0,0	0,3	0,2
MASTI (ukupne)	(g)	0,0	0,0	0,0	0,0
UGLJIKOHIDRATI					
(ukupni)	(g)	6,3	10,0	11,9	7,6
ENERGETSKA	(kJ)	105	167	192	121
VRIJEDNOST	(kcal)	25	40	46	29

Tablica 3. Sadržaj minerala i vitamina (mg100 g⁻¹) jabučastog voća¹⁵⁵

JABUČASTO VOĆE		DUNJA	JABUKA (cijela)	JABUKA (bez kore)	KRUŠKA	
MINERALI	Na	(mg)	3	3	2	1
	K	(mg)	200	279	120	94
	Ca	(mg)	14	10	4	6
	P	(mg)	19	10	8	7
	Fe	(mg)	0,3	0,2	0,3	0,1
	Cu	(mg)	0,13	-	0,10	0,10
VITAMINI	R. E.	(µg)	u tragovima	0	5	1
	B1	(mg)	0,002	0,002	0,004	0,003
	B2	(mg)	0,002	0,003	0,002	0,003
	Niacin	(mg)	0,2	0,2	0,1	0,2
	B6	(mg)	-	0,006	0,003	0,001
	C	(mg)	15	10	3	2

2.10.1. Jabuka (*Malus domestica*)

Jabuka spada u jezgričavo, jabučasto ili zrnato voće. Prema obliku nadzemnog sustava raste i uzgaja se u obliku stabla. Pup je mješovit i iz njega se razvija nekoliko listova i obično 5-6 cvijetova. Jabuka je nepravi plod, koji se razvija iz usplođa ili cvjetne lože (cvjetišta) i kućišta ili sjemenjače, koja nastaje iz plodnice¹⁵⁶.

Jabuci najviše odgovara umjereno kontinentalna klima sa srednjom godišnjom temperaturom od 8 °C do 12 °C. U periodu vegetacije ne odgovaraju joj visoke temperature. Dobro podnosi hladne zime, gdje minimalna temperatura ne pada ispod –25 °C. Za sve životne, fiziološke procese jabuke najprikladnija je temperatura oko 20 °C. Zimskim sortama povoljniji je položaj sa većom temperaturnom razlikom između dana i noći, jer se tada na disanje, koje je usporeno, troši manje rezervne hrane. Takvi plodovi su čvrsti, s dosta šećera i kiselina u skladnom omjeru, a i kvaliteta je dobra jer se bolje ugrađuju miris i aroma. Također je važna i vlažnost koja bi za vrijeme dozrijevanja plodova trebala biti oko 75 %. Najviše vlage jabuka zahtijeva u svibnju, lipnju i kolovozu. Magla, rosa i suša djeluju nepovoljno i uvjetuju veću pojavu gljivičnih bolesti na lišću i plodovima. Najbolje uspijevaju na dubljim, dobro dreniranim, pjeskovito-ilovastim tlima, koja imaju slabo kiselu reakciju. Uzgaja se na različitim podlogama.

Od kontinentalnog voća jabuka je na prvom mjestu po količinskoj proizvodnji plodova u svijetu, dok je u sveukupnoj proizvodnji na trećem mjestu, odmah iza banana i agruma.

Danas je poznato oko 10 000 sorti jabuka, koje se razlikuju po čitavom nizu svojstava i dijele se u više skupina.

Prema vremenu dozrijevanja razlikuju se slijedeće sorte¹⁵⁶:

1. Ljetne sorte (rane, srednje rane, kasne): *Close, Bjeličnjak, Vista Bella, Mantet* itd.
2. Jesenske sorte: *Elstar, Prima, Idared* itd.
3. Zimske sorte: *Kanada, Jonagold, Boskoop* itd.

Jabuke se još dijele na:

1. Sorte za preradu ili konzum:
 - vodeće sorte: *Jonagold, Idared*
 - prateće sorte: *Granny Smith, Gloster, Prima*
2. Sorte lokalnog značaja: *Jonathan, Close, Mantet*

2.10.2. Marelica (*Prunus Armenica*)

Marelice potječu iz Kine, gdje se uzgajaju preko 4000 godina, a na Sredozemlje ih je donio Aleksandar Veliki. Sazrijevaju u rano ljeto, prije drugog ljetnog voća i zato su u mnogim krajevima veoma dragocjene. Iako je marelica srodna breskvi, ona je nešto manja i drugačije koštice, koja se veoma lako odvaja od ploda. Najveći svjetski proizvođači marelica danas jesu Turska i Španjolska. Znatan dio od ukupne količine plodova jede se svjež, drugi dio se prerađuje u sokove, pekmeze i konzervira, a dio se i suši. Plodovi sadrže znatne količine β -karotena, vitamina B skupine, vitamina C, te minerala kalcija, fosfora i kalija. Sve te hranjive tvari su još koncentriranije u suhim marelicama¹⁵⁸. Tako se, na primjer, količina vitamina A sušenjem povećava sa 2600 IJ u 100 grama marelica na 7000 IJ vitamina A u 100 grama suhih marelica. Suhe marelice su također veoma korisne za anemične osobe zahvaljujući izrazito visokom sadržaju željeza.

Tablica 5. Prosječan kemijski sastav i energetska vrijednost (u 100 g jestivog dijela)

marelica¹⁶⁰⁻¹⁶²

HRANJIVE TVARI	Jed.	Svježa marelica	Osušena marelica
Energija	kcal	45	247
	kJ	186	10,5
Voda	g	85,3	17,6
Proteini ukupno	g	0,9	5
Masti ukupno	g	0,13	0,5
Ugljikohidrati ukupno	g	9,94	55,72
Minerali ukupno	g	0,66	3,3
Vlakna sirova ukupno	g	2,02	8
Beta karoten	μ g	1790	4620
Folna kiselina	μ g	3,6	5,1
Pantotenska kiselina	mg	0,29	0,83
Vitamin C	mg	9,4	11
Kalij	mg	278	1370
Kalcij	mg	16	82
Fosfor	mg	21	114
Magnezij	mg	9,2	50
Željezo	mg	0,65	4,4

2.10.3. Sušeno voće

Sušeno voće je proizvod koji se dobiva od cijelih, svježih, tehnološki zrelih i zdravih plodova, koji su pripremljeni i sušeni do te mjere da su pogodni za čuvanje.

Sušeno voće treba ispunjavati slijedeće uvjete:

- da ima aromu i boju karakterističnu za određenu vrstu, odnosno sortu voća,
- da nema mrlja koje su nastale uslijed fiziološkog oštećenja plodova zbog presušenosti i sl.,
- da posjeduje zadovoljavajuću rehidrationsku moć i
- da poslije rehidracije dobije miris i okus svježeg voća

Asortiman sušenih proizvoda od voća, u pojedinim zemljama, zavisi od lokalnih i udomaćenih običaja, klimatskih uvjeta i sl.

Sušeno voće ima dužu tradiciju od sušenog povrća. Ono nije samo poslastica, već i važna hrana, zbog visokog sadržaja ugljikohidrata (66 – 90 %), nutritivne vrijednosti i mogućnosti dužeg čuvanja.

Voće se prije sušenja može izrezati na polovice, četvrtine, kolutove, kockice određenih dimenzija ili se može sušiti kao cijeli plod, zavisno o metodi sušenja i vrsti voća.

Postoje dvije skupine sušenih proizvoda:

- s velikim sadržajem vode (16 – 18 %) i
- s malim sadržajem vode (3 – 8 %)

Sušeno voće se koristi za pripremu različitih umaka, te prašaka za pudinge i sladolede, a pojavljuje se i kao sastojak dječje hrane. Osim toga, značajni potrošači sušenog voća su konditorska i pekarska industrija. Sušeno voće se koristi i za pripravljanje čajeva, te u industriji vrenja (suha šljiva, marelica). Osušena jabuka je vrlo važna komponenta u dječjoj hrani i u hrani za dojenčad, kao i u dijetalnoj prehrani, a može se koristiti i kao osnovna sirovina neutralnog okusa kojoj se dodaje drugo aromatično voće¹⁵⁷.

Jabuka je voće koje se kao osušen proizvod prerađuje u najviše oblika. Za sušenje su pogodne sorte sa svjetlijom bojom mesa i usklađenog odnosa kiselina i šećera. Sorte s mekšim, brašnastim i žućkastim mesom ploda nisu pogodne za sušenje. Plodovi predviđeni za sušenje trebaju biti zreli, s razvijenom aromom, ali ne i omekšale konzistencije.

Plodovi jabuke se mogu rezati na komadiće duljine i širine 6, 10, 16 i 20 mm, s tim da je debljina komadića 3 do 5 mm^{158, 159}.

Za 1 kg osušenog proizvoda od jabuke (kolutovi ili ploške) sa 18 – 22 % ostatka vode, potrebno je preraditi 9 do 11 kg svježih plodova jabuke. Moguća je proizvodnja neoguljenih plodova, koja se odvija na isti način. Za dobivanje osušenih neoguljenih polovica jabuke, sa 15 do 18 % ostatka vode, potrebno je preraditi 7 do 7,8 kg svježe sirovine ovisno o sorti, dimenzijama i kvaliteti svježih plodova. Sušeni proizvod treba imati odgovarajuće senzorske osobine i rehidrationski omjer. Industrijski se najčešće prerađuju jesenske i zimske sorte, zbog obilnije rodosti i kemijskog sastava¹⁵⁷.

Tablica 4. Prosječni kemijski sastav nekih vrsta sušenog voća¹⁵⁷

SASTAV PROIZVOD	VODA (%)	PROTEINI (%)	MASTI (%)	UGLJ. HIDR. (%)	MIN. TV. (%)	PEKTIN. TV. (%)	ASKOR. KIS. (mg/ %)
MARELICA	15-25	4,8-5,2	0,4-0,5	63-73	3,1-3,8	2,6-3,8	15-17
BANANE	12-15	3,4-5,3	0,4-0,8	72-83	2,7-3,4	1,4-2,2	-
DATULJE	18-22	1,6-2,2	0,4-0,6	66-75	1,6-1,9	1,8-2,4	3
SMOKVE	23-26	2,8-4,0	0,9-1,4	58-63	2,2-2,5	5,8-7,8	0-3
BRESKVE	24	3	0,6	66-69	3	3,5	12-19
ŠLJIVE	20-24	1,9-2,3	0,5-0,6	59-69	1,8-2,1	1,4-1,6	2-5
GROŽĐICE	18-24	2-2,6	0,2-0,6	64-73	1,7-2,2	4,8	1-3
JABUKA	18-32	1,3-1,4	1-1,9	56-69	1,4-1,5	4	12

2.11. POVRĆE

Pod povrćem podrazumijevamo plodove i druge jestive dijelove povrtlarskih kultura, kao što su lišće, lukovice, gomolji, korijeni, mahune i stabljike, namijenjene za prehranu ljudi u svježem stanju ili poslije tehnološke obrade.

Zajednička karakteristika povrća je da su to voluminozne namirnice s visokim sadržajem vode (80-90 %), niske kalorične vrijednosti (43-52 kJ u 100 g povrća), te s dosta celuloznih vlakana koja pomažu normalnoj probavi¹⁶³.

Prehrambena vrijednost povrća leži u njegovom bogatstvu hranjivim tvarima, a posebno vitaminima i mineralima koji izravno utječu na fizikalnu i mentalnu kondiciju čovjeka, a time i na njegove radne sposobnosti. Uz voće, povrće je najvažniji i najjeftiniji izvor vitamina. Svježe povrće ima najveći sadržaj vitamina koji se smanjuje daljnjim čuvanjem, zamrzavanjem, sušenjem, te posebno termičkom obradom. Povrće je najvažniji izvor karotena iz kojeg ljudski organizam sintetizira vitamin A. Značajan je izvor vitamina C kao i vitamina B-kompleksa. Povrće u prehrani ima veliku ulogu i kao izvor minerala, koji su potrebni čovjeku za normalno funkcioniranje organizma. Izvor je željeza, kalija, magnezija i fosfora.

Neke se povrtne kulture koriste kao začinske biljke, jer jelima daju specifičan okus i miris, koji proizlazi iz njihovog bogatstva organskim kiselinama i eteričnim uljima. Takve tvari djeluju osvježavajuće, potiču apetit, a imaju i stanovito baktericidno djelovanje u usnoj šupljini i probavnom traktu^{63,114, 163}.

2.11.1. Značajke i prehrambena vrijednost korjenastog povrća

Najraširenije vrste korjenastog povrća su mrkva, peršin, pastirnjak i cikla. Njihova je značajka u tome da dio biljke zbog kojeg se uzgajaju sazrijeva u tlu. Osim podzemnih organa, od peršina se za jelo i industrijsku preradu koristi i lišće.

Hranjivi sastojci korjenastog povrća uglavnom su ugljikohidrati (tablica 6). Vrijednost korjenastog povrća je u sadržaju minerala i vitamina (tablica 7). Zajednička značajka korjenastog povrća jeste da su dvogodišnje kulture, koje u prvoj godini vegetacije oblikuju zadebljali korijen i rozetu lišća, a u drugoj cvjetno stablo i sjeme^{163,165}.

Tablica 6. Sadržaj hranjivih tvari u korijenastom povrću

VRSTA POVRĆA	UKUPNA SUHA TVAR (%)	ENERGETSKA VRIJEDNOST 1kg (kJ)	ŠEĆERI (%)	BJELANČEVINE (%)	ULJA (%)
MRKVA	10	1,8	8,2	1,1	0,3
PERŠIN	15	2,1	9,0	3,7	1,0
PASTRNIJAK	20	3,3	14,2	1,2	0,4
CIKLA	9	1,8	2,2	1,2	0,1

Tablica 7. Sadržaj vitamina i minerala (u 100 g jestivog dijela) korjenastog povrća

VRSTA POVRĆA	VITAMINI					MINERALI		
	Karoten (mg)	C (mg)	B ₁ (mg)	B ₂ (mg)	PP (mg)	Kalcij (mg)	Fosfor (mg)	Željezo (mg)
MRKVA	4,4	40	0,6	0,6	5	344	326	7,1
PERŠIN	0,4	1,930	1,1	2,8	14	1,903	840	43,0
PASTRNIJAK	0,0	180	0,8	1,2	2	445	624	5,5
CIKLA	0,01	100	0,2	0,5	4	203	322	7,5

2.11.2. Mrkva (*Daucus carota L.*)

Mrkva je dvogodišnja zeljasta biljka iz porodice *Umbelliferae*. Kao korijenasto povrće mrkva je vrlo cijenjena zbog posebnog hranjivog i dijetetskog značaja, naročito zbog sadržaja vitamina i mineralnih tvari. Zadebljali i sočni korijen mrkve upotrebljava se sirov, kuhan za spravljanje raznih jela, konzerviran sušenjem, za spravljanje soka i dr. Karakterističan je razmjerno visok sadržaj suhe tvari (9,4 – 16,2 %) u kojoj prevladavaju ugljikohidrati. Mrkva se odlikuje visokim sadržajem β -karotena, kojeg sadrži od 5,4 do 19,8 mg 100 g⁻¹. Ima ga znatno više u sekundarnoj kori nego u srži. U korijenu mrkve nalaze se i drugi vitamini (B1: 0,03 mg; B2: 0,02 mg; B6: 0,12 mg; PP: 0,2 mg; C: 2-10 mg). U malim količinama sadrži i vitamine D, E i K.

Mrkva u prvoj godini života formira zadebljali i sočan korijen s rozetom lišća, a u drugoj razvija cvjetonosno stablo i donosi plodove i sjeme. Oblik i veličina korijena dosta variraju, a on može biti gotovo loptast, kupast ili valjkast. Korijen sorti za ljudsku prehranu je narančast, a sorti za ishranu stoke žut ili bijel. Sorte za ljudsku prehranu svrstavaju se u rane, srednje i kasne. Najpoznatije sorte vode porijeklo iz Francuske, Nizozemske i Njemačke (*Nantaise, Chantenay*).

Mrkva se vrlo često siječe u kockice i kao takva ima široku primjenu za pripravu različitih jela, a osim toga vrlo lako se pakira u ambalažu različite veličine^{114, 166}.

2.11.3. Peršin (*Petroselinum hortense*)

Peršin je relativno mlada kultura, vodi podrijetlo od istoimene spontane flore, koja se sreće u mnogim predjelima u području Sredozemlja, pretežno na kamenitim staništima. Peršin se uzgaja zbog korijena i lišća, koji se razlikuju po kemijskom sastavu (tablica 8). Korijen se upotrebljava kuhan, a lišće svježe ili kuhano kao začin^{151, 163}.

Tablica 8. Prosječni kemijski sastav korijena i lišća peršina

SASTOJCI	KORIJEN	LIŠĆE
Ukupna suha tvar (%)	11,6-36,4	12,5-25,2
Šećeri (%)	0,7-10,1	0,7-3,1
Bjelančevine (%)	1,5-3,2	2,4-4,5
Celuloza (%)	1,3-2,9	1,4-1,7
Mineralne tvari (%)	1,6-1,7	1,7-3,9

Peršin sadrži velike količine vitamina C i vitamina A, a od mineralnih tvari najviše ima kalija, nešto manje kalcija i fosfora. Pored toga, sadrži i veliku količinu eteričnih ulja, koja biljci daju karakterističan miris.

Peršin je dvogodišnja biljka s vretenastim, zadebljanim korijenom, promjera 1,5-3,5cm, žućkaste pokožice i bijele boje mesa, s dosta razvijenim žilicama. Lišće je složeno perasto, glatko ili kovrčasto.

Sorte ove biljke dijele se na sorte koje se uzgajaju zbog korijena i sorte za uzgoj lišća. Od sorti peršina korjenaša najvažnije se sorte *Berlinski poludugi* i *Bardoviški*. Od lisnatih sorti najrašireniji su *Domaći lišćar* i *Non plus ultra*.

Onaj peršin koji se uzgaja zbog korijena namijenjenog za industrijsku preradu sušenjem, vadi se kad je sadržaj suhe tvari u korijenu najveći. Kako bi se iskoristilo i lišće za sušenje, vađenje se najčešće obavlja dvofazno. Lišće peršina se može čuvati na temperaturi 0-1 °C i relativnoj vlažnosti zraka 90-95 % u periodu 1-2 mjeseca, dok se zdravi, neoštećeni i površinski prosušeni korijeni mogu čuvati 4-6 mjeseci¹⁶³⁻¹⁶⁵.

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. ZADATAK

Zadatak istraživanja bio je optimiranje i modeliranje procesa sušenja voća i povrća (marelica, jabuka, mrkva i peršin), na osnovi praćenja kinetike sušenja i pokazatelja očuvanja nutritivnih i organoleptičkih svojstava. Kinetika sušenja odabranih uzoraka voća i povrća determinirana je kontinuiranim praćenjem: promjene mase uzoraka, temperaturnog profila materijala i medija za sušenje, te profila vlage.

Istraživanje je provedeno primjenom termogravimetrijske tehnike u laboratorijskim uređajima, koji su u svrhu ovog istraživanja posebno nadograđeni i opremljeni: tunelski sušionik (TD), vakuum sušionik (VK), infracrveni sušionik (IC), te sušionik za sušenje s fluidiziranim slojem (FBD).

U svrhu ubrzavanja kinetike sušenja, sprečavanja enzimske aktivnosti, kao i neenzimskih promjena tijekom procesa sušenja, primijenjeni su različiti fizikalno- kemijski postupci prethodne obrade uzoraka, te su ovisno o metodi sušenja predložena odgovarajuća rješenja. Za procjenu pojedine metode, te za praćenje utjecaja procesnih parametara na svojstva osušenih uzoraka, primijenjene su standardne analitičke metode: termogravimetrija, rehidracija, kolorimetrija, volumetrija, te tekućinska kromatografija visokog učinka (HPLC).

Za ispitivanje utjecaja temperature na kinetiku sušenja za sva četiri sušionika korišteni su uzorci odabranog voća i povrća istih dimenzija (20x20x5 mm), izuzev uzoraka marelice koji su prethodno kalibrirani na promjer 45 mm, te polovljeni i otkoštice.

Sušenje je provedeno pri temperaturama od 50 °C, 60 °C, 70 °C i 80 °C za uzorke marelice i jabuke; pri temperaturama od 60 °C, 70 °C i 80 °C za uzorke mrkve; te pri temperaturama od 60 °C, 65 °C i 70 °C za uzorke peršina. Brzina strujanja zraka u tunelskom sušioniku bila je podešena na 2,8 m s⁻¹, dok je u sušioniku za sušenje s fluidiziranim slojem bila podešena na 3,5 m s⁻¹. Također, u ovom dijelu ispitivanja provedeno je praćenje promjene boje i volumena, te rehidracijskih svojstava uzoraka za svaku pojedinačnu metodu sušenja. Sva mjerenja su provedena u dva ponavljanja. Ovaj dio istraživanja poslužio je za determiniranje optimalne temperature i metode sušenja odabranog voća i povrća.

Nakon utvrđivanja optimalne temperature sušenja u konvekcijskom tunelskom sušioniku, u drugom dijelu istraživanja provedeno je i ispitivanje različitih fizikalno-kemijskih postupaka prethodne obrade uzoraka. Ovaj dio istraživanja proveden je u tunelskom sušioniku (TD) pri temperaturi 50 °C i brzini strujanja zraka od 2,8 m s⁻¹ za uzorke jabuke, te pri temperaturi 60 °C i brzini strujanja zraka od 2,8 m s⁻¹ za uzorke mrkve i peršina.

Treći dio istraživanja obuhvatio je testiranje postojećih i izradu novih poluempirijskih modela koji opisuju proces sušenja voća i povrća. Testiranje odabranih matematičkih modela provedeno je za sve uzorke voća i povrća (marelica, jabuka, mrkva i peršin) i sve metode sušenja pri zadanim procesnim parametrima. Izrada novih poluempirijskih modela provedena je na uzorcima marelice i jabuke. U tu svrhu su se procesni uvjeti sušenja, temperatura i brzina strujanja zraka mijenjali u širem intervalu mjerenja, kako bi se dobila jasna ovisnost koeficijenta odabranih matematičkih modela. Sušenje uzoraka marelice i jabuke u tunelskom sušioniku provedeno je pri temperaturama sušenja od 50 °C, 60 °C, 70 °C i 80 °C, te brzinama strujanja zraka od 1,4 m s⁻¹; 2,1 m s⁻¹ i 2,8 m s⁻¹.

Također je ispitan utjecaj temperature sušenja i različitih metoda sušenja na sadržaj β-karotena u uzorcima mrkve. Određivanje sadržaja β-karotena u uzorcima svježe i osušene mrkve provedeno je metodom KO-04/95 koja je sukladna metodi HRN EN 12823-2: „Određivanje vitamina A tekućinskom kromatografijom visokog učinka.

3.2. MATERIJALI

Istraživanje je provedeno na uzorcima voća i povrća i to: marelica (*Prunus armeniaca L. var. Panonija*), jabuka (*Malus domestica var. Granny Smith*), mrkva (*Daucus carota L. var. Bolero F1*), peršin (*Petroselinum crispum var. tuberosum Eagle*). Svi uzorci voća i povrća bili su svježi, porijeklom iz jedne šarže poznatog lokalnog dobavljača, te čuvani u hladnjaku na +4 °C. Prije provedbe ispitivanja uzorci su stabilizirani na sobnoj temperaturi.

Za ispitivanje utjecaja temperature na kinetiku sušenja za sva četiri sušionika korišteni su uzorci odabranog voća i povrća istih dimenzija (20x20x5 mm), izuzev uzoraka marelice koji su prethodno kalibrirani na promjer 45 mm, te polovljeni i otkoštice.

3.3. METODE

3.3.1. Termogravimetrijske metode

Termogravimetrijske metode su pogodne za sve termostabilne tvari koje imaju sadržaj vlage veći od 0,1 %. Termogravimetrija je metoda vaganje – sušenje kod koje se uzorak suši do konstantne mase, pri čemu se promjena mase najčešće interpretira kao izravna posljedica gubljenja vlage. Ova metoda je korisna za praćenje procesa kod kojih dolazi do promjene ukupne mase ili pak pojedine komponente uzorka (desorpcija, oslobađanje plinova, apsorpcija vlage). Udio vlage u materijalu nije ekvivalentan samo udjelu vode, već uključuje sve sastojke koji isparavaju tijekom zagrijavanja, što dovodi do gubitka mase uzorka. Gubitak mase se registrira vaganjem uzorka i interpretira se kao sadržaj ili udio vlage u uzorku izražen na ukupnu masu uzorka ili na suhu tvar uzorka. Na ovaj način (sušenjem) ne uočava se razlika između isparavanja vode i drugih lako hlapivih komponenti hrane (alkoholi, organske kiseline i otapala, ulja i sl.).

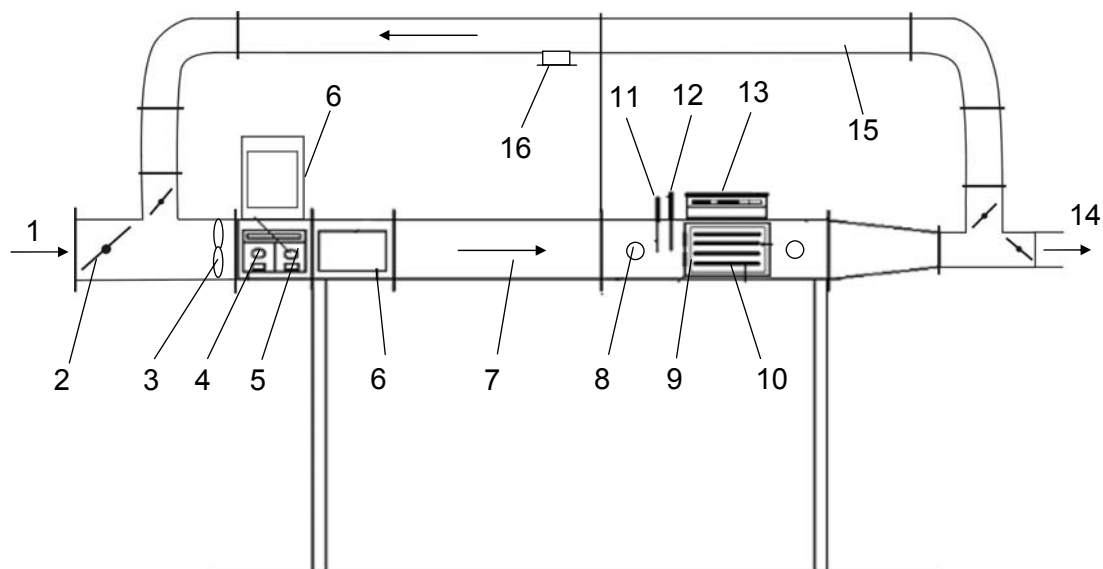
Sušenje je gotovo kada se postigne ravnotežno stanje, odnosno kada je tlak pare na površini tvari jednak parcijalnom tlaku pare u zraku. Što je niži parcijalni tlak pare u okolišu, to je niži ostatak vlage u materijalu prilikom uspostavljanja ravnotežnog stanja. Za termogravimetrijsko određivanje vlage, temperatura i vrijeme sušenja imaju odlučujući utjecaj, dok su atmosferski tlak i vlažnost materijala od sekundarnog značaja.

3.3.2. Uređaji za sušenje

3.3.2.1. Konvekcijski tunelski sušionik

Sušionik se sastoji iz tunela unutar kojeg su smješteni ventilator, grijači, nosači s pliticama za uzorke i recirkulacijskog cjevovoda sa zaklopkama. Zrak za sušenje se zagrijava pomoću četiri grijača smještena na stražnjem dijelu sušionika. Ispred grijača je postavljen aksijalni ventilator koji tjera zrak preko grijača, a potom i preko uzorka. Snaga grijača i brzina strujanja zraka regulirana je pomoću dva potenciometra postavljena na kontrolnoj ploči s vanjske strane sušionika. Brzina strujanja zraka mjerena je digitalnim anemometrom na izlazu iz sušionika. Prethodno pripremljeni uzorci (oko 100 g) postavljani su na plitice, koje su povezane s nosačem u sušioniku. Nosač je preko ovjesa povezan s vagom na sušioniku, koja je kontinuirano mjerila promjenu mase uzorka tijekom sušenja. U uzorke su na različitim pozicijama postavljana tri termopara tipa T, koja su mjerila temperaturu u sušenim uzorcima. Termoparovi su bili spojeni s računalom, koje je kontinuirano bilježilo podatke u zadanom vremenu. Temperatura i vlažnost zraka za sušenje kontinuirano su mjereni pomoću dvije sonde uređaja "Testo 350". U cilju uštede energije i sigurnosti pri radu tunelski sušionik je dodatno izoliran slojem staklene vune i Al-lima. Proračun je proveden algoritmom koji je pružio optimalni izbor debljine izolacijskog sloja za temperaturni režim koji je tretirao sušionik kao tri temperaturne zone. Postavljanjem toplinske izolacije ostvareno je značajno smanjenje toplinskih gubitaka i to za 55,73 % u odnosu na neizolirani sušionik. Temperatura vanjskog sloja izolacije pri radu s najvišim radnim temperaturama bila je ispod 32 °C. U tom pogledu dobiveni rezultati su također zadovoljavajući budući da je temperaturni prag boli oko 40 °C. S ciljem energetske ekonomije projektiran je i postavljen recirkulacijski cjevovod kojim se dio toplog zraka može vraćati na ulaz sušionika. Udio recirkuliranog zraka u glavnoj masi toplog zraka regulira se sustavom zaklopki.

Sušionik je dodatno opremljen sustavom za automatsku regulaciju temperature zraka, višekanalnim sustavom termoparova, digitalnim mjeračem vlažnosti zraka i temperature, računalom i programskom podrškom vlastite izrade.



Slika 3. Shematski prikaz konvekcijskog tunelskog sušionika (TD)

1– ulaz zraka; 2 – zaklopka; 3 – ventilator; 4 – regulator temperature; 5 – regulator ventilatora; 6 – grijači; 7– tunel; 8 – mjerni otvor; 9 – vrata; 10 – plitice; 11 – temperaturna sonda; 12 – sonda za mjerenje vlažnosti; 13 – digitalna vaga; 14 – izlaz zraka; 15 – recirkulacijski cjevovod

3.3.2.2. Sušionik s fluidiziranim slojem

Sušionik s fluidiziranim slojem (Fluid bed dryer 2000, Endecotts) je kompaktan laboratorijski sušionik. Sastoji se iz baze sušionika s regulacijom na koju se postavljaju različiti tipovi kolona izrađenih od nehrđajućeg čelika ili stakla. Ventilator propuhuje velik volumen zraka preko grijača iz baze fluidizatora u kolonu za fluidizaciju. Zagrijani zrak prolazi kroz difuznu gazu koja podržava fluidizaciju i raspoređuje zrak prilikom njegovog ulaska u kolonu. Specijalna filter vrećica na vrhu kolone zadržava uzorak; dok zrak, vlaga i plinovi izlaze van. Opsežan izbor kontrola čini ga idealnim za rad u laboratoriju i sa širokim izborom materijala.

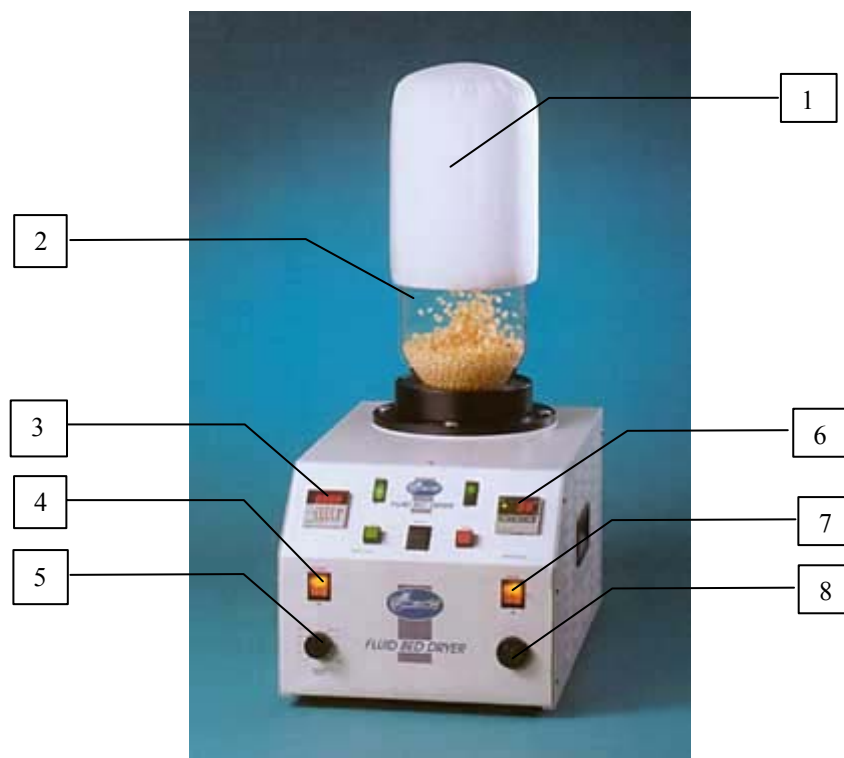
Max. težina uzorka: 5 kg

Određena voltaža: 110 V ili 240 V; 50 Hz ili 60 Hz

Potrošnja energije: 2,6 kW

Dimenzije: 260 x 320 x 505mm

Težina: 19 kg



Slika 4. Sušionik za sušenje s fluidiziranim slojem

1– filter vrećica; 2 – kolona; 3 – prikaz vremena; 4 – prekidač ventilatora; 5 – regulator brzine ventilatora; 6– prikaz temperature; 7 – prekidač grijača; 8 – temperaturni regulator

Prije svakog mjerenja sušionik je bio uključen, te je podešavana željena brzina strujanja zraka ($3,5 \text{ m s}^{-1}$), a zatim i željena temperatura (od $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ do $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Nakon stabilizacije zadanih uvjeta prethodno pripremljeni uzorci (oko 60 g) stavljeni su u kolonu koja se zatvarala filter vrećicom. Promjena mase uzorka praćena je diskontinuirano svakih 5 minuta pomoću digitalne vage.

3.3.2.3. Vakuum sušionik

Vakuum sušionik (VS-50 SC) namijenjen je za sušenje materijala osjetljivih na povišenu temperaturu. Sušionik se sastoji iz dobro izolirane vakuumske komore unutar koje su smještene grijane police. S komorom je povezana uljna vakuumpumpa, a razina ostvarenog podtlaka u sušioniku se regulira sustavom: analognog vakuometra, ventila i oduška. Tijekom istraživanja podtlak u komori za sušenje održavan je na 15 kPa i 40 kPa. Temperatura stijenki vakuumske komore i police regulirana je pomoću digitalnog pokazivača smještenog na prednjoj strani sušionika. U sušionik je postavljena vaga (mehanički dio) koja je preko dobro brtvljenih konektora povezana s drugom vagom (elektronski dio) smještenom izvan sušionika. Na taj način je otklonjen utjecaj temperature na električne dijelove vage. Vakuumska komora je također opremljena termoparom za mjerenje temperature u komori, te s tri termopara tipa T, za mjerenje temperature u sušenim uzorcima. Primjenom vakuuma unutar komore sušionika omogućuje se znatno snižavanje temperature vrelišta tekućine unutar materijala. Također je smanjena mogućnost oksidacije sušenog materijala.



Slika 5. Vakuum sušionik (VS-50 SC)

3.3.2.4. Uređaj za analizu vlage

Uređaj za analizu vlage (HR 73 METTLER TOLEDO) se sastoji od halogenog grijača, koji emitirajući IC zrake suši ispitivani uzorak; osjetljive vage koja kontinuirano mjeri masu uzoraka i zaslona na kojem se nalaze kontrole i prikazuju svi parametri sušenja. Grijač se sastoji od staklene cijevi ispunjene inertnim halogenim plinom koji se zagrijava pomoću Wolframove niti. Dimenzije halogenog grijača su male, a za razliku od običnih IC grijača, puna se snaga zagrijavanja postiže za vrlo kratko vrijeme. Toplinsko zračenje je optimalno i jednoliko raspoređeno po cijeloj površini uzorka. Za provedbu sušenja je korišten brzi program sušenja (*rapid drying program*), pogodan za tvari sa sadržajem vlage iznad 30 %. Ovakvim programom sušenja energija zračenja je tolika da premaši zadanu vrijednost temperature za 40 % u prve tri minute procesa sušenja. Pri tome dolazi do brzog nadomještanja oslobođenja topline isparavanja i značajnog ubrzavanja procesa sušenja. Temperatura u uzorcima mjerena je kontinuirano pomoću tri termopara tipa T. Termoparovi su spojeni s računalom (preko A/D konvertera) koje kontinuirano bilježi podatke u zadanom vremenu.



Slika 6. Uređaj za analizu vlage HR 73 MT

Tehničke karakteristike uređaja HR 73:

- temperaturni raspon	50 - 200 °C
- programi sušenja	4
- minimalna masa uzorka	0,1g
- maksimalna masa uzorka	71g
- čitljivost rezultata	0,01% (1mg)
- ponovljivost (s 10 g uzorka)	± 0,2 %
- ponovljivost (s 2 g uzorka)	± 0,1%

3.3.3. Određivanje apsolutno suhe tvari

Određivanje apsolutno suhe tvari provedeno je sušenjem u vakuum sušioniku pri temperaturi 70 °C i podtlaku 30 mbar, tijekom 24 sata¹⁶⁷.

Apsolutno suha tvar se koristi kod izračunavanja vlažnosti uzoraka po slijedećoj formuli:

$$X = \frac{m_{uz} - m_{s.tv.}}{m_{s.tv.}} \quad (17)$$

3.3.4. Određivanje boje

Budući je boja jedan od bitnih pokazatelja kvalitete proizvoda i kod osušenog proizvoda se postavljaju određeni zahtjevi u pogledu boje. Ona mora biti specifična, intenzivna i ujednačena. Svijetla boja bez sjaja ili promijenjena boja predstavljaju nedostatke kvalitete proizvoda.

Da bi se u potpunosti definirala boja mora se odrediti:

- vrsta boje: crvena, plava, zelena, žuta; u ovisnosti o prevladavajućoj valnoj duljini,
- zasićenost boje, tj. kroma koja predstavlja intenzitet boje; te
- reflektiranu ili apsorbiranu svjetlost. Ako se u jednakoj mjeri reflektiraju sva valna područja bijele, tj. sunčeve svjetlosti, tada nam se predmet čini bijel. Ako se u potpunosti apsorbira sunčeva svjetlost, to rezultira crnom bojom predmeta^{167,168}.

Mjerenja boje uzoraka provedena su pomoću kromametra Minolta CR-300 i CR 400. Ovakav tip kromametra mjeri reflektiranu svjetlost s površine predmeta. Predmet se postavlja na otvor mjerne glave promjera 8 mm. U otvoru se nalazi ksenonska lučna svjetiljka, koja pulsiranjem baca svjetlost okomitu na površinu predmeta. Svjetlost se reflektira, a takvu svjetlost mjeri šest jako osjetljivih silikonskih fotoćelija. Podatke zapisuje računalo i izražava ih u pet različitih sustava (X, Y, Z; Yxy; Lab; LCH; Hunter Lab).

U radu je korišten *Lab* sustav, koji daje približne vrijednosti kao i ljudsko oko.

L^* - vrijednosti daju ocjenu je li nešto tamno ili svijetlo. Ako je $L^* = 0$, tada je predmet crn, a ako je $L^* = 100$, tada je bijel.

a^* - vrijednost može biti pozitivna ili negativna. Ako je pozitivna, tada je rezultat crvena boja; a ako je negativna, rezultat je zelena boja.

b^* - vrijednost može, također biti pozitivna ili negativna. Ako je pozitivna, rezultat je žuta boja; a ako je negativna, rezultat je plava boja.

U ovom eksperimentalnom radu su praćene a^* , b^* i L^* vrijednosti svježih i osušenih uzoraka^{169,170}.

