



UNIVERZITET U NOVOM SADU  
TEHNOLOŠKI FAKULTET

# OPTIMIZACIJA SUŠENJA VOĆA U VAKUUMU

Doktorska disertacija

Mentor:

doc. dr Aleksandra Tepić

Kandidat:

Zdravko Šumić, dipl. inž.

Novi Sad, 2014.

---

## UNIVERZITET U NOVOM SADU

## TEHNOLOŠKI FAKULTET

## Ključna dokumentacijska informacija

<b>Redni broj:</b> RBR	
<b>Identifikacioni broj:</b> IBR	
<b>Tip dokumentacije:</b> TD	Monografska dokumentacija
<b>Tip zapisa:</b> TZ	Tekstualni štampani materijal
<b>Vrsta rada (dipl., mag., dokt.):</b> VR	Doktorska disertacija
<b>Ime i prezime autora:</b> AU	Zdravko Šumić, dipl. inž.
<b>Mentor (titula, ime, prezime, zvanje):</b> MN	dr Aleksandra Tepić, docent Tehnološkog fakulteta Univerziteta u Novom Sadu
<b>Naslov rada:</b> NR	Optimizacija sušenja voća u vakuumu
<b>Jezik publikacije:</b> JP	Srpski (latinica)
<b>Jezik izvoda:</b> JI	Srpski/engleski
<b>Zemlja publikovanja:</b> ZP	Srbija
<b>Uže geografsko područje:</b> UGP	AP Vojvodina
<b>Godina:</b> GO	2014.
<b>Izdavač:</b> IZ	Autorski reprint
<b>Mesto i adresa:</b> MA	Novi Sad, Bulevar Cara Lazara 1
<b>Fizički opis rada:</b> FO	Broj poglavlja 6, stranica 126, slika 21, tabela 18, literaturnih navoda 133
<b>Naučna oblast:</b> NO	Prehrambeno inženjerstvo

<b>Naučna disciplina:</b> <b>ND</b>	Tehnologija proizvoda od voća i povrća
<b>Predmetna odrednica,</b> <b>ključne reči:</b> <b>PO</b> <b>UDK</b>	Vakuumsko sušenje, optimizacija, RSM, prototip vakuumske sušare, kvalitet sušenog voća
<b>Čuva se:</b> <b>ČU</b>	Biblioteka Tehnološkog fakulteta Univerziteta u Novom Sadu, 21000 Novi Sad, Bulevar Cara Lazara 1
<b>Važna napomena:</b> <b>VN</b>	Nema
<b>Izvod:</b> <b>IZ</b>	Istraživanja u okviru disertacije usmerena su na razvoj vakuumskog postupka sušenja voća. Konstruisan je prototip laboratorijske vakuumske sušare i optimizovan proces sušenja višanja i borovnica. U cilju optimizacije procesa sušenja ispitan je uticaj nezavisno promenljivih procesa, temperature i pritiska, na parametre kvaliteta osušenog voća (aktivnost vode, sadržaj ukupnih fenola, ukupnih monomernih antocijana i vitamina C, antioksidativnu aktivnost, promenu boje, teksturu i sposobnost rehidracije). Proces sušenja optimizovan je korišćenjem metode odzivnih površina (engl. Response Surface Methodology, RSM). Rezultati istraživanja pokazuju da tehnika sušenja voća u vakuumu daje odlične rezultate u pogledu očuvanja visokovrednih komponenata voća i ima perspektivu za širu primenu u zanatskim i poluindustrijskim postrojenjima.
<b>Datum prihvatanja teme od strane NN veća:</b>	09.05.2014.
<b>Datum odbrane:</b> <b>DO</b>	
<b>Članovi komisije:</b> <b>(ime i prezime / titula / zvanje / naziv organizacije / status)</b> <b>KO</b>	<b>predsednik:</b> dr Sonja Đilas, redovni profesor Tehnološkog fakulteta Novi Sad <b>član:</b> dr Aleksandra Tepić, docent Tehnološkog fakulteta Novi Sad <b>član:</b> dr Stela Jokić, docent Prehrambeno-tehnološkog fakulteta Osijek

**UNIVERSITY OF NOVI SAD**  
**FACULTY OF TECHNOLOGY**

Key word documentation

<b>Accession number:</b> ANO	
<b>Identification number:</b> INO	
<b>Document type:</b> DT	Monographic documentation
<b>Type of record:</b> TR	Textual printed material
<b>Contents code:</b> CC	PhD Thesis
<b>Author:</b> AU	Zdravko Šumić, MSc
<b>Mentor:</b> MN	Aleksandra Tepić, PhD., assistant professor
<b>Title:</b> TI	Optimization of fruit drying in vacuum
<b>Language of text:</b> LT	Serbian
<b>Language of abstract:</b> LA	Serbian/English
<b>Country of publication:</b> CP	Serbia
<b>Locality of publication:</b> LP	AP Vojvodina
<b>Publication year:</b> PY	2014
<b>Publisher:</b> PU	Author reprint
<b>Publication place:</b> PP	Novi Sad, Bulevar Cara Lazara 1
<b>Physical description:</b> PD	Chapters 6, pages 126, figures 21, tables 18, ref. 133
<b>Scientific field:</b> SF	Food Engineering
<b>Scientific discipline:</b> SD	Fruit and vegetable processing technology

<b>Subject, Key words:</b> <b>SKW</b> <b>UC</b>	Vacuum drying, optimization, RSM, vacuum dryer prototype, quality of dried fruit
<b>Holding data:</b> <b>HD</b>	Faculty of Technology (library), 21000 Novi Sad, Bulevar Cara Lazara 1
<b>Note:</b> <b>N</b>	None
<b>Abstract:</b> <b>AB</b>	Research in the framework of the thesis focuses on the development of fruit vacuum-drying process. Laboratory vacuum dryer prototype was constructed. Cherries and blueberries vacuum drying process was optimized. In order to optimize the drying process, the influence of independent variables of the process (temperature and pressure) on the quality parameters of dried fruit (water activity, total phenol content, total monomeric anthocyanins and vitamin C, antioxidant activity, colour change, texture, and rehydration capability) was investigated. The drying process was optimized using Response Surface Methodology (RSM). There is the possibility of application of the results in plants at semi-industrial and industrial level.
<b>Accepted on Scientific Board on:</b> <b>AS</b>	May 5 <sup>th</sup> 2014.
<b>Defended:</b> <b>DE</b>	
<b>Thesis Defend Board:</b> <b>DB</b>	<b>president:</b> Dr Sonja Đilas, Professor, Faculty of Technology Novi Sad <b>member:</b> Dr Aleksandra Tepić, Assistant professor, Faculty of Technology Novi Sad <b>member:</b> Dr Stela Jokić, Assistant professor, Faculty of Food Technology Osijek

## SADRŽAJ

<b>UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>OPŠTI DEO .....</b>	<b>4</b>
HEMIJSKI SASTAV VOĆA.....	4
<i>Osnovni hemijski sastav.....</i>	<i>4</i>
<i>Bojene materije.....</i>	<i>7</i>
<i>Antioksidativna aktivnost voća.....</i>	<i>11</i>
IZBOR VOĆA ZA SUŠENJE .....	12
<i>Borovnica.....</i>	<i>12</i>
<i>Višnja.....</i>	<i>14</i>
TEHNOLOGIJA SUŠENJA VOĆA .....	15
SUŠENJE VOĆA U VAKUUMU.....	18
<i>Konstrukcija uređaja .....</i>	<i>20</i>
<i>Prenos mase i toplote.....</i>	<i>22</i>
<i>Sušenje smržavanjem .....</i>	<i>24</i>
<i>Pakovanje i skladištenje proizvoda.....</i>	<i>29</i>
OSTALE METODE SUŠENJA VOĆA.....	29
<i>Sušenje na Suncu.....</i>	<i>29</i>
<i>Sušenje vazduhom .....</i>	<i>31</i>
1. Komorne sušare.....	31
2. Tunelske sušare.....	32
3. Trakaste sušare.....	33
4. Sušare sa fulidizovanim slojem.....	34
5. Sušare sa raspršivanjem .....	35
6. Pneumatske sušare .....	37
<i>Sušenje na valjcima.....</i>	<i>38</i>
<i>Sušenje u peni .....</i>	<i>38</i>
<i>Sušenje zračenjem i akustično sušenje.....</i>	<i>39</i>
<i>Osmotska dehidratacija .....</i>	<i>40</i>
FAKTORI KVALITETA OSUŠENOG VOĆA .....	41
<i>Oblik i veličina.....</i>	<i>41</i>
<i>Boja.....</i>	<i>41</i>
<i>Tekstura .....</i>	<i>44</i>
<i>Aktivnost vode.....</i>	<i>45</i>
<i>Rehidratacija .....</i>	<i>47</i>
<i>Greške u procesu sušenja.....</i>	<i>47</i>
OPTIMIZACIJA PROCESA .....	49

---

---

<b>EKSPERIMENTALNI DEO .....</b>	<b>52</b>
UZORCI .....	52
REAGENSI .....	52
PROJEKTNI ZADATAK IZRADE PROTOTIPA LABORATORIJSKE VAKUUMSKE SUŠARE .....	53
USLOVI SUŠENJA .....	54
METODE RADA .....	55
<i>Suva materija</i> .....	55
<i>Aktivnost vode</i> .....	55
<i>Ukupni fenoli</i> .....	56
<i>Ukupni monomerni antocijani</i> .....	56
<i>Vitamin C</i> .....	56
<i>Antioksidativna aktivnost (DPPH test)</i> .....	57
<i>Površinska boja</i> .....	57
<i>Tekstura</i> .....	57
<i>Sposobnost rehidracije</i> .....	58
<i>Statistička obrada podataka</i> .....	58
<i>Matematičko modelovanje procesa sušenja</i> .....	60
<b>REZULTATI I DISKUSIJA .....</b>	<b>62</b>
PROTOTIP LABORATORIJSKE VAKUUMSKE SUŠARE .....	62
OPTIMIZACIJA PROCESA SUŠENJA VIŠNJE .....	64
<i>Suva materija</i> .....	69
<i>Aktivnost vode</i> .....	69
<i>Ukupni fenoli</i> .....	70
<i>Ukupni monomerni antocijani</i> .....	71
<i>Vitamin C</i> .....	71
<i>Antioksidativna aktivnost</i> .....	72
<i>Promena površinske boje</i> .....	73
<i>Tekstura</i> .....	73
<i>Sposobnost rehidracije</i> .....	73
<i>Optimizacija procesa sušenja</i> .....	74
<i>Modelovanje procesa sušenja</i> .....	78
OPTIMIZACIJA PROCESA SUŠENJA BOROVNICE .....	79
<i>Suva materija</i> .....	79
<i>Aktivnost vode</i> .....	80
<i>Ukupni fenoli</i> .....	80
<i>Ukupni monomerni antocijani</i> .....	80

---

---

<i>Vitamin C</i> .....	81
<i>Antioksidativna aktivnost</i> .....	81
<i>Promena površinske boje</i> .....	82
<i>Tekstura</i> .....	82
<i>Sposobnost rehidracije</i> .....	82
<i>Optimizacija procesa sušenja</i> .....	90
<i>Modelovanje procesa sušenja</i> .....	90
<b>ZAKLJUČAK</b> .....	<b>91</b>
<b>LITERATURA</b> .....	<b>96</b>
<b>PRILOG</b> .....	<b>106</b>
REZULTATI MODELOVANJA PROCESA VAKUUMSKOG SUŠENJA VIŠNJE .....	107
REZULTATI MODELOVANJA PROCESA VAKUUMSKOG SUŠENJA BOROVNICE .....	117

---



## UVOD

Sušenje je najstariji način konzerviranja hrane. Od najranijih dana čovek je koristio hranu osušenu na Suncu. I danas, sušenje je jedan od najvažnijih tehnoloških postupaka za čuvanje namirnica i njihovih nutritivnih i bioloških svojstava. Sušenje omogućava trajnost hrane na dva glavna načina: (1) odstranjuje vodu koja je neophodna za rast mikroorganizama i za enzimsku aktivnost i (2) odstranjivanjem vode povećava se osmotski pritisak, jer se povećava koncentracija soli, šećera i kiselina, čime se stvara sredina nepovoljna za rast mikroorganizama.

Sušenje predstavlja proces uklanjanja vode, nezavisno od načina kojim se voda izdvaja iz proizvoda. Pokretačka sila sušenja može biti razlika parcijalnih pritisaka vodene pare između atmosfere u kojoj se nalazi vlažni materijal i samog vlažnog materijala, razlika osmotskih pritisaka dva materijala koja su u dodiru i dr.

Sušenje voća odvija se pri složenim i međusobno zavisnim procesima transporta materije (vode) i razmene toplote između vlažnog materijala i agensa sušenja, pri čemu dolazi do dehidracije vlažnog materijala. Proces razmene toplote može se odvijati konduktivnim i/ili konvektivnim sušenjem i/ili radijacijom. Vakuumsko sušenje voća je posebno interesantan način sušenja, pošto se radi o niskotemperaturnom sušenju, koje se odvija u atmosferi sa smanjenim udelom kiseonika (koji u slučaju sušenja voća negativno utiče na kvalitet finalnog proizvoda, posebno njegove senzorne karakteristike – boju, ukus i miris). Niskotemperaturni režim sušenja takođe omogućava očuvanje

---

važnih nutritivnih jedinjenja (polifenola, karotenoida, terpena, vitamina i sl.) u voću tokom procesa sušenja. U cilju smanjenja troškova eksploatacije, vakuumsko sušenje može se koristiti u kombinaciji sa drugim metodama sušenja (kao tzv. sekundarno sušenje).

Sušare koje se trenutno koriste za sušenje voća u Srbiji imaju dosta tehničkih i tehnoloških manjkavosti, koje se iskazuju u dobijanju osušenih proizvoda koji ne zadovoljavaju sve oštrije zahteve međunarodnih standarda kvaliteta. Veliki broj kondenzacionih sušara koristi produkte sagorevanja kao agens sušenja, što uz nepovoljne temperaturne režime dodatno narušava kvalitet proizvoda. Velika potrošnja energije, loš uticaj na kvalitet gotovog proizvoda i zagađivanje životne sredine stvara potrebu za unapređenjima u ovoj oblasti.

**Cilj istraživanja.** U okviru ove doktorske disertacije dizajniran je prototip laboratorijske vakuumske sušare i ispitan je uticaj parametara vakuumskog sušenja na kvalitativne karakteristike odabranog voća, višnje (*Prunus cerasus* L.) i borovnice (*Vaccinium myrtillus* L.). Na osnovu dobijenih rezultata proces sušenja pod vakuumom je optimizovan.

Veliki broj naučnih radova na relevantnim internet bazama, kao i veliki broj objavljenih radova na svetski priznatim simpozijumima ukazuju da je sušenje prehrambenih proizvoda oblast koja još uvek traži dodatna istraživanja.

U najvećem broju naučnih radova ispitivana je kinetika kondenzacionog sušenja i definisani njegovi tehnološki i optimizacioni parametri. Ipak, značajno mesto u naučnim istraživanjima novijeg datuma zauzimaju i druge tehnike sušenja, među kojima i vakuumsko sušenje. Ovaj postupak sušenja koristi blaže temperaturne režime, pa se nameće kao postupak kojim se mogu sačuvati visokovredne komponente voća. Na ovaj način istraživanja u ovom radu prate svetske trendove u nauci - proizvodnja zdrave i bezbedne hrane, proizvedene ekološki prihvatljivim postupcima.

S obzirom na sve veći interes potrošača za kvalitetnom i bezbednom hranom, razvoj postupaka sušenja proizvoda bogatih fitonutrijentima pod vakuumom pruža mogućnost zadovoljenja potrošača za ovakvom vrstom proizvoda. Primenom vakuum tehnike, sušenje voća može se provesti na nižim temperaturama sušenja u odnosu na uobičajene postupke proizvodnje, čime se postiže očuvanje kvaliteta sirovine, kao i biološki aktivnih i nutritivno značajnih supstanci prisutnih u odabranom materijalu. Istovremeno, primena tehnika sušenja u kojima nema sagorevanja goriva, značajna je za pogone prehrambene industrije, jer se oni tako približavaju zelenoj tehnologiji, što direktno smanjuje ekološke poreze i doprinosi očuvanju životne okoline.

Istraživanja u okviru ove disertacije obuhvataju modelovanje i optimizaciju procesnih parametara sušenja u cilju očuvanja bioaktivnih i farmakološko značajnih komponenata polaznog-ispitivanog materijala. Istražen je uticaj različitih parametara sušenja na kvalitativne promene voća (tekstura, boja, sadržaj fenolnih jedinjenja, sposobnost rehidracije,  $a_w$  vrednost). Analiziran je antioksidativni kapacitet dobijenog proizvoda i njegovih ekstrakata i izvršeno poređenje sa standardnim antioksidativnim komponentama. Takođe je definisano tehnološko-projektno rešenje sušenja odabranih sirovina, a sve u cilju dobijanja proizvoda vrhunskog kvaliteta, smanjenja investicionih troškova, kao i razvoja ekoloških postupaka sušenja.

Uspešnom realizacijom planiranih istraživanja objašnjen je proces sušenja voća u vakuumu i uticaj pojedinih parametara sušenja na osetljive nutritivne komponente voća. Definisani su optimalni uslovi sušenja voća u cilju očuvanja nutritivnih i senzornih karakteristika gotovog sušenog proizvoda. Ovim su istraživanja dala doprinos nauci o sušenju voća proširivanjem znanja o fenomenima koji se dešavaju tokom procesa sušenja voća u uslovima sniženog pritiska.

Proizvodnja osušenih proizvoda u Srbiji ima dugu tradiciju i predstavlja značajan izvozni potencijal naše zemlje. Dobijeni rezultati moći će se iskoristiti za procenu moguće primene vakuumske postupka sušenja voća u industriji, sa posebnim osvrtom na primenu u malim i srednjim preduzećima specijalizovanim za proizvodnju osušenih proizvoda vrhunskog kvaliteta. Pored toga, dobijeni rezultati će se iskoristiti za pronalaženje tehnološko-projektne rešenja za proizvodnju pojedinih osušenih proizvoda od voća.

Doktorska disertacija izvedena je u sledećim fazama:

- Definisane projektnog zadatka izrade prototipa laboratorijske vakuumske sušare za voće;
- Izrada prototipa laboratorijske vakuumske sušare za voće;
- Sušenje odabranih vrsta voća pri definisanim kombinacijama parametara temperature i pritiska sušenja;
- Analiza gotovih osušenih proizvoda: sadržaj suve materije, aktivnost vode, sposobnost rehidracije, teksturalne karakteristike, površinska boja, sadržaj vitamina C, sadržaj ukupnih monomernih antocijana, sadržaj fenolnih jedinjenja, antioksidativna aktivnost;
- Obrada dobijenih rezultata, definisanje empirijskog modela i optimizacija procesa sušenja voća u vakuumu;

## OPŠTI DEO

### *Hemijski sastav voća*

Plodovi voća predstavljaju bitan i nezamenljiv izvor materija koje su neophodne u ishrani čoveka. Redovnom konzumacijom jačaju otpornost organizma, neutrališu i odstranjuju štetne materije nastale u procesu normalnog metabolizma (Seeram i sar., 2001).

Hemijski sastav voća je od značaja i sa gledišta tehnologije. Koji tehnološki postupak će se primeniti, koje reakcije mogu da se očekuju tokom prerade i kakav proizvod će se dobiti, tesno je vezano sa sastavom sirovine.

### **Osnovni hemijski sastav**

Hemijski sastav, odnosno tehnološke osobine plodova voća, zavise od sorte, stepena zrelosti i vremenskih uslova za vreme dozrevanja plodova. Najvažnije komponente hemijskog sastava su voda, ugljeni hidrati, kiseline, bojene, aromatične, pektinske i mineralne materije, vitamini, proteini itd.

**Voda** je neophodna za odvijanje metabolizma u svim živim ćelijama. U zavisnosti od vrste i uslova gajenja, voće može da sadrži od 75 do 93% vode (Kunzen i sar., 1999). Tako visok sadržaj vode smanjuje energetska, ali pruža visoku fiziološku vrednost. Zahvaljujući tome što se nutritivno vredne supstance voća (šećeri, kiseline, deo

pektinskih materija, neke bojene materije, pojedini vitamini i minerali) nalaze u vodenom rastvoru, organizam čoveka ih lako usvaja.

U tehnologiji prerade voća češće se govori o sadržaju suve materije, dakle svega onoga što nije voda, a što se nalazi u voću. Razlog leži u tome što je u ekonomskom i tehnološkom smislu sadržaj suve materije mnogo značajniji. Suva materija se sastoji od rastvorljivih (šećeri, kiseline i druge rastvorljive materije) i nerastvorljivih materija (skrob, celuloza, hemiceluloza, protopektin i dr.). Stalni nadzor i uvid u sadržaj suve materije u sirovini pruža jasna i određena uputstva za usmeravanje i vođenje tehnološkog postupka.

**Ugljeni hidrati** su posle vode najzastupljeniji sastojci voća. Zajedno sa kiselinama predstavljaju osnovnu komponentu u formiranju ukusa proizvoda. U voću se mogu naći kao mono-, oligo- i polisaharidi. Sadržaj šećera u plodovima voća kreće se od 3 do 25% (Barrett i sar., 2004; Jašić, 2007).

**Kiseline** se nalaze u svim biljnim vrstama, a posebno u plodovima voća i povrća. To su organske kiseline koje u voću i povrću mogu biti slobodne, ili kao sastojci estara. Najzastupljenije kiseline u voću su jabučna, limunska i vinska. U manjim količinama su zastupljene oksalna, hlorogena, salicilna, benzoeva, mravlja i dr. U raznim vrstama voća dominantne su različite kiseline. Tako je limunska kiselina dominantna u citrusima (limun, narandža) i bobičastom voću, jabučna u jabučastom, koštičavom i jagodastom voću, vinska u grožđu (Belitz, 2009).

**Mineralne materije** se ne menjaju tokom procesa konzervisanja i čuvanja voća. U poređenju sa drugim komponentama hemijskog sastava, može se reći da su to stabilni sastojci voća. Sveže voće najčešće sadrži mineralne materije u granicama od 0,3 do 0,8% (Niketić-Aleksić, 1982; Schobinger, 2001). Ovaj podatak ukazuje da je voće bogato mineralnim materijama. Najzastupljeniji element u pepelu voća je kalijum, a posle njega kalcijum i magnezijum. Pored njih, redovno su prisutni i fosfor, gvožđe, bakar, jod, fluor, cink i dr.

**Vitamini** su veoma značajni sastojci voća i u kombinaciji sa mineralnim materijama čine voće fiziološki veoma vrednim. Vitamini predstavljaju grupu organskih jedinjenja raznovrsne strukture i hemijskih osobina, čija je funkcija u organizmu specifična i neophodna. Nedovoljan unos pojedinih vitamina dovodi do bolesti koje se nazivaju hipovitaminoze, a dužim nedostatkom vitamina nastaje avitaminoza.

Zadatak svakog tehnološkog procesa prerade je da sačuva vitamine u najvećoj mogućoj meri. Vitamini lako podležu oksidativnoj i hidrolitičkoj razgradnji, te se kod prerade voća o tome mora voditi računa. Pored toga, povišena temperatura i svetlost značajno utiču na razgradnju nekih vitamina (naročito vitamina C) (Santos i Silva,

2008; Vračar, 2001). Zbog navedenog, gubitak vitamina C može poslužiti kao indikator adekvatnosti tehnološkog procesa.

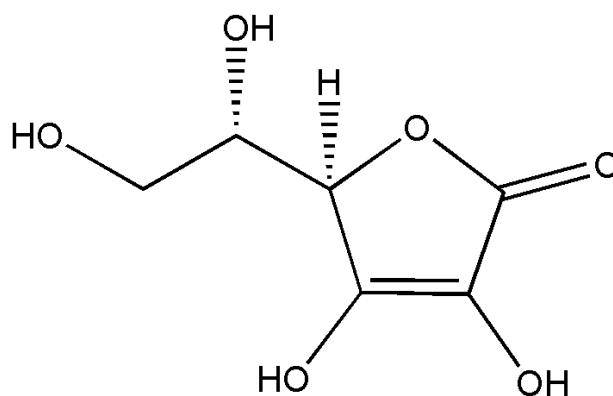
**Vitamin C** (L-askorbinska kiselina) je najefikasniji redukujući hidrosolubilni antioksidant i jedan je od najnestabilnijih vitamina rastvorljivih u vodi (Tumbas, 2010). Stabilnost vitamina C zavisi od koncentracije kiseonika, pH sredine, temperature, izloženosti svetlosti i prisustva teških metala. Gubitak vitamina C je približno deset puta veći u prisustvu kiseonika u odnosu na gubitak u anaerobnim uslovima. Njegova aktivnost uglavnom se uništava termičkom obradom hrane, naročito kada postoje tragovi metala, kao što je bakar (Heinonen, 2002).

Vitamin C (slika 1) vezuje slobodne radikale i time može da odigra značajnu ulogu u prevenciji raznih teških oboljenja, kao što su tumori. Usporava starenje, odstranjuje toksične metale iz organizma, pozitivno deluje na vid i ublažava posledice astme (Karlson, 1993).

Toksični efekti vitamina C nisu česti, međutim, potencijalne komplikacije usled dugotrajnog predoziranja obuhvataju stvaranje oksalatnih kamenaca, giht i štetno dejstvo askorbata na biotransformaciju ili apsorpciju drugih vitamina (npr. vitamin B<sub>12</sub>).

Vitamin C se koristi kao prehrambeni aditiv. Konzervisana hrana uvek sadrži zaostale molekule kiseonika koji mogu da reaguju sa različitim molekulima iz hrane i uzrokuju njeno kvarenje (Đilas i sar., 2008). Molekuli kiseonika mogu se deaktivirati dodavanjem vitamina C u toku procesa prerade i time sprečiti njihovo štetno delovanje. Vitamin C se dodaje proizvodu i sa ciljem povećanja njegove nutritivne vrednosti.

Najbolji izvori vitamina C su citrusno voće (limun, pomorandža), bobičasto voće (crna ribizla, borovnica), šipak, paprika, nekuvan kupus i zeleno voće.



Slika 1. Vitamin C (Beltz i Grosch, 1987)

**Aromatične materije** voća u hemijskom pogledu predstavljaju smešu raznih alkohola, estara, aldehida, ketona, karboksilnih kiselina, eteričnih ulja, smola i voskova. Uljane frakcije aroma sadrže više masne kiseline i terpene. U aromatične materije se

ubrajaju i tanini, koji su po hemijskoj prirodi polifenoli, a odgovorni su za opor ukus voća.

Navedene materije odgovorne su za miris, a pretežnim delom i za ukus voća. U voću se nalaze u minimalnim količinama, lako su isparljive i veoma lako reaguju međusobno ili sa nekim drugim materijama. U pojedinim sirovinama nalaze se u različitim odnosima i međusobnim kombinacijama, a variraju po sadržaju, rastvorljivosti i isparljivosti, i tek kao celina daju odgovarajuću aromu.

**Proteini** su biomakromolekuli izgrađeni od velikog broja aminokiselina, povezanih peptidnom vezom. U sastav proteina ulazi svega dvadeset aminokiselina. Sa stanovišta ishrane, značajno je podsetiti da su osam od njih esencijalne. Voće je u principu siromašno proteinima.

**Celuloza** je strukturni element ćelijskih zidova biljaka. Kako se celuloza ne razgrađuje u organima za varenje, izbacuje se iz organizma povlačeći sa sobom toksične materije. Celuloza je u nutritivnom smislu osnova fiziološki vrednih biljnih vlakana, koja pospešuju peristaltiku creva.

**Pektinske materije** su heteropolisaharidi. Osnovna funkcija pektinskih materija je da zajedno sa celulozom, hemicelulozom i ligninom daju čvrstinu biljnom tkivu (Sriamornsak, 2003). Karakterističan su sastojak voća i povrća i važan su element ishrane, jer imaju ulogu dijetetskih vlakana.

Pektinske materije su bitan faktor kvaliteta sirovina i proizvoda od voća. Pored ukupne količine pektinskih materija, veoma je važno znati i sastav pektinskih frakcija, odnosno količinu protopektina, pektininske i pektinske kiseline. Na osnovu odnosa ovih frakcija može se odrediti pogodnost sirovine za preradu u određenu vrstu gotovog proizvoda i vrsta pektolitičkog preparata koju je potrebno upotrebiti za depektinizaciju kaše u proizvodnji bistrih sokova i koncentrata. Pored toga, samo frakcija pektininskih kiseline ima sposobnost želiranja (Yadav, 2009). Ova osobina koristi se u proizvodnji želiranih proizvoda od voća.

## **Bojene materije**

Bojene materije su zajedno sa aromatičnim materijama, šećerima i voćnim kiselinama glavni nosioci senzornih osobina. Boja proizvoda ima višestruki uticaj na potrošače. Potrošači vezuju kvalitet namirnice za njenu boju, pa je boja jedan od najznačajnijih parametara kvaliteta proizvoda u prehrambenoj industriji. Boja voća zavisi od bojenih materija prisutnih u plodu, njihovog sastava, koncentracije i sastava sredine u kojoj se nalaze.

Jedan od glavnih zadataka tehnologije prerade jeste da promenu boje svede na minimum. Može se reći da su bojene materije voća veoma osetljive. Na stabilnost boje utiču brojni faktori, među kojima su najznačajniji prisustvo svetlosti, enzima, nekih metala i kiseonika, kao i uslovi sredine (temperatura, pH,  $a_w$ ). Promenu boje u toku prerade je nemoguće sprečiti, ali je moguće svesti na prihvatljiv nivo odabirom odgovarajućih uslova.

Upravo sušenje voća u vakuumu eliminiše većinu faktora koji negativno utiču na promenu boje. Voće se suši u vakuumu, pa je prisustvo kiseonika izbegnuto, a istovremeno vakuum omogućava korišćenje znatno niže temperature sušenja od konvencionalnih.

S obzirom na rastvorljivost u voćnom soku, pigmenti voća mogu se podeliti na nerastvorljive i rastvorljive. Nerastvorljive pigmente predstavljaju hlorofili i razni karotenoidi, a zajednički naziv za sve rastvorljive pigmente je flavonoidi. Flavonoidi su podgrupa fenolnih jedinjenja (Von Elbe i Schwartz, 1996). Najrašireniji flavonoidi su antocijani, flavoni, flavanoni i flavanoli.

Posebnu grupu bojnih materija predstavljaju jedinjenja koja su u neoštećenim ćelijama bezbojna, a prilikom oštećenja lako podležu enzimatskom i neenzimatskom potamnivanju (Šulc i sar., 1976). Ova jedinjenja predstavljaju taninske materije, u koje se ubrajaju razna fenolna jedinjenja, katehini i leukoantocijani. Kao rezultat promena ovih jedinjenja nastaju neprirodno tamna i tamnosmeđa jedinjenja.

**Flavonoidi.** Termin "flavonoid" označava sve biljne pigmente koji imaju C6-C3-C6 skelet, u kojima su dva benzenova prstena povezana preko C-3 jedinice (slika 2).

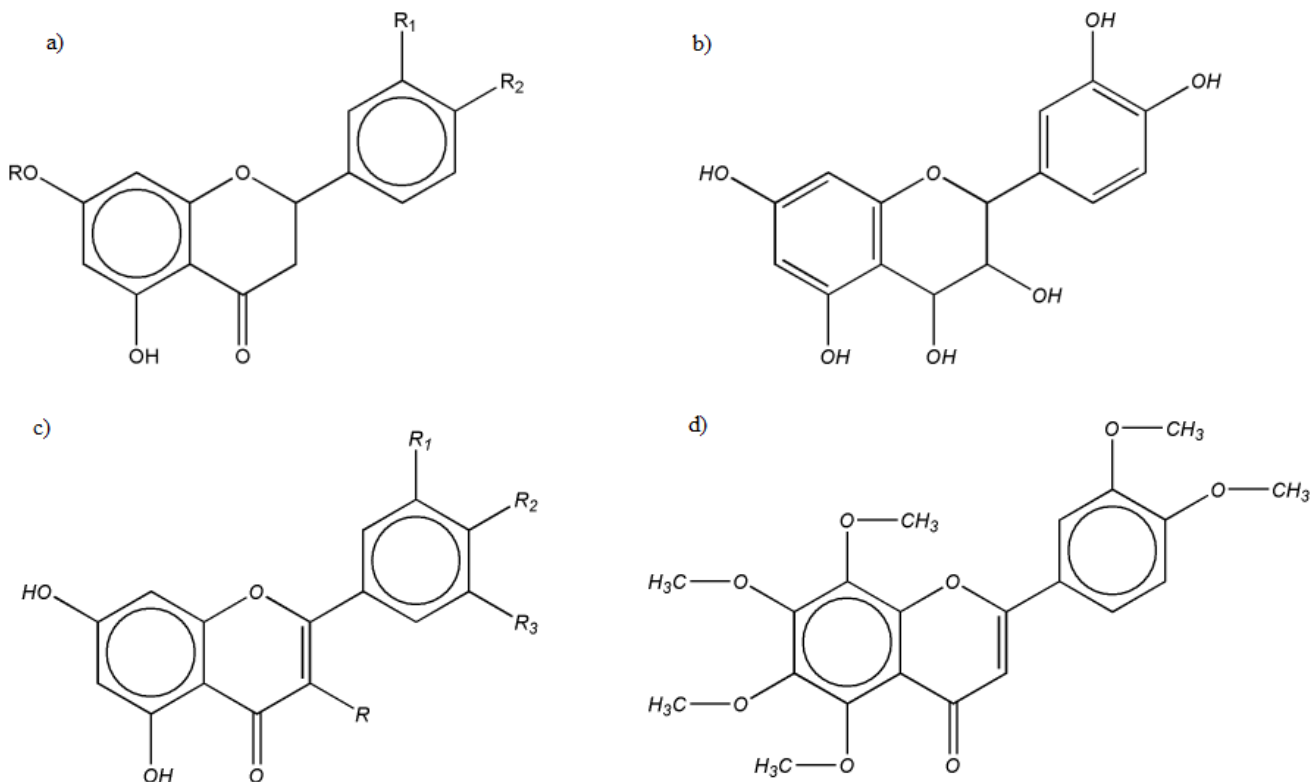
Flavonoidi su u vodi rastvorni žuti, crveni ili ljubičasti pigmenti. Iz biljaka je izolovano oko 3000 flavonoida koji su, s obzirom na stepen oksidacije centralnog piranskog prstena, podeljeni u jedanaest klasa: flavoni, izoflavoni, flavanoni, flavonoli, flavani, katehini, antocijanidini, leukoantocijanidini, halkoni, dihidrohalkoni i auron (Tepić, 2012).

Raznovrsnost i veliki broj struktura flavonoida rezultat su brojnih modifikacija njihovih osnovnih struktura kao što su: dodatne hidroksilacije, *o*-metilacije hidroksilnih grupa, dimerizacije, vezivanje neorganskog sulfata i glikolizacija hidroksilnih grupa (nastajanje *o*-glikozida), ili flavonoidnog jezgra (nastajanje C-glikozida).

Flavonoidi su rasprostranjeni u svim biljkama, a nađeni su i u nižim organizmima. Najrasprostranjeniji su flavonoli i flavoni. Među flavonolima najzastupljeniji su kvercetin, kampferol i miricetin, a od flavona najznačajniji su luteolin i apigenin. Halkoni, auron, flavanoni, dihidrohalkoni i izoflavoni se pojavljuju mestimično i u manjem broju biljnih vrsta. Flavanoni i izoflavoni su bezbojni, dok halkoni i auron



predstavljaju žute cvetne pigmente. Dokazano je da ova jedinjenja pokazuju antioksidativnu aktivnost (Khoo i sar., 2011; Kim i sar., 2005; Piccolella i sar., 2008; Seeram i sar., 2001).

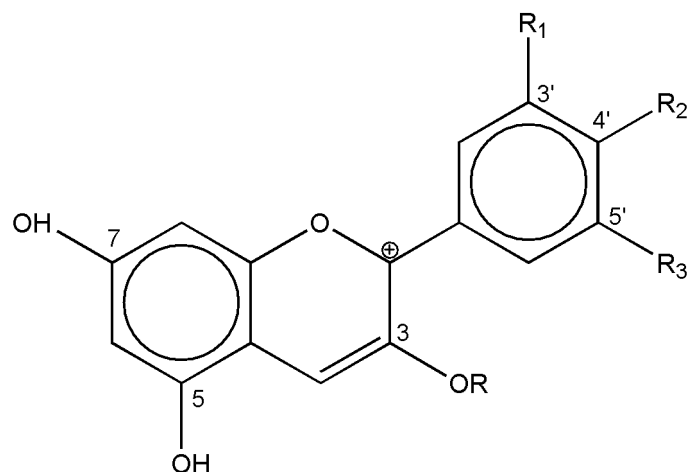


Slika 2. Strukturne formule nekih od najvažnijih fenolnih jedinjenja: a) flavononi b) leukoantocijanidini, c) flavoni, d) flavonoli (Beltz i Grosch, 1987)

**Antocijani** (grč. anthos - cvet i kyanos - plavo) su u prirodi široko rasprostranjena podgrupa flavonoida. Od njih potiče crvena, ljubičasta i plava boja cveća, voća i povrća (Castañeda-Ovando i sar., 2009). Najčešće su smešteni u kori voća, ali ih takođe ima i u pulpi.

Osnova antocijana je antocijanidin, koji se sastoji od dva aromatična prstena i jednog heterocikličnog prstena koji sadrži kiseonik (slika 3). U prirodi se uvek javljaju kao glukozidi i tada se nazivaju antocijani. U strukturi antocijana najčešći identifikovani šećeri su glukoza, galaktoza i arabinoza (Jeménez-Aquilar i sar, 2011).

Antocijani su veoma nestabilni. Njihova stabilnost zavisi od pH, temperature, hemijske strukture, kiseonika, metalnih jona, svetlosti, rastvarača, prisustva enzima i proteina.



Slika 3. Osnovna struktura antocijana (Beltz i Grosch, 1987)

U zavisnosti od pH rastvora, antocijani se mogu naći u različitim hemijskim oblicima. Pri pH 1 flavilium katjon (crvene boje) je dominantna forma (slika 3). Na pH vrednosti između 2 i 4 dominantna je plava boja. Pri vrednostima pH između 4 i 5 dominantne su dve bezbojne vrste (halkon i pseudo baze). Povećanje pH iznad 5 prouzrokuje otvaranje prstena, uspostavljanje elektronskog oblaka sistema konjugovanih dvostrukih veza, a samim tim i boje rastvora, koja je u ovom slučaju ljubičaste boje (Tepić, 2005).

Povišena temperatura utiče na razgradnju antocijana, koji se raspadaju na aglukon, antocijanidin i šećer. Ukoliko se primeni povišena temperatura duže vreme, antocijanidin se dalje razgrađuje stvarajući tamnosmeđe obojenje.

Stabilnost antocijanidina (aglukona) se menja pod uticajem supstituenata u prstenu B i prisustva dodatnih hidroksilnih ili metoksilnih grupa, koji smanjuju stabilnost aglukona u neutralnoj sredini. Iz ovoga se može zaključiti da je pelargonidin najnestabilniji antocijanidin u neutralnim rastvorima.

Prisustvo kiseonika u procesu prerade je nepoželjno, jer dovodi do oksidacije već delimično razgrađenih komponenata. Oksidacija je naročito izražena pri povišenim temperaturama. Cijanidin, delphinidin i pentunidin su najviše podložni oksidaciji jer su *o*-dihidroksil supstituisani; pelargonidin, peonidin i malvidin su stabilniji.

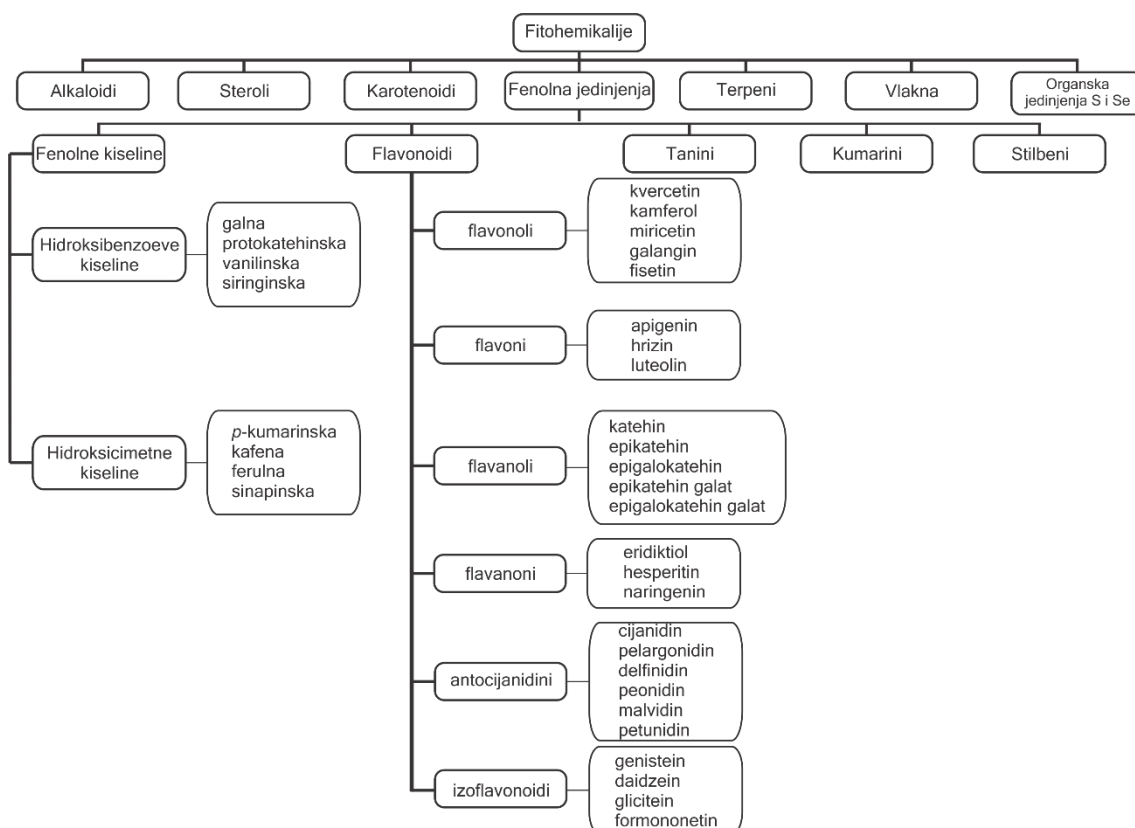
Antocijani sa metalnim jonima stvaraju kompleksne soli - helate, što rezultira jačim intenzitetom boje biljnog materijala. Molekuli antocijana mogu stvarati metalne helate samo kada u nekondenzovanom benzenovom prstenu poseduju dve ili tri hidroksilne grupe u *orto*-položaju. Joni metala pokazuju izrazitu sposobnost stvaranja helata u području pH 2,0 do 4,0 (Castañeda-Ovando i sar., 2009).

Stabilnost boje može biti poboljšana kopigmentacijom, kada molekul antocijana reaguje sa drugom prirodnom biljnom komponentom direktno, ili blagom interakcijom, rezultujući stabilnom bojom.

### Antioksidativna aktivnost voća

**Slobodni radikali.** Među najreaktivnije hemijske vrste ubrajaju se slobodni radikali, ali i neradikalni oblici koji su takođe oksidacioni agensi i lako se konvertuju u radikale. Slobodni radikali su atomi, joni ili molekuli, koji imaju jedan ili više nesparenih elektrona u svojoj strukturi. Oni mogu biti neutralni, ali i pozitivno (radikal katjon) i negativno (radikal anjon) naelektrisani. Nespareni elektroni su uzrok njihove visoke i neselektivne reaktivnosti (Tumbas, 2010).

**Antioksidanti.** Termin "antioksidant" podrazumeva sve supstance koje, prisutne u manjoj koncentraciji u odnosu na supstrate koji se oksidišu, mogu da spreče ili značajno smanje njihovu oksidaciju. Generalno, značaj antioksidanata nesumnjivo je u tome što štite prehrambene proizvode od oksidativnih transformacija, a sa druge strane su podrška *in vivo* postojećem antioksidativnom sistemu zaštite razvijenom kod svih aerobnih organizama (Walker i sar., 2008). Prema poreklu, antioksidanti mogu biti prirodni i sintetički.



Slika 4. Klasifikacija fitohemikalija (Erdman i sar., 2007; Liu, 2004)

U upotrebi je nekoliko sintetičkih antioksidanata: butilhidroksianizol (BHA), butilhidroksitoluen (BHT), *terc*-butilhidrohinon (TBHQ) i propilgalat (PG). Odlikuju se visokom stabilnošću, efikasnošću i niskom cenom. Međutim, iako sintetički antioksidanti pokazuju dobra antioksidativna svojstva, prirodni su zdravstveno bezbedniji i bolje prihvaćeni od strane potrošača (Osuna-Garcia i sar., 1997).

Mnoge naučnoistraživačke studije ukazuju na veću efikasnost i zdravstvenu bezbednost prirodnih antioksidanata izolovanih iz biljaka, mikroorganizama, gljiva i životinjskog tkiva u odnosu na sintetičke. Bogatstvo antioksidantima daje voću značajnu ulogu u preventivi i lečenju mnogih oboljenja. Fitohemikalije (slika 4) sa najizraženijim antioksidativnim delovanjem u voću su: polifenolna jedinjenja, askorbinska kiselina, tokoferoli i karotenoidi (Tumbas, 2010).

