Utjecaj procesnih parametara i postupaka prethodne obrade na kinetiku i kvalitetu sušenja batata (Ipomea batatas L.) u konvekcijskom tunelskom sušioniku

Čobanković, Iva

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:109:481151

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-19**

REPOZITORIJ PTFOS PREHRAMBENO-TEHNOLOŠKI FAKULTET OSIJEK dabar DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of Food Technology Osijek

zir.nsk.hr

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

dabar DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
PREHRAMBENO-TEHNOLOŠKI FAKULTET OSIJEK

Iva Čobanković

UTJECAJ PROCESNIH PARAMETARA I POSTUPAKA PRETHODNE OBRADE NA KINETIKU I KVALITETU SUŠENJA BATATA (*Ipomea batatas* L.) U KONVEKCIJSKOM TUNELSKOM SUŠIONIKU

DIPLOMSKI RAD

Osijek, srpanj 2017.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

DIPLOMSKI RAD

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Prehrambeno-tehnološki fakultet Osijek
Zavod za procesno inženjerstvo
Katedra za projektiranje tehnoloških procesa i konstrukcijske materijale
Franje Kuhača 20, 31000 Osijek, Hrvatska

Diplomski sveučilišni studij Prehrambeno inženjerstvo

Znanstveno područje: Biotehničke znanosti
Znanstveno polje: Prehrambena tehnologija
Nastavni predmet: Projektiranje uređaja u prehrambenoj industriji
Tema rada je prihvaćena na VIII. redovitoj sjednici Fakultetskog vijeća Prehrambeno-tehnološkog fakulteta Osijek u akademskoj godini 2015./2016. održanoj 31. svibnja 2016 godine.
Mentor: prof. dr. sc *Darko Velić*

Utjecaj procesnih parametara i postupaka prethodne obrade na kinetiku i kvalitetu sušenja batata (*Ipomea batatas* L.) u konvekcijskom tunelskom sušioniku

Iva Čobanković , 329/DI

Sažetak:

Istraživanje kinetike sušenja batata (Ipomea batatas L.) provedeno je u konvekcijskom tunelskom sušioniku pri različitim temperaturama sušenja (50, 60, 70 i 80 °C), brzini strujanja zraka od 2,8 m s^{-1} te različitim vrstama prethodne obrade svježih uzoraka. Primijenjeni fizikalno-kemijski postupci prethodne obrade uzoraka bili su: blanširanje u vreloj vodi, blanširanje na pari; uranjanje u: 0,5 %-tnu otopinu askorbinske kiseline, 0,15%-tnu otopinu 4-heksilresorcinola (4-HR) te 0,3 %-tnu otopinu L-cisteina (LC). Prethodna obrada s 0,15 %-tnom otopinom 4-HR rezultirala je značajnim skraćenjem ukupnog vremena sušenja i visokim rehidratacijskim omjerom, dok je prethodna obrada s 0,3 %-tnom LC rezultirala najmanjom ukupnom promjenom boje.

Ključne riječi: s*ušenje, batat, prethodna obrada, rehidratacija, boja*

Rad sadrži: 73 stranica
21 slika
5 tablica
0 priloga
160 literaturnih referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Sastav Povjerenstva za ocjenu i obranu diplomskog rada i diplomskog ispita:

1.	izv. prof. dr. sc. *Natalija Velić*	predsjednik
2.	prof. dr. sc. *Darko Velić*	član-mentor
3.	doc. dr. sc. *Tihana Marček*	član
4.	izv. prof. dr. sc. *Stela Jokić*	zamjena člana

Datum obrane: 14. srpnja 2017.

Rad je u tiskanom i elektroničkom (pdf format) obliku pohranjen u Knjižnici Prehrambeno-tehnološkog fakulteta Osijek, Franje Kuhača 20, Osijek.

BASIC DOCUMENTATION CARD

GRADUATE THESIS

University Josip Juraj Strossmayer in Osijek
Faculty of Food Technology Osijek
Department of Process Engineering
Subdepartment of technological design process and construction materials
Franje Kuhača 20, HR-31000 Osijek, Croatia

Graduate program Food engineering

Scientific area: Biotechnical sciences
Scientific field: Food technology
Course title: Food Process Equipment Design
Thesis subject was approved by the Faculty of Food Technology Osijek Council at its session no. 8 held on May 31, 2016.
Mentor: *Darko Velić*, PhD, full prof.

Process parameters and pre-treatment methods influence on the drying kinetics and quality of sweet potato (*Ipomea batatas* L.) dried in the convective tray drier

Iva Čobanković , 329/DI

Summary:

The drying characteristics of sweet potato (*Ipomea batatas* L.) were investigated using a laboratory convective tray drier at different drying temperatures and pre-treatments. The drying temperatures were 50, 60, 70, 80 °C, and airflow velocity 2.8 m s^{-1}. Different physical and chemical pre-treatments of sweet potato samples were applied as follows: hot water and steam blanching; dipping in: 0.5% ascorbic acid solution, 0.15% 4-hexylresorcinol (4-HR) solution, 0.3% L-cysteine (LC) solution. Pre-treatment with 0.15% 4-HR resulted in the most reduced drying time and high rehydration ratio, while pre-treatment with 0.3% LC solution resulted in the minimum colour change.

Key words: *drying, sweet potato, pre-treatment, rehydration, colour*

Thesis contains:
73 pages
21 figures
5 tables
0 supplements
106 references

Original in: Croatian

Defense committee:

1. *Natalija Velić*, PhD, associate prof. — chair person
2. *Darko Velić*, PhD, full prof. — supervisor
3. *Tihana Marček*, PhD, assistant prof. — member
4. *Stela Jokić*, PhD, associate prof. — stand-in

Defense date: July 14, 2017.

Printed and electronic (pdf format) version of thesis is deposited in Library of the Faculty of Food Technology Osijek, Franje Kuhača 20, Osijek.

Probudi se i zapjevaj Srijeme!
Neka vinograd te loze rasplete,
neka grožđe miri, neka vino teče.

Ej vinogradi želje moje davne,
Loze vite noći opjevane,
Zore tihe lišćem uspavane.

M.Č.

ZAHVALA

U prvom redu veliku zahvalu dugujem svome mentoru prof. dr. sc. Darku Veliću koji je imao velik utjecaj na moj profesionalni razvoj. Hvala Vam na iskazanom povjerenju, sugestijama i strpljenju tijekom izrade ovog diplomskog rada. Hvala Vam što ste sa mnom podijelili Vaše znanje i što ste uvijek imali vremena za mene. Također se zahvaljujem tehničkoj suradnici Jelki Babić na pomoći pri izradi eksperimentalnog dijela rada.

Nadalje, zahvaljujem se i mojim prijateljima i prijateljicama koji su ove studentske dane učinili nezaboravnima. Jedinstveni ste i neponovljivi!

Naposljetku najveću zahvalu dugujem svojoj obitelji koja mi je bila najveća potpora i zvijezda vodilja na ovom putu. Hvala mojim roditeljima što su mi omogućili studiranje, što su vjerovali u mene i što su me ohrabrivali kada mi je bilo najteže. Hvala vam na beskonačnom strpljenju, razumijevanju i bezuvjetnoj ljubavi. Dragi mama i tata, ovaj diplomski rad posvećujem vama.

SADRŽAJ

1. UVOD 1

2. TEORIJSKI DIO 3

2.1. TEORIJA SUŠENJA 4

2.2. VLAŽNE TVARI 6

2.2.1. Oblici vlažnih tvari 6

2.2.2. Oblici veza vlage i tvari u namirnicama 7

2.3. PROCESI PRI KONTAKTU VLAŽNE ČVRSTE TVARI I PLINA 8

2.3.1. Kinetika sušenja tvari 9

2.3.1.1 Period konstantne brzine sušenja 10

2.3.1.2. Period opadajuće brzine sušenja 12

2.4. MATEMATIČKI MODELI KOJIMA SE OPISUJE KINETIKA SUŠENJA BIOLOŠKIH MATERIJALA ... 14

2.5. KONVEKCIJSKO SUŠENJE 17

2.6. METODE OBRADE BIOLOŠKIH MATERIJALA NAMIJENJENIH SUŠENJU 18

2.6.1. Kemijske metode 19

2.6.2. Nekemijske (fizikalne) metode obrade 23

2.7. PROMJENE IZAZVANE SUŠENJEM 26

2.8. REHIDRATACIJSKA SVOJSTVA 32

2.9. BATAT (*Ipomoea batatas* L.) 34

2.10. SUŠENO POVRĆE 36

3. EKSPERIMENTALNI DIO 38

3.1. ZADATAK 39

3.2. MATERIJAL I METODE 39

3.2.1. Batat 39

3.2.2. Priprema svježeg uzorka za sušenje 40

3.2.3. Termogravimetrijska metoda 40

3.2.3.1. Određivanje udjela suhe tvari/vode 41

3.2.3.2. Konvekcijsko sušenje 41

3.2.4. Postupci prethodne obrade uzoraka 43

3.2.5. Određivanje boje 43

3.2.6. Određivanje rehidratacijskih svojstava 46

3.2.7. Matematičko modeliranje procesa sušenja 46

4. REZULTATI I RASPRAVA 48

4. 1. KRIVULJE SUŠENJA..... 49
4.2 PROMJENA BOJE 54
4.3. REHIDRATACIJA..... 58
5. ZAKLJUČCI 60
6. LITERATURA 64

Popis oznaka, kratica i simbola

A	površina [m^2]
a^*	parametar boje
AK	askorbinska kiselina
b^*	parametar boje
BL-v.p.	blanširanje vodenom parom
BL-v.v.	blanširanje vrelom vodom
D_{eff}	koeficijent difuzije
FAOSTAT	Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database
H_e	ravnotežna vlažnost zraka [kg_{vp}/kg_{sz}]
H_g	trenutna apsolutna vlažnost zraka [kg_{vp}/kg_{sz}]
k	parametar sušenja
K	kritična točka
KR	kapacitet rehidratacije
KR	Koeficijent rehidratacije
l	ukupna debljina pločastog uzorka kod sušenja [m]
L^*	parametar boje
LC	L-cistein
m	masa uzorka [kg]
m_{sz}	masa potpuno suhog zraka [kg]
m_{vp}	masa vlage odnosno vode [kg]
n	parametar sušenja
NT	neobrađeni uzorak
p_e	ravnotežni parcijalni tlaka vodene pare [Pa]
p_g	parcijalni tlak vodene pare u vlažnom zraku [Pa]
Q	količina topline [J]
r	latentna toplina isparavanja vode [kJ/kg]

R	indeks korelacije
RO	rehidratacijski omjer
t	vrijeme [s]
T_g	temperatura glavne mase zraka (temperatura suhog termometra) [K]
T_l	temperatura mokrog termometra [K]
w	brzina strujanja zraka [m/s]
X	apsolutna vlažnost zraka [kg_{vp} / kg_{sz}]
X	vlažnost sušenog materijala [$kg_v/kg_{s.tv.}$]
X'	bezdimenzionalna vlažnost
X_K	sadržaj vode u kritičnoj točki [$kg_v/kg_{s.tv.}$]
X_R	ravnotežni sadržaj vlage [$kg_v/kg_{s.tv.}$]
α	koeficijent prijelaza topline [W/m^2K]
ρ	specifična masa [kg/m^3]
ΔC^*_{ab}	promjena boje
ΔE	ukupna promjena boje
σ	koeficijent prijenosa mase [kg/m^2 h]
σ'	koeficijent prijenosa mase [$kg/m^2 \cdot s \cdot Pa$]
φ	relativna vlažnost zraka [%]
4-HR	4-heksil-resorcinol

1. UVOD

Sušenje ili dehidratacija je tehnološka operacija koja podrazumijeva oduzimanje vlage, odnosno vode, u svrhu dobivanja suhog proizvoda. Dehidratacija je kompleksan fizikalni proces koji istovremeno uključuje prijenos energije (topline) i tvari (vlage).

Sušenje kompleksnog sustava kao što je hrana odnosi se na uklanjanje gotovo cjelokupne vlage (vode) isparavanjem ili sublimacijom uz dovođenja topline pod kontroliranim uvjetima. Cilj ove operacije je konzerviranje hrane, a temelji se na principu anabioze, odnosno kseroanabioze (grč. *kseros* - suh), gdje se uklanjanjem vode potiskuje ili ograničava aktivnost mikroorganizama. Tako prerađena (konzervirana) namirnica može se koristi u vrijeme kada nije dostupna u svježem stanju u vidu poluprerađevine ili finalnog proizvoda.

Prednost sušenih proizvoda u odnosu na proizvode koji su konzervirani drugim metodama je smanjenje mase i volumena što olakšava rukovanje i upotrebu, uz niže troškove skladištenja i prijevoza. Međutim, tijekom sušenja dolazi i do nepoželjnih promjena na osušenim proizvodima kao što su smanjenja rehidratacijska (rekonstitucijska) svojstva, posmeđivanje, gubitak (degradacija) pojedinih komponenata itd. Rješavanje problema sušenja danas je najviše usmjereno na svladavanje navedenih nedostataka. Osnovni ciljevi takvog nastojanja su dobivanje proizvoda porozne (otvorene) strukture, dobrih rehidratacijskih svojstava te sa što manje promijenjenim organoleptičkim i nutritivnim svojstvima u odnosu na polaznu sirovinu.

2. TEORIJSKI DIO

2.1. TEORIJA SUŠENJA

Sušenje je tehnološka operacija koja podrazumijeva oduzimanje vlage odnosno relativno malih količina tekućine, skoro redovito vode, iz plinova, tekućina ili krutih tvari (Tomas, 2000).

Uklanjanje vode se može provoditi na različite načine:

- mehanički (centrifugiranjem),
- izmrzavanjem (iz plinova),
- kemijskim reakcijama ($CaC_2 + H_2O \rightarrow CaO + C_2H_2$),
- adsorpcijom iz plinova (silikagel) i
- otparivanjem (najčešće) (Tomas, 2000).

U užem smislu riječi, sušenjem se uklanjaju manje količine vode iz krutih ili gotovo krutih tvari, tj. otparivanje ili hlapljenje (Tomas, 2000). Načelna razlika između otparivanja i hlapljenja je u temperaturi. Tako se otparivanje provodi na temperaturi vrenja tekućine, a hlapljenje se provodi ispod temperature vrenja. Sušenje se najčešće provodi ispod temperature vrenja tekućine pri čemu je imperativ prisutnost plina koji ima dvojaku funkciju - odnosi otparenu tekućinu i donosi toplinu potrebnu za sušenje.

Sušenje kompleksnog sustava, kao što je hrana, odnosi se na uklanjanje gotovo cjelokupne vlage (vode) isparavanjem ili sublimacijom uz dovođenja topline pod kontroliranim uvjetima. Pored produljenja trajnosti hrane ciljevi sušenja uključuju i minimiziranje potreba za ambalažom i pakiranjem uz postizanje određene kvalitete gotovog proizvoda u smislu dobrih nutritivnih, organoleptičkih i rehidratacijskih svojstva.

Kako bi uklonili vodu potrebno je poznavanje kemijskog sastava i fizikalne strukture svježe namirnice. Generalno gledajući, vodu u hrani možemo podijeliti na slobodnu i vezanu vodu, dok prema Lovriću (2003) voda može biti u sljedećim oblicima:

- kao čista površinska voda ili tzv. slobodna voda,
- kemijski vezana nekim solima, primarnom valencijom ili kao hidrat ($CaCl_2 \cdot H_2O$),
- voda adsorbirana koloidnim tvarima, u stanju gela, tzv. hidratna voda
- voda adsorbirana kao vrlo tanki, jedno- ili više-molekularni sloj na unutarnjoj ili vanjskoj površini proizvoda molekularnim silama, ili adsorbirana u fine pore kapilarnom kondenzacijom,

- voda prisutna kao kontinuirana faza u kojoj druge tvari mogu biti suspendirane ili dispergirane, molekularno, koloidno ili kao emulzija.