Ukupna promjena boje (ΔE) je izračunata po formuli:

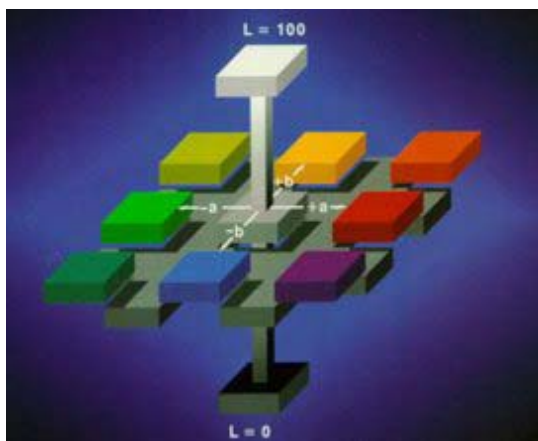
$$\Delta E = \sqrt{\left[\left(\Delta L^* \right)^2 + \left(\Delta a^* \right)^2 + \left(\Delta b^* \right)^2 \right]} \quad (18)$$

te kao promjena boje (C^*_{ab})¹⁷¹:

$$C^*_{ab} = \sqrt{\left[\left(\Delta a^* \right)^2 + \left(\Delta b^* \right)^2 \right]} \quad (19)$$



Slika 7. Uredaj za mjerenje boje «CR 400 Konica Minolta»



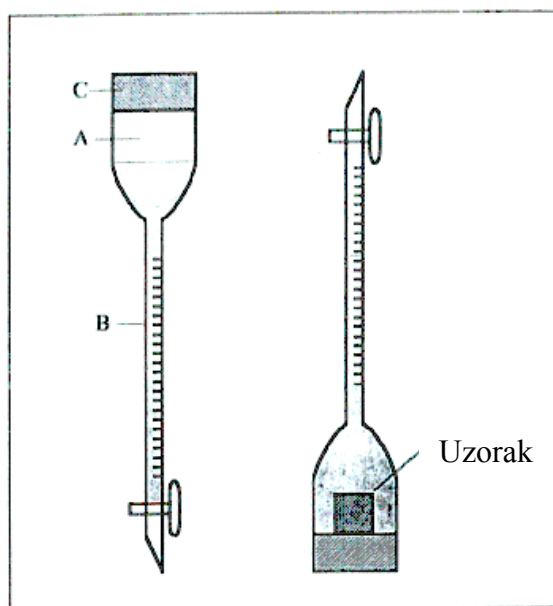
Slika 8. Ilustracija L^*a^*b sustava za praćenje boje površine uzoraka

3.3.5. Mjerenje promjene volumena tvari pri sušenju

Mjerenje promjene volumena je također jedan od pokazatelja kvalitete osušenih proizvoda. U ovom radu mjerenje promjene volumena provedeno je instrumentom vlastite izrade, pri čemu je korišteni n-heptan (C_7H_{16}) upotrijebljen kao tekućina čiji se istisnuti volumen očitava na graduiranom dijelu uređaja. Optimalna količina n-heptana za mjerenje bila je 4-5 ml, a mjerenje je provedeno prije i nakon sušenja uzoraka. Volumen je mjeren na 5 uzoraka od svakog pojedinačnog mjerenja, te je izražen kao aritmetička sredina.

Postotak skupljanja uzoraka izračunavan je na slijedeći način:

$$\% \text{ skupljanja} = \frac{V_0 - V_1}{V_0} \cdot 100 \quad (20)$$



Slika 9. Uredaj za mjerenje volumena

3.3.6. Provedba rehidracije

Za provedbu rehidracije je korištena standardna metoda, koja je opće prihvaćena u laboratorijskim istraživanjima. U laboratorijsku čašu od 250 ml se odvaži $3 \pm 0,1$ g osušenog uzorka. Zatim se doda 150 ml destilirane vode, pokrije satnim staklom i zagrijava do vrenja unutar 3 minute. Kuhanje se provodi 10 minuta, uz blago vrenje, nakon čega se prekine zagrijavanje i vrši hlađenje sadržaja u čaši. Kad se sadržaj ohladi, prenese se na Büchnerov lijevak. Cijeđenje se provodi 5 minuta pri slabom vakuumu. Nakon toga se sadržaj lijevka prenese na čisto satno staklo i izvaži.

Iz dobivenih podataka izračuna se rehidrationski omjer (RO) po slijedećoj formuli:

$$RO = \frac{\text{masa ocijeđenog rehidratiranog uzorka}}{\text{masa suhog materijala}} \quad (21)$$

3.3.7. Mjerenje temperature i relativne vlažnosti

Mjerenje temperature provedeno je pomoću uređaja: «Testo 635», «Testo 350», te višekanalnog sustava termoparova povezanog s računalom.

Temperatura i relativne vlažnost zraka za sušenje kontinuirano su mjerene pomoću dvije sonde uređaja "Testo 350", te kontrolno s uređajem «Testo 635». Za uređaj «Testo 350» korištena je programska podrška «Testo Comfort - Software Light». Kontrolno mjerenje temperature i relativne vlažnosti zraka provedeno je pomoću uređaja «Testo 635».

U uzorke su na različitim pozicijama postavljena tri termopara tipa T, promjera 0,0254 cm, koja mjere temperaturu u sušenim uzorcima. Termoparovi su spojeni s računalom koje je kontinuirano bilježilo podatke u zadanom vremenu. Višekanalni sustav termoparova, povezan je s računalom preko A/D konvertera «Pico ADC 16», te je uz programsku podršku «Pico Log Recorder» kontinuirano praćena temperatura u sušenim uzorcima.

3.3.8. Određivanje β – karotena

Određivanje sadržaja β -karotena u uzorcima svježe i sušene mrkve provedeno je metodom KO-04/95 koja je sukladna metodi HRN EN 12823-2: „Određivanje vitamina A tekućinskom kromatografijom visokog učinka – 2 dio: Mjerenje β -karotena (EN 12823-2:2000)“.

3.3.8.1. Ekstrakcija

Ekstrakcija je provedena na svježim i osušenim uzorcima mrkve. Uzorci su prethodno usitnjeni i homogenizirani na laboratorijskom mlinu. 5 g svježeg ili 2 g osušenog usitnjenog uzoraka je u više navrata ekstrahirano sa 150 ml n-heksana (ukupno 5 ispiranja). Ekstrakcija je provedena uz ultrazvučno i mehaničko miješanje u digestoru tijekom 15 minuta. Objedinjeni ekstrakt je ispran s 5 x 150 mL destilirane vode. Tako dobiveni ekstrakt uparivan je na rotirajućem uparivaču pri temperaturi 40 °C i podtlaku 120 mbar. Upareni ostatak je otopljen u 5 ml mobilne faze, te profiltriran kroz 0,45 μ m filter u otvor za kromatografsku analizu.

3.3.8.2. Priprema otopine standarda

Približno 30 mg standardnog uzoraka β – karotena (Fluka) otopljeno je u 20 ml diklormetana, te je 30 s miješano u ultrazvučnoj kupelji. Dobivena otopina razrijeđena je u n-heksanu do 100 ml. 1 ml tako priređene otopine razrijeđen je s n-heksanom do 100 ml. 1 ml standardne otopine sadržava približno 3 μg β – karotena u n-heksanu.

20 ml otopine standarda uparivano je na rotirajućem uparivaču pri temperaturi 40 °C i podtlaku 120 mbar. Ostatak je razrijeđen u 20 ml otapala kompatibilnog s reverznom fazom HPLC (acetonitril+metanol 85:15 (v/v) + 40 ml diklormetana/1 l smjese ACN/MeOH).

Razrijeđenja standardnih otopina pripremljena su u koncentracijama od 0,6 do 12 $\mu\text{g ml}^{-1}$. Provedena je kromatografska analiza ovako priređenih otopina, a iz površine dobivenih «pikova» i masenih koncentracija β – karotena nacrtani su baždarni pravci i izračunate pripadajuće jednadžbe pravca.

3.3.8.3. Kromatografska analiza – metoda vanjskog standarda

Prije provođenja kromatografske analize manja količina uzorka je profiltrirana kroz 0,45 μm filtar za organska otapala, a injektirano je 20 μl uzorka.

Kromatografski uvjeti

Kolona:	Phenomenex Luna 5u C18 100A 250 x 4,60 mm
Mobilna faza:	(CH ₃ CN + MeOH + DCM) (85 + 15 + 40 ml DCM/1 l)
Protok:	0-6,0 min: 1-1,8 ml min ⁻¹ 6,0-20 min: 1,8-2,0 ml min ⁻¹ 20-30 min: 2,0 ml min ⁻¹
Detekcija:	450 nm
Temperatura:	50 °C
Vrijeme trajanja:	30 min
Injektirani volumen:	20 μl
Vrijeme uravnoteženja kolone:	5 min

3.3.8.4. Identifikacija i kvantifikacija β – karotena

Identifikacija β – karotena provedena je usporedbom vremena zadržavanja razdvojenih spojeva s vremenom zadržavanja standarda, te usporedbom UV – spektra. Kvantitativne vrijednosti izračunate su iz jednadžbi baždarnih pravaca standardnih otopina, koje predstavljaju ovisnost površine pika i masene koncentracije spoja. Dobivene masene koncentracije (mg ml^{-1}) preračunate su na masu svježeg uzorka i masu suhe tvari.

Mjerenje je provedeno na HPLC-u Varian opremljenom sa:

- dvije binarne pumpe tipa ProStar 210
- ProStar 345 UV-Vis detektorom
- ProStar 363 fluorescentnim detektorom
- ProStar 410 AutoSampler.



Slika10. Prikaz sustava za provedbu tekućinske kromatografije visokog učinka

3.3.9. POSTUPCI PRETHODNE OBRADJE UZORAKA

Prije provedbe procesa sušenja na tunelskom sušioniku odabrani uzorci voća i povrća sušeni su kao neobrađeni i kao prethodno obrađeni različitim fizikalno-kemijskim metodama i to:

1. Za uzorke marelica provedena je prethodna obrada 0,5 % - tnom otopinom $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ tijekom 10 minuta. Sva daljnja istraživanja provedena su samo na prethodno obrađenim uzorcima marelice.
2. Za uzorke jabuke provedeno je blanširanje u vreloj vodi temperature 90 °C tijekom 3 minute, blanširanje u vodenoj pari tijekom 3 minute, blanširanje u 0,6 %-tnoj vodenoj otopini CaCl_2 temperature 90 °C tijekom 1 minute, zamrzavanje pri temperaturi -18 °C tijekom 24 sata, te uranjanje u 1 %-tnu otopinu askorbinske kiseline tijekom 3 minute. Istraživanja na uzorcima jabuke provedena su i na prethodno obrađenim i na neobrađenim (netretiranim) uzorcima.
3. Za uzorke mrkve provedena je prethodna obrada i to: blanširanje u vreloj vodi temperature 85 °C tijekom 3 minute, zamrzavanje pri temperaturi -18 °C tijekom 24 sata, uranjanje u 1 %-tnu otopinu askorbinske kiseline tijekom 3 minute; uranjanje u 1 %-tnu otopinu CaCl_2 i 1 %-tnu otopinu askorbinske kiseline tijekom 3 minute; te uranjanje u 2,5 %-tnu otopinu škroba tijekom 5 minuta. Istraživanja na uzorcima mrkve provedena su i na prethodno obrađenim i na neobrađenim (netretiranim) uzorcima.
4. Za uzorke peršina provedeni su različiti načini prethodne obrade i to: blanširanje u vreloj vodi temperature 80 °C tijekom 3 minute, zamrzavanje pri temperaturi -18 °C tijekom 24 sata, uranjanje u 1,5 %-tnu otopinu askorbinske kiseline tijekom 3 minute; uranjanje u 2 %-tnu otopinu CaCl_2 i 1,5 %-tnu otopinu askorbinske kiseline tijekom 3 minute, te uranjanje u 2,5 %-tnu otopinu škroba tijekom 5 minuta. Istraživanja na uzorcima peršina provedena su i na prethodno obrađenim i na neobrađenim (netretiranim) uzorcima.

4. REZULTATI

Za matematičko modeliranje i aproksimaciju eksperimentalnih podataka detaljno je ispitano šest matematičkih modela (jednadžbe tankog sloja) navedenih u tablici 9. Matematički modeli koji su pokazali najbolje slaganje s eksperimentalnim podacima promjene vlažnosti poslužili su za daljnju izradu novih poluempirijskih modela kinetike sušenja odabranih uzoraka voća i povrća.

Tablica 9. Jednadžbe tankog sloja

NAZIV MODELA	MATEMATIČKI IZRAZ
NEWTON	$X = e^{-k \cdot t}$
PAGE	$X = e^{-k \cdot t^n}$
HANDERSON I PABIS	$X = a \cdot e^{-k \cdot t}$
LOGARITAMSKI	$X = a \cdot e^{-k \cdot t} + c$
APROKSIMACIJA DIFUZIJE	$X = a \cdot e^{-k \cdot t} + (1 - a) \cdot e^{-k \cdot b \cdot t}$
MIDILLI I KUCUK	$X = a \cdot e^{-k \cdot t^n} + b \cdot t$

Parametri sušenja, koeficijenti i konstante, u navedenim matematičkim modelima određeni su metodom nelinearne regresije korištenjem programa Statistica 6.0.

Kao pokazatelji uspješnosti aproksimacije eksperimentalnih podataka za svaki odabrani model korišteni su: indeks korelacije (R), srednje odstupanje podataka (MBE), srednje kvadratno odstupanje (RMSE), reducirani hi-kvadrat (χ^2) i t-test.

Indeks korelacije računa se po formuli:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_i(t) - X_{i,\text{eksp.}}(t))^2}{\sum_{i=1}^N (\bar{X}_{\text{eksp.}} - X_{i,\text{eksp.}}(t))^2}} \quad (22)$$

gdje je: $X_{\text{eksp.}}$ srednja vrijednost mjerenih podataka $X_{i,\text{eksp.}}(t)$:

$$\bar{X}_{\text{eksp.}} = \frac{\sum_{i=1}^N X_{i,\text{eksp.}}(t)}{N} \quad (23)$$

Srednje odstupanje podataka (MBE):

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{i,\text{pred.}}(t) - X_{i,\text{eks.}}(t)) \quad (24)$$

Kao pokazatelj uspješnosti se može koristiti i **srednje kvadratno odstupanje (RMSE)** koje se izračunava prema formuli:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{i,\text{pred.}}(t) - X_{i,\text{eks.}}(t))^2}{N}} \quad (25)$$

Reducirani hi-kvadrat (χ^2):

Ovaj test se koristi za ispitivanje nezavisnosti dvije varijable ili faktora, slučajnosti, te dobrote (kvalitete) prilagodbe. Matematičko-statistička usporedba koristi testiranje eksperimentalne i teorijske krivulje pomoću χ^2 testa, a svrha usporedbe je zaključke teorijske krivulje distribucije prenijeti na eksperimentalne podatke. Kad ne bi bilo razlike između opaženih i očekivanih frekvencija izraz χ^2 bio bi jednak nuli. Što su razlike opaženih i očekivanih frekvencija veće to je i izraz χ^2 veći. Prema tome što je χ^2 manji (bliže nuli) to je vjerojatnost da treba prihvatiti postavljenu “nul” hipotezu veća i obrnuto.

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i(t) - X_{i,\text{eksp.}}(t))^2}{N - n} \quad (26)$$

Studentov t-test (t- stat):

$$t - \text{stat} = \sqrt{\frac{(n-1)MBE^2}{RMSE^2 - MBE^2}} \quad (27)$$

4.1. TABLIČNI PRIKAZ REZULTATA MATEMATIČKOG MODELIRANJA

Tablica 10. Prikaz rezultata statističke analize odabranih matematičkih modela za uzorke marelice sušene u tunelskom sušioniku (TD) pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od $1,4 \text{ m s}^{-1}$

$T_{(\text{sušenja})} = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$					
NAZIV MODELA	R	MBE	RMSE	χ^2	t-stat
NEWTON	0,9986	0,002123	0,046081	0,000152	0,587134
PAGE	0,9996	0,000704	0,026527	0,000040	0,337757
HANDERSON I PABIS	0,9995	-0,000274	0,016548	0,000056	0,210657
LOGARITAMSKI	0,9995	0,000054	0,007338	0,000054	0,093399
APROKSIMACIJA DIFUZIJE	0,9986	0,000969	0,031130	0,000155	0,396414
MIDILLI I KUCUK	0,9999	-0,000023	0,004837	0,000002	0,061567

$T_{(\text{sušenja})} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$					
NAZIV MODELA	R	MBE	RMSE	χ^2	t-stat
NEWTON	0,99562	0,002275	0,047697	0,000675	0,523092
PAGE	0,99882	0,003585	0,059875	0,000184	0,657080
HANDERSON I PABIS	0,99676	0,005132	0,071639	0,000504	0,786784
LOGARITAMSKI	0,99992	-0,000084	0,009184	0,000013	0,100615
APROKSIMACIJA DIFUZIJE	0,99562	0,002275	0,047697	0,000686	0,523092
MIDILLI I KUCUK	0,99993	0,000069	0,008320	0,000010	0,091149

$T_{(\text{sušenja})} = 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$					
NAZIV MODELA	R	MBE	RMSE	χ^2	t-stat
NEWTON	0,9961	0,002242	0,047348	0,000620	0,444662
PAGE	0,9993	0,002665	0,051624	0,000110	0,484918
HANDERSON I PABIS	0,9930	0,004918	0,070127	0,000438	0,659475
LOGARITAMSKI	0,9996	-0,000023	0,004791	0,000064	0,162999
APROKSIMACIJA DIFUZIJE	0,9961	0,001979	0,044485	0,000634	0,417717
MIDILLI I KUCUK	0,9998	0,000302	0,017373	0,000041	0,044940

$T_{(\text{sušenja})} = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$					
NAZIV MODELA	R	MBE	RMSE	χ^2	t-stat
NEWTON	0,9892	0,001171	0,034227	0,001846	0,276106
PAGE	0,9987	0,004307	0,065628	0,000233	0,530250
HANDERSON I PABIS	0,9930	0,007335	0,085645	0,001229	0,693036
LOGARITAMSKI	0,9996	0,000041	0,006372	0,000078	0,110477
APROKSIMACIJA DIFUZIJE	0,9987	0,003818	0,061786	0,000239	0,499090
MIDILLI I KUCUK	0,9998	0,000188	0,013698	0,000033	0,051370

Tablica 11. Prikaz rezultata statističke analize odabranih matematičkih modela za uzorke jabuke sušene u tunelskom sušioniku (TD) pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od $2,8 \text{ m s}^{-1}$

$T_{(\text{sušenja})} = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$					
NAZIV MODELA	R	MBE	RMSE	χ^2	t-stat
NEWTON	0,9848	0,003026	0,055005	0,002862	0,4509
PAGE	0,9989	0,004742	0,068862	0,000213	0,5650
HANDERSON I PABIS	0,9905	0,010641	0,103156	0,001817	0,8489
LOGARITAMSKI	0,9983	0,000087	0,003949	0,000340	0,0323
APROKSIMACIJA DIFUZIJE	0,9985	0,005701	0,075502	0,000298	0,6198
MIDILLI I KUCUK	0,9996	0,000015	0,009326	0,000075	0,0163
$T_{(\text{sušenja})} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$					
NAZIV MODELA	R	MBE	RMSE	χ^2	t-stat
NEWTON	0,9986	0,003025	0,054997	0,000211	0,4575
PAGE	0,9995	0,002267	0,047618	0,000070	0,3960
HANDERSON I PABIS	0,9990	0,004015	0,063367	0,000162	0,5274
LOGARITAMSKI	0,9995	0,000070	0,008387	0,000029	0,0697
APROKSIMACIJA DIFUZIJE	0,9996	0,001360	0,036878	0,000050	0,3065
MIDILLI I KUCUK	0,9998	0,000003	0,001633	0,000027	0,0136
$T_{(\text{sušenja})} = 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$					
NAZIV MODELA	R	MBE	RMSE	χ^2	t-stat
NEWTON	0,9968	0,004600	0,067826	0,000520	0,4661
PAGE	0,9989	0,004067	0,063777	0,000190	0,4381
HANDERSON I PABIS	0,9973	0,006161	0,078495	0,000448	0,5398
LOGARITAMSKI	0,9995	-0,000002	0,001502	0,000080	0,0103
APROKSIMACIJA DIFUZIJE	0,9991	0,003331	0,057719	0,000146	0,3964
MIDILLI I KUCUK	0,9996	0,000082	0,009055	0,000075	0,0621
$T_{(\text{sušenja})} = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$					
NAZIV MODELA	R	MBE	RMSE	χ^2	t-stat
NEWTON	0,9949	0,003688	0,060725	0,000885	0,3599
PAGE	0,9990	0,003584	0,059870	0,000173	0,3548
HANDERSON I PABIS	0,9962	0,006780	0,082339	0,000678	0,4888
LOGARITAMSKI	0,9993	-0,000005	0,002279	0,000130	0,0135
APROKSIMACIJA DIFUZIJE	0,9992	0,003262	0,057117	0,000140	0,3385
MIDILLI I KUCUK	0,9996	0,000071	0,008432	0,000081	0,0499

Tablica 12. Prikaz rezultata statističke analize odabranih matematičkih modela za uzorke jabuke sušene u sušioniku s fluidiziranim slojem (FBD) pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od $3,5 \text{ m s}^{-1}$

$T_{(\text{sušenja})} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$					
NAZIV MODELA	R	MBE	RMSE	χ^2	t-stat
NEWTON	0,99618	0,003454	0,058774	0,000727	0,228
PAGE	0,99915	0,003401	0,058316	0,000174	0,226
HANDERSON I PABIS	0,99691	0,006367	0,079797	0,000632	0,310
LOGARITAMSKI	0,99990	-0,000003	0,000508	0,000023	0,002
APROKSIMACIJA DIFUZIJE	0,99933	0,002853	0,053413	0,000149	0,207
MIDILLI I KUCUK	0,99987	0,000019	0,004349	0,000030	0,017
$T_{(\text{sušenja})} = 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$					
NAZIV MODELA	R	MBE	RMSE	χ^2	t-stat
NEWTON	0,99811	0,003902	0,062465	0,000359	0,226
PAGE	0,99900	-0,054323	0,233074	0,005067	0,864
HANDERSON I PABIS	0,99822	0,005004	0,070737	0,000365	0,256
LOGARITAMSKI	0,99979	-0,000003	0,001601	0,000047	0,006
APROKSIMACIJA DIFUZIJE	0,99923	0,002901	0,053860	0,000172	0,194
MIDILLI I KUCUK	0,99976	0,000045	0,006739	0,000058	0,024
$T_{(\text{sušenja})} = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$					
NAZIV MODELA	R	MBE	RMSE	χ^2	t-stat
NEWTON	0,9977	0,004620	0,067968	0,000461	0,215
PAGE	0,9995	0,004250	0,065195	0,000358	0,207
HANDERSON I PABIS	0,9990	0,005392	0,073431	0,000502	0,233
LOGARITAMSKI	0,9998	-0,000003	0,001660	0,000101	0,005
APROKSIMACIJA DIFUZIJE	0,9997	0,003724	0,061022	0,000333	0,193
MIDILLI I KUCUK	0,9998	0,002861	0,053491	0,000127	0,169

Tablica 13. Prikaz rezultata statističke analize odabranih matematičkih modela za infracrveno sušenje mrkve (IC) pri različitim temperaturama sušenja

T _(sušenja) = 60 °C					
NAZIV MODELA	R	MBE	RMSE	χ^2	t-stat
NEWTON	0,9810	-0,000499	0,022333	0,003467	0,181
PAGE	0,9983	0,005090	0,071347	0,000316	0,581
HANDERSON I PABIS	0,9880	0,009257	0,096215	0,002229	0,785
LOGARITAMSKI	0,9993	0,000001	0,001130	0,000133	0,009
APROKSIMACIJA DIFUZIJE	0,9977	0,006174	0,078575	0,000445	0,640
MIDILLI I KUCUK	0,9999	0,000089	0,009425	0,000025	0,077
T _(sušenja) = 70 °C					
NAZIV MODELA	R	MBE	RMSE	χ^2	t-stat
NEWTON	0,9753	-0,002196	0,046862	0,004604	0,332
PAGE	0,9975	0,006277	0,079227	0,000481	0,562
HANDERSON I PABIS	0,9838	0,009685	0,098411	0,003094	0,699
LOGARITAMSKI	0,9994	-0,000043	0,006551	0,000124	0,046
APROKSIMACIJA DIFUZIJE	0,9963	0,007783	0,088221	0,000737	0,626
MIDILLI I KUCUK	0,9999	0,000114	0,010695	0,000026	0,076
T _(sušenja) = 80 °C					
NAZIV MODELA	R	MBE	RMSE	χ^2	t-stat
NEWTON	0,9768	-0,001901	0,043601	0,004412	0,276
PAGE	0,9980	0,005574	0,074657	0,000391	0,473
HANDERSON I PABIS	0,9850	0,009770	0,098845	0,002938	0,628
LOGARITAMSKI	0,9992	0,000034	0,005825	0,000154	0,037
APROKSIMACIJA DIFUZIJE	0,9969	0,006138	0,078347	0,000621	0,497
MIDILLI I KUCUK	0,9999	0,000049	0,007005	0,000023	0,044

Tablica 14. Prikaz rezultata statističke analize odabranih matematičkih modela za vakuum sušenje peršina (VS) pri različitim temperaturama sušenja

$T_{(\text{sušenja})} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$					
NAZIV MODELA	R	MBE	RMSE	χ^2	t-stat
NEWTON	0,97831	-0,002064	0,045429	0,003743	0,419
PAGE	0,99728	0,006197	0,078719	0,000479	0,728
HANDERSON I PABIS	0,98538	0,008185	0,090473	0,002563	0,838
LOGARITAMSKI	0,99959	-0,000030	0,005459	0,000074	0,050
APROKSIMACIJA DIFUZIJE	0,99646	0,004647	0,068165	0,000633	0,630
MIDILLI I KUCUK	0,99988	-0,000001	0,000875	0,000021	0,008

$T_{(\text{sušenja})} = 65\text{ }^{\circ}\text{C}$					
NAZIV MODELA	R	MBE	RMSE	χ^2	t-stat
NEWTON	0,97833	-0,003085	0,055545	0,003804	0,472
PAGE	0,99812	0,005098	0,071399	0,000339	0,607
HANDERSON I PABIS	0,98640	0,008040	0,089667	0,002431	0,764
LOGARITAMSKI	0,99955	-0,000016	0,004045	0,000082	0,034
APROKSIMACIJA DIFUZIJE	0,99733	0,007386	0,085942	0,000493	0,732
MIDILLI I KUCUK	0,99997	-0,000013	0,003547	0,000006	0,030

$T_{(\text{sušenja})} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$					
NAZIV MODELA	R	MBE	RMSE	χ^2	t-stat
NEWTON	0,97191	-0,003812	0,061738	0,005030	0,495
PAGE	0,99698	0,006488	0,080549	0,000556	0,646
HANDERSON I PABIS	0,98122	0,008911	0,094399	0,003431	0,759
LOGARITAMSKI	0,99953	0,000917	0,030283	0,000089	0,242
APROKSIMACIJA DIFUZIJE	0,99542	0,006678	0,081718	0,000857	0,656
MIDILLI I KUCUK	0,99995	0,000057	0,007552	0,000009	0,060

Iz tabličnog prikaza statističke analize odabranih matematičkih modela (tablice 10-13) vidljivo je da za većinu ispitanih uzoraka i metoda (tehnika) sušenja najbolje slaganje s eksperimentalnim podacima daju *Midilli-Kucukov* četvero-parametarski matematički model:

$$X'(t) = a \cdot e^{-k \cdot t^n} + b \cdot t \quad (28)$$

te logaritamski model:

$$X'(t) = a \cdot e^{-k \cdot t} + c \quad (29)$$

$$X'(t) = \frac{X(t)}{X_0} \quad (30)$$

gdje je: $X'(t)$ bezdimenzionalna vlažnost, k i n su parametri (koeficijenti), a i b konstante sušenja u jednadžbi (28).

Parametri sušenja, koeficijenti i konstante, u navedenim matematičkim modelima određeni su metodom nelinearne regresije korištenjem programa Statistica 6.0.

Diferenciranjem *Midilli-Kucukovog* modela (28) dobije se izraz za brzinu sušenja:

$$-\frac{dX'(t)}{dt} = a \cdot k \cdot n \cdot t^{(n-1)} + b \quad (31)$$

Gdje su $t \geq 0$; $a > 0$; $k > 0$; $n > 1$

Diferenciranjem logaritamskog modela (29) dobije se izraz za brzinu sušenja:

$$-\frac{dX'(t)}{dt} = a \cdot k \cdot e^{-kt} \quad (32)$$

Gdje su $t \geq 0$; $a > 0$; $k > 0$

U slučaju matematičkog modeliranja eksperimentalnih podataka sušenja, gdje je koeficijent $n < 1$, za simulaciju brzine sušenja prikladnije je odabrati Pageov model:

$$X = e^{-k \cdot t^n} \quad (33)$$

čijim diferenciranjem se dobije izraz za brzinu sušenja:

$$-\frac{dX'(t)}{dt} = k \cdot n \cdot t^{(n-1)} \cdot X'(t) \quad (34)$$

Gdje su $t \geq 0$; $k > 0$; $n > 1$

Prva kritična točka sušenja (K_1) je određena maksimumom funkcije brzine sušenja:

$$t_{K,1} = \left(\frac{n-1}{kn} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (35)$$

$$X_{K,1} = X_1 \cdot e^{-\frac{1-n}{n}} \quad (36)$$

Druga kritična točka sušenja (K_2) je određena kao točka infleksije funkcije brzine sušenja:

$$t_{K,2} = \left(\frac{2n-1}{kn} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (37)$$

$$X_{K,2} = X_1 \cdot e^{-\frac{1-2n}{n}} \quad (38)$$

U koeficijente matematičkog modela koji je pokazao najbolje slaganje s eksperimentalnim podacima sušenja uzoraka marelice i jabuke uključene su stvarne procesne varijable kao što su temperatura i brzina strujanja zraka kojim se provodi sušenje. Utjecaji navedenih varijabli na konstante i koeficijente ispitanih modela istraženi su primjenom višestruke linearne regresije. Na taj način su dobiveni novi poluempirijski modeli koji mogu poslužiti za simuliranje kinetike sušenja odabranog voća i povrća unutar granica ispitanih procesnih parametara. Tako dobiveni poluempirijski modeli ponovo su podvrgnuti testiranju uspješnosti aproksimacije eksperimentalnih podataka pomoću ranije navedenih statističkih alata.

Za model

$$X'(t) = a \cdot e^{-k \cdot t^n} + b \cdot t \quad \text{Midilli-Kucuk}$$

ovisnost parametara sušenja o temperaturi sušenja i brzini strujanja zraka dana je izrazima:

$$a = \beta_0 + \beta_1 (T) + \beta_2 (v)$$

$$k = \beta_0 + \beta_1 (T) + \beta_2 (v)$$

$$n = \beta_0 + \beta_1 (T) + \beta_2 (v)$$

$$b = \beta_0 + \beta_1 (T) + \beta_2 (v)$$

Postupkom višestruke linearne regresije utvrđena je ovisnost parametara o ispitanim procesnim parametrima. Tijekom ispitivanja kinetike sušenja pri promjeni temperature održavana je konstantna brzina strujanja zraka i obratno.

Tako određeni parametri ulaze u odabrani model za kojeg se izračunava kvaliteta njegove primjene. Statistički pokazatelji ukazuju da odabrani modeli dobro aproksimiraju eksperimentalne podatke sušenja ispitanog voća i povrća.

Tablica 15. Vrijednosti konstanti i koeficijenta sušenja odabranog modela (28) za uzorke marelice dobivene metodom nelinearne regresije u ovisnosti o procesnim parametrima; brzini strujanja zraka ($1,4 \text{ m s}^{-1}$; $2,1 \text{ m s}^{-1}$; $2,8 \text{ m s}^{-1}$) i temperaturama sušenja od $50 \text{ }^\circ\text{C}$ do $80 \text{ }^\circ\text{C}$

T, °C	v, m/s	a	k	n	b	R
50	1,4	1,0124	0,00335	0,8423	-0,00004	0,99998
50	2,1	1,0066	0,00411	0,8553	-0,00008	0,99998
50	2,8	1,0141	0,00496	0,8288	-0,00011	0,99996
60	1,4	0,9975	0,00155	1,0337	-0,00006	0,99992
60	2,1	0,9932	0,00286	0,9645	-0,00013	0,99988
60	2,8	1,0019	0,00397	0,9358	-0,00012	0,99995
70	1,4	0,9861	0,00147	1,1159	-0,00004	0,99975
70	2,1	0,9807	0,00217	1,0575	-0,00010	0,99972
70	2,8	1,0001	0,00314	1,0135	-0,00014	0,99994
80	1,4	0,9919	0,00125	1,1668	-0,00011	0,99982
80	2,1	0,9910	0,00209	1,1585	-0,00013	0,99977
80	2,8	0,9965	0,00451	0,9989	-0,00024	0,99997

Tablica 16. Vrijednosti koeficijenata (β) dobivene metodom višestruke linearne regresije za pojedine parametre sušenja u modelu (28) pri ispitanim procesnim parametrima

	a	k	n	b
β_0	1,028821	0,002909	0,567352	0,000186
$\beta_1(T)$	-0,000622	-0,000051	0,008821	-0,000002
$\beta_2(v)$	0,004416	0,001600	-0,068153	-0,000063

Vrijednosti konstanti i koeficijenta sušenja ispitnog Midilli i Kucuk-ovog modela (28) dobivene metodom višestruke linearne regresije za uzorke marelice dane su slijedećim izrazima:

$$a = 1,028821 - 0,00622 \cdot T + 0,004416 \cdot v$$

$$k = 0,002909 - 0,000051 \cdot T + 0,001600 \cdot v$$

$$n = 0,567352 + 0,008821 \cdot T - 0,068153 \cdot v$$

$$b = 0,000186 - 0,000002 \cdot T - 0,000063 \cdot v$$

Tablica 17. Vrijednosti konstanti i koeficijenta sušenja odabranog modela (28) za uzorke jabuke dobivene metodom nelinearne regresije u ovisnosti o procesnim parametrima; brzini strujanja zraka ($1,4 \text{ m s}^{-1}$; $2,1 \text{ m s}^{-1}$; $2,8 \text{ m s}^{-1}$) i temperaturama sušenja od $50 \text{ }^\circ\text{C}$ do $80 \text{ }^\circ\text{C}$

T, °C	v, m/s	a	k	n	b	R
50	1,4	1,00063	0,00508	1,17425	-0,000001	0,99980
50	2,1	0,99853	0,00894	1,10826	-0,000029	0,99875
50	2,8	0,99806	0,01295	1,04589	-0,000010	0,99999
60	1,4	1,00041	0,00598	1,18731	-0,000023	0,99780
60	2,1	0,99906	0,01022	1,12403	-0,000054	0,99760
60	2,8	0,99737	0,01392	1,06047	-0,000107	0,99982
70	1,4	0,99993	0,00724	1,20294	-0,000045	0,99998
70	2,1	0,99793	0,01142	1,14047	-0,000119	0,99950
70	2,8	0,99513	0,01547	1,07858	-0,000239	0,99980
80	1,4	0,99995	0,00819	1,21950	-0,000062	0,99997
80	2,1	0,99830	0,01241	1,15347	-0,000175	0,99950
80	2,8	0,99593	0,01632	1,09378	-0,000303	0,99957

Tablica 18. Vrijednosti koeficijenata (β) dobivene metodom višestruke linearne regresije za pojedine parametre sušenja u modelu (28) pri ispitanim procesnim parametrima

	a	k	n	b
β_0	1,006658	-0,008731	1,221098	0,000473
$\beta_1(T)$	-0,000043	0,000113	0,001551	-0,000006
$\beta_2(v)$	-0,002579	0,005746	-0,090229	-0,000094

Vrijednosti konstanti i koeficijenta sušenja ispitnog Midilli i Kucuk-ovog modela (28) dobivene metodom višestruke linearne regresije za uzorke jabuke dane su slijedećim izrazima:

$$a = 1,006658 - 0,000043 \cdot T - 0,002579 \cdot v$$

$$k = -0,008731 + 0,000113 \cdot T + 0,005746 \cdot v$$

$$n = 1,221098 + 0,001551 \cdot T - 0,090229 \cdot v$$

$$b = 0,000473 - 0,000006 \cdot T - 0,000094 \cdot v$$

Tablica 19. Vrijednosti konstanti i koeficijenta sušenja odabranog modela (28) za uzorke jabuke sušene u tunelskom sušioniku u ovisnosti o temperaturi sušenja dobivene metodom nelinearne regresije

T, °C	a	k	n	b	R
50	0,9981	0,0130	1,0459	-0,000010	0,99999
60	0,9974	0,0139	1,0605	-0,000107	0,99982
70	0,9951	0,0155	1,0786	-0,000239	0,99980
80	0,9959	0,0163	1,0938	-0,000303	0,99957

Tablica 20. Vrijednosti konstanti i koeficijenta sušenja odabranog modela (29) za uzorke jabuke sušene u fluidiziranom sloju u ovisnosti o temperaturi sušenja dobivene metodom nelinearne regresije

T, °C	a	k	c	R
50	1,1038	0,0246	-0,0994	0,99987
60	1,1048	0,0306	-0,0994	0,99987
70	1,0563	0,0401	-0,0619	0,99979
80	1,0606	0,0498	-0,0712	0,99982

Tablica 21. Vrijednosti konstanti i koeficijenta sušenja odabranog modela (28) za infra-crveno sušenje uzorka jabuke u ovisnosti o temperaturi sušenja dobivene metodom nelinearne regresije

T, °C	a	k	n	b	R
50	0,9928	0,0009	1,3678	-0,000038	0,99993
60	0,9826	0,0015	1,3265	-0,000110	0,99962
70	0,9768	0,0014	1,4207	0,000007	0,99957
80	0,9820	0,0032	1,3593	-0,000031	0,99946

Tablica 22. Vrijednosti konstanti i koeficijenta sušenja odabranog modela (28) za uzorke mrkve sušene u tunelskom sušioniku u ovisnosti o temperaturi sušenja dobivene metodom nelinearne regresije

T, °C	a	k	n	b	R
60	0,9811	0,0054	1,1535	-0,00012	0,99958
70	0,9831	0,0065	1,1860	-0,00011	0,99968
80	0,9897	0,0075	1,1938	-0,00023	0,99977

Tablica 23. Vrijednosti konstanti i koeficijenta sušenja odabranog modela (28) za uzorke mrkve sušene u fluidiziranom sloju u ovisnosti o temperaturi sušenja dobivene metodom nelinearne regresije

T, °C	a	k	n	b	R
60	1,0054	0,0331	0,8990	-0,00099	0,99905
70	1,0014	0,0406	0,9472	-0,00087	0,99956
80	0,9968	0,0883	0,8099	-0,00125	0,99944

Tablica 24. Vrijednosti konstanti i koeficijenta sušenja odabranog modela (28) za infra-crveno sušenje uzorka mrkve u ovisnosti o temperaturi sušenja dobivene metodom nelinearne regresije

T, °C	a	k	n	b	R
60	1,0041	0,0009	1,3752	-0,00019	0,99988
70	1,0146	0,0016	1,2895	-0,00079	0,99981
80	1,0098	0,0011	1,4907	-0,00044	0,99987

Tablica 25. Vrijednosti konstanti i koeficijenta sušenja odabranog modela (28) za vakuum sušenje uzorka mrkve u ovisnosti o temperaturi sušenja dobivene metodom nelinearne regresije

T, °C	a	k	n	b	R
60	0,9833	0,0007	1,2663	-0,00020	0,99975
70	0,9819	0,0008	1,3249	-0,00020	0,99968
80	1,0008	0,0006	1,4427	-0,00002	0,99999

Tablica 26. Vrijednosti konstanti i koeficijenta sušenja odabranog modela (29) za uzorke peršina sušene u tunelskom sušioniku u ovisnosti o temperaturi sušenja dobivene metodom nelinearne regresije

T, °C	a	k	c	R
60	1,15293	0,01423	-0,14250	0,99993
65	1,18249	0,01520	-0,17724	0,99997
70	1,19795	0,01641	-0,20666	0,99996

Tablica 27. Vrijednosti konstanti i koeficijenta sušenja odabranog modela (28) za uzorke peršina sušene u fluidiziranom sloju u ovisnosti o temperaturi sušenja dobivene metodom nelinearne regresije

T, °C	a	k	n	b	R
60	1,0003	0,0612	0,9202	-0,00016	0,99997
65	0,9982	0,0773	0,8860	-0,00045	0,99986
70	0,9997	0,0999	0,8540	-0,00130	0,99996

Tablica 28. Vrijednosti konstanti i koeficijenta sušenja i odabranog modela (28) za infra-crveno sušenje uzorka peršina u ovisnosti o temperaturi sušenja dobivene metodom nelinearne regresije