### ***Izbor voća za sušenje***

Proizvodnja kvalitetno osušenog proizvoda podrazumeva definisanje primarne proizvodnje, odabir vrsta i sorti voća namenjenog sušenju, odabir tehnološkog postupka sušenja, dorade i pakovanja proizvoda prema savremenim zahtevima kvaliteta.

Primarna proizvodnja voća namenjenog sušenju obuhvata definisanje sortimenta, agrotehnike, momenta i načina berbe plodova, što podrazumeva i plansku sadnju voća za dobijanje kvalitetne sirovine za sušenje (Lozano, 2006).

Sve voćne vrste mogu da se suše, ali ne daju sve kvalitetan proizvod, ili kao osušene imaju manju mogućnost plasmana. Tradicionalno pogodne voćne vrste za preradu sušenjem su šljiva, grožđe, kajsija i smokva. U novije vreme se širi ponuda sušenog voća i posebno se primećuje povećano interesovanje za sušenu višnju za izvoz u Francusku i Rusiju. Među proizvodima agrarnog porekla, višnja je zauzimala deveto mesto u izvozu 2012. godine, sa ukupnom vrednošću izvoza 48 miliona dolara (PKS, 2013) pa se može reći da je potencijal prerade ovoga voća izuzetan.

Takođe se u maloprodaji i prodavnicama „zdrave hrane“ sve više mogu naći i sušene borovnice. Sušenje borovnica je popularno iz razloga velikih zdravstvenih benefita koje ovo voće ima i tendencije modernog društva ka zdravoj ishrani.

### **Borovnica**

Borovnica (*Vaccinium myrtillus*) je šumsko voće. Zbog svoje velike hranljivosti, prijatnog ukusa i boje, izvršene su selekcije šumske borovnice, koje se uzgajaju kao pitoma kultura na plantažama.

**Plodovi** borovnice su tamno plave boje i prijatnog slatko-nakiselog ukusa. Bobice borovnice su sitne, okruglastog oblika i veoma osjetljive na spoljne uticaje. Prosečna masa bobica različitih sorti se kreće od 78 do 207 g/100 bobica.

**Hemijski sastav.** Borovnica sadrži oko 17% suve materije, od čega 14% ugljenih hidrata, 0,6% proteina i 0,5% masti. Među mineralnim materijama najzastupljeniji su fosfor (10 mg/100 g), kalcijum (13 mg/100 g), magnezijum (7 mg/100 g) i u tragovima bakar i mangan (Ebert, 2008). Od vitamina najviše ima vitamina C (15 mg/100 g), a pored njega prisutni su B1, B2, PP (Bushway, 2006).

**Berba.** Borovnica prispeva za berbu od juna do septembra. Bere se kada plodovi dobiju izrazito tamnoplavu do crnu boju. Lako se skidaju sa peteljke, ručno ili specijalnim "češljevim" u hladnim jutarnjim časovima. Pri branju treba strogo voditi računa da se plodovi ne oštete. Borovnica se pakuje u male plitke letvarice koje moraju biti u ramovima.

**Skladištenje.** Plodovi slabo podnose transport i skladištenje u normalnim uslovima. Najbolje ih je odmah smrznuti i čuvati u komorama do momenta prerade ili prodaje u smrznutom stanju. U hladnjačama se mogu održati tri do četiri nedelje, na temperaturi od 0-2°C, uz relativnu vlažnost od 35-90% (Ebert, 2008).

**Upotreba.** Vrlo značajna biohemijska svojstva plodova borovnice razlog su njene široke primene. Pored upotrebe u svežem stanju, plodovi se mogu koristiti u industriji, za zamrzavanje, dobijanje sokova, koncentrata, želea i džemova.

Borovnice su vrlo dobra podloga za proizvodnju sokova i nektara. Zbog visoke cene, najčešće se koriste u koktelima. Sokovi od borovnice su vrlo cenjeni. Interesantan proizvod je i vino od borovnica sa svojim tipičnim ukusom. Borovnica ne sadrži mnogo isparljivih aromatičnih jedinjenja, pa nije pogodna za proizvodnju alkoholnih pića.

Osušene borovnice se koriste u mešavinama sa raznim pahuljicama (popularni Muesli). Sušene borovnice je moguće naći u mnogim mešavinama čajeva. Od borovnica je moguće proizvesti i ukusne marmelade. Ostaci od presovanja borovnica koriste se za proizvodnju koncentrata antocijana ili polifenola. U mnogim naučnim radovima dokazane su antioksidativne osobine bobičastog voća i njihovih ekstrakata (Kalt i sar., 1999; Prior i sar., 1998; Smith i sar., 2000; Stajčić i sar., 2012; Vulić i sar., 2011), pa se u novije vreme bobičasto voće i njihovi ekstrakti koriste kao komponenta suplemenata i funkcionalne hrane (Konić-Ristić, 2011).

## Višnja

Višnja (*Prunus cerasus*) je koštičavo voće koje je po svom značaju u voćarstvu Srbije na trećem mestu, iza šljive i jabuke. Sa 7% učešća u svetskoj proizvodnji, Srbija zauzima sedmo mesto po proizvedenim količinama (Sredojević, 2011).

**Plod** višnje je sočan, intenzivno crvene ili tamnocrvene boje, izrazito kiseo i aromatičan. Većina sorti višnje ima okrugao, ovalan, izduženo okrugao, a ređe pljosnat ili srcast oblik ploda. Kod maraske i nekih tipova kisele višnje plodovi su sitni, kod majske višnje su srednje krupnoće, a krupni su kod kereške i španske višnje. Plodovi višnje prispevaju od kraja maja do kraja juna.

**Sorte.** Poznatije sorte višanja koje se uzgajaju kod nas su: majska rana, majurka, ričmorensi, kereška, horlenova, keleris, lotova, maraska i marela.

**Berba.** Višnje se posle berbe pakuju u plitke letvarice. Pakovanje višanja u duboke letvarice nije podesno, jer dolazi do gnječenja i pucanja plodova, što izaziva nepotrebne gubitke i znatnije smanjenje kvaliteta. Vreme berbe se podešava prema potrebnoj tehnološkoj zrelosti za nameravanu preradu. Odmah posle berbe plodove treba što pre preraditi, jer svako duže stajanje utiče na smanjenje kvaliteta sirovine, pa prema tome i proizvoda.

**Hemijski sastav.** U soku višnje nalaze se rastvoreni razni hranljivi i senzorno važni sastojci kao što su šećeri, voćne kiseline, vitamini, mineralne materije, rastvorljivi pektini, razne bojene i druge materije. Suva materija kreće se oko 14 do 22% (Vračar, 2012).

Prosečan sadržaj ukupnih šećera u plodu višnje kreće se od 3,2 do 16%, a najviše su zastupljeni redukujući šećeri, fruktoza i glukoza. Voćne kiseline se u plodovima višanja nalaze u količinama od 0,5 do 2,4%, a najčešće su zastupljene jabučna, limunska, ćilibarna i vinska kiselina (Martinić, 2002; Vračar, 2012). Voćne kiseline zajedno sa voćnim šećerima daju karakterističan ukus višnji i njenim prerađevinama, te su vrlo važan senzorni sastojak.

Plod višnje sadrži vitamine u relativno malim količinama. Vitamin C se prosečno nalazi u količini od 6 do 43 mg/100 g, dok se drugi vitamini nalaze u tragovima. Višnje imaju jedinstven sadržaj antocijana i bogate su fenolnim jedinjenjima (Chaovanalikit i Wrolstad, 2004; Melicháčová i sar., 2010; Wang i sar., 1999). Fenolna jedinjenja doprinose ukusu, boji i čulnim karakteristikama, kao što su gorčina i oporost (Lee, 2000). Antocijani višnji daju karakterističnu crvenu ili tamnocrvenu boju. Pored njih, od pigmentata su u manjoj meri prisutni flavoni i u tragovima karoteni i ksantofili.

**Upotreba.** Plodovi višnje koriste se u svežem stanju i prerađuju se u bistri sok, kompot, slatko, džem, marmeladu, likere, sirupe, pasterizovanu pulpu itd. Kao što je već

rečeno, postoji i veliki potencijal plasmana sušene višnje za izvoz. Pošto se radi o zahtevu novijeg datuma, još uvek nije razvijena adekvatna tehnologija za sušenje višnje. Za sušenje se koriste tunelske sušare projektovane za sušenje šljive, pa se javlja niz tehnoloških problema koji utiču na umanjeње kvaliteta konačnog proizvoda.

### ***Tehnologija sušenja voća***

Princip konzervisanja koji se koristi pri sušenju hrane zasniva se na stvaranju sistema sa veoma niskom aktivnošću vode, koji će onemogućiti rast mikroorganizama (Lewicki, 2006). Produženje roka trajanja hrane je najvažniji cilj sušenja, ali nije jedini. Sušenjem se smanjuje zapremina voća i time olakšava skladištenje, pakovanje i transport. Sušenjem se rešava i problem sezonskog karaktera proizvoda, pa voće može biti dostupno potrošačima tokom čitave godine. Pored ovih prednosti sušenja voća, postoje i negativne promene koje se javljaju tokom sušenja (Grabowski i sar., 1990), kao na primer, posmeđivanje, smežuravanje, nepovratan gubitak sposobnosti rehidracije, gubitak isparljivih sastojaka, zagorevanje, gubitak biološki aktivnih jedinjenja osetljivih na toplotu, gubitak enzima itd. Uopšteno, ovi negativni aspekti sušenja se u sličnom stepenu javljaju i kod ostalih metoda konzervisanja (pasterizacija ili smrzavanje).

Tehnologija sušenja voća i povrća može se podeliti u tri faze: priprema za sušenje, sušenje i operacije nakon sušenja.

Kvalitet proizvoda, kao i rentabilnost proizvodnje, usko zavise od stručnog upravljanja i optimalnog sinhronizovanja ovih operacija. Na promene karakteristika proizvoda od kojih zavisi njegova upotrebljivost utiču sve tri grupe operacija, a nastale promene se ne mogu međusobno kompenzovati. Na primer, pažljivo vođeno sušenje ne može da ispravi propuste u toku pripreme, kao što se ni operacijama nakon završenog sušenja ne može popraviti loš kvalitet koji je nastao zbog nestručnih pripreme ili vođenja sušenja. Analogno tome, na kvalitet besprekorno pripremljenog i osušenog proizvoda može znatno da utiče, i to u negativnom smislu, loše usitnjavanje ili klasiranje proizvoda.

Na slici 5 predstavljena je opšta šema sušenja voća i povrća. Varijeteti tehnologije sušenja voća i povrća su izuzetno veliki, pa se u pojedinim slučajevima neki koraci procesa mogu izostaviti, ili drugi dodati.

**Priprema za sušenje.** Sveže ubrano voće je relativno lako kvarljivo i dalja obrada bi trebala da bude urađena neposredno nakon berbe. Brzom preradom sprečava se kvarenje ili gubitak kvaliteta. Priprema za sušenje obuhvata izdvajanje stranih primesa

iz voća, zatim pranje i kalibraciju voća. Često se koriste i razni tretmani koji sprečavaju promenu boje sirovina.

Voće prilikom prijema na preradu često sadrži razne primese kao što su grudvice zemlje, kamenčići, lišće, grančice. Vrlo često voće je i zaprljano. Izdvajanje primesa i pranje su važne operacije za mikrobiološku čistoću proizvoda. Sušenje smanjuje broj mikroorganizama, ali ipak ne u tolikoj meri da bi moglo da redukuje preveliku inficiranost do željenog stepena.

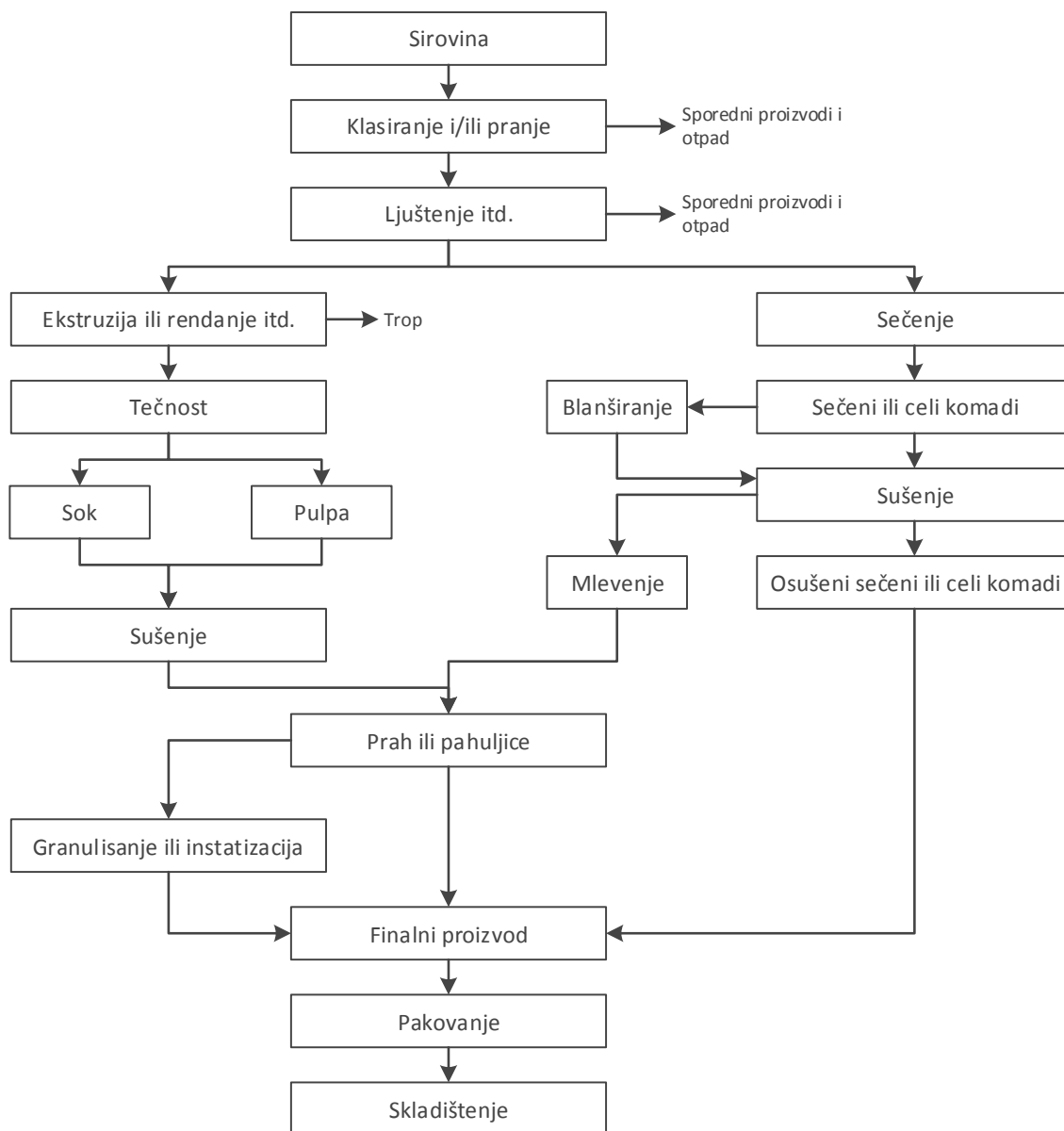
Pripremne operacije mogu obuhvatiti i ljuštenje i usitnjavanje plodova. Plodovi se najčešće seku na kocku i rezanace. Od optimalno podešenog sitnjenja sirovine zavise oblik, ujednačeni sadržaj vode, vreme rehidracije i zapreminska masa finalnog proizvoda. U slučaju sušenja komada neujednačenih dimenzija biće neravnomerna i brzina sušenja, što dovodi do neujednačene osušenosti, a takođe i do šarolikosti u pogledu brzine i intenziteta rehidracije. Iz istog razloga se, u slučaju sušenja celih plodova, plodovi moraju kalibrirati po veličini kako bi se omogućilo ravnomerno sušenje plodova. Broj klasa zavisi od sirovine. Na primer, šljiva se suši cela i kalibriše u tri klase.

Plodovi voća se u toku pripreme mogu tretirati raznim aditivima sa ciljem olakšanja sušenja i očuvanja boje. Šljive i grožđe se mogu tretirati vrelim alkalnim rastvorom, čime se rastvara sloj voska na pokožici koji otežava sušenje. Promena boje može se sprečiti sumporisanjem. Sumporisanje je odavno poznat način sprečavanja oksidativnih ili enzimatskih reakcija, koje su uzrok promene boje.

**Sušenje.** Osnovni cilj operacije sušenja je konzervisanje proizvoda. Sušenjem se treba upravljati tako da se optimalno iskoriste sirovine i mogućnosti uređaja za sušenje. Stručnim upravljanjem procesom dobija se sušeni proizvod željenog kvaliteta i povećava ekonomičnost proizvodnje.

Izbor tehnike sušenja često zavisi od karakteristika materijala koji se suši, od njegove osetljivosti na toplotu, osobina vezanih za zadržavanje kvaliteta ukusa, fizičke strukture, krajnje namene i, što je često najvažnije, od troškova samog procesa. Pojedine tehnike, kao što je sušenje smrzavanjem, pogodne su za skoro sve vrste proizvoda, ali visoki troškovi upotrebe ograničavaju širu primenu ovog procesa.





Slika 5. Opšta šema sušenja voća i povrća (Grabowski, 2005)

Neophodni toplotni fluks može se predati proizvodu posredno pomoću fluida, najčešće vlažnog vazduha, i direktno kontaktom materijala sa grejnom površinom. Primer kontaktnog sušenja je sušenje voća u vakuumu. Vakuum se koristi u cilju smanjenja temperature sušenja i koristi se za sušenje hrane osetljive na toplotu. U odsustvu vazduha, zagrevanje se postiže kontaktom sa zagrejanim nosačima ili putem zračenja, dok uklanjanje vodene pare zahteva korišćenje vakuumskih pumpi, kondenzatora ili neki drugi složeni dizajn. Pregled tehnika sušenja dat je u posebnim poglavljima ovog rada.

**Operacije posle sušenja.** Proizvodnja osušenih proizvoda nije završena nakon operacije sušenja. Proizvod se nakon sušenja mora ujednačiti po dimenzijama, boji i obliku. Finalizacija osušenih proizvoda može obuhvatiti sitnjenje, klasiranje i probiranje. Postupak klasiranja ima za cilj izdvajanje komadića većih ili manjih od propisanih dimenzija. Takođe, iz proizvoda se moraju ukloniti oštećeni osušeni plodovi i strane primese. Posebno je osetljivo prisustvo metalnih opiljaka, pa se na kraju linije obično postavlja metal detektor.

Ambalažni materijali za pakovanje osušenih proizvoda moraju biti nepropusni za vodu, kiseonik, svetlost i strane mirise. Materije osetljive na oksidaciju preporučljivo je pakovati u inertnom gasu. Time se sprečavaju pogoršanja boje i ukusa, čak i u slučaju dužeg skladištenja na višim temperaturama. Kao inertni gas uglavnom se koristi azot.

### ***Sušenje voća u vakuumu***

Sušenje voća u vakuumu zasniva se na pojavi da se tačka ključanja vode može sniziti ispod 100 °C zagrevanjem u uslovima sniženog pritiska. Ovo znači da se sirovine u vakuumu mogu sušiti na nižoj temperaturi nego pri atmosferskom pritisku. Na ovaj način se u velikoj meri može poboljšati kvalitet osušenog proizvoda.

Dok se kod sušenja vazduhom toplota prenosi konvekcijom, dotle se kod sušenja pod vakuumom toplota prenosi kontaktom, a ređe i zračenjem. Kod klasičnog vakuumskeg sušenja primenjuje se vakuum na kome je tačka ključanja vode viša od 0 °C. Pod tim uslovima voda iz tečnog prelazi u parno stanje. U ovom slučaju dolazi do smežuranja površine komadastih proizvoda, slično kao kod sušenja vazduhom pod atmosferskim pritiskom. Kada se pritisak u komori smanji na pritisak na kome je tačka ključanja vode ispod 0 °C, voda je u sistemu prisutna samo u obliku leda ili pare. Tada dolazi do sublimacije leda iz materijala. Ovaj način vakuumskeg sušenja naziva se sušenje smrzavanjem, sublimaciono sušenje ili liofilizacija.

Tehnikom sušenja u vakuumu obično se suši hrana osetljiva na toplotu. Vakuum se primenjuje da bi se ubrzalo uklanjanje vode i smanjila temperatura sušenja i time zaštitile komponente hrane osetljive na toplotu. Sušenjem u vakuumu uspešno se suši i osetljivo voće uz minimalne promene u zapremini, hemijskom sastavu i senzornim svojstvima (Mašović, 2000).

**Prednosti.** Niska temperatura sušenja i uklanjanje preko 90% prisutne vode garantuju maksimalno očuvanje termički osetljivih biološki aktivnih supstanci. Proizvodi osušeni u vakuumu mogu se čuvati na sobnim temperaturama. Pored niske temperature, proces sušenja se odvija u visokom vakuumu, pa su onemogućene oksidacione promene sirovine (Topić, 2001). Nutritivna vrednost ovim postupkom

osušenih proizvoda neznatno se menja u odnosu na nutritivnu vrednost polaznih svežih sirovina.

Sušenjem u vakuumu dobija se vrlo porozna struktura osušenog materijala. Ovim je onemogućena migracija vode, dislokacija rastvorljive suve materije i koncentrisanje materije u površinskom sloju. U toku sušenja klasičnim postupcima, stvaranje pokorice otežava razmenu materije na graničnoj površini, a kod osušenog proizvoda rehidrataciju. Zbog ovoga je brzina rehidratacije proizvoda osušenih u vakuumu znatno veća u poređenju sa ostalim tehnikama sušenja (Ivančević, 2003).

Sve nabrojane prednosti sušenja u vakuumu javljaju se kao nedostaci klasičnog sušenja vazduhom. Ovo ukazuje da je kvalitet finalnih proizvoda osušenih procesom sušenja u vakuumu značajno bolji u poređenju sa proizvodima sušenim korišćenjem ostalih tehnika sušenja.

**Nedostaci.** Osnovni nedostatak ove tehnike sušenja je relativno složen dizajn uređaja, kojim se ne mogu postići veliki kapaciteti proizvodnje (Topić, 2001). Zbog ove činjenice i cena uređaja je veća za isti kapacitet od klasičnih uređaja za sušenje vazduhom. Ograničavajući faktor šire primene ove tehnike je složeno upravljanje procesom, koje zahteva veoma dobro poznavanje termodinamike sistema i karakteristika sirovina.

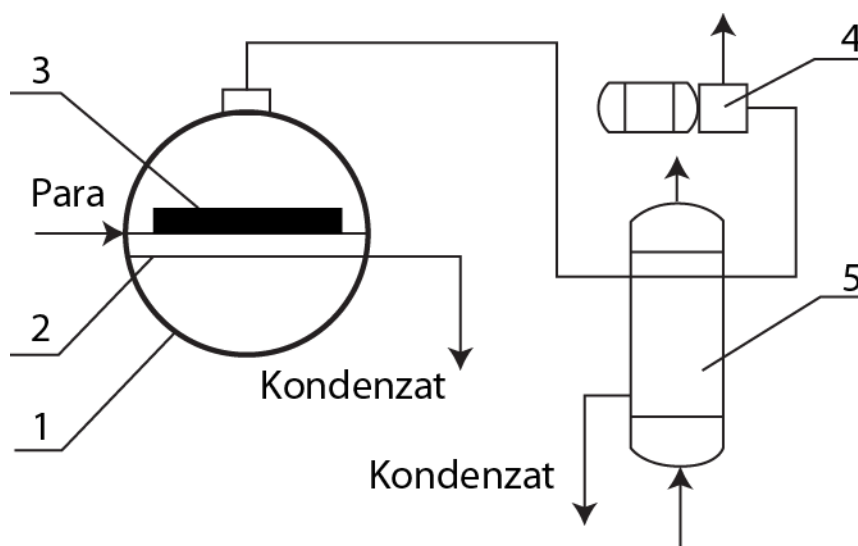
Dobro poznavanje termodinamike faznih promena vode u hrani i uticaja parametara sušenja na efikasnost i troškove procesa može značajno smanjiti cenu procesa i time proširiti mogućnosti primene ove tehnike sušenja. Razvojem novih ideja o minimalnoj obradi i dužem roku trajanja prehrambenih proizvoda, industrijska primena sušenja u vakuumu bi u skorijoj budućnosti mogla da se poveća (Lamikanra, 2002).

**Sušenje smrzanjem.** U slučaju sušenja smrzanjem sirovina je tokom celog procesa u smrznutom stanju, pa se ne remeti struktura ćelija. Izvorni oblik, boja i ukus sirovine zadržavaju se u većoj meri nego prilikom klasičnog sušenja u vakuumu, a značajno više u poređenju sa drugim postupcima sušenja. Sušenje smrzanjem je najskuplja tehnika sušenja (Janković, 2004). Troškovi procesa zavise od karakteristika sirovog materijala, načina pakovanja, kapaciteta opreme, trajanja ciklusa itd. Visoka cena opreme i eksploatacije je jedan od osnovnih razloga male upotrebe sušenja smrzanjem u prehrambenoj industriji. Upotreba je praktično svedena na proizvodnju visokokvalitetnih proizvoda velike dodate vrednosti. Upravo zbog visoke cene proizvoda, ova tehnika sušenja našla je znatno veću primenu u farmaceutskoj i biotehnološkoj industriji.

## Konstrukcija uređaja

Konstrukcija uređaja za sušenje u vakuumu pre svega zavisi od načina rada i namene. U svakom slučaju oprema se projektuje tako da predstavlja izolovan sistem u kome se održava optimalna temperatura i pritisak (Ivančević, 2003).

U najprostijem izvođenju (slika 6) uređaj za sušenje u vakuumu sastoji se od komore za sušenje, ugrađenih nosača i lesa, grejača, kondenzatora, vakuum pumpe i izvora toplote. Uređaji mogu biti konstruisani sa diskontinualnim ili kontinualnim režimom rada. Diskontinualne sušare najčešće su komornog tipa, a uređaji sa kontinualnim radom spadaju u grupu trakastih ili tunelskih sušara. Tečne namirnice osetljive na toplotu često se suše u sušarama sa valjcima koje rade pod vakuumom.



Slika 6. Šema vakuumske sušare: 1. komora za sušenje; 2. izvor toplote; 3. materijal; 4. vakuum pumpe; 5. kondenzator

**Komora za sušenje.** Komora za sušenje je obično cilindričnog oblika i u nju se postavljaju police na kojima se suši sirovina. Komora mora biti dobro zaptivena, kako bi se mogao održavati visoki vakuum u njoj.

**Police.** U prehrambenoj industriji najčešće se koriste uređaji za sušenje u vakuumu sa policama. Sirovina se slaže na police u kojima se nalaze električni grejači koji služe kao izvor toplote koja je neophodna za proces sublimacije. Toplota se predaje sirovini kontaktom sa grejnom površinom.

**Vakuum pumpe.** Vakuum pumpe je esencijalna komponenta sistema. Njena uloga je odvođenje vazduha i drugih nekondenzabilnih gasova iz sistema. Na ovaj način održava se visok vakuum u komori i kondenzatoru. Vakuum u sistemu može se održavati pomoću rotacionih uljnih vakuum pumpi ili višestepenih ejektorskih pumpi.

**Kondenzator.** Na liniji kretanja nastale vodene pare, između komore za sušenje i vakuum pumpe, postavlja se kondenzator. Kondenzovanjem vodene pare olakšava se održavanje vakuuma, jer je zapremina vode u čvrstom stanju mnogo manja od zapremine vode u parnom stanju. Pri sublimaciji 1 cm<sup>3</sup> leda nastaje para mnogo veće zapremine, pa bi u sistemu vakuum bilo potrebno održavati vakuum pumpama velike snage. Primenom kondenzatora, pumpe usisavaju samo nekondenzabilne gasove i vazduh koji se našao u komori za sušenje zbog loše hermetičnosti.

Zadatak kondenzatora je da u potpunosti odstrani vodenu paru. Brzina kondenzacije zavisi od razlike parcijalnih pritisaka para iznad površine sirovine i površine kondenzatora. Ovi parcijalni pritisci zavise od temperatura graničnog sloja iznad površine sirovine, odnosno kondenzatora. Pritisak pare sirovine forsira kretanje molekula vodene pare prema kondenzatoru. Molekuli imaju prirodni afinitet da se kreću prema kondenzatoru zato što je njegov pritisak pare niži nego onaj u okolini sirovine. Prema tome, temperatura kondenzatora mora biti značajno niža od temperature sirovine.

Kondenzator se hladi posebnom rashladnom instalacijom, u kojoj se koristi amonijak ili freon. Kondenzator mora imati dovoljnu površinu za kondenzovanje i kapacitet hlađenja da prikupi vodenu paru koja se oslobađa iz sirovine. Kada para dođe u kontakt sa površinom za kondenzovanje, ona se hladi i pretvara u kristale leda koji se naknadno uklanjaju iz sistema. Potrebna temperatura površine kondenzatora zavisi od temperature sirovine pri procesu sušenja. Što je niža temperatura materijala, mora biti niža i temperatura površine kondenzatora (Topić, 2001).

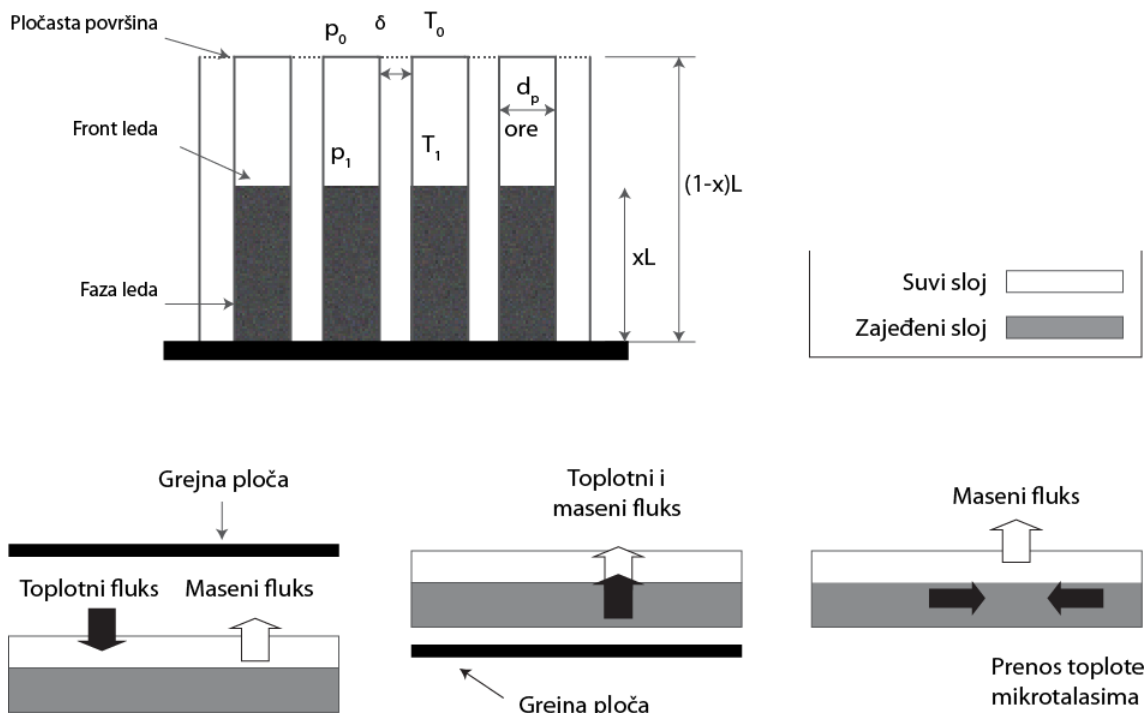
**Grejači.** Pored pumpe i kondenzatora, grejači su treća esencijalna komponenta u sistemu sušenja u vakuumu. Toplota se mora dovesti sirovini da bi se ubrzalo isparavanje vode i time povećala brzina sušenja. Dovođenje toplote mora biti pažljivo kontrolisano, pošto dovođenje više toplote nego što se za isparavanje može utrošiti dovodi do grejanja proizvoda i gubitka kvaliteta proizvoda. Brzina dovođenja toplote ograničena je i brzinom kondenzacije, odnosno kapacitetom kondenzatora (Ivančević, 2003).

Pored električnih grejača za zagrevanje sirovine, toplota se može dovesti preko medijuma (vodena para, vrela voda) koji struji kroz ploče, a na ove zagrejane nosače se postavljaju plitke lese sa materijalom koji se suši.

Toplota se sirovini može dovesti i pomoću mikrotalasa. Mikrotalasi se koriste kao izvor toplote za sušenje zato što su u mogućnosti da duboko prodru u sirovinu, proizvodeći efikasnije i uniformnije zagrevanje (Motavali, 2013).

## Prenos mase i toplote

Tokom sušenja u sirovini se javljaju procesi prenosa toplote i mase. Energija se predaje sirovini, voda prelazi u parno stanje i isparava. U slučaju sušenja u vakuumu pri kome je temperatura ključanja vode ispod 0 °C u sistemu postoji i led, pa se i njegov uticaj mora definisati pri opisu prenosa mase i toplote. Ovde će se izložiti analiza za ovaj složeniji slučaj. Prenos mase se uvek odvija kroz suvi sloj, dok se prenos toplote može odvijati kondukcijom i kroz smrznuti sloj (slika 7).



Slika 7. Šematski prikaz prenosa toplote i mase u slučaju sušenja smrzanjem (Wolti-Chanes, 2005)

Slika 7 ilustruje uzorak smrznute sirovine u obliku ploče sa smrznutim i suvim poroznim slojem, koja prolazi kroz jednodimenzionalno sušenje. Kontaktna površina između osušenih i smrznutih slojeva naziva se ledeni front, i aproksimativno se može uzeti da se on kreće uniformnom brzinom. Para struji kroz pore i kanale. U slučaju da se toplota provodi kroz suvi sloj, fluks toplote do ledenog fronta može se predstaviti formulom:

$$q = k_d \frac{(T_e - T_f)}{(1 - x) L} \quad (1)$$

gde je  $q$  fluks toplote ( $J/m^2 s$ ),  $k_d$  je koeficijent kondukcije suvog sloja ( $W/m K$ ),  $T_e$  je temperatura na površini ploče ( $^{\circ}C$ ),  $T_f$  je temperatura ledenog fronta ( $^{\circ}C$ ),  $L$  je debljina ploče (m), a  $x$  je relativna visina ledenog fronta.

Prenos toplote kroz smrznuti sloj može se opisati formulom:

$$q = k_f \frac{(T_p - T_f)}{x L} \quad (2)$$

gde je  $k_f$  koeficijent kondukcije smrznutog sloja (W/m K), a  $T_p$  je temperatura zagrejane ploče (°C).

Ako para struji u porama uglavnom Knudsenovom difuzijom, sudaranja sa suvim zidovima su brojna u poređenju sa sudarima između molekula vode, onda je brzina sublimacije leda ( $N_w$ , kg/s m<sup>2</sup>) definisana izrazom:

$$N_w = \varepsilon D_k \frac{M_w (P_f - P_e)}{R T (1 - x) L} \quad (3)$$

gde je  $\varepsilon$  zapremina frakcije leda,  $D_k$  je Knudsenov koeficijent isparavanja vode (m<sup>2</sup>/s),  $M_w$  molekulska masa vode (kg/mol),  $R$  je gasna konstanta (J/mol K),  $T$  je apsolutna temperatura (K),  $P_f$  je pritisak pare na površini leda i  $P_e$  je pritisak pare na površini sirovine (Pa).

Knudsenov koeficijent difuzije je funkcija prečnika pore ( $d_p$ ) i temperature:

$$D_k = \frac{2}{3} d_p \left( \frac{2RT}{\pi M_w} \right)^{0,5} \quad (4)$$

Na ledenom frontu,  $T_f$  predstavlja temperaturu sušenja. Pretpostavljajući da je u ravnoteži, ona je u funkcionalnoj zavisnosti sa pritiskom pare ( $p_w$ ) preko Clausius-Clapeyron-ove jednačine:

$$\ln(p_w) = 28,9 - \frac{6138}{T_f} \quad (5)$$

Iz bilansa mase za vodenu paru u okolini grejne ploče sledi izraz:

$$N_w = \varepsilon \rho_{ice} \frac{d(xL)}{dt} \quad (6)$$

gde je  $\rho_{ice}$  gustina leda (kg/m<sup>3</sup>).

Pod pretpostavkom da se sva toplota koristi za sublimaciju leda, bilans entalpije iznosi:

$$q = \Delta H_s N_w \quad (7)$$

gde je  $\Delta H_s$  latentna toplota sublimacije (J/kg).

Za temperaturne razlike koje nisu prevelike, Clausius-Clapeyron-ova jednačina može se linearizovati, a gore navedena jednačina se može rešiti analitički. Za ukupno vreme sušenja mogu se izvesti sledeći izrazi:

$$t = \frac{\alpha L^2}{D_k} (1 + \beta D_k) \quad (8)$$

u kojem je:

$$\alpha = \frac{1}{2} \rho_{ice} \frac{R T_f}{M_w} \frac{1}{(P_f - P_e)} \quad (9)$$

Ako dođe do prenosa toplote kroz suvi sloj, onda je  $\beta = 0$ ; ako se odvija prenos toplote kroz smrznuti sloj onda je:

$$\beta = \varepsilon D_k \frac{M_w^2 \Delta H_s^2 p_f}{R^2 T_f^3 k_{ice}} \quad (10)$$

gde je  $k_{ice}$  koeficijent toplotne kondukcije leda (W/m K).

Razvijeno je nekoliko matematičkih jednačina koje opisuju prenos mase i toplote za modelovanje procesa sušenja smrzanjem. Ovi modeli uzimaju u obzir samo smrznutu vodu (model sublimacije) ili uklanjanje smrznute i vezane vode (sorpcioni sublimacioni model), ispituju metode prenosa toplote i mehanizme difuzije, opisuju procese stabilnog i nestabilnog stanja ili analiziraju oba prenosa pod različitim uslovima procesa. Neki modeli precizno opisuju eksperimentalne brzine sušenja i vremena smrzanja.

Ipak, glavni problem u primeni nekih modela je zahtev za pouzdanim podacima o karakteristikama prenosa toplote i mase sirovine, kao što su difuzivnost u okviru poroznog medija, Knudsenova difuzija, koncentracija vodene pare u suvom sloju, poroznost, efektivna termička konduktivnost, permeabilnost itd.

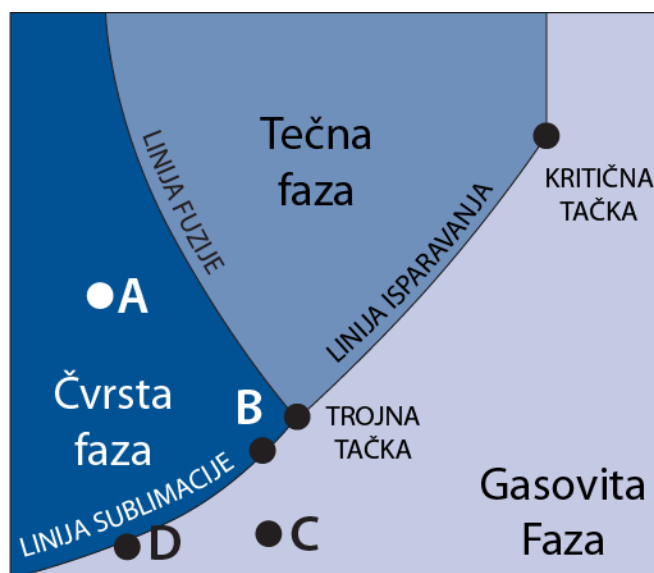
## Sušenje smrzanjem

**Princip.** Sušenje smrzanjem (freeze-drying) ili liofilizacija (lyophilisation) predstavlja poseban vid sušenja u vakuumu. Proces se sastoji od sublimacije vode iz smrznute sirovine, na dovoljno niskoj temperaturi i pod dovoljno visokim vakuumom. Sublimacija (lat. *sublimis*, visoko, uzvišeno) je proces direktnog prelaza čvrste materije, zagrevanjem, u gasovito stanje (i obrnuto), isključujući fazu topljenja (Kostić, 2005). Većina čvrstih materija na normalnoj temperaturi ima beskrajno mali napon pare i one ne mogu sublimirati. Kod malog broja čvrstih materija napon pare dostiže veće vrednosti, pa ove materije isparavaju i na sobnoj temperaturi. Takva supstanca je i voda, koju u procesu sušenja treba izdvojiti iz sirovine.



Pri konstantnom atmosferskom pritisku, zavisno od temperature, voda se može nalaziti u sva tri agregatna stanja. Snižavanjem pritiska i temperature u kontrolisanim uslovima voda se može dovesti u takvo stanje da istovremeno bude u čvrstom, tečnom i gasovitom stanju. Ta tačka u kojoj su sva tri stanja vode u ravnoteži naziva se trojna tačka. Trojna tačka za vodu se nalazi na temperaturi 0 °C i pritisku 610 Pa (Ivančević, 2003). Na pritiscima i temperaturama ispod trojne tačke, voda u obliku leda direktno prelazi u gasovito stanje, tj. sublimira.

U faznom dijagramu pritisak-temperatura (slika 8) prikazana je trojna tačka čiste vode. Fazni dijagram je linijama podeljen u tri regiona koji predstavljaju čvrsto, tečno i gasovito stanje vode u zatvorenom sistemu. Tačke duž linija razdvajanja predstavljaju kombinaciju temperature i pritiska na kojima su dve faze u ravnoteži: ravnoteža tečnosti i gasa, ravnoteža tečnosti i čvrste materije i ravnoteža čvrste materije i gasa, što je od primarnog značaja za sušenje smrzanjem. Trojna tačka predstavlja jedinu kombinaciju temperature i pritiska u kojoj su sva tri stanja vode u ravnoteži.



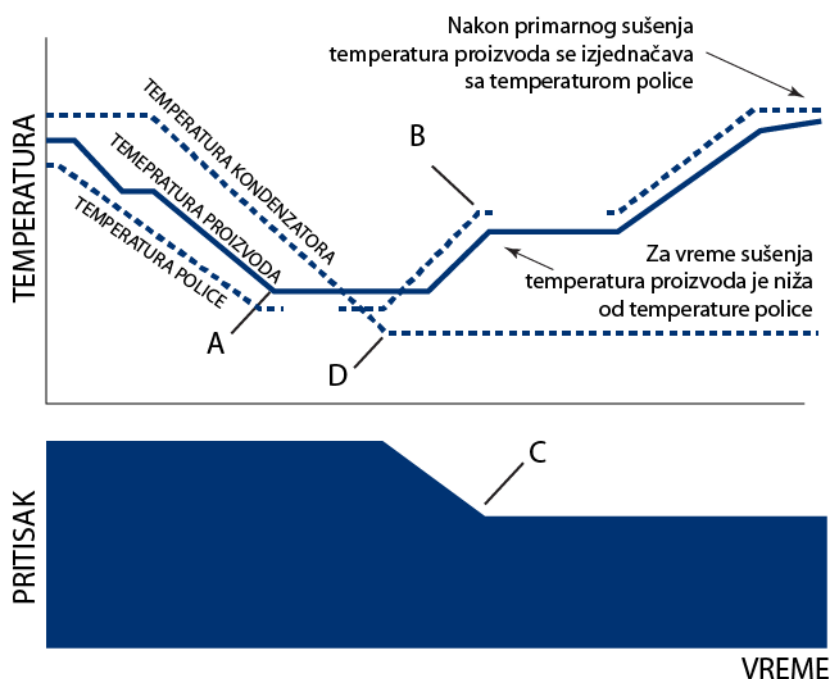
Slika 8. Fazni dijagram za vodu (Wolti-Chanes, 2005)

Voda može sublimirati i na atmosferskom pritisku na temperaturama okolne sredine ispod nule, ali je brzina sušenja (brzina sublimacije) u ovom slučaju neznatna.

**Opis procesa.** Proces sušenja smrzanjem sastoji se od tri osnovne faze: smrzanja, primarnog i sekundarnog sušenja sirovine (Vračar, 2004). Na faznom dijagramu (slika 8) prikazana su stanja vode, temperature i pritiska, u pojedinim fazama procesa sušenja smrzanjem. Većina sirovina lako se smrzava ispod svoje eutektičke ili staklo-tranzicione tačke (tačka A). Nakon smrzanja temperatura se diže do samo malo ispod temperature trojne tačke (tačka B) i zatim se u komori snižava pritisak. U ovoj tački počinje proces sušenja.

Na slici 9 ilustriran je proces sušenja smrzanjem. Sirovina se hladi ispod svoje eutektičke temperature (tačka A). Kondenzator se hladi do temperature otprilike 20°C hladnije od temperature sirovine, uopšteno oko -50 do -80°C (tačka D). Sirovinu treba sušiti na temperaturi malo nižoj od njegove eutektičke ili kolapsne temperature (tačka B).

Pošto je sirovina smrznuta i postignuta temperatura kondenzatora, sistem se vakuumira (tačka C). Na ovoj tački počinje primarno sušenje sirovine i ono se nastavlja sve dok se iz sirovine ne ukloni slobodna voda.



Slika 9. Šematski prikaz procesa smrzanja ([www.labconco.com](http://www.labconco.com))

Nakon što se ukloni slobodna voda sirovina se zagreva iznad eutektičke temperature, kako bi se iz sirovine uklonila vezana voda. Eutektička temperatura je najniža temperatura na kojoj eutektička smeša može postojati u tečnoj fazi (Kostić, 2005). Proces sekundarnog sušenja se nastavlja sve dok u sirovini ne zaostane slobodne vode koja obezbeđuje očuvanje strukture i mikrobiološke stabilnosti proizvoda.