Voda koja se uklanja postupkom sušenja je slobodna voda.

Razlikujemo dva načina provedbe procesa sušenja, a to su adijabatski gdje se toplina isparavanja dovodi osjetnom toplinom zraka kojim se ujedno provodi sušenje i neadijabatski kod kojeg se toplina isparavanja dovodi toplinom zračenja ili toplinom koja se provodi kroz stjenke u kontaktu s materijalom koji se suši.

Sušenje je kompleksan fizikalni proces koji istovremeno uključuje prijenos energije (topline) i tvari. S obzirom na prijenos energije od izvora topline do materijala razlikujemo metode sušenja koje se temelje na kondukciji, konvekciji i radijaciji ili se pak toplina generira unutar čvrstog materijala kao posljedica njegovog električnog otpora. Kod konvekcijskog sušenja prijenos topline je direktan pomoću zagrijanog medija (zrak ili dimni plinovi), dok kod kondukcijskog sušenja prijenos topline je indirektan putem metalne površine.

U prehrambenoj industriji najčešće se upotrebljava konvekcijsko sušenje uz primjenu zagrijanog zraka kao medija. Kod ovog načina sušenja prijenos topline ovisi o svojstvima zagrijanog zraka kao što su temperatura, vlažnost, brzina strujanja i tlak te izloženosti sušenog materijala okolnom zraku (Okos i sur., 2007).

2.2. VLAŽNE TVARI

Voda je glavni sastojak većine svježih namirnica. Tako udio vode u voću i povrću varira od 70–90% (u nekim slučajevima i više), a ostatak čini suha tvar. Glavna uloga vode u svježim namirnicama:

- otapanje sastojaka,
- transport tvari te
- sudjelovanje u brojnim reakcijama.

Voda također utječe na okus, izgled i strukturu hrane, ali i na njezinu podložnost kvarenju. Nadalje, bitno svojstvo vode je i njen visoki specifični toplinski kapacitet, što znači da voda može primiti ili predati velike količine topline pri relativno malim promjenama temperature (Velić, 2006).

Sadržaj (udio) vlage nekog materijala (hrane npr.) može se izraziti na ukupnu masu, tj. kao kg vode u kg materijala (vlažnog) ili na suhu tvar, tj. kg vode po kg suhe tvari, što se češće upotrebljava u proračunima vezanim uz proces dehidratacije (Lovrić, 2003).

2.2.1. Oblici vlažnih tvari

Vlažne čvrste tvari obzirom na kemijsko-fizikalne i strukturne osobine mogu se podijeliti na:

- kristalne tvari – anorganskog porijekla, manje od 1 nm te
- koloidno disperzni sustavi – organskog porijekla, veličine 1 – 200 nm.

Kod koloidno disperzni sustava vlaga predstavlja dio strukture čvrste tvari. Dijelimo ih u tri podskupine:

- *tipično koloidne tvari*, kod kojih se uklanjanjem vlage javljaju kontrakcije, uz očuvanje elastičnih osobina,
- *kapilarno-porozne tvari*, kod kojih se uklanjanjem vlage javljaju neznatne kontrakcije. Istovremeno tvar postaje krhka i može se pretvoriti u prah te

- *koloidno kapilarno-porozne tvari*, kod kojih su stjenke kapilara elastične i pri sušenju dolazi do njihovog skupljanja bez da se narušava osnovna prostorna struktura tvari. Primjer su zrna žitarica, gljive i sl. (Velić, 2006).

2.2.2. Oblici veza vlage i tvari u namirnicama

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

- *Kemijski vezana voda* je voda koju tvari sadržavaju u točno određenim stehiometrijskim odnosima. Kemijski vezanu vodu nije moguće ukloniti uobičajenim postupcima sušenja zato što je ta veza jaka.
- *Adsorpcijski vezana voda* je voda vezana na površini koloidnih čestica pod djelovanjem polarnih molekularnih sila. Ova veza vode i tvari spada u red fizikalno-kemijskih veza, koje imaju manji sadržaj energije od kemijskih veza. Adsorpcijsko vezanje vode je praćeno izdvajanjem topline.
- *Osmotski vezana voda* difuzijom prodire kroz polupropusne membrane koje grade skelet gela. Ova veza vode i tvari spada također u red fizikalno-kemijskih veza.
- *Kapilarno vezana voda* je voda vezana u kapilarama s polumjerom $r \geq 10^{-7}$ m. Voda je vezana fizikalno-mehaničkim vezama koje imaju manju energiju, tj. slabije su od fizikalno-kemijskih veza. Veza vode u kapilarama uvjetovana je silama površinske napetosti (Aladić, 2006).

Upotrebljavaju se različite metode kako bi se odredio stupanj vezanosti vode a temelje se na određivanju sadržaja energije koje ta veza posjeduje. Neke od metoda uključuju određivanje nezamrznute vode metodom nuklearne magnetske rezonancije (NMR), određivanje dielektričnih svojstava ili sorpcijskih svojstava hrane, određivanje količine dovedene topline potrebne za otparavanje određene količine vode iz tvari koja se suši itd.

2.3. PROCESI PRI KONTAKTU VLAŽNE ČVRSTE TVARI I PLINA

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

- adsorpcija vode i
- desorpcija vode

Hoće li se neka tvar sušiti ili vlažiti ovisi o ravnotežnim uvjetima. Tomas (2000) i Sokele (1998), navode da kako bi se neka tvar osušila ona se mora zagrijati do temperature na kojoj je parcijalni tlak vodene pare na površini sušene tvari veći od parcijalnog tlaka vodene pare u plinu. Ako je taj tlak manji, vlaga iz plina će se adsorbirati u tvari.

Kada je tlak pare na površini jednak parcijalnom tlaku pare u zraku, neće doći do adsorpcije niti do desorpcije vlage te možemo reći da je postignuta ravnotežna vlažnost. Ravnotežni sadržaj vlage ovisi o nizu parametara kao što su: kemijski sastav i struktura materijala te svojstva okolnog zraka (Barun, 2008).

Prijelazom vlage u zrak raste vlažnost zraka. Vlažnost zraka kojim se suši može se izraziti kao apsolutna ili relativna vlažnost (Velić, 2006).

Apsolutna vlažnost zraka može se izračunati prema **formuli (1)**:

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

gdje je: X – apsolutna vlažnost zraka [kg_{vp} / kg_{sz}],

m_{vp} – masa vlage odnosno vode [kg] i

m_{sz} – masa potpuno suhog zraka [kg].

Relativna vlažnost zraka može se izračunati prema **formulama (2)** i **(3)**:

$$\varphi = \frac{p_g}{p_e} \doteq \frac{H_g}{H_e} \quad \textbf{(2)}$$

$$\varphi = \frac{p_g}{p_e} \cdot 100 \doteq \frac{H_g}{H_e} \cdot 100 \quad \textbf{(3)}$$

gdje je: φ – relativna vlažnost zraka [%],

p_g – parcijalni tlak vodene pare u vlažnom zraku [Pa],

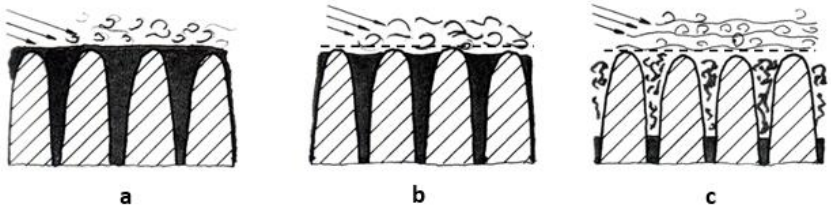
p_e – ravnotežni parcijalni tlaka vodene pare [Pa],

H_e – ravnotežna vlažnost zraka [kg_{vp}/kg_{sz}] i

H_g – trenutna apsolutna vlažnost zraka [kg_{vp}/kg_{sz}].

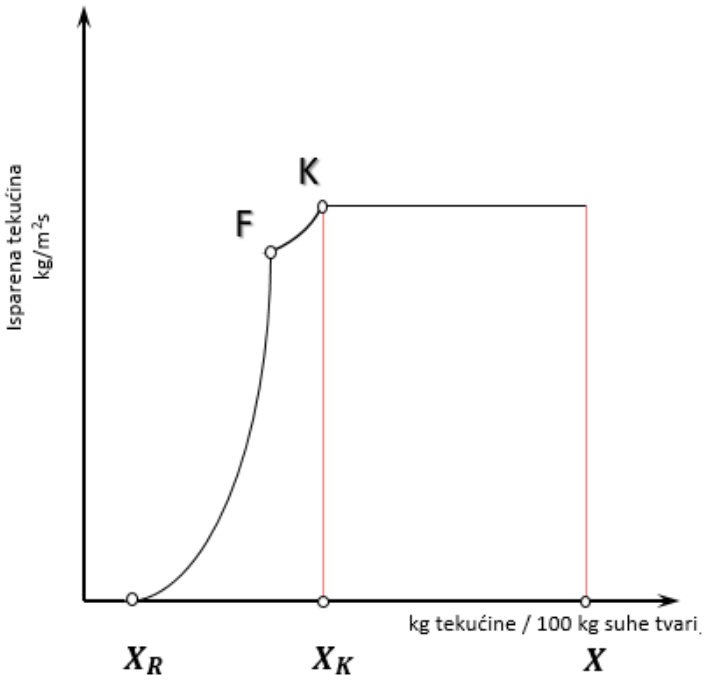
2.3.1. Kinetika sušenja tvari

Kinetika sušenja podrazumijeva promjenu sadržaja vlage i temperature materijala tijekom sušenja. Krivuljama sušenja može se opisati kinetika različitih procesa sušenja. Razlikujemo dva ili više perioda sušenja koja su prikazana na **Slici 1**. U početku, dok je površina materijala kojeg sušimo prekrivena slojem tekućine brzina otparivanja je konstantna i ne ovisi o količini tekućine već ovisi o veličini mokre površine i svojstvima zraka kojim se provodi sušenje (a). Ovaj period je konstantan do točke K na **Slici 2** odnosno do kritične vlažnosti nakon koje se meniskus tekućine povlači na pojedinim mjestima u unutrašnjost pora. Time se smanjuje slobodna površina tekućine i brzina sušenja opada (b). Kod točke F sva se tekućina povukla i od toga momenta za brzinu sušenja postaje mjerodavna samo ona kojom se tekućina, odnosno njezina para, može kretati (kapilaritetom, difuzijom) iz unutrašnjosti sušene tvari na površinu (c) (Tomas, 2000). Tu je brzina sušenja manja što je dublje meniskus u porama i što je manje pora ispunjeno tekućinom. Sušenje do kritične vlažnosti zove se period konstantne brzine sušenja, dok se nakon nje zove period padajuće brzine sušenja.



Slika 1 Stanje materijala tijekom pojedinih perioda sušenja (Tomas, 2000)

a – period konstantne brzine sušenja, *b* – prvi period padajuće brzine sušenja i *c* – drugi period padajuće brzine sušenja



Slika 2 Grafički prikaz ovisnost brzine sušenja

Ovisno o metodi i uvjetima sušenja te o svojstvima vlažnog materijala, ovi periodi mogu biti više ili manje naglašeni na samim krivuljama kinetike sušenja; neki mogu i u potpunosti izostati što će ovisiti o prevladavajućim mehanizmima prijenosa topline i tvari, koji potiču odnosno ograničavaju brzinu uklanjanja vlage (Lončarić, 2011).

2.3.1.1 Period konstantne brzine sušenja

Kao što je prethodno navedeno, brzina sušenja u ovom periodu ovisna je o veličini mokre površine, razlici parcijalnih tlakova para tekućine uz samu površinu tekućine i u glavnoj masi plina (zraka) kojim se provodi sušenje, odnosno razlici vlažnosti plina te o koeficijentu prijenosa mase koji se mijenja u ovisnosti o procesnim parametrima. Ta ovisnost prikazana je sljedećim **izrazom (4)**:

$$\frac{X}{A \cdot t} = \sigma \cdot \left(H_e - H_g\right) = \sigma' \cdot \left(p_e - p_g\right) \qquad \textbf{(4)}$$

gdje je: X – vlažnost materijala koji se suši [$kg_v/kg_{s.tv.}$],

A – površina [m^2],

t – vrijeme [s],

σ - koeficijent prijenosa mase [kg/m^2 h],

H_e – ravnotežna vlažnost zraka [kg_{vp}/kg_{sz}],

H_g – trenutna apsolutna vlažnost zraka [kg_{vp}/kg_{sz}],

p_g – parcijalni tlak vodene pare u vlažnom zraku [Pa] i

p_e – ravnotežni parcijalni tlaka vodene pare [Pa].

Koeficijent prijenosa mase σ' ovisi o koeficijentu difuzije i debljini laminarnog sloja. Za slučaj sušenja vlažne tvari zrakom Sherwood je preporučio slijedeću **formulu (5)** za izračunavanje:

$$\sigma' = 6 \cdot 10^{-8}(w \cdot \rho)^{0,8} \quad \textbf{(5)}$$

gdje je: σ' – koeficijent prijenosa mase [$kg/m^2 \cdot s \cdot Pa$],

w – brzina strujanja zraka [m/s],

ρ - specifična masa [kg/m^3].

Navedeni izraz vrijedi za brzine strujanja zraka od 1 do 6 m/s kod uobičajenih tlakova i temperatura sušenja.

Količinu tekućine koja ispari u jedinici vremena po jedinici površine moguće je izračunati iz količine topline (Q) koja se prenosi s medija kojim se suši na površinu tekućine uz poznat koeficijent prijelaza topline (α). Za otparivanje $X / \tau \cdot A$ [kg tekućine/s m^2] potrebna je toplina $X \cdot r / \tau \cdot A$ [J/s m^2] za čiji prijenos vrijedi **izraz (6)** (Tomas, 2000):

$$\frac{Q}{t \cdot A} = \frac{r \cdot X}{t \cdot A} = \alpha\left(T_g - T_l\right) = \sigma\left(H_e - H_g\right) \cdot r \quad \textbf{(6)}$$

gdje je: Q – količina topline [J],

A – površina [m^2],

t – vrijeme [s],

r – latentna toplina isparavanja vode [kJ/kg],

X – vlažnost materijala koji se suši [$kg_v/kg_{s.tv.}$],

α – koeficijent prijelaza topline [W/m^2K],

T_g – temperatura glavne mase zraka (temperatura suhog termometra) [K] i

T_l – temperatura mokrog termometra [K]

H_e – ravnotežna vlažnost zraka [kg_{vp}/kg_{sz}] i

H_g – trenutna apsolutna vlažnost zraka [kg_{vp}/kg_{sz}].

2.3.1.2. Period opadajuće brzine sušenja

Nakon što se dosegne kritični sadržaj vlage X_k (**Slika 2**) nastupa period opadajuće brzine sušenja. Brzina sušenja je u ovom periodu u stalnom opadanju zbog unutarnjih faktora (npr. priroda, geometrija i debljina materijala, veličina pora) koji ograničavaju brzinu transporta vlage unutar materijala.