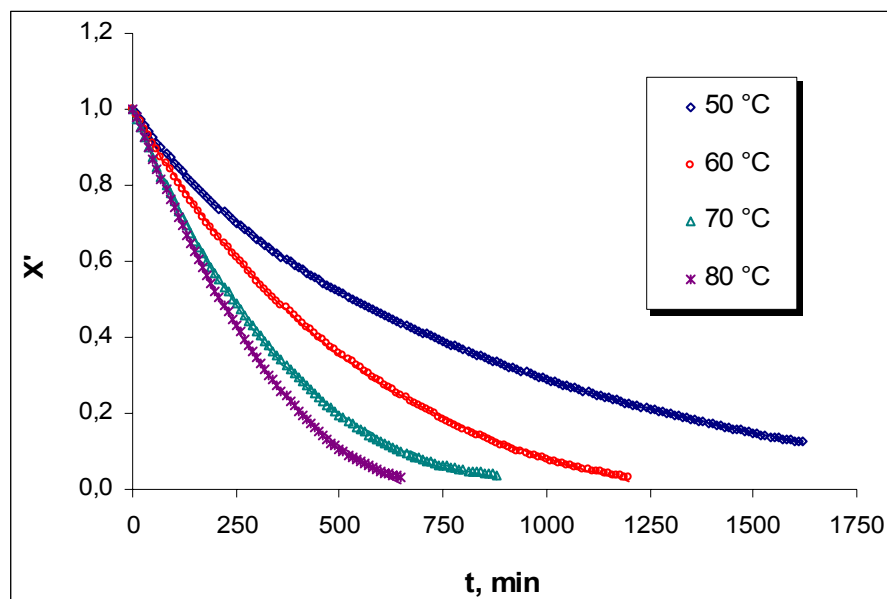
T, °C	a	k	n	b	R
60	0,9946	0,0013	1,2636	-0,00046	0,99992
65	0,9942	0,0020	1,2815	-0,00024	0,99994
70	0,9969	0,0024	1,2565	-0,00069	0,99992

Tablica 29. Vrijednosti konstanti i koeficijenta sušenja odabranog modela (28) za vakuum sušenje uzorka peršina u ovisnosti o temperaturi sušenja dobivene metodom nelinearne regresije

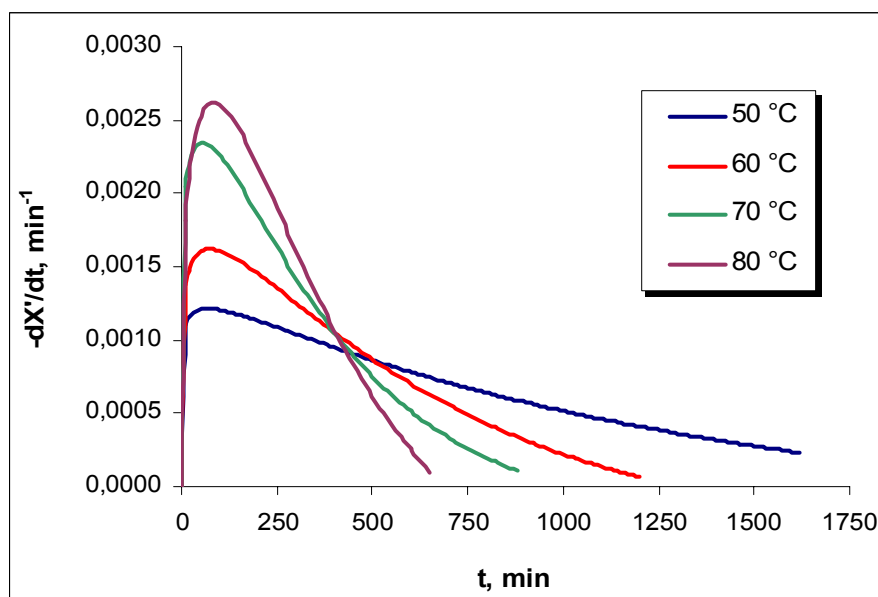
T, °C	a	k	n	b	R
60	0,9872	0,0010	1,2331	-0,00036	0,99988
65	0,9949	0,0012	1,2490	-0,00037	0,99997
70	0,9897	0,0011	1,2870	-0,00057	0,99995

4.2. GRAFIČKI PRIKAZ DOBIVENIH REZULTATA

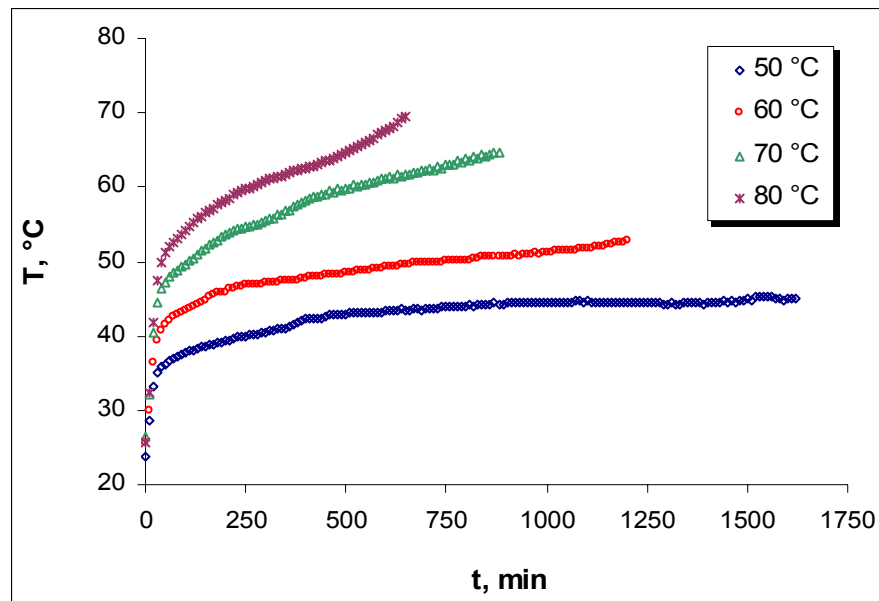
Tunelski sušionik (TD); uzorak - marelica; $v = 1,4 \text{ m s}^{-1}$



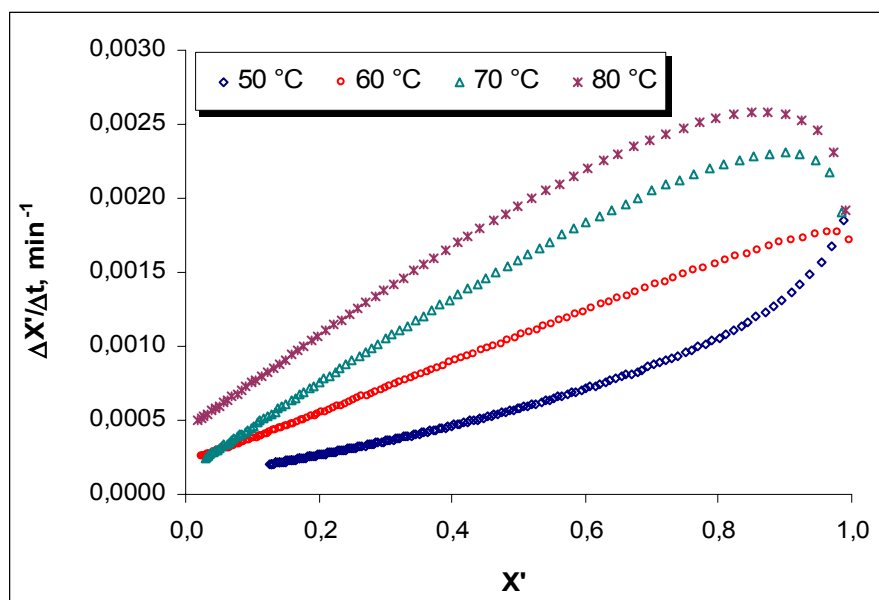
Slika 11. Ovisnost bezdimenzionalne vlažnosti uzorka marelice o vremenu sušenja pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od $1,4 \text{ m s}^{-1}$ (eksperimentalni podaci - simboli; aproksimacijski model - puna linija)



Slika 12. Ovisnost brzine sušenja uzorka marelice o vremenu sušenja pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od $1,4 \text{ m s}^{-1}$

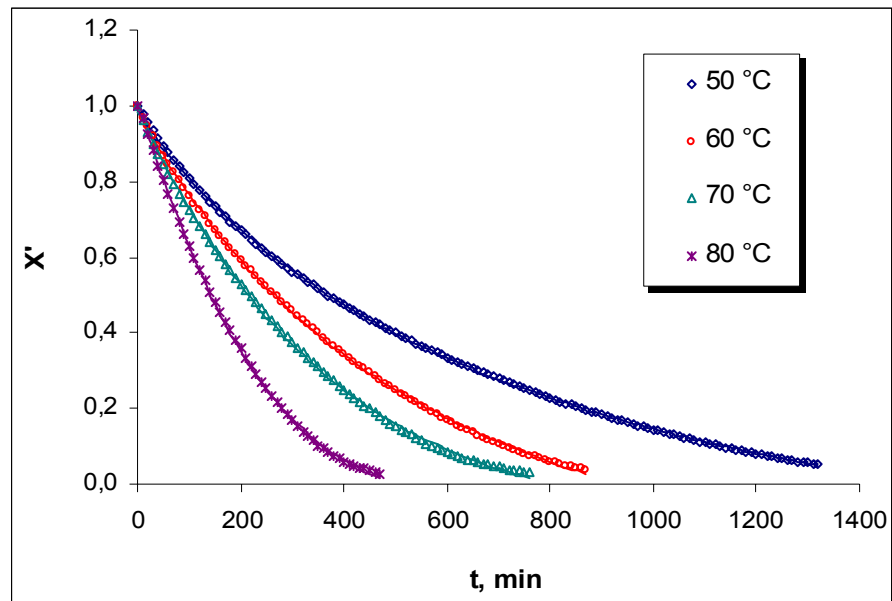


Slika 13. Promjena temperature u uzorcima marelice pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od $1,4 \text{ m s}^{-1}$

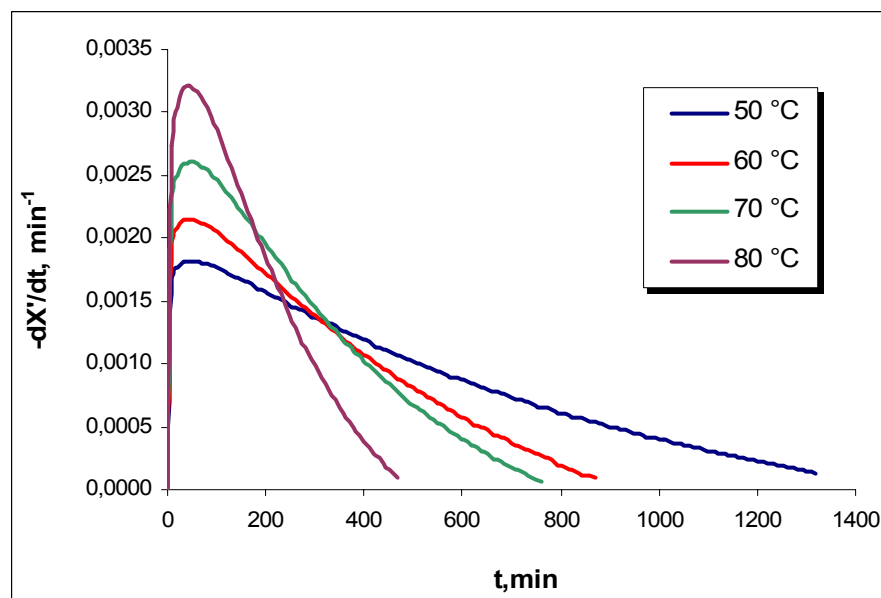


Slika 14. Ovisnost brzine sušenja uzoraka marelice o bezdimenzionalnoj vlažnosti pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od $1,4 \text{ m s}^{-1}$

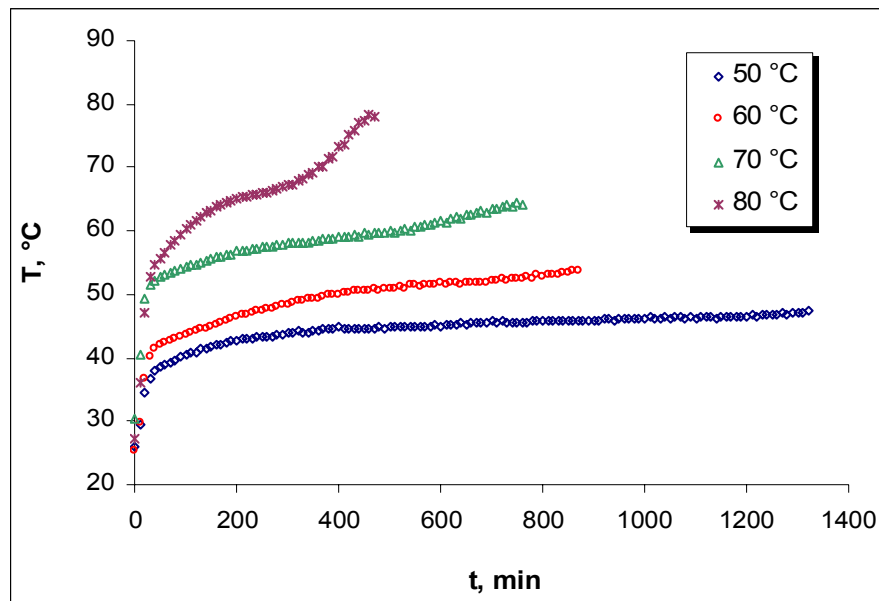
Tunelski sušionik (TD); uzorak - marelica; $v = 2,1 \text{ m s}^{-1}$



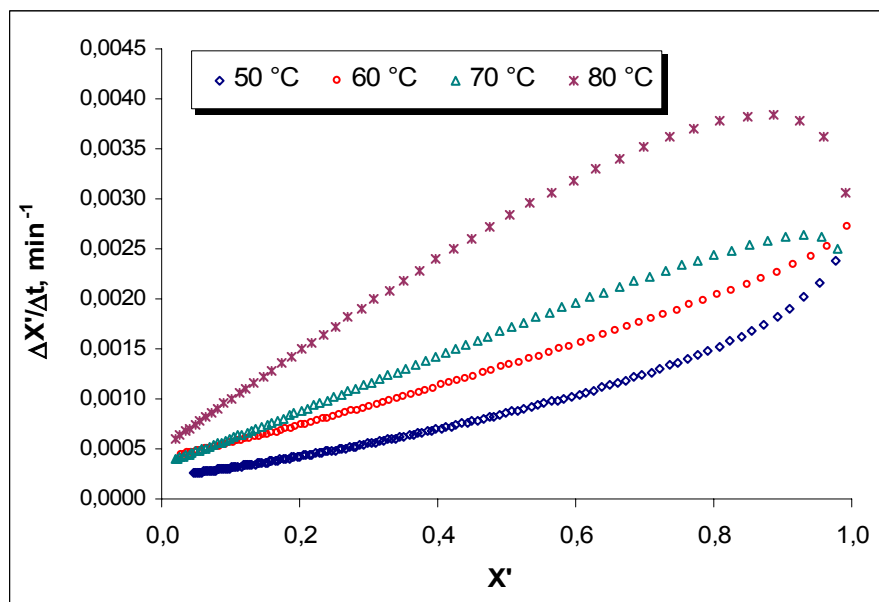
Slika 15. Ovisnost bezdimenzionalne vlažnosti uzorka marelice o vremenu sušenja pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od $2,1 \text{ m s}^{-1}$ (eksperimentalni podaci - simboli; aproksimacijski model - puna linija)



Slika 16. Ovisnost brzine sušenja uzorka marelice o vremenu sušenja pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od $2,1 \text{ m s}^{-1}$

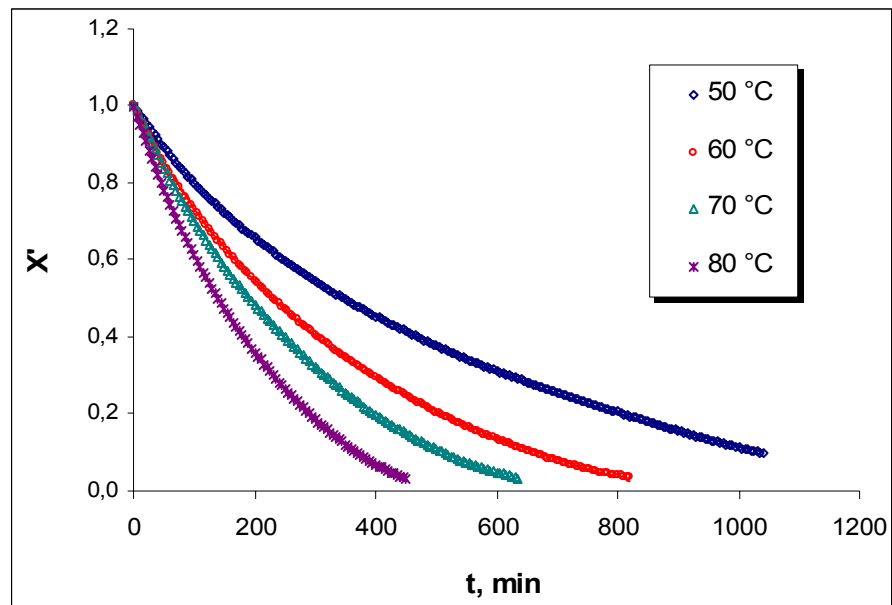


Slika 17. Promjena temperature u uzorcima marelice pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od $2,1 \text{ m s}^{-1}$

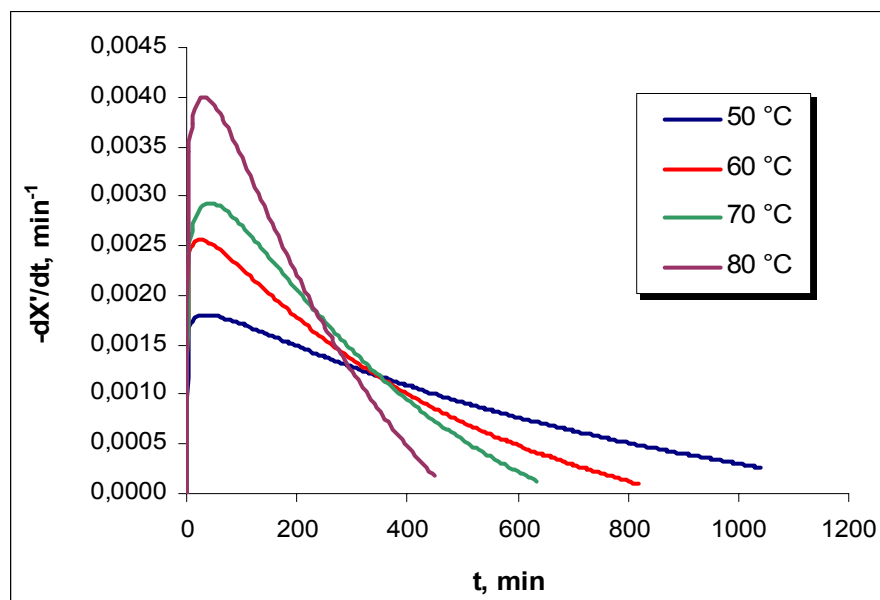


Slika 18. Ovisnost brzine sušenja uzoraka marelice o bezdimenzionalnoj vlažnosti pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od $2,1 \text{ m s}^{-1}$

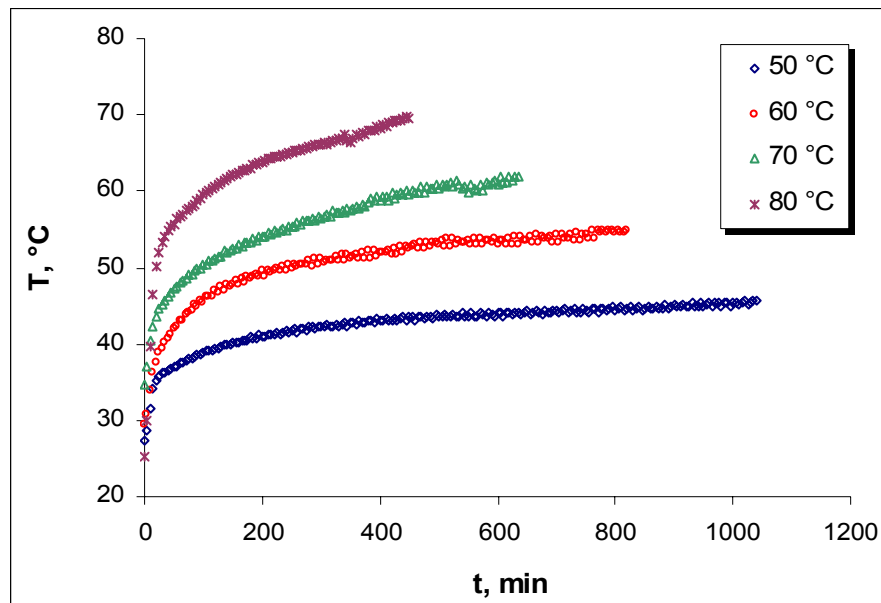
Tunelski sušionik (TD); uzorak - marelica; $v = 2,8 \text{ m s}^{-1}$



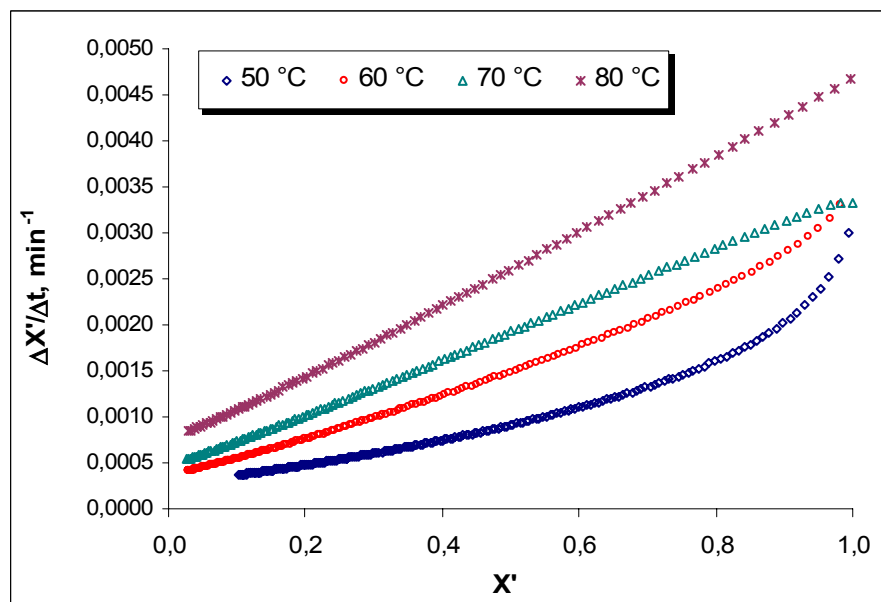
Slika 19. Ovisnost bezdimenzionalne vlažnosti uzorka marelice o vremenu sušenja pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od $2,8 \text{ m s}^{-1}$ (eksperimentalni podaci - simboli; aproksimacijski model - puna linija)



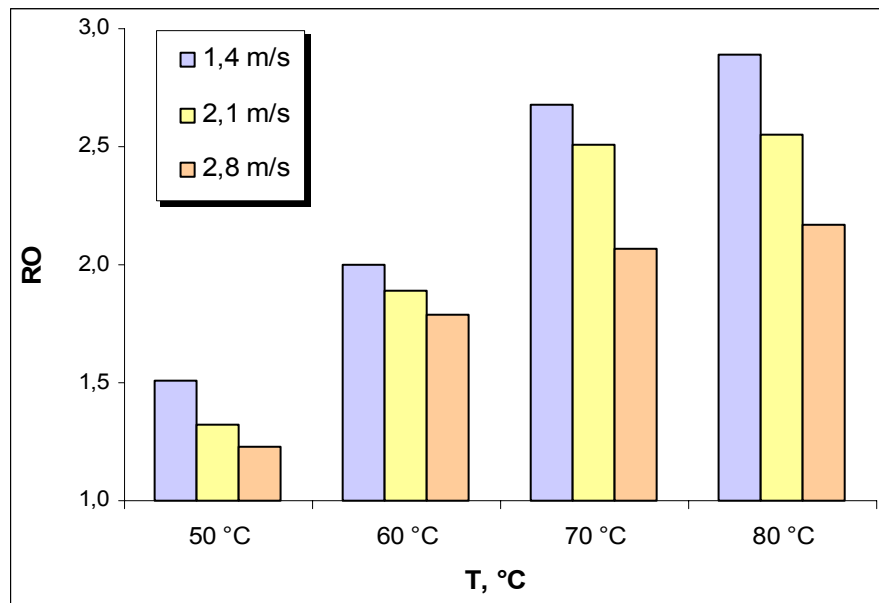
Slika 20. Ovisnost brzine sušenja uzorka marelice o vremenu sušenja pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od $2,8 \text{ m s}^{-1}$



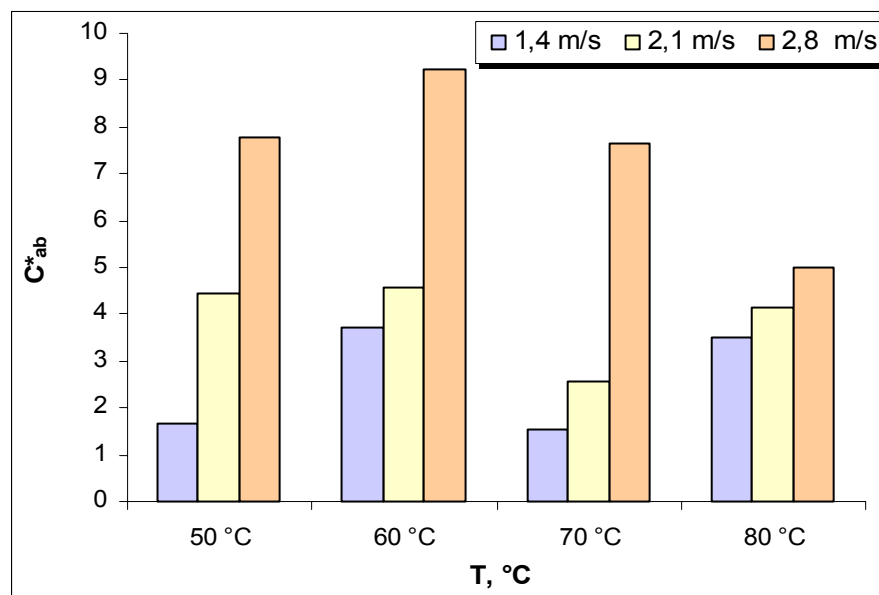
Slika 21. Promjena temperature u uzorcima marelice pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od $2,8 \text{ m s}^{-1}$



Slika 22. Ovisnost brzine sušenja uzoraka marelice o bezdimenzionalnoj vlažnosti pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od $2,8 \text{ m s}^{-1}$

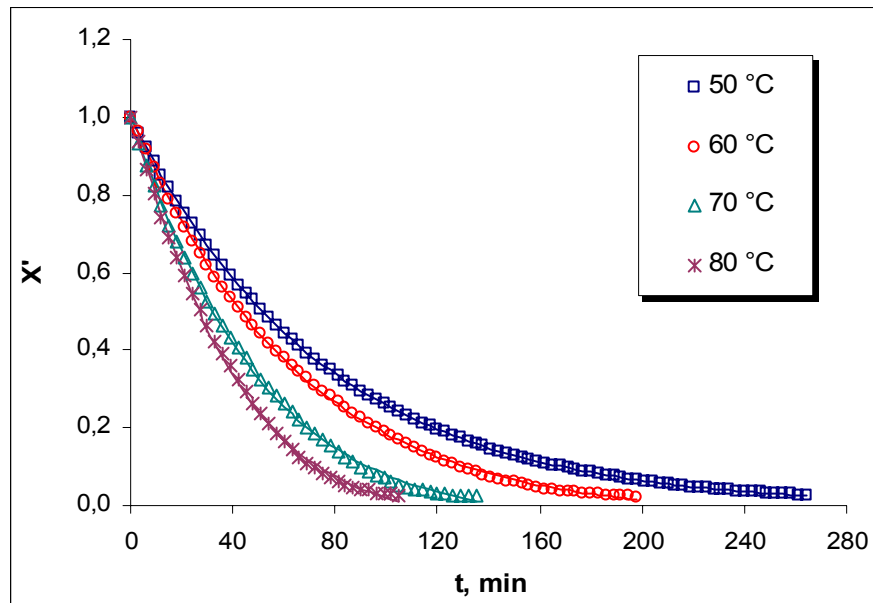


Slika 23. Rehidracijski omjeri (RO) uzoraka marelice pri različitim temperaturama sušenja i različitim brzinama strujanja zraka

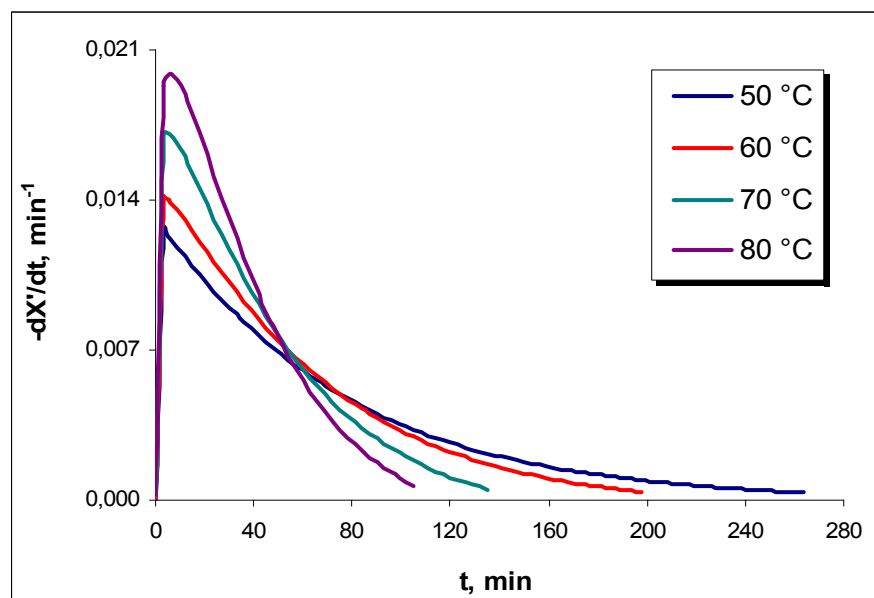


Slika 24. Ovisnost promjene boje uzoraka marelice (C^*_{ab}) pri različitim temperaturama sušenja i različitim brzinama strujanja zraka

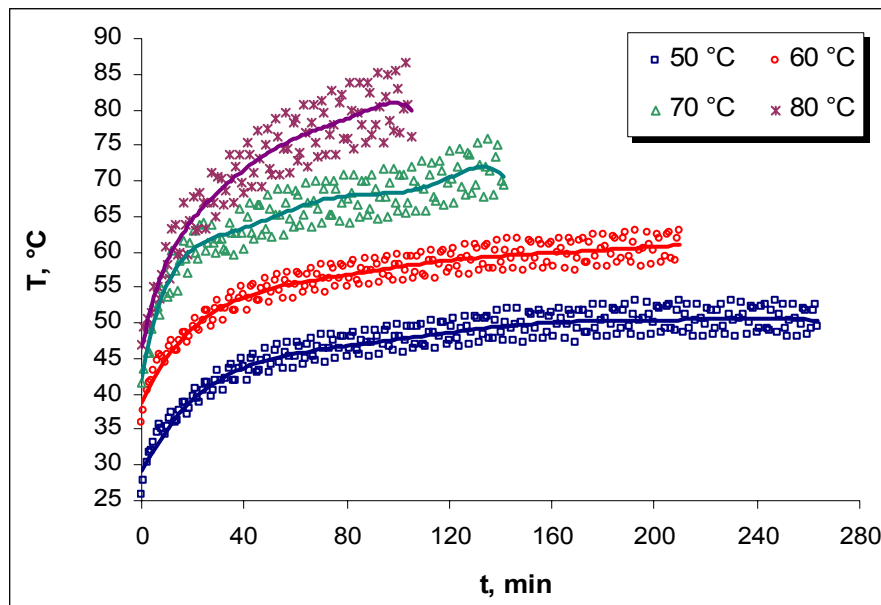
Tunelski sušionik (TD); uzorak - jabuka; $v = 2,8 \text{ m s}^{-1}$



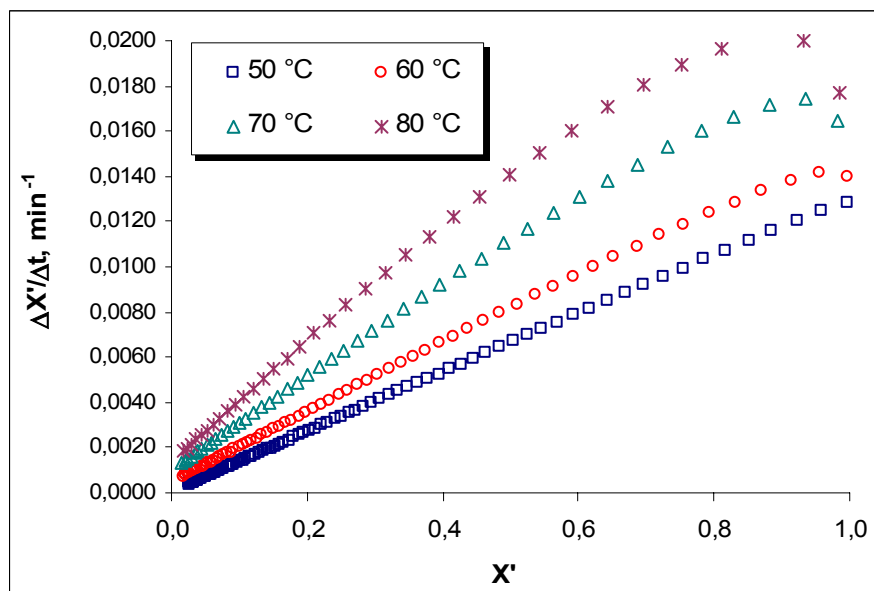
Slika 25. Ovisnost bezdimenzionalne vlažnosti uzorka jabuke o vremenu sušenja pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od $2,8 \text{ m s}^{-1}$ (eksperimentalni podaci - simboli; aproksimacijski model - puna linija)



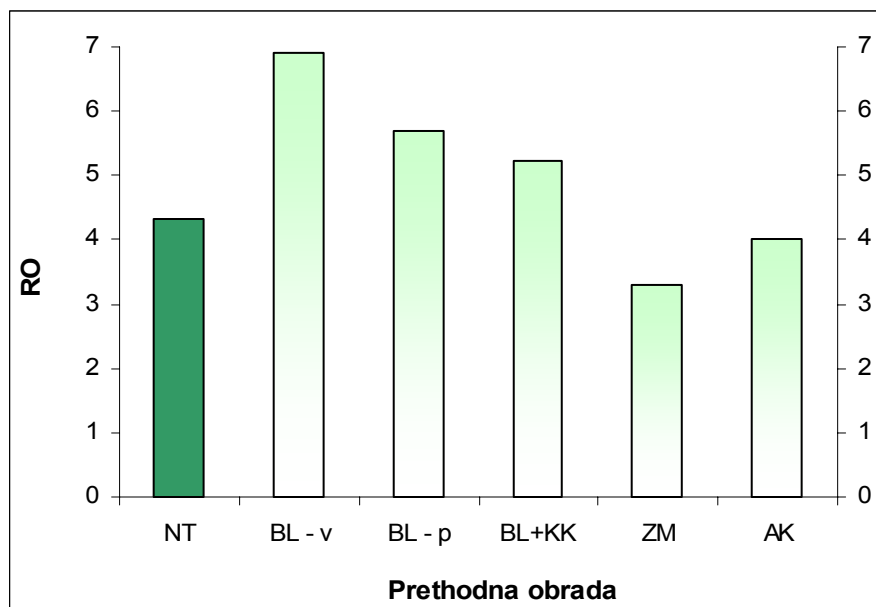
Slika 26. Ovisnost brzine sušenja uzorka jabuke o vremenu sušenja pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od $2,8 \text{ m s}^{-1}$



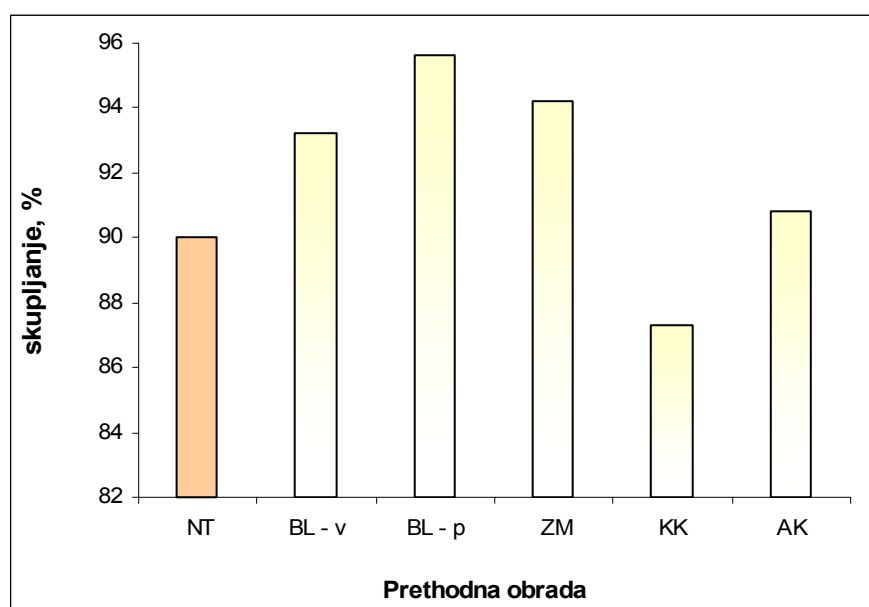
Slika 27. Promjena temperature u uzorcima jabuke pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od $2,8 \text{ m s}^{-1}$



Slika 28. Ovisnost brzine sušenja uzoraka jabuke o bezdimenzionalnoj vlažnosti pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od $2,8 \text{ m s}^{-1}$

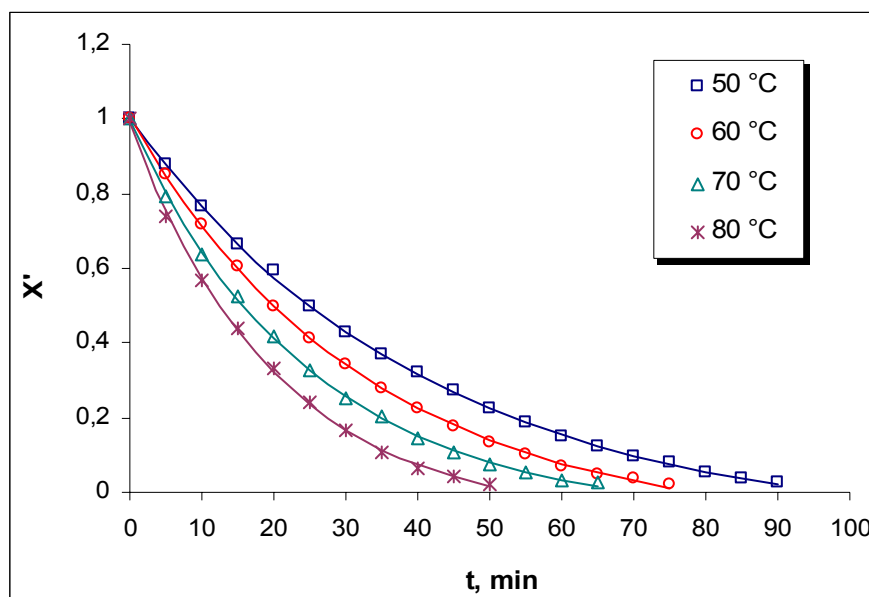


Slika 29. Rehidracijski omjeri (RO) uzoraka jabuke u ovisnosti o načinu prethodne obrade uzoraka sušenih u tunelskom sušioniku (TD) pri temperaturi 50 °C i brzini strujanja zraka od 2,8 m s⁻¹ (NT – neobrađeni uzorci; BL-v – blanširanje u vreloj vodi; BL-p – blanširanje na pari; BL+KK – blanširanje u 0,6 %-tnoj vodenoj otopini CaCl₂; ZM – zamrzavanje; AK – askorbinska kiselina)

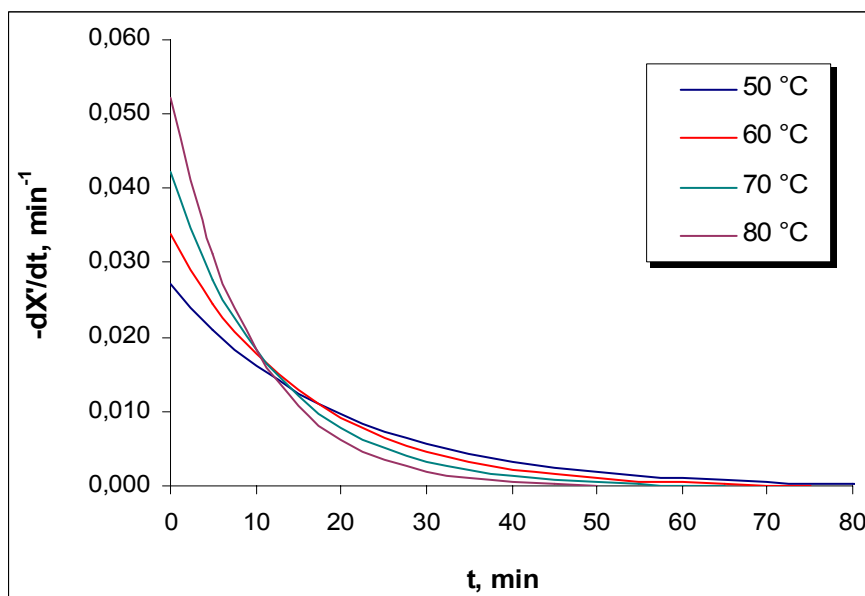


Slika 30. Ovisnost promjene volumena uzoraka jabuke o načinu prethodne obrade uzoraka sušenih u tunelskom sušioniku (TD) pri temperaturi 50 °C i brzini strujanja zraka od 2,8 m s⁻¹

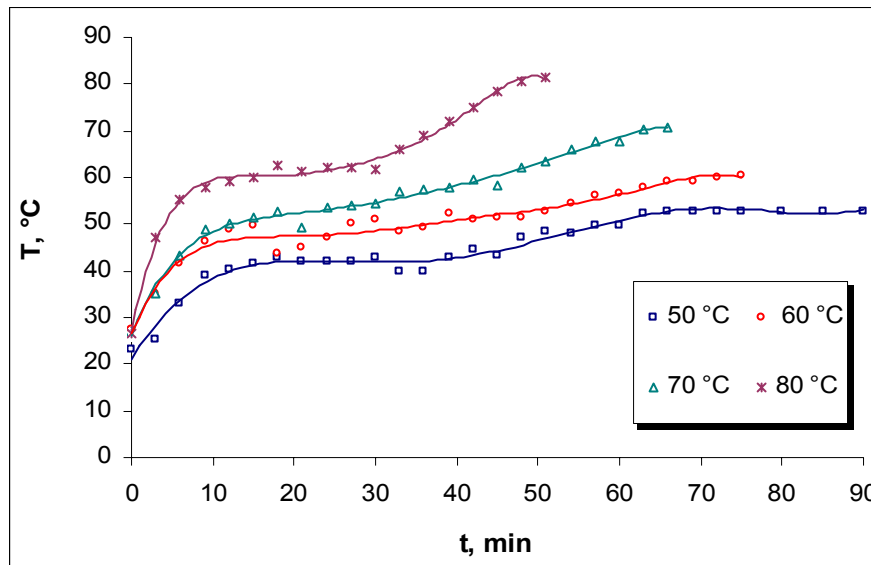
Sušionik za sušenje u fluidiziranom sloju (FBD); uzorak - jabuka; $v = 3,5 \text{ m s}^{-1}$



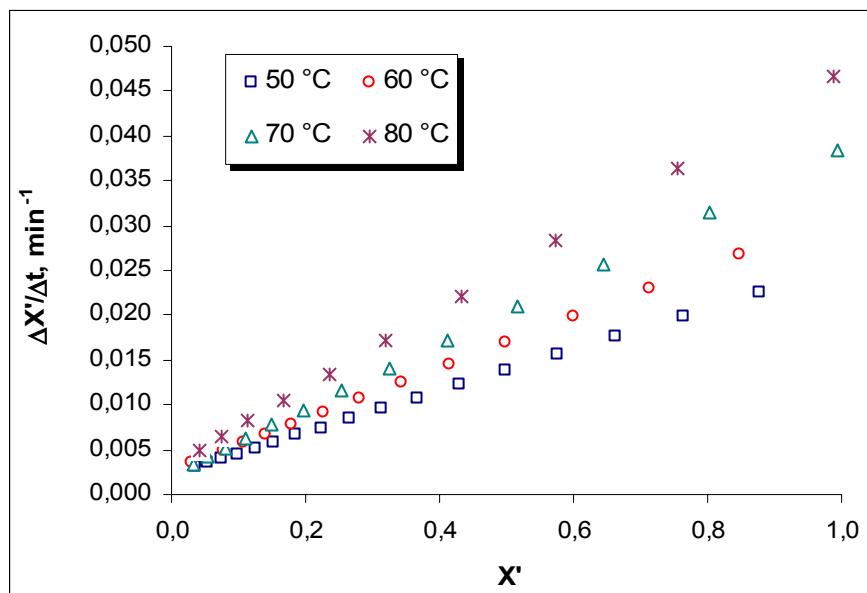
Slika 31. Ovisnost bezdimenzionalne vlažnosti o vremenu sušenja za uzorke jabuke sušene u sušioniku s fluidiziranim slojem (FBD) pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od $3,5 \text{ m s}^{-1}$ (eksperimentalni podaci - simboli; aproksimacijski model - puna linija).