**Smrzavanje.** Pošto se proces sušenja smrzanjem zasniva na sublimaciji, sirovina se mora smrznuti, odnosno mora se smrznuti slobodna voda u sirovini.

Metod smrzanja i konačna temperatura smrznute sirovine imaju značajan uticaj na oblik, veličinu i distribuciju kristala leda i time na krajnju strukturu proizvoda osušenog smrzanjem. Brzina hlađenja utiče na strukturu smrznute sirovine. Pri brzom smrzanju formiraju se manji kristali leda, koji stvaraju finiju strukturu pora u sirovini. Finija struktura pora predstavlja veći otpor protoku vodene pare, što otežava sušenje i time zahteva duže primarno sušenje. Ovakva tehnika korisna je kod mikroskopskog

ispitivanja strukture materijala. Sporije smrzavanje utiče na stvaranje većih kristala leda, što daje grublju strukturu pora, koja predstavlja manji otpor prolazu pare, pa je zato u ovom slučaju kraće vreme primarnog sušenja (Schneid, 2009).

Prilikom smrzavanja mora se obratiti pažnja i na karakteristike sirovine. Pri smrzavanju sirovina se može ponašati kao eutektička smeša ili se mogu stvarati staklaste strukture. Veoma je važno da se sirovina smrzne ispod najniže eutektičke tačke pre početka procesa sušenja, jer mali džepovi nesmrznutog materijala koji ostaju u sirovini mogu ekspanirati i time ugroziti strukturnu stabilnost osušenog proizvoda. Umesto formiranja eutektičke smeše, suspenzija može formirati staklastu strukturu. U ovom slučaju cela suspenzija postaje sve viskozija sa snižavanjem temperature dok se konačno ne smrzne na tački tranzicije stakla formirajući staklastu čvrstu materiju. Ovaj tip sirovina se ekstremno teško suši.

**Primarno sušenje.** Primarnim sušenjem se iz sirovine sublimacijom izdvaja tzv. slobodna voda. Smrznuta sirovina se u uslovima vakuuma zagreva kako bi se obezbedila latentna toplota isparavanja, ali tako da se sirovina drži ispod eutektičke temperature. Smatra se da je primarno sušenje završeno kada u sirovini ostane 6-8% vode. Pretpostavlja se da posle ovoga u sirovini više nema slobodne vode, pa je proces sublimacije završen.

Primarno sušenje sirovine zahteva veoma pažljivu kontrolu dva parametra, temperature i pritiska. Uslovi primarnog sušenja sublimacijom moraju se ustanoviti za svaku sirovinu posebno, zbog mogućnosti stvaranja eutektičkih smeša, staklastih struktura ili pojave kolapsa.

Brzina sublimacije leda iz smrznute sirovine zavisi od razlike pritisaka pare iznad sirovine i u kondenzatoru. Molekuli migriraju sa višeg pritiska u prostoru iznad sirovine u oblast nižeg pritiska u prostoru kondenzatora. Pošto je pritisak pare funkcionalno vezan sa temperaturom, neophodno je da sirovina bude toplija od kondenzatora. Veoma je važno da temperatura na kojoj se sirovina suši bude izbalansirana između temperature koja održava sirovinu u smrznutom stanju i temperature koja maksimizuje pritisak isparavanja vode iz sirovine. Ovaj balans je ključ optimizacije sušenja smrzavanjem. Dovod toplote sirovini mora se veoma pažljivo kontrolisati, naročito tokom ranih faza sušenja. Sirovini je potrebno dovesti što je moguće više toplotne energije radi ubrzavanja sušenja, ali tako da ne dođe do prelaska vode iz čvrstog u tečno stanje. Sve dok je u sirovini prisutna smrznuta slobodna voda, sirovina se mora držati ispod eutektičke temperature ili temperature staklaste tranzicije (Schneid, 2009).

Pored dovedene toplote, na brzinu sušenja utiče i odnos površine prema zapremini sirovine. Što je ovaj odnos veći i brzina sušenja je veća. Ovo je posledica veće površine

isparavanja u poređenju sa razdaljinom koju molekul mora da pređe do površine smrznute sirovine. Sušenje se odvija od površine sirovine i inicijalno uklanjanje molekula vode je brzo. Međutim, kako se front sušenja pomera ka centru sirovine, sušenje postaje sve teže. Molekuli vode sada moraju proći kroz osušene delove proizvoda, što ometa njihov napredak. Kako se front sušenja pomera sve dalje u unutrašnjost sirovine, dovodenje toplote sirovini postaje sve važnije.

**Sekundarno sušenje.** Sekundarnim sušenjem se iz sirovine desorpcijom izdvaja tzv. vezana (nesmrznuta) voda. Izdvajanje vezane vode zahteva nastavak sušenja na višoj temperaturi. Pošto na kraju primarnog sušenja u sirovini nema slobodne vode, temperatura sirovine može se podizati, a da ne dođe do topljenja vode. Temperatura sirovine se povećava, da bi se desorbovala granična voda. Sirovina se suši sve dok sadržaj rezidualne vode ne opadne na nivo koji se zahteva za optimalnu stabilnost proizvoda. Temperatura sirovine ne sme se prebrzo povećavati, kako ne bi došlo do pregrevanja sirovine.

Da bi se proces desorpcije ubrzao, vakuum u sistemu treba da bude što je moguće viši, a temperatura kondenzatora što je moguće niža. Dužinu sekundarne faze određuju karakteristike sirovine i performanse uređaja. Sekundarna faza sušenja zahteva od 30 do 50% vremena potrebnog za primarno sušenje (Schneid, 2009). Razlog ovome je niži pritisak ostataka vezane vode od pritiska slobodne vode na istoj temperaturi.

Na kraju sekundarnog sušenja dobija se proizvod koji sadrži 1-3% vode. Mnogi proizvodi, kao što su proteini i peptidi, zahtevaju vodu kako bi održali sekundarnu i tercijarnu strukturu. U ovom slučaju, sadržaj vode mora biti pažljivo kontrolisan. Prekomernim uklanjanjem vode materijal može izgubiti prirodna svojstva, odnosno, delimično ili potpuno, svoju aktivnost. Dodatno, prekomerna toplota može izazvati smanjivanje i ugljenisanje suvog ostatka (Schneid, 2009).

Uklanjanjem i tzv. vezane vode omogućava se uspešno čuvanje proizvoda i pri skladištenju na sobnoj temperaturi. Sušenje smržavanjem je završeno kada se ukloni sva slobodna voda i deo vezane vode do mere koja omogućava zaostajanje rezidualnog nivoa vode koji osigurava integritet željene strukture i stabilnost proizvoda.

## **Pakovanje i skladištenje proizvoda**

Postojanost proizvoda osušenog u vakuumu je velika i zavisi isključivo od korišćene ambalaže i uslova skladištenja (Ivančević, 2003). Najvažniji parametri skladištenja su vlažnost vazduha i prisustvo kiseonika.

Svi proizvodi osušeni u vakuumu imaju mali sadržaj vode i po svojoj prirodi su veoma higroskopni. Zbog ovoga kontakt sa **vodom** u toku skladištenja može narušiti održivost proizvoda. Rizik od degradacije proizvoda vodom smanjuje se i skladištenjem proizvoda u prostoru sa niskom vlažnošću. U vakuumu se uglavnom suše osetljive sirovine, kod kojih kontakt proizvoda sa **kiseonikom** izaziva pojavu oksidacionih procesa i time umanjeње kvaliteta proizvoda. Mnogi proizvodi osušeni u vakuumu zahtevaju da se **ambalaža** zatvori još dok je proizvod pod vakuumom, čime se eliminiše uticaj vode i kiseonika na proizvod. Primenjuje se i pakovanje proizvoda u prisustvu inertnih gasova, kakvi su argon ili azot. Inertni gasovi moraju biti veoma čisti i ne smeju sadržati kiseonik ili vodu. Ambalažni materijali koji se koriste za pakovanje proizvoda osušenih u vakuumu moraju biti nepropusni za vodu i kiseonik.

Štetni efekti kiseonika i vode zavise od **temperature** skladištenja. Što je viša temperatura skladištenja, to je brža degradacija proizvoda. Većina proizvoda osušenih smrzavanjem može se čuvati na sobnoj temperaturi, ali skladištenje na nižim temperaturama produžava njihov rok upotrebe.

## ***Ostale metode sušenja voća***

Sušenje voća i povrća može biti prirodno, kontrolisano ili kombinovano (Grabowski, 2005). Prirodno sušenje je zasnovano na prirodnoj aktivnosti Sunca i vetra, kontrolisano na nezavisnom izvoru toplote (sušenje vazduhom, kontaktno sušenje, osmotska dehidracija itd.), a kombinovano koristi oba izvora toplote (na primer hibridna solarna sušara). Sve ove metode igraju važnu ulogu u sušenju voća i povrća. Toplota neophodna za sušenje prenosi se od izvora energije do vlažnog materijala uz pomoć provođenja, strujanja, unutrašnjeg generisanja (mikrotalasi), površinske radijacije (Sunce, svetlo) ili kombinacijom ovih tehnika. U skladu sa najnovijim trendovima, u mnogim postojećim konvencionalnim sistemima za sušenje, solarna energija, energija vetra i energija iz drugih prirodnih izvora se sve više koristi u obezbeđivanju dela ili celokupne energije potrebne za proces sušenja.

## **Sušenje na Suncu**

Korišćenje toplotnog zračenja u svrhu sušenja hrane nije uobičajeno. Jedina dva primera koji imaju praktičan značaj su primena toplotnog zračenja u nekim slučajevima

sušenja u vakuumu i tradicionalnog sušenja hrane izlaganjem uticaju Sunčevih zraka (Jelen, 2005).

Hranu su na Suncu sušili još stari Egipćani. Uprkos značajnim tehnološkim dostignućima, sušenje hrane na Suncu je i dalje važna tehnika koja se koristi u mnogim državama. Ova tehnika i danas se često koristi u proizvodnji suvog grožđa, sušene ribe, divljih pečuraka i drugih proizvoda.

**Opis procesa.** Tehnike sušenja na Suncu uglavnom se zasnivaju na iskustvu i tradiciji. Vlažan materijal širi se po polju ili betonskim pistama kako bi se sušio na Suncu i vetru. Sunčeva energija omogućava isparavanje vode, dok vetar pomaže uklanjanje vode, te se tako proces ubrzava.

Debljina vlažnog sloja, vreme sušenja i rukovanje materijalom pre, tokom i nakon sušenja čine obično standardizovane uslove zasnovane na praksi. Neki veoma približni proračuni sušenja na Suncu mogu se izvesti na osnovu dostupnih podataka o količini zračenja solarne energije u datom regionu, optičkih osobina vlažnih i suvih materijala, lokalnih klimatskih uslova kao što su temperatura i vlažnost vazduha, učestalost i intenzitet padavina.

Vreme sušenja na Suncu zavisi od karakteristika materijala i uslova sušenja i obično se kreće u opsegu od 3 do 4 dana, ali može biti i duže (Grabowski, 2005). Tokom ovog vremena, materijal bi trebalo zaštititi od kiše, insekata, ptica, životinja itd. Razvijeno je nekoliko praktičnih metoda za smanjivanje vremena sušenja. Jedna od najznačajnijih, posebno za veći obim proizvodnje, je primena različitih pred-tretmana. Koristi se nekoliko metoda pred-tretmana materijala, kao na primer parenje, potapanje u kipuću vodu ili šećer i/ili rastvor soli ili upotreba etil-, metil- ili natrijum oleata itd. Drugi način da se smanji vreme sušenja na Suncu je korišćenje kolektora solarne energije, sa ili bez prirodnog ili veštački izazvanog strujanja vazduha unutar sušare. Ova tehnika se obično naziva solarno sušenje.

Temperatura voća tokom sušenja na Suncu je obično između 5 i 15 °C iznad temperature okruženja (Grabowski, 2005).

**Prednosti.** Sušenje na Suncu može biti veoma jeftino u oblastima adekvatnih klimatskih uslova i tamo gde su troškovi radne snage niski. Solarna energija ne zagađuje okolinu.

**Nedostaci.** Glavni problemi sušenja na Suncu su zavisnost procesa od vremenskih uslova i teško održavanje higijene proizvodnje (Jelen, 2005). Noću i tokom kišnih perioda, ovaj tip sušenja se ne može koristiti. Održavanje higijene je teško, pošto se sirovina suši na otvorenom prostoru.

## Sušenje vazduhom

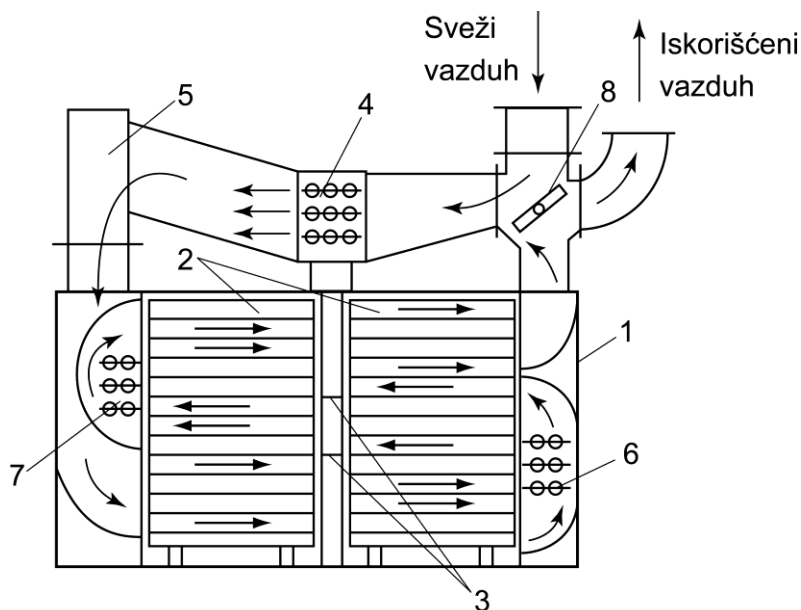
Većina tehnika sušenja voća je zasnovana na upotrebi toplog vazduha kao medijuma za konvektivni prenos toplote i uklanjanje isparene vode. Postoji veliki broj različitih konstrukcija sušara. Konstrukcije se među sobom razlikuju u konfiguraciji komore za sušenje, tj. po poziciji ili relativnom kretanju materijala i vazdušne struje. Neki od osnovnih tipova konvektivnih sušara su: kondenzacione, tunelske, trakaste i sl. Prema relativnom kretanju vazduha i materijala, sušare mogu biti istosmerne (vazduh i materijal se kreću u istom smeru), protivsmernne (materijal se kreće suprotno od kretanja vazduha) ili unakrsne (Jelen, 2005).

Sušenje voća i povrća toplim vazduhom obuhvata širok opseg metoda. Glavni mehanizam sušenja u ovom slučaju je kretanje vlažnosti iz unutrašnjosti do površine vlažnog materijala i isparavanje u okolni vazduh. Brzina sušenja je funkcija nekoliko parametara, kao što su temperatura, vlažnost i brzina strujanja vazduha, sadržaja vode vlažnih i osušenih proizvoda, reoloških karakteristika, specifične površine sušenja i geometrijske forme inicijalnog proizvoda itd. U daljem tekstu predstavljeni su neki opšti tipovi konstrukcija sušara toplim vazduhom pogodnih za sušenje voća i povrća.

### *1. Komorne sušare*

Komorna sušara (slika 10) je najjednostavniji tip sušare koja koristi vazduh kao medijum za sušenje. Rad sušare je diskontinualan. Sušara omogućava obradu različitih proizvoda, od tečnih emulzija do čvrstih materijala. Tipična komorna sušara sastoji se od izolovanih komora sa policama na koje se stavljaju posude u kojima se nalazi vlažni materijal koji se suši. Ventilator potiskuje vazduh kroz grejač, a potom horizontalno između polica ili vertikalno kroz njih. Deo vazduha se može recirkulisati, ili se sav vazduh ispušta u atmosferu. Vlažan materijal stavlja se na police u relativno tankom sloju debljine 1 do 6 cm pa kapaciteti ovih sušara nisu veliki.

Uslove sušenja je teško kontrolisati. Teško je održavati podjednaku vrednost temperature u svim sekcijama komore za sušenje, pa sušenje materijala nije ravnomerno. Glavni nedostatak ovih sušara je veliki manuelni rad potreban za opsluživanje sušare i relativno slab intenzitet sušenja. Ipak, veliki broj različitih materijala može se osušiti u ovim sušarama pa je njihova primena široko rasprostranjena u prehrambenoj industriji. Komorne sušare ponekad se koriste za finalno sušenje i egalizaciju osušenog povrća (Grabowski, 2005).



Slika 10. Komorna sušara: 1 - komora za sušenje; 2 - podovi na kojima se nalazi vlažan materijal; 3 - pregrade koje odvajaju sekcije u sušari; 4, 6 i 7 - kaloriferi; 5 - ventilator; 8 - ploča za raspodelu svežeg i iskorišćenog vazduha

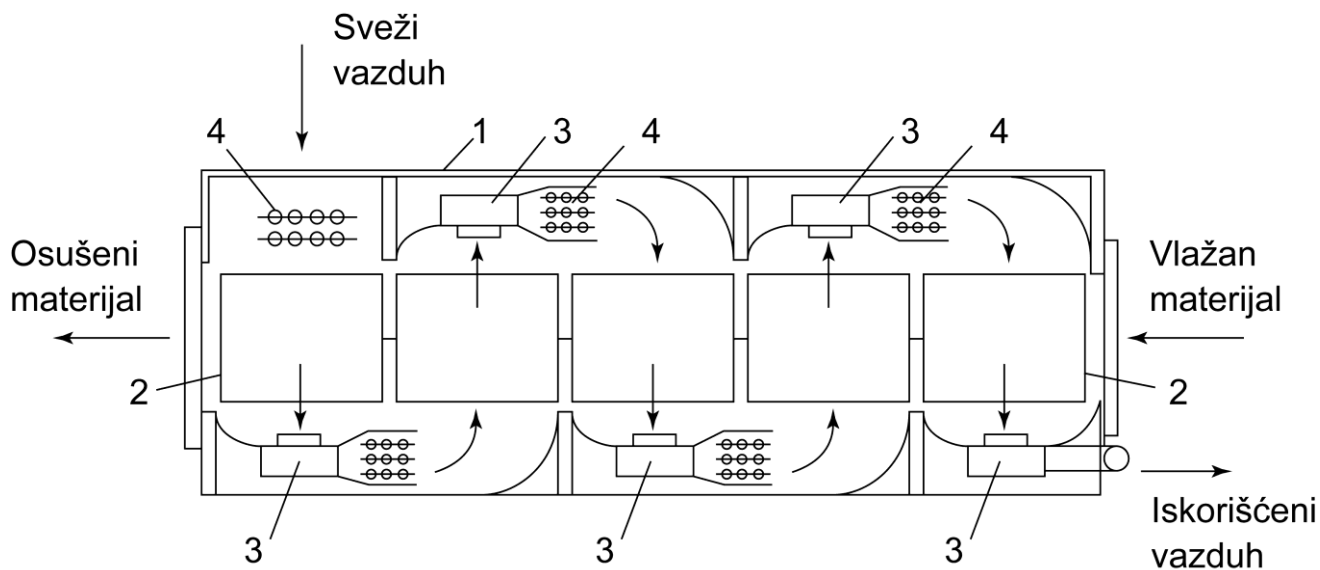
## 2. Tunelske sušare

Tunelske sušare imaju sve prednosti komornih sušara. Pored toga, rade polukontinualno. Ovaj tip sušare je veoma popularan za sušenje voća i povrća. U poređenju sa komornom sušarom, troškovi ulaganja su viši.

Tipična sušara može biti duža od 20 m, sa kvadratnim ili pravougaonim poprečnim presekom otprilike 2x2 m. Vlažan materijal se stavlja na lese koje su poređane na kolicima (slika 11). Kolica se periodično uvlače u jedan kraj tunela (vlažni kraj), kreću kroz tunel i izvlače na drugom kraju (suvi kraj). Kretanje kolica u odnosu na vazduh može biti istosmerno i protivsmerno (Grabowski, 2005). Svež vazduh ventilatorom se potiskuje preko izmenjivača toplote, gde se zagreva na potrebnu temperaturu i usmerava na vlažni materijal. Deo vazduha može se recirkulirati ili ceo izbaciti u atmosferu.

Osnovni principi modelovanja i vreme sušenja za ovaj tip sušenja slični su onima za komornu sušaru. Dimenzije tunela računaju se na osnovu propusne moći sušenja, neophodnom vremenu sušenja, dimenzijama i kapacitetu kolica. Osnovni nedostaci su neravnomerno sušenje i velik utrošak manuelnog rada.





Slika 11. Tunelska sušara. 1 - komora za sušenje; 2 - vagoneti sa vlažan materijal; 3 - ventilatori; 4 - kaloriferi

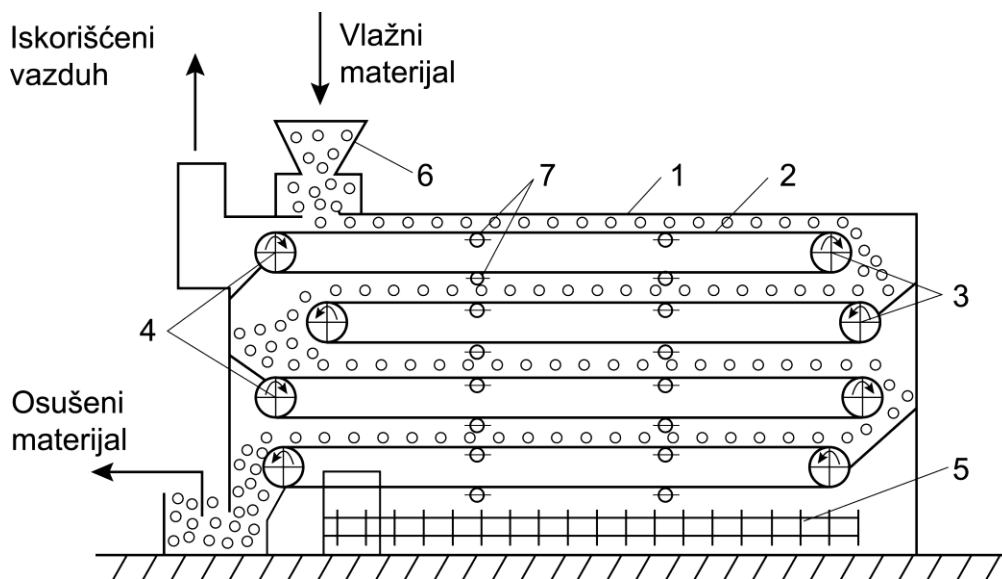
### 3. Trakaste sušare

Kontinualno sušenje postiže se trakastim sušarama. Ovaj tip sušare je veoma popularan u industriji prerade povrća. Vlažan materijal nosi se kroz tunel na perforiranim (mrežastim, rupičastim ili rešetkastim) beskrajnim pokretnim trakama. Zagrejani vazduh usmerava se kroz pokretnu traku i sloj materijala, ili se usmerava preko površine materijala, kod sušenja u tankom sloju na neperforiranim trakama. Kretanje vazduha u odnosu na pokretan vlažan materijal može biti protivsmerno ili unakrsno. Vazduh struji iznad čvrstog materijala, zagreva ga i oduzima mu vodu. Iskorišćeni vazduh izlazi iz komore za sušenje sa vrha uređaja, a osušeni materijal se iznosi na dnu uređaja.

Neki modeli se sastoje od dve ili više pokretnih traka u seriji (redno postavljenih). Takođe, može se koristiti konfiguracija sa strujanjem vazduha u istom ili suprotnom smeru od kretanja materijala.

Ove sušare su ograničene na hranu koja formira poroznu podlogu (isečena, granulirana). Za sušenje povrća, mogu se koristiti višestruke pokretne trake (do 5), jedna iznad druge (slika 12). Vlažan proizvod se uvodi na gornju pokretnu traku i kreće nadole sa jedne pokretne trake na drugu. Cirkulacija vazduha je obično kombinacija ukrštenog i istosmernog/protivsmernog kretanja. Ovaj tip sušara često se koristi za finalnu fazu sušenja nekih vrsta povrća. Trakaste sušare u novije vreme zamenjuju tunelske za sušenje povrća kao što su šargarepa, luk i krompir. Često se proizvod na pokretnoj traci dodatno zagreva energijom infracrvene, mikrotalasne ili radio frekvencije (Grabowski, 2005).

Nedostaci ove tehnike sušenja su relativno visoka potrošnja toplote i usko polje mogućnosti primene jer su pogodne samo za sušenje rastresitog materijala. Neravnomerno sušenje materijala u površinskom sloju i unutrašnjosti sloja rešava se presipanjem materijala jedne trake na drugu i unakrsnim kretanjem vazduha u odnosu na vlažan materijal. Presipanjem materijala sa trake na traku i unakrsnim kretanjem vazduha i vlažnog materijala povećava se površina kontakta između toplog vazduha i čestica materijala i tako obezbeđuje brže i ravnomernije sušenje.



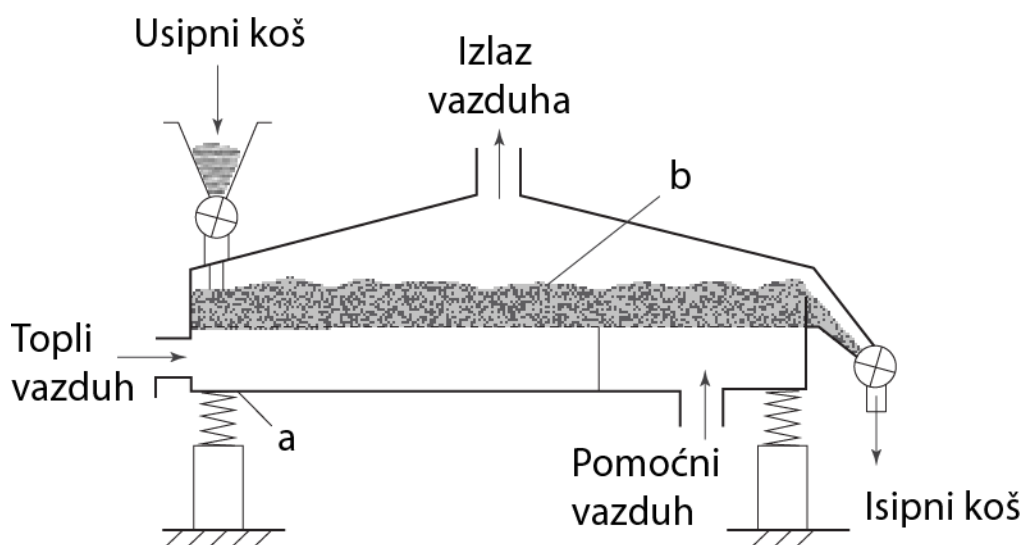
Slika 12. Trakasta sušara 1 - komora za sušenje; 2 - beskonačna traka; 3, 4 - pogonski bubnjevi; 5 - kalorifer; 6 - dozator; 7 - ležajevi za pokretanje traka

#### 4. Sušare sa fluidizovanim slojem

Povrće (celo ili isečeno u komade) može se osušiti u sušarama sa fluidizovanim slojem, ili u nekoliko njenih modifikacija, kao što su sušare sa vibrirajućom podlogom. Ova tehnika sušenja toplim vazduhom pogodna je za sušenje rastresitog materijala (npr. pasulja, kukuruza, kockica mrkve i granula krompira). Glavna prednost ovog tipa sušare je kratko vreme sušenja, što je rezultat visoke temperature i velikog koeficijenta prenosa toplote postignutog povećanjem turbulencije vazduha. Ova tehnika koristi se za sušenje komada hrane veličine od 10 do 20 mm. Grašak, pasulj, isečena mrkva, luk i krompir su tipično povrće koje se suši ovom tehnikom sušenja. Velika disperzija veličine komada otežava ravnomernu fluidizaciju materijala. U ovakvim slučajevima koriste se mehanički ili pneumatski izazvane vibracije (pulsirajuća fluidizacija) (Grabowski, 2005).

Sušara sa vibrirajućom podlogom često se koristi kao sušara druge faze sušenja praškastog materijala ili, na primer, kao granulator nakon sušenja raspršivanjem u prvoj fazi (slika 13).

**Opis procesa.** Sušare sa fluidizovanim slojem rade u kontinualnom režimu. Strujanjem vazduha kroz perforirane pregrade, koje se nalaze na dnu komore za sušenje, sloj materijala počinje da lebdi u vazduhu, odnosno stvara se fluidizovana podloga. Na ovaj način značajno se povećava površina kontakta između čestica čvrstog materijala i vazduha, a time i brzina sušenja. Osušeni materijal izvodi se iz komore trakastim transporterom, a iskorišćeni vazduh prolazi kroz ciklon i vrećasti filter radi zadržavanja preostalih finih čestica materijala koje nosi vazduh. Ove čestice osušenog materijala odvoje se na trakasti transporter (Sovilj, 2004). Šema ovakve sušare prikazana je na slici 13.



Slika 13. Šema sušare sa fluidizovanim slojem (Jelen, 2005)

### 5. Sušare sa raspršivanjem

Bilo koji materijal koji može da se pretvori u tečnost ili emulziju, može biti sušen raspršivanjem. Izlazni proizvod ove tehnike sušenja je u praškastom obliku. Osnovna razlika između sušenja raspršivanjem i ostalih postupaka sušenja hrane vazduhom je relativno kratko vreme sušenja (nekoliko sekundi). Posledica ovako brzog sušenja malih kapi dispergovanih u topli vazduh minimizuje neke od štetnih promena hrane koje su uobičajene za ostale tehnike sušenja.

**Opis procesa.** Princip rada kontinualnog procesa sušenja raspršivanjem je disperzija (atomizacija) tečnosti koja se suši u struji toplog vazduha koji ulazi u komoru za sušenje. Prečnici pojedinačnih kapi tečnog mlaza kreću se na nivou mikrometra, a temperatura vazduha može se kretati i do 200 °C (Jelen, 2005). Na ovaj način voda iz čestica materijala skoro trenutno isparava i prelazi u vazduh. U narednoj fazi se osušeni materijal u prahu uklanja iz vazdušne struje trakastim transporterom u prihvatni sud. Iskorišćeni vazduh iznosi se preko ciklona i vrećastog filtera, čime se uklanjaju fine

čestice koje su zaostale u vadašnoj struji i prebacuju na trakasti transporter (Sovilj, 2004).

Kretanje materijala u odnosu na vazduh može biti u istom ili suprotnom smeru. Istosmerni tok vlažnog materijala i vazduha je zastupljeniji, jer omogućava rad na višim temperaturama, bez pregrevanja materijala. S druge strane, pri protivsmernom toku, tokom sušenja omogućeno je duže zadržavanje čestica materijala u uređaju, zbog toga što u ovom slučaju vazduh ima veću brzinu kroz komoru za sušenje nego što je brzina taloženja čestica. To omogućava dobijanje osušenog materijala sa relativno velikim gustinama (Sovilj, 2004).

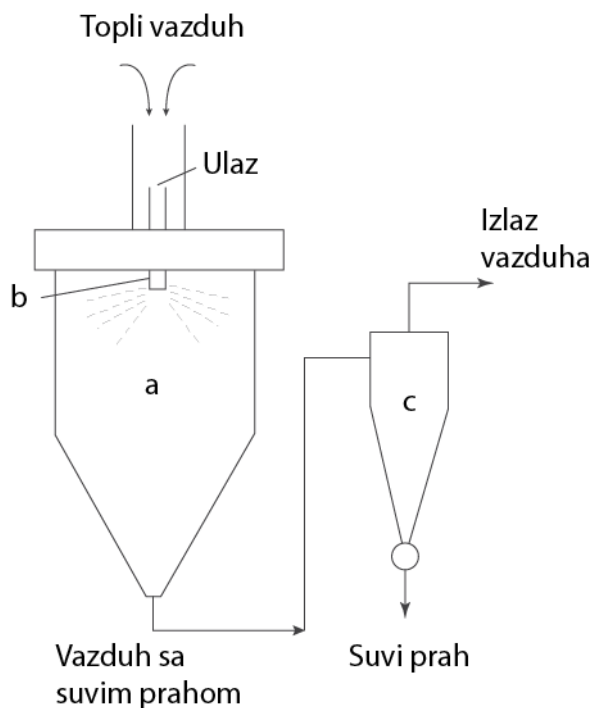
Mogu se razlikovati tri konsektivna koraka: (1) atomizacija unetog materijala, (2) sušenje vazduhom i (3) odvajanje osušenog proizvoda od izlaznog vazduha.

Atomizacija je najkritičnija operacija u procesu sušenja raspršivanjem. Najčešće se koriste atomizeri sa rotacionim točkom i mlazni atomizeri. Pneumatski dvo-fluidni (potisnuti vazduh/tečna hrana) mlazevi se retko koriste, i to za specijalne namene (emulzije, pastozni materijali itd.). Protok u smeru strujanja, suprotno od smera strujanja ili kombinovani protok kapi i vazduha za sušenje je tipičan u komorama za sušenje raspršivanjem.

Geometrija komora za sušenje uglavnom zavisi od tipa atomizera koji se koristi. Atomizeri sa rotacionim točkom su obično kratki i široki (kupasti tip), a mlazni su dugački i uzani (visoki tip). Osušeni proizvod skuplja se na dnu komore za sušenje u vrećastim filterima ili elektrostatičnim taložnicima.

Za sakupljanje praha najčešće se koriste ciklon, vrećasti filter i sistem za aglomeraciju. Oprema za sakupljanje najfinijih čestica iz izduvnog vazduha može predstavljati izvor mikrobiološke kontaminacije, pa je nepogodna za moderne operacije sušenja hrane.

Tipična jedinica za sušenje raspršivanjem (slika 14) sastoji se od tri glavna dela: komore za sušenje (a), mehanizma za disperziju (atomizaciju) tečnosti (b) i sistema za skupljanje praha osušenog materijala (c). Izbor metoda atomizacije utiče na osnovnu konstrukciju komore za sušenje. Najšire rasprostranjeni sistemi za atomizaciju su tipa raspršivanja pod pritiskom i tipa centrifugalnog tanjira. Mada je centrifugalna atomizacija mnogo složenija i skuplja od atomizacije raspršivanjem, atomizirajući tanjir ima veću upotrebljivost, jer može da se primeni i kod viskoznih i partikulisanih tečnih sistema.



Slika 14. Šema sušare za sušenje raspršivanjem (Jelen, 2005)

Napredak dizajna uređaja za sušenje raspršivanjem ogleda se u:

- primeni višefaznog sušenja, kod kojeg primarnu fazu sušenja raspršivanjem sledi sekundarna faza sušenja prikupljenog praha na traci;
- uvođenju razmenjivača toplote u cilju rekuperacije toplote iz vazduha koji izlazi;
- povećanju kompaktnosti uređaja koji kombinuje komore za sušenje i prikupljanje praha.

**Primena.** Korišćenjem tehnike sušenja raspršivanjem dobijaju se sokovi ili koncentрати u prahu. Na ovaj način dobijeni suvi praškovi mogu se direktno koristiti kao važan sastojak supa u prahu, mešavina začina ili aditiva.

Primena ove tehnike sušenja na paste od voća ili povrća nameće nekoliko problema. Na primer, moraju se rešiti problemi lepljivosti, stvrdnjavanja i higroskopnosti finalnih proizvoda. Sušenje pulpe paradajza je tipičan primer komplikovanog procesa, pošto osušeni prah paradajza teži da postane mekan i lepljiv, dok je još uvek topao. U ovom slučaju emulzija se raspršuje u vazdušnu struju temperature od 138-150 °C, a na kraju sušenja se uvodi hladan suvi vazduh u izduvni kraj sušare ili se zidovi sušare hlade do temperature od 38-50 °C (Grabowski, 2005). Ovaj tip sušare je relativno skup.

### 6. Pneumatske sušare

Pneumatske sušare pretežno se koriste za finalno sušenje voća i povrća, odnosno materijala koji ne pokazuju sklonost ka slepljivanju. Rastresiti materijal suši se u toku transporta vazdušnom strujom. Brzina toplog vazduha prevazilazi brzinu taloženja

čestica, a proces sušenja traje nekoliko sekundi. Materijal se obično prethodno osuši drugim postupkom (raspršivanjem, fluidizacijom itd.) da bi se snizio nivo vlažnosti ispod 40% (vodeni balast) (Grabowski, 2005).

Primena pneumatskih sušara je relativno ograničena, bez obzira na jednostavnu konstrukciju i njenu kompaktnost. Potrošnja energije u pneumatskim sušarama je relativno velika (Sovilj, 2004).

### **Sušenje na valjcima**

Sušara sa valjcima je primer sušare u kojoj se toplota neophodna za isparavanje vode materijalu predaje direktnim kontaktom sa grejnom površinom. Tečni proizvod se u tankom sloju nanosi na površinu valjka koji rotira. Valjci se sa unutrašnje strane greju vodenom parom. Na kraju procesa, osušeni proizvod se skida (ostruže) specijalnim noževima u vidu pahuljica ili praha, a vlažan vazduh se uklanja iz sušare ventilatorima.

Postoje tipovi uređaja sa jednim valjkom ili sa dva valjka koji rotiraju jedan prema drugom. Sistem bubnjeva se u potpunosti može zatvoriti u kabinu radi postizanja vakuumskog sistema rada ili radi korišćenja vazduha za sušenje.

**Primena.** Sušenje na valjcima je tradicionalan način sušenja obranog mleka. U tehnologiji voća i povrća najviše se koriste za sušenje krompir pirea, pri čemu se dobijaju pahuljice. Tipičan primer operacije sušenja na jednom bubnju je sušenje kašastog paradajza. Sušare sa dva bubnja koriste se za sušenje paradajza i pirea od bundeve ili krompira itd.

Sušare sa valjcima se ubrajaju među kontaktne sušare, zajedno sa vakuumskim sušarama. Ove sušare su složenije konstrukcije u odnosu na atmosfere i primenjuju se za sušenje osetljivih materijala (Sovilj, 2004).

**Prednosti i nedostaci.** Sušenje na valjcima je potpuno kontinualan proces, na srazmerno jednostavnom i jeftinom uređaju. Vreme sušenja ovom tehnikom je veoma kratko i kreće se oko jednog minuta. Na primer, sadržaj vode kivanog pirea od krompira smanjuje se sa 80% na samo 5% u roku od 20 sekundi. Nedostatak ove metode sušenja predstavlja kontakt materijala sa površinom valjka vrlo visoke temperature. Visoka temperatura umanjuje senzorne osobine i rastvorljivost proizvoda, čime se umanjuje i ukupni kvalitet proizvoda.

### **Sušenje u peni**

U proizvodnji praškova od voća i povrća često se primenjuje metoda sušenja u peni. Metoda u osnovi predstavlja kovektivno sušenje na normalnom atmosferskom pritisku. Tečnost koja se suši prevodi se u penasto stanje odgovarajućim aditivima, a zatim se

stabilna pena nanosi u tankom sloju na površinu za sušenje. Osušeni proizvod se nakon hlađenja skida sa ove površine i sakuplja u vidu pahuljica.

Od praktične važnosti su dve metode sušenja penom: sušenje pokrivanjem penom i raspršivanjem pene. Stabilna gasno-tečna pena je primaran uslov za uspešno sušenje penom. Glicerol monostearat i propilen glikol monostearat su tipični aditivi za smešu pene za sušenje sokova ili pulpi. Sušenje pokrivanjem penom obuhvata tanak sloj (0,1-0,5 mm) stabilne pene na vazduhu temperature 65-70 °C (Grabowski, 2005). Proces sušenja traje samo nekoliko minuta. Za ovaj proces mogu se koristiti i sušare sa beskrajnom pokretnom trakom, kao i blago modifikovana sušara sa raspršivanjem.

**Primena.** Sušenje u peni je pogodno za sušenje proizvoda sa manjom higroskopnošću i termoplastičnošću. Korišćenjem ove tehnike može se proizvesti kvalitetan paradajz u prahu.

**Prednosti i nedostaci.** Među prednosti postupka spadaju srazmerno mali investicioni troškovi, instantnost proizvoda, kao i očuvanost senzornih svojstava. Povrće i voće u prahu osušeno pokrivanjem penom ima manje promene boje i ukusa izazvane toplotom u poređenju sa proizvodima osušanim konvencionalnim postupcima sušenja. Dobija se proizvod čija je gustina manja nego kod konvencionalnih sušara. Gustina proizvoda je skoro jednaka gustini instant praška ili aglomerat praška.

Osnovna mana ovog načina sušenja je upotreba aditiva. Sve probirljivije tržište zahteva proizvode sa što manje veštačkih primesa, pa upotreba aditiva umanjuje vrednost proizvoda. Upotreba aditiva je strogo kontrolisana i ograničena.

### **Sušenje zračenjem i akustično sušenje**

Sušenje mikrotalasima postaje sve popularnije u tehnologiji sušenja. Ipak, ova metoda još uvek nije dovoljno istražena da bi se primenila u obimnijoj proizvodnji. Primeri primene su sušenje pomfrita, graška, luka, pasulja i koncentrata soka od povrća.

Sušenje infracrvenim talasima se koristi za sušenje hrane u tankom sloju, posebno začina. Uglavnom se koristi u kombinaciji sa drugim metodama sušenja, na primer kod vakuumske sušenja ili kod sušenja smrzanjem, gde se kombinuje sa kontaktnim prenosom toplote.

Akustično sušenje talasima 13-19 kHz i intenziteta između 128 i 132 dB se primenjuje za sušenje pirinča u fluidizacionom sloju temperature između 20 i 40 °C (Grabowski, 2005). Uspešno je primenjena kombinacija solarne i akustične energije za sušenje različitih poljoprivrednih proizvoda.

## Osmotska dehidracija

Primer metode minimalne prerade voća i povrća je osmotska dehidracija. Proces se zasniva na tendenciji da se postigne ravnoteža između osmotskog pritiska unutar biljnih ćelija i osmotskog pritiska rastvora koji ih okružuje, a koji ima povišen osmotski pritisak usled visoke koncentracije rastvorljivog osmotskog agensa. U ovim uslovima dolazi do molekularne difuzije vode kroz polupropustljivu ćelijsku membranu i biljna ćelija gubi vodu, odnosno suši se. Proces osmotske dehidracije se zaustavlja kada osmotski pritisak unutar tkiva dostigne osmotski pritisak sirupa koji ga okružuje.

Osmotska dehidracija može omogućiti smanjenje aktivnosti vode do izvesne mere, što je uglavnom ograničeno aktivnošću vode samog osmotskog pritiska sirupa. Na primer, tipičan osmotski sirup, kao što je rastvor šećera od 60 °Brix, ima aktivnost vode oko 0,85. Ovo znači da bi hrana osmotski dehidratirana u gore navedenom rastvoru bila uravnotežena na aktivnosti vode od 0,85 i time sa mikrobiološke tačke gledišta nije potpuno sigurna, te je često neophodna i druga faza sušenja.

Ova druga faza najčešće predstavlja sušenje toplim vazduhom, a može biti i bilo koji drugi tip sušenja kao što su solarno, vakuumsko ili mikrotalasno sušenje. Razvijeno je nekoliko dvofaznih procesa sušenja voća i povrća, sa osmotskom dehidracijom u prvoj fazi. Na primer, dobijeni su osušena mrkva i krompir visokog kvaliteta, dok dehidrisani celer nije dao zadovoljavajuće rezultate (Jayaraman, 2006).

Tipična oprema za osmotsku dehidraciju sastoji se od mešalice za sirup sa elementima za zagrevanje, kako bi se održala temperatura oko 50 °C. Moguće su i više ili niže temperature, u zavisnosti od proizvoda.

Takođe je razvijena jedinica za kontinualnu osmotsku dehidraciju (Grabowski, 2005). Na slici 15 prikazano je pilot postrojenje za osmotsku dehidraciju voća, razvijeno na Poljoprivrednom fakultetu u Novom Sadu.



Slika 15. Postrojenje za osmotsku dehidraciju (Babić, 2007)



## ***Faktori kvaliteta osušenog voća***

Osnovni faktori kvaliteta sušenog voća su oblik, boja, tekstura, aktivnost vode i sposobnost rehidracije. Sušenjem se smanjuje sadržaj vode u namirnici i postiže mikrobiološka stabilnost. Proces sušenja mora se voditi tako da sušeni proizvodi zadrže senzorna svojstva polaznih sirovina.

### **Oblik i veličina**

Sušeno voće i povrće treba da poseduje atraktivan i ujednačen oblik, ujednačene dimenzije, i to kako u osušenom stanju, tako i nakon rehidracije. Izbor oblika komada zavisi od predviđene namene. Zahtevi se razlikuju u proizvodnji raznih mešavina za supe, salate, umake ili za začinske smeše. Mrkva se, na primer, može sušiti u obliku kolutova ili kockica raznih veličina.

Kod proizvoda sa krupnijim komadima definišu se zahtevi za minimalni prečnik, dozvoljeni procenat prisutnih polutki i delova manjih dimenzija u odnosu na masu ili broj komada, na primer kod kolutova jabuke. Pravilnikom o kvalitetu proizvoda od voća, povrća i pečurki i pektinskih preparata (Sl. list SFRJ, 1/79) se, na primer, definiše broj plodova suve šljive u 0,5 kg proizvoda.