U homogenim, čvrstim tvarima prijenos vlage prema površini se najvjerojatnije odvija molekularnom difuzijom tekućine (Velić, 2006). Brzina prijenosa vlage je određena drugim Fickovim zakonom za koji vrijedi **formula (7)**:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \cdot \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad \textbf{(7)}$$

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

$$\frac{X_K - X_R}{X - X_R} = \frac{8}{\pi^2} e^{-D_{eff}(\frac{\pi}{2l})^2 \cdot t} \quad \textbf{(8)}$$

Diferenciranjem ove jednadžbe dobije se izraz za brzinu sušenja:

$$\frac{dX}{dt} = -\frac{\pi \cdot D_{eff}}{4l^2}(X - X_R) \quad \textbf{(9)}$$

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

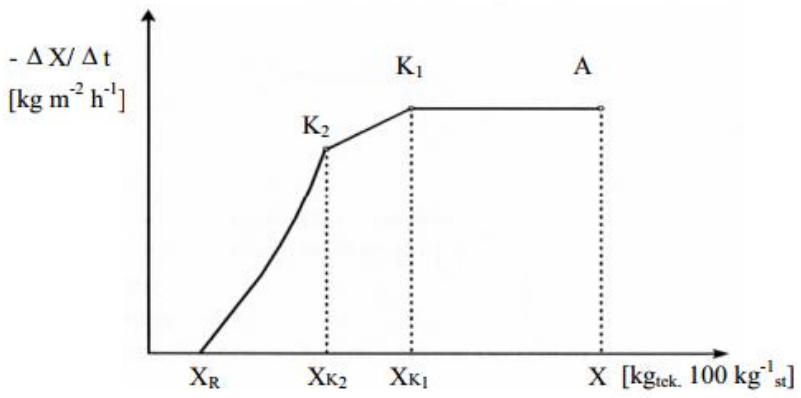
Jednadžbe **(8)** i **(9)** vrijede za jednodimenzionalni prijenos tvari koji je karakterističan za čvrste tvari oblika ravne ploče, čija je debljina zanemariva u odnosu na druge dvije dimenzije. U praksi se uzima da je D_{eff} konstantno, pa jednadžba **(9)** poprima slijedeći oblik:

$$\frac{dX}{dt} = -k(X - X_R) \quad \textbf{(10)}$$

Integriranjem jednadžbe **(10)** u granicama od X_K do X i od $t = 0$ do t, dobiva se pojednostavljeni izraz za opis perioda opadajuće brzine sušenja:

$$ln\frac{X_{(t)} - X_R}{X - X_R} = k \cdot t \quad \textbf{(11)}$$

Period padajuće brzine sušenja može se sastojati od dva ili više perioda kao što je prikazano na **Slici 3**. Postojanje više perioda padajuće brzine sušenja zabilježeno je tijekom infracrvenog i mikrovalnog sušenja breskve (Wang i Sheng, 2006), mikrovalnog sušenja mrkve i krumpira (Chua i Chou, 2005) te sušenja jabuke (Feng i sur., 2000).



Slika 3 Krivulja brzine sušenja sa dva perioda opadajuće brzine sušenja i dvije kritične točke (K_1 i K_2) (Velić, 2006)

2.4. MATEMATIČKI MODELI KOJIMA SE OPISUJE KINETIKA SUŠENJA BIOLOŠKIH MATERIJALA

Opisivanje kinetike sušenja bioloških materijala predmet velikog broja znanstvenih i stručnih radova čiji je osnovni cilj pronaći matematičke modele koji će u što većoj mjeri odgovarati stvarnim radnim uvjetima te kao takvi poslužiti za simulaciju i optimiranje procesa sušenja. Diferencijalne jednadžbe kojima se opisuje kinetika sušenja, posebice bioloških materijala, često su vrlo složene i kao takve ograničene za upotrebu. Iz tih razloga je sve prisutnija primjena i iznalaženje različitih jednadžbi tankog sloja (Byler i sur., 1987; Jaros i Pabis, 2006; Velić, 2006). Jednadžbe tankog sloja mogu se podijeliti u tri grupe:

- empirijske,
- poluempirijske i
- teorijske.

Razlika između emprijiskih i teorijskih jednadžbi tankog sloja je što empirijske zanemaruju unutarnji otpor prijenosu tvari, dok teorijske uzimaju u obzir samo unutarnji otpor prijenosu tvari. Najšire istražen teorijski model sušenja jeste II. Fickov zakon difuzije. Empirijski modeli daju direktnu vezu između sadržaja vlage materijala i vremena sušenja. Oni zanemaruju osnove procesa koji se odvijaju tijekom sušenja te njihovi parametri nemaju fizikalno značenje, iako uspješno koreliraju mjerne podatke. Među njima su najznačajniji Thompsonov i Wangov model (Akpinar, 2006; Togrul i Pehlivan, 2003).

Poluempirijski modeli često su kompromis između teorije i prakse. Takvi modeli u načelu su izvedeni kao pojednostavljenje II. Fickovog zakona ili kao modifikacija jednostavnijih modela koji vrijede unutar određenog raspona radnih uvjeta za koje su razvijeni (Akpinar, 2006; Sander, 2003). Prednost takvih modela je što oni zahtijevaju kraće vrijeme izrade u odnosu na teorijske jednadžbe tankog sloja, te ne zahtijevaju uključivanje geometrijskih karakteristika uzoraka, difuzije tvari i vodljivosti. Takve pretpostavke su uključene u jednadžbe slijedećih modela: Lewis, Page, Handerson i Pabis, Logaritamskog, Aproksimacijsko-difuzijskog te Midilli i Kucuk-ovog modela.

Najčešće korištene poluempirijske jednadžbe su Lewisova i Pageova. Lewisova jednadžba, često nazivana eksponencijalnim zakonom sušenja, pretpostavlja da je brzina sušenja

proporcionalna razlici stvarnog srednjeg sadržaja vlage materijala i ravnotežne vlažnosti pri danim procesnim uvjetima. Prema Lewisu prijenos tvari tijekom sušenja može se promatrati na način analogan prijenosu topline pri hlađenju čvrstog tijela. Page modificira Lewisovu jednadžbu uvodeći eksponent na vrijeme, u cilju što boljeg slaganja mjernih i računskih podataka i uvodi još jedan empirijski parametar, *n*.

Handerson i Pabisov model predstavlja prvi član općeg rješenja II. Fickovog zakona. Koeficijent *k*, u takvom modelu, povezan je s efektivnim difuzijskim koeficijentom kada se proces sušenja odvija samo u periodu opadajuće brzine sušenja, dok difuzija predstavlja kontrolirajući mehanizam prijenosa tvari (Mrkić, 2005; Sander, 2003).

Prethodno spomenuti matematički modeli kojima se opisuje kinetika sušenja kao i njihovi matematički izrazi prikazani su u **Tablici 1**.

Tablica 1 Matematički modeli kojima se opisuje kinetika sušenja

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

Procesno inženjerstvo zahtijeva numeričko interpretiranje eksperimentalnih podataka, jer uobičajeni načini njihovog prikazivanja koristeći tablice i grafikone nisu prikladni za daljnju obradu upotrebom računala. Zbog toga se problem svodi na pronalaženje kontinuiranih kvantitativnih modela na temelju eksperimentalnih podataka koji su dostupni samo u diskretnim intervalima. Nalaženjem odgovarajućih analitičkih metoda definiraju se procesi sušenja čime je omogućena simulacija i vođenje takvih procesa primjenom računala. Numerička interpretacija eksperimentalnih podataka kinetike sušenja nužna je zbog nepostojanja adekvatnih teorijskih modela (Ježek, 1999; Turner i Mujumdar, 1996).

Eksperimentalni matematički modeli kinetike sušenja su empirijske jednadžbe koje u sebi sadrže izmjerene vrijednosti vlažnosti materijala i vremena sušenja, procesne parametre, te neke fenomenološke koeficijente. Fenomenološki koeficijenti opisuju prirodu neke pojave i mogu dovesti do širokih predviđanja kinetike sušenja ako se povežu s najprikladnijom pokretačkom silom (razlika koncentracije, tlak, temperatura). Boss i suradnici (2004) navode da modeli s ovakvim koeficijentima zamjenjuju puno složenije modele, te su kao takvi pogodni za projektiranje procesne opreme i optimiranje procesa.

Empirijski modeli u procesu sušenja matematički definiraju:

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

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

Vrijednosti koeficijenata (parametara) sušenja računaju se linearnom ili nelinearnom regresijom (logaritamska, eksponencijalna, potencijska) te moraju zadovoljiti određene statističke kriterije odnosno dati najmanju moguću razliku između eksperimentalno dobivenih i izračunatih vrijednosti vlažnosti sušenog materijala. Procjena modela provodi se statističkom analizom, a kao najčešći kriterij uzima se indeks korelacije (R) između izračunatih i eksperimentalnih vrijednosti te korijen kvadrata srednje pogreške (Akpinar, 2006; Wang i Chao, 2002).

2.5. KONVEKCIJSKO SUŠENJE

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

Konvekcija može biti prirodna i prisilna. Kod prirodne konvekcije razlike u temperaturama uzrokuju razlike gustoća, koje zatim dovode do kretanja većih masa fluida. Kod prisilne konvekcije se kretanje fluida postiže mehaničkim putem. Toplina se vlažnom materijalu dovodi strujanjem zraka ili nekog drugog plina iznad njegove površine. Toplina potrebna za isparavanje konvekcijom predaje se izloženoj površini materijala, a isparena vlaga se potom odvodi pomoću medija za sušenje (uglavnom zrak, ali mogu biti i plinovi izgaranja, pregrijana para i sl.). Procesi prijenosa tvari i topline odvijaju se u suprotnim smjerovima. Takvi se sušionici obično nazivaju direktni sušionici (Sander, 2003).

U periodu konstantne brzine sušenja vlažna površina materijala ima temperaturu koja odgovara temperaturi mokrog termometra medija kojim se suši, dok se u periodu padajuće brzine sušenja temperatura materijala približava temperaturi suhog termometra medija kojim se provodi sušenje. O tome se mora voditi računa kada se suše materijali osjetljivi na povišene temperature, kao što su prehrambeni materijali (Ježek, 1999; Sander, 2003; Tomas, 2000).

2.6. METODE OBRADE BIOLOŠKIH MATERIJALA NAMIJENJENIH SUŠENJU

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

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

Guljenje i rezanje izaziva znatne promjene biljnih tkiva koje se u prvom redu očituju u povećanju respiracije, produkciji etilena te raznih reakcija fenolnih spojeva. Boja, tekstura i aroma oštećenih biljnih tkiva, između ostalog, su posljedica utjecaja sinteze i polimerizacije fenolnih spojeva (Rolle i Chism, 1987).

Gubitak šećera i ostalih topivih tvari tijekom obrade mogu utjecati na gubitak arome što dovodi do smanjenja kvalitete osušenih proizvoda (Carlin i sur., 1990; Howard i sur., 1994).

Cilj pripreme bioloških materijala je poboljšanje kvalitete konačnog proizvoda te poboljšanje kinetike sušenja. Jedan dio metoda prethodne obrade usmjeren je na operacije općeg značenja, dok se drugi dio usmjerava na poboljšanje samog procesa dehidratacije (Picchioni i sur., 1994).

Metode koje se primjenjuju u cilju zaustavljanja neželjenih procesa metabolizma i poboljšanja kinetike sušenja oštećenih biljnih tkiva mogu se klasificirati u dvije grupe: kemijske i nekemijske (fizikalne) metode (Lewicki, 1998).

2.6.1. Kemijske metode

2.6.1.1. Anorganske tvari

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

Kao sastojci hrane, pojam sulfiti obuhvaća sumpor dioksid (SO_2), natrij metabisulfit ($Na_2S_2O_5$), natrij bisulfit ($NaHSO_3$), natrij sulfit (Na_2SO_3), kalij metabisulfit ($K_2S_2O_5$) i kalij bisulfit ($KHSO_3$).

Funkcija sulfita u hrani je višestruka:

- sprječavaju enzimsko i neenzimsko posmeđivanje,
- kontroliraju rast mikroorganizama,
- djeluju kao sredstvo za izbjeljivanje,
- imaju antioksidativno djelovanje, te
- djeluju kao reducirajući posrednici

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

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

Riva i Masi (1988) ustanovili su da namakanje kolutića jabuke u otopini $K_2S_2O_5$ tijekom 5–30 minuta smanjuje se njihova čvrstoća tijekom konvekcijskog sušenja te se znatna kontrakcija volumena uočava tek u završnom stadiju sušenja.

Barbanti i suradnici (1991) utvrdili su da dodatak sulfita prije sušenja uzoraka jabuka i breskvi utječe na povećanje njihove mase tijekom rehidratacije u odnosu na neobrađene uzorke.

Prethodnom obradom svježih uzoraka jabuke 1,5 % - tnom otopinom $K_2S_2O_5$ postiže se veća brzina sušenja u odnosu na brzinu sušenja netretiranih uzoraka jabuke. 1,5 % - tna otopina

$K_2S_2O_5$ pokazuje značajan utjecaj na smanjenje ukupne promjene boje osušenih uzoraka (Planinić i sur., 2001). Međutim, sulfiti se danas upotrebljavaju samo u nekim slučajevima jer mogu izazvati ozbiljne zdravstvene smetnje te je stoga njihova primjena zakonski regulirana.

Biljna tkiva koja su rezana ili sjeckana pokazuju smanjenje respiracije te intenziviranje rekonstitucijskih procesa ako se tretiraju kalcijem (Picchioni i sur., 1994; Poovaiah. 1986). Dodatak kalcija pomaže povećanju integriteta staničnih membrana i staničnih stijenki. Također, kalcij koji se infiltrira unutar stanice stvara veze sa staničnom stijenkom te gradi poprečne veze s pektinskim tvarima unutar središnje lamele (Ahmed i sur., 1991; Glenn i Pooviaiah, 1990; Poovaia, 1986).

Namakanje biljnih tkiva u otopini NaCl prije provedbe sušenja ne pokazuje značajan utjecaj na čvrstoću tkiva, ali je uočeno bitno povećanje rehidratacijske sposobnosti kod osušenih proizvoda (Riva i Masi, 1988). Tijekom rehidratacije kristali NaCl disociraju te tvore koncentrirane nakupine natrijevih i kloridnih iona. Solvatacija tako nastalih iona omogućava bržu a samim tim i bolju rehidrataciju (Curry i sur., 1976).

Prethodna obrada s Na_2CO_3 omekšava strukturu tkiva i povećava rehidracijska svojstva osušenih uzorka celera (Neuman, 1972).

2.6.1.2. Organske tvari

Ugljikohidrati

Literaturni pregled pruža uvid u dva osnovna modela upotrebe ugljikohidrata prije provedbe sušenja, a to su:

- I. model - zasniva se na primjeni relativno niskih koncentracija šećernih otopina, uz kratko vrijeme obrade te
- II. model - sastoji se u primjeni visokih koncentracija šećera što rezultira stvaranjem osmotskog tlaka koji je odgovoran za uklanjanje vode te impregniranjem samog tkiva (Lewicki, 1998).

Obrada biljnih tkiva saharozom ili glicerolom prije operacije sušenja znatno poboljšava rehidrataciju tako obrađenih bioloških materijala. Obrada saharozom pokazuje promjenu u

strukturi i mehaničkoj čvrstoći biljnih tkiva. Također, uočeno je da otopine polihidroksida skraćuju vodikove veze u polisaharidima biljnih stanica, što je u izravnoj korelaciji sa smanjenjem deformacija tijekom sušenja (Neuman, 1972).

Utjecaj šećera na različite stanične komponente rezultira očuvanjem funkcionalnosti proteina. Stabilizacija trodimenzionalne strukture proteina izaziva povećanje hidrofobnih interakcija, kao i određenih hidrofilnih svojstava prilikom nastajanja proteinsko-šećernih kompleksa (Mudahar i sur., 1989; Yoo i Lee, 1993).

Dehidratacijom membrana povećavaju se Van der Waals-ove privlačne sile između acilnih lanaca i tranzicija tekućih kristala u gel strukturu. Disaharidi, kao što su saharoza ili trehaloza, vežu vodu te sprječavaju takvu faznu promjenu (Crowe i sur., 1988).

Osmotsko uklanjanje vode u većini istraživanja daje nepovoljne rezultate u pogledu rekonstitucijskih svojstva bioloških materijala. Niske vrijednosti rehidratacionog omjera uočene su kod jabuke, peršina, mrkve i bundeve, a efekt osmotskog uklanjanja vode kod navedenih bioloških materijala bio je ovisan o vrsti uporabljene osmoaktivne tvari. Također je primijećeno da su brzina rehidratacije, kao i konačni sadržaj vode, veći u slučaju osmo-konvekcijskog sušenja materijala koji su tretirani sa škrobnim sirupom u odnosu na one koji su tretirani otopinom saharoze (Lenart i sur., 1992).