Slika 32. Ovisnost brzine sušenja za uzorke jabuke sušene u sušioniku s fluidiziranim slojem (FBD) pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od $3,5 \text{ m s}^{-1}$

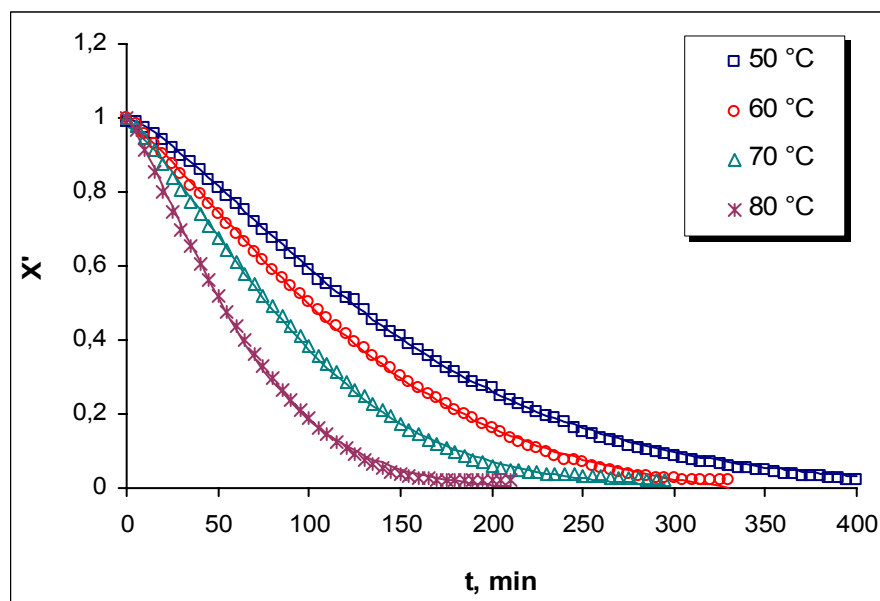


Slika 33. Promjena temperature u uzorcima jabuke sušene u sušioniku s fluidiziranim slojem (FBD) pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od $3,5 \text{ m s}^{-1}$

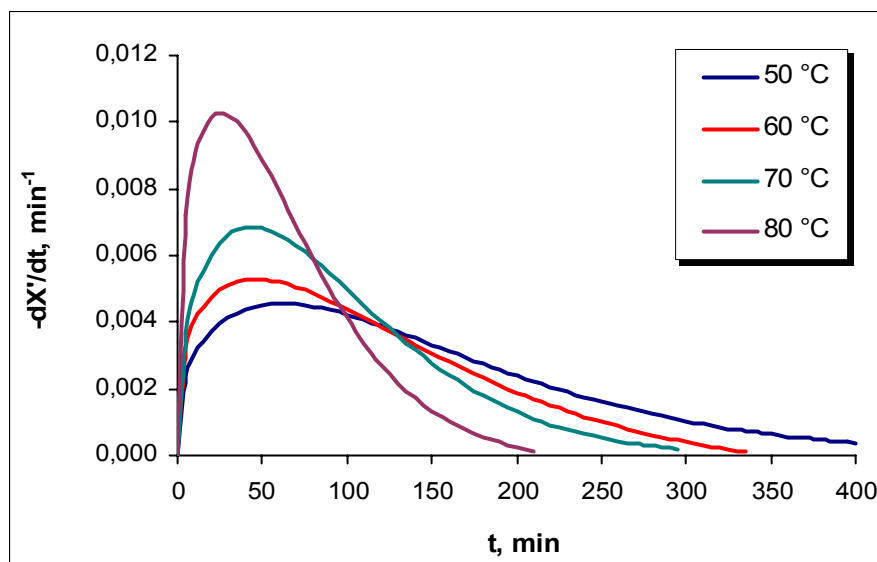


Slika 34. Ovisnost brzine sušenja uzoraka jabuke o bezdimenzionalnoj vlažnosti sušene u sušioniku s fluidiziranim slojem (FBD) pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od $3,5 \text{ m s}^{-1}$

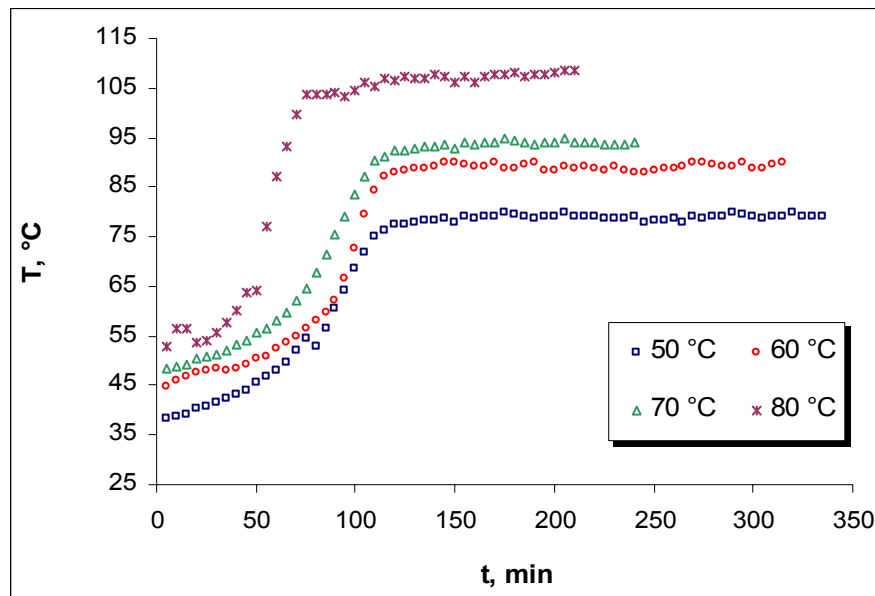
Infracrveni sušionik (IC); uzorak - jabuka



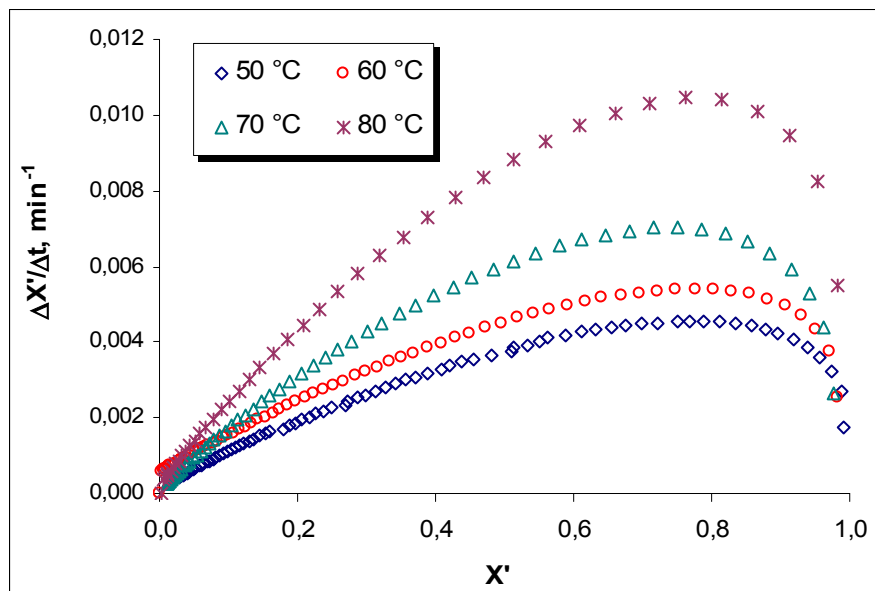
Slika 35. Ovisnost bezdimenzionalne vlažnosti o vremenu sušenja za uzorke jabuke sušene u infracrvenom sušioniku (IC) pri različitim temperaturama sušenja (*eksperimentalni podaci - simboli; aproksimacijski model - puna linija*)



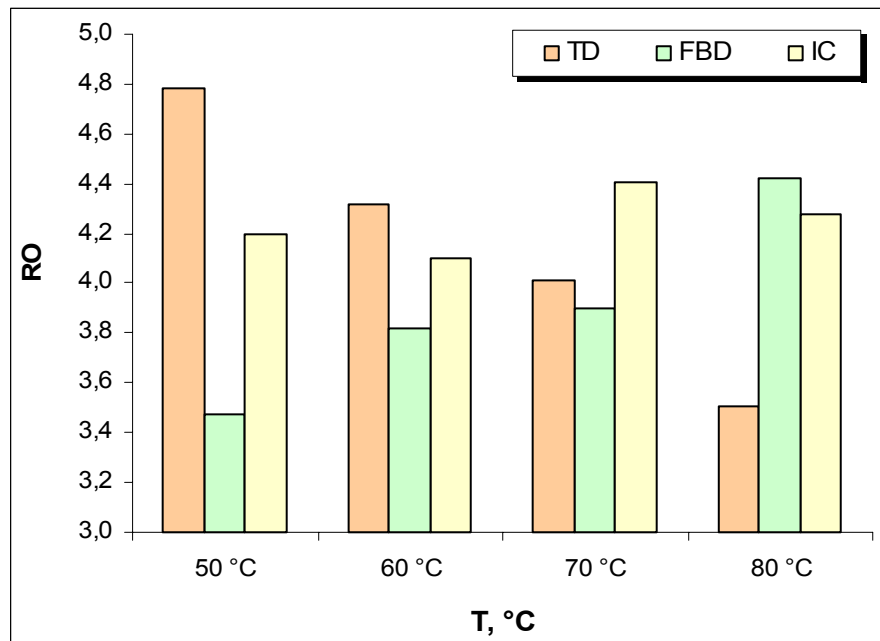
Slika 36. Ovisnost brzine sušenja za uzorke jabuke sušene u infracrvenom sušioniku (IC) pri različitim temperaturama sušenja



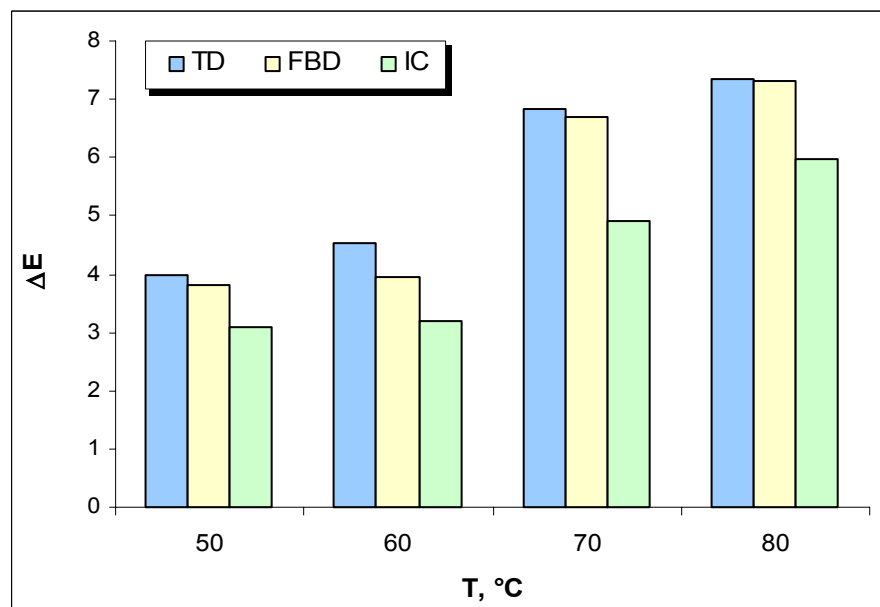
Slika 37. Promjena temperature u uzorcima jabuke pri različitim temperaturama sušenja sušene u infracrvenom sušioniku (IC)



Slika 38. Ovisnost brzine sušenja uzoraka jabuke o bezdimenzionalnoj vlažnosti sušene u infracrvenom sušioniku (IC) pri različitim temperaturama sušenja

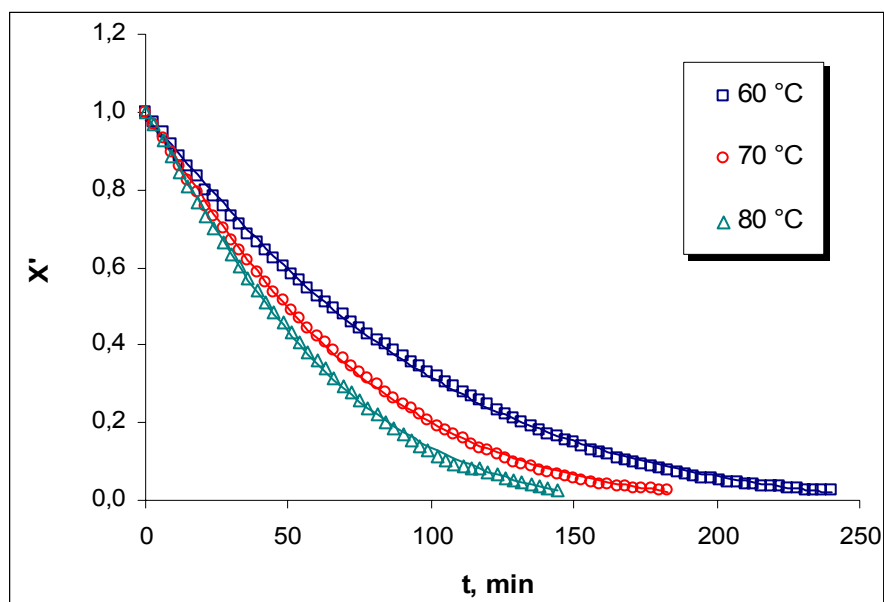


Slika 39. Vrijednosti rehidracijskih omjera (RO) uzoraka jabuke u ovisnosti o različitim metodama i temperaturama sušenja (TD – tunelski sušionik; FBD – sušionik za sušenje s fluidiziranim slojem; IC – infracrveni sušionik)

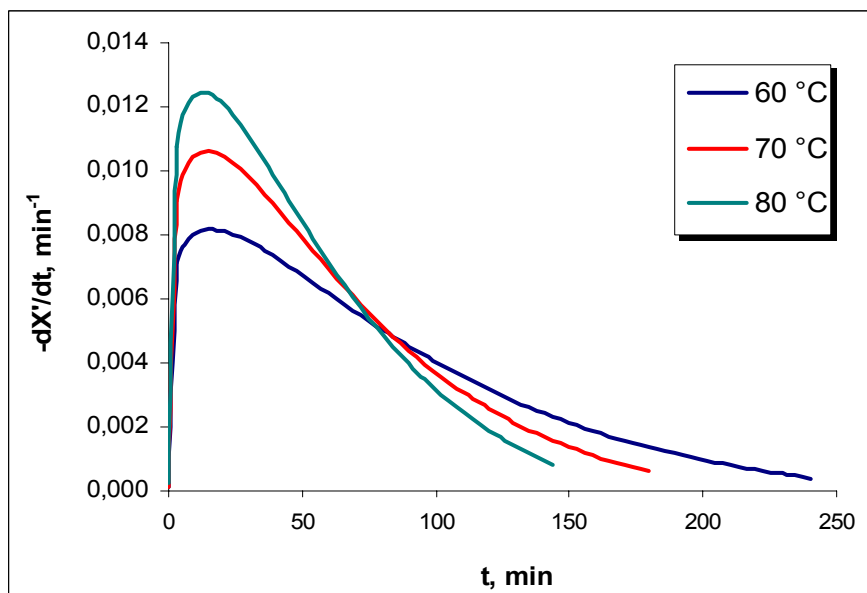


Slika 40. Ukupna promjene boje (ΔE) uzoraka jabuke u ovisnosti o različitim metodama i temperaturama sušenja (TD – tunelski sušionik; FBD – sušionik za sušenje s fluidiziranim slojem; IC – infracrveni sušionik)

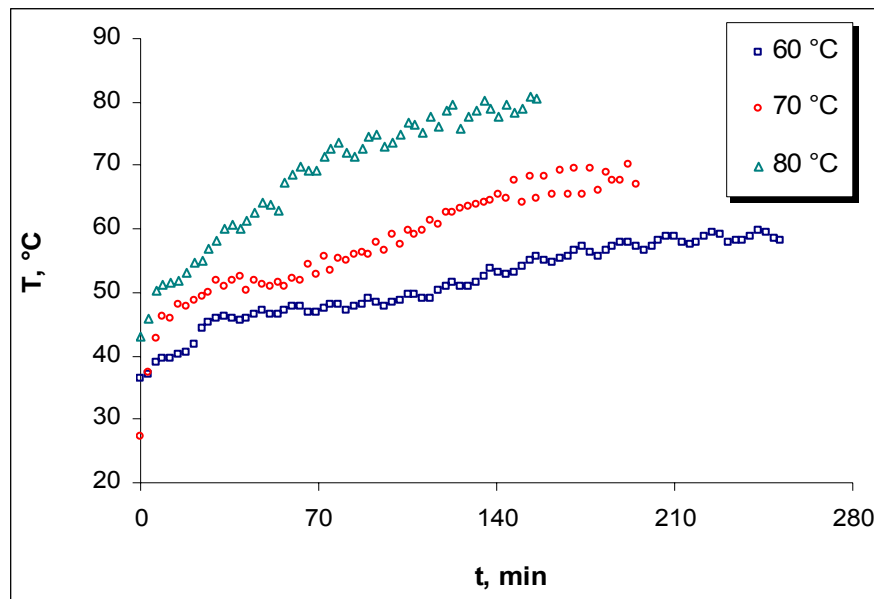
Tunelski sušionik (TD); uzorak - mrkva; $v = 2,8 \text{ m s}^{-1}$



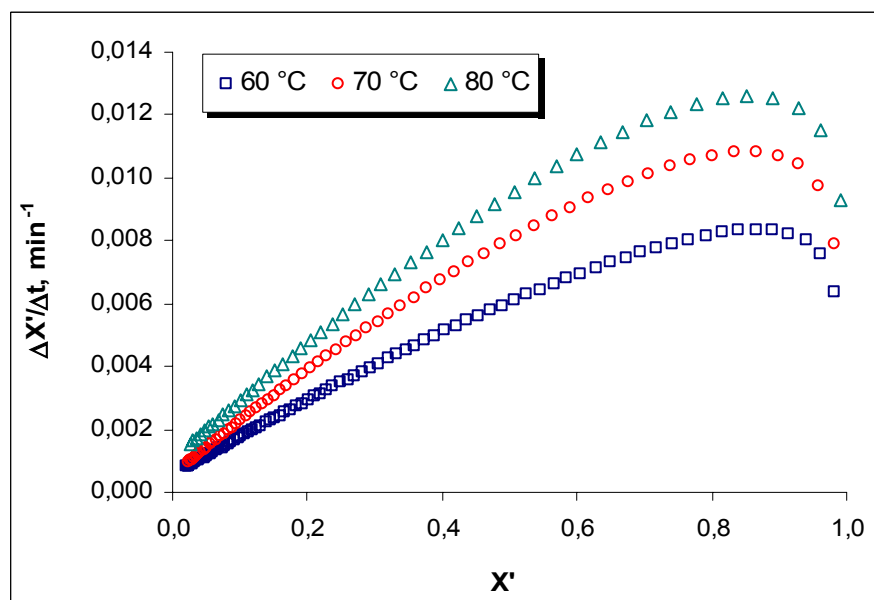
Slika 41. Ovisnost bezdimenzionalne vlažnosti uzorka mrkve o vremenu sušenja pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od $2,8 \text{ m s}^{-1}$ (eksperimentalni podaci - simboli; aproksimacijski model - puna linija)



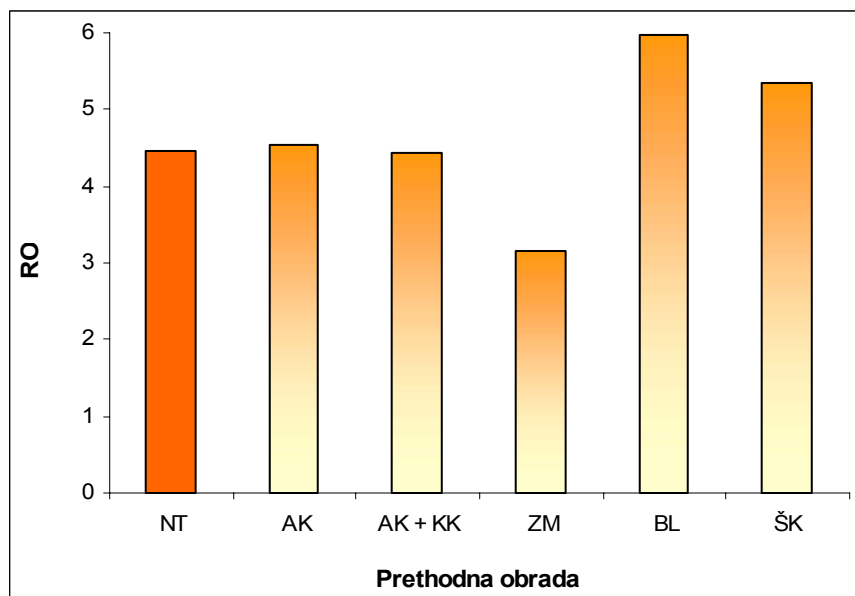
Slika 42. Ovisnost brzine sušenja uzorka mrkve o vremenu sušenja pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od $2,8 \text{ m s}^{-1}$



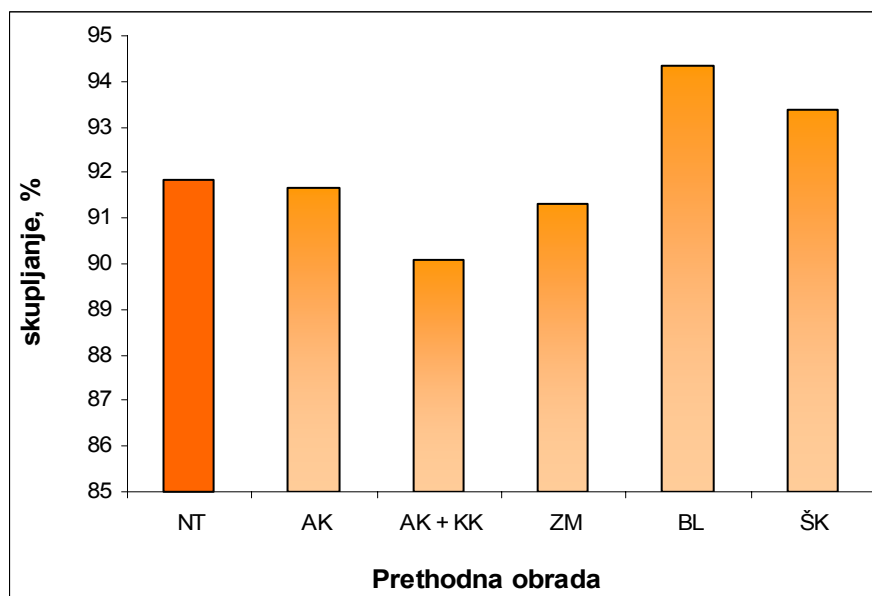
Slika 43. Promjena temperature u uzorcima mrkve sušene u tunelskom sušioniku (TD) pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od $2,8 \text{ m s}^{-1}$



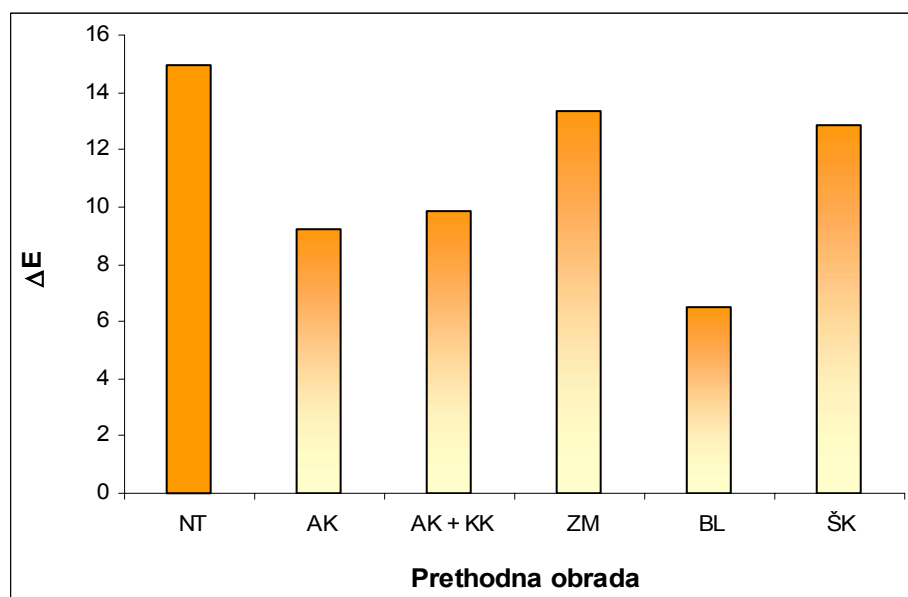
Slika 44. Ovisnost brzine sušenja uzoraka mrkve o bezdimenzionalnoj vlažnosti pri različitim temperaturama sušenja



Slika 45. Rehidracijski omjeri (RO) uzoraka mrkve u ovisnosti o načinu prethodne obrade uzoraka sušenih u tunelskom sušioniku (TD) pri temperaturi 60 °C i brzini strujanja zraka od 2,8 m s⁻¹ (NT – neobrađeni uzorci; AK – askorbinska kiselina; KK – kalcijev klorid; BL – blanširanje u vreloj vodi; ZM – zamrzavanje; ŠK - škrob)

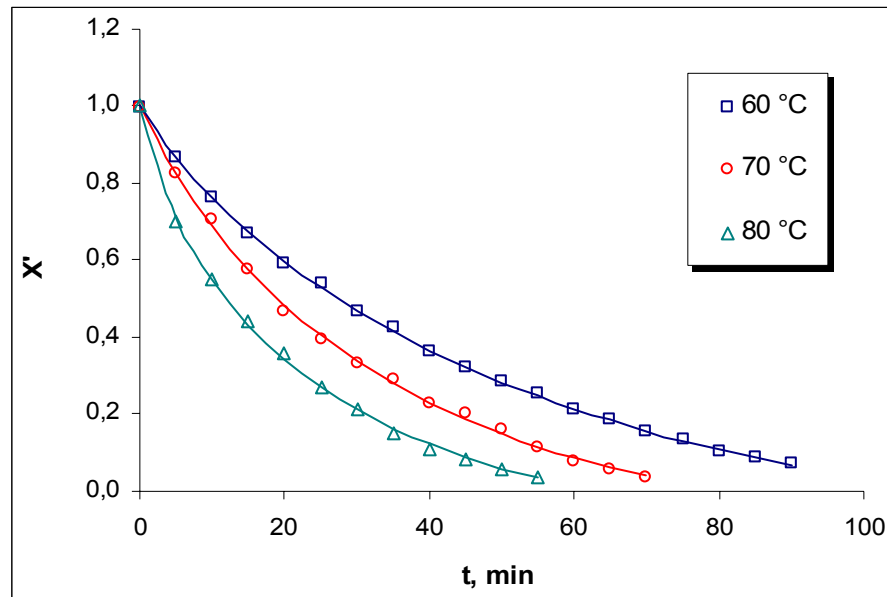


Slika 46. Ovisnost promjene volumena uzoraka mrkve o načinu prethodne obrade uzoraka sušenih u tunelskom sušioniku (TD) pri temperaturi 60 °C i brzini strujanja zraka od 2,8 m s⁻¹ (NT – neobrađeni uzorci; AK – askorbinska kiselina; KK – kalcijev klorid; BL – blanširanje u vreloj vodi; ZM – zamrzavanje; ŠK - škrob)

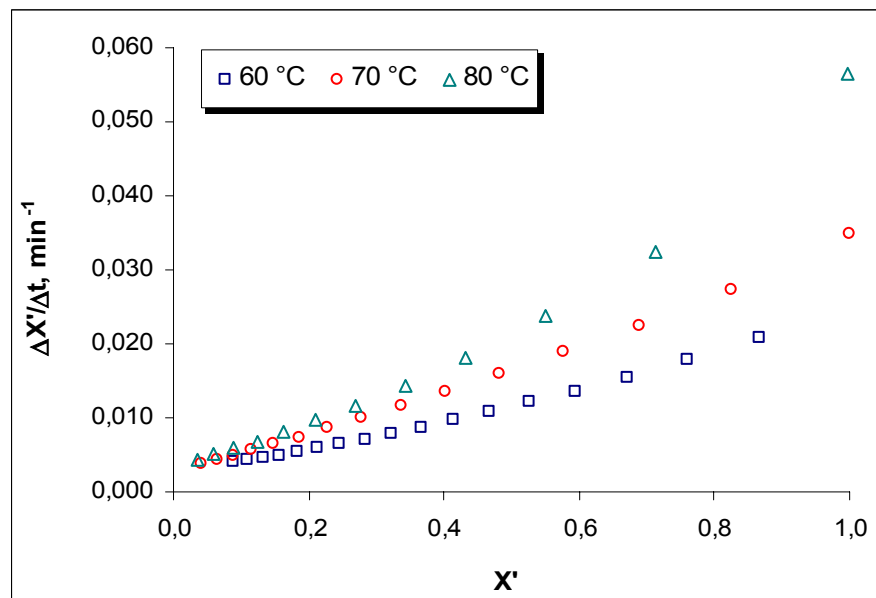


Slika 47. Ovisnost ukupne promjene boje uzoraka mrkve (ΔE) o načinu prethodne obrade uzoraka sušenih u tunelskom sušioniku (TD) pri temperaturi 60 °C i brzini strujanja zraka od 2,8 m s⁻¹ (NT – neobrađeni uzorci; AK – askorbinska kiselina; KK – kalcijev klorid; BL – blanširanje u vreloj vodi; ZM – zamrzavanje; ŠK - škrob)

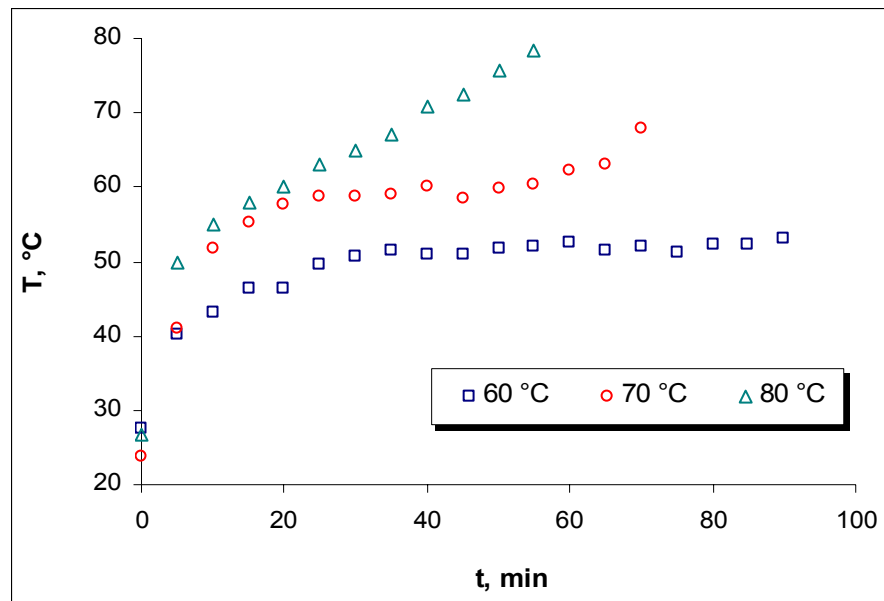
Sušionik za sušenje u fluidiziranom sloju (FBD); uzorak - mrkva; $v = 3,5 \text{ m s}^{-1}$



Slika 48. Ovisnost bezdimenzionalne vlažnosti uzorka mrkve o vremenu sušenja pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od $3,5 \text{ m s}^{-1}$ (eksperimentalni podaci - simboli; aproksimacijski model - puna linija)

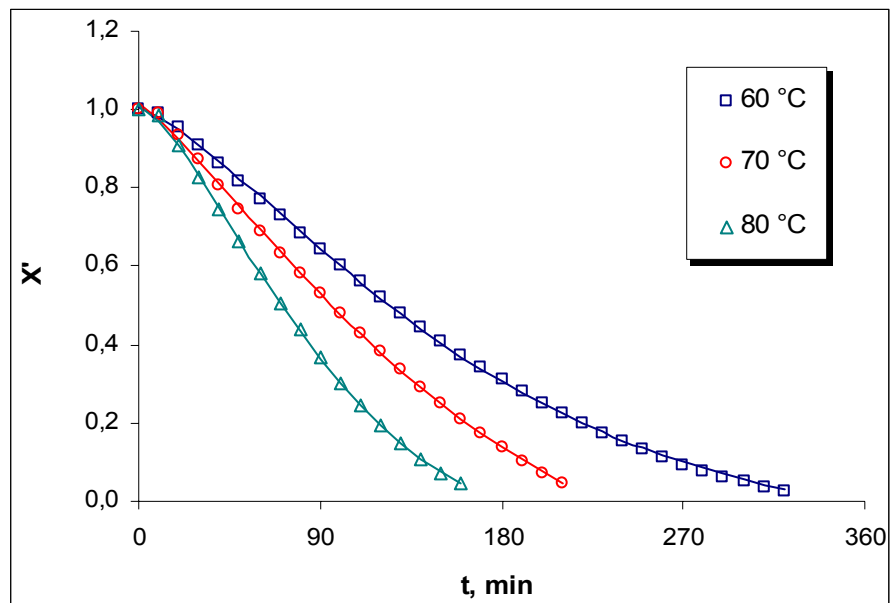


Slika 49. Ovisnost brzine sušenja uzorka mrkve o bezdimenzionalnoj vlažnosti tijekom sušenja u sušioniku s fluidiziranim slojem (FBD) pri različitim temperaturama sušenja



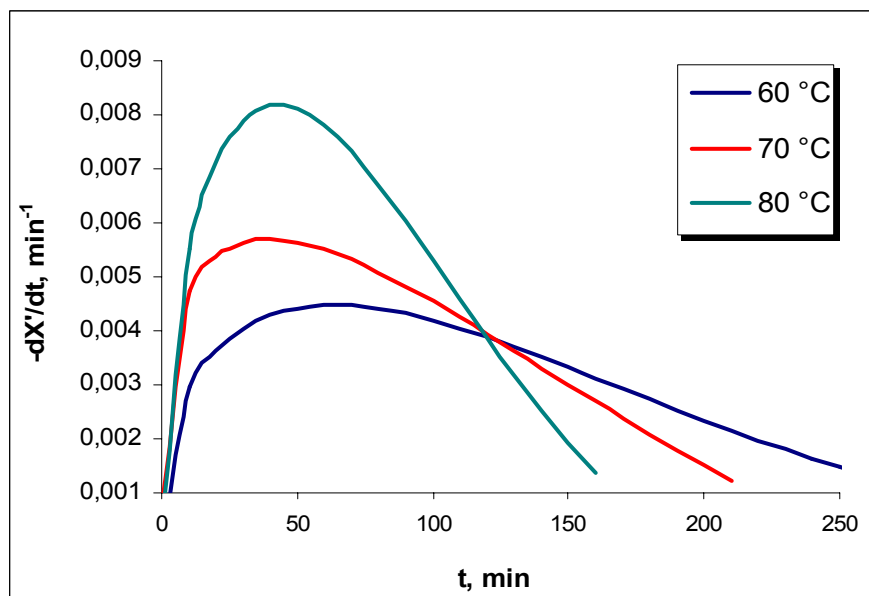
Slika 50. Promjena temperature u uzorcima mrkve tijekom sušenja u sušioniku s fluidiziranim slojem (FBD) pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od $3,5 \text{ m s}^{-1}$