Dimenzije sušenog voća i povrća propisuju se na osnovu klasiranja pomoću sita sa standardizovanim otvorima. U propisima su utvrđene gornje ili donje granice zadržanih ili propuštenih količina, izraženih u procentima mase. Ovi podaci se ponekad dopunjuju zahtevima u pogledu dužine, širine i debljine komada (Marković, 2009).

Zapremina predstavlja treću karakteristiku koju treba odrediti kod upotrebe osušenih proizvoda. Sušeni proizvodi istih oblika i dimenzija mogu da imaju različite zapremine, što zavisi od vrste sirovine, sadržaja suve materije, primenjenog postupka sušenja ili uslova prerade. Ovo je od posebnog značaja, na primer u proizvodnji supa, čije su operacije transporta komponenti, odmeravanja, mešanja, punjenja i pakovanja potpuno automatizovane i ne trpe gruba odstupanja.

### **Boja**

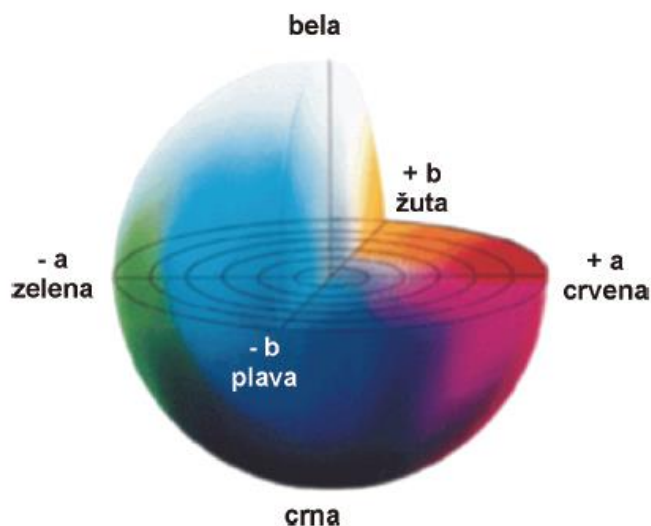
Boja je jedan od najvažnijih pokazatelja kvaliteta sušenog voća i povrća. Utiče na prihvatljivost proizvoda od strane potrošača i time na komercijalnu vrednost proizvoda (Nieto-Sandoval i sar., 1999). Kod nekih proizvoda njen značaj prevazilazi i značaj ukusa. Uopšteno se može reći da se od sušenog proizvoda traži specifična, intenzivna i ujednačena boja. Bleda boja, boja bez sjaja, ili promenjena boja zbog propusta u proizvodnji predstavljaju ozbiljne mane kvaliteta. Kod belih proizvoda ti nedostaci su

žuta, cigla-crvena, crna i siva boja; kod crvenih proizvoda mane su žuta, smeđa, terakota boja; kod zelenih proizvoda nepoželjne boje su žuta, zelena i slične nijanse.

Boja osušenih proizvoda može se analizirati senzorno ili instrumentalno. Senzorno ispitivanje zahteva veliko iskustvo ocenjivača. Opažaj boje se razlikuje u zavisnosti od osetljivosti oka posmatrača, od veličine posmatranog predmeta, izvora svetlosti, od pozadine i kontrasta i od ugla pod kojim se predmet posmatra. Pored ovoga, verbalno opisivanje boje može biti teško i zbunjujuće, pošto dve osobe mogu opisati istu boju različitim terminima.

Instrumentalnim metodama se određuju konkretni pokazatelji za objektivno ocenjivanje boje. Ove metode se zasnivaju na određivanju bojenih materija koje se mogu ekstrahovati ili definisanju boje pomoću sistema numeracije boje. Numeričko opisivanje boje olakšava razumevanje i standardizaciju boje. U primeni je veći broj sistema definisanja boje: CIE Lab, Oswald-ov, Munsell-ov, Hunter-ov itd. Među navedenim najpoznatiji je i u najširoj primeni CIE Lab sistem.

**CIE Lab sistem.** CIE komisija (International Commission on Illumination) definisala je tristimulusni sistem numeracije boje i na osnovu njega razvila XYZ obojeni prostor. Sistem je zasnovan na trodimenzionalnom, sferičnom, obojenom prostoru sa tri koordinate ( $L^*$   $a^*$   $b^*$ ) (slika 16). Tristimulusne vrednosti XYZ zasnovane su na teoriji da oko poseduje receptore za tri osnovne boje (crvenu, zelenu i plavu) i da se sve ostale boje opažaju kao mešavina ovih osnovnih boja (Tepić, 2005).



Slika 16. CIE Lab obojeni prostor

Elementi opažene boje su svetloća, „hue angle“ i „chroma“ i oni se određuju iz  $L^*$   $a^*$   $b^*$  koordinata.  $L$  koordinata je merilo svetloće boje i smeštena je na centralnoj (vertikalnoj) osi u CIE Lab obojenom prostoru. Ova osa je ahromatična i ima opseg od crne (0) na dnu do bele (100) na vrhu.  $a$  i  $b$  su koordinate hromatičnosti i pokazuju

pravac i udaljenost od centra obojene sfere. Koordinata  $a$  označava crvenu boju kada je pozitivna, a zelenu kada je negativna,  $b$  označava žutu kada je pozitivna i plavu kada je negativna. „Hue angle“ ( $h^\circ$ ) i „chroma“ ( $c$ ) se mogu odrediti iz koordinata  $a$  i  $b$ . „Hue angle“ utvrđuje nijansu boje (crvena, žuta, plava, zelena itd.) i izračunava se kao:

$$\text{hue angle } (h^\circ) = \arctg \frac{b^*}{a^*} \quad (11)$$

U bilo kom horizontalnom preseku obojene sfere svi „hue angle“-ovi su predstavljeni u kružnici ( $360^\circ$ ) (krug boja). Uzorak sa „hue angle“-om od  $0^\circ$  je purpurno-crven,  $90^\circ$  - žut,  $180^\circ$  - plavkastozelen i  $270^\circ$  - plav.

„Chroma“ je merilo zasićenosti boje, odnosno čistoće. Uzorak sa većom „chroma“-om je življi, slikovitiji, jasniji od uzorka sa manjom „chroma“-om, iako oba uzorka mogu imati isti „hue angle“. Boje locirane blizu centralne ose obojenog prostora imaju male (niske) „chroma“-e, što znači mutne ahromatične boje, sa dosta sive. Boje locirane blizu periferije obojenog prostora su življe. „Chroma“ ( $c$ ) se izračunava kao:

$$c = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (12)$$

**Ukupna promena boje.** Prema Mascan-u (2001), ukupna razlika u boji,  $\Delta E$ , koja predstavlja kombinaciju parametara  $L$ -,  $a$ - i  $b$ - vrednosti, je kolorimetrijski parametar intenzivno korišćen za karakterizaciju varijacije boja u hrani tokom obrade. Pretpostavlja se da razlika boja uzoraka manja od 1,0 nije senzorno uočljiva (Filimon, 2011).

**Očuvanje boje.** Da bi se očuvala boja osušenih proizvoda, posebnu pažnju treba obratiti na korake procesa koji imaju uticaj na promene boje. U prvom redu treba obratiti pažnju na uticaj čuvanja sirovine pre početka prerade, na vreme zadržavanja očišćene sirovine, zatim na uticaj hemijske obrade, blanširanja, hlađenja, sušenja i uslova uskladištenja gotovog proizvoda.

Merenjem boje omogućava se utvrđivanje najpovoljnijeg momenta za berbu, kinetike degradacije boje tokom termičke prerade, kao i uticaja ostalih parametara procesa na promenu boje.

Krokida i sar. (1998) su ispitali efekat uslova sušenja na promenu boje kod banane i ostalog voća tokom konvencionalnog i vakuumskog sušenja. Analizirana je boja tokom vakuumskog i konvencionalnog sušenja na 50, 70 i 90 °C i vlažnosti vazduha 15, 30 i 40%. Temperatura vazduha je uticala na promenu boje, ali ne i na svetloću. Utvrđeno je

i da se brzina promene boje povećava sa povećanjem temperature, a sa smanjenjem vlažnosti materijala smanjuje se i brzina promene boje kod obe metode sušenja.

Promena boje osušenih proizvoda može se znatno usporiti korišćenjem prirodnih (tokoferoli, tokotrienoli, askorbinska kiselina, askorbil palmitat, fenolna jedinjenja, ružmarin ekstrakt) ili sintetičkih (etoksikvin, galati, BHT-butilhidroksitoluen, BHA-butilhidroksianizol i TBHQ-*terc*-butilhidrokinon) antioksidanata (Tepić, 2005).

## **Tekstura**

Tekstura je značajna karakteristika kvaliteta voća i povrća. Pri definisanju pojma, tekstura se najčešće povezuje sa svojstvima hrane i osećajima koji nastaju tokom njenog konzumiranja. Termin se prvobitno koristio za opisivanje vizuelnih karakteristika materijala i karakteristika materijala sa kojima se čovek upoznaje dodirrom. Opažanje teksture obuhvata ocenjivanje hrane u ustima i uključuje rad kože, mišića i vezivnih tkiva, u i oko lica.

Rehidratirani osušeni proizvodi imaju manju elastičnost od polaznih sirovina, što je posledica strukturalnih oštećenja sirovine do kojih dolazi delovanjem visokih temperatura.

**Merenje teksture.** *Merenje senzorne teksture.* Senzorno ispitivanje najčešće izvodi trenirana grupa stručnjaka. Na ovaj način se obezbeđuje objektivno ispitivanje senzornih osobina proizvoda. Teksturalne karakteristike mogu se podeliti u tri grupe:

- mehaničke (tvrdoća, kohezivnost, viskoznost, elastičnost i adhezivnost, krtost, lakoća žvakanja i lepljivost),
- geometrijske (one koje se odnose na veličinu i oblik, i one koje se odnose na oblik i orijentaciju),
- karakteristike sastava (sadržaj vode i masti).

*Merenje mehaničke teksture.* Razvoj instrumentalnih metoda je nastao iz želje da se što objektivnije proceni tekstura hrane i da se tekstura poveže sa sastavom hrane. Cilj je povezati mehanička svojstva sa sastavom i strukturom hrane.

**Akustična emisija i hrskavost.** Hrskavost je naročito značajna karakteristika kvaliteta voća i povrća. Hrskavost i zvuk su usko povezani. Zvuk i njegova jačina koji se javljaju pri konzumiranju hrane direktno utiču na opaženu hrskavost.

Hrskavi proizvodi su okarakterisani iznenadnim, čistim i potpunim prelomima, uz brzo širenje preloma kod suve hrskave hrane, čime se omogućava nastanak zvuka. Prema definiciji, hrskavost je ostvarena iznenadnim padom u opterećenju do kojeg dolazi u sensorima mišića i zubima kada se hrskavi proizvod prelomi u ustima. Kao

rezultat toga, jedan od načina za ocenjivanje senzornih osobina kao što je hrskavost jeste merenje zvukova koji nastaju tokom kompresije hrane.

**Poređenje instrumentalnog i senzornog merenja teksture.** Teksturu je veoma teško opisati ili meriti. Veliki broj skorašnjih istraživanja pokazao je da se kod voća i povrća senzorna merenja još ne mogu zameniti instrumentalnim pristupom (Harker i sar., 2002). Bez obzira na to, napredak u rukovanju i interpretaciji instrumentalno dobijenih podataka obezbediće dalje mogućnosti za istraživanje povezanosti fizičkih merenja i senzornih opažaja (De Belie i sar., 2002).

### Aktivnost vode

Mikroorganizmi su glavni uzročnici kvara hrane. Njihov rast i razvoj u potpunosti zavise od količine vode u tečnom stanju. Voda je osnovni rastvarač i neophodna je za sve reakcije u živom svetu, pa zbog toga udeo vode izrazito utiče na rast i razmnožavanje mikroorganizama. Mikrobiološka stabilnost osušene hrane postiže se uklanjanjem vode, usled čega se prekidaju vitalni procesi potrebni za rast mikroorganizama i njihovih spora.

Ključni parametar održivosti osušene hrane predstavlja aktivnost vode ( $a_w$ ). Voda u hrani može biti prisutna kao slobodna ili vezana. Aktivnost vode je pokazatelj one količine vode kojom mikroorganizam zaista raspolaže u reakcijama metabolizma. Definiše se kao odnos pritiska vodene pare ( $p$ ) iznad hrane i pritiska vodene pare čiste vode ( $p_0$ ) na istoj temperaturi:

$$a_w = \frac{p_w}{p_{w0}} \quad (13)$$

gde je  $p_w$  – pritisak vodene pare iznad namirnice, a  $p_{w0}$  - pritisak pare čiste vode na istoj temperaturi.

Svaki mikroorganizam ima optimalnu i minimalnu aktivnost vode potrebnu za njegov rast. Optimalna  $a_w$  vrednost za rast većine mikroorganizama je u opsegu od 0,99-0,98. Smanjenje  $a_w$  ispod optimuma odlaže klijanje spora i usporava rast mikroorganizama, a smanjenje  $a_w$  ispod minimuma, prikazanog u tabeli 1, potpuno inhibira rast mikroorganizama i klijanje spora.

Kvasci i plesni su otporniji od bakterija na snižene vrednosti  $a_w$  i u uslovima snižene aktivnosti vode mogu izazivati kvarenje. Većina bakterija koje izazivaju kvarenje ne rastu ispod  $a_w$  vrednosti 0,91, dok plesni rastu i pri vrednostima manjim od 0,80 (Škrinjar, 1996).

Tabela 1. Minimalne vrednosti aktivnosti vode potrebne za rast mikroorganizama (Vereš, 2004)

Grupa mikroorganizama	Primeri	Minimum $a_w$
Bakterije, virusi	<i>Salmonella, Bacillus, Pseudomonas, Escherichia, Lactobacillus, Vibrio</i>	0,91
Kvasci	<i>Candida, Torulopsis, Staphylococcus aureus</i>	0,80-0,88
Plesni	Mikotoksigeni penicilijum	0,80
Halofilne bakterije	<i>Clostridium botulinum, Staphylococcus</i>	0,75
Neke plesni	Mikotoksigeni aspergilus	0,75
Kserofilne plesni	<i>Aspergillus chevalieri, A. candidus, Wallemia sebi</i>	0,65
Osmofilni kvasci	<i>Saccharomyces rouxi</i>	0,60

Bakterije koje izazivaju kvarenje su inhibirane na  $a_w$  vrednosti oko 0,97; patogene klostridije na  $a_w$  0,94; većina bakterija iz roda *Bacillus* na  $a_w$  vrednosti 0,93. *Staphylococcus aureus* je najotporniji patogeni mikroorganizam, može rasti u aerobnim uslovima na  $a_w = 0,86$  i anaerobnim uslovima na  $a_w = 0,91$ . *Clostridium botulinum* ne raste ispod 0,94 (Škrinjar, 1996).

Veliki broj kvasaca i plesni mogu se razmnožavati na  $a_w$  ispod 0,86, dok neki osmofilni kvasci i kserofilne plesni imaju sposobnost rasta na  $a_w$  vrednosti nešto iznad 0,6. Da bi se namirnica zaštitila snižavanjem  $a_w$  vrednosti, ona bi se trebala sniziti do 0,6.

Aktivnost vode svežeg povrća se kreće u opsegu od 0,97-0,99. Osušeno povrće sa sadržajem vode od 14-24% ima aktivnost vode između 0,7 i 0,77 (Stančić, 1982). Patogeni hrane su inhibirani pri aktivnosti vode ispod 0,9 tako da se osušena hrana može smatrati sredinom u kojoj je razvoj patogena inhibiran.

Smanjenje aktivnosti vode nije dovoljno da spreči rast svih mikroorganizama. Uticaj aktivnosti vode na rast mikroorganizama je uslovljen mnogim faktorima, kao što su temperatura, pH sredine, dostupnost hranljivih materija, prisustvo inhibitornih supstanci, dostupnost kiseonika itd. Što su uslovi sredine pogodniji, mikroorganizmi mogu rasti na nižim  $a_w$  vrednostima.

Pri istom sadržaju vode u hrani, aktivnost vode može biti različita, zavisno od sastava hrane. Relativno male promene hemijskog sastava (hidroliza saharoze, skroba i dr.) u velikoj meri utiču na aktivnost vode. Zbog ovoga, iako postoji korelacija, sadržaj vode (suve materije) ne daje tačan podatak o aktivnosti vode. Iako je merenje aktivnosti vode jednostavno uz korišćenje nekoliko tipova komercijalno dostupnih uređaja, sadržaj suve materije i dalje je najpraktičniji kriterijum održivosti proizvoda u tehnologiji sušenja hrane.

Proizvod se može smatrati biološki stabilnim pri  $a_w$  vrednosti 0,6. Što je aktivnost vode u proizvodu viša, veća je potreba za dodatnim načinima konzervisanja: korišćenje toplote, hemijskih konzervanasa, inertnog gasa, posebnih uslova skladištenja i dr. (Vereš, 1991).

### **Rehidracija**

Sposobnost naknadnog primanja vode osušenih proizvoda, tj. rehidracija, je jedna od važnih karakteristika ovih proizvoda. Što je proizvod kvalitetnije osušen, moći će pri rehidraciji da primi veću količinu vode. Na primer, poželjno je da se vrednost za normalno bubrenje raznih vrsta osušenog kupusa i kelja kreće oko 70%, za boraniju, mrkvu i luk oko 50%, a za grašak oko 20% (Vračar, 2001).

Pored količine vode koju osušeni proizvod može da primi, važna karakteristika ovih proizvoda je i vreme rehidracije. Smatra se da je za prvoklasan proizvod potrebno najviše 30 minuta, a za nešto manje kvalitetan najviše 60 minuta (Vračar, 2001). Duže vreme kuvanja ukazuje na slab kvalitet, koji se javlja kao posledica neispravnog sušenja.

Vreme rehidracije ima veliki praktičan značaj. Što je rehidracija brža, potrebno je manje vremena za pripremu osušenih proizvoda za neposrednu potrošnju. Prema tome, za potrošača je praktični pokazatelj sposobnosti prijema vode ono povećanje mase koju proizvod postiže prema propisanim uputstvima proizvođača. Pri rehidraciji, i konzistencija proizvoda treba da poprimi stanje normalno za potrošnju, tj. proizvodi ne smeju biti ni previše tvrdi, a ni raskuvani.

Intenzitet i vreme rehidracije zavise od svojstava i uslova čuvanja sirovine, upravljanja procesom sušenja (sprečavanja stvaranja kore) i tehnike sušenja. Candelaria i Raymundo (1994) su uporedili uticaj sušenja vazduhom i u vakuumu na sposobnost rehidracije osušenog proizvoda. Utvrdili su da je sposobnost rehidracije i brzina rehidracije značajno veća kod proizvoda osušenih u vakuumu.

### **Greške u procesu sušenja**

Većina negativnih promena sirovina u toku procesa sušenja nastaju usled delovanja visokih temperatura. Najblaži stepen termičkog oštećenja je neznatna promena boje. Kod većih oštećenja pogoršava se ukus, sposobnost rehidracije, kao i nutritivna vrednost proizvoda, jer se razaraju vitamini, denaturišu proteini i druga biološki važna jedinjenja osetljiva na toplotu.

Karakterističan parametar za termičko oštećenje je tzv. kritična temperatura, iznad koje će proizvod biti termički oštećen. Ova kritična temperatura i kod istih vrsta

materijala zavisi od sadržaja vode. Od povrća, na toplotu je najosetljiviji crni luk, tj. kod njega je najniža kritična temperatura. Kolutovi crnog luka imaju kritičnu temperaturu od 65-70 °C pri 10-12% vode, 60-65 °C pri 8-10% vode i 55-60 °C pri 6-8% vode, s tim da je ona u završnoj fazi sušenja identična sa temperaturom materijala. Primenom sulfatacije, kritična temperatura se može povisiti za 5-10 °C (Stančić, 1982).

Pored temperature, važan parametar je i vreme delovanja povišene temperature. Na primer, kod sušenja raspršivanjem, vreme sušenja traje nekoliko sekundi pa proizvod praktično ostaje neoštećen iako je temperatura izlaznog vazduha oko 100 °C.

Za očuvanje kvaliteta osušenih proizvoda ključna je odgovarajuća kontrola i upravljanje procesom sušenja. Sledeći poremećaji kvaliteta su zajednički za mnoge sušene proizvode.

**Smežuranost.** Pošto se voda uklanja tokom procesa sušenja, mnogi proizvodi se smanjuju zbog elastične prirode tkiva i razlike pritiska između spoljne sredine i praznina koje nastaju uklanjanjem vode. Promene dimenzija i oblika najvećim delom su ireverzibilne. Na promene oblika bitno utiče i brzina sušenja. Materijal sušen većom brzinom poseduje manju zapreminsku masu od sporo sušenog. Prednost veće zapreminske mase sporo osušenih proizvoda potisnuta je, međutim, slabijom bojom i smanjenom sposobnošću rehidratacije.

**Potamnivanje.** Mnoge sirovine sadrže proteine i šećere, koji su glavni učesnici Maillard-ovih reakcija potamnivanja. Promena boje može biti posledica i enzimskih reakcija oksidativnog tipa, kao i karamelizacije, koja prati termičku razgradnju šećera. Promene boje usled prisustva teških metala (prvenstveno gvožđa) dešavaju se uglavnom za vreme pripreme sirovina za sušenje. Brzina ovih promena zavisi od sadržaja vode i temperature materijala (Tepić, 2012).

Zagorevanje proizvoda posledica je lošeg upravljanja procesom, odnosno dovođenja materijalu više toplote nego što se isparavanjem vode iz njega može izdvojiti. Reakcije potamnivanja u praksi se uglavnom sprečavaju sumporisanjem. U tu svrhu, sirovina se pre sušenja tretira gasovitim sumpor-dioksidom, rastvorom sumporaste kiseline, natrijum-bisulfita ili natrijum-sulfita (Linden, 1999). Potamnivanje se može sprečiti blanširanjem ili korišćenjem askorbinske ili limunske kiseline.

**Stvaranje kore.** Ovaj termin označava poremećaj koji nastaje usled formiranja čvrste kore na površini sušenog proizvoda. Kora je praktično nepropusna za vodenu paru i ometa dalje sušenje. Proizvod izgleda suv, iako i dalje sadrži značajne količine vode i podložan je kvarenju. Poremećaj je karakterističan za sušenje nekih sirovina i često je pojačan migracijom rastvorljivih komponenti na površinu proizvoda.



Za sušenje celih ili delova plodova voća, u praksi se u početnoj fazi koristi vazduh velike relativne vlažnosti i srazmerno niske temperature (npr. kod šljive, vazduh temperature 50-55 °C i relativne vlažnosti 60-65%). Ovim postupkom sprečava se stvaranje kore, a najlakše se može realizovati kod protivsmernih tunelskih sušara.

**Smanjenje sposobnosti rehidracije.** Opadanje sposobnosti rehidracije (moći bubrenja) je posledica skupljanja materijala, oštećenja izazvanih toplotom i formiranja kore. Najosetljivija jedinjenja su skrob, proteini i pektinske materije. Koloidalnu reverzibilnost kviri pre svega delimična ili potpuna koagulacija proteina, izazvana delovanjem toplote. Usled ovih promena materijala može doći do toga da je suvi proizvod teško rekonstituisati u njegovo originalno stanje. U slučaju tečnih sirovina (voćni sokovi), efekti lošeg sušenja se javljaju kao pojava formiranja taloga prilikom rekonstitucije, a kod čvrstih sirovina rehidracija može biti dodatno otežana i može zahtevati nekoliko sati.

**Gubitak isparljivih materija.** Sušenje je zasnovano na isparavanju vode, ali u toku procesa može doći do uklanjanja i drugih komponenata. Mnoge komponente koje utiču na aromu proizvoda su isparljive, a gubitak arome je jedan od najčešćih poremećaja kod svih osušenih proizvoda. Sastav isparljivih materija koje se gube zavisi od primenjenih temperatura sušenja i napona pare isparljivih komponenti. Važnu ulogu ima i rastvorljivost ovih jedinjenja u vodi, kao i njihova međusobna rastvorljivost.

Negativne promene mirisa i ukusa su težak problem koji često ometa širu prihvaćenost industrijski osušenih proizvoda.

Mnoge alternativne tehnike sušenja vazduhom su razvijene kako bi se neki od ovih poremećaja otklonili. Pored toga, kao uspešne pokazale su se tehnike sušenja koje su zasnovane na mehanizmu toplotnog ili masenog fluksa, a ne na upotrebi vrelog vazduha. Savremeni postupci sušenja (proizvodnja praha ili pahuljica voća) primenjuju rekuperaciju arome, koja se zatim može vratiti proizvodu. Međutim, postupak znatno poskupljuje proizvodnju.

### ***Optimizacija procesa***

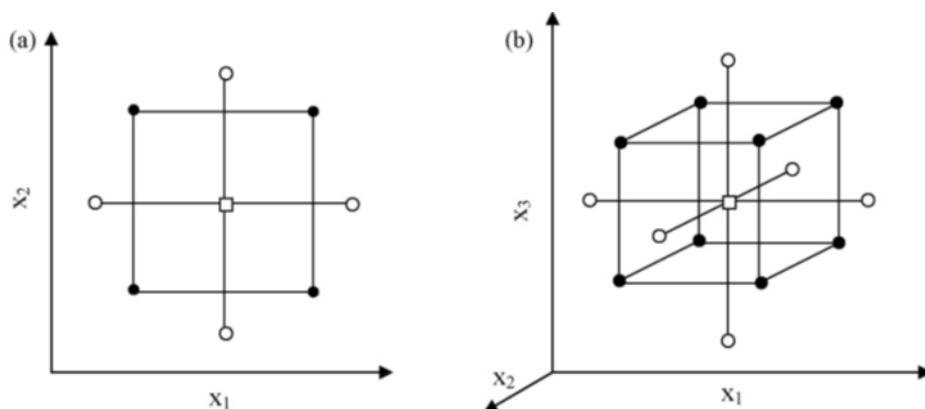
Optimizacija uopšteno podrazumeva poboljšanje svojstava nekog sistema ili procesa, uz postizanje maksimalnog prinosa uz što manje uložene resurse. Optimizacija procesa sušenja voća u vakuumu podrazumeva pronalaženje vrednosti nezavisnih veličina za odzive koji opisuju karakteristike kvaliteta proizvoda (Madamba, 2002). Neke od promenljivih veličina je potrebno uvećati, dok je neke potrebno umanjiti. U mnogim slučajevima, poboljšanje jednog odziva može imati suprotan efekat na drugi, što se rešava korišćenjem nekoliko pristupa optimizaciji procesa. Jedan pristup koristi

proceduru ograničene optimizacije, drugi je nadgradnja konture dijagrama različitih veličina odziva (Madamba, 2002), a treći rešavanje problema višestrukih odziva korišćenjem funkcija poželjnosti, kombinovanjem svih odziva u jedno merenje (Baš i Boyacı, 2007; Chakraborty i sar., 2011; Diamante i Yamaguchi, 2012; Erbay i Icier, 2009; Eren i Kaymak-Ertekin, 2007).

Optimizacija procesa zasniva se na odabiru optimalnih vrednosti nezavisno promenljivih veličina sa ciljem postizanja željenog izlaza, odnosno odziva procesa. Najčešće postoji veliki broj mogućih kombinacija vrednosti nezavisno promenljivih veličina procesa, pa je za optimizaciju procesa neophodno primeniti neku od multivarijabilnih statističkih tehnika.

**Metoda odzivnih površina** (Response Surface Methodology, RSM), koju su prvi opisali Box i Wilson (1951) predstavlja zbir matematičkih i statističkih tehnika koje su korišćene u većini studija koje obuhvataju optimizaciju (Madamba, 2002) i korisna je za modelovanje i analizu problema u kojoj je ispitivani odziv pod uticajem nekoliko promenljivih veličina (Montgomery, 1991).

Ovom metodom moguće je optimizovati proces izvođenjem neuporedivo manjeg broja eksperimenata u odnosu na klasičan pristup planiranju eksperimenta. Pažljivo urađen eksperimentalni plan omogućava dobijanje dovoljnog broja informacija, odnosno podataka o nezavisno promenljivim veličinama, potrebnih za optimizaciju odziva sistema koji zavise od tih promenljivih veličina (Montgomery, 2005). U primeni su različiti eksperimentalni planovi: centralni kompozitni plan (Central Composite Design, CCD), Box-Behnken dizajn (BBD), potpuni eksperimentalni plan, Graeco-Latinov dizajn i drugi (Francis i sar., 2003). Svi planovi zasnovani su na principu ekvivalentne distribucije ulaznih promenljivih veličina oko date nezavisne veličine. Na slici 17 prikazana je šema rasporeda ulaznih promenljivih veličina oko centralne tačke kod CCD plana eksperimenta.



Slika 17. Pozicija ulaznih podataka za centralno kompozitni faktorski plan (Bezerra i sar., 2008)

U procesu sušenja voća u vakuumu primena RSM omogućava ispitivanje uticaja temperature i pritiska (ulazne promenljive veličine) na kvalitet osušenog voća (odziv) i utvrđivanje matematičkih modela koji opisuju navedeni uticaj. Funkcija odziva procesa sušenja voća u vakuumu se, u opštem slučaju, opisuje matematičkim polinomom drugog reda (Mayers i Montgomery, 2002):

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j X_j + \sum_{j=1}^k \beta_{ij} X_j^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j \quad (14)$$

gde su:  $\beta_0$  nezavisni član jednačine,  $\beta_j$  linearni regresioni koeficijenti,  $\beta_{ij}$  kvadratni regresioni koeficijenti,  $\beta_{ij}$  interaktivni regresioni koeficijenti,  $X_i$  i  $X_j$  kodirane vrednosti nezavisno promenljivih veličina,  $Y$  odziv, odnosno zavisno promenljiva veličina. Grafički prikaz funkcije odziva predstavlja odzivnu površinu i može se prikazati u dve ili tri dimenzije (Baš i Boyaci, 2007).

Odzivi ( $Y$ ) u optimizaciji procesa sušenja voća u vakuumu mogu biti parametri kvaliteta osušenog voća. Optimizacijom se definiše zavisnost parametara kvaliteta osušenog voća od nezavisno promenljivih veličina procesa (temperature i pritiska). Pošto postoji više odziva, optimizacija podrazumeva pronalaženje vrednosti ulaznih promenljivih veličina za koje će svi posmatrani odzivi biti u definisanom opsegu (Oehlert, 2000).

U proizvodnji sušenog voća od izuzetne je važnosti da se postigne zadovoljavajuća vrednost aktivnosti vode, očuva boja i tekstura proizvoda. Dovoljno niska aktivnost vode obezbeđuje održivost proizvoda, a boja i tekstura imaju ključnu ulogu u definisanju kvaliteta proizvoda. Tokom procesa sušenja parametri kvaliteta proizvoda se menjaju kao rezultat delovanja povišene temperature i kiseonika itd.

Parametri koji karakterišu kvalitet osušenog voća, odnosno izlazne veličine procesa su: sadržaj suve materije,  $a_w$  vrednost, moć bubrenja, površinska boja, ukupni fenoli, ukupni monomerni antocijani, vitamin C, tekstura i antioksidativna aktivnost.

Pošto se radi o tehnici koja omogućava postizanje vrhunskog kvaliteta proizvoda, primena optimizacije procesa je od izuzetne važnosti. Ona podrazumeva pronalaženje kombinacije parametara kojima se postiže maksimalno očuvanje kvaliteta proizvoda i racionalizacija troškova proizvodnje. Sušenje voća u vakuumu može imati važnu ulogu i u industrijskim razmerama, pa razvoj tehnika optimizacije procesa time još više dobija na značaju.

## **EKSPERIMENTALNI DEO**

### ***UZORCI***

Polazne sirovine za ispitivanje bile su višnja sorte Erdi Botermo i divlja borovnica. Višnje su nabavljene od individualnog proizvođača iz Ljutova (Subotica) i gajene su u uslovima organske proizvodnje. Borovnica je nabavljena od firme ITN Beograd poreklom iz prirodnog staništa iz regiona Kopaonika.

Plodovi su brani ručno u stadijumu fiziološke zrelosti. Pre podvrgavanja procesu sušenja u vakuumu voće je oprano a potom smrznuto na -35 °C. Višnja je i ručno iskošćena. Smrznuti plodovi sušeni su u vakuumskoj sušari pri različitim uslovima temperature i pritiska. Sušenje je izvedeno na Tehnološkom fakultetu u Novom Sadu.

### ***REAGENSI***

Vitamin C bio je nabavljen od proizvođača J.T. Baker iz Holandije. 1,1-Difenil-2-pikril-hidrazil-hidrat (DPPH) i Folin-Ciocalteu reagens nabavljeni su u Sigma (Sigma-Aldrich GmbH, Sternheim, Germany). Hlorogenska kiselina bila je proizvođača Sigma (Sigma, St. Luis, MO, USA). Sve druge hemikalije i reagensi su bili analitičke čistoće.

## **PROJEKTNI ZADATAK IZRADE PROTOTIPA LABORATORIJSKE VAKUUMSKE SUŠARE**

Prototip vakuumske sušare korišćen za sušenje uzoraka je konstruisan prema projektnom zadatku formiranom na predmetu Tehnologija proizvoda od voća i povrća sa Tehnološkog fakulteta Univerziteta u Novom Sadu (tabela 2-4). Sušaru je prema projektnom zadatku konstruisala firma Kovačević inženjering DOO iz Banatskog Karlovca.

**Tabela 2. Projektni parametri sušare**

<b>R.br.</b>	<b>Naziv dela</b>	<b>Opis</b>
1.	Radna komora sa lesom	Projektovati radnu komoru sa lesama tako da može da prihvati 1 kg materijala sa masenim opterećenjem 5 kg/m <sup>2</sup> . Broj lesa 1.
2.	Vakuum pumpa	Instalirati vakuum pumpu koja može da ostvari vrednost apsolutnog pritiska 200 Pa (2 mbar). Maksimalna buka koju stvara pumpa 40 dB.
3.	Grejač	Instalirati električni grejač snage dovoljne da se materijal može zagrejati do 60 °C. Treba da se izbegne zagrevanje materijala zračenjem.
4.	Toplotna izolacija	Toplotno izolovati sve spoljašnje delove sušare.
5.	Zaptivanje	Obezbediti maksimalno zaptivanje svih delova sušare koji se nalaze u režimu vakuuma.
6.	Posuda za kondenzat	Obezbediti adekvatnu posudu za skupljanje kondenzata.
7.	Kondenzator	Snaga kondenzatora treba da onemogući prelazak kondenzata u pumpu.

**Tabela 3. Upravljački elementi sušare**

<b>R.br.</b>	<b>Naziv upravljano dela</b>	<b>Opis</b>
1.	Električni grejač	Obezbediti precizno upravljanje radne temperature i održavanje na zadatoj vrednosti sa greškom ±1 °C. Potrebno je omogućiti da se temperatura može menjati u toku procesa (programirano ako je moguće).
2.	Vakuum pumpa	Obezbediti automatsko održavanje zadate vrednosti radnog pritiska sa greškom ±5 mbar u opsegu od 2-1000 mbara.

Tabela 4. Akvizicione potrebe sušare

Merena veličina	Opseg merenja	Preciznost	Opis
Pritisak (apsolutni)	0-10 <sup>5</sup> Pa	100 Pa	Omogućiti beleženje i memorisanje vrednosti apsolutnog pritiska u zadatom i promenljivom vremenskom intervalu tokom trajanja procesa sušenja.
Temperatura	0-60 °C	0,1 °C	Omogućiti merenje i beleženje temperature u komori i temperature unutar same sirovine u zadatim i promenljivim vremenskim intervalima.
Masa	0-1 kg (neto sirovine)	0,1 g	Senzor za merenje mase ne sme da menja karakteristike u temperaturnom opsegu koji se koristi. Potrebno je omogućiti beleženje i memorisanje vrednosti promene mase u zadatom i promenljivom vremenskom intervalu tokom trajanja procesa sušenja.
Utrošena snaga	-	1 W	Potrebno je omogućiti beleženje i memorisanje vrednosti utroška energije u toku trajanja procesa sušenja.
Vreme	-	1 s	Program treba da beleži vreme (počev od nultog vremena pa nadalje, zavisno od zadatih vremenskih intervala beleženja parametara).

## USLOVI SUŠENJA

Pre sušenja plodovi borovnice i višnje su smrznuti. Smrznuti uzorci su ravnomerno raspoređeni na polici u tankom sloju. Za svaki ciklus sušenja odmerena je približno jednaka veličina uzorka (500 g višnje i 400 g borovnice). Sistem je beležio masu uzorka u intervalima od 10 minuta. Proces sušenja je prekidano po postizanju zadatog uslova da promena mase uzorka u toku pola sata nije veća od jednog grama. Sušenje borovnice je sprovedeno u intervalu radnog pritiska 38-400 mbar i temperature 36-64 °C, a višnje 17-583 mbar i 46-74 °C, u skladu sa eksperimentalnim planom datim u tabeli 5. Vreme sušenja variralo je, zavisno od uslova sušenja (temperature i pritiska), u intervalu između 5,5 i 29,1 h kod borovnice, a od 8,5 do 43,5 h kod višnje.

**Tabela 5.** Uslovi sušenja borovnice i višnje

Uzorak	Borovnica		Višnja	
	T (°C)	P (mbar)	T (°C)	P (mbar)
Uzorak 1	64	250	60	300
Uzorak 2	60	400	60	300
Uzorak 3	60	100	46	300
Uzorak 4	50	462	74	300
Uzorak 5	50	250	50	500
Uzorak 6	50	250	60	300
Uzorak 7	50	250	50	100
Uzorak 8	50	250	70	100
Uzorak 9	50	250	60	17
Uzorak 10	50	38	60	583
Uzorak 11	40	400	60	300
Uzorak 12	40	100	70	500
Uzorak 13	36	250	60	300

## ***METODE RADA***

U uzorcima osušene borovnice i višnje određeni su moć bubrenja, suva materija, površinska boja,  $a_w$  vrednost, sadržaj ukupnih monomernih antocijana i ukupnih fenolnih jedinjenja, vitamin C.  $a_w$  vrednost rađena je u dva ponavljanja; površinska boja merena je u pet ponavljanja; ostale analize rađene su u tri ponavljanja. Rezultati su obrađeni u programu Microsoft Excel 2010 i izraženi su kao srednja vrednost  $\pm$  standardna devijacija.

Proces je optimizovan korišćenjem metode odzivnih površina.

### **Suva materija**

Sadržaj suve materije određen je gravimetrijski, sušenjem uzoraka na temperaturi od  $105 \pm 0,5^\circ\text{C}$  do konstantne mase (Sl. list SFRJ 29/83).

### **Aktivnost vode**

Aktivnost vode ( $a_w$  vrednost) ispitivanih uzoraka određena je pomoću  $a_w$ -metra, model Testo 650, TESTO Nemačka. Uređaj se sastoji iz mernog instrumenta,  $a_w$  seta koji se sastoji iz sonde, merne ćelije i plastične merne posude. Kada se dostigne ravnotežna vlažnost, na displeju  $a_w$ -metra se očitava vrednost.

## Ukupni fenoli

Fenolna jedinjenja ekstrahovana su metodom po González-Gómez i sar. (2010), uz određene modifikacije. Osušeni uzorci su usitnjeni pre ekstrakcije. U erlenmajer od 50 ml preneto je 5 grama uzorka, preliveno sa 25 ml rastvora metanola kao ekstrakcionog sredstva i prekrivenom folijom. Uzorci su mešani na laboratorijskom šejkeru (UNIMAX 1010, Heidolph, Nemačka) 24 časa u mraku. Nakon 24 časa, kvantitativno su preneseni u odmerne tikvice 50 ml. Tikvice su dopunjene ekstrakcionim sredstvom do nominalne zapremine i sadržaj profiltriran kroz filter papir (plava traka). Ekstrakti su do momenta određivanja čuvani u zatvorenim bocama u frižideru. Sadržaj ukupnih fenola u ekstraktima određen je spektrofotometrijski, metodom po Folin-Ciocalteau (Kähkönen i sar., 1999; Singelton i Rosi, 1965), koristeći hlorogenu kiselinu kao standard. Sadržaj ukupnih fenola izražen je kao ekvivalent hlorogene kiseline (mg CAE/100 g SM osušenih uzoraka voća).

## Ukupni monomerni antocijani

Sadržaj ukupnih monomernih antocijana ispitivanih uzoraka određen je UV-VIS spektroskopijom (Giusti i Wrolstad, 2001). Metoda je zasnovana na pH-diferencijalnoj metodi koju su opisali Fuleki i Francis (1968). Apsorbancija ekstrakata izmerena je na 510 i 700 nm u 0,025M puferu kalijum-hlorida (pH 1,0) i 0,4M puferu natrijum acetata (pH 4,5). Sadržaj ukupnih monomernih antocijana izražen je u ekvivalentima cijanidin-3-glukozida (mg CGE/100 g SM osušenih uzoraka voća).

## Vitamin C

Vitamin C je u ispitivanim uzorcima određen visokopritisnom tečnom hromatografijom (HPLC).

Odmereno je 2,5 g voćne kaše i prebačeno u odmerni sud 25 ml, dodata je 3% *m*-fosforna kiselina u 8% sirćetnoj kiselini i masa mešana oko 5 minuta. Odmerni sud je dopunjen do nominalne zapremine i sadržaj profiltriran. U filtrate je dodat aktivni ugalj radi uklanjanja boje.

Sadržaj je profiltriran kroz filter papir i membranski filter prečnika pora 45 µm. Iz filtrata je određen vitamin C, HPLC-UV-DAD sistemom. Stacionarna faza je kolona C-8, a pokretna rastvor amonijum-acetata pH 5,1 koncentracije 0,1 mol/l i protoka 0,4 ml/min.

Sadržaj vitamina C određen je tako što je sa hromatograma očitana površina ispod pika, a zatim je proporcijom pomoću standard vitamina C izračunata njegova koncentracija u supstratima.



### Antioksidativna aktivnost (DPPH test)

Sposobnost "hvatanja" slobodnih radikala 80%-tnih metanolnih ekstrakata osušenih uzoraka određena je primenom jednostavne i brze spektrofotometrijske metode, koju su opisali Espin i sar. (2000). Pripremljen ekstrakt se izmeša sa metanolom (96%) i 90  $\mu$ l 2,2-difenil-1-pikril-hidrazil (DPPH) da bi se dobile konačne koncentracije od 2,0; 4,0 i 6,0 mg sušenog uzorka/ml. Nakon 60 minuta na sobnoj temperaturi izmerena je apsorbanacija na 517 nm. Kapacitet hvatanja slobodnih radikala (%RSC) je izračunat pomoću sledeće formule:

$$\%RSC = 100 - \frac{A_{uzorka} \cdot 100}{A_{stepe\ probe}} \quad (15)$$

Antioksidativna aktivnost je izražena preko  $IC_{50}$  vrednosti, koja predstavlja koncentraciju rastvora ekstrakta potrebnu za 50% antiradikalske aktivnosti. Dakle, viša  $IC_{50}$  vrednost odgovara nižoj antioksidativnoj aktivnosti.

### Površinska boja

CIE  $L^*a^*b^*$  koordinate površinske boje ispitivanih uzoraka izmerene su pomoću kolorimetra Konica Minolta CR-400 (Minolta Co., Ltd., Osaka, Japan). Površinska boja uzoraka izmerena je kao  $L$  (stepena svetloće),  $a$  (stepena prisustva crvene i zelene boje) i  $b$  (stepena prisustva žute i plave boje). Ukupna promena boje tokom sušenja okarakterisana je parametrom  $\Delta E$ , koji je određen pomoću sledeće formule:

$$\Delta E = \sqrt{[(L_0 - L)^2 + (a_0 - a)^2 + (b_0 - b)^2]} \quad (16)$$

gde su:  $L_0$ ,  $a_0$ ,  $b_0$  parametri boje belog standarda,  $L$ ,  $a$ ,  $b$  - parametri boje uzoraka.

Merena je boja svih pripremljenih uzoraka stavljanjem uzorka na mernu glavu kolorimetra. Za kalibraciju je korišćena standardna bela boja. Merenja su ponavljana pet puta.

### Tekstura

Tekstura uzoraka osušene višnje merena je na uređaju Texture Analyzer (TE32, Stable Micro Systems, UK) u laboratorijama Tehnološkog fakulteta Univerziteta u Novom Sadu. Merena je sila sečenja primenom nastavka Knife Blade. Podešavanja parametara na uređaju su bila sledeća: brzina testa - 2,0 mm/s; razdaljina - 30 mm, opterećenje - 250 kg.

Zbog velike razlike u dimenzijama uzoraka osušene borovnice i osušene višnje nije bilo izvodljivo merenje teksture obe vrste proizvoda na isti način. Tekstura uzoraka osušene borovnice merena je na uređaju Texture Analyzer (TA XT Plus, Stable Micro Systems, UK) u laboratorijama Høgskolen i Sør-Trøndelag University College. Tekstura je merena tako što je beležena polovina visine bobice borovnice, sila koju je potrebno primeniti da bi se bobica kompresovala do polovine prvobitne visine i čvrstoća bobice. Od svakog uzorka uzimano je po deset primeraka za ispitivanje slobodnim izborom. Za merenja je korišćen cilindričan nastavak -P20 Plexi.

### Sposobnost rehidracije

Sposobnost rehidracije određena je merenjem zapremine neupijene vode od strane osušenih uzoraka (Vračar, 2001). Sušene borovnice su usitnjene i potom je 2 g prebačeno u odmerni sud od 100 ml i preliveno sa 50 ml destilovane vode. Odmerni sud je prekriven aluminijumskom folijom i ostavljen na tamnom mestu 24 časa. Nakon 24 časa sadržaj je profiltriran i očitana je zapremina neupijene vode.