Prodiranje šećera u jabučno tkivo popraćeno je omekšavanjem njegove teksture. Kockice jabuke kod kojih se voda uklanjala osmotskim putem pokazuju slabu otpornost na kompresiju, u odnosu na one koje nisu obrađene. Razlog slabljenja teksture tkiva kockica jabuke uslijed dehidratacije osmozom pripisuje se padu turgoskog tlaka te premještanju iona iz stanične stjenke u okolni medij. Također, uočena je depolimerizacija pektinskih tvari uslijed povećane enzimske aktivnost, što dodatno slabi strukturu tkiva biljne stanice (Forni i sur., 1986).

Osmotsko uklanjanje vode u kombinaciji s konvekcijskim sušenjem rezultira znatnim promjenama strukture tkiva bioloških materijala, koje utječu i na mehanička svojstava osušenih proizvoda (Abonyi i sur., 2002).

Biopolimeri

Međustanični prostori predstavljaju najbrži put za prodiranje velikih molekula u biljno tkivo. Infiltracija biopolimera u međustanični prostor, kao i staničnu stjenku, povećava otpornost materijala prema promjenama koje su izazvane prethodnom obradom i sušenjem. Obrada s dekstrinima manjih molekula prije provedbe sušenja daje bolju teksturu kod rehidratirane mrkve i kockica rajčice te povećanje kapaciteta zadržavanja vode (Mudahar i sur., 1989; Mudahar i sur., 1991).

Veći utjecaj na poboljšanje teksture i rehidratacijska svojstava ima obrada uzoraka škrobom. Naime, dokazano je da namakanje rajčice prije provedbe sušenja u 2,5 %-tnoj otopini škroba tijekom dvije minute, pri sobnoj temperaturi znatno poboljšava njenu rehidrataciju (Tripathi i Nath, 1989).

Za kockice mrkve obrađene sa 2,5 %-tnom otopinom škroba pri temperaturi 80 °C tijekom 30 sekundi potrebno je kraće vrijeme sušenja, te je uočeno povećanje gustoće uzoraka u odnosu na uzorke blanširane pri temperaturi 90°C tijekom 3 minute. Također je uočeno manje skupljanje uzoraka, za oko 10 %, te poboljšanje rehidratacije u odnosu na blanširane uzorke (Kunzek i sur., 2002; Lewicki, 1998).

2.6.1.3. Površinski aktivne tvari

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

Kratkotrajnim uranjanjem voća s kožicom u zagrijane alkalne otopine uklanja se voštana ovojnica (*tzv. kutikula*), a operacija je poznata kao dipovanje (Hegedušić, 1991; Lovrić i Piližota, 1994; Lovrić, 1991).

Uranjanje boba grožđa u otopinu etilolata (*etil-9-oktadecenoat*) uz dodatak K_2CO_3 značajno smanjuje otpor kožice prema prolasku vode te se na takav način ukupno vrijeme sušenja smanjuje za polovicu. Povećanje brzine sušenja stvara otvorenu, poroznu strukturu, koja rezultira boljim rehidratacijskim svojstvima (Doymaz i Pala, 2002; Masi i Riva, 1988).

Uranjanje šljiva u zagrijanu otopinu NaOH (0,5 %) značajno skraćuje vrijeme sušenja te je u tom slučaju ono jednako vremenu potrebnom za sušenje blanširanih uzoraka. Iako ne spada u aditive koji se dodaju u hranu, NaOH se ipak može koristiti za poboljšavanje preradbenih svojstava materijala (Barbanti i sur., 1995).

2.6.1.4. Ostala sredstva za prethodnu obradu

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

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

Ostali inhibitori enzimskog posmeđivanja u komercijalnoj upotrebi su aminokiseline koje sadržavaju sulfhidrilnu skupinu, posebno cistein i reducirani glutation; te anorganske soli, kao što su natrijev i cinkov klorid (Piližota i Šubarić, 1998).

2.6.2. Nekemijske (fizikalne) metode obrade

2.6.2.1. Blanširanje

Blanširanje predstavlja jednu od najraširenijih metoda prethodne obrade bioloških materijala, posebice voća i povrća, namijenjenih sušenju. Blanširanjem se nastoji izazvati denaturacija ili inhibicija enzima koji su odgovorni za smanjenje kakvoće proizvoda kroz enzimsko posmeđivanje, oksidaciju lipida i ostale degradativne reakcije. Također, blanširanje znatno utječe na skraćivanje vremena sušenja, uklanjanje zraka iz međustaničnog prostora te omekšavanje teksture bioloških materijala (Lewicki, 1998; Negi i Roy, 2000).

Blanširanje se provodi termičkom obradom materijala, pripremljenog na odgovarajući način (oljuštenog, izrezanog, usitnjenog i sl.), provođenjem kroz toplu vodu (eventualno vrelu) ili

zasićenu vodenu paru u trajanju od nekoliko minuta (Lovrić, 1991). Biološki materijali tijekom zagrijavanja omekšaju, što je posljedica pada turgorskog tlaka i kompleksnih promjena unutar polisaharidnog matriksa stanične stjenke. Smanjenje kohezivnih sila unutar polisaharidnog matriksa te pad adhezije unutar stanice, rezultira povećanjem adsorpcijskih i rekonstitucijskih svojstava materijala (Lewicki, 1998). Nadalje, stanična tkiva gube svoju čvrstoću zbog enzimske aktivnosti što dovodi do depolimerizacije celuloznih i pektinskih tvari unutar stanične stijenke (Bolin i Huxsoll, 1989; Simal i sur., 1997).

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

Do danas su provedena brojna ispitivanja utjecaja različitih načina blanširanja na dinamiku sušenja i kvalitetu dehidratiranih proizvoda. Koji će se postupak blanširanja bioloških materijala primijeniti ovisi prvenstveno o vrsti i sastavu konkretnog biološkog materijala namijenjenog sušenju (Heredia-Leon i sur., 2004; Kompany i sur., 1991).

Blanširanje ima velik utjecaj na neenzimsko posmeđivanje voća i povrća. Blanširane kockice mrkve pokazuju visoki stupanj zadržavanja β-karotena, te značajnu degradaciju askorbinske kiseline u odnosu na neobrađene uzorke (Negi i Roy, 2001; Seow i sur., 1992).

Blanširanje korjenastog i lisnatog povrća u vodi pri temperaturi 95 °C može se poboljšati dodatkom sulfita, otopina soli, bikarbonata te magnezijevog-oksida (Collins i sur., 1997; Negi i Roy, 2000).

2.6.2.2. Zamrzavanje

Utjecaj zamrzavanja na strukturu tkiva bioloških materijala prije sušenja predmet je istraživanja više autora (Asami i sur., 2003; Choe i sur., 2001; Matteo i sur., 2002; Oliveira i Silva, 1992). Kockice mrkve koje su zamrznute prije sušenja pokazuju značajno skraćivanje ukupnog vremena sušenja te za oko 30 % manje skupljanje u odnosu na blanširane uzorke. Međutim, stupanj rehidratacije je bio nešto niži nego kod blanširanih kockica mrkve (Oliveira i Silva, 1992). Zamrzavanje voća i povrća prije sušenja u vakuumu daje osušeni proizvod boljih

rehidratacijskih svojstava u odnosu na materijale koji se suše vrućim zrakom (Doymaz i Pala, 2002).

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

Uspoređujući difuziju neobrađenih i prethodno zamrznutih uzoraka mrkve, došlo se do zaključka da se tijekom njihovog sušenja difuzitet smanji na polovicu inicijalne vrijednosti za prethodno zamrznute uzorke (Lewicki, 1998).

Zamrzavanje špinata rezultira smanjenjem sadržaja glikolipida te povećanjem broja neutralnih lipida. Triacilgliceroli i slobodni steroli u neutralnim lipidima te sterilglikozidi i monogalaktozildigliceridi u glikolipidima su stabilniji tijekom prethodne obade. Sadržaj klorofila, luteina i β-karotena u špinatu se smanjuje toplinskom obradom (Choe i sur., 2001).

Statistički značajne vrijednosti u sadržaju ukupnih fenolnih tvari uočene su kod kupina, jagoda te kukuruza koji su nakon branja bili zamrznuti ili su pak sušeni uz prethodno zamrzavanje u odnosu na uzorke koji su sušeni samo u struji vrućeg zraka. Sekundarni fenolni metabolizam igra važnu ulogu u očuvanju raznih svojstava biljnih tkiva. Također, veliki broj različitih fenolnih spojeva je važan i za očuvanje ljudskog zdravlja (Asami i sur., 2003).

2.7. PROMJENE IZAZVANE SUŠENJEM

2.7.1. Promjena volumena

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

U ranim fazama sušenja, dok gradijent koncentracija još nije znatan, svojstva površinskog sloja ne pokazuju bitne razlike u odnosu na svojstva unutrašnjeg dijela materijala. U tom stadiju materijal je viskoelastičan i otporan na deformacije te se uklanjanje vode odražava kroz direktnu promjenu volumena. Količina vode koja se uklanja iz materijala skoro u potpunosti odgovara stupnju skupljanja ili kvrčenja (Lewicki, 1998).

Skupljanje uzoraka mrkve u periodu konstantne brzine sušenja ekvivalentno je volumenu isparene vode u konvekcijskom sušioniku pri temperaturama 60 i 80 °C, no sušenje mrkve pri temperaturi 100 °C i krumpira pri temperaturi 60 °C rezultira manjim kontrakcijama volumena u odnosu na volumen isparene vode (Nieto i sur., 2004).

U živom tkivu samo voda i male molekule u otopini difundiraju kroz stanične stijenke koje imaju svojstvo visoko selektivnih permeabilnih membrana (Puiggali i sur., 2004).

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

Porast koncentracije otopljenih tvari na površini ima za posljedicu stvaranje velikog gradijenta vlažnosti te se pod takvim uvjetima odvija difuzija tvari u smjeru unutrašnjosti gdje je otopina većeg razrjeđenja. Postupno koncentriranje otopljenih tvari u perifernim dijelovima bioloških materijala ima za posljedicu intenziviranje različitih degradativnih reakcija, orožnjavanje i kvrčenje površinskog sloja (Potter i Hotchkiss, 1995; Suarez i Viollaz, 1991).

2.7.2. Poroznost

Promjena volumena tijekom provedbe sušenja ima za posljedicu stvaranje porozne strukture bioloških materijala. Materijal kod kojeg je došlo do ekstenzivnog kvrčenja pokazuje značajno smanjenje broja pora, kao i njihove prosječne veličine (Lewicki, 1998).

Isparavanjem vode povećava se viskoznost preostale otopine, kojoj se smanjuje mobilnost i difuznost molekula. Nekristalni dijelovi polisaharida i proteina, kao i stanični sokovi, grade amorfne regije. Temperatura staklastog prijelaza, koja je inače vrlo niska, znatno se povećava ukoliko se smanjuje sadržaj vode. Staklasto stanje koje se oblikuje u završnom periodu sušenja daje mehaničku čvrstoću materijala. Zbog toga dolazi do povećanja kvrčenja i poroznosti materijala (Roos i Karel, 1991; Tsami i Katsioti, 2000).

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

Porozni proizvodi imaju prednosti koje se ogledaju u brzoj topljivosti, boljoj sposobnosti rekonstitucije, većem prividnom volumenu, dok su nedostaci skraćenje vremena skladištenja zbog povećanja površine koja je izložena zraku, svjetlu itd (Potter i Hotchkiss, 1995; Shapton, 1998).

2.7.3. Promjena boje (posmeđivanje)

Boja povrća predstavlja je jedan od najvažniji parametara kvalitete. Tako Piližota i Šubarić (1998) navode kako općenito proizvodi koji ne zadovoljavaju u pogledu boje često nisu prihvaćeni od strane potrošača, usprkos dobrom okusu i aromi.

Tijekom pripreme, prerade i skladištenja povrća može doći razvoja poželjnih i nepoželjnih svojstava među kojima je najvažnije svojstvo promjene boje. Ovo svojstvo je produkt reakcija posmeđivanja koje utječu na sljedeće karakteristike povrća:

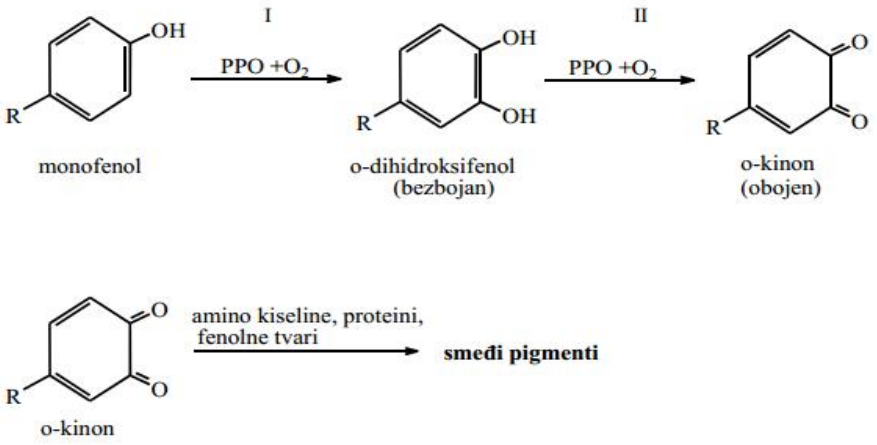
- nutritivnu vrijednost,
- aromu,
- stabilnost tijekom skladištenja te
- na izbor same tehnologije prerade.

Reakcije posmeđivanja mogu se podijeliti na enzimsko i neenzimsko posmeđivanje.

2.7.3.1. Enzimsko posmeđivanje

Enzimsko posmeđivanje u većini slučajeva predstavlja negativnu promjenu koja je vezana uz promjenu boje i sastava voća i povrća. Ove reakcije podrazumijevaju nastajanje tamno obojenih tvari iz fenolnih spojeva (supstrat) djelovanjem enzima polifenol-oksidaze (PPO) uz prisustvo kisika. Fenolni spojevi se u biljnim stanicama svježeg voća i povrća nalaze pretežito u vakuolama, dok se oksidoreduktaze (PPO) nalaze uz stanične stijenke (Pozderović, 2013). Mehaničkim operacijama (guljenje, rezanje, mljevenje itd.) razara se stanična struktura te se omogućava kontakt enzima i supstrata s kisikom iz zraka.

Na **Slici 4** vidljivo je da je PPO odgovorna za hidroksilaciju monofenola u *o*-difenole koji zatim oksidiraju do *o*-kinona. Kinoni su jako reaktivni i u neenzimskim reakcijama sa aminokiselinama, fenolnim spojevima i proteinima daju tamno obojene melanoidne pigmente.



Slika 4 Reakcije hidroksilacije monofenola i dehidrogenacije *o*-difenola, katalizirane polifenol oksidazom (Pozderović, 2013)

Ovim procesima je zajedničko to što svi započinju kontaktom između fenolnih spojeva i enzima, koji stupaju u kontakt tek kada je narušena stanična struktura. Naime, za enzimsko posmeđivanje je potrebna nazočnost triju komponenti: kisik, enzim i supstrat. Shodno tome enzimsko posmeđivanje funkcija je aktivnosti enzima i koncentracije supstrata u voću i povrću, a o njihovim koncentracijama ovisi stupanj posmeđivanja (Piližota i Nedić Tiban, 2014).

Najčešći enzim u voću i povrću koji uzrokuje ove reakcije je polifenol-oksidaza (PPO). PPO je oligomerni enzim koji sadrži metaloporfirinski prsten s bakrom (Cu^{2+}) kao prostetskom skupinom, a pripada skupini oksidoreduktivnih enzima. Nadalje, fenolni spojevi sadrže aromatski prsten na kojem mogu biti jedna ili više hidroksilnih skupina uz druge substituente. Fenolni supstrati enzima PPO kod batata su klorogenska kiselina i kava kiselina (Piližota i Nedić Tiban, 2014).