Infracrveni sušionik (IC); uzorak - mrkva

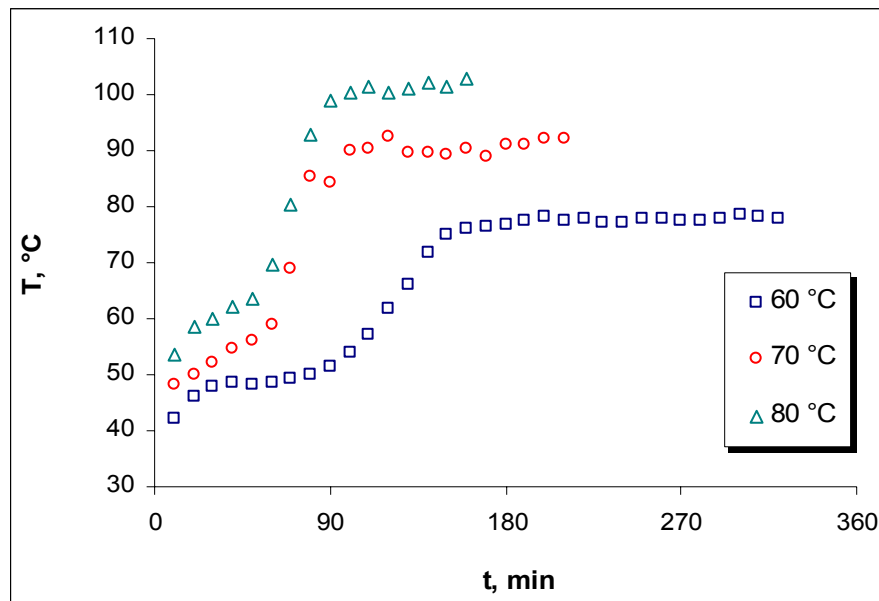


Slika 51. Ovisnost bezdimenzionalne vlažnosti uzorka mrkve o vremenu sušenja pri različitim temperaturama sušenja

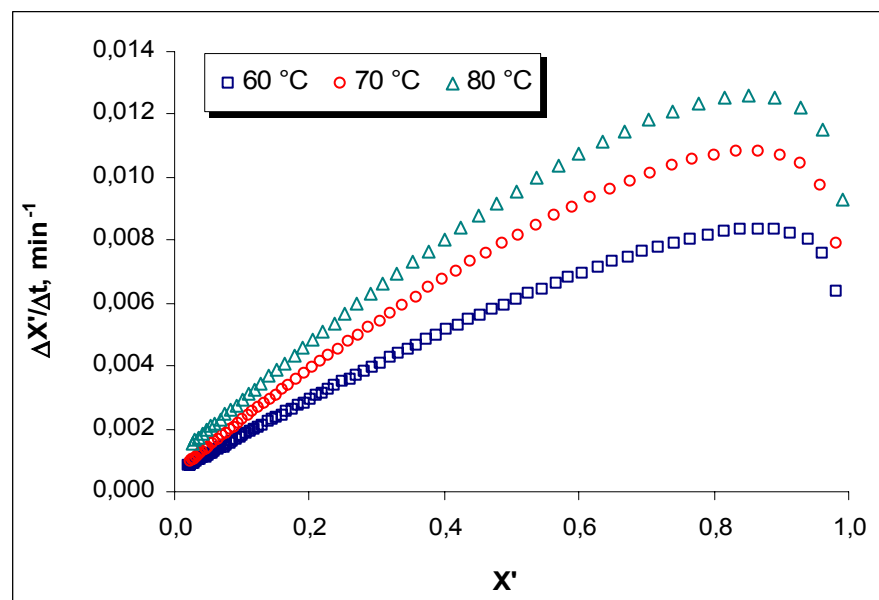
(eksperimentalni podaci - simboli; aproksimacijski model - puna linija)



Slika 52. Ovisnost brzine sušenja uzorka mrkve o vremenu sušenja pri različitim temperaturama sušenja

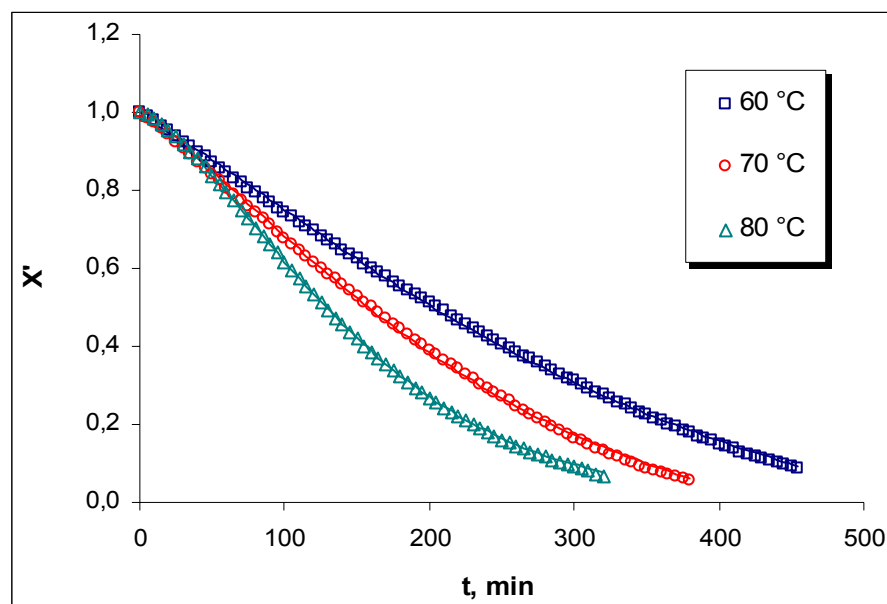


Slika 53. Promjena temperature u uzorcima mrkve tijekom sušenja u infracrvenom sušioniku (IC) pri različitim temperaturama sušenja

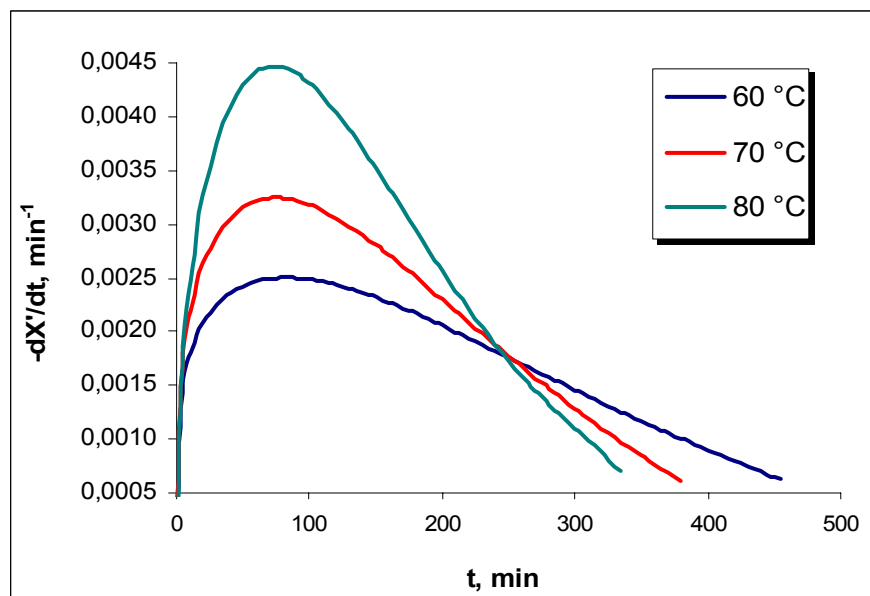


Slika 54. Ovisnost brzine sušenja uzoraka mrkve o bezdimenzionalnoj vlažnosti tijekom sušenja u infracrvenom sušioniku (IC) pri različitim temperaturama sušenja

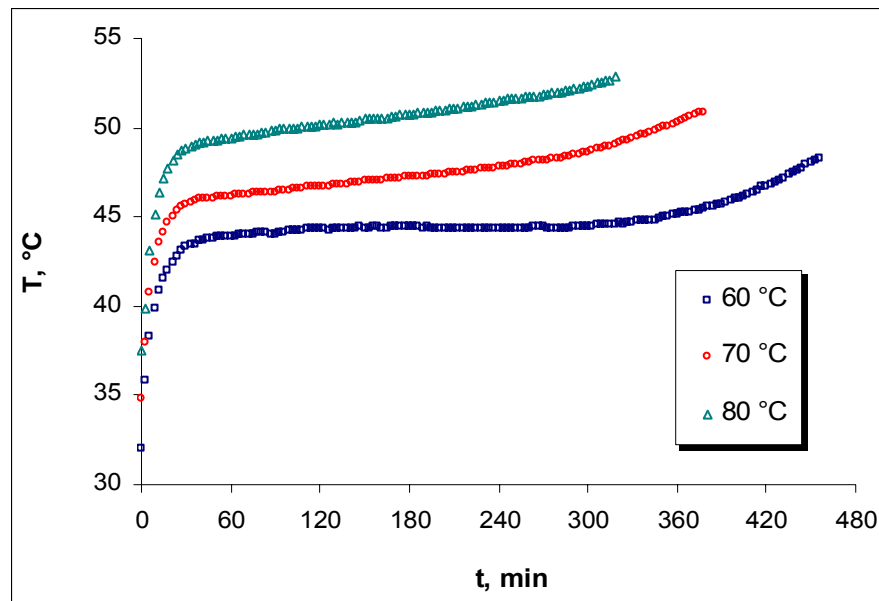
Vakuum sušionik (VS); uzorak – mrkva; $p = -40 \text{ Pa}$



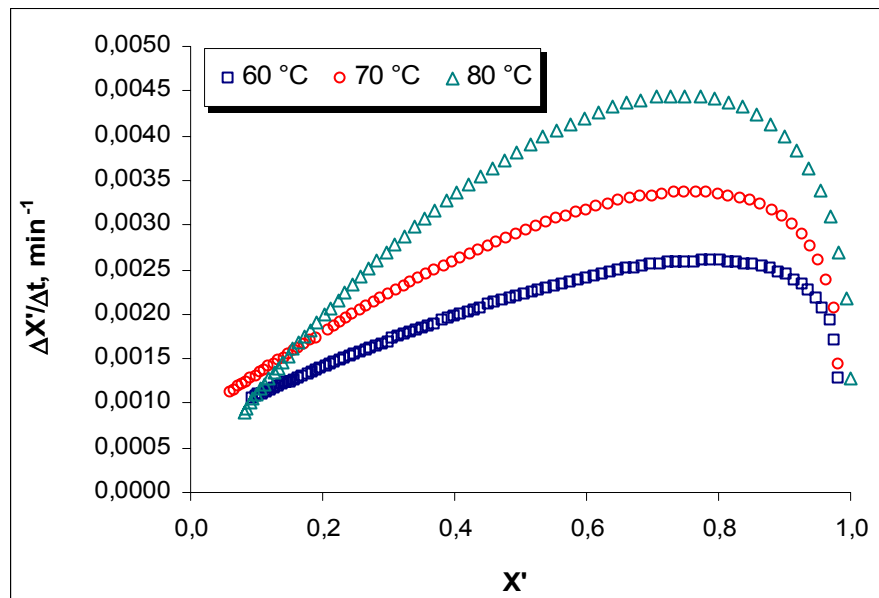
Slika 55. Ovisnost bezdimenzionalne vlažnosti o vremenu sušenja pri različitim temperaturama sušenja za vakuum sušenje (VS) uzorka mrkve (eksperimentalni podaci - simboli; aproksimacijski model - puna linija)



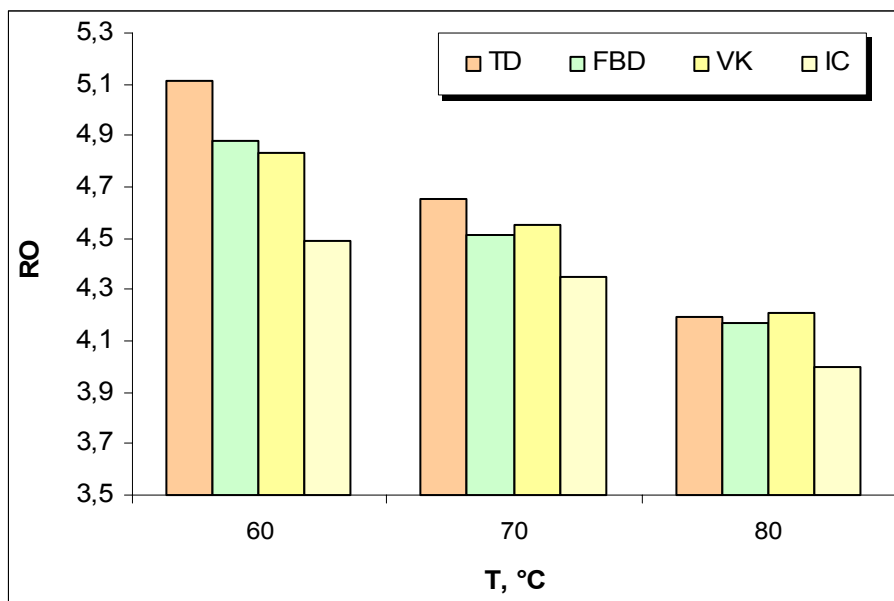
Slika 56. Ovisnost brzine sušenja uzorka mrkve o vremenu sušenja pri različitim temperaturama sušenja



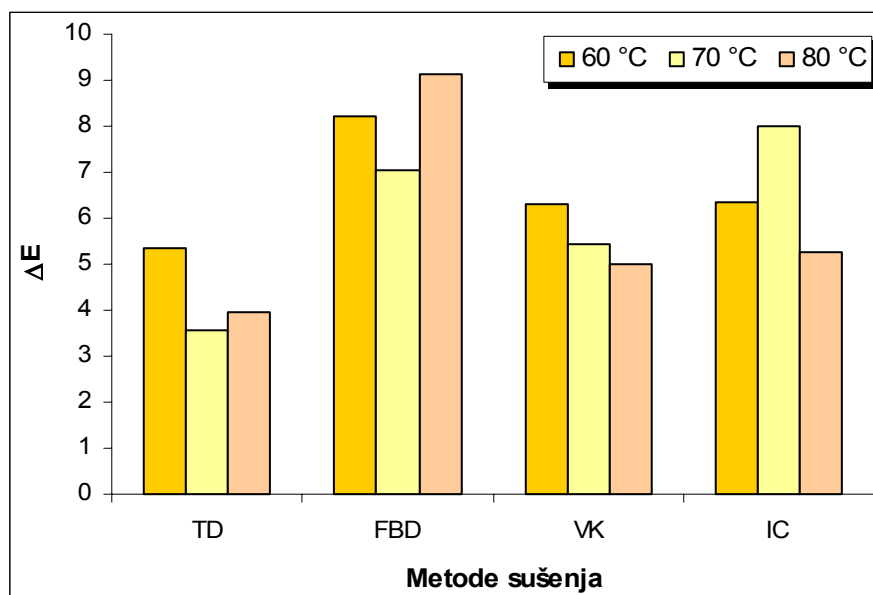
Slika 57. Promjena temperature u uzorcima mrkve tijekom vakuum sušenja (VS) pri različitim temperaturama sušenja



Slika 58. Ovisnost brzine sušenja uzoraka mrkve o bezdimenzionalnoj vlažnosti pri različitim temperaturama sušenja

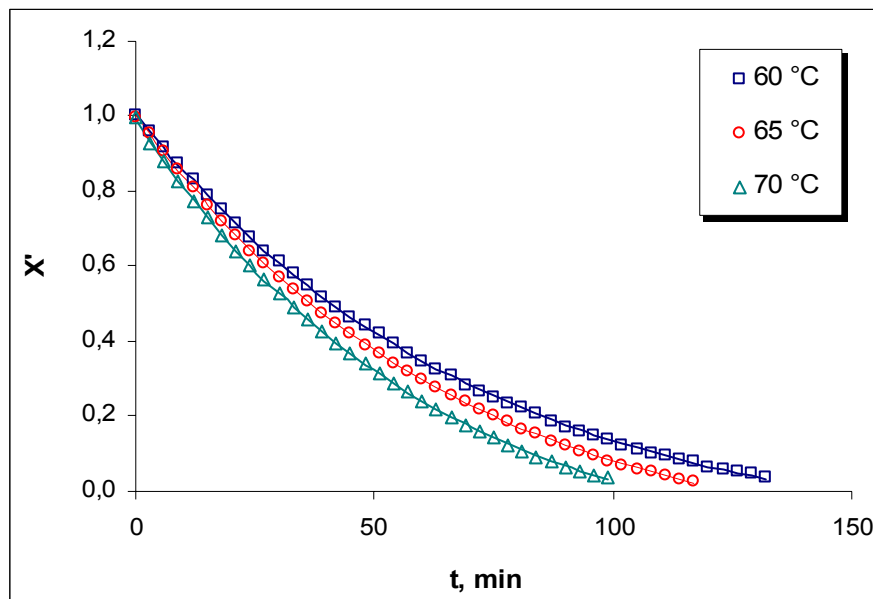


Slika 59. Rehidracijski omjeri (RO) uzoraka mrkve u ovisnosti o različitim metodama i različitim temperaturama sušenja (TD – tunelski sušionik; FBD – sušionik za sušenje s fluidiziranim slojem; VK – vakuum sušionik; IC – infracrveni sušionik)

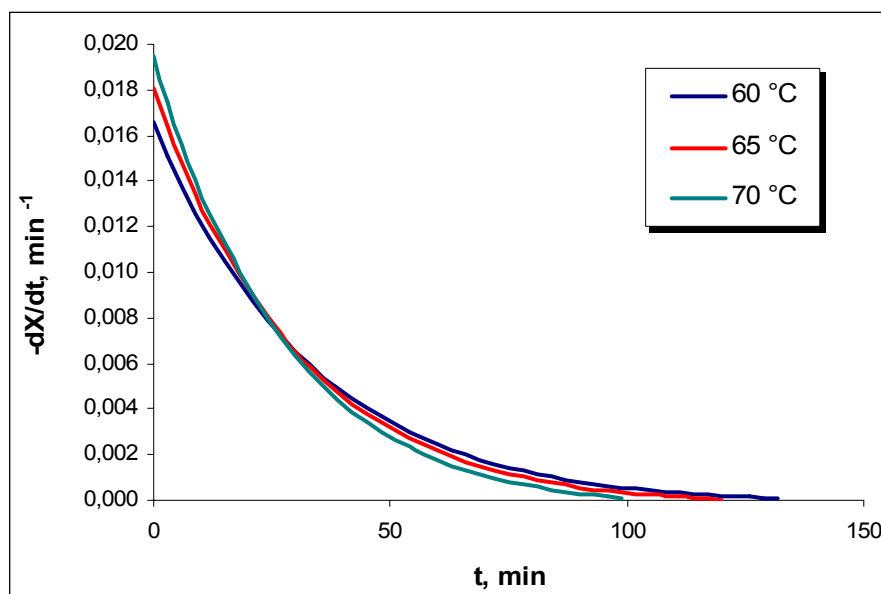


Slika 60. Ukupna promjena boje uzoraka mrkve (ΔE) u ovisnosti o različitim metodama i različitim temperaturama sušenja (TD – tunelski sušionik; FBD – sušionik za sušenje s fluidiziranim slojem; VK – vakuum sušionik; IC – infracrveni sušionik)

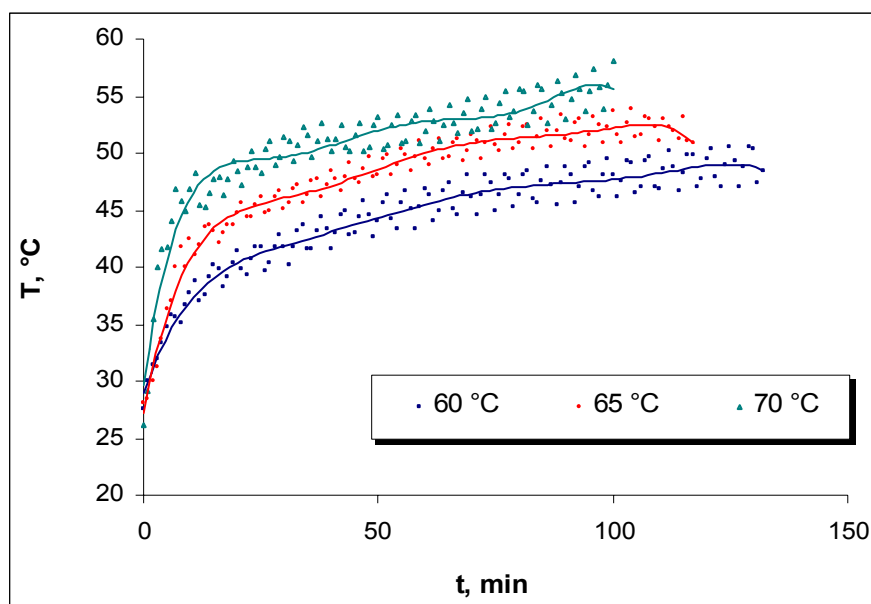
Tunelski sušionik (TD); uzorak – peršin; $v = 2,8 \text{ m s}^{-1}$



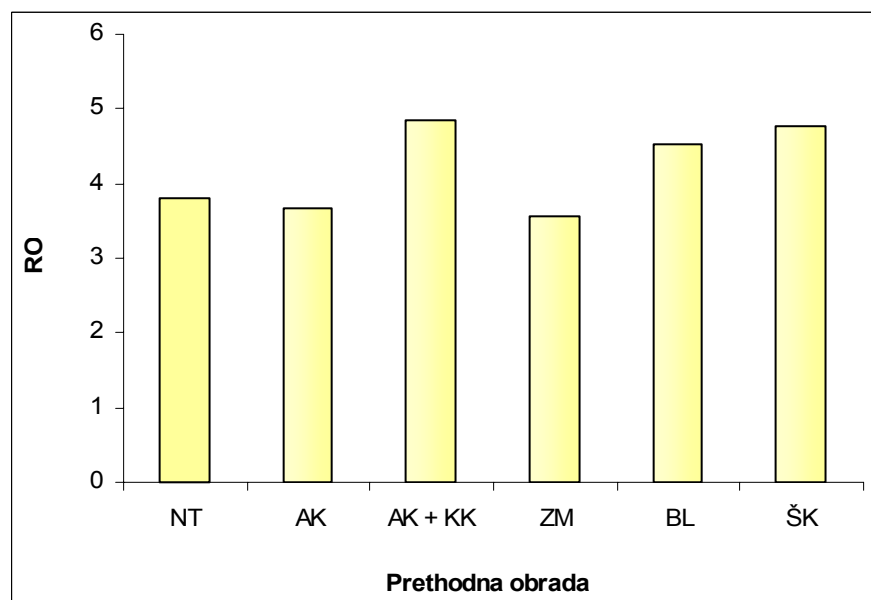
Slika 61. Ovisnost bezdimenzionalne vlažnosti uzorka peršina o vremenu sušenja pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od $2,8 \text{ m s}^{-1}$ (eksperimentalni podaci - simboli; aproksimacijski model - puna linija)



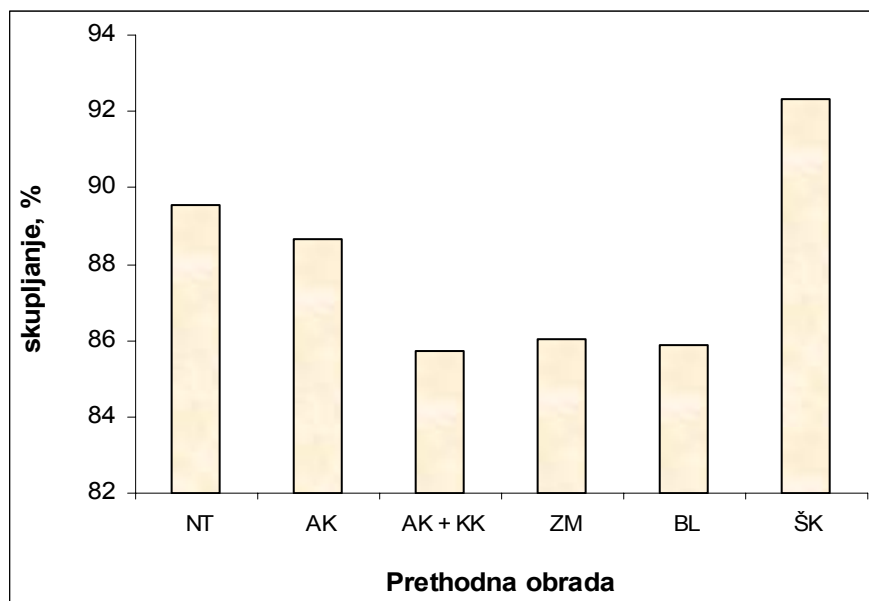
Slika 62. Ovisnost brzine sušenja uzorka peršina o vremenu sušenja pri različitim temperaturama sušenja



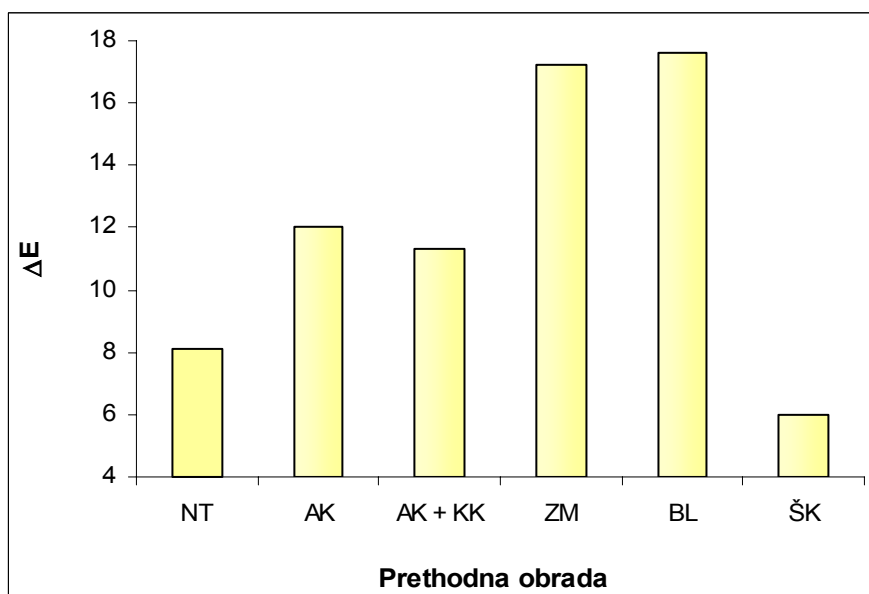
Slika 63. Promjena temperature u uzorcima peršina sušenih u tunelskom sušioniku (TD) pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od $2,8 \text{ m s}^{-1}$



Slika 64. Rehidracijski omjeri (RO) uzoraka peršina u ovisnosti o načinu prethodne obrade uzoraka sušenih u tunelskom sušioniku (TD) pri temperaturi 60 °C i brzini strujanja zraka od $2,8 \text{ m s}^{-1}$ (NT – neobrađeni uzorci; AK – askorbinska kiselina; KK – kalcijev klorid; ZM – zamrzavanje; BL – blanširanje; ŠK – škrob)

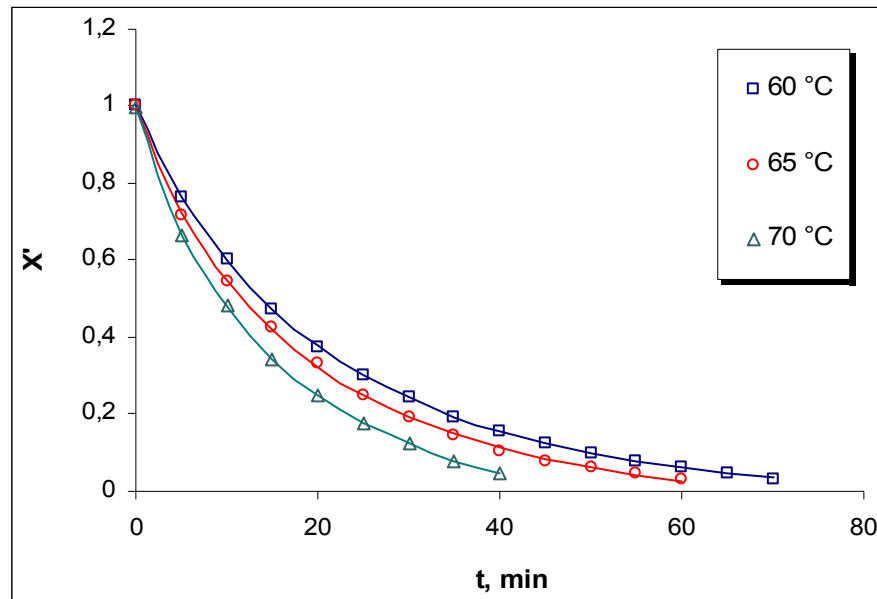


Slika 65. Ovisnost promjene volumena uzoraka peršina o načinu prethodne obrade uzoraka sušenih u tunelskom sušioniku (TD) pri temperaturi 60 °C i brzini strujanja zraka od 2,8 m s⁻¹

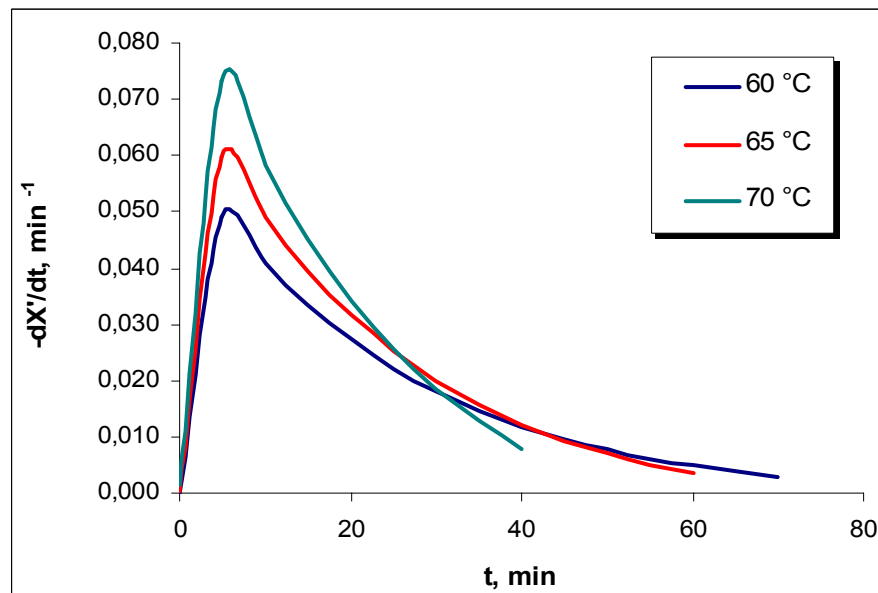


Slika 66. Ukupna promjena boje uzoraka peršina (ΔE) u ovisnosti o načinu prethodne obrade uzoraka sušenih u tunelskom sušioniku (TD) pri temperaturi 60 °C i brzini strujanja zraka od 2,8 m s⁻¹ (NT – neobrađeni uzorci; AK – askorbinska kiselina; KK – kalcijev klorid; ZM – zamrzavanje; BL – blanširanje; ŠK – škrob)

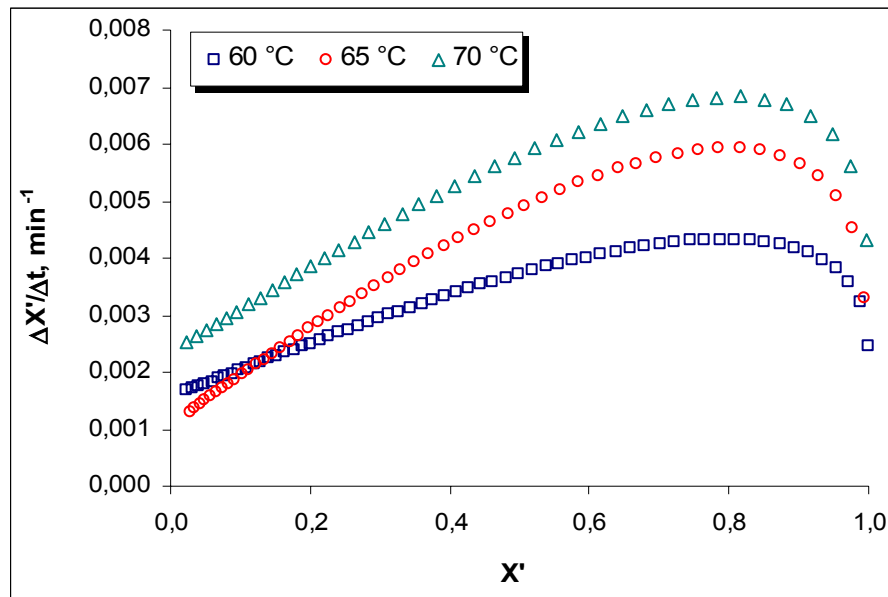
Sušionik za sušenje u fluidiziranom sloju (FBD); uzorak – peršin; $v = 3,5 \text{ m s}^{-1}$



Slika 67. Ovisnost bezdimenzionalne vlažnosti uzorka peršina o vremenu sušenja pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od $3,5 \text{ m s}^{-1}$ (eksperimentalni podaci - simboli; aproksimacijski model - puna linija)

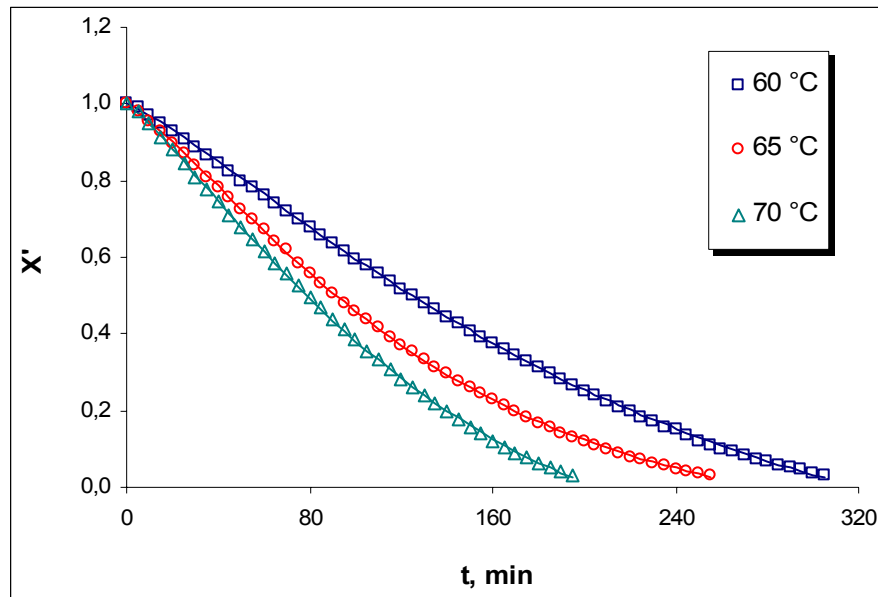


Slika 68. Ovisnost brzine sušenja uzorka peršina o vremenu sušenja pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od $3,5 \text{ m s}^{-1}$

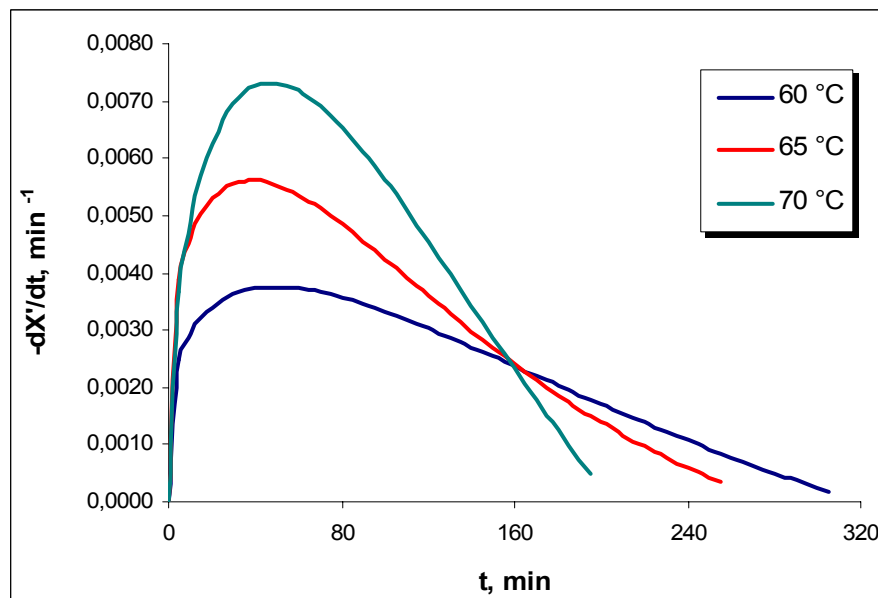


Slika 69. Ovisnost brzine sušenja uzoraka peršina o bezdimenzionalnoj vlažnosti za uzorke sušene u sušioniku s fluidiziranim slojem (FBD) pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od $3,5 \text{ m s}^{-1}$

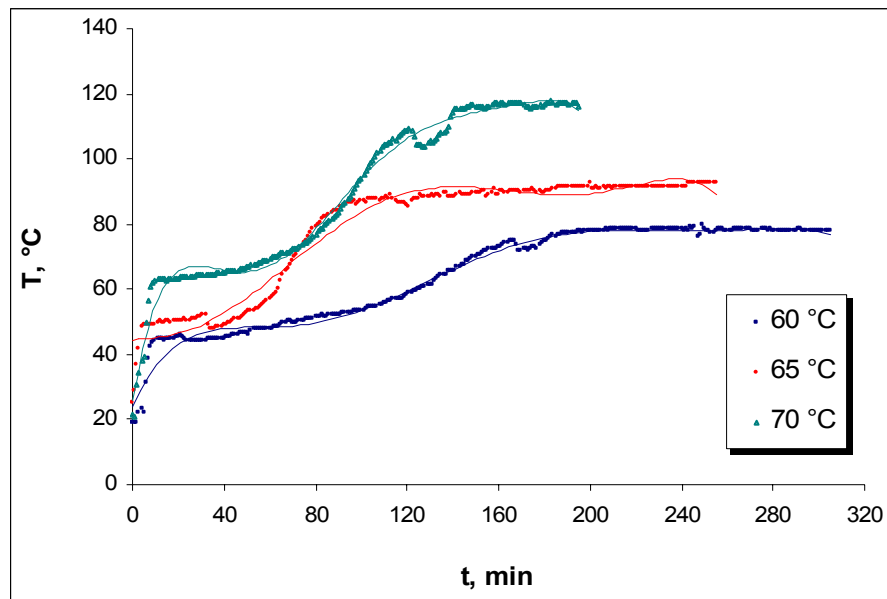
Infracrveni sušionik (IC); uzorak – peršin



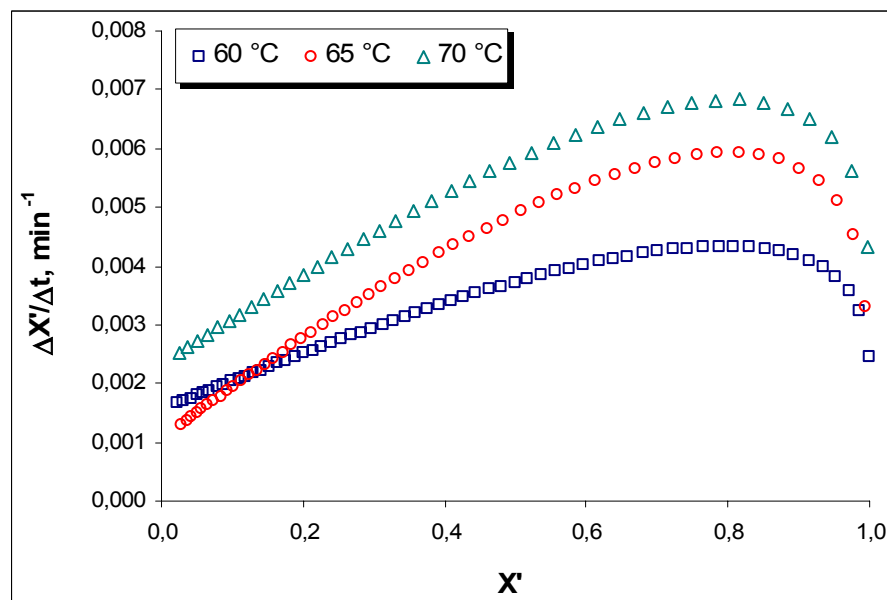
Slika 70. Ovisnost bezdimenzionalne vlažnosti uzorka peršina o vremenu sušenja pri različitim temperaturama sušenja za uzorke sušene u IC sušioniku (eksperimentalni podaci - simboli; aproksimacijski model - puna linija)