Sposobnost rehidracije ( $SR$ ) izračunava se na 10 grama uzorka:

$$SR = 5 \cdot [50 - (V + 1)] \quad (17)$$

gde je:  $V$ - zapremina neupijene vode;  $V+1$ - korekcija zbog gubitka.

### Statistička obrada podataka

Procena koeficijenta modela urađena je nelinearnom regresionom analizom, a statistička analiza značajnosti ispitivanih parametara na posmatrane odzive, te numerička optimizacija ispitivanih procesnih parametara, primenom programskog paketa Design-Expert® v.7 (Stat-Ease, Minneapolis, MN, USA). Rezultati su statistički testirani analizom varijanse (ANOVA) na nivou značajnosti od  $p = 0,05$ . Adekvatnost modela je procenjena koeficijentom determinacije ( $R^2$ ) i modelom  $p$ -vrednosti.

Na osnovu dobijenog matematičkog modela (polinoma) konstruisana je odzivna površina koja omogućava vizuelni prikaz uticaja ispitivanih parametara na posmatrane procese. Odzivna površina može se prikazati kao površina u 3D prostoru ili pomoću kontura odzivnih površina.

Kako bi razvijeni modeli imali primenu u simulaciji i optimizaciji, urađen je završni korak u metodi odzivnih površina, optimizacija posmatranog procesa (Banga i sar., 2003; Myers i Montgomery, 2002). Za optimizaciju procesa primenjena je metoda zasnovana na konceptu željene funkcije (Desirability function). Optimizacija se izvodi na način da se praćeni odzivi prevode u individualne željene funkcije čije se vrednosti

kreću između 0 i 1. Vrednost individualne željene funkcije 0 predstavlja najlošiju, a 1 najbolju vrednost za posmatrani odziv. Ukupna željena funkcija jednaka je geometrijskoj sredini pojedinačnih željenih funkcija (Anderson-Cook i sar., 2009).

Optimalna temperatura i pritisak sušenja voća definisani su u RSM modelu korišćenjem centralnog kompozitnog plana (Central composite design, CCD) (Baš i Boyaci, 2007). Temperatura sušenja ( $X_1$ ) i pritisak ( $X_2$ ) bile su nezavisno promenljive veličine ispitane da bi se optimizovao proces sušenja u cilju ostvarivanja boljeg kvaliteta krajnjeg proizvoda ( $Y$ ).

Nezavisno promenljive veličine (temperatura i pritisak) kodirane su korišćenjem opšte jednačine:

$$X = \frac{x - \frac{x_{max} + x_{min}}{2}}{\frac{x_{max} - x_{min}}{2}} \quad (18)$$

gde su:  $X$  - kodirana vrednost promenljive veličine (u opsegu od -1 do 1),  $x$  – realna vrednost odabrane promenljive veličine, a  $x_{max}$  i  $x_{min}$  realne maksimalne, odnosno minimalne vrednosti promenljive veličine, u odabranom opsegu za ispitivanje. Ispitivani faktori i nivoi su prikazani u tabeli 6.

**Tabela 6. Nekodirani i kodirani nivoi nezavisno promenljivih veličina korišćenih u RSM dizajnu za sušenje višnje**

Nezavisno promenljiva veličina	Simboli	Nivoi				
		-1.414	-1	0	+1	1.414
Temperatura (°C)	$X_1$	46	50	60	70	74
Pritisak (mbar)	$X_2$	17	100	300	500	583

**Tabela 7. Nekodirani i kodirani nivoi nezavisno promenljivih veličina korišćenih u RSM dizajnu za sušenje borovnice**

Nezavisno promenljiva veličina	Simboli	Nivoi				
		-1.414	-1	0	+1	1.414
Temperatura (°C)	$X_1$	46	50	60	70	74
Pritisak (mbar)	$X_2$	38	100	250	400	464

Eksperimentalni podaci su fitovani sa modelom odzivnih površina drugog reda u sledećem obliku:

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j X_j + \sum_{j=1}^k \beta_{ij} X_j^2 + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} X_i X_j \quad (19)$$

gde su:  $Y$  vrednosti ispitivanih odziva (ukupna suva materija, vrednost aktivnosti vode, ukupni fenoli, vitamin C,  $IC_{50}$ , antioksidativna aktivnost, sadržaj antocijana, ukupna promena boje i tekstura),  $\beta_0$ , je nezavisni član jednačine, a  $\beta_j$ ,  $\beta_{ij}$ ,  $\beta_{ij}$  regresioni koeficijenti uz linerane, kvadratne i interaktivne članove jednačine;  $X_i$  i  $X_j$  su kodirane nezavisno promenljive veličine (temperatura i pritisak sušenja). Ukupna promena boje i vrednost aktivnosti vode su uzeti kao najvažniji faktori kvaliteta osušenog voća. Fenolna jedinjenja, antioksidativna aktivnost, antocijanini i vitamin C prate navedene parametre po značaju.

### Matematičko modelovanje procesa sušenja

Eksperimentalni podaci svakog procesa sušenja, za svaki uzorak, izraženi su kao bezdimenzionalna vlažnost ( $\Phi$ ) uzoraka u određenom vremenu sušenja:

$$\Phi = \frac{mW - mW_e}{mW - mW_{poč}} \quad (20)$$

gde je  $mW$  vlažnost materijala u vremenu  $t$ ,  $mW_e$  ravnotežna vlažnost materijala, a  $mW_{poč}$  početna vlažnost materijala (u vremenu  $t = 0$ ).

Međutim, za biološke materijale je teško odrediti ravnotežnu vlažnost materijala, jer je zanemarljivo mala, te je za potrebe proračuna bezdimenzionalna vlažnost uzoraka izračunata kao odnos trenutne vlažnosti materijala i početne vlažnosti svežeg materijala:

$$\Phi = \frac{mW}{mW_{poč}} \quad (21)$$

Za aproksimaciju eksperimentalnih podataka sušenja upotrebljeno je 11 matematičkih modela (Mwithiga i Olwal, 2005; Soysal i sar., 2006; Simal i sar., 2005; Akpinar i sar., 2007) prikazanih u tabeli 8.

**Tabela 8.** Matematički modeli za aproksimaciju eksperimentalnih podataka.

Naziv	Jednačina
Page's model	$\phi = \exp(-k \times t^n);$
	$k = P1, n = P2$
Modified Henderson-	$\phi = G' \times \exp(-S' \times t^N);$
Pabis's model	$G' = P1, S' = P2, N = P3$
Peleg's model	$\phi = \phi_0 - \frac{t}{K_1 + K_1 \times t};$
	$K_1 = P1, K_2 = P2$
Newton	$\phi = \exp(-k \times t)$
	$k = P1$
Modified Page	$\phi = \exp(-k \times t^n)$
	$k = P1, n = P2$
Logarithmic	$\phi = a \times \exp(-k \times t) + b$
	$a = P1, k = P2, b = P3$
Midilli i sar.	$\phi = a \times \exp(-k \times t^n) + b \times t$
	$a = P1, k = P2, n = P3, b = P4$
Wang & Singh	$\phi = 1 + a \times t + b \times t^n$
	$a = P1, b = P2$
Two-term	$\phi = a \times \exp(-k \times t) + b \times \exp(-k_1 \times t)$
	$a = P1, k = P2, b = P3, k_1 = P4$
Two-term exponential	$\phi = a \times \exp(-k \times t) + (1 - a) \times \exp(-k \times a \times t)$
	$a = P1, k = P2$
Diffusion approximation	$\phi = a \times \exp(-k \times t) + (1 - a) \times \exp(-k \times b \times t)$
	$a = P1, k = P2, b = P3$

Za ocenu uspešnosti aproksimacije eksperimentalnih podataka sušenja matematičkim modelima korišćeni su koeficijent determinacije,  $R^2$  i koeficijent korelacije, R.

Modelovanje procesa sušenja primenom model jednačina izvedeno je korišćenjem programa Origin 6.1 i Excel 2010.

## REZULTATI I DISKUSIJA

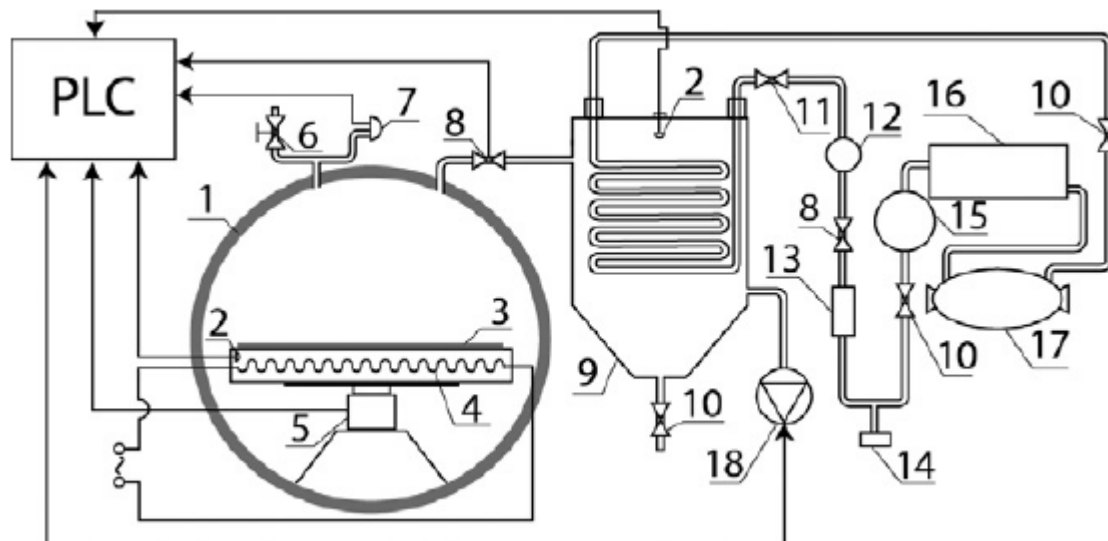
### *PROTOTIP LABORATORIJSKE VAKUUMSKE SUŠARE*

Prototip vakuumske sušare sastoji se od cilindrične komore, vakuum pumpe, grejača i kondenzatora (slika 18). Komora je napravljena od nerđajućeg čelika (Č.4580) u obliku cilindra ukupne zapremine 70 l. Debljina zida komore je 5 mm. Na vratima komore ugrađeno je staklo ( $\Phi 130 \times 6$  mm) radi lakše kontrole sušenja.

Svi delovi sušare koji se nalaze u režimu vakuuma su zaptiveni. Vakuum pumpa (model R50016 proizvođača Busch iz Nemačke) može da ostvari vrednost apsolutnog pritiska 200 Pa (2 mbar). Između vakuum pumpe i komore instaliran je kondenzator (model kompresora R134a proizvođača Danfoss iz Danske) u kome se može postići minimalna temperatura  $-40$  °C. U komori sušare nalazi se polica od aluminijuma postavljena na posebne držače, veličine 400x400x20 cm. U polici su smešteni električni grejači ukupne snage 490 W, koji omogućavaju zagrevanje materijala do temperature 75 °C.

Vakuumska sušara opremljena je programabilnim logičkim kontrolerom (PLC) za automatsko upravljanje procesom. PLC ima mogućnost merenja i memorisanja svih radnih parametara procesa u zadatim i promenljivim vremenskim intervalima (mase uzorka, apsolutnog pritiska u komori, temperature ploče i same sirovine). Upravljačka jedinica obezbeđuje upravljanje radom vakuum pumpe i grejača. Na ovaj način se automatski održava zadata vrednost radnog pritiska u komori i temperature ploče.

Najvažnije tehničke karakteristike uređaja su sledeće: opseg radne temperature 25-75 °C; osetljivost senzora temperature (model T91 proizvođača Termotehna iz Srbije)  $\pm 0,3$  °C; maksimalna masa uzorka za sušenje 1000 g; osetljivost senzora merenja mase  $\pm 0,3\%$ ; rezolucija merenja mase  $\pm 0,5$  g (model SP4MC3MR proizvođača HBM); opseg radnog pritiska 2-1000 mbar; osetljivost senzora za pritisak  $\pm 0,5$  mbar (model PMC131 proizvođača Enderess+Hauser).



Slika 18. Šematski prikaz vakuumske sušare: 1. komora; 2. senzor temperature; 3. lesa; 4. grejač; 5. merna ćelija za masu; 6. ventil; 7. senzor pritiska; 8. elektromagnetni ventil; 9. kondenzator; 10. ventil; 11. ekspanzioni ventil; 12. indikator protoka; 13. isparivač; 14. prijemnik; 15. kontrola pritiska; 16. kondenzator; 17. kompresor; 18. vakuum pumpa.



Slika 19. Prototip laboratorijske vakuumske sušare

## **OPTIMIZACIJA PROCESA SUŠENJA VIŠNJE**

Metoda odzivnih površina korišćena je za optimizaciju procesa sušenja višanja u vakuumu. Model i njegovi koeficijenti dobijeni su statističkom metodom nelinearne regresije eksperimentalnih podataka, a model daje funkcionalnu zavisnost između zavisne i nezavisno promenljivih veličina. Model se sastoji od linearnih i kvadratnih članova, te člana koji predstavlja interakciju ispitivanih promenljivih veličina, pa prema tome model može biti linearan ili kvadratni ili srednja vrednost ukoliko nema značajnog uticaja ispitivanih faktora.

Ispitani su uticaji temperature sušenja (46-74 °C) i pritiska (17-583 mbar) na suhu materiju, vrednost aktivnosti vode, ukupne fenole, vitamin C, antioksidativnu aktivnost, sadržaj ukupnih monomernih antocijanina, ukupnu promenu boje i teksturu višanja osušenih u vakuumskoj sušari. Tabela 9 pokazuje dobijene eksperimentalne podatke za ispitivane odzive. Uticaji linearnih, kvadratnih ili koeficijenata interakcije na odziv ispitani su u pogledu značajnosti korišćenjem analize varijanse (ANOVA), sa nivoom pouzdanosti od 95%. Koeficijenti regresije u modelu izračunati su korišćenjem metode najmanjih kvadrata. Stepenn značajnosti svakog faktora određen je svojom  $p$ -vrednošću. Tabela 10 prikazuje odgovarajuće  $p$ -vrednosti za promenljive veličine izabranog odziva osušenih višanja za svaki od dobijenih koeficijenata i interakcija. Analiza varijanse (tabela 11) pokazuje da su modeli regresije za sve ispitivane odzive bili statistički relevantni, uz nivo značajnosti u opsegu od  $p < 0,0001$  (za teksturu) do  $p = 0,0434$  (za vitamin C) i model nije imao značajan nedostatak prilagođavanja ( $p > 0,05$ ). Prilagođeni model je dobro predvideo podatke, sa visokim koeficijentima korelacije,  $R^2$ , koji variraju od 0,8665 do 0,9851, u zavisnosti od ispitivanih odziva. Modeli polinoma drugog reda korišćeni za izražavanje ispitivanih odziva ( $Y$ ) kao funkcija nezavisno promenljivih veličina (u smislu kodiranih vrednosti) prikazani su u tabeli 12.



Tabela 9. Eksperimentalni dizajn i podaci za analizu vakuumski osušenih višanja metodom odzivnih površina

Uzorak	Temperatura (°C)	Pritisak (mbar)	Suva materija (%)	$a_w$ vrednost	Sadržaj ukupnih fenola (mg CAE/100 SM)	Vitamin C (mg/100 g SM)	IC <sub>50</sub> (mg/ml)	Sadržaj antocijana (mg CGE/100 g SM)	Ukupna promena boje	Čvrstoća (g)
1	60	300	65,68	0,738	603,51	13,68	3,945	118,93	53,63	2677,89
2	60	300	69,78	0,708	545,12	12,13	3,591	117,82	55,8	2937,15
3	46	300	32,52	0,916	313,78	15,48	6,607	144,05	49,5	1890,84
4	74	300	78,78	0,510	751,75	12,59	3,004	51,83	56,7	4517,63
5	50	500	57,32	0,795	539,50	17,83	4,438	123,62	55,2	2052,64
6	60	300	71,05	0,647	719,18	11,25	2,964	124,99	55,3	2767,58
7	50	100	79,86	0,551	728,17	9,87	3,098	130,65	53,22	3730,87
8	70	100	81,92	0,497	758,49	9,36	2,377	98,46	56,3	6114,80
9	60	17	86,47	0,434	1180,09	10,89	1,394	78,76	51,1	5894,03
10	60	583	77,71	0,572	658,54	10,54	3,307	62,36	56,82	3862,99
11	60	300	65,35	0,752	707,95	12,73	3,082	129,45	55,75	2273,47
12	70	500	77,26	0,554	661,91	10,38	3,346	82,12	58,48	3479,27
13	60	300	70,32	0,707	676,51	12,69	2,956	101,04	55,38	2951,92

Tabela 10. Odgovarajuće *p*-vrednosti za odabrane promenljive veličine odziva vakuumski osušenih višanja za svaki dobijeni koeficijent

Odziv	$X_1$	$X_2$	$X_1^2$	$X_2^2$	$X_1X_2$
Suva materija	0,0041	0,1002	0,1044	0,0246	0,2658
$a_w$ vrednost	0,0005	0,0103	0,9643	0,0009	0,1063
Ukupni fenoli	0,0385	0,0119	0,1187	0,0208	0,6808
Vitamin C	0,0286	0,0941	0,3116	0,1263	0,0601
IC <sub>50</sub>	0,0037	0,0172	0,0161	0,0402	0,7549
Sadržaj antocijana	0,0040	0,3699	0,5456	0,0291	0,7943
Ukupna promena boje	0,0076	0,0288	0,4511	0,9671	0,9706
Sposobnost rehidracije	0,0032	0,0873	0,2452	0,0985	0,0186
Čvrstoća	<0,0001	<0,0001	0,1385	<0,0001	0,1582

$X_1$ : temperatura sušenja;  $X_2$ : pritisak,  $p < 0,01$  visoko značajan;  $0,01 \leq p < 0,05$  značajan;  $p \geq 0,05$  nije značajan

Tabela 11. Analiza varijanse (ANOVA) modelovanih odziva vakuumski osušenih višanja

Uticaj	Suma kvadrata	Stepen slobode	Suma srednjih kvadrata	F-vrednost	<i>p</i> -nivo
<b>Suva materija</b>					
Model	1953,73	5	390,75	7,15	0,0112
Ostatak	382,58	7	54,65		
Nedostatak prilagođavanja	317,60	3	105,87	6,52	0,0509
Čista greška	64,98	4	16,24		
Ukupno	2336,30	12			
$R^2 = 0,9217$					
<b><math>a_w</math> vrednost</b>					
Model	0,21	5	0,043	16,74	0,0009
Ostatak	0,018	7	0,0025		
Nedostatak prilagođavanja	0,011	3	0,0038	2,31	0,2184
Čista greška	0,0065	4	0,0016		
Ukupno	0,23	12			
$R^2 = 0,9606$					

<b>Ukupni fenoli</b>					
Model	364100	5	72818,87	6,32	0,0157
Ostatak	80640,11	7	11520,02		
Nedostatak prilagođavanja	58633,15	3	19544,38	3,55	0,1262
Čista greška	22006,96	4	5501,74		
Ukupno	444700	12			
R <sup>2</sup> = 0,9048					
<b>Vitamin C</b>					
Model	50,65	5	10,13	4,22	0,0434
Ostatak	16,81	7	2,40		
Nedostatak prilagođavanja	13,63	3	4,54	5,71	0,0627
Čista greška	3,18	4	0,80		
Ukupno	67,45	12			
R <sup>2</sup> = 0,8665					
<b>IC50</b>					
Model	15,23	5	3,05	9,33	0,0053
Ostatak	2,28	7	0,33		
Nedostatak prilagođavanja	1,51	3	0,50	1,26	0,1915
Čista greška	0,78	4	0,19		
Ukupno	17,51	12			
R <sup>2</sup> = 0,9325					
<b>Sadržaj antocijana</b>					
Model	7734,36	5	1546,87	5,24	0,0256
Ostatak	2066,61	7	295,23		
Nedostatak prilagođavanja	1599,10	3	533,03	4,56	0,0884
Čista greška	467,51	4	116,88		
Ukupno	9800,97	12			
R <sup>2</sup> = 0,8888					
<b>Ukupna promena boje</b>					
Model	54,14	5	10,83	4,38	0,0241
Ostatak	17,29	7	2,47		
Nedostatak prilagođavanja	14,14	3	4,71	5,98	0,0584
Čista greška	3,15	4	0,79		
Ukupno	71,43	12			
R <sup>2</sup> = 0,8716					

<b>Sposobnost rehidracije</b>					
Model	1957,91	5	391,58	7,88	0,0086
Ostatak	347,72	7	49,67		
Nedostatak prilagođavanja	318,42	3	106,14	14,49	0,0.29
Čista greška	29,31	4	7,33		
Ukupno	2305,63	12			
$R^2 = 0,849$					
<b>Čvrstoća</b>					
Model	2,1160000	5	4,231000	46,07	< 0,0001
Ostatak	6,42800	7	91830,99		
Nedostatak prilagođavanja	3,38500	3	112800	1,48	0,3466
Čista greška	3,04400	4	76088,58		
Ukupno	2,1800000	12			
$R^2 = 0,9851$					

**Tabela 12. Model polinoma drugog reda korišćenog za opisivanje ispitivanih odziva (Y) vakuumski osušenih višanja kao funkcija nezavisno promenljivih veličina (u smislu kodiranih vrednosti)**

<b>Odziv</b>	<b>Model polinoma drugog reda</b>	<b>Jednačina</b>
Suva materija	$Y_1 = 68,72 + 10,93X_1 - 4,95X_2 - 5,23X_1^2 + 7,99X_2^2 + 4,47X_1X_2$	(22)
$a_w$ vrednost	$Y_2 = 0,71 - 0,11X_1 + 0,062X_2 - 0,00009X_1^2 - 0,11X_2^2 - 0,047X_1X_2$	(23)
Ukupni fenoli	$Y_3 = 650,45 + 96,51X_1 - 127,85X_2 - 72,35X_1^2 + 129,92X_2^2 + 23,02X_1X_2$	(24)
Vitamin C	$Y_4 = 12,50 - 1,51X_1 + 1,06X_2 + 0,64X_1^2 - 1,02X_2^2 - 1,73X_1X_2$	(25)
IC <sub>50</sub>	$Y_5 = 3,31 - 0,86X_1 + 0,63X_2 + 0,68X_1^2 - 0,54X_2^2 - 0,093X_1X_2$	(26)
Sadržaj antocijana	$Y_6 = 118,45 - 25,41X_1 - 5,82X_2 - 4,14X_1^2 - 17,83X_2^2 - 2,33X_1X_2$	(27)
Ukupna promena boje	$Y_7 = 55,18 + 2,06X_1 + 1,52X_2 - 0,48X_1^2 - 0,025X_2^2 + 0,03X_1X_2$	(28)
Sposobnost rehidracije	$Y_8 = 31,58 - 10,94X_1 + 4,96X_2 + 5,11X_1^2 - 8,19X_2^2 - 4,47X_1X_2$	(29)
Čvrstoća	$Y_9 = 2721,6 + 940,7X_1 - 898,3X_2 + 192,1X_1^2 + 1029,2X_2^2 - 239,3X_1X_2$	(30)

$X_1$ : temperatura sušenja;  $X_2$ : pritisak sušenja

## Suva materija

Sadržaj suve materije je kvalitativna karakteristika, pošto se na osnovu ovog podatka ocenjuje kvalitet sirovina i gotovih proizvoda. Suvu materiju čine sve komponente proizvoda osim vode. Suva materija sveže višnje može biti u opsegu od 18,3 do 27,0% (Doymaz, 2007; Filimon i sar., 2011a; Motavali i sar., 2011). Akpinar i Bicer (2007) su utvrdili da je sadržaj vode u osušenim višnjama bio 19%. Doymaz (2007) je zaustavljao proces sušenja pri sadržaju vode 20%.

Slika 20 pokazuje da se suva materija u osušenim višnjama povećava sa povećanjem temperature sušenja. Povećanje pritiska do 300 mbar dovodi do smanjenja suve materije. Dalje povećanje pritiska nije pokazalo značajnu promenu suve materije u uzorcima. Linerani član temperature sušenja i kvadratni član pritiska (tabela 10) značajno su uticali na sadržaj suve materije, dok ostale promenljive veličine nisu pokazale značajan uticaj na suhu materiju ( $p > 0,05$ ).

## Aktivnost vode

Vrednost aktivnosti vode ( $a_w$ ) je fizička karakteristika koja ima direktan uticaj na mikrobiološku bezbednost hrane. Poznavanje vrednosti aktivnosti vode veoma je korisno za predviđanje stabilnosti hrane, izbor uslova skladištenja za nove proizvode i za poboljšanje procesa i opreme za sušenje (Vullioud i sar., 2004). Mikroorganizmi uopšteno rastu između vrednosti aktivnosti vode 0,99-0,98, dok većina mikroorganizama zaustavlja razvoj pri  $a_w < 0,90$ . Neke gljive prestaju da rastu samo na  $a_w$  vrednostima nižim od 0,62 (Raimbault, 1998). Liofilizirano voće trebalo bi da se čuva u opsegu vrednosti aktivnosti vode od 0,45 do 0,54, konvektivno osušeno voće između 0,46 i 0,63.  $A_w$  sveže višnje nalazi se u opsegu od 0,983 do 0,971 (Barbosa-Canovas i sar., 2007). Kod liofiliziranih i konvektivno osušenih višanja  $a_w$  vrednosti su 0,54, odnosno 0,63 respektivno (Klewicki i sar., 2009).

Aktivnost vode uzoraka osušenih u ovom radu bila je između 0,434 i 0,916, kao što je prikazano u tabeli 9. Vrednost aktivnosti vode 0,7 često se uzima za granicu održivosti namirnica. Krajnja  $a_w$  vrednost osušenog voća može biti u opsegu 0,6 do 0,8 (Barbosa-Canovas i sar., 2007). Iz tabele 11 može se videti da je  $a_w$  vrednost značajno zavisila od lineranog člana temperature sušenja ( $p = 0,0005$ ) i pritiska ( $p = 0,0103$ ), i kvadratnog člana pritiska ( $p = 0,0009$ ). Pored toga, interakcija između temperature i pritiska ( $X_1X_2$ ) nije imala značajan uticaj na  $a_w$  vrednost ( $p = 0,1063$ ). Prilagođeni model (jednačina 22) je veoma dobro predstavio eksperimentalne podatke sa visokim koeficijentom korelacije,  $R^2 = 0,9606$ . Slika 20 pokazuje da se  $a_w$  vrednost u osušenim višnjama samo blago povećava sa smanjenjem temperature sušenja. Takođe se može videti da se  $a_w$  vrednost povećava sa

povećanjem pritiska sve do 400 mbar, dok dalje povećanje pritiska nije značajno uticalo na  $a_w$  vrednost.

### Ukupni fenoli

Fenolna jedinjenja je potrebno očuvati u procesu sušenja, jer se tako štite antioksidativna svojstva gotovog proizvoda. Fenolna jedinjenja utiču i na senzorne karakteristike hrane (ukus, miris, boja), pa se zaštitom ovih jedinjenja čuva i ukupni kvalitet hrane. Antocijani (cijanidin-3-soforozid, cijanidin-3-glukozilrutinozid, cijanidin-3-glukozid, cijanidin-3-rutinozid, cijanidin-3-arabinozilrutinozid, pelargonidin-3-glukozid i peonidin-3-rutinozid) su najvažniji fenoli u višnjama (Chandra i sar., 1992; Chaovanalikit i Wrolstad, 2004; Filimon i sar., 2011a; Gao i Mazza, 1995). Prisutni su takođe i neohlorogenska kiselina, *p*-kumaroilkininska kiselina i flavan-3-oli (Chaovanalikit i Wrolstad, 2004; Gao i Mazza, 1995; Gonçalves, 2004).

Ukupan sadržaj fenola u svežim višnjama koje su bile predmet istraživanja u ovom radu, bio je 1368 mg CAE/100 g SM. U osušenim višnjama on je varirao od 314 do 1180 mg CAE/100 g SM u skladu sa različitim ispitivanim nivoima parametara. Statističkom analizom (ANOVA) dobijenih rezultata utvrđeno je da su na prinos ukupnih fenolnih jedinjenja statistički značajan uticaj imali pritisak, kao linearni i kvadratni član, te temperatura sušenja kao linearni član (tabela 10). Interakcija između temperature i pritiska ( $X_1X_2$ ) nije imala značajan uticaj na ukupan sadržaj fenola ( $p = 0,6808$ ). Model polinoma drugog reda, prikazan u tabeli 12, korišćen je da bi se izrazio sadržaj fenola ( $Y_3$ ) kao funkcija nezavisno promenljivih veličina (u smislu kodiranih vrednosti). Slika 20 pokazuje da se ukupan sadržaj fenola u osušenim višnjama povećavao sa povećanjem temperature sušenja do oko 65 °C, dok dalje povećanje temperature nije uzrokovalo značajniju promenu sadržaja ukupnih fenola. Takođe se može uočiti da se ukupan sadržaj fenola smanjivao sa povećanjem pritiska do 300 mbar, dok dalje povećanje pritiska nije pokazalo značajne promene u ukupnom sadržaju fenola.

U zavisnosti od vrste, sadržaj ukupnih fenola u svežim višnjama može da bude i do 400 mg CAE/100 g (Khoo i sar., 2011; Kim i sar., 2005). Prema Kirakosyan i sar. (2009), sadržaj ukupnih fenola u osušenim višnjama može biti u opsegu od 634 do 781 mg CAE/100 g SM. U navedenim opsezima kretali su se i sadržaji ukupnih fenola svežih i osušenih uzoraka višnje dobijenih u ovom radu.

Različiti procesi sušenja utiču na sadržaj fenola u ispitivanom materijalu (Joshi i sar., 2011; Piga i sar., 2003). Joshi i sar. (2011) su utvrdili da uticaj različitih procesa sušenja na koncentraciju fenolnih jedinjenja zavisi od njihovog sastava i može se pripisati promenljivoj stabilnosti različitih fenola u uslovima sušenja. Pokazano je da značajan gubitak fenolnih jedinjenja (katehin, epikatehin, floridžin) može biti uzrokovan procesom sušenja vazduhom (Funebo i Ohlsson, 1998), ali se gubitak istih ili mnogih drugih fenolnih

jedinjenja (epikatehin, cijanidin-3-*o*-galaktozid, kvarcetin-3-*o*-galaktozid) može pripisati izlaganju visokim temperaturama tokom procesa sušenja, za koju se pokazalo da izaziva razgradnju ovih jedinjenja (Julkunen-Tiitto i Sorsa, 2001).

### **Ukupni monomerni antocijani**

Pored toga što imaju ulogu bojenih materija, antocijani mogu imati značajnu ulogu u ishrani čoveka.

Sadržaj ukupnih monomernih antocijana u svežim višnjama može se kretati u opsegu od 2,2 do 128 mg CGE/100 g SM, u zavisnosti od sorte višanja (Dóka i sar., 2011; Filimon i sar., 2011b; Khoo i sar., 2011; Kim i sar., 2005). Prema Kirakosyan i sar. (2009), u osušenim višnjama se količina ukupnih monomernih antocijanina kreće između 17,3 i 56,4 mg CGE/ 100 g SM.

Sadržaj ukupnih monomernih antocijana u svežim višnjama ispitivanim u ovom radu, bio je 151 mg CGE/100 g SM, a u osušenim se kretao u opsegu od 51,8 do 144 mg CGE/100 g SM.

Prema podacima datim u tabeli 12 može se videti da svi članovi temperature i pritiska sušenja pokazuju negativan uticaj na sadržaj ukupnih monomernih antocijana u osušenim višnjama. Interakcija između ova dva parametra nije imala značajan uticaj na dobijeni odziv. Uticaj temperature i pritiska sušenja na sadržaj ukupnih monomernih antocijana u osušenim višnjama može se opisati jednačinom 27. Vizuelizacija parametara uticaja može se ostvariti šemom predstavljenom na slici 20. Sa ove slike može se videti da se povećanjem temperature sušenja smanjuje sadržaj antocijana. Povećanjem pritiska do oko 300 mbar, povećava se sadržaj antocijana. Dalje povećanje pritiska dovodi do smanjenja njihovog sadržaja u osušenim uzorcima. Negativan uticaj temperature na prinos antocijana je očekivan usled njihove nestabilnosti i degradacije tokom dugog izlaganja povišenim temperaturama (Tiwari i sar., 2008; Tiwari i sar., 2010).

### **Vitamin C**

Vitamin C je relativno nestabilan na toploti, kiseoniku i svetlosti i njegovo očuvanje može se koristiti kao indikator kvaliteta uslova sušenja. Usled važnosti vitamina C za ljudsku ishranu, kao i njegovu primenu kao indikatora kvaliteta prerade hrane, Santos i Silva (2008) su ispitali zadržavanje vitamina C u voću i povrću tokom procesa sušenja. Oni su zaključili da su među faktorima koji utiču na razgradnju vitamina C najvažniji temperatura i vreme. Takođe, koncentracija kiseonika u atmosferi sušenja utiče na krajnji sadržaj u osušenom proizvodu. Ipak, potrebna su dalja istraživanja da bi se omogućilo bolje razumevanje uticaja kiseonika na vitamin C tokom procesa sušenja, pošto različito voće i povrće ima različite hemijske i fizičke karakteristike.

Sadržaj vitamina C u osušenim višnjama ispitivanim u ovom radu varirao je od 9,36 do 17,8 mg/100 g SM. Sveži uzorak je imao 25,3 mg vitamina C/100 g SM. Iz tabele 10 je očigledno da je  $X_1$  najdominantniji faktor koji utiče na sadržaj vitamina C. Sa slike 20 može se videti da se povećanjem pritiska sušenja sadržaj vitamina C smanjuje. Linearni član temperature pokazuje značajan negativan uticaj na prinos vitamina C, što je direktno povezano sa ubrzanom degradacijom ovog jedinjenja na povišenim temperaturama.

### Antioksidativna aktivnost

Parametri primenjenog procesa sušenja utiču na antioksidativne osobine materijala, pošto isti parametri utiču na sadržaj glavnih antioksidativnih jedinjenja: vitamina C, ukupnih fenola i antocijana. Antioksidativna aktivnost određena je jednostavnom, često primenjivanom i brzom metodom, DPPH testom. Kao pokazatelj antioksidativne aktivnosti uzoraka osušenih višanja korišćena je  $IC_{50}$  vrednost.  $IC_{50}$  vrednost predstavlja koncentraciju antioksidativnog uzorka koja redukuje 50% slobodnih radikala prisutnih u reakcionom sistemu. Veće  $IC_{50}$  vrednosti ukazuju na nižu antioksidativnu aktivnost u uzorku.

Antioksidativna aktivnost osušenih višanja bila je proporcionalna sadržaju ukupnih fenola (tabela 9). Sa povećanjem sadržaja ukupnih fenola,  $IC_{50}$  vrednost se smanjuje, što ukazuje na veću antioksidativnu aktivnost uzorka. Uzorak osušene višnje sa najvećim sadržajem ukupnih fenola (1180 mg CAE/100 SM), imao je najnižu  $IC_{50}$  vrednost (1,39 mg/ml) i sledstveno tome najveću antioksidativnu aktivnost.  $IC_{50}$  vrednost u svežim uzorcima bila je 1,28 mg/ml. Statistička analiza je pokazala da su linearni i kvadratni članovi temperature i pritiska sušenja imali značajan uticaj na antioksidativnu aktivnost osušenih višanja (tabela 10). Linearni član temperature sušenja imao je najznačajniji uticaj ( $p = 0,0037$ ) na  $IC_{50}$  vrednost. Slika 20 pokazuje da se sa povećanjem pritiska do oko 400 mbar  $IC_{50}$  vrednosti ispitivanih ekstrakata višnje smanjuju, što znači da se antioksidativna aktivnost povećava. Daljim povećanjem pritiska, od 400 do 600 mbar,  $IC_{50}$  vrednost se povećava, što znači da se antioksidativna aktivnost smanjuje. Sličan trend zabeležen je sa povećanjem temperature do oko 60 °C, gde se  $IC_{50}$  vrednost smanjila, što je indikator povećanja antioksidativne aktivnosti, dok se daljim povećanjem temperature antioksidativna aktivnost smanjivala. Kao što su Piga i saradnici (2003) utvrdili, ovo povećanje antioksidativne aktivnosti može se objasniti većom antioksidativnom moći polifenola u intermedijernim fazama oksidacije ili formiranjem novih jedinjenja sa većom antioksidativnom aktivnošću. Dalje povećanje temperature tokom procesa sušenja dovodi do povećanja  $IC_{50}$  vrednosti, što znači da se antioksidativna aktivnost smanjuje.



## Promena površinske boje

Površinska boja je prvi parametar kvaliteta proizvoda sa kojim se potrošači sreću prilikom kupovine. Prema Filimonu (2011b), ako je  $\Delta E$  između dva uzorka manja od 1,0, pretpostavlja se da promena boje nije senzorno uočljiva. Ukupna promena boje ( $\Delta E$ ) uzoraka osušenih u vakuumu varirala je od 49,5 do 58,5 u zavisnosti od primenjene temperature i pritiska sušenja. Linearni članovi temperature ( $p = 0,0076$ ) i pritiska ( $p = 0,0288$ ) značajno su uticali na boju uzoraka, dok kvadratni i interaktivni članovi nisu imali značajan efekat na ukupnu promenu boje (tabela 10). Slika 20 predstavlja odzivnu površinu ukupne promene boje kao funkcije temperature i pritiska za sušenje višanja u vakuumu. Odzivne površine ukazuju da se  $\Delta E$  vrednosti povećavaju sa povećanjem pritiska i temperature sušenja.

## Tekstura

Tokom prerade, plodovi voća prolaze kroz seriju promena makrostrukture i sastava (Kunzen i sar., 1999). Pošto tekstura proizvoda utiče na prihvatljivost proizvoda od strane potrošača, poželjno je da osušeni proizvodi ne budu previše tvrdi.

Linearni član temperature i pritiska sušenja i kvadratni član pritiska sa  $p < 0,0001$  značajno su uticali na teksturu sušene višnje (tabela 10). Osim toga, interakcija između temperature i pritiska ( $X_1X_2$ ) nije imala značajan uticaj na teksturu uzorka ( $p = 0,1582$ ). Prilagođeni model (jednačina 11) je veoma dobro predstavio eksperimentalne podatke sa visokim koeficijentom korelacije ( $R^2 = 0,9851$ ). Čvrstoća osušenih višanja se povećavala sa povećanjem temperature sušenja, dok je povećanje pritiska do 350 mbar pokazalo smanjenje čvrstoće. Dalje povećanje pritiska nije pokazalo bilo kakve promene u čvrstoći uzoraka (slika 20).

## Sposobnost rehidracije

Rehidracija je proces koji se primenjuje sa ciljem obnavljanja osobina svežeg materijala kontaktom osušenog proizvoda sa vodom (Taiwo i sar., 2002). Što je veća sposobnost naknadnog upijanja vode osušenih proizvoda, to je njihov kvalitet veći. Sposobnost rehidracije zavisi od fizičkih karakteristika osušenih proizvoda i uslova sušenja (Khraisheh i sar., 2004; Krokida i Marinos-Kouris, 2003). Smanjena sposobnost rehidracije može ukazivati i na loše upravljanje procesom sušenja.

Osušenom voću se rehidracijom ne može vratiti sva voda oduzeta sušenjem zbog ireverzibilnih strukturnih promena u biljnom tkivu do kojih dolazi u toku procesa sušenja (Krokida i Philippopoulos, 2005; Krokida i Marinos-Kouris, 2003). U brojnim radovima ispitana je sposobnost rehidracije osušenog voća. Ipak, nema konzistentnosti u

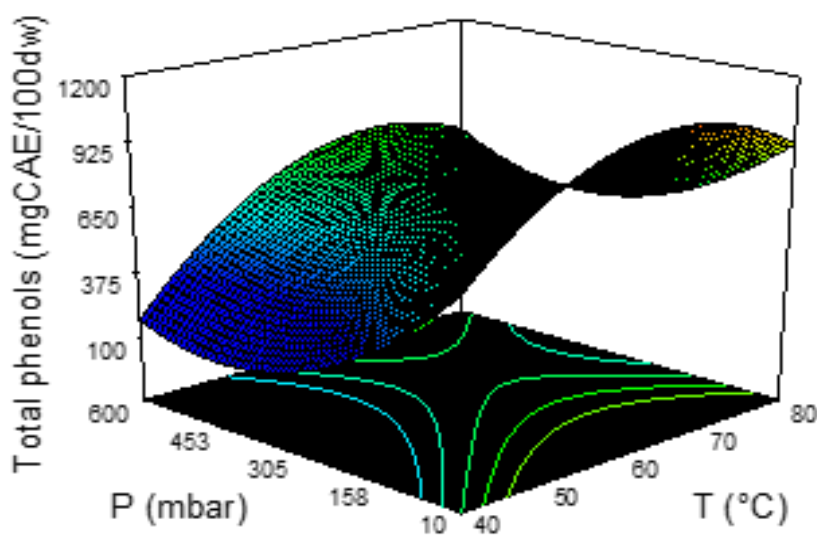
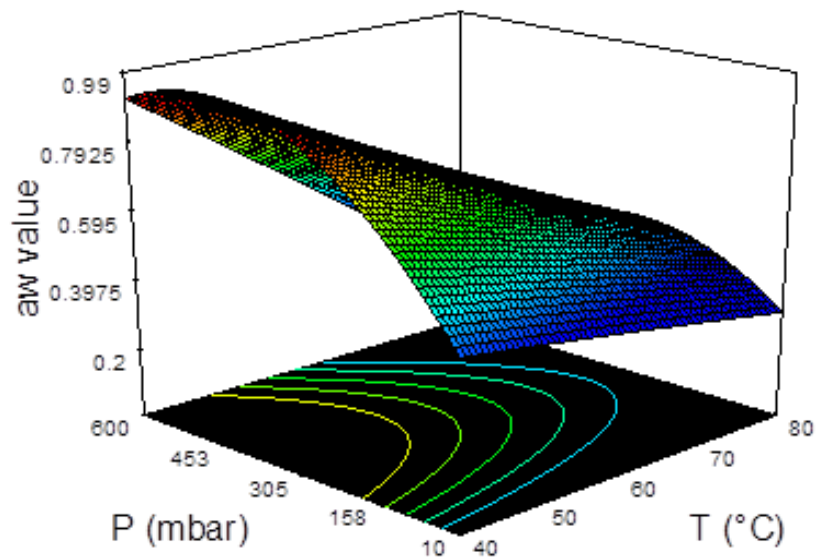
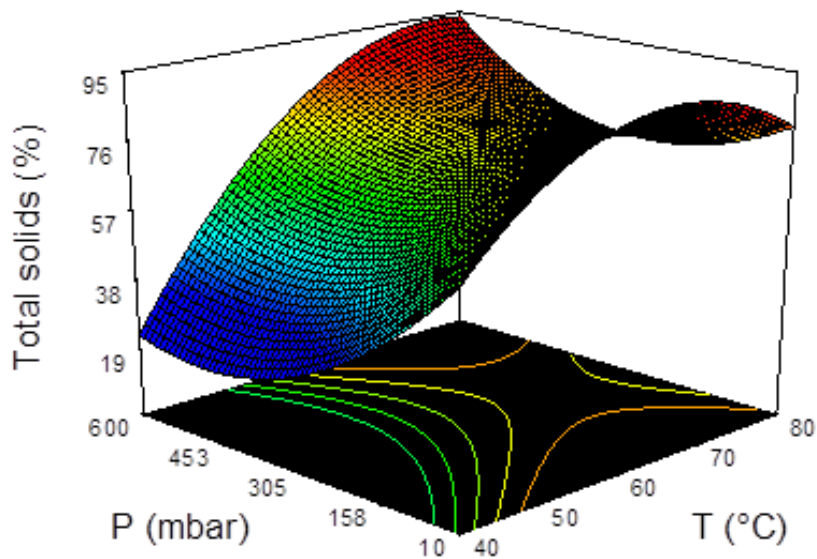
primenjenim ekperimentalnim postupcima, niti u načinu izražavanja dobijenih rezultata (Lewicki, 1998).