2.7.3.2. Neenzimsko posmeđivanje

Neenzimsko posmeđivanje u velikom broju slučajeva predstavlja negativnu promjenu koja dovodi promjene boje, ali i drugih promjena kao što su degradacija sastojaka hrane, smanjenje probavljivosti proteina te tvorbe toksičnih spojeva.

Nasuprot reakcijama enzimskog posmeđivanja, koje uključuju prisutnost enzima, ove reakcije ne zahtijevaju njihovu prisutnost (katalitičko djelovanje). Također nije nužna niti nazočnost kisika, ali kisik i svjetlo pospješuju ove procese.

Reakcije neenzimskog posmeđivanja mogu se podijeliti u tri kategorije:

1. *Maillard-ove reakcije ili reakcije tipa karboni - amin*: započinju reakcijom između slobodne amino skupine amino kiselina, peptida ili proteina i karbonilne skupine reducirajućih šećera, aldehida i ketona, spojeva sa aldehidnom i keto grupom. Ove reakcije ubrzavaju se kod povišene temperature, a posljedice su promjena arome, smeđi pigmenti, gubitak esencijalnih amino kiselina, produkcija toksina kao što je akrilamid itd.
2. *Karamelizacija*: reakcije ugljikohidrata u odsustvu amina. Ove vrste reakcija pojavljuju se pri povišenim temperaturama (prženje, pečenje, sušenje itd.).
3. *Oksidativna degradacija askorbinske kiseline*: može, ali i ne mora biti katalizirana enzimima. To je termička degradacija koja se odvija bez prisustva ili u prisustvu amino kiselina, a produkt reakcije oksidirani di- i poli- karbonilni spojevi.

Reakcije enzimskog posmeđivanja u svojoj drugoj fazi, nakon nastanka kinona, odvijaju se mehanizmom neenzimskog posmeđivanja (isključen utjecaj enzima).

Reakcije neenzimskog posmeđivanja ne moraju nužno imati nepoželjan učinak i se često radi na stvaranju uvjeta za njihovo nastajanje. Istodobno, nekoliko studija (Krokida i Maroulis, 2001; Sharma i sur., 2000; Šubarić, 1999) utvrdilo je da su produkti neenzimskog posmeđivanja u nekim slučajevima poželjni zbog prepoznatljivih svojstava određenih prehrambenih proizvoda kao što su pekarski proizvodi, pečeno meso, pržena kava itd.

2.7.3.3. Sprječavanje posmeđivanja

Kako bi se enzimsko i neenzimsko posmeđivanje spriječilo potrebno je poznavanje njihovih reakcijskih mehanizama, ali i kemijskog sastava same namirnice.

Opći princip sprječavanja enzimskog posmeđivanja temelji se na čimbenicima koji do njega dovode, a to su:

- enzim PPO - inhibicija termičkim i kemijskim metodama;
- supstrat - primjena reducirajućih sredstava pri čemu se *o*-kinoni reduciraju u početni spoj (askorbinska kiselina, sulfiti, tiolne tvari itd.);
- kisik - pakiranje u ambalažu nepropusnu za kisik, aseptično punjenje.

Sprječavanje promjene boje je značajno kako zbog očuvanja organoleptičkih svojstava, tako i zbog činjenice da polifenoli koji sudjeluju u reakcijama enzimskog posmeđivanja imaju značajnu ulogu u ljudskom zdravlju.

S druge strane sprječavanje neenzimskog posmeđivanja, u kompleksnom sustavu kakav je hrana, nije uvijek lako ostvariti, niti postoji metoda za sprječavanje ovih reakcija (Piližota i Nedić Tiban, 2014). Generalno gledajući ono se može spriječiti primjenom sulfita prije smrzavanja ili dehidratacije (H_2SO_3, SO_2), smanjenjem sadržaja amino spojeva, proteina i reducirajućih šećera te osiguravanjem niskih temperatura u svim fazama prerade.

2.8. REHIDRATACIJSKA SVOJSTVA

Osušeni proizvodi se u velikom broju slučajeva konzumiraju ili dalje prerađuju nakon njihovog rehidratiranja. Cilj sušenja svakako je dobivanje proizvoda s produženim vijekom trajanja, koji će nakon rekonstitucije imati zadovoljavajuća teksturalna, vizualna i senzorska svojstva uz minimalno vrijeme rehidratacije, što je naročito važno za instant i „ready-to-eat“ proizvode (Marabi i sur., 2004, Marabi i sur., 2003). Shodno tome, otvorenost strukture, odnosno sposobnost rehidratacije ili rekonstitucije, predstavlja jedno od najvažnijih kriterija ocjenjivanja uspješnosti procesa dehidratacije.

Tijek i stupanj rehidratacije mjere se praćenjem porasta mase kuhanjem dehidratirane namirnice kroz određeno vrijeme, a izražavaju se kao rehidratacioni omjer, koeficijent rehidratacije i postotak vode u rehidratiranom materijalu (Lovrić, 1991).

Rehidratacijski omjer može se izračunati prema **formuli (12)**:

$$RO = \frac{masa\ ocijeđenog\ rehidratiranog\ uzorka}{masa\ suhog\ materijala} \quad \textbf{(12)}$$

Koeficijent rehidratacije može se izračunati prema **formuli (13)**:

$$KR = \frac{masa\ ocijeđenog\ rehidratiranog\ uzorka}{masa\ prije\ sušenja} \quad \textbf{(13)}$$

Kapacitet rehidratacije može se izračunati prema **formuli (14**):

$$KR = \frac{\%\ vode\ nakon\ rehidratacije}{\%\ suhe\ tvar\ uzorka} \quad \textbf{(14)}$$

U idealnom slučaju bi se trebalo postići vraćanje potpune količine uklonjene vode. Međutim, u praksi, većina promjena koje nastaju tijekom sušenja u staničnom tkivu biološkog materijala su ireverzibilne te se rehidratacija ne može smatrati kao proces koji je reverzibilan dehidrataciji. Svojstva i kakvoća rehidratiranog biološkog materijala uvjetovani su promjenama koje su uzrokovane prethodnom obradom prije sušenja, sušenjem te rehidratacijskim ili rekonstitucijskim svojstvima samog biološkog materijala (Toledo, 1980).

Na rekonstituciju hrane nemaju utjecaja samo veličina i oblik čestica, već i fizičke i kemijske promjene koje su se dogodile tijekom procesa sušenja, odnosno skladištenja. To se prije svega odnosi na denaturaciju proteina i ireverzibilne promjene ostalih sastojaka koje je teško izbjeći (Bobic i sur., 2002; Krokida i Maroulis, 2001; Lewicki i sur., 1997; Vetter i Kunzek, 2003). Više autora navodi da poseban problem predstavlja škrob koji se postupno modificira djelovanjem topline, što je naročito izraženo kod sušenja krumpira kao i nekih proizvoda na njegovoj bazi, npr. pirea (Simal i sur., 1994; Taiwo i sur., 2002).

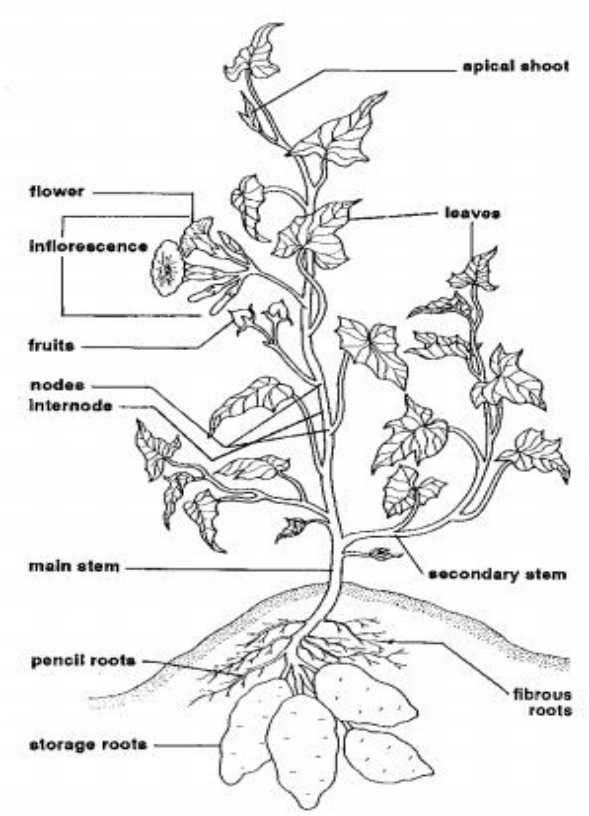
Osušeni biološki materijali, kao što su voće i povrće, trebali bi kuhanjem u vreloj vodi, kroz najviše 20 – 30 minuta, poprimiti stalnu masu otprilike jednaku masi svježeg uzorka uzetog za sušenje. Međutim, različiti biološki materijali imaju različitu rehidratacijsku sposobnost. Razlog tome je različiti kemijski sastav te sama struktura materijala.

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

Tijekom provedbe rehidratacije može se uočiti nekoliko procesa s različitom kinetikom. U početku procesa rehidratacije apsorpcija vode je obično intenzivna te daljnjom provedbe dolazi do znatnog usporavanja brzine apsorpcije. Ubrzana hidratacija bioloških materijala izaziva promjene na njihovoj površini, kao i kapilarnim svojstvima koja su vezana uz poroznost (Karathanos i sur., 1993; Lewicki, 1998). Stupanj rekonstitucije osušenih bioloških uzoraka ovisi o stupnju stanične i strukturne oštećenosti, koje su izravna posljedica sušenja. Rahman i Perera (1999) također navode da na stupanj rekonstrukcije utječu i svojstva vode kojom se provodi rehidratacija kao što su prisutnost aniona u vodi, pH vode itd.

2.9. BATAT (*Ipomoea batatas* L.)

Batat (*Ipomoea batatas* L.) je biljka iz porodice slakova, *Convolvulaceae*. Uzgaja se u tropskom i suptropskom klimatskom području, a potječe iz središnjeg dijela Južne Amerike, odakle se u 16 st. proširio na Europu, Afriku i Aziju. Iako je višegodišnja je zeljasta biljka batat se pretežno uzgaja kao jednogodišnja, a za kvalitetan rast i razvoj treba 100 – 150 dana bez mraza (Grahovac, 2014).



Slika 5 Morfološka svojstva biljke batat (Huaman, 1992)

Na **Slici 5** prikazana su morfološka svojstva biljke. Mladi listovi, vršci biljke i sekundarna zadebljanja korijena upotrebljavaju kao sirovine u prehrambenoj i farmaceutskoj industriji čiji prinos uvelike ovisi o kvaliteti presadnica, gnojidbi, navodnjavanju i malčiranju (Grahovac, 2014.). Korijena batata najčešće se rabi kao hrana te kao materijal za proizvodnju pića, tjestenina i prirodnih bojila, za razliku od listova koji se samo povremeno rabe kao stočna hrana (Bogović i sur., 2013). Kvaliteta navedenih dijelova biljke određuje se prema njihovoj veličini, obliku, boji i okusu. Tako sekundarna zadebljanja korijena, koja se često pogrešno nazivaju gomoljima, mogu biti različitog oblika (okrugli, eliptični, jajoliki, duguljasti itd.) i boje

(bijela, žuta, narančasta i crvena). Navedena svojstva ovise o sorti, tlu u kojem se uzgaja te drugim parametrima.

Nadalje, batat je poljoprivredna kultura koja je karakterizirana s jednostavnim uzgojem na suhim i siromašnim tlima, visokom energetskom vrijednošću po jedinici obradive površine, visokom nutritivnom vrijednošću te obiluje biološki aktivnim komponentama (β-karoten, polifenoli, askorbinska kiselina, dijetalna vlakna itd.) (Van Hal, 2000). Pojedini autori navode kako svježi korijen batata također sadrži umjerene količine vitamina E, B_1, B_2 i B_3 te Fe, K, Ca, Zn, Na, Mg i Mn (Srivastava i sur., 2012; Woolfe, 1992; Adebowale i sur., 2005). Zbog svog kemijskog sastava (**Tablica 2**) svježi korijen batat se svrstava u kategoriju lako pokvarljive sirovine čija se trajnost procjenjuje na 3 mjeseca. Slijedom navedenog potrebno ga je podvrgnuti primarnoj preradi (pranje i guljenje, rezanje na kriške, sušenje i mljevenje) nakon čega se dobije brašno čija je trajnost procijenjena na > 6 mjeseci (Srivastava i sur., 2012).

Tablica 2 Prosječni kemijski sastav svježeg korijena batata (%) (Woolfe, 1992)

Komponente	%
Vlažnost	71,1
Bjelančevine	1,43
Škrob	20,1
Šećeri	2,38
Vlakna	1,64
Masti	0,17
Pepeo	0,74

Prema podacima s FAOSTAT-a (2013) batat je na šesnaestom mjestu u kategoriji poljoprivrednih kultura s opadajućim trendom. U Svijetu se uzgaja na 8 milijuna ha, a prosječan prinos iznosi 14 t/ha. Najveći uzgajači batata nalaze se u Aziji, koja čini 76,8 % ukupnog uzgoja, Africi (10,4 %) te Sjevernoj i Južnoj Americi (2,2 %). U Hrvatskoj se prema realnim predviđanjima očekuje uzgoj na 500 ha uz prinos 20 do 30 t/ha (Grahovac, 2014).

2.10. SUŠENO POVRĆE

Konzerviranje sušenjem, pored konzerviranja zamrzavanjem te konzerviranja sterilizacijom, predstavlja jedno od najprimjenjivanijih metoda konzerviranja povrća. Tako prerađeno povrće može se koristi u vrijeme kada nije dostupno u svježem stanju u vidu poluprerađevine ili finalnog proizvoda. Prednost sušenog povrća u odnosu na zamrznuto ili sterilizirano je smanjenje mase i volumena što olakšava rukovanje i upotrebu, ali smanjuje troškove skladištenja te prijevoza. Međutim, tijekom sušenja povrće prolazi kroz fizičke, mehaničke, kemijske, organoleptičke i nutritivne promjene koje uzrokuju degradaciju kvalitete (Crapiste, 2000). Sukladno navedenom, potrebno je provesti optimizaciju procesnih parametara, naročito temperature, s ciljem postizanja efikasnosti procesa, ali i kvalitete finalnog proizvoda (Banga i sur., 2003). Kako bi se zadovoljili navedeni zahtjevi potrebno je provesti i pripremu povrća za sušenje, a ono uključuje sljedeće operacije i procese:

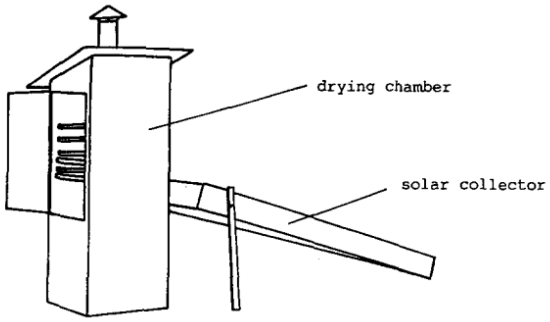
- osnovne obradu (suho i mokro čišćenje, sortiranje, kalibriranje, guljenje i rezanje) te
- specifične obrade koje ovise vrsti početne sirovine (npr. vađenje sjemene lože kod začinske paprike te komušanje i krunjenje kod graška).

Navedene operacije upotrebljavaju i kod drugih metoda konzerviranja (konzerviranje zamrzavanjem ili sterilizacijom). Tako pripremljeno povrće potrebno je prije sušenja podvrgnuti prethodnoj obradi kako bi se spriječile oksidacijske promjene posmeđivanja.