Slika 71. Ovisnost brzine sušenja uzorka peršina o vremenu sušenja pri različitim temperaturama sušenja za uzorke sušene u IC sušioniku

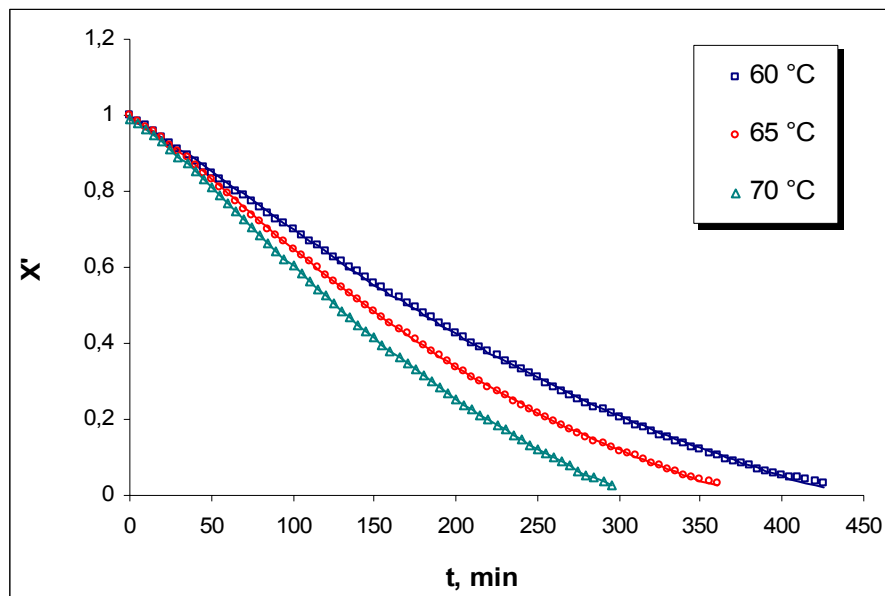


Slika 72. Promjena temperature u uzorcima peršina pri različitim temperaturama sušenja za uzorke sušene u IC sušioniku

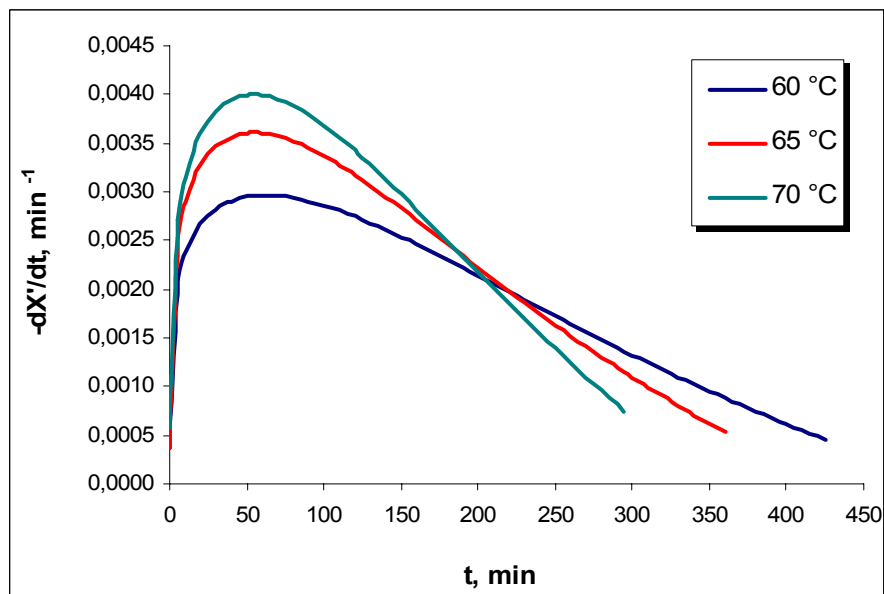


Slika 73. Ovisnost brzine sušenja uzoraka peršina o bezdimenzionalnoj vlažnosti pri različitim temperaturama sušenja za uzorke sušene u IC sušioniku

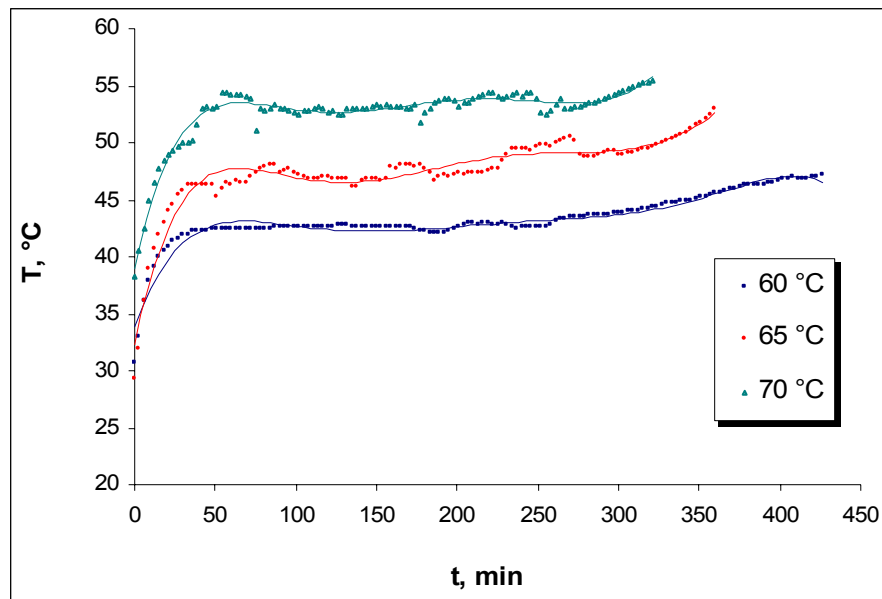
Vakuum sušionik (VK); uzorak – peršin; $p = -15 \text{ Pa}$



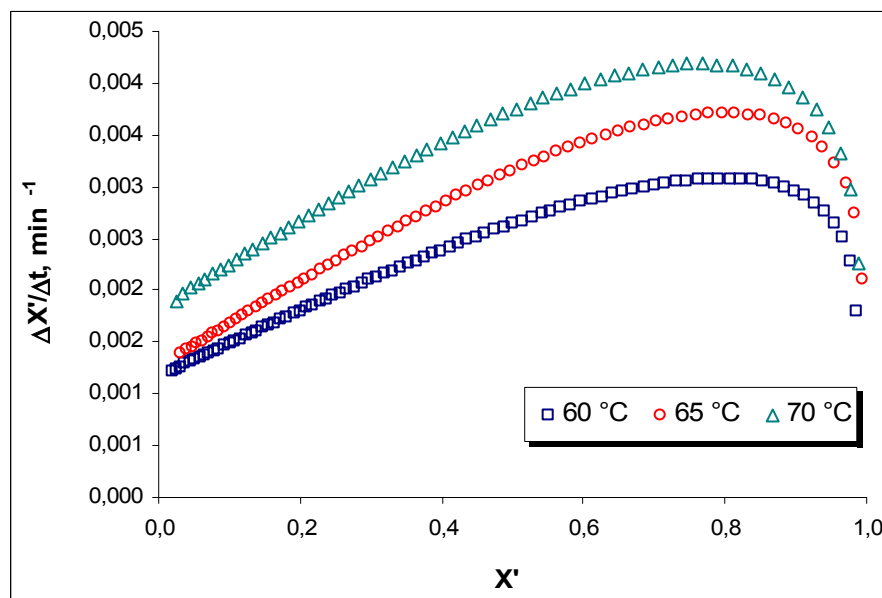
Slika 74. Ovisnost bezdimenzionalne vlažnosti o vremenu sušenja pri različitim temperaturama sušenja za uzorke peršina sušene u vakuum sušioniku (eksperimentalni podaci - simboli; aproksimacijski model - puna linija)



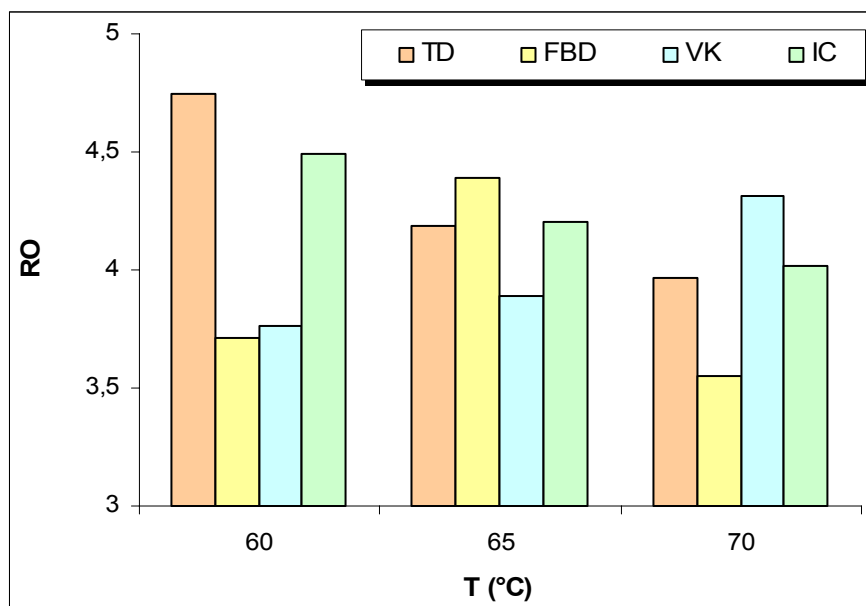
Slika 75. Ovisnost brzine sušenja o vremenu sušenja pri različitim temperaturama sušenja za uzorke peršina sušene u vakuum sušioniku



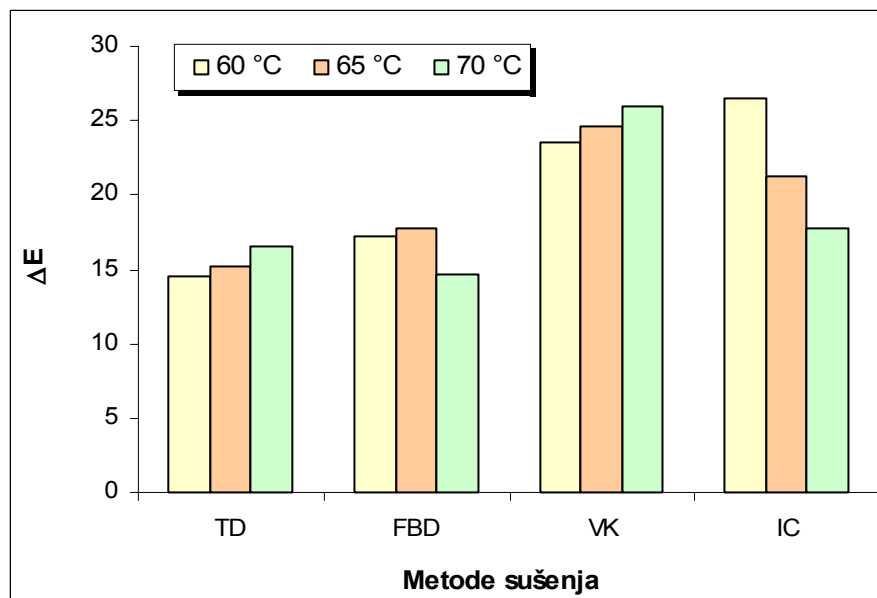
Slika 76. Promjena temperature pri različitim temperaturama sušenja za uzorke peršina sušene u vakuum sušioniku



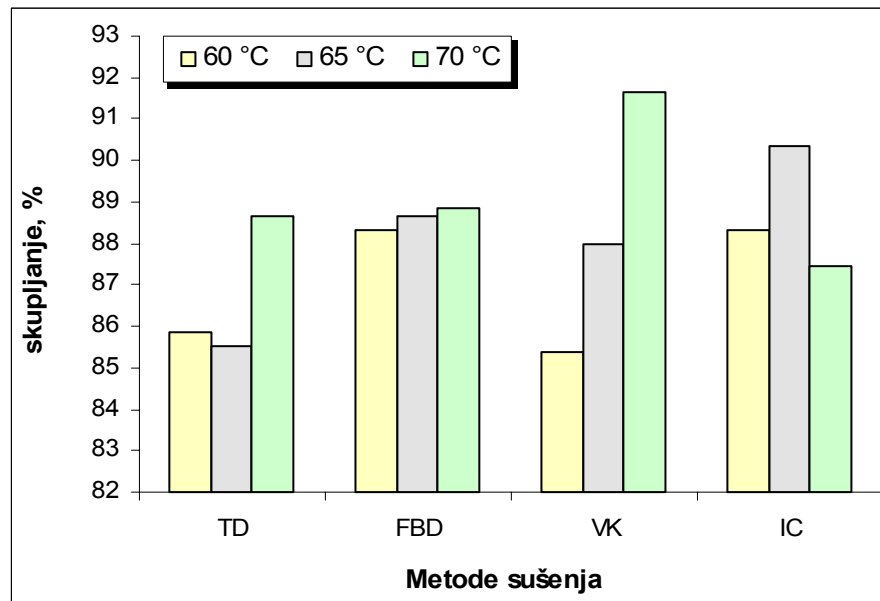
Slika 77. Ovisnost brzine sušenja o bezdimenzionalnoj vlažnosti pri različitim temperaturama sušenja za uzorke peršina sušene u vakuum sušioniku



Slika 78. Rehidracijski omjeri (RO) uzoraka peršina u ovisnosti o različitim metodama i različitim temperaturama sušenja (TD – tunelski sušionik; FBD – sušionik za sušenje s fluidiziranim slojem; VK – vakuum sušionik; IC – infracrveni sušionik)



Slika 79. Ukupna promjena boje (ΔE) uzoraka peršina u ovisnosti o različitim metodama i različitim temperaturama sušenja (TD – tunelski sušionik; FBD – sušionik za sušenje s fluidiziranim slojem; VK – vakuum sušionik; IC – infracrveni sušionik)



Slika 80. Promjena volumena uzoraka peršina u ovisnosti o različitim metodama i različitim temperaturama sušenja (TD – tunelski sušionik; FBD – sušionik za sušenje s fluidiziranim slojem; VK – vakuum sušionik; IC – infracrveni sušionik)

4.3. REZULTATI KROMATOGRAFSKE ANALIZE

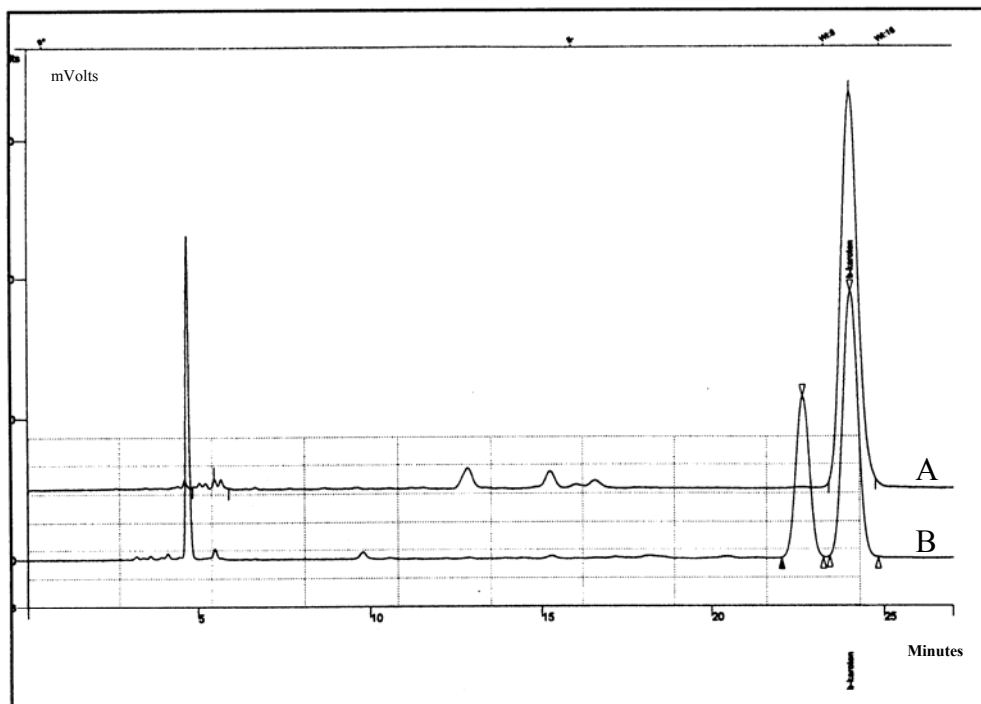
Tablica 30. Sadržaj β – karotena u svježim i osušenim uzorcima mrkve

UZORAK	Koncentracija (mg 100 g ⁻¹) ^a ± SD
Svježi uzorak	9,44 ± 0,25
60 TD	69,08 ± 1,10
70 TD	82,73 ± 1,66
80 TD	77,52 ± 2,23
60 FBD	59,31 ± 2,87
70 FBD	64,78 ± 2,58
80 FBD	50,76 ± 2,43
60 VK	64,66 ± 1,74
70 VK	72,50 ± 2,56
80 VK	74,40 ± 3,84
60 IC	64,27 ± 1,36
70 IC	58,45 ± 2,84
80 IC	65,56 ± 2,17

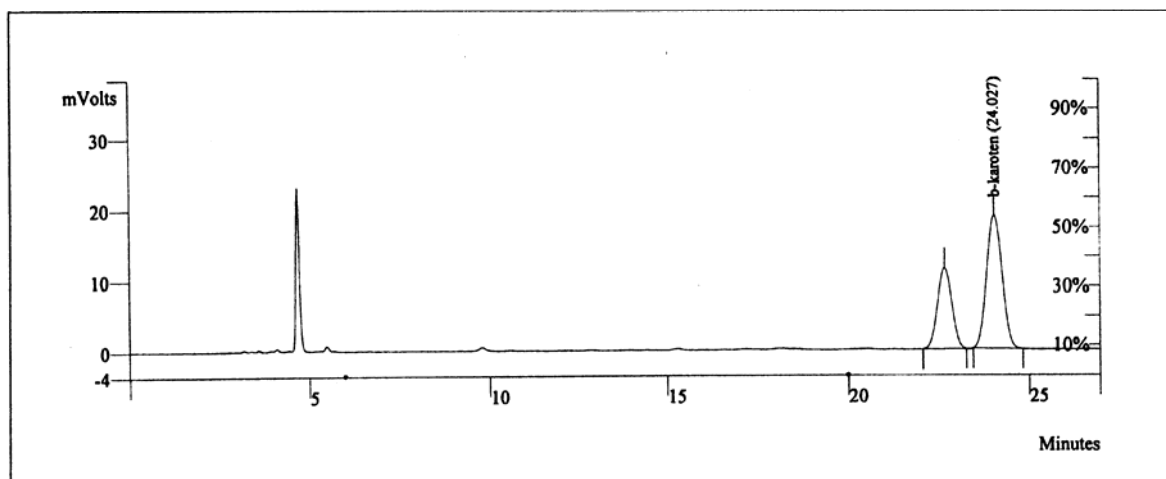
^a Rezultati su srednje vrijednosti četiri mjerenja za svježi uzorak, te tri mjerenja za osušene uzorke

Tablica 31. Sadržaj β – karotena u svježim i osušenim uzorcima mrkve izražena na suhu tvar pojedinih uzoraka

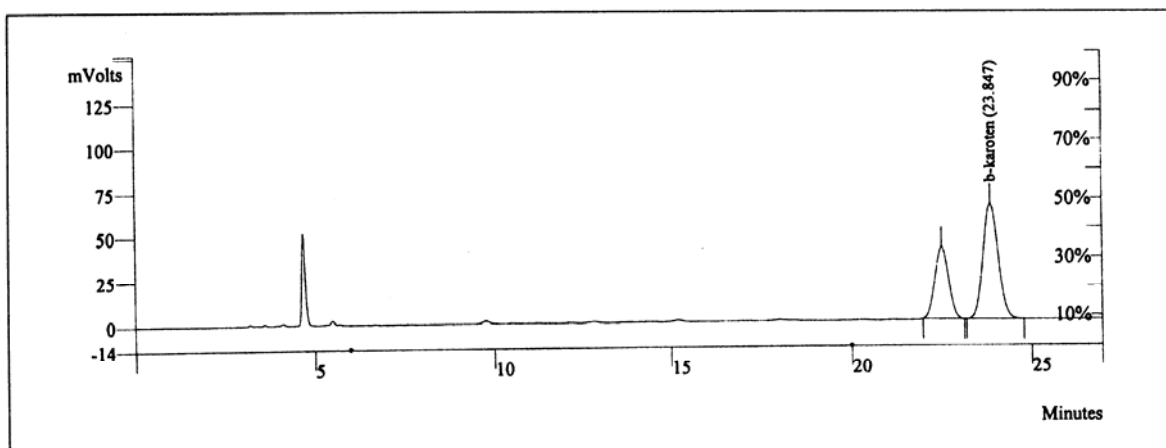
UZORAK	Koncentracija (mg g ⁻¹ _{st})
Svježi uzorak	0,787
60 TD	0,618
70 TD	0,728
80 TD	0,682
60 FBD	0,522
70 FBD	0,570
80 FBD	0,447
60 VK	0,569
70 VK	0,638
80 VK	0,655
60 IC	0,566
70 IC	0,514
80 IC	0,577



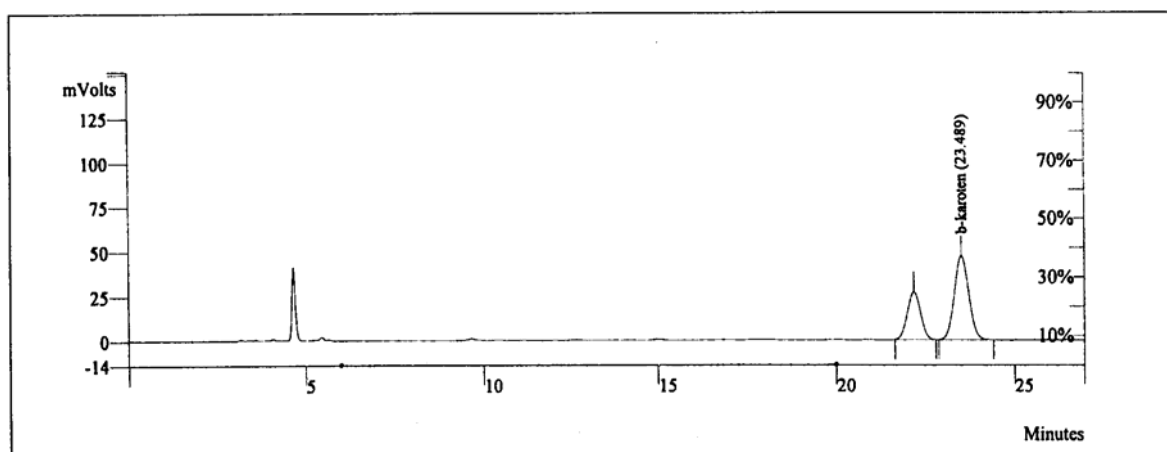
Slika 81. Kromatogram β – karotena u standardnom i ispitivanom uzorku mrkve
 A – standard β – karotena; B – ekstrakt svježeg uzorka mrkve



Slika 82. Kromatogram β – karotena u svježem uzorku mrkve
Kromatografska oznaka b-karoten (24.027)



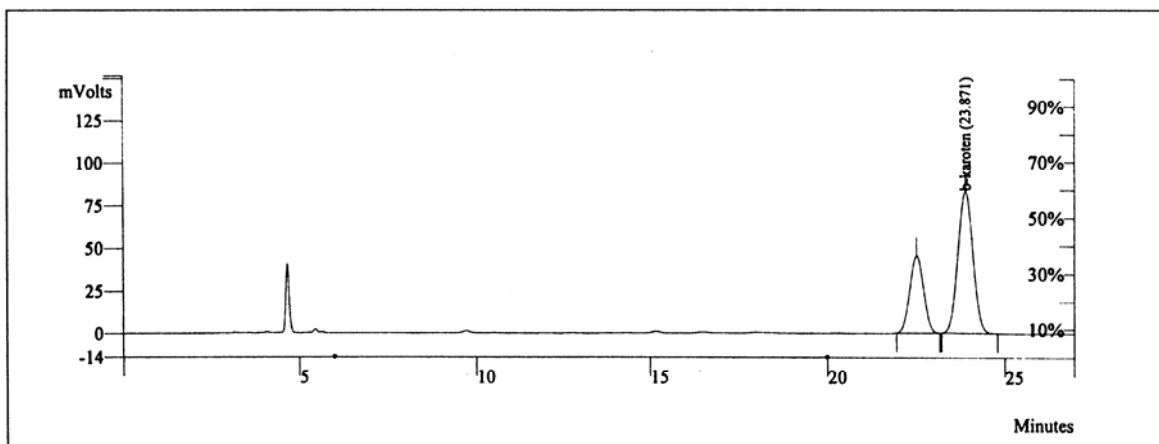
Slika 83. Kromatogram β – karotena u suhom uzorku mrkve
Kromatografska oznaka: b-karoten (23.847) – uzorak 70 TD



Slika 84. Kromatogram β – karotena u suhom uzorku mrkve
Kromatografska oznaka: b-karoten (23.489) – uzorak 70 FBD

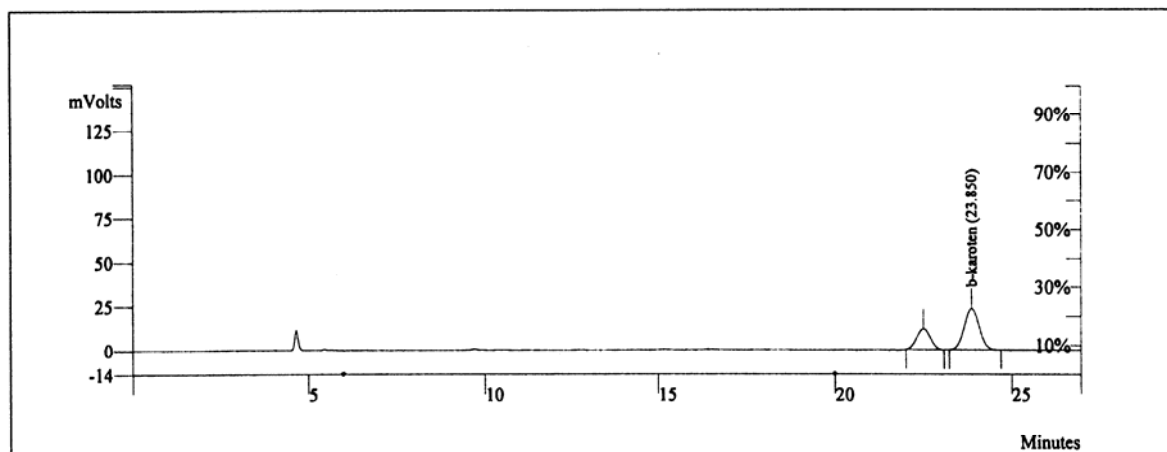
Kromatografski uvjeti

Kolona: Phenomenex Luna 5u C18 100A 250x4,60 mm; *Mobilna faza:* (CH₃CN+MeOH+DCM) (85+15+40 ml DCM/1 l); *Protok:* 0-6,0 min; 1-1,8 ml min⁻¹; 6,0-20 min; 1,8-2,0 ml min⁻¹; 20-30 min: 2,0 ml min⁻¹; *Detekcija:* 450 nm; *Temperatura:* 50 °C; *Injektirani volumen:* 20 μ l.



Slika 85. Kromatogram β – karotena u suhom uzorku mrkve

Kromatografska oznaka: b-karoten (23.871) – uzorak 70 IC

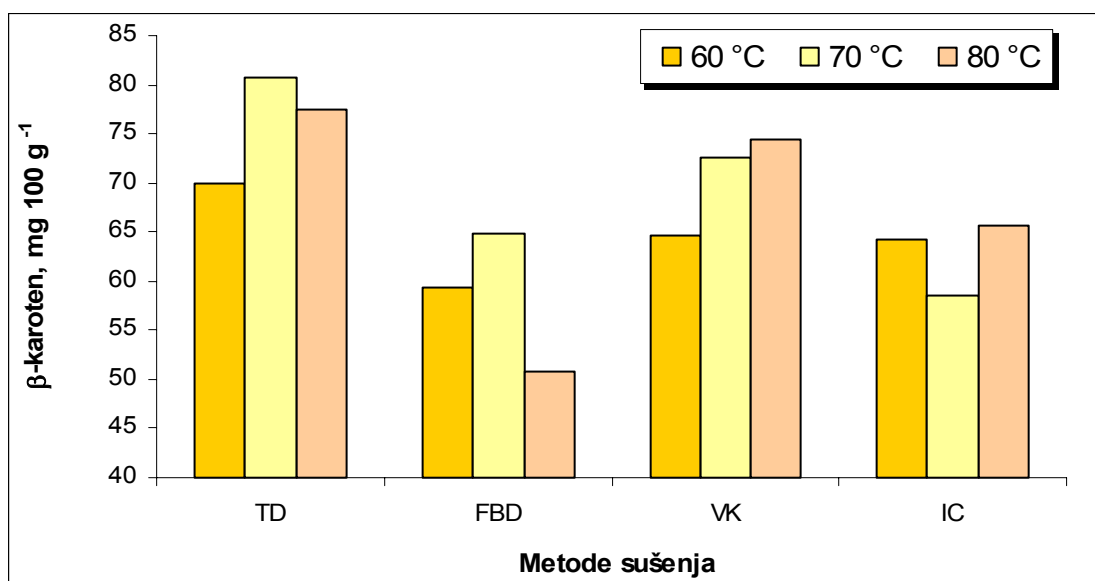


Slika 86. Kromatogram β – karotena u suhom uzorku mrkve

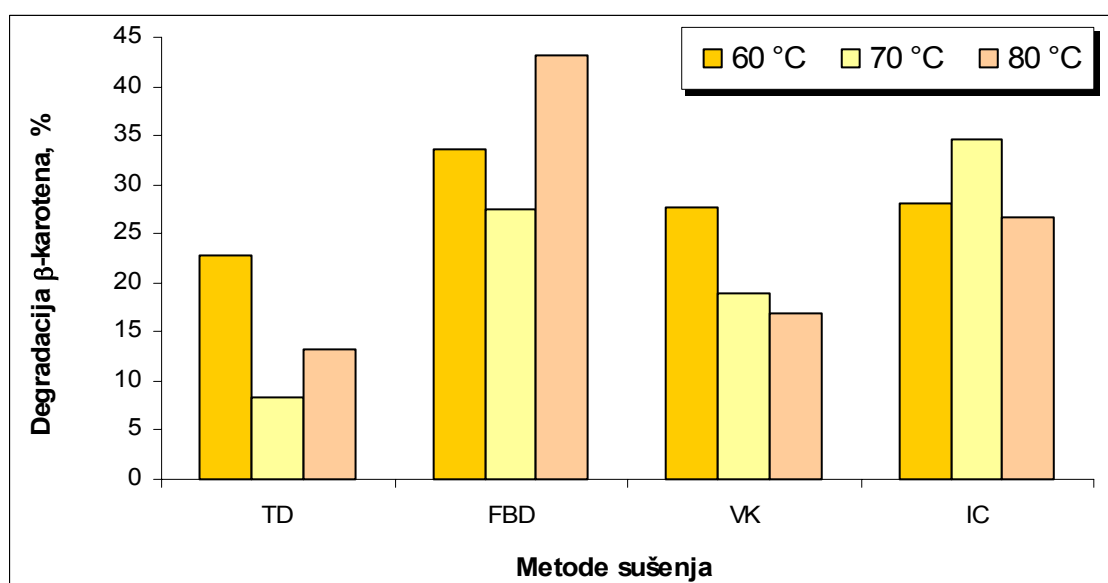
Kromatografska oznaka: b-karoten (23.850) – uzorak 70 VK

Kromatografski uvjeti

Kolona: Phenomenex Luna 5u C18 100A 250x4,60 mm; *Mobilna faza:* (CH₃CN+MeOH+DCM) (85+15+40 ml DCM/1 l); *Protok:* 0-6,0 min; 1-1,8 ml min⁻¹; 6,0-20 min; 1,8-2,0 ml min⁻¹; 20-30 min: 2,0 ml min⁻¹; *Detekcija:* 450 nm; *Temperatura:* 50 °C; *Injektirani volumen:* 20 μ l.



Slika 87. Sadržaj β -karotena u osušenim uzorcima mrkve u ovisnosti o različitim metodama i temperaturama sušenja



Slika 88. Degradacija β -karotena u osušenim uzorcima mrkve u ovisnosti o različitim metodama i temperaturama sušenja

5. RASPRAVA

Istraživanje kinetike sušenja provedeno je primjenom termogravimetrijske tehnike na laboratorijskim uređajima koji su za potrebe ovog rada posebno nadograđeni i opremljeni: tunelski sušionik (TD), sušionik za sušenje s fluidiziranim slojem (FBD), infra-crveni sušionik (IC), te vakuum sušionik (VK). Sva ispitivanja su provedena na prehrambenim materijalima, i to uzorcima voća i povrća. Sušenje je provedeno pri temperaturama od 50 °C, 60 °C, 70 °C i 80 °C za uzorke marelice i jabuke; pri temperaturama od 60 °C, 70 °C i 80 °C za uzorke mrkve, te pri temperaturama od 60 °C, 65 °C i 70 °C za uzorke peršina.

Za matematičko modeliranje i aproksimaciju eksperimentalnih podataka detaljno je ispitano šest prethodno selekcioniranih matematičkih modela (jednadžbe tankog sloja) navedenih u tablici 9. Parametri sušenja, koeficijenti i konstante u navedenim matematičkim modelima određeni su regresijskim putem i to metodom nelinearne regresije u računalnom programu Statistica 6.0. Kao pokazatelji uspješnosti aproksimacije eksperimentalnih podataka za svaki odabrani model korišteni su: indeks korelacije (R), srednje odstupanje podataka (MBE), srednje kvadratno odstupanje (RMSE), reducirani hi-kvadrat (χ^2) i t-test. Matematički model koji je pokazao najbolje slaganje s eksperimentalnim podacima promjene vlažnosti poslužio je za daljnju izradu novih poluempirijskih modela kinetike sušenja odabranih uzoraka voća i povrća.

U tablici 10 dan je prikaz rezultata statističke analize odabranih matematičkih modela za uzorke marelice sušene u tunelskom sušioniku (TD) pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od 1,4 m s⁻¹. Vidljivo je da pri svim temperaturama sušenja (50 °C, 60 °C, 70 °C i 80 °C) najbolje slaganje s eksperimentalnim rezultatima daje Midilli i Kucukov model. Također, statističkom analizom eksperimentalnih podataka promjene vlažnosti za uzorke marelice dobivenih pri različitim temperaturama sušenja (50 °C, 60 °C, 70 °C i 80 °C) i brzinama strujanja zraka od 2,1 m s⁻¹ i 2,8 m s⁻¹ najbolje slaganje s eksperimentalnim rezultatima daje Midilli i Kucukov model. Ovakva spoznaja poslužila je za izradu novog poluempirijskog modela koji opisuje proces sušenja uzoraka marelice, budući da su procesni uvjeti, temperatura sušenja i brzina strujanja zraka, mijenjani u širem intervalu mjerenja, što je nadalje omogućilo ispitivanje ovisnosti koeficijenata odabranog matematičkog modela o stvarnim procesnim uvjetima.

Tablica 15 prikazuje vrijednosti konstanti i koeficijenta sušenja odabranog modela (28) za uzorke marelice dobivene metodom nelinearne regresije u ovisnosti o procesnim parametrima: temperaturama sušenja od 50 °C, 60 °C, 70 °C i 80 °C i brzinama strujanja zraka od 1,4 m s⁻¹; 2,1 m s⁻¹; te 2,8 m s⁻¹. Tablica 15 prikazuje vrijednosti koeficijenta (β) dobivene metodom višestruke linearne regresije za pojedine parametre sušenja u modelu (28) pri ispitanim procesnim parametrima. Pa tako za model:

$$X'(t) = a \cdot e^{-k \cdot t^n} + b \cdot t$$

vrijednosti konstanti i koeficijenta sušenja (a , k , n , b) u ovisnosti o temperaturi sušenja i brzina strujanja zraka dane su sljedećim izrazima:

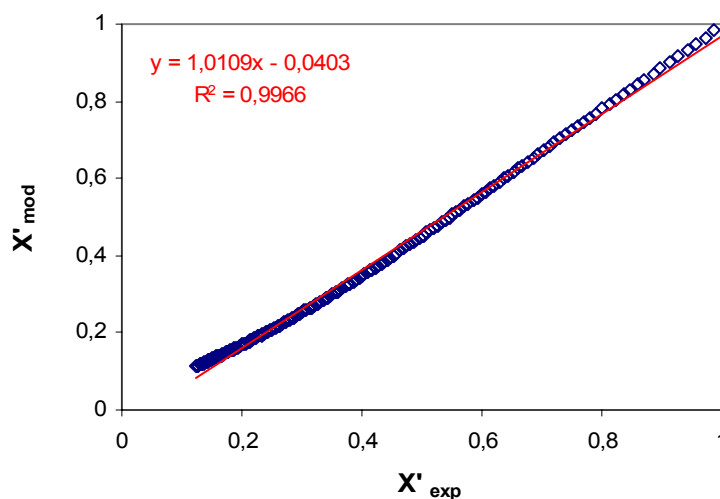
$$a = 1,028821 - 0,00622 \cdot T + 0,004416 \cdot v$$

$$k = 0,002909 - 0,000051 \cdot T + 0,001600 \cdot v$$

$$n = 0,567352 + 0,008821 \cdot T - 0,068153 \cdot v$$

$$b = 0,000186 - 0,000002 \cdot T - 0,000063 \cdot v$$

Na takav način dobio se novi poluempirijski model koji može poslužiti za simuliranje kinetike sušenja uzoraka marelice unutar granica ispitanih procesnih parametara.



Slika 89. Eksperimentalne i modelne (simulacijske) vrijednosti bezdimenzionalne vlažnosti za uzorke marelice pri temperaturi 50 °C i brzini strujanja zraka od 1,4 m s⁻¹

Novi model je ponovo podvrgnut testiranju uspješnosti aproksimacije eksperimentalnih podataka promjene vlažnosti pomoću ranije navedenih statističkih alata u zadanom intervalu mjerenja, te je utvrđeno da je konzistentnost i primjenjivost modela visoka. Na slici 89 dan je odnos eksperimentalnih vrijednosti bezdimenzionalne vlažnosti i vrijednosti bezdimenzionalne vlažnosti dobivene korištenjem novog poluempirijskog modela za sušenje uzoraka marelice pri temperaturi 50 °C i brzini strujanja zraka od 1,4 m s⁻¹. Statistički pokazatelji ($r = 0,9983$ i $\chi^2 = 0,001513$) potvrđuju primjenjivost dobivenog modela. Dobru aproksimaciju eksperimentalnih podataka sušenja marelice s novim poluempirijskim modelom potvrđuju visoke vrijednosti koeficijenta korelacije podataka (0,9827 – 0,9998) za sva ostala testiranja modela unutar granica ispitanih procesnih parametara.

U tablici 11 dan je prikaz rezultata statističke analize odabranih matematičkih modela za uzorke jabuke sušene u tunelskom sušioniku (TD) pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od 2,8 m s⁻¹. Vidljivo je da pri svim temperaturama sušenja (50 °C, 60 °C, 70 °C i 80 °C) najbolje slaganje s eksperimentalnim rezultatima daje Midilli i Kucukov model. Nadalje, statističkom analizom eksperimentalnih podataka promjene vlažnosti za uzorke jabuke dobivenih pri različitim temperaturama sušenja (50 °C, 60 °C, 70 °C i 80 °C) i brzinama strujanja zraka od 1,4 m s⁻¹ i 2,1 m s⁻¹ najbolje slaganje s eksperimentalnim rezultatima daje također Midilli i Kucukov model. Ovakva spoznaja poslužila je za izradu novog poluempirijskog modela koji opisuje proces sušenja uzoraka jabuke budući da su procesni uvjeti, temperatura sušenja i brzina strujanja zraka mijenjani u širem intervalu mjerenja, što je nadalje omogućilo ispitivanje ovisnosti koeficijenata odabranog matematičkog modela o stvarnim procesnim uvjetima.