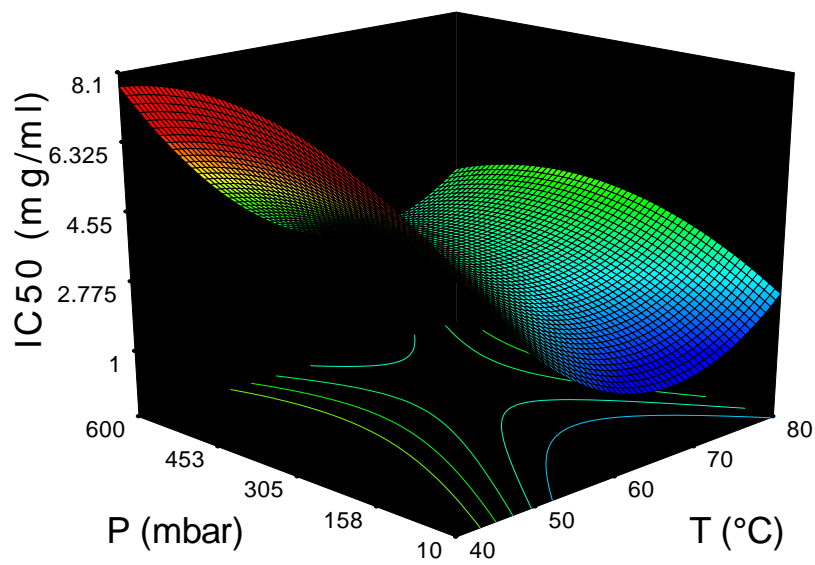
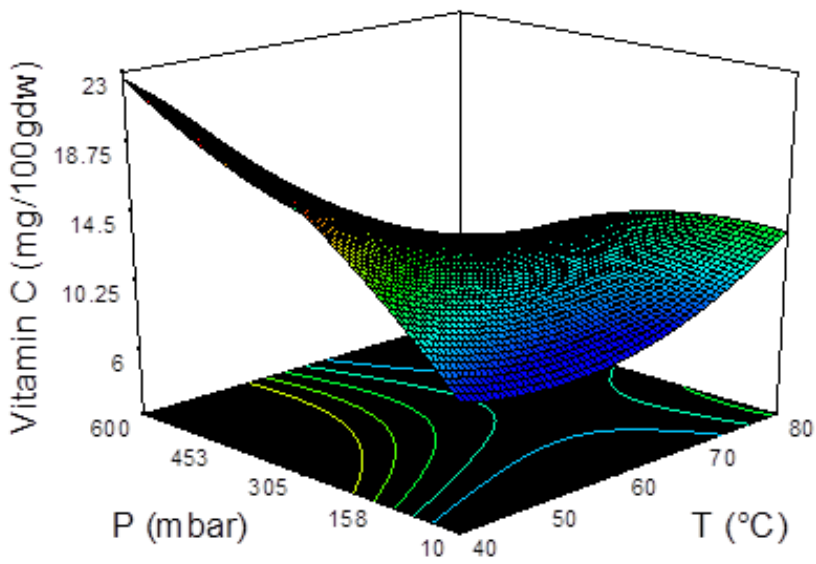
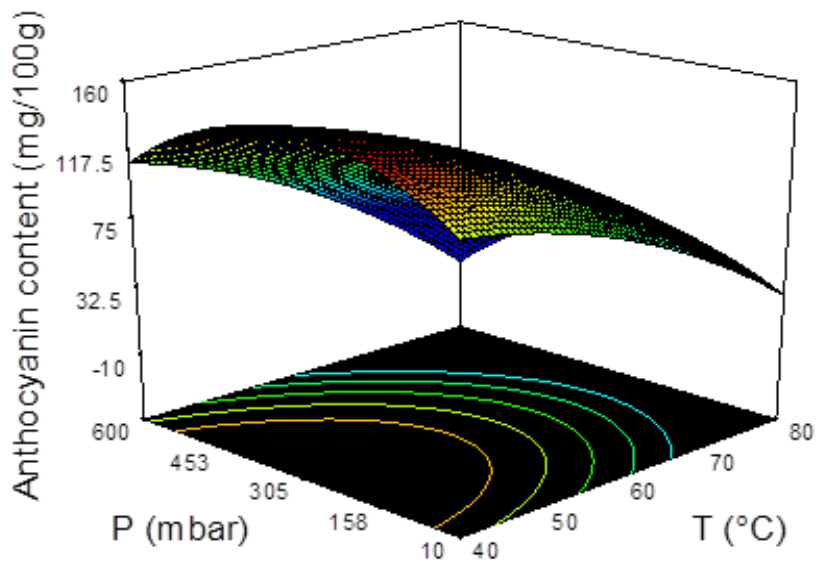
Sposobnost rehidracije osušenih uzoraka višnje kretala se od 21,22 do 67,48%, zavisno od uslova sušenja. Sposobnost rehidracija osušenih uzoraka višnje značajno je zavisila lineranog člana temperature sušenja ( $p = 0,0032$ ). Interakcija između temperature i pritiska takođe je imala značajan uticaj na sposobnost rehidracije uzoraka ( $p = 0,0186$ ). Na adekvatnost modela ukazuje njegova statistička značajnost ( $p = 0,0086$ ), međutim usled značajnog nedostatka prilagođavanja ( $p = 0,029$ ) ovaj model nije mogao potpuno opisati ispitivani sistem.

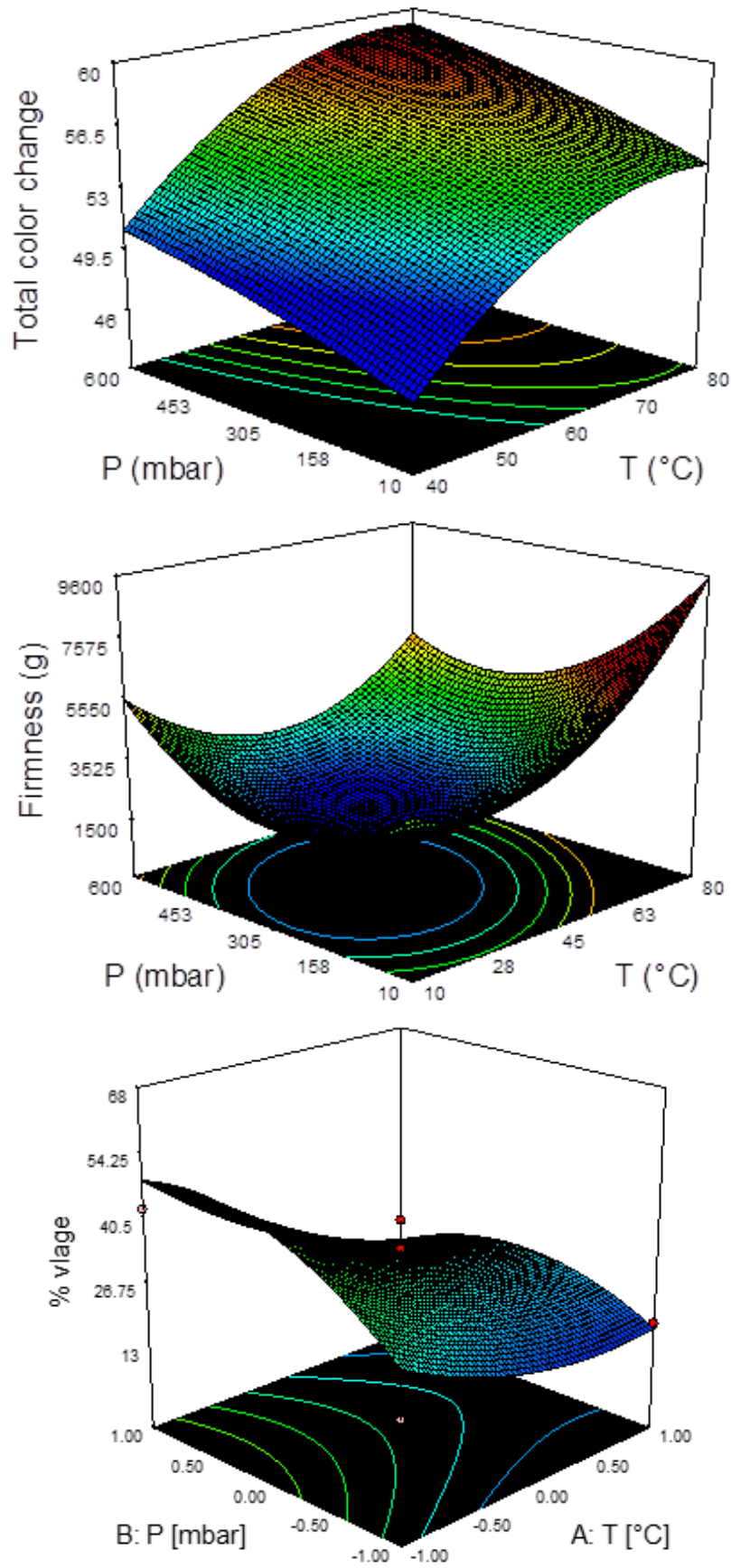
### **Optimizacija procesa sušenja**

Glavni cilj istraživanja bilo je pronalaženje optimalnih vrednosti parametara sušenja, temperature i pritiska. U istraživanju je funkcija poželjnosti (Desirability function) razvijena za sledeće kriterijume: maksimalni sadržaj ukupnih fenola, vitamina C i antocijana, maksimalna antioksidativna aktivnost (minimalna  $IC_{50}$  vrednost) u osušenom voću. Pored toga, zadatak je bio postići minimalnu ukupnu promenu boje, minimalnu  $a_w$  vrednost i teksturu uzoraka. Dobijeni modeli polinoma drugog reda korišćeni su za svaki odziv kako bi se odredili optimalni uslovi sušenja. Ovi regresioni modeli bili su validni samo u izabranom eksperimentalnom domenu.

Primenom metoda funkcije poželjnosti, dobijeni su optimalni uslovi sušenja višnje u vakuumu, 54,03 °C i 148,16 mbar. U ovoj tački, ispitivani odzivi izračunati su kao ukupni fenoli 744 mg CAE/100 g SM, vitamin C 11,4 mg/100 g SM, sadržaj monomernih antocijana 125 mg CGE/100 g SM,  $IC_{50}$  3,23 mg/ml, suva materija 70,7%,  $a_w$  vrednost 0,646, ukupna promena boje 52,6 i čvrstoća 3395,4 g.







Slika 20. Šematski prikaz dobijenih odziva kao funkcija pritiska i temperature sušenja višanja u vakuumu.

## Modelovanje procesa sušenja

Princip modelovanja baziran je na skupu matematičkih jednačina koje mogu adekvatno da karakterišu sistem. Rešenje ovih jednačina mora omogućiti predviđanje procesnih parametara kao funkciju vremena u bilo kom trenutku. U zavisnosti od primenjene jednačine, modeli mogu da se klasifikuju kao teorijski, semi-empirijski i empirijski. Teorijski modeli zasnivaju se na drugom Fikovom zakonu difuzije, dok su empirijski modeli češće čiste kinetičke formule zasnovane na procesnim uslovima (Brasiello i sar., 2013).

U prilogu ovog rada prikazane su vrednosti statističkih parametara 11 odabranih modela datih u tabeli 8. Ispitana je mogućnost predviđanja sadržaja vode u materijalu pomoću model jednačina iz dostupne literature.

Koeficijent determinacije je primarni kriterijum za izbor jednačine koja će na najbolji način opisivati krivu sušenja. Srednje vrednosti koeficijenata determinacije svakog ispitanog modela pri opisivanju vakuumskog sušenja višnje prikazani su u tabeli 13.

Kada bi vrednost parametra  $R^2$  iznosila 1, bilo bi potvrđeno potpuno, odnosno idealno slaganje između eksperimentalnih i modelom izračunatih vrednosti. Kao što se iz prikazanih rezultata može videti, za numeričke aproksimacije eksperimentalnih podataka dobijene su vrlo visoke vrednosti koeficijenata korelacije ( $R^2$ ). Primenjeni modeli pokazali su dobru moć predviđanja kinetike procesa sušenja kivija (Simal i sar., 2005), peršuna (Soysal i sar., 2006), kelja (Mwithiga i Olwal, 2005) i lista peršuna (Akpınar i sar., 2006). S obzirom da su ispitanici modeli odabrani na osnovu pregleda literature, može se sa sigurnošću tvrditi da su podaci dobijeni u ovom radu u saglasnosti sa dostupnom literaturom.

**Tabela 13.** Srednje vrednosti koeficijenata determinacije i koeficijenata korelacije za svaki model između eksperimentalnih i izračunatih vrednosti vakuumski osušene višnje.

R. br.	Naziv modela	$R^2$
I	Page's model	0,987
II	Modified Henderson-Pabis's model	0,988
III	Peleg's model	0,984
IV	Newton	0,969
V	Modified Page	0,970
VI	Logarithmic	0,990
VII	Midilli i sar.	0,990
VIII	Wang&Singh	0,948
IX	Two-term	0,993
X	Two –term exponential	0,972
XI	Diffusion approximation	0,690

Na osnovu vrednosti ovih statističkih parametara može se konstatovati da "two-term" model najbolje aproksimira eksperimentalne podatke dobijene sušenjem višnje u vakuumu, s obzirom da je navedeni model za sve uzorke imao najveće vrednosti koeficijenta determinacije ( $R^2=0,993$ ). "Diffusion approximation" model u poređenju sa ostalim modelima ima najmanji koeficijent determinacije ( $R^2=0,690$ ) što znači i da daje loše predviđanje kinetike sušenja višnje u vakuumskoj sušari.

### **OPTIMIZACIJA PROCESA SUŠENJA BOROVNICE**

U radu je ispitan uticaj temperature sušenja (36-64 °C) i pritiska sušenja (38-462 mbar) na kvalitet osušenih borovnica. Dobijeni rezultati prikazani su u tabeli 14. Analiza varijanse (tabela 16) pokazuje da su regresioni modeli za ispitivane odzive (suva materija, ukupni fenoli, vitamin C, monomerni antocijani, promena boje) bili statistički relevantni, uz nivo značajnosti u opsegu od  $p < 0,0001$  (za sadržaj antocijana) do  $p = 0,0495$  (za ukupnu promenu boje). Regresioni modeli za  $a_w$  vrednost, čvrstoću i  $IC_{50}$  vrednosti nisu bili statistički relevantni ( $p > 0,05$ ). Vrednosti koeficijenata multiple determinacije su se kretale od 0,3090 (za čvrstoću) do 0,9775 (za antocijane), u zavisnosti od ispitivanih odziva. Adekvatnost ispitivanih modela određena je nedostatkom prilagođavanja. Značajan nedostatak prilagođavanja utvrđen je kod vitamina C i promene boje ( $p < 0,05$ ) iako su regresioni modeli bili statistički relevantni. Prilikom ispitivanja antioksidativne aktivnosti utvrđena je  $p$ -vrednost bliska graničnoj ( $p = 0,056$ ). Ispitivanjem nedostatka prilagođavanja ( $p > 0,05$ ) može se zaključiti da bi ovaj model mogao da se primeni za opisivanje odziva  $IC_{50}$  vrednosti tokom procesa sušenja. Modeli polinoma drugog reda korišćeni za izražavanje ispitivanih odziva ( $Y$ ) kao funkcija nezavisno promenljivih veličina (u smislu kodiranih vrednosti) prikazani su u tabeli 17.

#### **Suva materija**

Suva materija u svežim borovnicama se može kretati od 13,4 do 15,6 g/100 g (Prior i sar., 1998), pa sve do 16,8 g/100 g (Vračar, 2001). Suva materija osušenih borovnica ispitanih u ovom radu kretala se između 76,86 i 90,26%, zavisno od uslova sušenja.

Slika 21 pokazuje da je temperatura imala značajan uticaj na suhu materiju osušenih borovnica. Sadržaj suve materije se povećavao sa povećanjem temperature. Ovo se može potvrditi i preko  $p$ -vrednosti (tabela 15), gde je linearni član temperature sušenja ( $p = 0,0009$ ) imao značajan uticaj na suhu materiju, dok ostale promenljive veličine nisu.

### Aktivnost vode

U osušenim uzorcima borovnice  $a_w$  vrednost se kretala od 0,434 do 0,822, a u svežoj je bila 0,987. Rezultati ispitivanja  $a_w$  vrednosti u različitim uslovima sušenja prikazani su u tabeli 14. Prilagođeni model (jednačina 32) nije zadovoljavajuće predstavljao eksperimentalne podatke, jer je imao nizak koeficijent korelacije,  $R^2 = 0,515$ , što je potvrđeno testiranjem nedostatka prilagođavanja koji je bio značajan za ispitivanu izlaznu veličinu ( $p = 0,1075$ ). Slika 21 pokazuje da se  $a_w$  vrednost u osušenim borovnicama povećava sa smanjenjem temperature sušenja. Aktivnost vode se povećava sa povećanjem pritiska sve do 350 mbar, dok dalje povećanje pritiska nije značajno uticalo na  $a_w$  vrednost.

### Ukupni fenoli

Borovnica je voće veoma bogato fenolima i antocijanima (Prior i sar., 1998). Sadržaj ukupnih fenola u različitim sortama borovnice može se kretati od 251 (Vračar, 2001), 300 do 384 (You i sar., 2011), ali može biti i 929 mg CAE/100 g (Sellappan i sar., 2002). Podaci o sadržaju pojedinih fenola su različiti u literaturi. You i sar. (2011) su utvrdili sedam fenola u borovnicama: kafena, hlorogena, *p*-kumarinska, 4-*o*-feruloilkininska, 5-*o*-feruloilkininska, *trans*-ferulna kiselina i kvercetin sa hlorogenom kiselinom. Oni nisu identifikovali galnu kiselinu, ni katehin, koji su bili dominantni u istraživanjima Sellappan i sar. (2002). Generalno, kvantitativni i kvalitativni sadržaj fenola varira (Giovanelli, 2009) u zavisnosti od sorte, klimatskih uslova i lokacije.

Sadržaj ukupnih fenola osušenih borovnica varirao je od 2,15 do 3,64 mg CAE/100 g SM, zavisno od primenjenih nivoa parametara. Sadržaj ukupnih fenola značajno je zavisio od linearnog člana temperature i pritiska (tabela 15). Osim toga, interakcija između temperature i pritiska ( $X_1X_2$ ) nije imala značajan uticaj na sadržaj ukupnih fenola ( $p = 0,0889$ ), kao ni kvadratni član temperature ( $p = 0,2141$ ) i kvadratni član pritiska ( $p = 0,1987$ ). Polinom drugog reda korišćen za opisivanje ukupnog sadržaja fenola ( $Y_3$ ) prikazan je u tabeli 17. Slika 21 pokazuje da se sadržaj ukupnih fenola u osušenim borovnicama povećavao sa povećanjem temperature sušenja. Može se videti da se sadržaj ukupnih fenola povećava značajno sa povećanjem pritiska do 260 mbar, dok dalje povećanje pritiska nije pokazalo značajno povećanje sadržaja ukupnih fenola. Utvrđeni uticaj pritiska na prinos ukupnih fenola ukazuje da niži apsolutni pritisak, kao ni temperatura, ne utiču na degradaciju ove grupe jedinjenja prilikom procesa sušenja.

### Ukupni monomerni antocijani

Pored atraktivne boje, antocijani imaju i važnu fiziološku ulogu u organizmu. Sadržaj ukupnih fenolnih jedinjenja i antocijana generalno je viši u divljim nego u kultivisanim sortama borovnice (Giovanelli i Buratti, 2011). Sellappan i sar. (2002) su utvrdili da se



sadržaj antocijana u borovnicama kreće od 87,4 do 197 mg CGE/100 g. Rezultati do kojih su došli drugi autori pokazuju da sadržaj antocijana može da se kreće u opsegu od 116 do 224 mg CGE/100 g SM (You i sar., 2011). U borovnicama je identifikovano pet glavnih grupa antocijana: cijanidin, delfinidin, peonidin, malvinidin i petunidin (Lohachoompol i sar., 2008; You i sar., 2011).

U ovom istraživanju, sadržaj antocijana bio je u opsegu između 1771,99 i 2753,45 mg CGE/100 g SM. Prema podacima iz tabele 15, može se videti da je linearni član temperature sušenja imao statistički značajan uticaj na sadržaj antocijana u osušenim borovnicama ( $p < 0,0001$ ). Pored toga, kvadratni član pritiska i kvadratni član temperature takođe pokazuju značajan uticaj na sadržaj antocijana, kao i interakcija između ova dva parametra ( $p = 0,0007$ ). Može se zaključiti da na povišenim temperaturama i većem apsolutnom pritisku sušenja dolazi do povećane degradacije antocijana (Tiwari i sar., 2008; Tiwari i sar., 2010). Uticaj temperature i pritiska sušenja na sadržaj antocijana u osušenim borovnicama može se opisati jednačinom 17 i grafički je prikazan na slici 21.

### Vitamin C

Sadržaj vitamina C u svežim borovnicama može varirati u granicama između 1,3 i 16,4 mg/100 g (Bushway i sar., 2006; Prior i sar., 1998).

U ispitanim uzorcima osušenih borovnica sadržaj vitamina C kretao se u opsegu od 28,15 do 67,59 mg/100 g SM. Kao što je prikazano u tabeli 15 linearni član temperature je dominantno uticao na sadržaj vitamina C ( $p = 0,0010$ ). Na osnovu podataka prikazanih na slici 21 može se zaključiti da korišćene temperature sušenja (36-64 °C) nisu negativno uticale na sadržaj vitamina C. Povećanjem pritiska sušenja sadržaj vitamina C se smanjivao usled oksidacije.

Model je imao značajan nedostatak prilagođavanja ( $p = 0,0111$ ) pa jednačina (34) data u tabeli 17 ne opisuje na zadovoljavajući način sadržaj vitamina C u zavisnosti od procesnih parametara.

### Antioksidativna aktivnost

Statističkom analizom je utvrđeno da je linearni član temperature sušenja imao značajan uticaj na antioksidativnu aktivnost osušenih borovnica (tabela 15). Linearni član pritiska sušenja imao je manji uticaj ( $p = 0,0611$ ) na  $IC_{50}$  vrednost. Slika 21 pokazuje da se sa povećanjem pritiska blago smanjuje antioksidativna aktivnost ispitivanih uzoraka osušene borovnice, odnosno  $IC_{50}$  vrednosti se povećavaju. Sa iste slike može se videti da primenjeni opseg temperatura sušenja (36-64 °C) nije negativno uticao na antioksidativnu aktivnost osušenih uzoraka.

## Promena površinske boje

Ukupna promena boje ( $\Delta E$ ) borovnica osušenih u vakuumu je varirala od 88,33 do 91,88 što pokazuje malu razliku promene boje osušenih uzoraka. Linearni član temperature ( $p = 0,0096$ ) imao je značajan uticaj na boju uzoraka, dok linearni i kvadratni član ispitivanih parametara, i interakcija između temperature i pritiska nisu imali značajan uticaj na promenu boje (tabela 15). Slika 21 pokazuje odzivnu površinu ukupne promene boje kao funkciju temperature i pritiska za sušenje borovnica u vakuumu. Slika 21 pokazuje da su se vrednosti  $\Delta E$  povećavale sa povećanjem temperature sušenja. Može se takođe videti da se  $\Delta E$  povećavalo sa povećanjem pritiska do oko 300 mbar, dok dalje povećanje pritiska utiče na smanjenje  $\Delta E$  osušenih borovnica.

## Tekstura

Prosečni rezultati instrumentalnog merenja teksture i statistička analiza instrumentalno dobijenih vrednosti za teksturu, sa nivoom značajnosti od 95%, prikazani su u tabeli 15.

Statistička značajnost testa nedostatka prilagođavanja za prinos čvrstoće bila je visoka ( $p = 0,2095$ ), pa matematički model predstavljen jednačinom (39) datoj u tabeli 17 ne opisuje na odgovarajući način zavisnost čvrstoće od nezavisno promenljivih veličina, temperature i pritiska. Prema tome jednačina X ne može da se primeni za optimizaciju ove veličine usled spomenutih nedostataka (neodgovarajući model i značajnost testa prilagođavanja).

## Sposobnost rehidratacije

Sposobnost rehidratacije osušenih uzoraka borovnice kretala se od 25,00 do 44,72%, zavisno od uslova sušenja. Rezultati ispitivanja pokazuju da se sposobnost rehidratacije smanjivala sa povećanjem temperature i pritiska sušenja. Kvadratni član pritiska imao je najveći uticaj na sposobnost rehidratacije ( $p = 0,0052$ ). Adekvatnost modela potvrđena je njegovom statističkom značajnošću ( $p = 0,0275$ ) i neznačajnošću nedostatka prilagođavanja ( $p = 0,1897$ ).

Tabela 14. Eksperimentalni dizajn i podaci za analizu vakuumski osušenih borovnica metodom odzivnih površina

Uzorak	Temperatura (°C)	Pritisak (mbar)	Suva materija (%)	$a_w$ vrednost	Sadržaj ukupnih fenola (mg CAE/100 SM)	Vitamin C (mg/100 g SM)	IC <sub>50</sub> (mg/ml)	Sadržaj antocijana (mg CGE/100 g SM)	Ukupna promena boje	Čvrstoća (g)
1	64	250	89,11	0,724	3,6395	52,622	0,02987	2455,10	89,89	0,634
2	60	400	87,98	0,542	2,9025	47,699	0,03933	1986,40	89,68	0,507
3	60	100	90,26	0,434	3,5061	67,593	0,03462	2753,45	88,33	0,480
4	50	462	76,41	0,815	2,1529	36,760	0,05259	1984,02	90,21	0,674
5	50	250	79,41	0,778	2,9782	36,991	0,04257	2067,01	91,05	0,651
6	50	250	81,53	0,724	2,9891	37,649	0,04563	1975,59	91,21	0,588
7	50	250	82,68	0,690	2,8828	39,859	0,03921	1927,40	90,88	0,574
8	50	250	83,82	0,646	3,1804	36,814	0,03874	1955,22	91,24	0,541
9	50	250	74,84	0,822	2,7565	34,482	0,04946	1920,42	90,63	0,672
10	50	38	83,84	0,655	3,3039	35,699	0,03417	2455,74	89,58	0,515
11	40	400	80,45	0,736	2,8211	32,703	0,04610	1828,70	91,88	0,587
12	40	100	76,99	0,800	2,5993	28,154	0,04729	1938,93	91,57	0,617
13	36	250	76,86	0,814	2,7003	34,805	0,04939	1771,99	90,60	0,619

Tabela 15. Odgovarajuće *p*-vrednosti za odabrane promenljive veličine odziva vakuumski osušenih borovnica za svaki dobijeni koeficijent

Odziv	$X_1$	$X_2$	$X_1^2$	$X_2^2$	$X_1X_2$
Suva materija	0,0009	0,3774	0,1533	0,6419	0,2777
$a_w$ vrednost	0,0541	0,3945	0,7596	0,4805	0,4408
Ukupni fenoli	0,0058	0,0114	0,2141	0,1987	0,0889
Vitamin C	0,0010	0,3790	0,0664	0,7882	0,0515
IC <sub>50</sub>	0,0094	0,0611	0,3802	0,9072	0,5489
Sadržaj antocijana	< 0,0001	< 0,0001	0,0234	0,0011	0,0007
Ukupna promena boje	0,0096	0,1834	0,2439	0,1013	0,4465
Sposobnost rehidracije	0,5613	0,0746	0,6666	0,0052	0,0680
Čvrstoća	0,3487	0,2940	0,8503	0,4456	0,6921

$X_1$ : temperatura sušenja;  $X_2$ : pritisak,  $p < 0,01$  visoko značajan;  $0,01 \leq p < 0,05$  značajan;  $p \geq 0,05$  nije značajan

Tabela 16. Analiza varijanse (ANOVA) modelovanih odziva vakuumski osušenih borovnica

Uticaj	Suma kvadrata	Stepen slobode	Suma srednjih kvadrata	F-vrednost	<i>p</i> -nivo
<b>Suva materija</b>					
Model	213,37	5	42,67	7,18	0,0111
Ostatak	41,63	7	5,95		
Nedostatak prilagođavanja	27,74	3	9,25	2,66	0,1838
Čista greška	13,89	4	3,47		
Ukupno	255,00	12			
$R^2 = 0,9217$					
<b><math>a_w</math> vrednost</b>					
Model	0,082	5	0,016	1,49	0,3049
Ostatak	0,078	7	0,011		
Nedostatak prilagođavanja	0,058	3	0,019	3,98	0,1075
Čista greška	0,019	4	0,005		
Ukupno	0,16	12			
$R^2 = 0,515$					

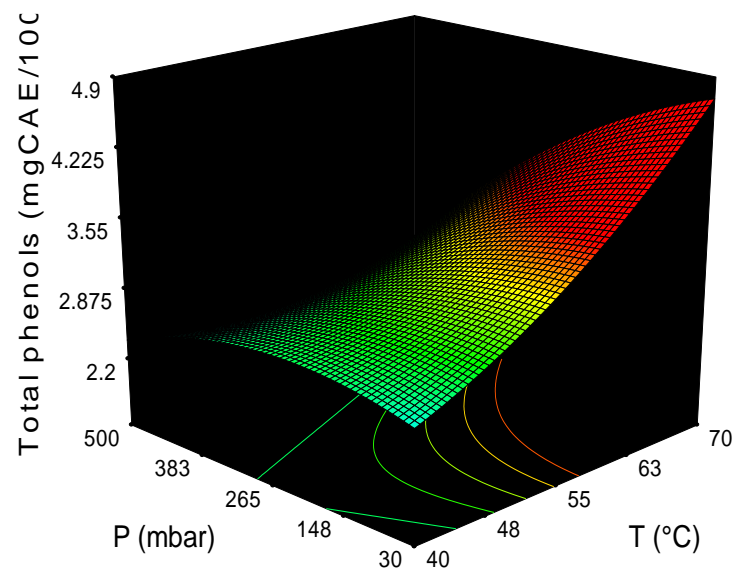
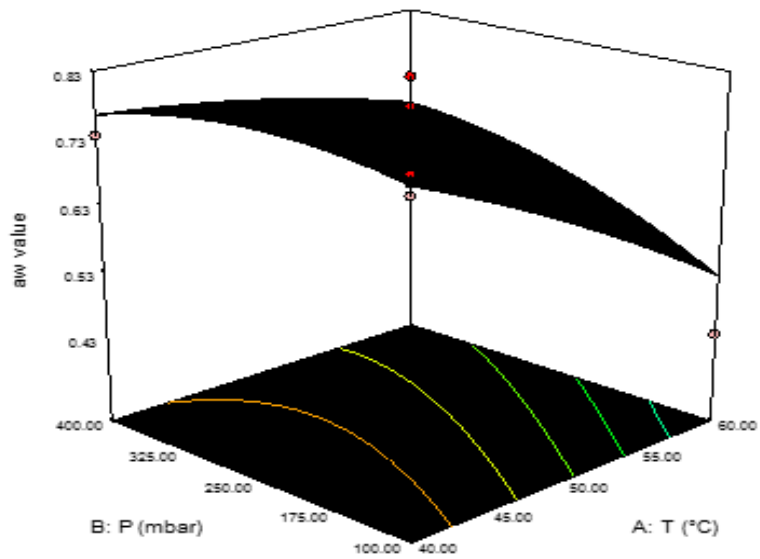
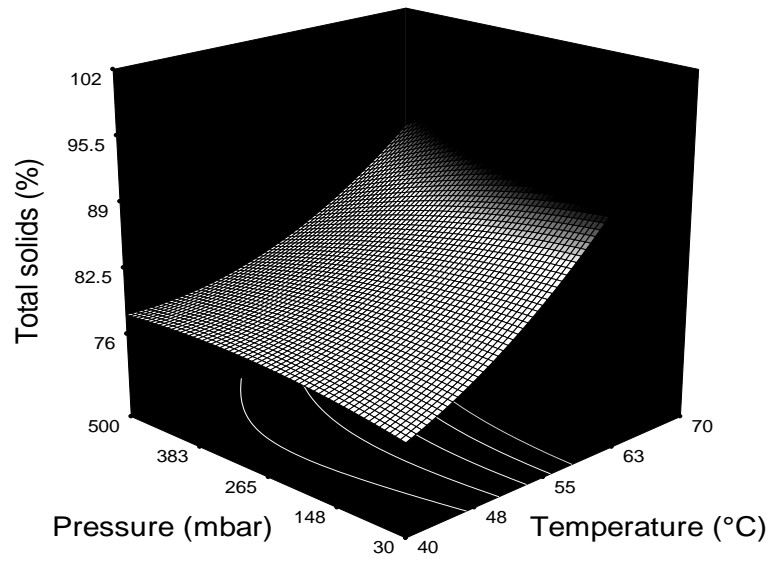
<b>Ukupni fenoli</b>						
Model	1,54	5	0,31	7,06	0,0117	
Ostatak	0,31	7	0,044			
Nedostatak prilagođavanja	0,21	3	0,070	2,87	0,1677	
Čista greška	0,097	4	0,024			
Ukupno	1,85	12				
R <sup>2</sup> = 0,8344						
<b>Vitamin C</b>						
Model	1094,23	5	218,85	8,05	0,0081	
Ostatak	190,23	7	27,18			
Nedostatak prilagođavanja	175,39	3	58,46	15,75	0,0111	
Čista greška	14,84	4	58,46			
Ukupno	1284,46	12				
R <sup>2</sup> = 0,8519						
<b>IC<sub>50</sub></b>						
Model	0,000415	5	0,000083	3,78	0,0560	
Ostatak	0,000154	7	0,000022			
Nedostatak prilagođavanja	0,000072	3	0,000024	1,19	0,42	
Čista greška	0,000081	4	0,000020			
Ukupno	0,000568	12				
R <sup>2</sup> = 0,7297						
<b>Sadržaj antocijani</b>						
Model	984000	5	196800	60,88	< 0,0001	
Ostatak	22630,64	7	3232,95			
Nedostatak prilagođavanja	8700,87	3	2900,29	0,83	0,5415	
Čista greška	13929,77	4	3482,44			
Ukupno	1007000	12				
R <sup>2</sup> = 0,9775						
<b>Ukupna promena boje</b>						
Model	8,29	5	1,66	3,99	0,0495	
Ostatak	2,91	7	0,42			
Nedostatak prilagođavanja	2,65	3	0,88	13,85	0,0140	
Čista greška	0,26	4	0,064			
Ukupno	11,20	12				
R <sup>2</sup> = 0,8368						

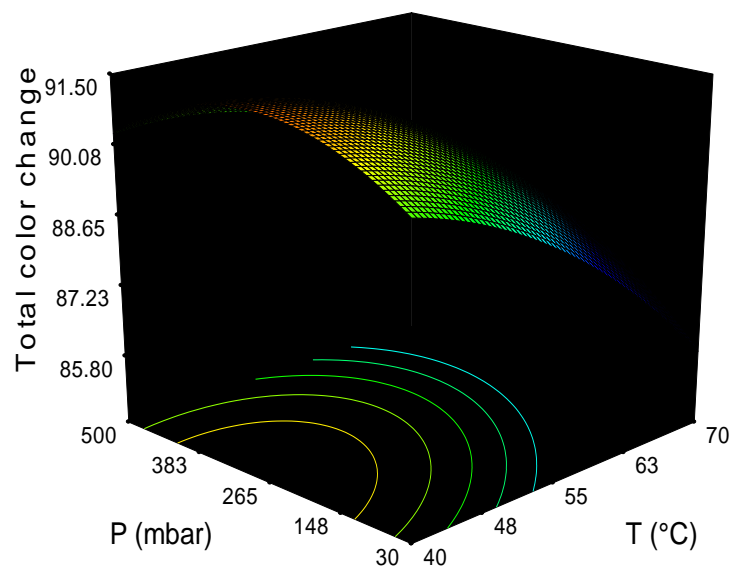
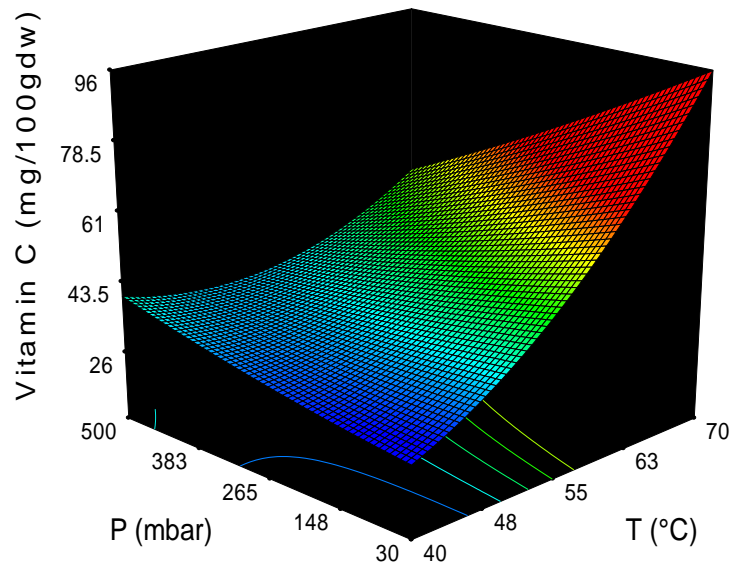
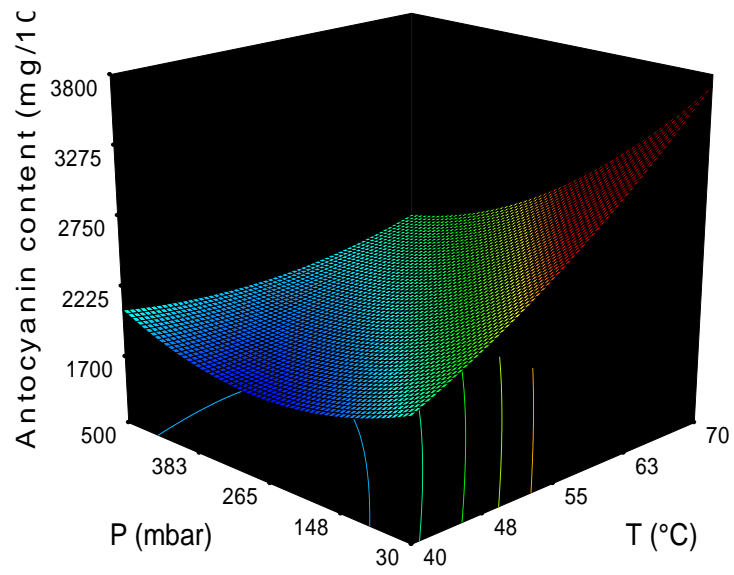
<b>Sposobnost rehidracije</b>					
Model	112,78	5	22,56	5,09	0,0275
Ostatak	31,04	7	4,43		
Nedostatak prilagođavanja	20,51	3	6,84	2,60	0,1897
Čista greška	10,53	4	2,63		
Ukupno	143,82	12			
$R^2 = 0,784$					
<b>Čvrstoća</b>					
Model	0,015	5	0,002982	0,63	0,6870
Ostatak	0,033	7	0,004767		
Nedostatak prilagođavanja	0,021	3	0,007140	2,39	0,2095
Čista greška	0,012	4	0,002988		
Ukupno	0,048	12			
$R^2 = 0,309$					

**Tabela 17. Model polinoma drugog reda korišćenog za opisivanje ispitivanih odziva (Y) vakuumski osušenih borovnica kao funkcija nezavisno promenljivih veličina (u smislu kodiranih vrednosti)**

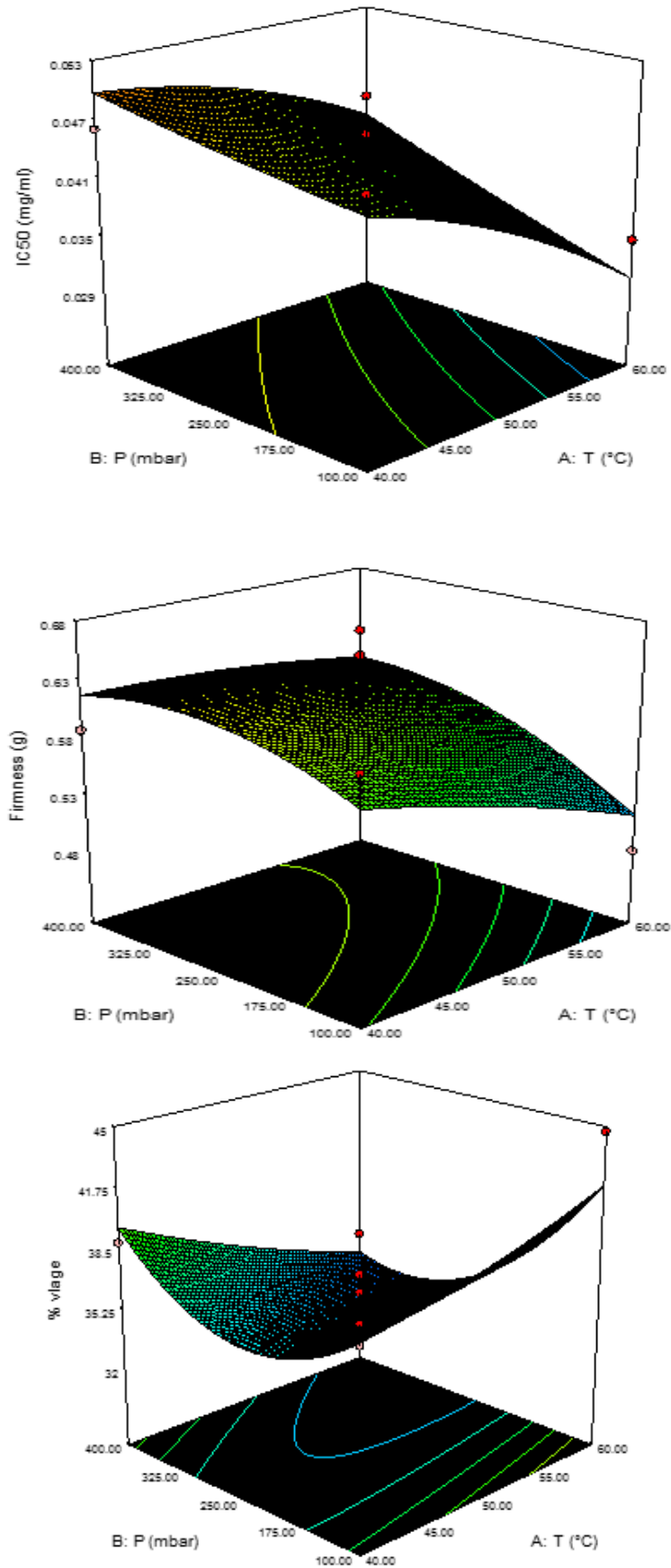
<b>Odziv</b>	<b>Model polinoma drugog reda</b>	<b>Jednačina</b>
Suva materija	$Y_1 = 81,46 + 4,77X_1 - 0,81X_2 + 1,48X_1^2 - 0,45X_2^2 - 1,43X_1X_2$	(31)
$a_w$ vrednost	$Y_2 = 0,732 - 0,086X_1 + 0,033X_2 - 0,012X_1^2 - 0,029X_2^2 + 0,043X_1X_2$	(32)
Ukupni fenoli	$Y_3 = 2,96 + 0,29X_1 - 0,25X_2 + 0,11X_1^2 - 0,11X_2^2 - 0,21X_1X_2$	(33)
Vitamin C	$Y_4 = 37,16 + 9,95X_1 - 1,73X_2 + 4,29X_1^2 + 0,55X_2^2 - 6,11X_1X_2$	(34)
IC <sub>50</sub>	$Y_5 = 0,043 - 0,006X_1 + 0,004X_2 - 0,002X_1^2 + 0,0002X_2^2 + 0,0014X_1X_2$	(35)
Sadržaj antocijana	$Y_6 = 1969,13 + 242,29X_1 - 193,05X_2 + 62,25X_1^2 + 115,42X_2^2 - 164,20X_1X_2$	(36)
Ukupna promena boje	$Y_7 = 91,00 - 0,81X_1 + 0,34X_2 - 0,31X_1^2 - 0,46X_2^2 + 0,26X_1X_2$	(37)
Sposobnost rehidracije	$Y_8 = 35,01 - 0,45X_1 - 1,56X_2 + 0,36X_1^2 + 3,21X_2^2 - 2,27X_1X_2$	(38)
Čvrstoća	$Y_9 = 0,605 - 0,024X_1 + 0,014X_2 - 0,005X_1^2 - 0,021X_2^2 + 0,014X_1X_2$	(39)

$X_1$ : temperatura sušenja;  $X_2$ : pritisak sušenja









Slika 21. Šematski prikaz dobijenih odziva kao funkcija pritiska i temperature sušenja borovnica u vakuumu.

## Optimizacija procesa sušenja

Primenom modela funkcije poželjnosti, dobijeni su optimalni uslovi sušenja borovnice u vakuumu, 60 °C i 100 mbar. Ispitivani odzivi izračunati su u ovoj tački i dobijeni su sledeći podaci: ukupni fenoli 3,70 mg CAE/100 g SM, vitamin C 59,79 mg/100 g SM, sadržaj monomernih antocijana 2746,33 mg/100 g SM, IC<sub>50</sub> 0,031 mg/ml, suva materija 89,50%, a<sub>w</sub> vrednost 0,527, ukupna promena boje 88,83 i čvrstoća 0,512 g.

## Modelovanje procesa sušenja

U tabeli 18 su prikazane srednje vrednosti koeficijenata determinacije ispitanih modela za opisivanje sušenja borovnice u vakuumu. Dobijeni rezultati numeričke aproksimacije eksperimentalnih podataka pokazuju veoma visoke vrednosti koeficijenata determinacije (R<sup>2</sup>) pa se može zaključiti da svi modeli pokazuju veoma dobro predviđanje kinetike sušenja borovnice u vakuumu.

Tabele sa vrednostima statističkih parametara 11 odabranih modela prikazane su u prilogu ove disertacije. Empirijski Midilli i sar. model pokazao je najbolje mogućnosti aproksimacije eksperimentalnih podataka dobijenih sušenjem borovnice u vakuumu jer je imao najveću vrednost koeficijenta determinacije (R<sup>2</sup>=0,999), a najlošije modifikovani Page-ov model (R<sup>2</sup>=0,993).

**Tabela 18.** Srednje vrednosti koeficijenata determinacije za svaki model između eksperimentalnih i izračunatih vrednosti vakuumski osušene borovnice.

R. br.	Naziv modela	R <sup>2</sup>
I	Page's model	0,999
II	Modified Henderson-Pabis's model	0,999
III	Peleg's model	0,991
IV	Newton	0,967
V	Modified Page	0,967
VI	Logarithmic	0,998
VII	Midilli i sar.	0,999
VIII	Wang & Singh	0,994
IX	Two-term	0,988
X	Two-term exponential	0,998
XI	Diffusion approximation	0,657

## ZAKLJUČAK

U okviru doktorske disertacije konstruisan je prototip laboratorijske vakuumske sušare, ispitan je uticaj parametara sušenja na karakteristike osušenog voća i na osnovu dobijenih podataka optimizovan je proces sušenja odabranog voća u vakuumu.