Sušenje povrća se provodi u kontroliranim mikroklimatskim uvjetima (sušionicima) za razliku od voća koje se više suši u prirodnim (makroklimatskim) uvjetima (sunčevim zračenjem). Razlog tome je što povrće sadrži niži udio kiselina zbog čega je podložno mikrobiološkom kvarenju te kao takvo nije pogodno za sušenje u prirodnim uvjetima (izuzetak rajčica). Sušenje povrća u većem (industrijskom) kapacitetu danas se najčešće provodi u kontinuiranim sušionicima s trakama. Upotrebljavaju se i tunelski uređaji s lesama i kolicima, a za manje kapacitete mogu poslužiti i komorni sušionici s lesama (Piližota, 2016). Osušeno povrće potrebno je zatim pakirati i skladištiti u adekvatnim uvjetima jer je osjetljivo na vlagu, kisik i svjetlost. Najčešće se kao ambalažni materijali koriste plastične folije, različiti laminati itd.

Sušenje korijena batata provodi se već generacijama u razvijenim zemljama. Tradicionalnim postupkom korijen batata, koji može biti oguljen ili ne mora, reže se na manje dijelove te se suši prirodno na suncu. Prije rezanja i sušenja korijen se potopi u 8 – 10 %-tnu otopinu NaCl

kako bi se inhibiralo kvarenje uzrokovano mikroorganizmima (Winaro, 1982). Međutim, direktnim izlaganjem sunčevim zrakama uzrokuje gubitak boje uslijed reakcija posmeđivanja. U Japanu je tako osušeni batat iznimno tražen jer se koristi za dobivanje brašna karakteristične boje i snažnog okusa. Diamante i Munro (1993) predložili su sušenje batata sunčevim zrakama, ali indirektnim putem pomoću solarnih panela u mikroklimatskim uvjetima - solarnim sušionicima (**Slika 6**).



Slika 6 Solarni sušionik sa solarnim panelima (Diamante i Munro 1993)

U mnogim istraživanjima sušenja batata zabilježena je uporaba kemijskih i fizikalnih metoda (blanširanje, natrijev metabisulfit $Na_2S_2O_5$, natrijev bisulfit $NaHSO_3$, askorbinska kiselina itd.) koje za cilj prije svega imaju sprječavanje gubitka boje te očuvanje ostalih bitnih svojstava osušenog batata (Ahmed i sur., 2010; Lin i sur., 2005; Shih i sur., 2009; Woolfe, 1992).

U Africi se sušeni korijen batata upotrebljava kao zamjena za kukuruz u krmivima, dok se brašno može koristiti zajedno s pšeničnim brašnom u proizvodnji finalnih proizvoda kao što su keksi, kruh, kolači itd. (Srivastava i sur., 2012). Primjer osušenog batata prikazan je na **Slici 7**.



Slika 7 Osušeni batat

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. ZADATAK

Zadatak rada bio je odrediti utjecaj temperature sušenja te različitih fizikalno-kemijskih postupaka prethodne obrade na kinetiku sušenja, rehidratacijska svojstva i promjenu boje korijena batata.

U tu svrhu trebalo je provesti slijedeće aktivnosti:

- pripremiti svježi uzorak za sušenje;
- odrediti suhu tvar uzorka;
- provesti proces sušenja neobrađenih uzorka na temperaturama 50 °C, 60 °C, 70 °C i 80 °C i brzini strujanja zraka od 2,8 m s^{-1};
- odrediti optimalnu temperaturu sušenja;
- ispitati različite kemijske i fizikalne postupke prethodne obrade uzoraka na optimalnoj temperaturi i brzini strujanja zraka od 2,8 m s^{-1};
- ispitati podudarnost eksperimentalnih podataka s odabranim matematičkim modelom.

Za procjenu utjecaja postupaka prethodne obrade te za praćenje utjecaja procesnih parametara na svojstva osušenih uzoraka, primijenjene su standardne analitičke metode: termogravimetrija, rehidratacija i kolorimetrija (Velić, 2006).

Navedeno istraživanje provedeno je u laboratorijima Prehrambeno-tehnološkog fakulteta Osijek na Katedri za projektiranje tehnoloških procesa i konstrukcijske materijale te Katedri za bioprocesno inženjerstvo.

3.2. MATERIJAL I METODE

3.2.1. Batat

U radu je korišten svježi korijen batata (*Ipomoea batatas* L.) narančaste boje te duguljastog oblika. Uzorak je nabavljen u lokalnom supermarketu i skladišten u hladnjaku na +4 °C do provođenja pokusa.

3.2.2. Priprema svježeg uzorka za sušenje

Svježi uzorci su prije neposredne uporabe izvađeni iz hladnjaka, prani te rezani na ploške debljine 4 mm pomoću električnog rezača. Zatim su ručno rezani cilindričnim rezačem u oblik diska promjera 20 mm pri čemu su dobiveni ujednačeni uzorci kojima je prije sušenja izmjerena boja. **Slika 8** prikazuje pripremljeni svježi uzorak.



Slika 8 Svježi uzorci pripremljeni za sušenje

3.2.3. Termogravimetrijska metoda

Termogravimetrija (TG) je jedna od metoda termalne analize uzoraka. Temelji se na promjeni mase kod uzorka koji se zagrijava ili hladi određenom brzinom ili se uzorak drži na određenoj temperaturi u nekom vremenskom periodu. Ova metoda je korisna za praćenje procesa kod kojih dolazi do promijene ukupne mase ili pojedine komponente uzorka (desorpcija, oslobađanje plinova, apsorpcija vlage) odnosno nije pogodna za uzorke kod kojih ne dolazi do promjene mase.

3.2.3.1. Određivanje udjela suhe tvari/vode

Određivanje apsolutno suhe tvari provedeno je sušenjem u komornom sušioniku pri temperaturi 105 °C i atmosferskom tlaku tijekom 24 sata (AOAC, 1995).

Apsolutno suha tvar se koristi kod izračunavanja vlažnosti uzoraka prema **formuli (15)**:

$$X = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100 \qquad [\%] \qquad \textbf{(15)}$$

gdje je: m_1 – masa uzorka prije sušenja [g] i

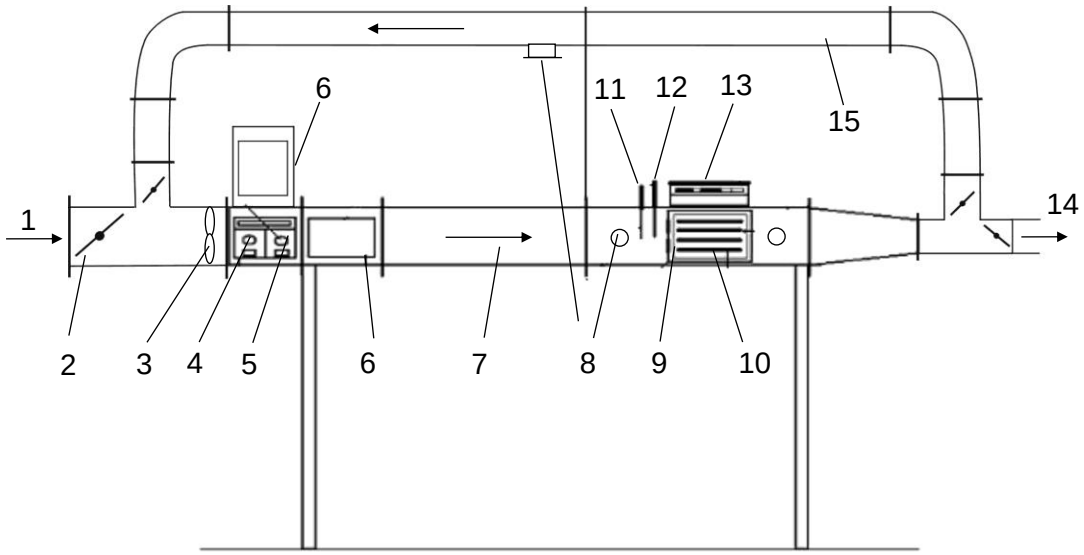
m_2 – masa uzorka nakon sušenja [g].

Suha tvar određivana je i pomoću halogenog analizatora vlage HR73 (Mettler Toledo, Švicarska) koji se sastoji od grijača, osjetljive vage i zaslona na kojem se prikazuju parametri sušenja. Sušenje se provodi pomoću infracrvenih zraka odnosno grijača koji se sastoji od staklene cjevčice ispunjene inertnim halogenim plinom, koji se zagrijava putem Wolframove žice spojene na izvor električne energije. Dimenzije grijača manje su u odnosu na konvencionalne grijače, a punu snagu grijanja postiže u prvih par sekundi, što ovu metodu čini znatno bržom u odnosu na prvotnu. Za provedbu sušenja oko 3 g uzorka ravnomjerno je raspoređeno na aluminijskoj plitici koja je zatim postavljena na držač koji se nalazi ispod grijača. Nakon početka halogeni grijač isijava infracrvene zrake koje uzorak djelomično apsorbira te se unutar uzorka energija isijavanja prevodi u toplinsku energiju. Tijekom provedbe analize vaga kontinuirano mjeri i bilježi masu uzorka, a analiza završava automatski korištenjem brzog program sušenja (*rapid drying* program), pogodan za tvari sa sadržajem vlage iznad 30 % (Velić, 2006). Udio suhe tvari određen je kao srednja vrijednost dvaju paralela za svaki uzorak prije sušenja.

3.2.3.2. Konvekcijsko sušenje

Konvekcijsko sušenje neobrađenih i prethodno obrađenih uzoraka provođeno je korištenjem tunelskog sušionika "TRAY DRIER" (Armfield, Ujedinjeno Kraljevstvo). Na **Slici 9** prikazana je shema navedenog sušionika koji radi na principu prisilne konvekcije. Sušionik se sastoji od tunela (7) u kojem su smješten ventilator (3), grijači (6), nosači s pliticama za uzorke (10) i recirkulacijskog cjevovoda (15) sa zaklopkama (2). Zrak za sušenje je zagrijavan pomoću četiri

grijača smještena na stražnjem dijelu sušionika. Iza grijača postavljen je ventilator koji tjera zrak preko grijača i uzorka pri čemu se postiže prisilna konvekcija. Snaga grijača i brzina rada ventilatora regulirana je pomoću dva potenciometra (4 i 5) postavljena na kontrolnoj ploči s vanjske strane sušionika. Nakon prolaska preko uzoraka zrak se ispušta u atmosferu. Zrak je također moguće usmjeriti u cjevovod za recirkulaciju pomoću sustava zaklopki koje se nalaze na tunelu no taj način rada nije korišten u ovom istraživanju. Sušionik je dodatno izoliran slojem staklene vune i Al-lima pri čemu su smanjeni toplinski gubitci za 55,73 % u odnosu na neizolirani sušionik (Velić, 2006).



Slika 9 Shema konvekcijskog sušionika „TRAY DRIER“ (Velić, 2006)

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

Provedba sušenja

Prije sušenja podešena je željena temperatura sušenja (50°C – 80 °C) te brzina strujanja zraka od 2,8 m s^{-1}. Prethodno pripremljeni uzorci, bilo neobrađeni ili obrađeni različitim fizikalnim ili kemijskim metodama prethodne obrade, stavljeni su na plitice. Plitice su zatim postavljene na nosač unutar sušionika koji je bio povezan s vagom na sušioniku. Vaga je bila spojena na računalo koje je kontinuirano bilježilo promjenu mase uzorka svakih 5 minuta. Vaga je bila

podešena za mjerenje u „*animal*“ opciji jer zbog strujanja zraka dolazi do njihanja nosača s pliticama. U uzorke su na različitim pozicijama postavljana tri termopara tipa T, koja su mjerila temperaturu u sušenim uzorcima. Termoparovi su također bili spojeni s računalom, koje je kontinuirano bilježilo podatke u istim vremenskim intervalima kao u slučaju bilježenja promjene mase uzorka. Temperatura sušenja i vlažnost zraka mjerena je pomoću dvije sonde uređaja "TESTO 350".

Nakon sušenja i kondicioniranja izmjerena je boja kod uzoraka, a potom su uzorci stavljani u bočice od tamnog stakla s čepom te čuvani na sobnoj temperaturi do provođenja postupka rehidratacije i kontrolnog mjerenja boje.

3.2.4. Postupci prethodne obrade uzoraka

Nakon određivanja optimalne temperature pomoću netretiranih uzoraka ispitan je utjecaj različitih fizikalnih i kemijskih metoda na kinetiku i kvalitetu sušenja uzorka.

U radu su korištene slijedeće fizikalne metode prethodne obrade uzoraka:

- blanširanje u vreloj voda temperature 85 °C tijekom 3 minute i
- blanširanje vodenom parom tijekom 5 minuta.

U radu su korištene slijedeće kemijske metode prethodne obrade uzorka:

- potapanje u 0,5 %-tnoj otopini askorbinske kiseline tijekom 3 minute,
- potapanje 0,3 %-tnoj otopini L-cisteina tijekom 5 minuta te
- potapanje 0,15 %-tnoj otopini 4–heksil–rezorcinola tijekom 5 minuta.

3.2.5. Određivanje boje

Boja svježih i osušenih uzoraka mjerena je pomoću kromametra CR 400 (Minolta, Japan) (**Slika 10**) čiji se rad temelji na mjerenju reflektirane svjetlost s površine osvijetljenog predmeta. Predmet se postavlja na otvor mjerne glave promjera 8 mm. U otvoru se nalazi ksenonska lučna svjetiljka, koja pulsiranjem baca svjetlost okomitu na površinu predmeta (Velić, 2006). Dio reflektirane svjetlosti mjeri šest jako osjetljivih silikonskih fotoćelija. Podatke zapisuje

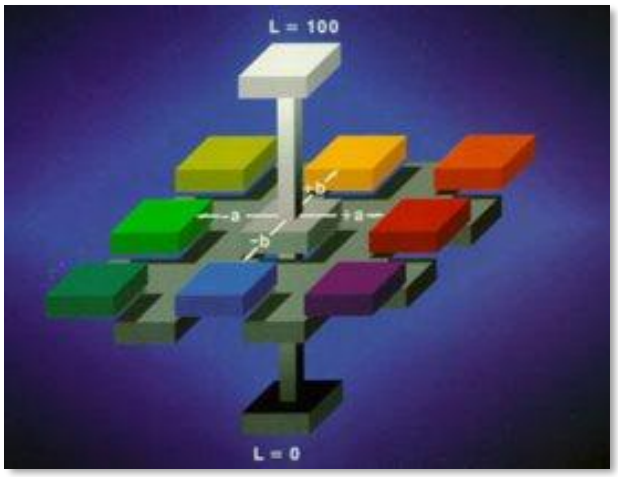
računalo, a za obrađivanje podataka koristi različite matematičke sustave za boju (*X, Y, Z*; *Yxy*; *L*a*b**; *LCH*; *Hunter Lab*).



Slika 10 Kromametra CR 400 (Minolta, Japan)

U radu korišten je *L*a*b** sustav mjerenja prikazan na **Slici 11**. Boja je u ovom sustavu definirana određenim mjestom u trodimenzionalnom prostoru kojeg predstavljaju tri međusobno okomite osi označene kao *L*, a* i b** čije vrijednosti se podudaraju sa sljedećim rasponima boja:

- *L** = 100 (predmet je bijel) ili *L** = 0 (predmet je crn),
- *a** vrijednost može biti pozitivna (crvena boja) ili negativna (zelena boja) i
- *b** vrijednost može biti pozitivna (žuta boja) ili negativna (plava boja).



Slika 11 Prikaz *L*a*b** sustav boja

U radu su *L*, a* i b** parametri boje određivani na svježim i osušenim uzorcima, a boja je izmjerena na 20 uzoraka. Prije svakog mjerenja kromametar je kalibriran sa standardnom bijelom keramičkom pločicom (CR-A43), a podaci su obrađeni računalom (DP-400) te su ispisani na papir.