Tablica 17 prikazuje vrijednosti konstanti i koeficijenta sušenja odabranog modela (28) za uzorke jabuke dobivene metodom nelinearne regresije u ovisnosti o procesnim parametrima; temperaturama sušenja od 50 °C, 60 °C, 70 °C i 80 °C i brzinama strujanja zraka od 1,4 m s⁻¹; 2,1 m s⁻¹; te 2,8 m s⁻¹.

Tablica 18 prikazuje vrijednosti koeficijenata (β) dobivenih metodom višestruke linearne regresije za pojedine parametre sušenja jabuke u modelu (28) pri ispitanim procesnim parametrima. Pa tako za model:

$$X'(t) = a \cdot e^{-k \cdot t^n} + b \cdot t$$

vrijednosti konstanti i koeficijenata sušenja (a , k , n , b) u ovisnosti o temperaturi sušenja i brzina strujanja zraka dane su slijedećim izrazima:

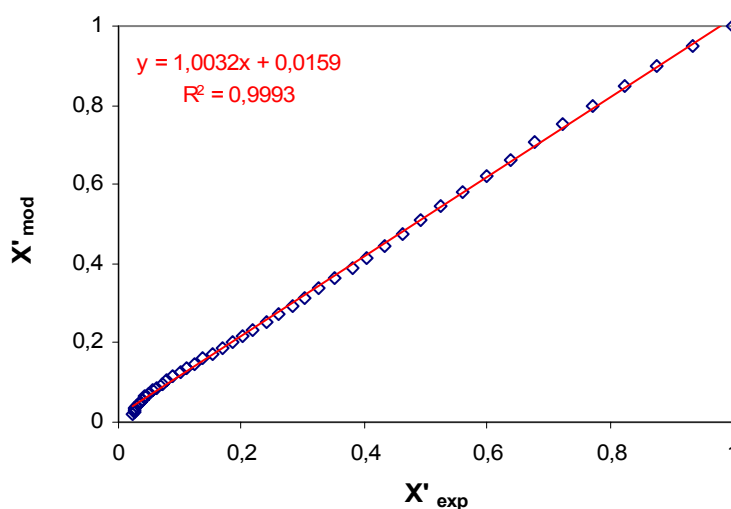
$$a = 1,006658 - 0,000043 \cdot T - 0,002579 \cdot v$$

$$k = -0,008731 + 0,000113 \cdot T + 0,005746 \cdot v$$

$$n = 1,221098 + 0,001551 \cdot T - 0,090229 \cdot v$$

$$b = 0,000473 - 0,000006 \cdot T - 0,000094 \cdot v$$

Na takav način dobio se novi poluempirijski model koji može poslužiti za simuliranje kinetike sušenja uzoraka jabuke unutar granica ispitanih procesnih parametara.



Slika 90. Eksperimentalne i modelne (simulacijske) vrijednosti bezdimenzionalne vlažnosti za uzorke jabuke pri temperaturi 70 °C i brzini strujanja zraka od 2,8 m s⁻¹

Novi model je ponovo podvrgnut testiranju uspješnosti aproksimacije eksperimentalnih podataka promjene vlažnosti, pomoću ranije navedenih statističkih alata, u zadanom intervalu mjerenja, te je utvrđeno da je konzistentnost i primjenjivost modela visoka. Na slici 90 dan je odnos eksperimentalnih vrijednosti bezdimenzionalne vlažnosti i vrijednosti

bezdimenzionalne vlažnosti dobivenih po novom poluempirijskom modelu za sušenje uzoraka jabuke pri temperaturi 70 °C i brzini strujanja zraka od 2,8 m s⁻¹. Statistički pokazatelji ($r = 0,9996$ i $\chi^2 = 0,000361$) potvrđuju primjenjivost dobivenog modela. Dobru aproksimaciju eksperimentalnih podataka sušenja jabuke s novim poluempirijskim modelom potvrđuju visoke vrijednosti koeficijenta korelacije podataka (0,9909 – 0,9997) za ostala testiranja modela unutar granica ispitanih procesnih parametara.

Tablica 20 daje prikaz rezultata statističke analize odabranih matematičkih modela za uzorke jabuke sušene u sušioniku s fluidiziranim slojem pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od 3,5 m s⁻¹. Vidljivo je da pri svim temperaturama sušenja (50 °C, 60 °C, 70 °C i 80 °C) najbolje slaganje s eksperimentalnim rezultatima sušenja jabuke u sušioniku s fluidiziranim slojem daje logaritamski model (29). Rezultati statističke analize odabranih matematičkih modela za uzorke jabuke sušene u tunelskom sušioniku i infracrvenom sušioniku upućuju da najbolje slaganje s eksperimentalnim podacima sušenja daje Midilli i Kucukov model (28).

U tablicama 19 – 21 dan je pregled ovisnosti vrijednosti konstanti i koeficijenta sušenja odabranih modela (28, 29) u ovisnosti o temperaturi sušenja i različitim metodama sušenja. Vrijednosti su dobivene metodom nelinearne regresije za eksperimentalne podatke sušenja uzorka jabuke u tunelskom sušioniku (TD), sušioniku za sušenje u fluidiziranom sloju (FBD), te infracrvenom sušioniku (IC).

Tablica 22 daje prikaz rezultata statističke analize odabranih matematičkih modela za infra-crveno sušenje mrkve pri različitim temperaturama sušenja. Vidljivo je da pri svim temperaturama sušenja (60 °C, 70 °C i 80 °C) najbolje slaganje s eksperimentalnim rezultatima daje Midilli i Kucukov model. Iz statističke analize eksperimentalnih podataka sušenja mrkve na ostalim uređajima za sušenje, pri različitim temperaturama sušenja (60 °C, 70 °C i 80 °C), također je vidljivo da najbolje slaganje s eksperimentalnim rezultatima daje Midilli i Kucukov model.

U tablicama 22 – 25 dan je pregled vrijednosti konstanti i koeficijenta sušenja odabranog modela (28) u ovisnosti o različitim temperaturama i metodama sušenja. Vrijednosti su dobivene metodom nelinearne regresije eksperimentalnih podataka sušenja uzorka mrkve u tunelskom sušioniku (TD), sušioniku za sušenje u fluidiziranom sloju (FBD), vakuum sušioniku (VS), te infracrvenom sušioniku (IC).

U tablici 29 dane su vrijednosti rezultata statističke analize odabranih matematičkih modela za vakuum sušenje peršina pri različitim temperaturama sušenja. Pri svim temperaturama sušenja (60 °C, 65 °C i 70 °C) i podtlaku od 15 kPa, najbolje slaganje s eksperimentalnim rezultatima daje Midilli i Kucukov model. Nadalje, statističkom analizom eksperimentalnih podataka za uzorke peršina sušene u sušioniku za sušenje u fluidiziranom sloju, te infracrvenom sušioniku, pri različitim temperaturama sušenja (60 °C, 65 °C i 70 °C), najbolje slaganje s eksperimentalnim rezultatima daje Midilli i Kucukov model, dok za sušenje u tunelskom sušioniku pri različitim temperaturama sušenja (60 °C, 65 °C i 70 °C) najbolje slaganje s eksperimentalnim podacima daje logaritamski model (29).

U tablicama 26 – 29 dan je pregled vrijednosti konstanti i koeficijenta sušenja odabranih modela (28, 29) u ovisnosti o različitim temperaturama i metodama sušenja. Vrijednosti su dobivene metodom nelinearne regresije eksperimentalnih podataka sušenja uzorka peršina u tunelskom sušioniku (TD), sušioniku za sušenje u fluidiziranom sloju (FBD), vakuum sušioniku (VS), te infracrvenom sušioniku (IC).

Na slikama 11 – 22 dan je grafički prikaz kinetike sušenja uzoraka marelice pri različitim temperaturama sušenja (50 °C, 60 °C, 70 °C i 80 °C) i različitim brzinama strujanja zraka (1,4 m s⁻¹; 2,1 m s⁻¹; 2,8 m s⁻¹). Iz grafičkog prikaza kinetike sušenja uzoraka marelice vidljivo je da se pri većim brzinama strujanja zraka postiže i veća maksimalna brzina sušenja i da se postiže ranije, što znači da je proces sušenja brži kod većih brzina strujanja zraka. Oblik krivulja brzine sušenja je takav da se one mogu podijeliti samo na dva dijela, a to su period porasta brzine sušenja i period opadajuće brzine sušenja, dok im nedostaje period konstantne brzine sušenja. Ovakav oblik krivulja brzine sušenja je karakterističan za prehrambene materijale^{24,151}. No, ipak iz slika 12 i 16, može se uočiti da kod nižih temperatura sušenja i manjih brzina strujanja zraka, za razliku od viših temperatura i većih brzina strujanja zraka, postoji dio krivulje (nakon početnog brzog porasta brzine sušenja) koji bi se više ili manje mogao aproksimirati konstantnom brzinom sušenja²¹. Ovo je uočljivo i iz prikaza ovisnosti promjene temperature u uzorcima marelice o različitim temperaturama sušenja i različitim brzinama strujanja zraka (slika 13 i 17). Iz slika je vidljivo da kod nižih brzina strujanja zraka (1,4 m s⁻¹ i 2,1 m s⁻¹) i nižih temperatura sušenja postoji dio krivulje u kojem se temperatura uzoraka može aproksimirati s konstantnom vrijednosti temperature.

Slika 23 prikazuje rehidrationske omjere (RO) uzoraka marelice pri različitim temperaturama sušenja i različitim brzinama strujanja zraka. Vrijednosti rehidrationskih omjera za uzorke marelice kreću se u intervalu 1,23 – 2,89, te pokazuju opću tendenciju rasta s porastom temperature sušenja, dok s povećanjem brzine strujanja zraka rehidrationski omjeri opadaju. Najveći rehidrationski omjer postignut je pri temperaturi sušenja od 80 °C i brzini strujanja zraka od 1,4 m s⁻¹.

Na slici 24 prikazana je promjena boje uzoraka (C*_{ab}) marelice pri različitim temperaturama sušenja i različitim brzinama strujanja zraka. Uočljivo je da se promjena boje uzoraka marelice izražena kao (C*_{ab}) povećava s porastom brzine strujanja zraka, dok s druge strane ne postoji jasna ovisnost promjene boje (C*_{ab}) o temperaturi sušenja. Izražavanje promjene boje kao (C*_{ab}) umjesto izražavanja preko ukupne promjene boje (ΔE) odabrana je zbog svojstva sušenih uzoraka i stvaranja jasnije ovisnosti o brzini strujanja zraka¹⁷¹.

Na slikama 25 – 28 dan je grafički prikaz kinetike sušenja uzoraka jabuke sušenih pri različitim temperaturama sušenja (50 °C, 60 °C, 70 °C i 80 °C) i brzini strujanja zraka od 2,8 m s⁻¹ u tunelskom sušioniku s pliticama (TD). Iz grafičkog prikaza kinetike sušenja uzoraka jabuke vidljivo je da se pri većim temperaturama zraka postiže i veća maksimalna brzina sušenja i da se postiže ranije, što znači da je proces sušenja brži kod viših temperatura. Oblik krivulja brzine sušenja je takav da se one mogu podijeliti samo na dva dijela, te se uočava vrlo oštar prijelaz iz perioda porasta brzine sušenja u period opadajuće brzine sušenja. Na slici 29 dan je grafički prikaz ovisnosti rehidrationskih omjera (RO) uzoraka jabuke o načinu prethodne obrade uzoraka sušenih u tunelskom sušioniku (TD) pri temperaturi 50 °C i brzini strujanja zraka od 2,8 m s⁻¹. Vidljivo je da prethodna obrada uzoraka jabuke postupcima blanširanja u vreloj vodi temperature 90 °C tijekom 3 minute, blanširanja na vodenoj pari tijekom 3 minute, te blanširanja u 0,6 %-tnoj otopini CaCl₂ temperature 90 °C tijekom 1 minute, daju najviše vrijednosti rehidrationskih omjera u odnosu na ostale metode. Takvi oblici prethodne obrade uzoraka znatno poboljšavaju rehidrationska svojstva, te ubrzavaju tijek sušenja u odnosu na neobrađene uzorke⁷⁸. Blanširanje utječe na skraćivanje vremena potrebnog za sušenje, uklanjanje zraka iz međustaničnog prostora, te omekšavanje teksture bioloških materijala^{71,111-116}. Biljna tkiva koja su rezana ili sjeckana pokazuju smanjenje respiracije ako su tretiraju kalcijem, te intenziviranje rekonstitucijskih procesa⁷⁸⁻⁷⁹.

Najniži rehidrationski omjer (3,49) je u slučaju prethodnog zamrzavanja uzoraka jabuke, što za posljedicu ima značajno narušavanje strukture uzrokovane nastajanjem kristala leda tijekom postupka zamrzavanja.

Na slici 30 dana je ovisnost promjene volumena uzoraka jabuke o načinu prethodne obrade uzoraka sušenih u tunelskom sušioniku (TD) pri temperaturi 50 °C i brzini strujanja zraka od 2,8 m s⁻¹. Najveća promjena volumena uzoraka jabuke izmjerena je u slučaju prethodne obrade uzoraka blanširanjem na vodenoj pari tijekom 3 minute, a najmanja kod blanširanja u vreloj 0,6 %-tnoj otopini CaCl₂ tijekom 1 minute. Dodatak kalcija pomaže povećanju integriteta staničnih membrana i staničnih stijenki. Također kalcij, koji se infiltrira unutar stanice, stvara veze sa staničnom stijenkom, te gradi poprečne veze s pektinskim tvarima unutar središnje lamele⁸⁰⁻⁸³.

Slike 31 – 36 daju prikaz kinetičkih krivulja sušenja uzoraka jabuke u sušioniku s fluidiziranim slojem i infra-crvenom sušioniku. Krivulja sušenja jabuke u sušioniku s fluidiziranim slojem upućuju na znatno veću brzinu sušenja u odnosu na ostale ispitane metode. Ukupno vrijeme sušenja jabuke u sušioniku s fluidiziranim slojem je kraće za 75-78 % u odnosu na ukupno vrijeme sušenja uzoraka jabuke u infracrvenom sušioniku. Nadalje, ukupno vrijeme sušenja jabuke u sušioniku s fluidiziranim slojem je kraće za 50-66 % u odnosu na ukupno vrijeme sušenja jabuke u tunelskom sušioniku za isti sadržaj vlažnosti u osušenom uzorku.

Oblik krivulja brzine sušenja uzoraka jabuke na infracrvenom sušioniku (slika 36) je takav da se ne uočava vrlo oštar prijelaz iz perioda porasta brzine sušenja u period opadajuće brzine sušenja. Kod nižih temperatura sušenja postoji dio krivulje (nakon početnog brzog porasta brzine sušenja) koji bi se više ili manje mogao aproksimirati konstantnom brzinom sušenja²⁴. Ovo je uočljivo i iz prikaza ovisnosti promjene temperature u uzorcima jabuke o različitim temperaturama sušenja (slika 37). Iz slike je vidljivo da kod nižih temperatura sušenja postoji dio krivulje u kojem se temperatura uzoraka može aproksimirati s konstantnom vrijednosti temperature.

Na slici 39 dan je grafički prikaz vrijednosti rehidrationskih omjera (RO) uzoraka jabuke u ovisnosti o različitim temperaturama i metodama sušenja. Iz slike 39 vidljivo je da se vrijednosti rehidrationskih omjera (RO) kreću u intervalu 3,51 – 4,78. Vrijednosti rehidrationskih omjera za uzorke jabuke sušene u tunelskom sušioniku opadaju s porastom temperature, dok vrijednosti rehidrationskih omjera za uzorke jabuke sušene u sušioniku s

fluidiziranim slojem rastu s porastom temperature sušenja. Za infra-crveno sušenje uzoraka jabuke ne postoji jasna ovisnost rehidratacijskih omjera (RO) o temperaturi sušenja.

Najviša vrijednost rehidratacijskog omjera (4,78) izmjerena je pri temperaturi 50 °C i brzini strujanja zraka od 2,8 m s⁻¹ za uzorke jabuke sušene u tunelskom sušioniku.

Ukupna promjene boje uzoraka jabuke (ΔE) u ovisnosti o različitim metodama i temperaturama sušenja prikazana je na slici 40. Može se uočiti da ukupna promjene boje (ΔE) raste s porastom temperature sušenja kod sušenja uzoraka jabuke u sušioniku s fluidiziranim slojem i infracrvenom sušioniku, dok je najmanja ukupna promjena boje kod sušenja uzoraka jabuke u tunelskom sušioniku pri temperaturi 60 °C i brzini strujanja zraka od 2,8 m s⁻¹.

Na slikama 41 – 54, te slikama 48 – 58 dan je grafički prikaz kinetičkih krivulja sušenja uzoraka mrkve na četiri različita uređaja za: tunelski sušionik (TD), sušionik za sušenje s fluidiziranim slojem (FBD), infracrveni sušionik (IC), te vakuum sušionik (VS). Krivulje sušenja mrkve u sušioniku s fluidiziranim slojem upućuju na znatno veću brzinu sušenja u odnosu na ostale ispitane metode. Ukupno vrijeme sušenja mrkve u sušioniku s fluidiziranim slojem kraće je za 61-63 % u odnosu na ukupno vrijeme sušenja uzoraka mrkve u tunelskom sušioniku; za 66-72 % u odnosu na ukupno vrijeme sušenja uzoraka mrkve u infracrvenom sušioniku, te za 80-83 % u odnosu na ukupno vrijeme sušenja uzoraka mrkve u vakuum sušioniku, za isti sadržaj vlažnosti u osušenom uzorku.

Oblik krivulja brzine sušenja uzoraka mrkve na infracrvenom i vakuum sušioniku (slika 52 i 56) je takav da postoji blagi prijelaz iz perioda porasta brzine sušenja u period opadajuće brzine sušenja. Kod nižih temperatura sušenja postoji dio krivulje koji bi se više ili manje mogao aproksimirati s konstantnom brzinom sušenja. Ovo je uočljivo i iz prikaza ovisnosti promjene temperature u uzorcima mrkve o različitim temperaturama sušenja (slika 53 i 57). Iz slike je vidljivo da kod nižih temperatura sušenja postoji dio krivulje u kojem se temperatura uzoraka može aproksimirati s konstantnom vrijednosti temperature.

Na slici 45 dan je grafički prikaz ovisnosti rehidratacijskih omjera (RO) uzoraka mrkve o načinu prethodne obrade uzoraka sušenih u tunelskom sušioniku (TD) pri temperaturi 60 °C i brzini strujanja zraka od 2,8 m s⁻¹. Za uzorke mrkve provedena je prethodna obrada i to: blanširanje u vreloj vodi temperature 85 °C tijekom 3 minute, zamrzavanje na –18 °C tijekom 24 sata, uranjanje u 1 %-tnu otopinu askorbinske kiseline tijekom 3 minute; uranjanje u 1 %-tnu otopinu CaCl₂ i 1 %-tnu otopinu askorbinske kiseline tijekom 3 minute; te u 2,5 %-tnu otopinu škroba tijekom 5 minuta. Vidljivo je da prethodna obrada

uzoraka mrkve blanširanjem u vreloj vodi temperature 85 °C tijekom 3 minute, te uranjanjem u 2,5 %-tnu otopinu škroba tijekom 5 minuta daje najbolje rezultate u pogledu rehidrationskih svojstava.

Veći utjecaj na poboljšanje teksture i rehidrationskih svojstava ima škrob. Naime dokazano je da namakanje rajčice prije provedbe sušenja u 2,5 %-tnoj otopini škroba tijekom dvije minute pri sobnoj temperaturi znatno poboljšava njenu rehidrationsku¹⁰³. Za kockice mrkve obrađene sa 2,5 %-tnom otopinom škroba pri temperaturi 80 °C tijekom 30 sekundi potrebno je kraće vrijeme sušenja, te je uočeno povećanje gustoće uzoraka u odnosu na uzorke blanširane pri temperaturi 90°C tijekom 3 minute. Također je uočeno manje skupljanje uzoraka za oko 10 %, te poboljšanje rehidrationske u odnosu na blanširane uzorke^{71,104}. Nadalje, blanširanje znatno utječe na skraćivanje vremena potrebnog za sušenje, uklanjanje zraka iz međustaničnog prostora, te omekšavanje teksture bioloških materijala^{71,111-116}.

Najniži rehidrationski omjer (3,15) izmjeren je u slučaju prethodnog zamrzavanja uzoraka mrkve čemu je uzrok značajno narušavanje strukture nastajanjem kristala leda tijekom postupka zamrzavanja.

Kockice mrkve koje su zamrznute prije sušenja pokazuju značajno skraćivanje ukupnog vremena sušenja, te za oko 30 % manje skupljanje u odnosu na blanširane uzorke. Međutim, stupanj rehidrationske je bio nešto niži nego kod blanširanih kockica mrkve¹¹⁷.

Očuvanje strukture stanične stijenke predmnijeva i povećani prijenos mase. Kod bioloških materijala koji se zamrzavaju dolazi do značajnog oštećenja tkiva što za posljedicu ima promjenu u difuziji vode. Uspoređujući difuziju neobrađenih i prethodno zamrznutih uzoraka mrkve došlo se do zaključka da se tijekom njihovog sušenja difuzitet smanji na polovicu inicijalne vrijednosti za zamrznute uzorake^{71,117}.

Na slici 46 dana je ovisnost promjene volumena uzoraka mrkve o načinu prethodne obrade uzoraka sušenih u tunelskom sušioniku (TD) pri temperaturi 60 °C i brzini strujanja zraka od 2,8 m s⁻¹. Najveća promjena volumena uzoraka mrkve je u slučaju prethodne obrade uzoraka blanširanjem u vreloj vodi temperature 85 °C tijekom 3 minute, te kod uranjanja u 2,5 %-tnu otopinu škroba tijekom 5 minuta, što je u korelaciji s vrijednostima rehidrationskih omjera za istu vrstu prethodne obrade.

Ovisnost ukupne promjene boje uzoraka mrkve (ΔE) o načinu prethodne obrade uzoraka sušenih u tunelskom sušioniku (TD) pri temperaturi 60 °C i brzini strujanja zraka od 2,8 m s⁻¹ prikazana je na slici 47. Može se uočiti da ukupna promjene boje (ΔE) najmanja u

slučaju blanširanja uzoraka mrkve u vreloj vodi temperature 85 °C tijekom 3 minute. Također, značajnije smanjenje promjene boje uzoraka daje njihovo prethodno uranjanje u otopine: 1 %-tne askorbinske kiseline tijekom 3 minute; te kombinaciju 1 %-tna otopine CaCl₂ i 1 %-tne askorbinske kiseline tijekom 3 minute.

Na slici 59 dan je grafički prikaz vrijednosti rehidrationskih omjera (RO) uzoraka mrkve u ovisnosti o različitim temperaturama i metodama sušenja. Iz slike je vidljivo da se vrijednosti rehidrationskih omjera (RO) kreću u intervalu 4,02 – 5,11. Vrijednosti rehidrationskih omjera za uzorke mrkve opadaju s porastom temperature za sve metode sušenja. Najviša vrijednost rehidrationskog omjera (5,11) izmjerena je pri temperaturi 60 °C i brzini strujanja zraka od 2,8 m s⁻¹ za uzorke mrkve sušene u tunelskom sušioniku. Pri temperaturama sušenja od 70 °C i 80 °C izmjereni rehidrationski omjeri su veći za uzorke sušene u tunelskom sušioniku u odnosu na ostale metode sušenja.

Ukupna promjene boje uzoraka mrkve (ΔE) u ovisnosti o različitim metodama i temperaturama sušenja prikazana je na slici 60. Najmanja ukupna promjena boje u odnosu na sve ispitane metode i temperature sušenja je kod sušenja uzoraka mrkve u tunelskom sušioniku pri temperaturi 70 °C i brzini strujanja zraka od 2,8 m s⁻¹. Nije uočena jasna ovisnost ukupne promjene boje uzoraka mrkve (ΔE) o temperaturi sušenja za sušenje u sušioniku s fluidiziranim slojem i infracrvenom sušioniku. Najveću ukupnu promjenu boje sušenih uzoraka daje sušenje u sušioniku s fluidiziranim slojem, dok najmanju ukupnu promjenu boje, u većini slučajeva, daje sušenje uzoraka mrkve u tunelskom sušioniku pri svim ispitanim temperaturama sušenja.

Na slikama 61 – 63, te slikama 67 – 77 dan je grafički prikaz kinetičkih krivulja sušenja uzoraka peršina na četiri različita uređaja: tunelski sušionik (TD), sušionik za sušenje s fluidiziranim slojem (FBD), infracrveni sušionik (IC), te vakuum sušionik (VS), pri temperaturama od sušenja od 60 °C, 65 °C i 70 °C.

Krivulje sušenja peršina u sušioniku s fluidiziranim slojem upućuju na znatno veću brzinu sušenja u odnosu na ostale ispitane metode. Ukupno vrijeme sušenja peršina u sušioniku s fluidiziranim slojem kraće je za 47-59 % u odnosu na ukupno vrijeme sušenja uzoraka peršina u tunelskom sušioniku; za 76-79 % u odnosu na ukupno vrijeme sušenja uzoraka peršina u infracrvenom sušioniku; te za 83-87 % u odnosu na ukupno vrijeme sušenja uzoraka mrkve u vakuum sušioniku, za isti sadržaj vlažnosti u osušenom uzorku.

Oblik krivulja brzine sušenja uzoraka peršina na infracrvenom i vakuum sušioniku (slika 71 i 75) je takav da postoji blagi prijelaz iz perioda porasta brzine sušenja u period

opadajuće brzine sušenja. Kod nižih temperatura sušenja postoji dio krivulje koji bi se više ili manje mogao aproksimirati s konstantnom brzinom sušenja^{24,31,151}. Ovo je uočljivo i iz prikaza ovisnosti promjene temperature u uzorcima peršina o različitim temperaturama sušenja (slika 72 i 76). Iz slika je vidljivo da kod nižih temperatura sušenja postoji dio krivulje u kojem se temperatura uzoraka može aproksimirati s konstantnom vrijednosti temperature.

Na slici 64 dan je grafički prikaz ovisnosti rehidrationskih omjera (RO) uzoraka peršina o načinu prethodne obrade uzoraka sušenih u tunelskom sušioniku (TD) pri temperaturi 60 °C i brzini strujanja zraka od 2,8 m s⁻¹. Za uzorke peršina provedeni su različiti načini prethodne obrade i to: blanširanje u vreloj vodi temperature 80 °C tijekom 3 minute, zamrzavanje na -18 °C tijekom 24 sata, uranjanje u 1,5 %-tnu otopinu askorbinske kiseline tijekom 3 minute; uranjanje u kombinaciju 2 %-tna otopine CaCl₂ i 1,5 %-tne otopine askorbinske kiseline tijekom 3 minute, te uranjanje u 2,5 %-tnu otopinu škroba tijekom 5 minuta.

Iz slike 64 vidljivo je da prethodna obrada uzoraka peršina blanširanjem u vreloj vodi temperature 80 °C tijekom 3 minute, uranjanjem u kombinaciju 2 %-tne otopine CaCl₂ i 1,5 %-tne otopine askorbinske kiseline tijekom 3 minute, te uranjanjem u 2,5 %-tnu otopinu škroba tijekom 5 minuta poboljšava rehidrationska svojstva osušenih uzorka.

Najniži rehidrationski omjer od 3,57 izmjeren je u slučaju prethodnog zamrzavanja uzoraka peršina, međutim vrijednost rehidrationskog omjera je približna vrijednosti za neobrađeni uzorak.

Na slici 65 dana je ovisnost promjene volumena uzoraka peršina o načinu prethodne obrade uzoraka sušenih u tunelskom sušioniku (TD) pri temperaturi 60 °C i brzini strujanja zraka od 2,8 m s⁻¹. Najveća promjena volumena uzoraka peršina je u slučaju prethodne obrade uzoraka uranjanjem u 2,5 %-tnu otopinu škroba tijekom 5 minuta.

Ovisnost ukupne promjene boje uzoraka peršina (ΔE) o načinu prethodne obrade uzoraka sušenih u tunelskom sušioniku (TD) pri temperaturi 60 °C i brzini strujanja zraka od 2,8 m s⁻¹ prikazana je na slici 66. Može se uočiti da je ukupna promjena boje (ΔE) najmanja u slučaju prethodne obrade uzoraka uranjanjem u 2,5 %-tnu otopinu škroba tijekom 5 minuta. Ostale fizikalno-kemijske metode prethodne obrade uzoraka daju značajni porast ukupne promjene boje (ΔE) što predstavlja negativni učinak.

Na slici 78 dan je grafički prikaz vrijednosti rehidrationskih omjera (RO) uzoraka peršina u ovisnosti o različitim temperaturama i metodama sušenja. Iz slike je vidljivo da

se vrijednosti rehidracijskih omjera (RO) kreću u intervalu 3,55 – 4,75. Vrijednosti rehidracijskih omjera za uzorke peršina opadaju s porastom temperature za slučaj sušenja u tunelskom sušioniku i infra-crvenog sušenja, dok kod vakuum sušenja vrijednosti rehidracijskih omjera rastu s porastom temperature sušenja. Za sušenje u fluidiziranom sloju nije uočena jasna ovisnost vrijednosti rehidracijskih omjera o temperaturi. Najviša vrijednost rehidracijskog omjera (4,75) izmjerena je pri temperaturi 60 °C i brzini strujanja zraka od 2,8 m s⁻¹ za uzorke peršina sušene u tunelskom sušioniku.

Ukupna promjene boje uzoraka peršina (ΔE) u ovisnosti o različitim metodama i temperaturama sušenja prikazana je na slici 79. Najmanja ukupna promjena boje u odnosu na sve ispitane metode i temperature sušenja je kod sušenja uzoraka peršina u tunelskom sušioniku pri temperaturi 60 °C i brzini strujanja zraka od 2,8 m s⁻¹.

Kromatografska analiza

Tablice 30 i 31 prikazuju koncentraciju β – karotena u svježim i osušenim uzorcima mrkve za pojedine metode i temperature sušenja izražena u mg 100 g⁻¹, te u mg g⁻¹_{s.tv.}. Slike 81 – 86 daju prikaz kromatograma β – karotena u svježem, suhom i standardnom uzorku. Iz dobivenih kromatograma izračunate su i koncentracije β – karotena u osušenim uzorcima mrkve u ovisnosti o različitim metodama i temperaturama sušenja što prikazuje slika 87. Na slici 88 dan je grafički prikaz degradacije β -karotena u osušenim uzorcima mrkve u ovisnosti o različitim metodama i temperaturama sušenja.

Najveća degradacija β – karotena je u uzorcima mrkve sušenim u sušioniku s fluidiziranim slojem, dok je općenito najmanja (u odnosu na ostale ispitane metode) u slučaju sušenja mrkve u tunelskom sušioniku.

Najmanja degradacija β – karotena je u neobrađenim uzorcima mrkve sušene u tunelskom sušioniku pri temperaturi sušenja od 70 °C i brzini strujanja zraka od 2,8 m s⁻¹.

6. ZAKLJUČCI

Modeliranjem eksperimentalnih podataka promjene vlažnosti za uzorke marelice i jabuke sušene u tunelskom sušioniku pri različitim temperaturama sušenja (50 °C, 60 °C, 70 °C i 80 °C) i brzinama strujanja zraka (1,4 m s⁻¹; 2,1 m s⁻¹; 2,8 m s⁻¹) utvrđeno je da najbolje slaganje s eksperimentalnim podacima daje Midilli i Kucukov model. Dobiveni su novi poluempirijski modeli koji mogu poslužiti za simuliranje kinetike sušenja uzoraka marelice i jabuke unutar granica ispitanih procesnih parametara, temperature i brzine strujanja zraka.

Pri svim ispitanim temperaturama sušenja (50 °C, 60 °C, 70 °C i 80 °C) najbolje slaganje s eksperimentalnim rezultatima sušenja jabuke u sušioniku s fluidiziranim slojem daje logaritamski model (29), dok za uzorke jabuke sušene u tunelskom sušioniku i infracrvenom sušioniku najbolje slaganje s eksperimentalnim podacima sušenja daje Midilli i Kucukov model (28).

Modeliranjem eksperimentalnih podataka promjene vlažnosti za uzorke mrkve sušene na četiri ispitana sušionika pri različitim temperaturama (60 °C, 70 °C i 80 °C) utvrđeno je da najbolje slaganje s eksperimentalnim rezultatima u svim ispitivanjima daje Midilli i Kucukov model.

Statističkom analizom eksperimentalnih podataka za uzorke peršina sušene u sušioniku za sušenje u fluidiziranom sloju, infracrvenom sušioniku, te vakuum sušioniku pri različitim temperaturama sušenja (60 °C, 65 °C i 70 °C), najbolje slaganje s eksperimentalnim rezultatima daje Midilli i Kucukov model, dok za sušenje u tunelskom sušioniku pri različitim temperaturama sušenja (60 °C, 65 °C i 70 °C) najbolje slaganje s eksperimentalnim podacima daje logaritamski model (29).

Iz grafičkog prikaza kinetike sušenja uzoraka vidljivo je da se pri većim brzinama strujanja zraka postiže i veća maksimalna brzina sušenja i da se postiže ranije, što znači da je proces sušenja brži kod većih brzina strujanja zraka. Oblik krivulja brzine sušenja je takav da se one mogu podijeliti samo na dva dijela, a to su period porasta brzine sušenja i period opadajuće brzine sušenja, dok im nedostaje period konstantne brzine sušenja. Ovakav oblik krivulja brzine sušenja je karakterističan za prehrambene materijale. No, ipak može se uočiti da kod nižih temperatura sušenja i manjih brzina strujanja zraka, za razliku od viših temperatura i većih brzina strujanja zraka, postoji dio krivulje (nakon

početnog brzog porasta brzine sušenja) koji bi se više ili manje mogao aproksimirati konstantnom brzinom sušenja. Ovo je uočljivo i iz prikaza ovisnosti promjene temperature u uzorcima o različitim temperaturama sušenja i različitim brzinama strujanja zraka. U slučaju manjih brzina strujanja zraka ($1,4 \text{ m s}^{-1}$ i $2,1 \text{ m s}^{-1}$) i nižih temperatura sušenja postoji dio krivulje u kojem se temperatura uzoraka može aproksimirati s konstantnom vrijednosti temperature.

Na osnovi praćenja utjecaja prethodne obrade uzoraka i metode sušenja na parametre kvalitete osušenih uzoraka mogu se izvesti sljedeći zaključci:

Marelica

Vrijednosti rehidrationskih omjera za uzorke marelice kreću se u intervalu 1,23 – 2,89, te pokazuju opću tendenciju rasta s porastom temperature sušenja, dok s povećanjem brzine strujanja zraka rehidrationski omjeri opadaju. Najviša vrijednost rehidrationskog omjera (2,89) izmjerena je pri temperaturi $80 \text{ }^\circ\text{C}$ i brzini strujanja zraka od $1,4 \text{ m s}^{-1}$.

Promjena boje uzoraka marelice izražena kao (C^*_{ab}) povećava se s porastom brzine strujanja zraka, dok s druge strane ne postoji jasna ovisnost promjene boje (C^*_{ab}) o temperaturi sušenja.

Jabuka

Prethodna obrada uzoraka jabuke postupcima blanširanja u vreloj vodi temperature $90 \text{ }^\circ\text{C}$ tijekom 3 minute; blanširanja na vodenoj pari tijekom 3 minute; te blanširanja u 0,6 %-tnoj otopini CaCl_2 temperature $90 \text{ }^\circ\text{C}$, tijekom 1 minute, daju veće vrijednosti rehidrationskih omjera u odnosu na ostale ispitane metode. Takvi oblici prethodne obrade uzoraka znatno poboljšavaju rehidrationska svojstva, te ubrzavaju tijek sušenja u odnosu na neobrađene uzorke.

Najveća promjena volumena uzoraka jabuke uočena je u slučaju prethodne obrade uzoraka blanširanjem na vodenoj pari tijekom 3 minute, a najmanja kod blanširanja u 0,6 %-tnoj otopini CaCl_2 temperature $90 \text{ }^\circ\text{C}$ tijekom 1 minute.

Vrijednosti rehidrationskih omjera za uzorke jabuke sušene u tunelskom sušioniku opadaju s porastom temperature, dok vrijednosti rehidrationskih omjera za uzorke jabuke sušene u sušioniku s fluidiziranim slojem rastu s porastom temperature sušenja. Za infra-

crveno sušenje uzoraka jabuke ne postoji jasna ovisnost rehidrationskih omjera (RO) o temperaturi sušenja.

Najviša vrijednost rehidrationskog omjera (4,78) izmjerena je pri temperaturi 50 °C i brzini strujanja zraka od 2,8 m s⁻¹ za uzorke jabuke sušene u tunelskom sušioniku.

Ukupna promjene boje (ΔE) raste s porastom temperature sušenja kod sušenja uzoraka jabuke u sušioniku s fluidiziranim slojem i infracrvenom sušioniku, dok je najniža vrijednost ukupne promjene boje izmjerena kod sušenja uzoraka jabuke u tunelskom sušioniku pri temperaturi 50 °C i brzini strujanja zraka od 2,8 m s⁻¹.

Mrkva

Prethodna obrada uzoraka mrkve blanširanjem u vreloj vodi temperature 85 °C tijekom 3 minute, te uranjanjem u 2,5 %-tnu otopinu škroba tijekom 5 minuta daje najbolje rezultate u pogledu rehidrationskih svojstava. Veći utjecaj na poboljšanje teksture i rehidrationskih svojstava ima škrob.

Najniži rehidrationski omjer (3,15) izmjeren je u slučaju zamrzavanja uzoraka mrkve prije sušenja, što je vjerojatno posljedica narušavanja strukture tkiva nastajanjem kristala leda tijekom postupka zamrzavanja. Kockice mrkve koje su zamrznute prije sušenja pokazuju značajno skraćivanje ukupnog vremena sušenja, te za oko 30 % manje skupljanje u odnosu na blanširane uzorke. Međutim, stupanj rehidrationske je bio nešto niži nego kod blanširanih kockica mrkve.

Najveća promjena volumena uzoraka mrkve izmjerena je u slučaju prethodne obrade uzoraka blanširanjem u vreloj vodi temperature 85 °C tijekom 3 minute, te kod uranjanja u 2,5 %-tnu otopinu škroba tijekom 5 minuta, što je u korelaciji s vrijednostima rehidrationskih omjera za istu vrstu prethodne obrade.

Ukupna promjene boje (ΔE) je najmanja u slučaju blanširanja uzoraka mrkve u vreloj vodi temperature 85 °C tijekom 3 minute. Također, značajnije smanjenje promjene boje uzoraka daje njihovo prethodno uranjanje u otopine: 1 %-tne askorbinske kiseline tijekom 3 minute, te kombinaciju 1 %-tne otopine CaCl₂ i 1 %-tne askorbinske kiseline tijekom 3 minute.

Vrijednosti rehidrationskih omjera za uzorke mrkve opadaju s porastom temperature za sve metode sušenja. Najviša vrijednost rehidrationskog omjera (5,11) izmjerena je pri temperaturi 60 °C i brzini strujanja zraka od 2,8 m s⁻¹ za uzorke mrkve sušene u tunelskom sušioniku.

Najveću ukupnu promjenu boje sušenih uzoraka daje sušenje u sušioniku s fluidiziranim slojem, dok najmanju ukupnu promjenu boje, u većini slučajeva, daje sušenje uzoraka mrkve u tunelskom sušioniku pri svim ispitanim temperaturama sušenja.

Najveća degradacija β – karotena je u uzorcima mrkve sušenim u sušioniku s fluidiziranim slojem, dok je općenito najmanja (u odnosu na ostale ispitane metode) u slučaju sušenja mrkve u tunelskom sušioniku. Najmanja degradacija β – karotena je u neobrađenim uzorcima mrkve sušene u tunelskom sušioniku pri temperaturi sušenja od 70 °C i brzini strujanja zraka od 2,8 m s⁻¹.