**Prototip laboratorijske vakuumske sušare.** Na osnovu definisanog projektnog zadatka, u saradnji sa firmom Kovačević inženjering, konstruisan je prototip laboratorijske vakuumske sušare za voće. U toku konstruisanja uređaja rešeni su svi tehnički problemi, među kojima su najvažniji merenje promene mase tokom sušenja, zaptivanje uređaja, zaštita vakuum pumpe od kondenzata, eliminisanje grešaka merenja itd. Prototip je zadovoljio sve zahteve projektnog zadatka. Primenjeno tehničko rešenje laboratorijske vakuumske sušare može se iskoristiti za proizvodnju poluindustrijskih vakuumskih sušara.

**Sušenje odabranih vrsta voća.** Sva ispitivanja vazana za sušenje u vakuumu sprovedena su na dve vrste voća proizvedenog na teritoriji Srbije: višnje (*Prunus cerasus*) i divlje borovnice (*Vaccinium myrtillus*). Višnja i borovnica su odabrane na osnovu zastupljenosti i značaja u proizvodnji voća u Srbiji. Voće je sušeno na odabranim kombinacijama nezavisno promenljivih veličina, temperature i pritiska. Plan eksperimenta napravljen je pomoću Design Expert programa. Višnje su sušene na temperaturama između 46 i 74 °C i pritiscima sušenja između 17 i 583 mbar, a borovnice pri kombinacijama temperature između 36 i 64 °C i pritisaka sušenja između

38 i 462 mbar. Dobijeni rezultati ukazuju da obe voćne vrste imaju potencijal za proizvodnju sušenog voća primenom tehnike sušenja u vakuumu.

**Analize osušenih proizvoda** obuhvatile su ispitivanja hemijskog sastava, antioksidativne aktivnosti, aktivnosti vode, promene površinske boje i teksture.

Ispitivanja hemijskog sastava osušenih uzoraka obuhvatila su spektrofotometrijsko određivanje sadržaja ukupnih monomernih antocijana, ukupnih fenola i kvantitativnu HPLC analizu vitamina C. Rezultati spektrofotometrijskih ispitivanja ukazuju da proces sušenja u vakuumu utiče na sadržaj ukupnih monomernih antocijana, ukupnih fenola i vitamina C u osušanim uzorcima.

U osušanim višnjama **sadržaj ukupnih fenola** je varirao od 314 do 1180 mg CAE/100 g SM, a u osušanim borovnicama od 2,15 do 3,64 mg CAE/100 g SM, u zavisnosti od primenjenih parametara sušenja. Na prinos ukupnih fenola statistički najznačajan uticaj imali su linearni članovi temperature ( $p = 0,0385$  kod višnje i  $p = 0,0058$  kod borovnice) i pritiska ( $p = 0,0119$  kod višnje i  $p = 0,0114$  kod borovnice).

Sadržaj ukupnih fenola u osušanim višnjama i borovnicama povećavao se sa povećanjem temperature sušenja do oko 65 °C, dok dalje povećanje temperature nije uzrokovalo značajniju promenu sadržaja ukupnih fenola u osušanim višnjama. Sadržaj ukupnih fenola u osušanim višnjama smanjivao se sa povećanjem pritiska sušenja do 300 mbar, a u osušanim borovnicama se povećavao sa povećanjem pritiska do 260 mbar. Dalje povećanje pritiska, iznad pomenutih granica, nije imalo uticaja na sadržaj ukupnih fenola.

Sadržaj **ukupnih monomernih antocijana** u osušanim višnjama kretao se u opsegu od 51,8 do 144 mg CGE/100 g SM, a kod borovnice od 1771,99 do 2753,45 mgCGE/100 g SM. Dobijeni rezultati ispitivanja ukazuju da na povišenima temperaturama i većem apsolutnom pritisku sušenja dolazi do povećane degradacije antocijana.

Kvalitativnom HPLC analizom utvrđeno je da se sadržaj **vitamina C** u osušanim uzorcima višnje kretao od 9,36 do 17,8 mg/100 g SM, a borovnice od 28,15 do 67,59 mg/100 g SM. Sadržaj vitamina C u osušanim višnjama je opadao sa povećanjem temperature i pritiska sušenja, što je očekivano s obzirom na osetljivost vitamina C na povišenu temperaturu i oksidaciju. Model prinosa vitamina C u osušanim uzorcima borovnica u zavisnosti od temperature i pritiska imao je statistički značajan nedostatak prilagođavanja ( $p = 0,0111$ ) pa se dobijeni model nije mogao iskoristiti za precizno predviđanje sadržaja vitamina C u osušanim uzorcima.

Primenom spektrofotometrijske metode ispitana je **antioksidativna aktivnost** osušenih uzoraka. Antioksidativna aktivnost izražena je kao  $IC_{50}$  vrednost. Antioksidativna aktivnost osušenih uzoraka bila je proporcionalna sadržaju ukupnih fenola i vitamina C. Tako je uzorak osušene višnje sa najvećim sadržajem ukupnih fenola (1180 mg CAE/100 SM) imao najnižu  $IC_{50}$  vrednost (1,39 mg/ml) i time najveću antioksidativnu aktivnost. Statistička analiza pokazala je da je linearni član temperature sušenja imao najznačajniji uticaj na  $IC_{50}$  vrednost ( $p = 0,0037$  kod višnje,  $p = 0,0094$  kod borovnice).

**Aktivnost vode** uzoraka višnje osušenih u ovom radu bila je između 0,434 i 0,916, a borovnice između 0,434 i 0,822. Aktivnost vode osušenih višanja značajno je zavisila od linearnog člana temperature sušenja ( $p = 0,0005$ ) i pritiska ( $p = 0,0103$ ), i kvadratnog člana pritiska ( $p = 0,0009$ ). Koeficijent korelacije prilagođenog modela aktivnosti vode u osušanim uzorcima borovnice bio je nizak ( $R^2 = 0,515$ ) i nije zadovoljavajuće predstavljao eksperimentalno dobijene podatke. S druge strane, prilagođeni model aktivnosti vode kod osušenih višanja je veoma dobro predstavio eksperimentalne podatke sa visokim koeficijentom korelacije ( $R^2 = 0,9606$ ).

Linearni član temperature i pritiska sušenja i kvadratni član pritiska sa  $p < 0,0001$  značajno su uticali na **teksturalne karakteristike** osušene višnje. Čvrstoća osušenih višanja se povećavala sa povećanjem temperature sušenja, dok je povećanje pritiska do 350 mbar uticalo na smanjenje čvrstoće. Dalje povećanje nije pokazalo bilo kakve promene u čvrstoći uzoraka. Prilagođeni model je veoma dobro predstavio eksperimentalne podatke sa visokim koeficijentom korelacije ( $R^2 = 0,9851$ ) kod osušenih uzoraka višnje, dok je koeficijentom korelacije prilagođenog modela prinosa čvrstoće osušenih uzoraka borovnice bio nizak ( $R^2 = 0,3090$ ), pa se dobijeni matematički model ne može iskoristiti za predviđanje čvrstoće uzorka.

Ukupna promena **površinske boje** ( $\Delta E$ ) uzoraka višnje osušenih u vakuumu varirala je od 49,5 do 58,5, a osušenih uzoraka borovnice od 88,33 do 91,88, u zavisnosti od primenjene temperature i pritiska sušenja. Linearni članovi temperature ( $p = 0,0076$ ) i pritiska ( $p = 0,0288$ ) značajno su uticali na boju uzoraka višnje. Linearni član temperature sušenja borovnice ( $p = 0,0096$ ) imao je značajan uticaj na boju uzoraka, dok linearni i kvadratni član ispitivanih parametara, i interakcija između temperature i pritiska nisu imali značajan uticaj na promenu boje osušenih uzoraka borovnice.

**Optimizacija** procesa sušenja višnje i borovnice u vakuumu urađena je korišćenjem metode odzivnih površina. Cilj optimizacije bio je pronalaženje najboljih vrednosti parametara sušenja, temperature i pritiska, u cilju očuvanja biološki vrednih komponenata voća, minimalne promene površinske boje i teksture, uz istovremeno postizanje zadovoljavajuće održivosti proizvoda.

Optimalni uslovi sušenja voća dobijeni su primenom metoda funkcije poželjnosti. Optimalni uslovi sušenja višnje bili su 54,03 °C i 148,16 mbar, a borovnice 60 °C i 100 mbar.

Ispitivani odzivi su izračunati u ovoj tački za sušenu višnju i iznosili su: 744 mg CAE/100 g SM za ukupne fenole, 11,4 mg/100 g SM za vitamin C, 125 mg/100 g SM za monomerne antocijane, 3,23 mg CGE/ml za IC<sub>50</sub>, 70,7% za suhu materiju, 0,646 za a<sub>w</sub> vrednost, 52,6 za ukupnu promenu boje i 3395,4 g za čvrstoću.

Ispitivani odzivi sušenja borovnica su izračunati za dobijene optimalne uslove i iznosili su: ukupni fenoli 3,70 mg CAE/100 g SM, vitamin C 59,79 mg/100 g SM, sadržaj monomernih antocijana 2746,33 mg CGE/100 g SM, IC<sub>50</sub> 0,031 mg/ml, suva materija 89,50%, a<sub>w</sub> vrednost 0,527, ukupna promena boje 88,83 i čvrstoća 0,512 g.

Za aproksimaciju eksperimentalnih podataka sušenja upotrebljeno je 11 matematičkih modela: Page's model, Modified Henderson-Pabis's model, Peleg's model, Newton, Modified Page, Logarithmic, Midilli i sar., Wang & Singh, Two-term, Two-term exponential i Diffusion approximation model. Za numeričku aproksimaciju eksperimentalnih podataka dobijene su vrlo visoke vrednosti koeficijenata korelacije (R<sup>2</sup>). Model two-term najbolje je aproksimirao eksperimentalne podatke dobijene sušenjem višnje u vakuumu (R<sup>2</sup> = 0,997), a Diffusion approximation model najslabije (R<sup>2</sup> = 0,831). Empirijski Midilli i sar. model pokazao je najbolje mogućnosti aproksimacije procesa sušenja borovnice u vakuumu (R<sup>2</sup>=0,999), a modifikovani Page-ov model (R<sup>2</sup>=0,993) najlošije.

Voće ima značajnu ulogu u ljudskoj ishrani, a pojedini sastojci voća mogu imati i zaštitnu ulogu u prevenciji bolesti. Da bi ovi sastojci voća zadržali svoju funkciju moraju se sačuvati u obliku u kome se nalaze u svežem voću. Prisustvo ovih komponenata u prerađenim proizvodima jedan je od osnovnih zahteva potrošača. Za tehnologiju sušenja ovo znači da će samo metode koje zadovoljavaju ove zahteve imati dobru perspektivu primene. Upravo ka očuvaju nutritivno vrednih komponenata voća trebalo bi da se usmere dalja istraživanja tehnologije sušenja voća. Potrošnju energije i aspekte životne sredine takođe bi trebalo uzeti u razmatranje pri razmatranju novih tehnika sušenja.

Rezultati izloženi u ovom radu pokazali su da se korišćenjem tehnike vakuumskog sušenja može sačuvati nutritivna vrednost i kvalitet svežeg voća. Korišćenjem ove tehnike izbegava se oštećenje sastojaka osetljivih na toplotu (vitamini, antocijani i fenoli itd.), potamnivanje proizvoda, gubitak sposobnosti rehidracije, a promena boje i teksture su svedene na prihvatljiv nivo, uz istovremeno postizanje zadovoljavajuće održivosti osušenog proizvoda.

Poboljšanje postojećih, kao i uvođenje novih tehnika sušenja jednako su važni aspekti istraživanja tehnologije sušenja. U ovoj disertaciji definisano je tehničko rešenje prototipa laboratorijske vakuumske sušare, a izloženi rezultati sušenja voća daju nova saznanja o uticaju parametara procesa sušenja na osetljive komponente voća i time konačan kvalitet osušenog proizvoda.

## LITERATURA

Aguilar-Jimenez, C.E., Tolon-Becerra, A., Lastra-Bravo, X. B. (2011). Agri-environmental evaluation of traditional and alternative corn production systems in Chiapas, Mexico. *Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics* 112, 71-86.

Akpınar E. K., Bicer Y., Cetinkaya F. (2006). Modelling of thin layer drying of parsley leaves in a convective dryer and under open sun. *Journal of Food Engineering* 75, 308-315.

Akpınar, E. K. & Bicer, Y. (2007). Modelling of thin layer drying kinetics of sour cherry in a solar dryer and under open sun. *Journal of Scientific & Industrial Research* 66, 764-771.

Alibas, I. (2007). Energy consumption and colour characteristics of nettle leaves during microwave, vacuum and convective drying. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 96, 495–502.

Anderson-Cook, C.M., Borror, C.M., Montgomery, D.C. (2009). Response Surface Design Evaluation and Comparison. *Journal of Statistical Planning and Inference* 139, 629-641.

Babić, Lj., Babić, M., Pavkov, I. (2007). Osmotsko i konvektivno sušenje voća. *Savremena poljoprivreda* 56, 6, 304–313.



Banga, J. R., Balsa-Canto, E., Moles C. G., Alonso, A. A. (2003). Dynamic optimization of bioreactors: a review. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 69A, 257-265.

Barbosa-Cánovas, V. G., Fontana, Jr. J. A., Schmidt, J. S., Labuza, P. T. (2007). *Water Activity in Foods - Fundamentals and Applications*, John Wiley & Sons, Iowa.

Barrett, D. M., Somogyi, L., Ramaswamy, H. (2004). *Processing fruits, Science and Technology*, London: CRC Press.

Baş, D., Boyacı, I.H. (2007). Modeling and optimization I. Usability of response surface methodology, *Journal of Food Engineering*, 78, 836–45.

Belitz H.D., Grosch W. (1987). *Food Chemistry*. Springer - Verlag, Berlin - Heidelberg.

Belitz, H.D., Grosch W., Schieberle P. (2009). *Food Chemistry*. 4th revisited and extended Edition. New York: Springer.

Bezerra, M.A., Erthal, R., Santelli, R.E., Oliveiraa, E.P., Villar, L.S., Escaleiraa, L.A. (2008). Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta* 76, 965–977.

Box, G. E. P., Wilson, K. B. (1951). On the experimental attainment of optimum conditions, *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, 13, 1, 1-45.

Braziello A., Adiletta G., Russo P., Crescitelli S., Albanese D., Matteo M. D. (2013). *Journal of Food Engineering* 114, 99-105.

Bushway, R.J., Gann, D.F., Cook, W.P., Bushway, A.A. (2006). Mineral and vitamin C content in lowbush blueberries (*Vaccinium angustifolium* Ait.), *Journal of Food Science*, 48, 6, 1878-1878.

Candelaria, N. M., Raymundo, L. C. (1994). Comparative drying and reconstitution characteristics of some fruits and vegetables. *Philippine-Agriculturist* 77(3), 321-326.

Castañeda-Ovando, A., Pacheco-Hernandez, Ma.d.L., Paez-Hernandez, Ma.E., Rodriguez, J.A., Galan-Vidal, C.A. (2009). Chemical studies of anthocyanins: a review. *Food Chemistry*, 113, 4, 859-871.

Chakraborty, R., Bera, M., Mukhopadhyay, P. & Bhattacharya, P. (2011). Prediction of optimal conditions of infrared assisted freeze-drying of aloe vera (*Aloe barbadensis*) using response surface methodology. *Separation and Purification Technology* 80, 375-384.

Chandra, A., Nair, M. G. & Iezzoni, A. (1992) Evaluation and characterization of the anthocyanin pigments in tart cherries (*Prunus cerasus* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 40, 967-969.

Chaovanalikit, A., Wrolstad, R. E. (2004). Anthocyanin and Polyphenolic Composition of Fresh and Processed Cherries. *Journal of Food Science*, 69, 73-83.

De Belie N., Laustsen, A. M., Martens, M., Bro, R., De Baerdemaeker, J. (2002). Use of physico-chemical methods for assessment of sensory changes in carrot texture and sweetness during cooking, *Journal of Texture Studies*, 33, 5, 367-388.

Diamante, L. M., Yamaguchi, Y. (2012) Response surface methodology for optimisation of hot air drying of blackcurrant concentrate infused apple cubes. *International Food Research Journal* 19, 353-362.

Dóka, O., Ficzek, G., Bicanic, D., Spruijt, R., Luterotti, S., Tóth, M., Buijnsters, G.J., Végvári, Gy. (2011). Direct photothermal techniques for rapid quantification of total anthocyanin content in sour cherry cultivars. *Talanta* 84, 341-346.

Doymaz I. (2007). Influence of pretreatment solution on the drying of sour cherry. *Journal of Food Engineering*, 78, 2, 591-596.

Đilas, S., Čanadanović-Brunet, J., Tumbas, V. (2008). Hemija hrane, praktikum sa radnom sveskom. Novi Sad: Tehnološki fakultet.

Ebert, G. (2008). Uzgoj borovnica i brusnica. Požega: Gaudeamus.

Erbay, Z., Icier, F. (2009). Optimization of hot air drying of olive leaves using response surface methodology. *Journal of Food Engineering*, 91, 533-541.

Erdman W.J., Balentine D., Arab L., Beecher G., Dwyer T.J., Folts J., Harnly J., Hollman P., Keen L.C., Mazza G., Messina M., Scalbert A., Vita J., Williamson G., Burrowes J. (2007). Flavonoids and heart health: proceedings of the ILSI North America Flavonoids Workshop, May 31-June 1, 2005, Washington, DC. *The Journal of Nutrition*, 718-737.

Eren, I., Kaymak-Ertekin F. (2007). Optimization of osmotic dehydration of potato using response surface methodology. *Journal of Food Engineering*, 79, 344-352.

Espin, J. C., Soler-Rivas, C. & Wichers, H. J. (2000). Characterization of the total free radical scavenger capacity of vegetable oils and oil fractions using 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl radical. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 48, 648-656.

Filimon, R., Niculaua, M., Sârbu, S., Filimon, R. & Arion, C. (2011a). Determination of chromatic characteristics of the hydroalcoholic extracts obtained from the fruits of some cherry and sour cherry varieties, *Lucrări științifice, seria Agronomie* 54, 1, 124-129.

Filimon, R., Beceanu, D., Niculaua, M. & Arion, C. (2011b). Study on the anthocyanin content of some sour cherry varieties grown in Iași area, Romania. *Cercetări Agronomice în Moldova*, 44, 1 (145), 81-91.

Francis, F., Sabu, A., Nampoothiri, K. M., Ramachandran, S., Ghosh, S, Szakacs, G., Pandey, A. (2003). Use of response surface methodology for optimizing process parameters for the production of  $\alpha$ -amylase by *Aspergillus oryzae*. *Biochemical Engineering Journal* 15, 107-115.

Fuleki, T., Francis, F.J. (1968). Quantitative methods for anthocyanins. 1. Extraction and determination of total anthocyanin in cranberries. *Journal of Food Science*, 33, 72-77.

Funebo, T. & Ohlsson, T (1998). Microwave-assisted air dehydration of apple and mushrooms. *Journal of Food Engineering* 38, 353-367.

Gao, L., Mazza, G (1995). Characterization, quantitation, and distribution of anthocyanins and colorless phenolics in sweet cherries. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 43, 343-346.

Giovanelli G., Buratti S. (2009). Comparison of polyphenolic composition and antioxidant activity of wild Italian blueberries and some cultivated varieties, *Food Chemistry*, 112, 903-8.

Giusti, M. M., Wrolstad, R. E. (2001). Characterization and measurement of anthocyanins by UV-Visible spectroscopy. In Wrolstad, E. R., Acree, E. T., An, H. & Decker, A. E. (Eds.), *Current Protocols in Food Analytical Chemistry (F1.2.1.-1.2.13)*. New York: John Wiley & Sons.

Gonçalves, B., Landbo, A.-K., Knudsen, D., Silva, A. P., Moutinho-Pereira, J., Rosa, E. & Meyer, A. S. (2004). Effect of ripeness and postharvest storage on the phenolic profiles of cherries (*Prunus avium* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 52, 523-530.

González-Gómez, D., Lozano, M., Fernández-León, M. F., Bernalte, M. J., Ayuso, M. C., & Rodríguez, A. B. (2010). Sweet cherry phytochemicals: Identification and characterization by HPLC-DAD/ESI-MS in sweet-cherry grown in Valle del Jerte (Spain). *Journal of Food Composition and Analysis* 23, 533-539.

Grabowski, S., Marcotte, M., Ramaswamy, H. (2005). *Dehydrated Vegetables: Principles and Applications* in Hui, Y. H., Sherkat, F. (ed.): *Handbook of Food Science, Technology, and Engineering - 4 Volume*. CRC Press.

Harker, F. R., Maindonald, J., Murray, S. H. (2002). Sensory interpretation of instrumental measurements 1: Texture of apple fruit. *Postharvest Biology and Technology* 24, 225-239.

Heinonen, I. M., Meyer, A. S. (2002). *Antioxidants in fruits, berries and vegetables* in Jongen, W. M. F. (ed.). *Fruit and vegetable processing*. Cambridge England: CRC Press.

Ivančević S., Mitrović D., Tošić D. (2003). Liofilization: New treatment of preserving food. *Traktori i pogonske mašine*, 8, 4, 198-202.

Janković, M., Mašović, S., Bukvić, B., Vukosavljević, P. (2004). Konzervisanje malina liofilizacijom, *Jugoslovensko voćarstvo* 38, 147-148, 199-207.

Jašić, M. (2007). *Tehnologija voća i povrća - I dio*. Tuzla: Tehnološki fakultet.

Jayaraman, K. S., Das Gupta, D. K. (2006). *Drying of Fruits and Vegetables in: Mujumdar, A. S., Handbook of Industrial Drying*. CRC Press.

Jelen, P. (2005). Foods, 2. Food Technology in Wiley, J. (ed.): Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley. 8-13.

Joshi, A. P. K., Rupasinghe, H. P. V. & Khanizadeh S. (2011). Impact of drying process on bioactive phenolics, vitamin C and antioxidant capacity of red-fleshed apple slice. *Journal of Food Processing and Preservation*, 35, 4, 453-457.

Julkunen-Tiitto, R. & Sorsa, S. (2001). Testing the effects of drying methods on willow flavonoids, tannins and salicylates. *Journal of Chemical Ecology* 27, 4, 779-789.

Kähkönen, M. P., Hopia A. I., Vuorela, H. J., Rauha, J. P., Pihlaja, K., Kujala, T. S. & Heinonen, M. (1999). Antioxidant activity of plant extracts containing phenolic compounds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47, 3954-3962.

Kalt, W., Forney, F.C., Martin, A., Prior, L.R. (1999). Antioxidant capacity, vitamin C, phenolics, and anthocyanins after fresh storage of small fruits, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47, 4638-44.

Karslon, P. (1993). *Biokemija*. Zagreb: Školska knjiga.

Khoo, M. G., Clausen, R. M., Pedersen, H. B. & Larsen, E. (2011) Bioactivity and total phenolic content of 34 sour cherry cultivars. *Journal of Food Composition and Analysis*, 24, 772-776.

Khraisheh, M.A.M., McMinn, W.A.M., Magee, T.R.A. (2004). Quality and structural changes in starchy foods during microwave and convective drying. *Food Research International* 37, 497–503.

Kim, D. O, Heo, J. H., Kim, J. Y., Yang, S. H. & Lee, Y. C. (2005). Sweet and sour cherry phenolics and their protective effects on neuronal cells. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53, 9921-9927.

Kirakosyan, A., Seymour, M. E., Urcuyo Llanes, E. D., Kaufman, B. P. & Bolling, F. S. (2009). Chemical profile and antioxidant capacities of tart cherry products. *Food Chemistry* 115, 20-25.

Klewicki, R., Konopacka, D., Uczciwek, M., Irzyniec, Z., Piasecka, E. & Bonazzi, C. (2009). Sorption isotherms for osmo-convectively-dried and osmo-freeze-dried apple, sour cherry, and blackcurrant. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 84, 6 (ISAFRUIT Special Issue), 75-79.

Konić-Ristić, A., Šavikin, K., Zdunić, G., Janković, T., Juranic, Z., Menković, N., Stanković, I. (2011). Biological activity and chemical composition of different berry juices, *Food Chemistry*, 125, 1412-17.

Kostić, V., Kostić, Lj. (2005) *Hemijsko tehnološki leksikon*. Beograd: Građevinska knjiga.

Krokida, M.K., Karathanos, V. T., Maroulis, Z. B. (2000) Compression analysis of dehydrated agricultural products. *Drying Technology* 18, 395-408.

Krokida, M.K., Tsami, E., Maroulis, Z.B. (1998). Kinetics on colour changes during drying of some fruits and vegetables. *Drying Technology* 16(3-5), 667-685.

Krokida, M.K., Marinos-Kouris, D. (2003). Rehydration kinetics of dehydrated products. *Journal of Food Engineering* 57, 1-7.

Krokida, M.K., Philippopoulos, C. (2005). Rehydration of dehydrated foods. *Drying Technology* 23, 799-830.

Kunzen, H., Kabbert, R. & Gloyna, D. (1999). Aspects of material science in food processing: changes in plant cell walls of fruits and vegetables. *Zeitschrift fur Lebensmitteluntersuchung und Forschung A*, 208, 233-250.

Lamikanra, O. (2002). *Fresh-cut fruits and vegetables: science, technology, and market*. USA: CRC Press.

Lee, H. S. (2000). HPLC analysis of phenolic compounds. In M. L. Nollet (Ed.), *Food Analysis by HPLC (1st Ed.)* (pp. 775-823). New York: Marcel Dekker, Inc.

Lewicki, P.P. (2006). Design of hot air drying for better foods. *Trends in Food Science & Technology*, 17, 153-163.

Lewicki, P.P. (1998). Some remarks on rehydration of dried foods. *Journal of Food Engineering* 36, 81-87.

Linden, G., Lorient, D. (1999). *New ingredients in food processing*. Cambridge: CRC Press.

Liu, H.R. (2004). Potential synergy of phytochemicals in cancer prevention: mechanism of action. *International Research Conference on Food, Nutrition, and Cancer. The Journal of Nutrition*, 3479-3485.

Lohachoopol, V., Mulholland, M., Srzednicki, G., Craske, J. (2008). Determination of anthocyanins in various cultivars of highbush and rabbiteye blueberries, *Food Chemistry*, 111, 249-54.

Lozano, J. E. (2006). *Fruit Manufacturing*. New York: Springer.

Madamba, P. S. (2002). The response surface methodology: an application to optimize dehydration operations of selected agricultural crops. *Lebensmittel - Wissenschaft und Technologie*, 35, 584-592.

Marković, V. (2009). *Tehnologija proizvodnje suve šljive bez koštica*, Novi Sad: Samostalno izdanje.

Martinić, E., (2002). *Višnja*. Beograd: Vizartis.

Mascan, M. (2001). Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying, *Journal of Food Engineering* 48, 169-75.

Mašović, S. M., Janković, M. A., Radulović, E. P. (2000). Ispitivanje promena kvaliteta jabuka konzervisanih sušenjem, sušenjem - smrzavanjem i liofilizacijom. *Acta Periodica Technologica*, 31, 213-219.

Melicháčová, S., Timoracká, M., Bystrická, J., Vollmannová, A. & Čéry, J. (2010). Relation of total antiradical activity and total polyphenol content of sweet cherries (*Prunus avium* L.) and tart cherries (*Prunus cerasus* L.). *Acta agriculturae Slovenica*, 95, 1, 21-28.

Montgomery, D. C. (1991). *Design and Analysis of Experiments*. New York: John Wiley & Sons, Inc., pp. 521-567.

Montgomery, D. C. (2005). *Design and Analysis of Experiments: Response surface method and designs*. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc.

Motavali, A., Najafi, G. H., Abbasi, S., Minaei, S. & Ghaderi, A. (2011). Microwave-vacuum drying of sour cherry: comparison of mathematical models and artificial neural networks. *Journal of Food Science and Technology*, 50, 4, pp. 714-722.

Mwithiga G., Olwal J. O. (2005). The drying kinetics of kale (*Brassica Oleraceae*) in a convective hot air dryer, *Journal of Food Engineering* 71, 373-378.

Mwithiga G., Olwal J. O. (2005). The drying kinetics of kale (*Brassica Oleraceae*) in a convective hot air dryer, *Journal of Food Engineering* 71, 373-378.

Myers, R. H., Montgomery, D.C. (2002). *Response Surface Methodology*, 2nd ed., John Wiley and Sons Inc., New York.

Nieto-Sandoval J.M., Fernández-López J.A., Almela L., Muñoz J.A. (1999). Dependence between apparent color and extractable color in paprika. *Color Research and Application*, 24, 2, 93-97.

Niketić-Aleksić, G. (1982). *Tehnologija voća i povrća*. Beograd: Poljoprivredni fakultet.

Oehlert G.W. (2000). *Design and analysis of experiments: Response surface design*, New York: W.H. Freeman and Company.

Osuna-Garcia J.A., Wall M.M., Waddell C.A. (1997). Natural antioxidants for preventing color loss in stored paprika. *Journal of Food Science*, 62, 5, 1017-1021.

Piccolella, S., Fiorentino, A., Pacifico, S., D'abrosca, B., Uzzo, P. & Monaco, P. (2008). Antioxidant properties of sour cherries (*Prunus cerasus* L.): role of colorless phytochemicals from the methanolic extract of ripe fruits. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56, 1928–1935.

Piga A., Del Caro A. & Corda G. (2003). From plums to prunes: influence of drying parameters on polyphenols and antioxidant activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 51, 3675-3681.

Pravilnik o kvalitetu proizvoda od voća, povrća i pečurki i pektinskih preparata (Sl. list SFRJ, 1/79)

Pravilnik o metodama uzimanja uzoraka i vršenja hemijskih i fizičkih analiza radi kontrole kvaliteta proizvoda od voća i povrća (Sl. list SFRJ, 29/83)

Prior, L. R., Cao, G., Martin, A., Sofic, E. , McEwen, J. , O'Brien, C. , Lischner, N. , Ehlenfeldt, M., Kalt, W., Krewer, G., Mainland, C. M. (1998). Antioxidant capacity as influenced by total phenolic and anthocyanin content, maturity, and variety of *Vaccinium* species, *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 46, 2686-93.

Privredna Komora Srbije (PKS), 2013, pks.rs

Raimbault, M. (1998). General and microbiological aspects of solid substrate fermentation. *EJB Electronic Journal of Biotechnology* 1, 3, 1-15.

Santos, P. H. S., Silva, M. A. (2008). Retention of vitamin C in drying processes of fruits and vegetables - A review. *Drying Technology*, 26, 1421-1437.

Schneid, S. C. (2009). Investigation of Novel Process Analytical Technology (PAT) Tools for Use in Freeze-Drying Processes. Doktorgrades, Der Naturwissenschaftlichen Fakultät der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, München.

Schobinger, U. (2001). *Frucht- und Gemüsesäfte*. Berlin: Ulmer.

Schwartzberg, H. G., Rao M. A. (1990). *Biotechnology and Food Process Engineering*. New York: Marcel Dekker Inc.

Seeram, P. N., Momin, A. R., Nair, G. M. & Bourquin, D. L. (2001). Cyclooxygenase inhibitory and antioxidant cyanidin glycosides in cherries and berries. *Phytomedicine*, 8, 5, 362-369.

Sellappan, S., Akoh, C.C., Krewer, G. (2002). Phenolic compounds and antioxidant capacity of georgia-grown blueberries and blackberries, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50, 2432–38.

Simal S., Femenia A., Garau M.C., Rosselló C. (2005). Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit, *Journal of Food Engineering* 66, 323-328.

Singleton, V.L. & Rossi, J.A. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, 16, 144-158.

Smith, M.A.L., Marley, K.A., Seigler, D., Singletary, K.W., Meline, B. (2000). Bioactive properties of wild blueberry fruits, *Journal of Food Science*, 65, 352-56.

- Sovilj, M. (2004). Difuzione operacije. Novi Sad: Tehnološki fakultet.
- Soysal Y., Öztekin S., Eren Ö. (2006). Microwave drying of parsley: Modelling, Kinetics, and Energy Aspects, *Biosystems Engineering* 93, 403-413.
- Sredojević, Z. (2011). Economic evaluation of sweet and sour cherry production in Serbia. III savetovanje "Inovacije u voćarstvu" - Unapređenje proizvodnje trešnje i višnje. Zbornik radova. Univerzitet u Beogradu, Poljoprivredni fakultet, 5-20.
- Sriamornsak, P. (2003). Chemistry of Pectin and Its Pharmaceutical Uses: A Review. *Silpakorn University International Journal*, 3, 1-2, 206-227.
- Stančić, P. (1982). Priručnik za industrijsku proizvodnju sušenog voća i povrća. Beograd: Književne novine.
- Stajčić, S.M., Tepić, A.N., Djilas, S.M., Šumić, Z.M., Čanadanović-Brunet, J.M., Četković, G.S., Vulić, J.J., Tumbas, V.T. (2012). Chemical composition and antioxidant activity of berry fruits. *Acta Periodica Technologica*, 43, 93-105.
- Škrinjar, M., Govedarica, M., Dimić, G., Jarak, M., Milošević, N. (1996). Mikrobiologija voća i proizvoda od voća. Novi Sad: Tehnološki fakultet.
- Šulc, D., Ćirić, D., Vujičić, B., Bardić, Ž., Curaković, M., & Gvozdenović, J. (1976). Tehnologija proizvodnje bistrih i kašastih koncentrata od voća i povrća. Novi Sad: Tehnološki fakultet.
- Tepić A. (2005): Promena boje začinske mlevene paprike i zaštitno delovanje antioksidanasa. Magistarski rad, Novi Sad: Tehnološki fakultet.
- Tepić, A. (2012). Bojene materije voća i povrća. Novi Sad: Tehnološki fakultet.
- Tiwari B.K., O'Donnell C.P., Patras A., Cullen P.J. (2008). Anthocyanin and ascorbic acid degradation in sonicated strawberry juice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56, 21, 10071-7.
- Tiwari, B.K., Patrasb, A., Bruntonb, N., Cullenc, P.J., O'Donnella, C.P. (2010). Effect of ultrasound processing on anthocyanins and color of red grape juice, *Ultrasonics Sonochemistry*, 17, 3, 598-604.
- Topić R. M., Topić G. R., Aćimović, D. (2001). Justify using of sublimation drying with aspect of characteristics and energy demand value. *Časopis za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi (PTEP)*, 5, 3, 81-84.
- Tumbas, V. (2010). Antiradikalska i antiproliferativna aktivnost ekstrakata odabranih biljaka iz familija *Rosaceae* i *Ericaceae*. Doktorska disertacija, Novi Sad: Tehnološki fakultet.
- Vereš, M. (2004). Principi konzervisanja namirnica. Beograd: Poljoprivredni fakultet.
- von Elbe, J. H., Schwartz S. J. (1996): *Food Chemistry, Third Edition*, Fennema, R. O. (Ed.). Marcel Dekker, Inc.



Vračar, L. (2001). Priručnik za kontrolu kvaliteta svežeg i prerađenog voća, povrća i pečurki i osvežavajućih bezalkoholnih pića. Novi Sad: Tehnološki fakultet.

Vračar, Lj. (2012). Tehnologija zamrzavanja voća. Novi Sad: Tehnološki fakultet.

Vračar, Lj., Tepić, A., Letić, A., Palinkaš, M. (2004). Sušenje maline postupkom liofilizacije, *Jugoslovensko voćarstvo* 38, 147-148, 209-214.

Vulić, J.J., Tumbas, V.T., Savatović, S.M., Dilas, S.M., Četković, G.S., Čanadanović-Brunet, J.M. (2011). Polyphenolic content and antioxidant activity of the four berry fruits pomace extracts. *Acta Periodica Technologica*, 42, 271-279.

Vullioud, M., Márqueza, C. A. & Michelis, A. (2004). Desorption isotherms for sweet and sour cherry. *Journal of Food Engineering*, 63, 1, 15-19.

Walker, A., Larkin, A., Cormack, J. (2008). *Reader's Digestov vodič kroz vitamine, minerale i suplemente*, Beograd: Mladinska knjiga.

Wang, H., Nair, M. G., Strasburg, G. M., Booren, A. M. & Gray, J. I. (1999). Antioxidant polyphenols from tart cherries (*Prunus cerasus*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47, 840-844.

Wolti-Chanes, J., Bermúdez, D., Valdez-Fragoso, A., Mújica-Paz, H., Alzamora, S.M., (2005). Dehydrated Vegetables: Principles and Applications in Hui, Y. H., Sherkat, F. (ed.): *Handbook of Food Science, Technology, and Engineering - 4 Volume*. CRC Press. pp. 1-61.

Yadav, S., Yadav, P. K., Yadav, D., Yadav, K. D. (2009). Pectin lyase: A review. *Process Biochemistry* 44, 1-10.

You, Q., Wang B., Chen F., Huand Z., Wang, X., Luo, G.P. (2011). Comparison of anthocyanins and phenolics in organically and conventionally grown blueberries in selected cultivars, *Food Chemistry*, 125, 201-208.

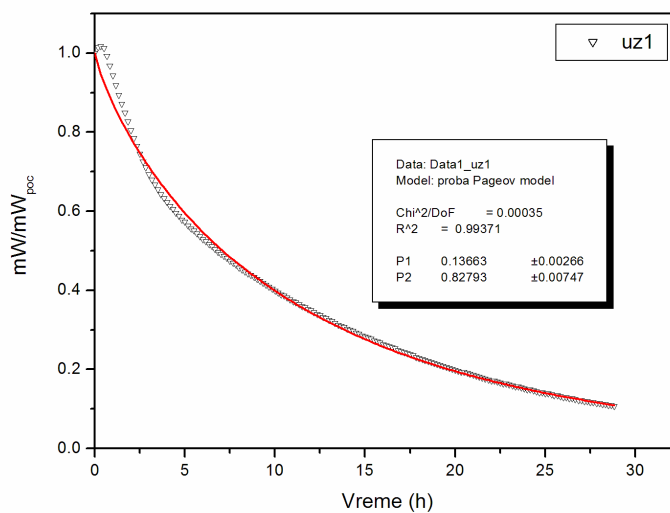
Zhangjing, C. & Fred, M. L. (2001). Vacuum drying of small wood components at room temperature. *Forest Products Journal*, 51, 55-57.

## **PRILOG**

## Rezultati modelovanja procesa vakuumskeg sušenja višnje

Tabela 19. Procenjeni parametri matematičkog Page-ovog modela i koeficijenata determinacije između eksperimentalnih i izračunatih vrednosti za vakuumsko sušenje višnje

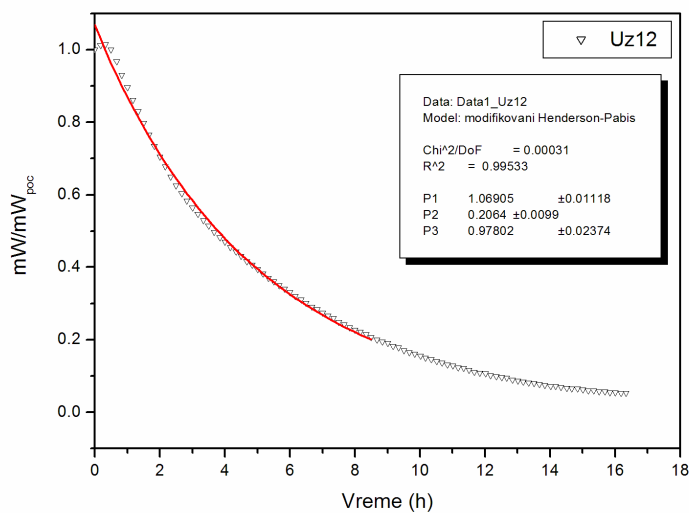
Uzorak	t (°C)–P (mbar)	P1	P2	R2
1	60-300	0,13663	0,82793	0,99371
2	60-300	0,15957	0,82492	0,99060
3	46-300	0,09307	0,79202	0,99060
4	74-300	0,22354	0,96745	0,99264
5	50-500	0,06637	0,92923	0,98728
6	60-300	0,22140	0,78508	0,99135
7	50-100	0,15264	0,92747	0,98770
8	70-100	0,41455	0,79051	0,98240
9	60-20	0,75759	0,90552	0,97141
10	60-580	0,08411	1,05277	0,98664
11	60-300	0,28629	0,75451	0,98684
12	70-500	0,15703	1,09886	0,99087
13	60-300	0,21775	0,75583	0,97628



Slika 22. Poređenje eksperimentalnih vrednosti i vrednosti Pageovog modela za uzorak 1

Tabela 20. Procenjeni parametri modifikovanog Henderson-Pabis-ovog modela i koeficijenata korelacije između eksperimentalnih i izračunatih vrednosti za vakuumsko sušenje višnje

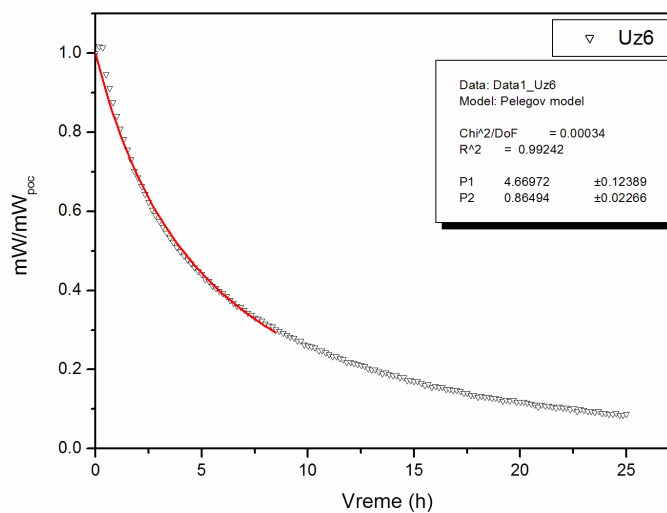
Uzorak	t (°C)–P (mbar)	P1	P2	P3	R2
1	60-300	1,07559	0,16867	0,80032	0,98615
2	60-300	1,0731	0,17730	0,84887	0,98996
3	46-300	1,05387	0,11647	0,75775	0,98393
4	74-300	1,08508	0,28024	0,88642	0,99189
5	50-500	1,03628	0,06727	1,00285	0,99531
6	60-300	1,07227	0,25955	0,75959	0,99338
7	50-100	1,07719	0,18114	0,91126	0,99071
8	70-100	1,09592	0,50132	0,71142	0,97673
9	60-20	1,04401	0,80716	0,86866	0,97219
10	60-580	1,05273	0,11974	0,90794	0,99278
11	60-300	1,05975	0,33986	0,68656	0,98967
12	70-500	1,06905	0,20640	0,97802	0,99533
13	60-300	1,07926	0,28489	0,65457	0,98304



Slika 23. Poređenje eksperimentalnih vrednosti i vrednosti modifikovanog Henderson-Pabisovog modela za uzorak 12

**Tabela 21. Procenjeni parametri Peleg-ovog modela i koeficijenta determinacije između eksperimentalnih i izračunatih vrednosti za vakuumsko sušenje višnje**

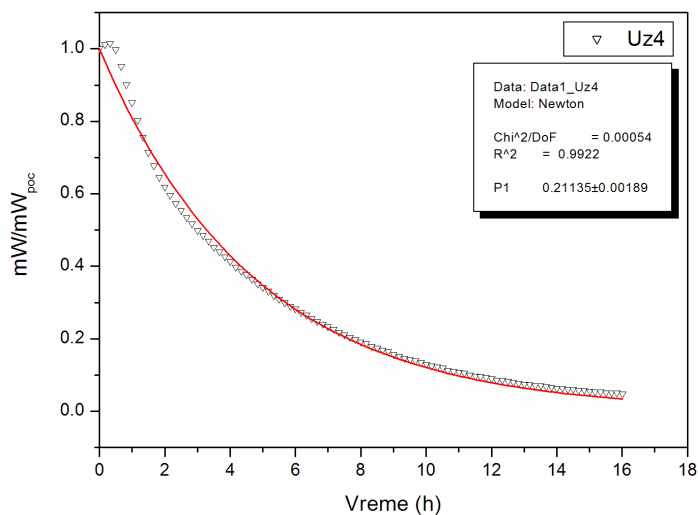
Uzorak	t (°C)–P (mbar)	P1	P2	R2
1	60-300	8,13460	0,78638	0,97892
2	60-300	7,33153	0,70485	0,9825
3	46-300	12,59219	0,94144	0,97813
4	74-300	4,13471	0,70434	0,98485
5	50-500	18,70394	0,16953	0,98436
6	60-300	4,66972	0,86494	0,99242
7	50-100	6,91462	0,61227	0,98014
8	70-100	2,02766	0,89247	0,97759
9	60-20	1,01683	0,83120	0,98413
10	60-580	10,75317	0,57000	0,98472
11	60-300	3,21985	0,95869	0,98979
12	70-500	5,51275	0,58301	0,98637
13	60-300	4,26540	1,04391	0,9846



**Slika 24. Poređenje eksperimentalnih vrednosti i Pelegovog modela za uzorak 6**

Tabela 22. Procenjeni parametri Newton-ovog modela i koeficijenta determinacije između eksperimentalnih i izračunatih vrednosti za vakuumsko sušenje višnje