Na temelju dobivenih vrijednosti L^*, a^* i b^* parametra za svježe i sušene uzorke izračunate su vrijednosti koje ukazuju na promjenu boje tijekom sušenja, a to su:

- ukupna promjena boje (ΔE) koja je računata prema **formuli (16)**:

$$\Delta E = \sqrt{[(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]} \quad \textbf{(16)}$$

- te promjena boje (ΔC^*_{ab}) koja je računata prema **formuli (17)**:

$$\Delta C^*_{ab} = \sqrt{[(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]} \quad \textbf{(17)}$$

Odnos ukupne promjene boje (*ΔE*) i tolerancije ljudskog oka za uočavanje razlike između boja dan je u **Tablici 3**.

Tablica 3 Odnos ukupne promjene boje (*ΔE*) i tolerancije ljudskog oka za uočavanje razlike između boja (Grapho Metronic, 2016)

ΔE	**oznaka**
< 0,2	nije uočljiva
0,2 – 1	vrlo slabo uočljiva
1 – 3	slabo uočljiva
3 – 6	uočljiva
> 6	vrlo uočljiva

3.2.6. Određivanje rehidratacijskih svojstava

U radu je korištena standardna metoda za određivanje rehidratacijskih svojstava. U Erlenmeyerova tikvica od 250 ml dodano je 3 g (± 0,1 g) osušenog uzorka i 150 ml destilirane vode koja je zatim prekrivena staklom. Sadržaj u tikvici zagrijavan je do vrenja koje je trebalo postići unutar 3 minute te je kuhan 10 minuta uz blago vrenje. Nakon toga sadržaj u tikvici je ohlađen i prenesen u Büchnerov lijevak na cijeđenje koje se provodi 5 minuta pri slabom vakuumu. Sadržaj iz lijevka je zatim prenesen na čisto satno staklo i izvagano. Iz dobivenih podataka računat je rehidratacijski omjer (*RO*) prema **izrazu (18)**:

$$RO = \frac{masa\ rehidratiranog\ uzorka}{masa\ osušenog\ uzorka} \quad \textbf{(18)}$$

Određivanje rehidratacijskih svojstava provedeno je u dvije paralele za svaki uzorak koji je sušen pri određenim procesnim uvjetima.

3.2.7. Matematičko modeliranje procesa sušenja

Eksperimentalni podaci u ovome radu izraženi su kao bezdimenzionalna vlažnost ($X^{'}$) uzorka koja predstavlja omjer trenutne vlažnosti materijala ($X(t)$) i početne vlažnosti svježeg materijala (X_0):

$$X^{'} = \frac{X(t)}{X_0} \quad \textbf{(19)}$$

Za aproksimaciju eksperimentalnih podataka korišten je *Page*-ov eksponencijalni matematički model koji je uspješno opisuje kinetiku sušenja različitih materijala u različitim procesnim uvjetima (Barun, 2008). Navedeni matematički model može se izračunati prema **formuli (20)**:

$$X^{'}(t) = e^{(-kt^n)} \quad \textbf{(20)}$$

gdje je: $X^{'}(t)$ – bezdimenzionalna vlažnost u određenom vremenu,

k, n – parametri sušenja.

Parametri sušenja k i n određeni su korištenjem nelinearne Levenberg-Marquardt regresijske metode najmanjih kvadrata, a proračun ovih podataka proveden je računalnim putem korištenjem programa STATISTICA 12.

Diferenciranjem modela **(20)** dobije se izraz za brzinu sušenja:

$$\frac{dX^{'}}{dt} = k \cdot n \cdot t^{(n-1)} \cdot X^{'}(t) \quad \textbf{(21)}$$

Za ocjenu uspješnosti aproksimacije eksperimentalnih podataka sušenja korišten je indeks korelacije (*R*) koji se računa prema **izrazu (22)**:

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

gdje je $\bar{X}_{eksp.}$ srednja vrijednost mjernih podataka $X_{i,eksp.}(t)$.

Pomoću parametara sušenja *k* i *n* izračunate su prva i druga kritična točka i to prema sljedećim izrazima:

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

$$\tau_{K,1} = \left(\frac{n-1}{kn}\right)^{\frac{1}{n}} \quad \textbf{(23)}$$

$$X_{K,1} = X_1 \cdot e^{\frac{1-n}{n}} \quad \textbf{(24)}$$

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

$$\tau_{K,2} = \left(\frac{2n-1}{kn}\right)^{\frac{1}{n}} \quad \textbf{(25)}$$

$$X_{K,2} = X_1 \cdot e^{\frac{1-2n}{n}} \quad \textbf{(26)}$$

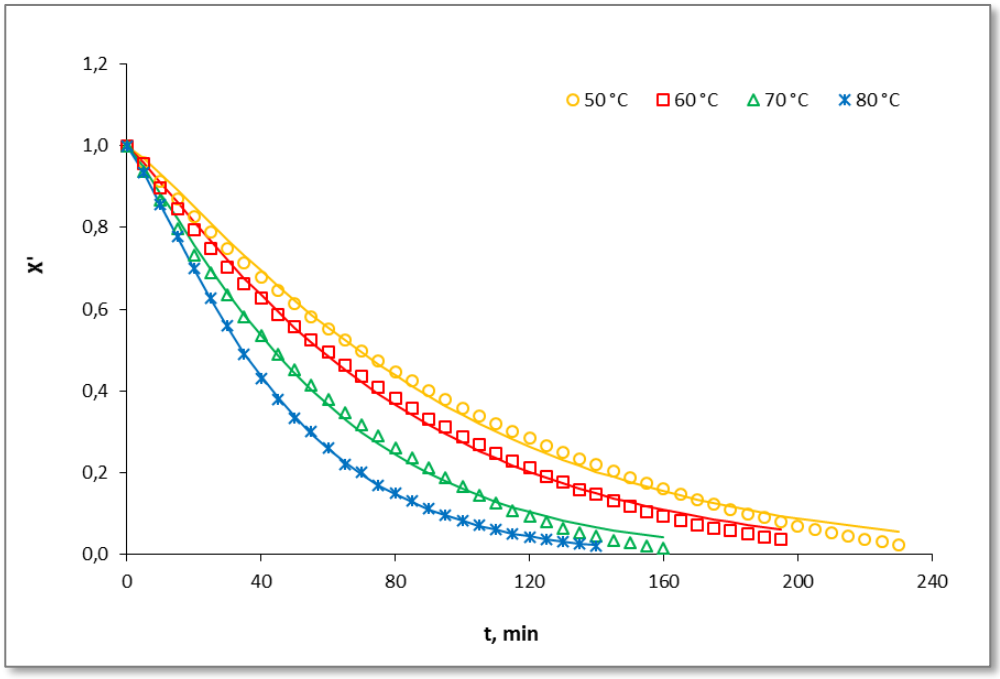
4. REZULTATI I RASPRAVA

U ovom poglavlju prikazani su rezultati dobiveni eksperimentalnim radom kao i rezultati njihove obrade. Rezultati su podijeljeni u tri osnovne skupine:

- kinetičke krivulje konvekcijskog sušenja uzorka batata koje su aproksimirane *Page*-ovim eksponencijalnim matematičkom modelom,
- rezultati promjene boje nakon konvekcijskog sušenja uzorka batata i
- rezultati rehidratacijskog postupka.

4. 1. KRIVULJE SUŠENJA

Na temelju eksperimentalno dobivenih podataka promjene mase vlažnog uzorka tijekom procesa sušenja, koja je izražena kao bezdimenzionalna vlažnost (X'), izrađene su kinetičke krivulje sušenja koje su prikazane na narednim slikama.



Slika 12 Ovisnost bezdimenzionalne vlažnosti uzorka batata o vremenu sušenja pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od 2,8 m s^{-1}

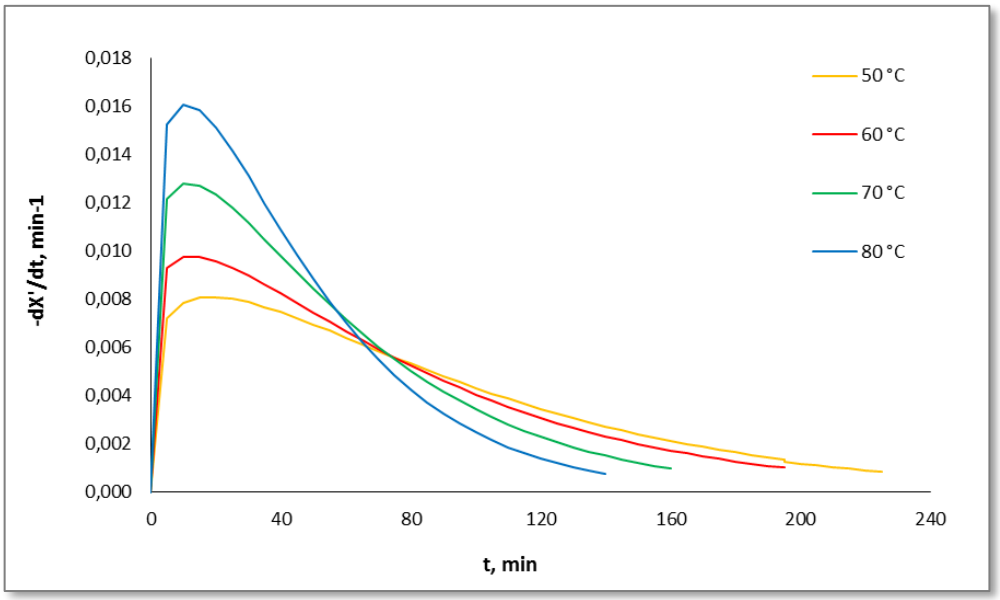
Grafički prikaz ovisnosti bezdimenzionalne vlažnosti (X') o vremenu sušenja, pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od 2,8 m s^{-1}, prikazan je na **Slici 12**. Kako je i očekivano, bezdimenzionalna vlažnost postupno je opadala tijekom cijelog procesa sušenja, a povećanjem temperature sušenja skraćivalo se ukupno vrijeme sušenja. Skraćivanje vremena

sušenja može se objasniti da povećanjem temperature sušenja povećava se parcijalni tlak vodene pare na površini uzorka koji pogoduje bržem uklanjanju vlage iz unutrašnjosti prema površini uzorka.

Iz grafičkog prikaza također je vidljivo dobro slaganje eksperimentalnih vrijednosti (simboli) s aproksimacijskim krivuljama (pune linije) *Page*-ovog matematičkog modela. Navedeno potvrđuje visoke vrijednosti indeksa korelacije (R) koji su prikazani u **Tablici 4**. Indeks korelacije R izračunat je prema **izrazu (22).**

Tablica 4 Parametri aproksimacijskog modela *k* i *n* te indeks korelacije R za konvekcijsko sušenje uzorka batata pri temperaturi 50 – 80 °C

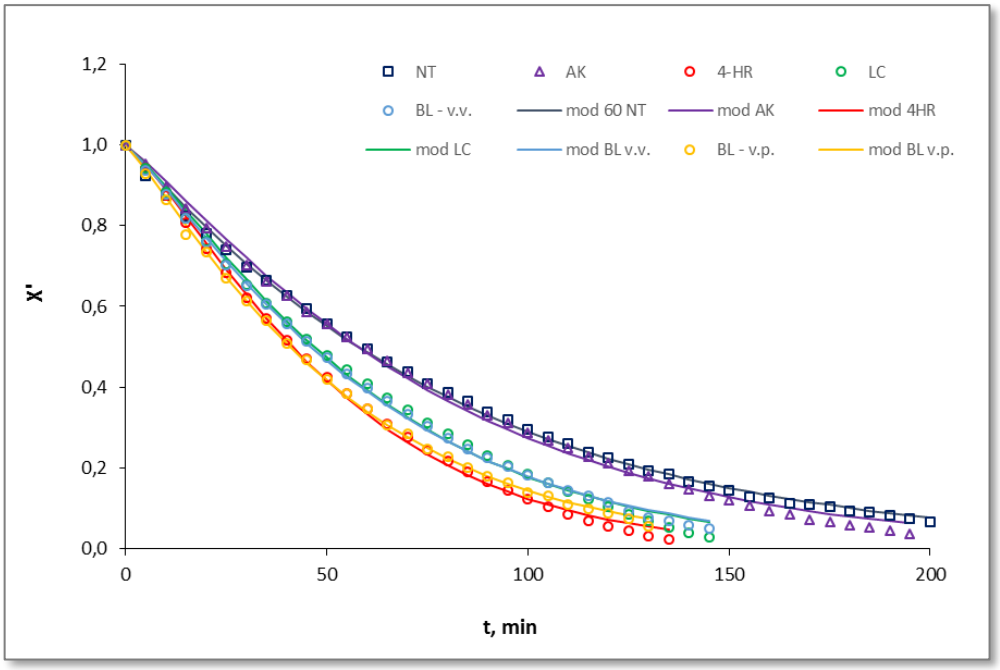
T [°C]	50	60	70	80
k	0,004744	0,006762	0,008332	0,009731
n	1,177314	1,141252	1,170638	1,204949
R	0,997838	0,997838	0,998624	0,998849



Slika 13 Ovisnost brzine sušenja uzorka batata o vremenu sušenja pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od 2,8 m s^{-1}

Grafički prikaz ovisnosti brzine sušenja o vremenu sušenja pri različitim temperaturama sušenja i brzini strujanja zraka od 2,8 m s^{-1} prikazan je na **Slici 13**. Vrijednosti brzine sušenja izračunate su prema **izrazu (21)**, a vrijednosti parametar *k* i *n* nalaze se u **Tablici 4**. Iz grafičkog prikaza vidljivo je da pri višim temperaturama postiže se veća maksimalna brzina sušenja te se ona postiže ranije. Nakon postizanja maksimalne brzine, period prije postizanja maksimalne brzine karakterizira se kao period porasta brzine sušenja, slijedi period opadajuće brzine sušenja, uz izostanak jasnog perioda konstantne brzine sušenja. Kao što je navedeno u teorijskom dijelu, brzina sušenja je u ovom periodu u stalnom opadanju s vremenom sušenja zbog unutarnjih faktora koji ograničavaju brzinu transporta vlage unutar materijala. Ova pojava može se objasniti II. *Fick*-ovim zakonom gdje difuzija predstavlja glavni mehanizam prijenosa tvari, u ovome slučaju vlage, kroz materijal. Ovakav oblik krivulja brzine sušenja je karakterističan za prehrambene materijale, a sastoji se od dva perioda opadajuće brzine sušenja. Slični rezultati zabilježeni su u slučaju sušenja batata različitim metodama sušenja i kod drugih autora (Singh i Pandey, 2012; Diamante i Munro 1993; Doymaz, 2012).

Međutim, kod nižih temperatura može se uočiti da postoji dio krivulje (nakon početnog brzog porasta brzine sušenja) koji bi mogao odgovarati periodu konstantne brzine sušenja. Velić (2006) je također zabilježio ovu pojavu pri različitim metodama sušenja uzoraka marelice, peršina i mrkve.