Peršin

Prethodna obrada uzoraka peršina: blanširanjem u vreloj vodi temperature 80 °C tijekom 3 minute, uranjanje u kombinaciju 2 %-tne otopine CaCl₂ i 1,5 %-tne otopine askorbinske kiseline tijekom 3 minute, te uranjanje u 2,5 %-tnu otopinu škroba tijekom 5 minuta poboljšava rehidrationska svojstva osušenih uzorka. Najveća promjena volumena uzoraka peršina je u slučaju prethodne obrade uzoraka uranjanjem u 2,5 %-tnu otopinu škroba tijekom 5 minuta.

Ukupna promjene boje (ΔE) najmanja je u slučaju prethodne obrade uzoraka uranjanjem u 2,5 %-tnu otopinu škroba tijekom 5 minuta. Ostale fizikalno-kemijske metode prethodne obrade uzoraka dovele su do značajnog porasta ukupne promjene boje (ΔE) što predstavlja negativni učinak.

Najviša vrijednost rehidrationskog omjera (4,75) izmjerena je pri temperaturi 60 °C i brzini strujanja zraka od 2,8 m s⁻¹ za uzorke peršina sušene u tunelskom sušioniku.

Najniža vrijednost ukupne promjene boje u odnosu na sve ispitane metode i temperature sušenja je kod sušenja uzoraka peršina u tunelskom sušioniku pri temperaturi 60 °C i brzini strujanja zraka od 2,8 m s⁻¹.

7. LITERATURA

1. S. Mujumdar: *Handbook of Industrial Drying*. Marcel Dekker Inc., New York, Basel, Hong Kong, 2nd ed., Vol. 1., 605-739, 1995.
2. S. Tomas: *Sušenje, apsorpcija*. Prehrambeno tehnološki fakultet Osijek, Osijek, 1-14, 2000.
3. R. P. Singh, D. R. Heldman: *Introduction to Food Engineering*. Academic Press, London, 556-591, 2001.
4. N. Dobričević: *Sušenje jabuke suvremenim tehnološkim postupcima*. U *Zbornik radova IX. Međunarodno savjetovanje tehnologa sušenja i skladištenja*, Agronomski fakultet, Zagreb, Hrvatska, str. 175-185, 1993.
5. Z. Katić: *Sušenje i sušare u poljoprivredi*, Multigraf doo, Zagreb, 1-159, 1997.
6. T. Kudra, A. S. Mujumdar, *Advanced Drying Technologies*. Marcel Dekker, Inc. New York, 1-26, 2002.
7. L. W. Aurand, A. E. Woods: *Food Chemistry*. Avi Publishing Co. Inc., Westport, Connecticut, 1973.
8. N. N. Potter, H. J. Hotchkiss: *Food Science*. Chapman & Hall, New York, 5th ed., 200-232, 1995.
9. D. A. Shapton: *Principles and practices for the safe processing of foods*. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 224, 325-333, 1998.
10. P. P. Lewicki: Water as the determinant of food engineering properties. A review. *Journal of Food Engineering*, 61(4): 483-495, 2004.
11. T. Lovrić: *Procesi u prehrambenoj industriji s osnovama prehrambenog inženjerstva*. Prehrambeno-biotehnološki fakultet sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, str. 229, 245-247, 1991.
12. N. Sanjuan, J. Bon, G. Clemente, A. Mulet: Changes in the quality of dehydrated broccoli florets during storage. *Journal of Food Engineering*, 62 (1): 15-21, 2004.
13. V. Guillard, B. Broyart, C. Bonazzi, S. Guilbert, N. Gontard: Modelling of moisture transfer in a composite food: Dynamic water properties in an intermediate a(w) porous product in contact with high a(w) filling. *Chemical Engineering Research & Design*, 81 (A9): 1090-1098, 2003.

14. M. Pagano, R. H. Mascheroni: Water sorption of *Amaranthus cruentus* L. seeds modelled by GAB equation. *International Journal of Food Properties*, 6 (3): 369-391, 2003.
15. M. Sinigaglia, M. R. Corbo, C. Altieri, D. Campaniello, D. D'Amato, A. Bevilacqua: Combined effects of temperature, water activity, and pH on *Alicyclobacillus acidoterrestris* spores. *Journal of Food Protection*, 66 (12): 2216-2221, 2003.
16. M. E. Guynot, S. Marin, V. Sanchis, A. J. Ramos: Modified atmosphere packaging for prevention of mold spoilage of bakery products with different pH and water activity levels. *Journal of Food Protection*, 66 (10): 1864-1872, 2003.
17. A. Sander: *Komparativna istraživanja kinetike sušenja čvrstih materijala*, Disertacija, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 3-40, 2003.
18. V. T. Karathanos: Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *Journal of Food Engineering*, 39 (4), 337-344, 1999.
19. S. Tomas, D. Skansi, E. Sokele: Kinetika konvekcijskog sušenja poroznih materijala. *U Znan. prak. poljop. tehnol.*, 22 (3), 505-518, 1992.
20. I. Turner, A.S. Mujumdar: *Mathematical Modeling and Numerical Techniques in Drying Technology*, Marcel Dekker, Inc., New York, Basel, Hong Kong, 83-435, 1996.
21. G. Mwithiga, J. O. Olwal: The drying kinetics of kale (*Brassica oleracea*) in a convective hot air dryer. *Journal of Food Engineering*, 71, (4): 373-378, 2005.
22. S. Kaleemullah and R. Kailappan: Drying Kinetics of Red Chillies in a Rotary Dryer. *Biosystems Engineering*, 92, (1): 15-23, 2005.
23. İ. Doymaz: Drying characteristics and kinetics of okra. *Journal of Food Engineering*, 69, (3): 275-279, 2005.
24. D. Velić, M. Planinić, S. Tomas, M. Bilić: Influence of airflow velocity on kinetics of convection apple drying. *Journal of Food Engineering*, 64/1, 97-102, 2004.
25. C. Bilbao-Sáinz, A. Andrés, P. Fito: Hydration kinetics of dried apple as affected by drying conditions. *Journal of Food Engineering*, 68, (3): 369-376, 2005.
26. C. Niamnuy, S. Devahastin: Drying kinetics and quality of coconut dried in a fluidized bed dryer. *Journal of Food Engineering*, 66, (2): 267-271, 2005.
27. V. T. Karathanos: Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *Journal of Food Engineering*, 39 (4), 337-344, 1999.

28. Z. Bobić: *Dinamika sušenja prehrambenih proizvoda u fluidiziranom sloju*, Disertacija, Prehrambeno-biotehnološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 1-21, 1997.
29. V. T. Karathanos, V. G. Belessiotis: Sun and artificial air drying kinetics of some agricultural products. *Journal of Food Engineering*, 31(1), 35-46, 1997.
30. G. K. Vagenas, V. T. Karathanos: Prediction of the moisture diffusivity in gelatinized starch materials. *Journal of Food Engineering*, 18 (2), 159-179, 1993.
31. M. K. Krokida, V. T. Karathanos, Z. B. Maroulis, D. Marinou-Kouris: Drying kinetics of some vegetables. *Journal of Food Engineering*, 59 (4): 391-403, 2003.
32. K. Sacilik, R. Keskin, A. K. Elicin: Mathematical modelling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. *Journal of Food Engineering*, 73, (3): 231-238, 2006.
33. M. Jaros, S. Pabis: Theoretical Models for Fluid Bed Drying of Cut Vegetables. *Biosystems Engineering*, 93, (1): 45-55, 2006.
34. V. Mrkić: *Utjecaj uvjeta sušenja na biološki aktivne spojeve i antiradikalnu snagu brokule i luka*, Disertacija, Prehrambeno-biotehnološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 4-16, 2005.
35. M. Markowski: Air drying of vegetables: Evaluation of mass transfer coefficient. *Journal of Food Engineering*, 34, (1): 55-62, 1997.
36. J. Wang, Y. Chao: Drying characteristics of irradiated apple slices, *Journal of Food Engineering*, 52, (1), 83-88, 2002.
37. G. P. Sharma, R. C. Verma and P. Pathare: Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices. *Journal of Food Engineering*, 71, (3): 282-286, 2005.
38. H. Toğrul: Simple modeling of infrared drying of fresh apple slices. *Journal of Food Engineering*, 71, (3): 311-323, 2005.
39. T. Toğrul, D. Pehlivan: Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. *Journal of Food Engineering*, 65 (3): 413-425, 2004.
40. E. K. Akpınar: Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. *Journal of Food Engineering*, 73 (1): 75-84, 2006.
41. V. Demir, T. Gunhan, A. K. Yagcioglu, A. Degirmencioglu: Mathematical modelling and the determination of some quality parameters of air-dried bay leaves. *Biosystems Engineering*, 88 (3): 325-335, 2004.

42. E. A. Boss, R. M. Filho, E. C. V. de Toledo: Freeze drying process: real time model and optimization. *Chemical Engineering and Processing*, 43, (12): 1475-1485. 2004.
43. T. Togrul, D. Pehlivan: Modelling of drying kinetics of single apricot. *Journal of Food Engineering*, 58 (1): 23-32, 2003.
44. S. R. Parde, D. S. Jayas, N. D. G.White: Grain drying (a review). *Sciences des Aliments*. 23 (5-6): 589-622, 2003.
45. Doymaz: Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering*, 61(3): 359-364, 2004.
46. C. Ertekin, O. Yaldiz: Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering*, 63, (3): 349-359, 2004.
47. Iguaz, A. Esnoz, G. Martinez, A. Lopez, P. Virseda: Mathematical modelling and simulation for the drying process of vegetable wholesale by-products in a rotary dryer. *Journal of Food Engineering*, 59 (2-3): 151-160, 2003.
48. E. K. Akpınar, Y. Bicer, C. Yildiz: Thin layer drying of red pepper. *Journal of Food Engineering*, 59 (1): 99-104, 2003.
49. M. Di Matteo, L. Cinquanta, G. Galiero, S. Crescitelli: A mathematical model of mass transfer in spherical geometry: plum (*Prunus domestica*) drying. *Journal of Food Engineering*, 58 (2): 183-192, 2003.
50. T. Togrul, D. Pehlivan: Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering*, 55 (3): 209-216, 2002.
51. J. Nilsson, S. Stenstrom: Modelling of heat transfer in hot pressing and impulse drying of paper. *Drying Technology*, 19 (10): 2469-2485, 2001
52. Z. Kawala, J. Wojdal: Modelling of freeze-drying process with volumetric heating. *Inżynieria Chemiczna i Procesowa*, 22 (3C): 675-680, 2001.
53. K. Ciesielski, I. Zbicinski: Hybrid neural modelling of fluidised bed drying process. *Drying Technology*, 19 (8): 1725-1738, 2001.
54. E. Hajidavalloo, F. Hamdullahpur: Thermal analysis of a fluidized bed drying process for crops. Part I: Mathematical modeling. *International Journal of Energy Research*, 24 (9): 791-807, 2000.
55. I. Farkas, C. Meszaros, A. Balint: Mathematical and physical foundations of drying theories. *Drying Technology*, 18 (3): 541-559, 2000.

56. M. A. M. Khraisheh, W. A. M. McMinn, T.R.A. Magee: A multiple regression approach to the combined microwave and air drying process. *Journal of Food Engineering*. 43 (4): 243-250, 2000.
57. S. J. Temple A. J. B. van Boxtel: Modelling of fluidized-bed drying of black tea. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 74 (2): 203-212, 1999.
58. L. M. Diamante, P. A. Munro: Mathematical modelling of hot air drying of sweet potato slices. *International Journal of Food Science and Technology*, 26 (1), 99-109, 1991.
59. A. Midilli, H. Kucuk, Z. Yapar: A new model for single layer drying. *Drying Technology*, 20 (7): 1503-1513, 2002.
60. D. S. Jayas, S. Cenkowski, S. Pabis, W. Muir: Review of thin-layer drying and wetting equations. *Drying Technology*, 9 (3), 551-588, 1991.
61. R. K. Byler, C. R. Anderson, R. C. Brook: Statistical methods in thin layer parboiled rice drying models. *Transactions of the ASAE*, 30 (2), 533-538, 1987.
62. B. K. May, A.J. Sinclair, A.L. Halmos, V.N. Tran: Quantitative analysis of drying behavior of fruits and vegetables. *Drying Technology*. 17 (7-8), 1441-1448, 1998.
63. D. Ježek: *Prijelaz topline između uronjenog orebrenog grijača i sloja čestica prehrambenih proizvoda različitih dimenzija*, Disertacija, Prehrambeno-biotehnološki fakultet, Zagreb, 3-68, 1999.
64. R. H. Newman, M. A. Ha, L. D. Melton: Solid-state ^{13}C NMR investigation of molecular ordering in the cellulose of apple walls. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 42, 1402-1406, 1994.
65. B. Feinberg, Vegetables. *Food Dehydration*. W. B. Van Arsdel, M. J. Copley, A. I. Morgan, The Avi Publ. Co., Westport, Con., Vol.2. Practices and Applications, 1-82, 1973.
66. S. J. Singer, G. L. Nicolson: The Fluid Mosaic Model of the Structure of Membranes. *Science*, 175, 720-731, 1972.
67. W. M. Becker, J. B. Reece, M. F. Poenie: *The World of the Cell*. Menlo Park, CA: Benjamin/Cummings., 1996.
68. S. Rolle, G. W. Chism: Physiological consequences of minimally processed fruit and vegetables. *Journal of Food Quality*, 10, 157-177, 1987.

69. F. Carlin, C. Nguyen, G. Hilbert, Y. Chambroy: Modified atmosphere packing of fresh, «ready to use» grated carrots in polymeric films. *Journal of Food Science*, 55, 1033-1038, 1990.
70. L. R. Howard, K. S. Yoo, L. M. Pike, G. H. Miller: Quality changes in diced onions stored in film packages. *Journal of Food Science*, 59, 110-112,117, 1994.
71. P. P. Lewicki: Effect of pre-drying treatment, drying and rehydration on plant tissue properties: A review. *International Journal of Food Properties*, 1 (1): 1-22, 1998.
72. G. J. Buta, H. E.Moline, D. W. Spaulding, C. Y. Wang: Extending storage life of fresh-cut apples using natural products and their derivatives. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47, 1-6, 1999.
73. G. J. Buta, J. Abbott: Browning inhibition of three cultivars of fresh-cut pears. *HortScience*, 35, 1111-1113, 2000.
74. G. A. González-Aguilar, C. Y.Wang, J. G. Buta: Inhibition of browning and decay of fresh-cut radishes by natural compounds and their derivatives. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 34, 324-328, 2001.
75. M. Riva, P. Masi: The influence of the blanching procedure on the quality and shelf-life of dried apples. In: *Progress in Food preservation Processes*, CERIA, Brussels, vol. 1. 31-38. 1988.
76. D. Barbanti, D. Mastrocola, G. Pinnavaia, C. Severini, M. Dalla Rosa: Air drying of fruit: effects of different pre-treatments on drying rate and product quality. In *Drying '91*. A.S. Mujumdar, I. Filkova, I. eds. Elsevier Science Publisher, Amsterdam, 471-482, 1991.
77. M. Planinić, S. Tomas, D. Velić: Influence of drying parameters and browning inhibitor on infrared drying of apple, *The 4th Croatian Congress of Food Technologists, Biotechnologists and Nutritionist*, Opatija, 2001.
78. B. W. Poovaiah: Role of calcium in prolonging storage life of fruits and vegetables. *Food Technology*, 40 (5): 86-89, 1986.
79. G. A. Picchioni, A. E. Watada, S. Roy, B. D. Whitaker, W. P. Wergin: Membrane lipid metabolism, cell permeability and ultrastructural changes in lightly processed carrot. *Journal of Food Science*, 59, 597-601, 605, 1994.
80. G. M. Glenn, B. W. Pooviaiah: Calcium-mediated post-harvest changes in texture and cell wall structure and composition in Golden Delicious apples. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 115, 962-968, 1990.

81. E. M. Ahmed, S. Mirza, A. G. Arreola: Ultrastructural and textural changes in processed carrot tissue. *Journal of Food Quality*, 14, 321-330, 1991.
82. J. C. Curry, E. E. Burns, N. D. Heidelbough: Effect of sodium chloride on rehydration of freeze-dried carrot. *Journal of Food Science*, 41, 176-179, 1976.
83. H. J. Neuman: Dehydrated celery: effects of pre-drying treatments and rehydration procedures on reconstitution. *Journal of Food Science*, 37, 437-441, 1972.
84. B. Yoo, C. M. Lee: Thermoprotective effect of sorbitol on proteins during dehydration. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 41, 190-192, 1993.
85. J. H. Crowe, L. M. Crowe, J. F. Carpenter, A. S. Rudolph, C. A. Winstrom, B. J. Spargo, T. J. Anchordoguy: Interactions of sugars with membranes. *Biochimica and Biophysica Acta*, 947, 367-384, 1988.
86. A. Lenart, B. Iwaniuk, P. P. Lewicki: Water transfer during rehydration of dewatered apple, pumpkin and carrot. In: *Properties of Water in Foods*. Warsaw, Agricultural University Press, Warsaw, 118-129, 1992.
87. A. Monsalve-Gonzales, G. V. Barbosa-Canovas, R. P. Cavaliere: Mass transfer and textural changes during processing of apples by combined methods. *Journal of Food Science*, 58, 1118-1124, 1993.
88. S. Simal, E. Deyá, M. Frau, C. Rosseló: Simple modelling of air drying curves of fresh and osmotically pre-dehydrated apple cubes. *Journal of Food Engineering*, 33, 139-150, 1997.
89. H. R. Bolin, C. C. Huxsoll: Storage stability of minimally processed fruit. *Journal of Food Processing and Preservation*, 13, 281-292, 1989.
90. R. Ahvenainen, New approaches in improving the shelf life of minimally processed fruit and vegetables. *Trends in Food Science and Technology*, 7, 179-187, 1996.
91. S. Vetter, H. Kunzek, B. Senge: The influence of the pre-treatment of apple cell wall samples on their functional properties. *European Food Research & Technology*, 212 (6): 630-635, 2001.
92. N. Ramos, T. R. S. Brandao, C. L. M. Silva: Structural changes during air drying of fruits and vegetables. *Food Science & Technology International*, 9 (3): 201-206, 2003.
93. E. Forni, D. Torregiani, P. Battiston, A. Polesello: Research into changes of pectic substances in apricot and peaches processed by osmotic dehydration. *Carbohydrate Polymers*, 6, 379-381, 1986.

94. E. Torringa, E. Esveld, I. Scheewe, R. Van den Berg, P. Bartels: Osmotic dehydration as a pre-treatment before combined microwave-hot-air drying of mushrooms, *Journal of Food Engineering*, 49 (2-3): 185-191, 2001.
95. P. M. Azoubel, F. E. X. Murr: Optimisation of osmotic dehydration of cashew apple (*Anacardium occidentale* L.) in sugar solutions. *Food Science & Technology International*, 9 (6): 427-433, 2003.
96. I. Doymaz, M. Pala: The effects of dipping pretreatments on air-drying rates of the seedless grapes. *Journal of Food Engineering*, 52 (4): 413-417, 2002.
97. M. Di Matteo, L. Cinquanta, G. Galiero, S. Crescitelli: Effect of a novel physical pretreatment process on the drying kinetics of seedless grapes. *Journal of Food Engineering*, 46 (2): 83-89, 2000.
98. R. Kortbech-Olesen: Dehydrated vegetables – a market to watch in future, *Indian Food Industry*, 13 (5), 35-40, 1994.
99. H. H. Nijhuis, H. M. Torringa, S. Muresan, D. Yuksel, C. Leguijt, W. Kloek: Approaches to improving the quality of dried fruit and vegetables, *Trends in Food Science & Technology*, 9, (1): 13-20, 1998.
100. B. I. Abonyi, H. Feng, J. Tang, C. G. Edwards, B. P. Chew, D.S. Mattinson, J. K. Fellman: Quality Retention in Strawberry and Carrot Purees Dried with Refractance Window™ System. *Journal of Food Science*, 67, (3): 1051-1056. 2002.
101. G. S. Mudahar, R. T. Toledo, J. D. Floros, J. J. Jen: Optimization of carrot dehydration process using response surface methodology. *Journal of Food Science*, 54, 714-719. 1989.
102. G. S. Mudahar, J. R. Buhr, J. J. Jen: Infiltrated biopolymers effect on quality of dehydrated carrot. *Journal of Food Science*, 57, 526-529, 1991.
103. R. N. Tripathi, N. Nath: Effect of starch dipping on quality of dehydrated tomato slices. *Journal of Food Science and Technology*, 26, 137-141, 1989.
104. H. Kunzek, S. Muller, S. Vetter, R. Godeck: The significance of physico chemical properties of plant cell wall materials for the development of innovative food products (review). *European Food Research & Technology*, 214 (5): 361-376, 2002.
105. T. Lovrić, V. Piližota: *Konzerviranje i prerada voća i povrća*, Nakladni zavod Globus, Zagreb, 35-210, 1994.
106. V. Hegedušić: *Vrednovanje sirovina i proizvoda sušenjem te njihova priprema za sušenje*, Sušenje u prehrambenoj industriji PBF, 4-5, 1991.

107. P. Masi, M. Riva: Modelling grape drying kinetics. *In: Preconcentration and Drying of Food Materials*, S. Bruin, ed. Elsevier, Amsterdam, 203-214, 1988.
108. D. Barbanti, D. Mastrocola, S. Pizzarani: Air drying of plums. Influence of some process parameters on the specific drying kinetics. *Science des Aliments*, 15, 19-29, 1995.
109. V. Piližota, D. Šubarić: Control of Enzymatic Browning of Foods. *Food Technol. Biotechnol.*, 36 (3): 219-227, 1998.
110. D. M. Barret, C. Theerakulkait: Quality indicators in blanched, frozen, stored vegetables. *Food technology*, 49, 62-65, 1995.
111. J. C. Heredia-Leon, R. Talamas-Abbud, V. Mendoza-Guzman, F. Solis-Martinez, J. Jimenez-Castro, J. Barnard, A. Quintero-Ramos: Structural and physical properties of dried Anaheim chilli peppers modified by low-temperature blanching. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 84 (1): 59-65, 2004.
112. E. Kompany, K. Allaf, J. M. Bouvier, P. Guigon, A. Maureaux: A new drying method of fruits and vegetables – quality improvement of final product. *In: Drying '91*. A. S. Mujumdar, I. Filkova, I. eds. Elsevier Science Publisher, Amsterdam, 499-506, 1991.
113. P. S. Negi, S. K. Roy: The effect of blanching on quality attributes of dehydrated carrots during long-term storage. *European Food Research & Technology*, 212 (4): 445-448, 2001.
114. C. C. Seow, K. B. Ng, M. C. Bourne: Effect of blanching treatments on physiochemical properties of dehydrated carrots, celery and green beans. *ASEAN Food Journal*, 7 (4): 184-188, 1992.
115. L. Collins, H. S. Sidhu, C. A. Mullins: Drying tomatoes through osmotic treatment and dehydration. *Tennessee Agricultural Science*, 182, 24–27. 1997.
116. P. S. Negi, S. K. Roy: Effect of blanching and drying methods on beta-carotene, ascorbic acid and chlorophyll retention of leafy vegetables. *Lebensmittel - Wissenschaft + Technologie. Food Science + Technology*, 33 (4): 295-298, 2000.
117. F. A. R. Oliveira, C. L. M. Silva: Freezing influences diffusion of reducing sugars in carrot cortex. *Journal of Food Science*, 57, 932-934, 1992.
118. E. Choe, J. Lee, K. Park, S. Lee: Effects of heat pretreatment on lipid and pigments of freeze-dried spinach. *Journal of Food Science*, 66 (8): 1074-1079, 2001.

119. M. Di Matteo, L. Cinquanta, G. Galiero, S. Crescitelli: Physical pre-treatment of plums (*Prunus domestica*). Part 1. Modelling the kinetics of drying. *Food Chemistry*, 79 (2): 227-232, 2002.
120. D. K. Asami, Y. J. Hong, D. M. Barrett, A. E. Mitchell: Comparison of the total phenolic and ascorbic acid content of freeze-dried and air-dried marionberry, strawberry, and corn grown using conventional, organic, and sustainable agricultural practices. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51 (5): 1237-1241, 2003.
121. A. F. Baroni, M. D. Hubinger: Drying of onion: effects of pretreatment on moisture transport. *Drying Technology*, 16 (9&10): 2083-2094, 1998.
122. M. S. Hatamipour, D. Mowla: Shrinkage of carrots during drying in an inert medium fluidized bed. *Journal of Food Engineering*, 55 (3): 247-252, 2002.
123. S. Pabis, M. Jaros: The first period of convection drying of vegetables and the effect of shape-dependent shrinkage. *Biosystems Engineering*, 81 (2): 201-211, 2002.
124. P. P. Lewicki, D. Witrowa: Heat and mass transfer in externally controlled drying of vegetables. In: *Drying '92*. A. S. Mujumdar, ed. Elsevier Science Publisher, Amsterdam, Part A, 884-891, 1992.
125. B. Nieto, D. M. Salvatori, M. A. Castro, S. M. Alzamora: Structural changes in apple tissue during glucose and sucrose osmotic dehydration: shrinkage, porosity, density and microscopic features. *Journal of Food Engineering*, 61 (2): 269-278, 2004.
126. J. R. Talla Puiggali, W. Jomaa, Y. Jannot: Shrinkage and density evolution during drying of tropical fruits: application to banana. *Journal of Food Engineering*, 64 (1): 103-109, 2004.
127. H. Yang, N. Sakai, M. Watanabe: Drying model with non-isotropic shrinkage deformation undergoing simultaneous heat and mass transfer, *Drying Technology*, 19 (7): 1441-1460, 2001.
128. N. P. Zogzas, Z. B. Maroulis, D. Marions-Kouris: Densities, shrinkage and porosity of same vegetables during air drying. *Drying Technology*, 12 (7): 1653-1666, 1994.
129. C. Suarez, P. E. Viollaz: Shrinkage effect on drying behavior of potato slabs. *Journal of Food Engineering*, 13 (2): 103-114, 1991.
130. E. Tsami, M. Katsioti: Drying kinetics for some fruits: Predicting of porosity and color during dehydration. *Drying Technology*, 18 (7): 1559-1581, 2000.

131. Y. Roos, M. Karel: Effects of water and molecular weight on glass transition in amorphous carbohydrates and carbohydrate solutions. *Journal of Food Science*, 56, 1676-1681, 1991.
132. D. Šubarić: *Inhibicija polifenol-oksidade u svrhu sprječavanja enzimskog posmeđivanja*. Doktorska disertacija, Prehrambeno-biotehnološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu, str. 2-51, 1999.
133. T. R. Toledo: *Fundamentals of Food Process Engineering*. Westport, Connecticut: Avi Publishing Company, Inc., 128-383, 1980.
134. P. P. Lewicki: Some remarks on rehydration of dried foods. *Journal of Food Engineering*, 36, 81-87, 1998.
135. M. K. Krokida, Z. B. Maroulis: Structural properties of dehydrated products during rehydration. *International Journal of Food Science & Technology*, 36 (5): 529-538, 2001.
136. P. P. Lewicki, D. Witrowa-Rajchert, J. Mariak: Changes of structure during rehydration of dried apples. *Journal of Food Engineering*, 63, 347-350, 1997.
137. S. Vetter, H. Kunzek: The influence of the pre-drying treatment on the hydration properties of dried cell wall materials from apples. *European Food Research and Technology*. 216 (2): 129-137, 2003.
138. Z. Bobic, I. Bauman, D. Curic: Rehydration ratio of fluid bed-dried vegetables. *Sadhana-Academy Proceedings in Engineering Sciences*. 27 (3): 365-374, 2002.
139. S. Simal, C. Rossello, A. Berna, A. Mulet: Heat and mass transfer model for potato drying. *Chemical Engineering Science*, 22 (49): 3739-3744, 1994.
140. B. S. Luh, J. G. Woodroof: *Comercial Vegetable Processing*, Avi Publishing Comp., Westport, 195-289, 1975.
141. M. K. Krokida, C. T. Kiranoudis, Z. B. Maroulis, D. Marinos-Kouris: Effect of pretreatment on color of dehydrated products. *Drying Technology*, 18 (6): 1239-1250, 2000.
142. G. K. Sharma, A. D. Semwal, S. S. Arya: Effect of processing treatments on the carotenoids composition of dehydrated carrots. *Journal of Food Science & Technology-Mysore*. 37 (2): 196-200, 2000.
143. V. T. Karathanos, S. Anglea, M. Karel: Collapse of structure during drying of celery. *Drying Technology*, 11: 1005-1023, 1993.

144. G. Ruíz Díaz, J. Martínez-Monzó, P. Fito, A. Chiralt: Modelling of dehydration-rehydration of orange slices in combined microwave/air drying. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 4 (2): 203-209, 2003.
145. M. Maskan: Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 48 (2): 177-182, 2001.
146. M. A. M. Khraisheh , W. A. M. McMinn, T. R. A. Magee: Quality and structural changes in starchy foods during microwave and convective drying. *Food Research International*, In Press, available online 27. March 2004.
147. S. Prakash, S. K. Jha, N. Datta: Performance evaluation of blanched carrots dried by three different driers. *Journal of Food Engineering*, 62 (3): 305-313, 2004.
148. M. K. Krokida, D. Marinos-Kouris: Rehydration kinetics of dehydrated products. *Journal of Food Engineering*, 57 (1): 1-7, 2003.
149. M. Planinić, S. Tomas, A. Bucić, M. Bilić, D. Velić, D. Kovačević, D. Šubarić: Effect of cultivation and drying temperature on rehydration ability of the carrots and potatoes. 32. Symposium «*Actual Tasks on Agricultural Engineering*», Opatija, Croatia, 397-403, 2004.
150. K. A. Taiwo, A. Angersbach, D. Knorr: Influence of high intensity electric field pulses and osmotic dehydration on the rehydration characteristics of apple slices at different temperatures. *Journal of Food Engineering*, 52, (2): 185-192, 2002.
151. D. Velić, M. Bilić, S. Tomas, M. Planinić, A. Bucić: Parsley Root Drying - Comparison Of Two Different Methods, 33. *Symposium «Actual Tasks on Agricultural Engineering*», Opatija, Croatia, 2005. 551-570.
152. Femenia, M. J. Bestard, N. Sanjuan, C. Rosselló, A. Mulet: Effect of rehydration temperature on the cell wall components of broccoli (*Brassica oleracea* L. Var. *italica*) plant tissues. *Journal of Food Engineering*, 46, (3): 157-163, 2000.
153. N. Sanjuán, S. Simal, J. Bon and A. Mulet: Modelling of broccoli stems rehydration process. *Journal of Food Engineering*, 42, (1): 27-31, 1999.
154. C. R. Sauterre, J. N. Cash, D. J. Vannorman: Ascorbic acid/citric acid combination in the processing of frozen apple slices. *Journal of Food Science*, 1713-1736, 1988.
155. A. Kaić-Rak, K. Antonić: *Tablice o sastavu i prehrambenoj vrijednosti namirnica i pića*. Zavod za zaštitu zdravlja Rep. Hrvatske, Zagreb, str. 58-59, 1990.

156. I. Miljković: *Suvremeno voćarstvo*. Nakladni zavod Znanje, Nacionalna i sveučilišna knjižnica Zagreb, Zagreb, str. 147-172, 1991.
157. B. Perić: *Priručnik za industrijsku proizvodnju sušenog voća i povrća*. Književne novine, Beograd, str. 10-13, 331-342, 1982.
158. M. A. Bošković: *Fundamental Aspects of the Dehydration of Foodstuffs, Conference health in Aberdeen*. str. 14-15, 1958.
159. N. Dobričević: Sušenje jabuke suvremenim tehnološkim postupcima. U *Zbornik radova IX. Međunarodno savjetovanje tehnologa sušenja i skladištenja*, Agronomski fakultet, Zagreb, Hrvatska, str. 175-185, 1993.
160. Prehrambene tablice (*kemijski sastav namirnica*), Hrvatski farmer, ur. Ignac Kulier, <http://hrana.com/pt/>, 21. 06. 2005.
161. Watt-Merill: *The Food Composition Tables*, USDA Book 8, Washington D.C., 1985.
162. Fachmann-Souci-Kraut: *Food Compositon and Nutrition Tables*, Wiessenschaftlicheverlag, Stuttgart, 1989/90.
163. Z. Matotan: *Proizvodnja povrća*, Nakladni zavod Globus, Zagreb, str. 9-89., 1994.
164. B. Britvica: *Poljoprivredna enciklopedija*, II. dio, Jugoslavenski leksikografski zavod, Zagreb, str. 503 – 504, 1967.
165. P. Pavlek : *Specijalno povrćarstvo*, Fakultet poljoprivrednih znanosti, Zagreb, 1993.
166. *Poljoprivredna enciklopedija*, II. dio, Jugoslavenski leksikografski zavod, Zagreb, str. 265 – 267, 1967.
167. AOAC: *Official Methods of Analysis*, Vol II, 16th ed., Association of Official Analytical Chemists, Arlington, USA, 1995.
168. ASTM D2244: *Standard Test Method for Calculation of Color Differences From Instrumentally Measured Color Coordinates*, American Society for Testing and Materials, ASTM International, 2002.
169. A. Askar: Measurement of Food Color, *Processing Fruit. Quality*, 6, 223-334, 1993.
170. G. Sumnu, E. Turabi, M. Oztop: Drying of carrots in microwave and halogen lamp–microwave combination ovens, *LWT - Food Science and Technology*, 38, (5), 549-553, 2005.
171. S. Simal, C. Garau, A. Femenia, C. Rossello: Drying of Red Pepper (*Capsicum Annuum*): Water Desorption and Quality, *International Journal of Food Engineering*, 1 (4): 1-12, 2005.

POPIS OZNAKA, KRATICA I SIMBOLA

A – površina [m^2]

a_w – aktivitet vode

a^* , b^* i L^* - parametri boje uzoraka

a , k , n , b – parametri sušenja

AK – askorbinska kiselina

BL-p – blanširanje na pari

BL-v – blanširanje u vreloj vodi

C^*_{ab} – promjena boje

CH₃CN – acetonitril

DCM – diklor-metan

D_{eff} – koeficijent difuzije [$m^2 s^{-1}$]

dX/dt – brzina sušenja [$kg_{vp} kg^{-1}_{st} s^{-1}$]

FBD – sušionik za sušenje s fluidiziranim slojem

H - vlažnost zraka [$kg_{vp} kg^{-1}_{sz}$]

H_e – ravnotežna vlažnost zraka [$kg_{vp} kg^{-1}_{sz}$]

H_g – trenutna apsolutna vlažnost zraka [$kg_{vp} kg^{-1}_{sz}$]

IC – infracrveni sušionik

KK – kalcijev klorid

ℓ – debljina sušenog uzorka [m]

m – masa [kg]

MBE – srednje odstupanje podataka

MeOH – metanol

m_{vp} – masa vodene pare [kg]

m_{sz} – masa suhog zraka [kg]

m_1 – masa suhog uzorka [g]

m_2 – masa rehidratiranog uzorka [g]

NT – neobrađeni uzorci

p – tlak [Pa]

p – parcijalni tlak vode u namirnici [Pa]

p_0 – tlak čiste vode [Pa]

p_e – ravnotežni parcijalni tlak vodene pare [Pa]

p_g – parcijalni tlak vodene pare u glavnoj masi zraka [Pa]

r – latentna toplina isparavanja vode [kJ kg⁻¹]

R – indeks korelacije

RH – relativna vlažnost zraka [%]

RMSE – srednje kvadratno odstupanje

RO – rehidrationski omjer

ZM – zamrzavanje

t - vrijeme [s]

t' – vremenski interval [s]

T – temperatura [°C]

TD – tunelski sušionik

v – brzina strujanja zraka [m s⁻¹]

VK – vakuum sušionik

V_0 – volumen svježeg uzorka [ml]

V_1 – volumen uzorka nakon sušenja [ml]

w_0 - udio vlage svježeg uzorka [%]

w_f - udio vlage suhog uzorka [%]

Q – količina topline [J]

X – vlažnost sušenog materijala [$\text{kg}_v \text{kg}_{st}^{-1}$]

X' – bezdimenzionalna vlažnost

X_K – sadržaj vode u kritičnoj točki [$\text{kg}_{vp} \text{kg}_{st}^{-1}$]

X_R – ravnotežni sadržaj vlage [$\text{kg}_{vp} \text{kg}_{st}^{-1}$]

α – koeficijent prijelaza topline [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$]

χ^2 – reducirani hi-kvadrat

ΔE – ukupna promjena boje uzoraka

ρ - specifična masa [kg m^{-3}]

σ - koeficijent prijenosa mase [$\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$]

Indeksi:

k – kritični sadržaj vlage

K - kritična točka

R - ravnotežno stanje

uz - uzorak

v - voda

vp - vodena para

sr - srednji

st - suha tvar

sz - suhi zrak

$tek.$ - tekućina

zr - zrak

ŽIVOTOPIS

Darko Velić, rođen je 20. veljače 1974. godine u Bihaću, Republika Bosna i Hercegovina, gdje je završio osnovnu i srednju Elektrotehničku školu, smjer računarska tehnika i automatika.

Nakon završene srednje škole 1992. godine aktivno se priključuje postrojbama HVO-a Zborno mjesto Bihać u čijim redovima obnaša vojne dužnosti tijekom tri godine.

U rujnu 1995. godine upisuje Prehrambeno tehnološki fakultet u Osijeku na kojem 26. svibnja 2000. godine diplomira kao prvi diplomand generacije akademske 1995./96. godine, te stječe zvanje diplomiranog inženjera prehrambene tehnologije, smjera Prehrambeno inženjerstvo.

10. listopada 2000. godine zapošljava se na Prehrambeno tehnološkom fakultetu u Osijeku kao znanstveni novak.

24. studenog 2000. godine na III. redovitoj sjednici Fakultetskog vijeća PTF-a Osijek izabran je u istraživačko zvanje mlađeg asistenta iz znanstvenog područja Biotehničke znanosti, znanstveno polje Prehrambena tehnologija, znanstvena grana Inženjerstvo na Katedri za projektiranje i optimizaciju tehnoloških procesa.

2000./2001. godine upisuje poslijediplomski magistarski znanstveni studij, smjera Prehrambeno inženjerstvo.

Bio je suradnik na znanstvenom projektu 113001: «Razvoj procesa proizvodnje visokokvalitetnih prehrambenih proizvoda» od 2000. do 2002. godine. Trenutno je suradnik na znanstvenom projektu 113005: «Suvremene metode sušenja u prehrambeno-procesnom inženjerstvu». Suradnik je i na VIP projektima: «Sušenje slavonskih autohtonih i ekoloških proizvoda» i «Proizvodnja jabučnog octa na obiteljskim gospodarstvima». Bio je suradnik i na tehnolojskim projektima: (TP-02/0113) «Razvoj i konstrukcija tenzidnog senzora» i (TP 01/0113-03) «Istraživanje postupaka slađenja domaćih sorti pšenice». Na projektu CARDS «Program održivog razvoja obiteljskih farmi u Baranji» bio je voditelj stručnog tima; 2005. – 2006.

Objavio je 11 znanstvenih radova, od toga 3 rada indeksirana u referalnim časopisima prve (a1) skupine (SCI, CC), 8 znanstvenih radova treće (a3) skupine recenzirana i objavljena u zborniku radova s međunarodnog znanstvenog skupa. Sudjelovao je s 8 radova na međunarodnim i 7 radova na domaćim znanstvenim skupovima.

Zbog doprinosa razvoju prehrambenog inženjerstva i ostvarenih rezultata znanstvenog rada, Darko Velić dipl. ing., dobiva godišnju nagradu Akademije tehničkih znanosti Hrvatske za mlade znanstvenike «Vera Johanides» za 2003. godinu, te je bio predloženi Prehrambeno tehnološkog fakulteta Osijek za Godišnju državnu nagradu za znanost Ministarstva znanosti i tehnologije, u kategoriji znanstvenih novaka za 2003. godinu u području biotehničkih znanosti.

Na IX. redovitoj sjednici Fakultetskog vijeća Prehrambeno tehnološkog fakulteta Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, akademska 2003. /2004. godina, održanoj dana 15. rujna 2004. godine utvrđeno je da Darko Velić, dipl. ing., ispunjava uvjete za izbor u znanstvenog suradnika. Temeljem toga omogućen mu je prelazak s poslijediplomskog magistarskog znanstvenog studija, smjer Prehrambeno inženjerstvo, na poslijediplomski studij za stjecanje akademskog stupnja doktor znanosti, upisom studija i izradom doktorskog rada, bez pohađanja nastave i polaganja ispita.

Oženjen je i otac dvoje djece.