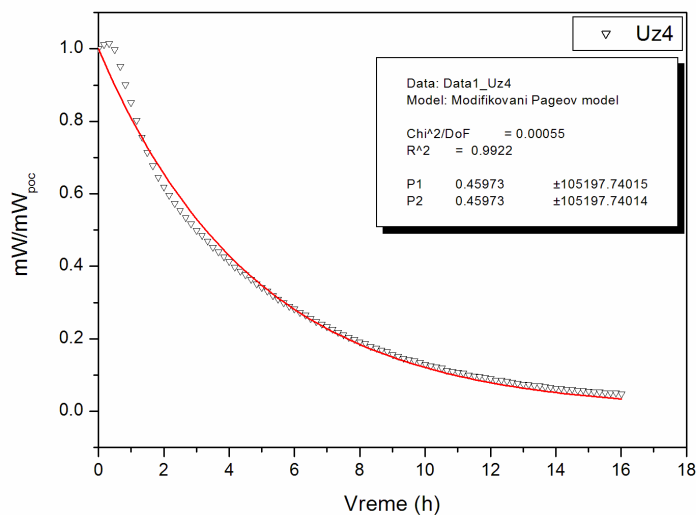
Uzorak	t (°C)–P (mbar)	P1	R2
1	60-300	0,08842	0,97569
2	60-300	0,10531	0,97306
3	46-300	0,05592	0,961
4	74-300	0,21135	0,9922
5	50-500	0,05641	0,98465
6	60-300	0,1364	0,95192
7	50-100	0,12676	0,98253
8	70-100	0,30935	0,95889
9	60-20	0,71445	0,96819
10	60-580	0,09199	0,98549
11	60-300	0,1977	0,94379
12	70-500	0,18287	0,98721
13	60-300	0,14754	0,93321



Slika 25. Poređenje eksperimentalnih vrednosti i vrednosti Newton-ovog modela za uzorak 4

Tabela 23. Procenjeni parametri modifikovanog Page-ovog modela i koeficijenta determinacije između eksperimentalnih i izračunatih vrednosti za vakuumsko sušenje višnje

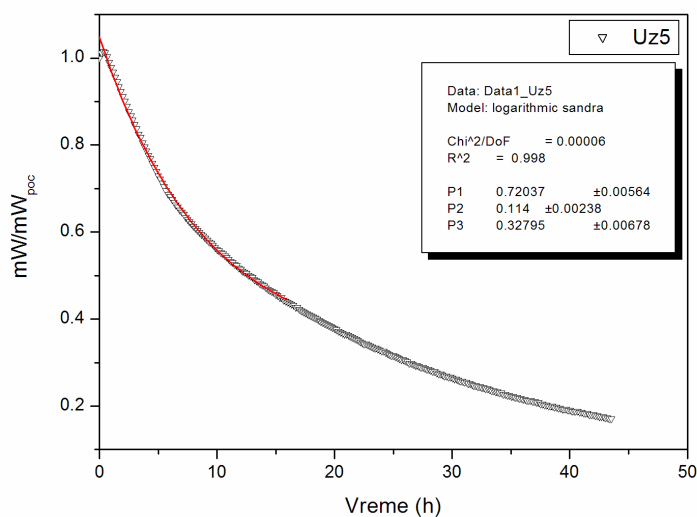
Uzorak	t (°C)–P (mbar)	P1	P2	R2
1	60-300	-0,29731	-0,2731	0,97569
2	60-300	0,32451	0,32451	0,97306
3	46-300	0,23646	0,23646	0,961
4	74-300	0,45973	0,45973	0,9922
5	50-500	0,2375	0,2375	0,98465
6	60-300	0,38006	0,38006	0,96011
7	50-100	0,36291	0,36291	0,98502
8	70-100	0,55624	0,55624	0,95889
9	60-20	0,84521	0,84521	0,96819
10	60-580	-0,30331	-0,30331	0,98549
11	60-300	-0,44459	-0,44459	0,94379
12	70-500	-0,42764	-0,42764	0,98721
13	60-300	-0,38409	-0,38409	0,93321



Slika 26. Poređenje eksperimentalnih vrednosti i vrednosti Page-ovog modela za uzorak 4

Tabela 24. Procenjeni parametri Logaritamskog modela i koeficijenta determinacije između eksperimentalnih i izračunatih vrednosti za vakuumsko sušenje višnje

Uzorak	t (°C)–P (mbar)	P1	P2	P3	R2
1	60-300	0,89321	0,11231	0,0976	0,99128
2	60-300	0,90762	0,14361	0,10765	0,99387
3	46-300	0,68567	0,11324	0,32683	0,99355
4	74-300	1,01026	0,24686	0,03958	0,99559
5	50-500	0,72037	0,114	0,32795	0,998
6	60-300	0,85553	0,22058	0,15521	0,99531
7	50-100	0,93834	0,19089	0,12788	0,99653
8	70-100	0,92083	0,35656	0,05308	0,97563
9	60-20	0,98203	0,63784	-0,02254	0,97086
10	60-580	0,79312	0,15701	0,26084	0,99555
11	60-300	0,77364	0,33214	0,2204	0,98538
12	70-500	1,01449	0,22375	0,06041	0,99602
13	60-300	0,70011	0,33528	0,33132	0,98587

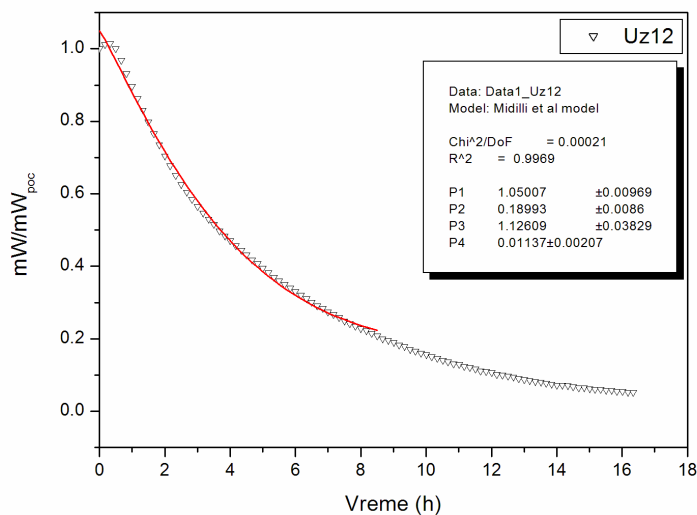


Slika 27. Poređenje eksperimentalnih vrednosti i vrednosti Logaritamskog modela za uzorak 5



**Tabela 25. Procenjeni parametri Midilli-ovog et al. modela i koeficijenta determinacije između eksperimentalnih i izračunatih vrednosti za vakuumsko sušenje višnje**

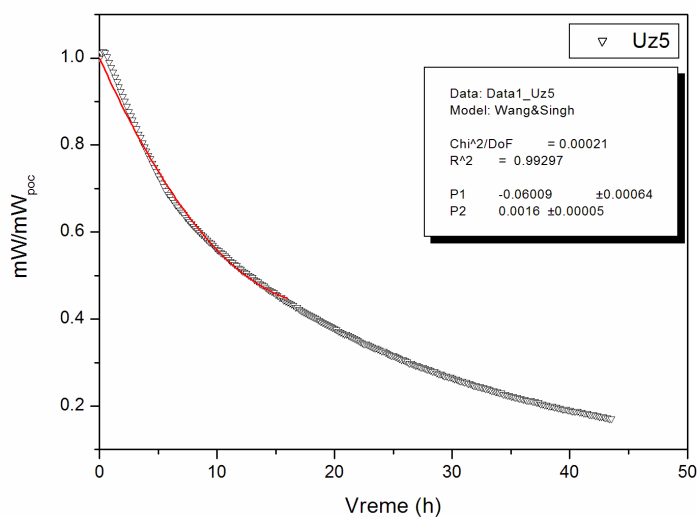
Uzorak	t (°C)–P (mbar)	P1	P2	P3	P4	R2
1	60-300	1,09294	0,19341	0,71532	-0,0006	0,99661
2	60-300	1,09174	0,20437	0,77665	0,00116	0,99669
3	46-300	1,05638	0,12366	0,75534	0,00316	0,99569
4	74-300	1,08188	0,27665	0,90118	0,00087	0,99611
5	50-500	1,03606	0,07991	1,05294	0,01347	0,99818
6	60-300	1,06797	0,25813	0,79251	0,00395	0,99722
7	50-100	1,07552	0,18415	0,94124	0,00518	0,99612
8	70-100	1,09338	0,4968	0,71611	-0,00025	0,98548
9	60-20	1,06488	0,81045	0,75206	-0,00798	0,98258
10	60-580	1,02355	0,11178	1,23588	0,03229	0,9987
11	60-300	1,05289	0,33514	0,73145	0,00444	0,99
12	70-500	1,05007	0,18993	1,12609	0,01137	0,9969
13	60-300	1,06189	0,27621	0,80153	0,01569	0,9866



**Slika 28. Poređenje eksperimentalnih vrednosti i vrednosti Midilli et al. modela za uzorak 12**

Tabela 26. Procenjeni parametri Wang & Singh-ovog modela i koeficijenta determinacije između eksperimentalnih i izračunatih vrednosti za vakuumsko sušenje višnje

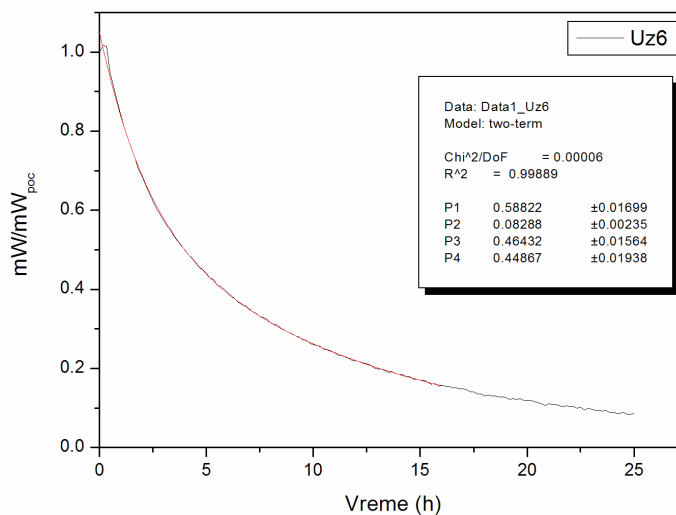
Uzorak	t (°C)–P (mbar)	P1	P2	R2
1	60-300	-0,07416	0,0016	0,95328
2	60-300	-0,08637	0,00212	0,94847
3	46-300	-0,06187	0,00165	0,98524
4	74-300	-0,15517	0,00633	0,96263
5	50-500	-0,06009	0,0016	0,99297
6	60-300	-0,12992	0,00514	0,95838
7	50-100	-0,11813	0,0043	0,98405
8	70-100	-0,1944	0,00946	0,83154
9	60-20	-0,36459	0,03051	0,80555
10	60-580	-0,09072	0,00327	0,98703
11	60-300	-0,19848	0,01366	0,95904
12	70-500	-0,16264	0,0083	0,98994
13	60-300	-0,16381	0,01086	0,9693



Slika 29. Poređenje eksperimentalnih vrednosti i vrednosti Wang & Singh modela za uzorak 5

Tabela 27. Procenjeni parametri "two-term" modela i koeficijenta determinacije između eksperimentalnih i izračunatih vrednosti za vakuumsko sušenje višnje

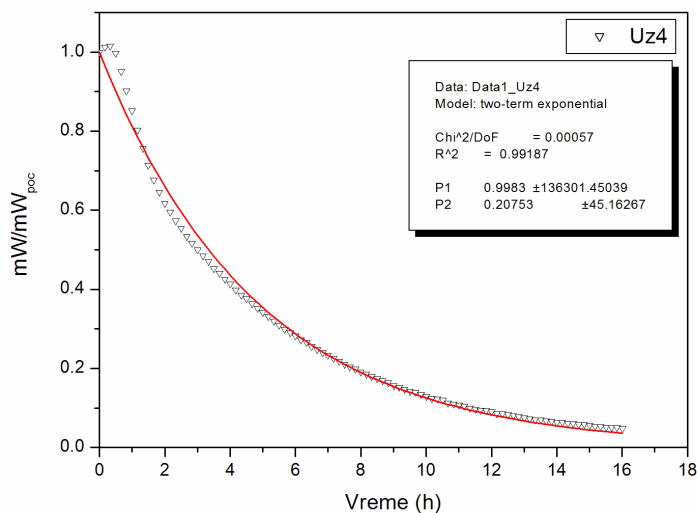
Uzorak	t (°C)–P (mbar)	P1	P2	P3	P4	R2
1	60-300	0,46869	0,08203	0,46869	0,08203	0,98243
2	60-300	0,63026	0,06867	0,43991	0,33466	0,99856
3	46-300	0,80463	0,03804	0,24194	0,35516	0,99707
4	74-300	0,72989	0,17237	0,35163	0,51575	0,99692
5	50-500	0,22476	-0,01488	0,82194	0,1019	0,99803
6	60-300	0,58822	0,08288	0,46432	0,44867	0,99889
7	50-100	0,45625	0,0684	0,62418	0,26856	0,99713
8	70-100	0,6478	0,20663	0,44776	1,24954	0,9901
9	60-20	0,77572	0,58168	0,29485	2,71641	0,97555
10	60-580	1,04649	0,11089	0,0023	-0,41026	0,99654
11	60-300	0,74922	0,13398	0,30567	1,17701	0,99329
12	70-500	0,01121	-0,14856	1,06222	0,21237	0,99605
13	60-300	0,70762	0,08303	0,35735	0,76254	0,99072



Slika 30. Poređenje eksperimentalnih vrednosti i vrednosti "two-term" modela za uzorak 6

Tabela 28. Procenjeni parametri "two-term exponential" modela i koeficijenta determinacije između eksperimentalnih i izračunatih vrednosti za vakuumsko sušenje višnje

Uzorak	t (°C)–P (mbar)	P1	P2	R2
1	60-300	0,99759	0,08825	0,97569
2	60-300	0,99759	0,08823	0,92809
3	46-300	0,99765	0,05802	0,96317
4	74-300	0,9983	0,20753	0,99187
5	50-500	0,27787	0,13571	0,99028
6	60-300	0,23074	0,48310	0,99109
7	50-100	0,38122	0,24526	0,99065
8	70-100	0,24741	0,97709	0,98237
9	60-20	0,23555	2,42562	0,97331
10	60-580	0,9996	0,09199	0,98549
11	60-300	0,99873	0,19290	0,94249
12	70-500	1,57533	0,23300	0,98941
13	60-300	0,99865	0,14748	0,93321

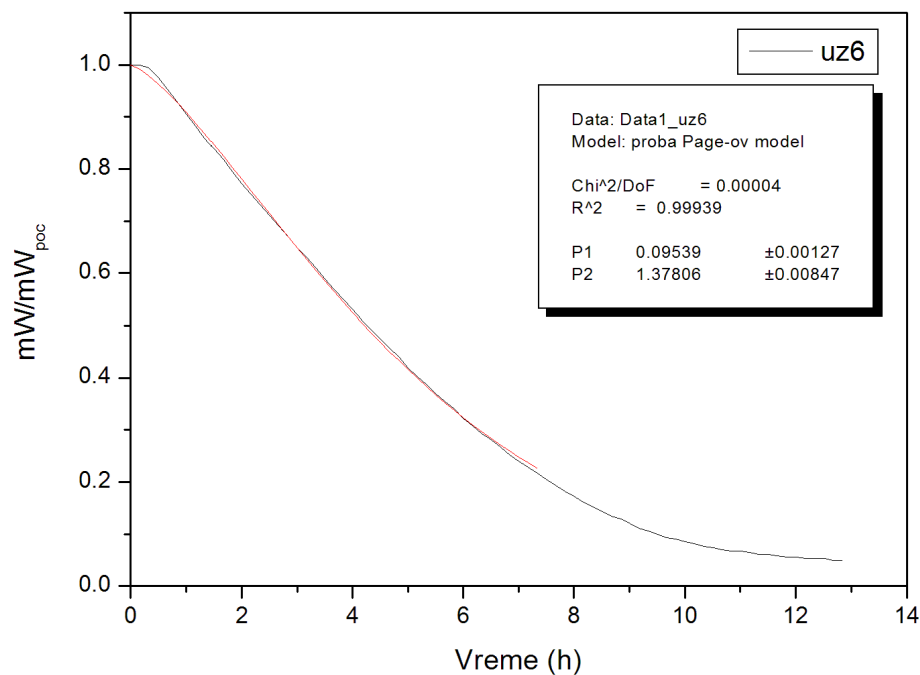


Slika 31. Poređenje eksperimentalnih vrednosti i vrednosti "two-term exponential" modela za uzorak 4

## Rezultati modelovanja procesa vakuumskeg sušenja borovnice

Tabela 29. Procenjeni parametri matematičkog Page-ovog modela i koeficijenata determinacije između eksperimentalnih i izračunatih vrednosti za vakuumsko sušenje borovnice

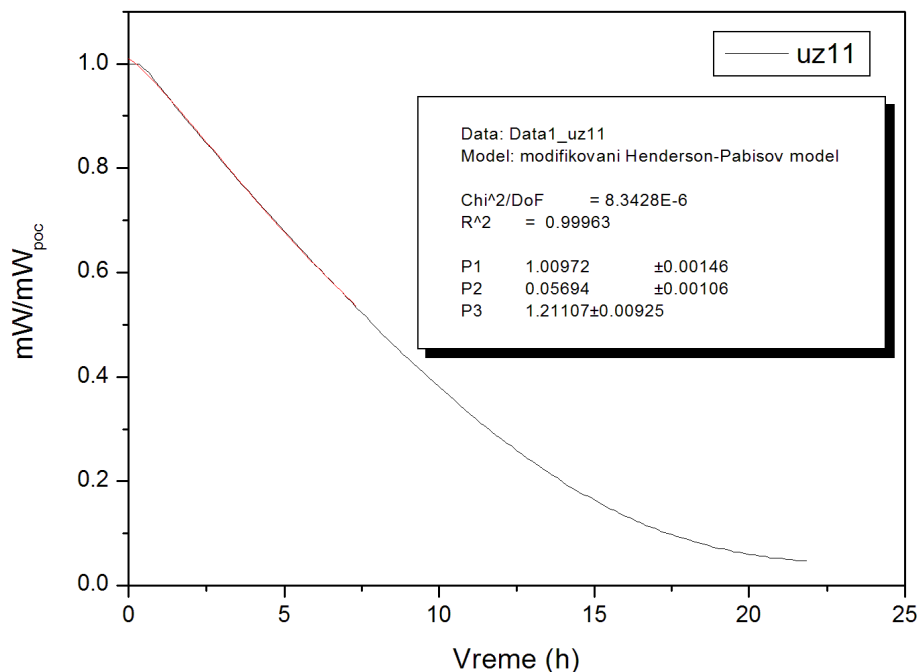
Uzorak	t (°C)–P (mbar)	P1	P2	R <sup>2</sup>
1	64-250	0,20057	1,52227	0,99909
2	60-400	0,13968	1,48251	0,99909
3	60-100	0,28927	1,44436	0,99895
4	50-462	0,08674	1,39410	0,99926
5	50-250	0,08849	1,37747	0,99930
6	50-250	0,09539	1,37806	0,99939
7	50-250	0,0923	1,37164	0,99931
8	50-250	0,09856	1,39930	0,99933
9	50-250	0,09932	1,34024	0,99921
10	50-38	0,31096	1,24766	0,99805
11	40-400	0,05104	1,26164	0,99922
12	40-100	0,08820	1,35570	0,99929
13	36-250	0,08100	1,04229	0,99289



Slika 32. Poređenje eksperimentalnih vrednosti i vrednosti Pageovog modela za uzorak 6

**Tabela 30. Procenjeni parametri modifikovanog Henderson-Pabis-ovog modela i koeficijenata korelacije između eksperimentalnih i izračunatih vrednosti za vakuumsko sušenje borovnice**

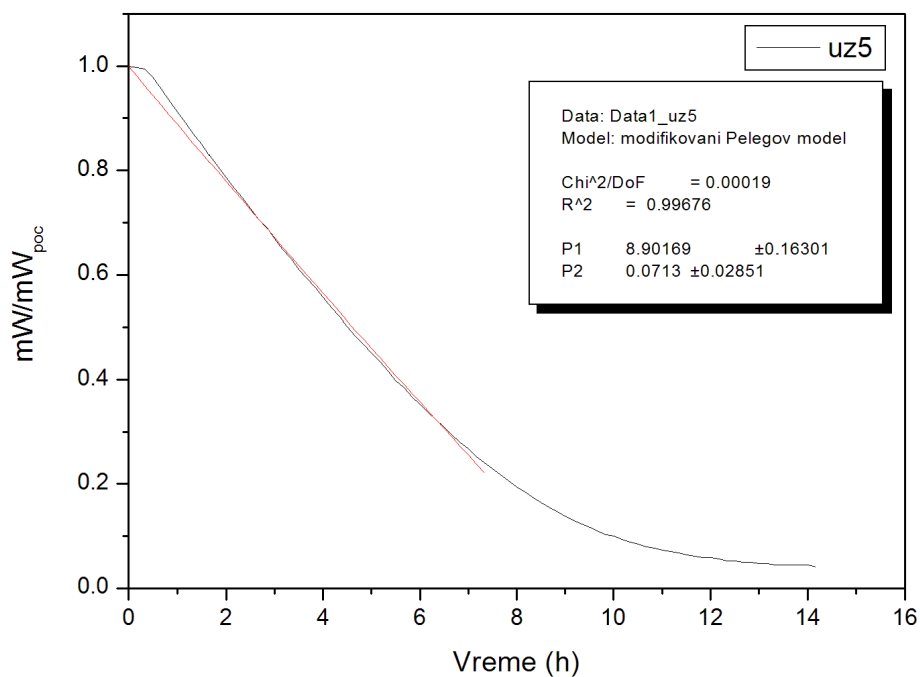
Uzorak	t (°C)–P (mbar)	P1	P2	P3	R2
1	64-250	1,01683	0,21458	1,47878	0,99935
2	60-400	1,00972	0,14591	1,45929	0,99915
3	60-100	1,02721	0,31459	1,38695	0,99939
4	50-462	1,00535	0,08994	1,37615	0,99931
5	50-250	1,00185	0,08961	1,37125	0,99931
6	50-250	1,00303	0,09727	1,36831	0,9994
7	50-250	1,00442	0,09501	1,35725	0,99934
8	50-250	1,00852	0,10382	1,37319	0,99943
9	50-250	1,00555	0,10288	1,32283	0,99926
10	50-38	1,02047	0,33026	1,23089	0,99829
11	40-400	1,00972	0,05694	1,21107	0,99963
12	40-100	1,01172	0,09539	1,31735	0,99952
13	36-250	1,02986	0,10285	0,93814	0,99575



**Slika 33. Poređenje eksperimentalnih vrednosti i vrednosti modifikovanog Henderson-Pabisovog modela za uzorak 11**

**Tabela 31. Procenjeni parametri Peleg-ovog modela i koeficijenata determinacije između eksperimentalnih i izračunatih vrednosti za vakuumsko sušenje borovnice**

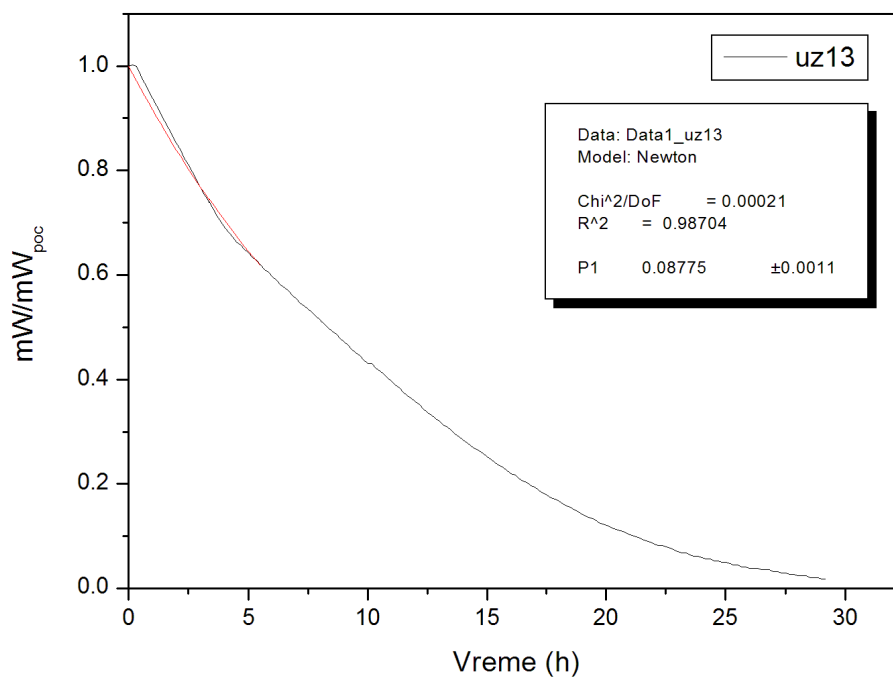
Uzorak	t (°C)–P (mbar)	P1	P2	R2
1	64-250	3,9582	0,28916	0,98750
2	60-400	4.16967	0.53330	0.97610
3	60-100	2.39367	0.61722	0.97217
4	50-462	8.94396	0.05726	0.99589
5	50-250	8.90169	0,07130	0,99676
6	50-250	8,22707	0,11925	0,99628
7	50-250	8,55115	0,10236	0,99622
8	50-250	7,80407	0,13617	0,99503
9	50-250	8,14538	0,15332	0,99679
10	50-38	2,50731	0,62391	0,98760
11	40-400	16,71037	-0,18044	0,99657
12	40-100	9,01282	0,09288	0,99515
13	36-250	11,53189	0,54431	0,99177



**Slika 34. Poređenje eksperimentalnih vrednosti i Pelegovog modela za uzorak 5**

**Tabela 32. Procenjeni parametri Newton-ovog modela i koeficijenta determinacije između eksperimentalnih i izračunatih vrednosti za vakuumsko sušenje borovnice**

Uzorak	t (°C)–P (mbar)	P1	R2
1	64-250	0,34683	0,94723
2	60-400	0,24593	0,95029
3	60-100	0,43501	0,95916
4	50-462	0,14331	0,96536
5	50-250	0,14297	0,96886
6	50-250	0,15377	0,96783
7	50-250	0,14785	0,96847
8	50-250	0,16287	0,9636
9	50-250	0,15248	0,97308
10	50-38	0,40177	0,97989
11	40-400	0,07271	0,97677
12	40-100	0,13931	0,96706
13	36-250	0,08775	0,98704

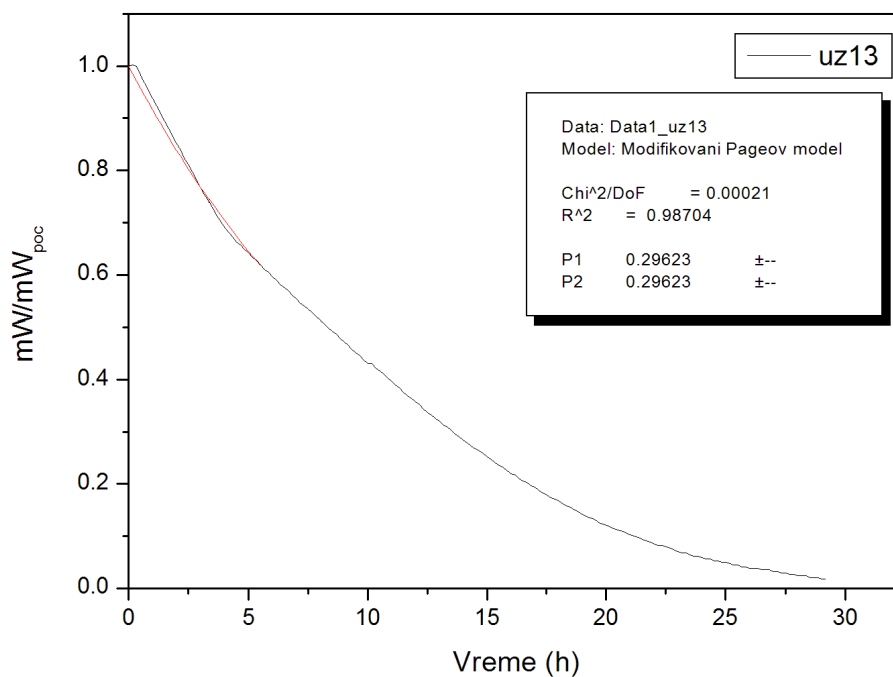


**Slika 35. Poređenje eksperimentalnih vrednosti i vrednosti Newton-ovog modela za uzorak 13**



**Tabela 33. Procenjeni parametri modifikovanog Page-ovog modela i koeficijenta determinacije između eksperimentalnih i izračunatih vrednosti za vakuumsko sušenje borovnice**

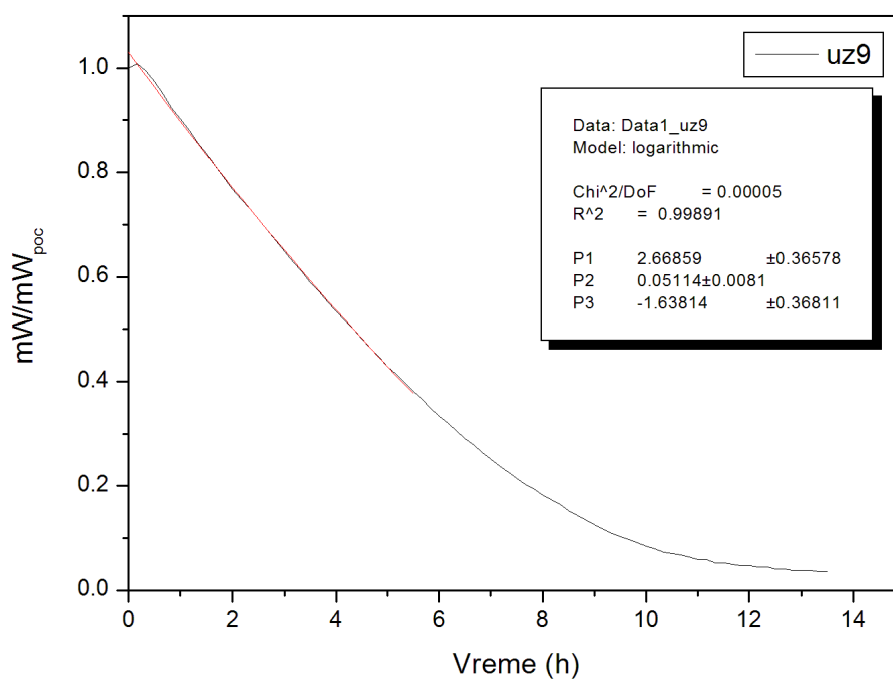
Uzorak	t (°C)–P (mbar)	P1	P2	R2
1	64-250	0,58899	0,58899	0,94723
2	60-400	0,49592	0,49592	0,95029
3	60-100	0,65955	0,65955	0,95916
4	50-462	0,37855	0,37855	0,96536
5	50-250	0,37812	0,37812	0,96886
6	50-250	0,39241	0,39214	0,96783
7	50-250	0,38452	0,38452	0,96847
8	50-250	0,40357	0,40357	0,96360
9	50-250	0,39049	0,39049	0,97308
10	50-38	0,63386	0,63386	0,97989
11	40-400	0,26965	0,26965	0,97677
12	40-100	0,37324	0,37324	0,96706
13	36-250	0,29623	0,29623	0,98704



**Slika 36. Poređenje eksperimentalnih vrednosti i vrednosti Page-ovog modela za uzorak 13**

**Tabela 34. Procenjeni parametri Logaritamskog modela i koeficijenata determinacije između eksperimentalnih i izračunatih vrednosti za vakuumsko sušenje borovnice**

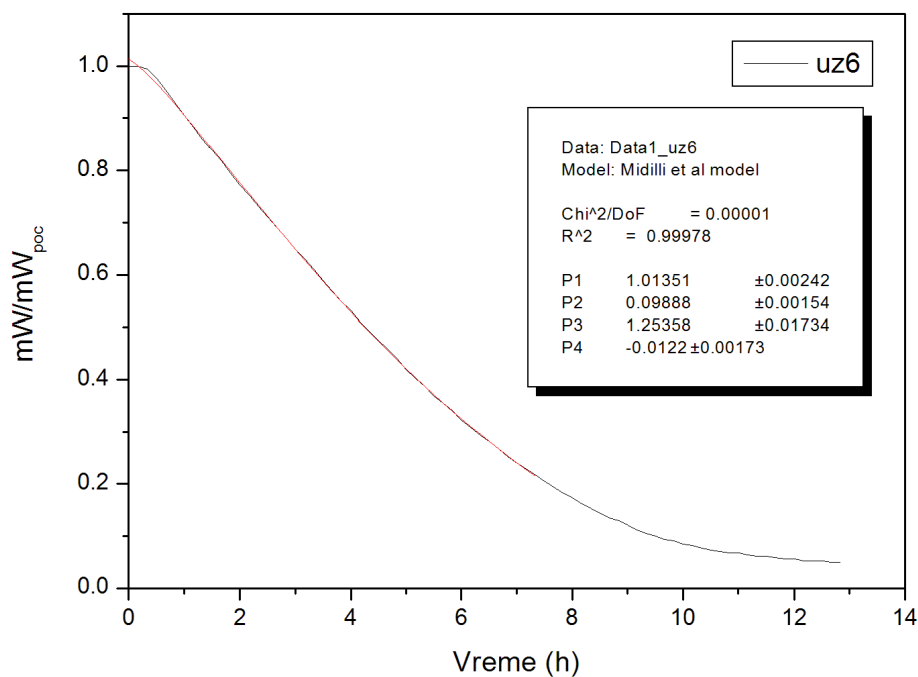
Uzorak	t (°C)–P (mbar)	P1	P2	P3	R2
1	64-250	1,52828	0,21155	-0,44709	0,99556
2	60-400	2,24656	0,09374	-1,19306	0,99806
3	60-100	1,28417	0,34617	-0,19010	0,99392
4	50-462	3,09419	0,04215	-2,05765	0,99810
5	50-250	2,24656	0,09374	-1,19306	0,99806
6	50-250	2,94519	0,04657	-1,91164	0,99871
7	50-250	3,44999	0,03783	-2,41862	0,99837
8	50-250	3,26940	0,04379	-2,23184	0,99852
9	50-250	2,66859	0,05114	-1,63814	0,99891
10	50-38	1,18833	0,34257	-0,1277	0,99662
11	40-400	3,68591	0,01953	-2,66356	0,99807
12	40-100	3,49557	0,03594	-2,46114	0,99797
13	36-250	1,02791	0,0951	-0,0019	0,99616



**Slika 37. Poređenje eksperimentalnih vrednosti i vrednosti Logaritamskog modela za uzorak 9**

**Tabela 35. Procenjeni parametri Midilli-ovog et al. modela i koeficijenta determinacije između eksperimentalnih i izračunatih vrednosti za vakuumsko sušenje borovnice**

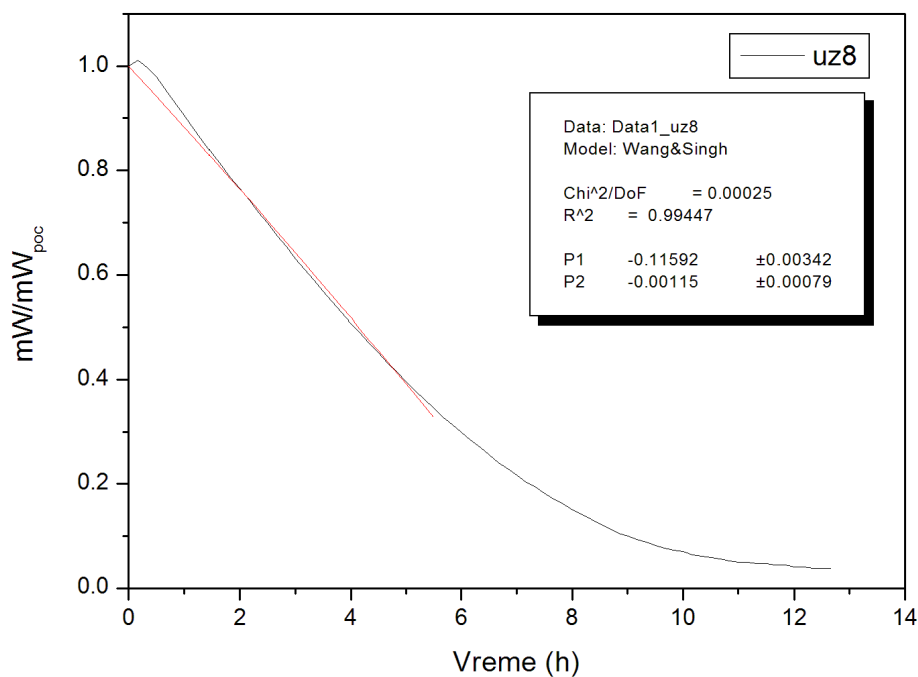
Uzorak	t (°C)–P (mbar)	P1	P2	P3	P4	R2
1	64-250	1,05622	-0,00302	2,7742	-0,25683	0,99842
2	60-400	1,00445	0,13982	1,50067	0,00121	0,99928
3	60-100	1,02412	0,31038	1,41102	0,00104	0,99946
4	50-462	1,01541	0,09000	1,26216	-0,01309	0,99968
5	50-250	1,01326	0,08929	1,24101	-0,01517	0,99977
6	50-250	1,01351	0,09888	1,25358	-0,0122	0,99978
7	50-250	1,01426	0,09571	1,24714	-0,01224	0,99969
8	50-250	1,01840	0,10666	1,26874	-0,01034	0,99976
9	50-250	1,01766	0,10419	1,18954	-0,01465	0,99975
10	50-38	1,02692	0,33842	1,18989	-0,00205	0,99846
11	40-400	1,01009	0,05634	1,20561	-0,00106	0,99963
12	40-100	1,01703	0,09551	1,25722	-0,00688	0,99963
13	36-250	1,00937	0,11016	1,21321	0,03471	0,99918



**Slika 38. Poređenje eksperimentalnih vrednosti i vrednosti Midilli et al. modela za uzorak 6**

**Tabela 36. Procenjeni parametri Wang & Singh-ovog modela i koeficijenta determinacije između eksperimentalnih i izračunatih vrednosti za vakuumsko sušenje borovnice**

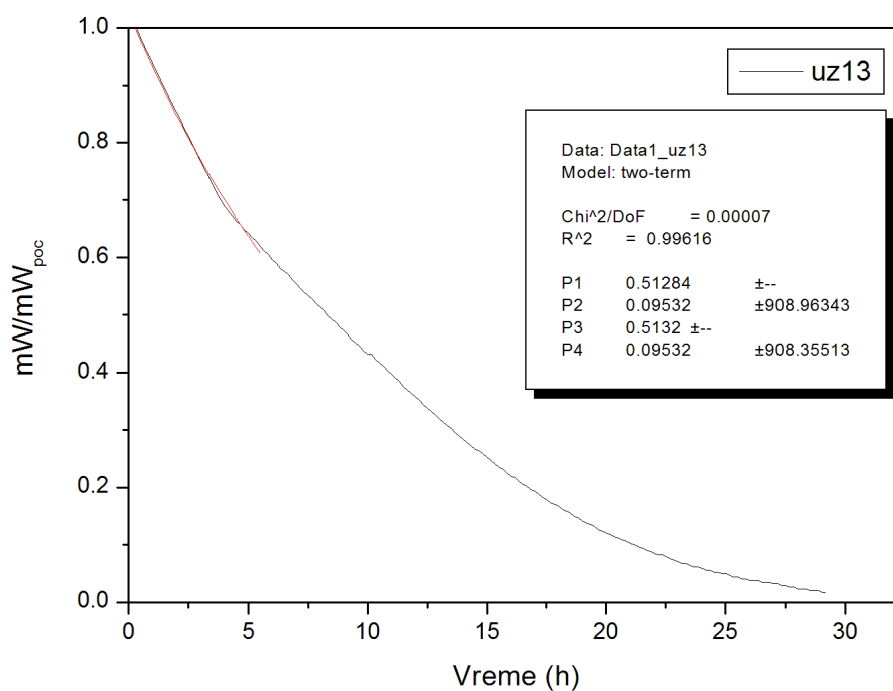
Uzorak	t (°C)–P (mbar)	P1	P2	R2
1	64-250	-0,24815	0,01289	0,98953
2	60-400	-0,16976	0,00232	0,99338
3	60-100	-0,32400	0,02643	0,99037
4	50-462	-0,10207	-0,00185	0,99465
5	50-250	-0,10354	-0,00143	0,99594
6	50-250	-0,11115	-0,00108	0,99593
7	50-250	-0,10757	-0,00113	0,99521
8	50-250	-0,11593	-0,00115	0,99447
9	50-250	-0,11437	-0,00009	0,99582
10	50-38	-0,31295	0,02615	0,99520
11	40-400	-0,05439	-0,00208	0,99482
12	40-100	-0,10084	-0,00157	0,99371
13	36-250	-0,07815	0,00104	0,99094



**Slika 39. Poređenje eksperimentalnih vrednosti i vrednosti Wang & Singh modela za uzorak 8**

**Tabela 37. Procenjeni parametri "two-term" modela i koeficijenta determinacije između eksperimentalnih i izračunatih vrednosti za vakuumsko sušenje borovnice**

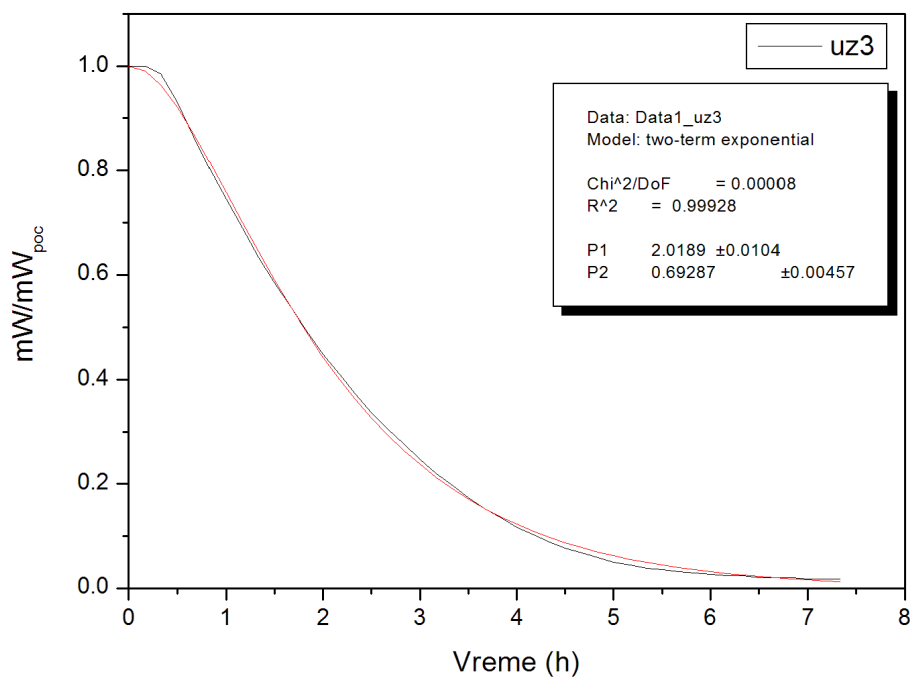
Uzorak	t (°C)–P (mbar)	P1	P2	P3	P4	R2
1	64-250	0,57307	0,40207	0,57307	0,40208	0,9754
2	60-400	0.55774	0.28459	0.55754	0.28459	0.97809
3	60-100	0.5717	0.49706	0.57187	0.49706	0.98156
4	50-462	0.53326	0.16349	0.5334	0.16349	0.98795
5	50-250	0.53083	0.16175	0.53097	0.1617	0.98878
6	50-250	0.53313	0,17413	0,53327	0,17413	0,98817
7	50-250	0,53212	0,16748	0,53226	0,16748	0,98887
8	50-250	0,53808	0,18642	0,53822	0,18642	0,9874
9	50-250	0,53078	0,17143	0,53092	0,17143	0,99128
10	50-38	0,54646	0,44195	0,54701	0,44195	0,99158
11	40-400	0,51577	0,08179	0,51615	0,08179	0,99444
12	40-100	0,53233	0,15893	0,53269	0,15893	0,98965
13	36-250	0,51284	0,09532	0,5132	0,09532	0,99616



**Slika 40. Poređenje eksperimentalnih vrednosti i vrednosti "two-term" modela za uzorak 13**

Tabela 38. Procenjeni parametri "two-term exponential" modela i koeficijenta determinacije između eksperimentalnih i izračunatih vrednosti za vakuumsko sušenje borovnice

Uzorak	t (°C)–P (mbar)	P1	P2	R2
1	64-250	2,0381	0,57164	0,99797
2	60-400	2,01697	0,43277	0,99794
3	60-100	2,01890	0,69287	0,99928
4	50-462	1,91662	0,26380	0,99879
5	50-250	1,90242	0,26014	0,99882
6	50-250	1,90564	0,27580	0,99890
7	50-250	1,90111	0,26637	0,99889
8	50-250	1,92586	0,29315	0,99882
9	50-250	1,87694	0,26700	0,99881
10	50-38	1,83558	0,58683	0,99769
11	40-400	1,82088	0,13841	0,99863
12	40-100	1,89244	0,25134	0,99905
13	36-250	1,39230	0,10008	0,99222



Slika 41. Poređenje eksperimentalnih vrednosti i vrednosti "two-term exponential" modela za uzorak 3