Slika 14 Ovisnost bezdimenzionalne vlažnosti neobrađenih (NT) i prethodno obrađenih uzoraka batata o vremenu sušenja pri brzini strujanja zraka od 2,8 m s^{-1}

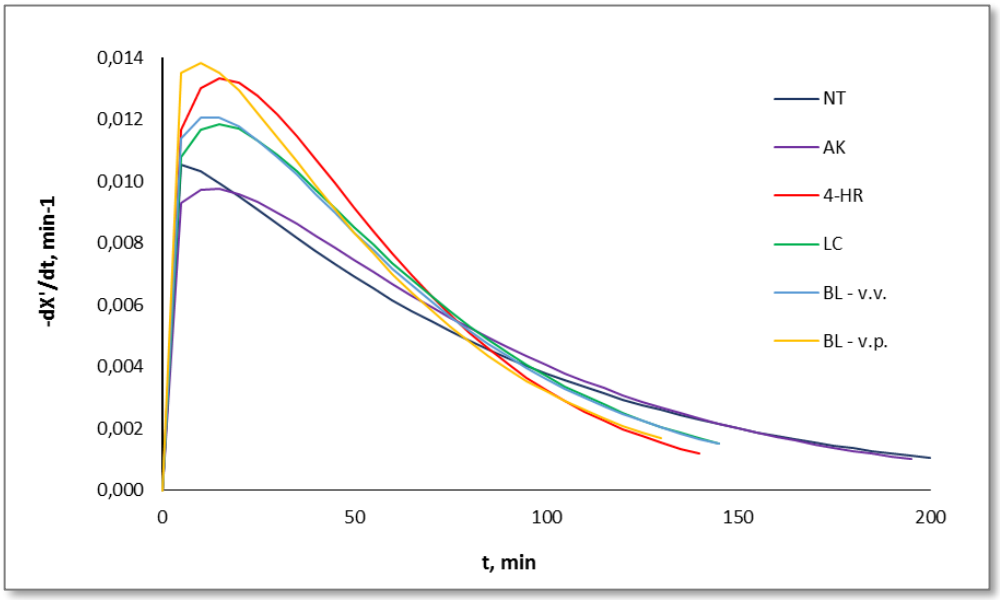
(NT – neobrađeni uzorak; AK – askorbinska kiselina; 4-HR – 4-heksil-resorcinol; LC – L-cistein; BL-v.v. – blanširanje vrelom vodom; BL-v.p. – blanširanje vodenom parom)

Slika 14 predstavlja ovisnosti bezdimenzionalne vlažnosti (X') neobrađenih (NT) i prethodno obrađenih uzoraka batata (AK – askorbinska kiselina; 4-HR – 4-heksil-resorcinol; LC – L-cistein; BL-v.v. – blanširanje vrelom vodom; BL-v.p. – blanširanje vodenom parom) o vremenu sušenja i brzini strujanja zraka od 2,8 m s^{-1}. Kako je i očekivano, bezdimenzionalna vlažnost postupno je opadala tijekom cijelog procesa sušenja, a prethodnom obradom uzoraka, u odnosu na neobrađene uzorke (NT), skraćeno je vrijeme sušenja.

Iz grafičkog prikaza također je vidljivo dobro slaganje eksperimentalnih vrijednosti (simboli) s aproksimacijskim krivuljama (pune linije) *Page*-ovog matematičkog modela. Navedeno potvrđuju visoke vrijednosti koeficijenata korelacije (R) koje su prikazane u **Tablici 5**. Indeks korelacije R izračunat je prema **izrazu (22)**.

Tablica 5 Parametri aproksimacijskog modela *k* i *n* te indeks korelacije R za konvekcijsko sušenje uzorka batata pri temperaturi 60 °C i različitoj prethodnoj obradi uzoraka

T [°C]	NT	AK	4-HR	LC	BL-v.v.	BL-v.p.
k	0,009656	0,006762	0,006482	0,006762	0,007716	0,009936
n	1,053720	1,141252	1,254489	1,203987	1,174567	1,145161
R	0,999352	0,997838	0,999051	0,998215	0,999358	0,999626



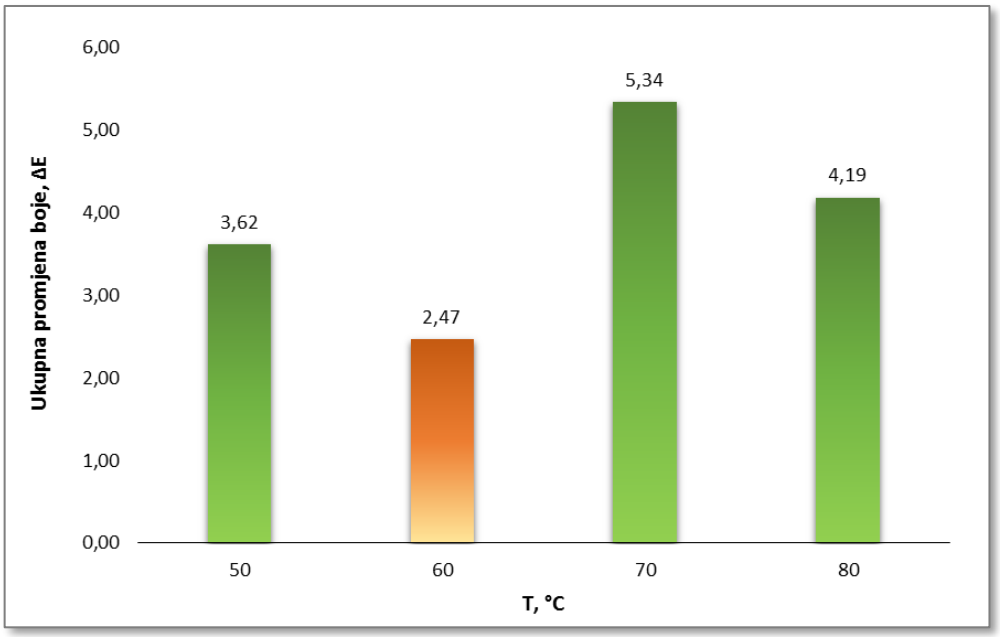
Slika 15 Ovisnost brzine sušenja neobrađenih (NT) i prethodno obrađenih uzoraka batata o vremenu sušenja pri brzini strujanja zraka od 2,8 m s^{-1}

Slika 15 predstavlja ovisnosti brzine sušenja neobrađenih (NT) i prethodno obrađenih uzoraka batata o vremenu sušenja pri temperaturi sušenja 60 °C i brzini strujanja zraka od 2,8 m s^{-1}. Iz grafičkog prikaza vidljivo je da blanširanjem uzoraka vodenom parom tijekom 5 minuta i potapanjem uzoraka u 0,15 %-tnoj otopini 4-heksil-rezorcinola tijekom 5 minuta značajno skraćuje vrijeme sušenja i to za 45,8 % (BL-v.p.), odnosno 30 % (4-HR). Blanširanje utječe na skraćivanje vremena potrebnog za sušenje, uklanjanje zraka iz međustaničnog prostora te omekšavanje teksture bioloških materijala. Ovakav oblik krivulja brzine sušenja je

karakterističan za prehrambene materijale te je kao kod **Slike 13** uočen izostanak perioda konstantne brzine sušenja.

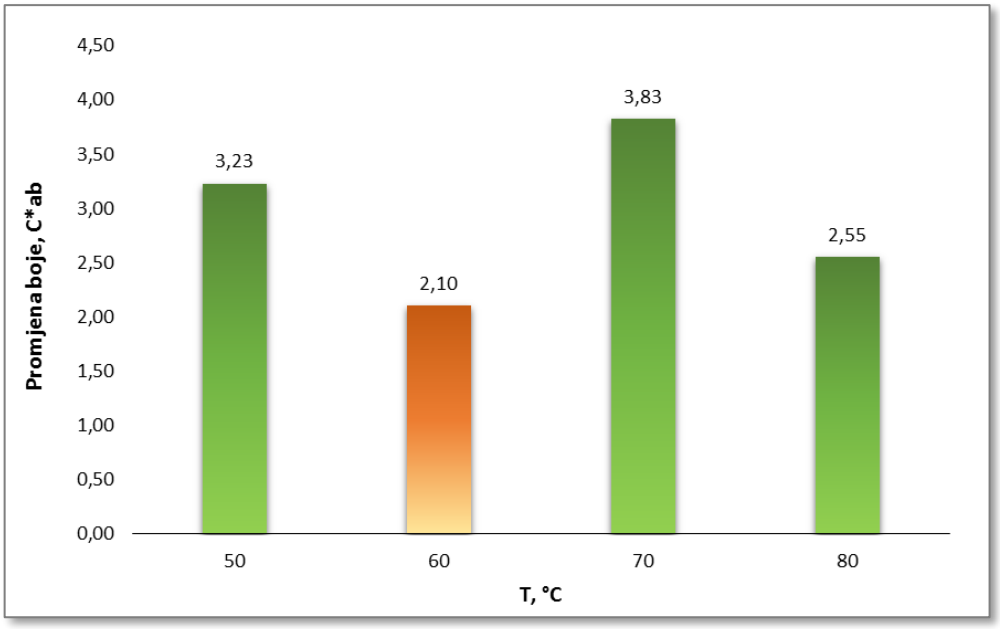
4.2 PROMJENA BOJE

Na temelju eksperimentalno dobivenih vrijednosti *L**, *a** i *b** parametara prije i nakon sušenja izračunate su vrijednosti ukupne promjene boje (*ΔE*), koja je računata prema **formuli (16)**, i promjene boje (*C*ab*), koja je računata prema **formuli (17)**. Navedene promjene boje tijekom sušenja prikazane su na narednim slikama.



Slika 16 Ukupna promjena boje (*ΔE*) u ovisnosti o različitim temperaturama sušenja uzoraka batata pri brzini strujanja zraka od 2,8 m s^{-1}

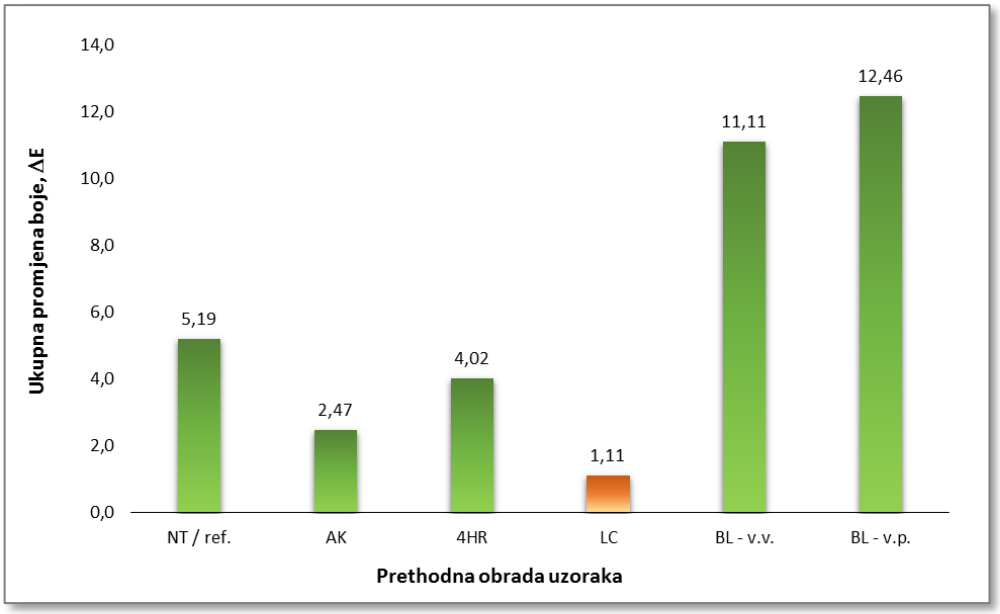
Slika 16 prikazuje ukupnu promjenu boje (*ΔE*) u ovisnosti o različitim temperaturama sušenja (50 – 80 °C) pri brzini strujanja zraka od 2,8 m s^{-1}. Najmanja ukupna promjena boje (*ΔE* = 2,47) zabilježena je kod temperature sušenja od 60 °C, a navedena promjena je za ljudsko oko slabo uočljiva (**Tablica 3**). Slični rezultati već su zabilježeni konvekcijskim sušenjem jabuke u tunelskom sušioniku pri temperaturi sušenja 60 °C i brzini strujanja zraka od 2,8 m s^{-1} (Velić, 2006).



Slika 17 Promjena boje (*C*ab*) u ovisnosti o različitim temperaturama sušenja uzoraka batata pri brzini strujanja zraka od 2,8 m s^{-1}

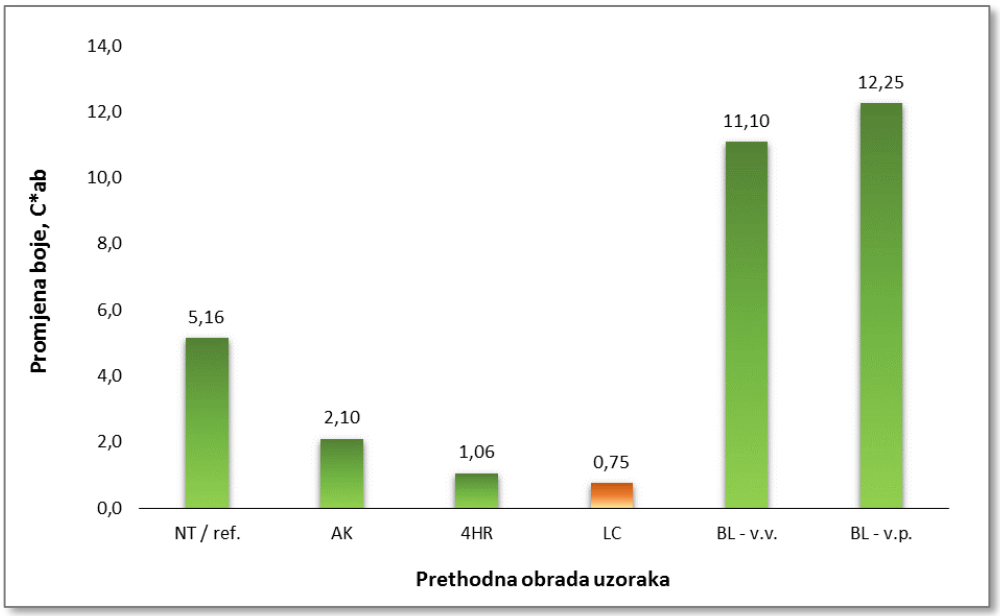
Slika 17 prikazuje promjenu boje (*C*ab*) u ovisnosti o različitim temperaturama sušenja (50 – 80 °C) pri brzini strujanja zraka od 2,8 m s^{-1}. Promjena boje izražena kao *C*ab* u potpunosti prati ukupnu promjenu boje (*ΔE*).

U pojedinim istraživanjima uočeno je da s porastom temperature sušenja raste i ukupna promjena boje (*ΔE*) (Velić, 2006; Kirić, 2009). Međutim, jasna korelacija između porasta temperature sušenja i promjene boje (*C*ab*) u ovome radu nije uočena.



Slika 18 Ukupna promjena boje (*ΔE*) neobrađenih (NT) i prethodno obrađenih uzoraka batata pri temperaturi 60 °C i brzini strujanja zraka od 2,8 m s^{-1}

(NT/ref. – neobrađeni uzorak; AK – askorbinska kiselina; 4HR – 4-heksil-resorcinol; LC – L-cistein; BL-v.v. – blanširanje vrelom vodom; BL-v.p. – blanširanje vodenom parom)



Slika 19 Promjena boje (*C*ab*) neobrađenih (NT) i prethodno obrađenih uzoraka batata pri temperaturi 60 °C i brzini strujanja zraka od 2,8 m s^{-1}

Ukupna promjena boje (*ΔE*) i promjena boje (*C*ab*) u ovisnosti o različitim metodama prethodne obrade uzoraka batata prikazane su **Slikama 18** i **19**. Iz navedenih grafičkih prikaza možemo uočiti kako prethodna obrada uzoraka ima pozitivan utjecaj na promjenu boje u odnosu na neobrađeni odnosno referentni uzorak (NT/ref.). Izuzetak predstavlja prethodna obrada uzoraka blanširanje vrelom vodom (BL-v.v.) i blanširanje vodenom parom (BL-v.p.). Ukupna promjena boje (*ΔE*) (**Slika 18**) i promjena boje (*C*ab*) (**Slika 19**) za spomenute uzorke ujedno poprimaju najveće vrijednosti. Razlog tome je povećanje vrijednosti parametara *a** i *b** nakon sušenja (pozitivne vrijednosti) (**Tablica 5**). Ukoliko promotrimo *L*a*b** sustav boja na **Slici 11** pozitivne vrijednosti parametara *a** i *b** rezultiraju otklonu od izrazito narančaste boji. Također, ova promjena ukupna boje je prema **Tablici 3** za ljudsko oko vrlo uočljiva.

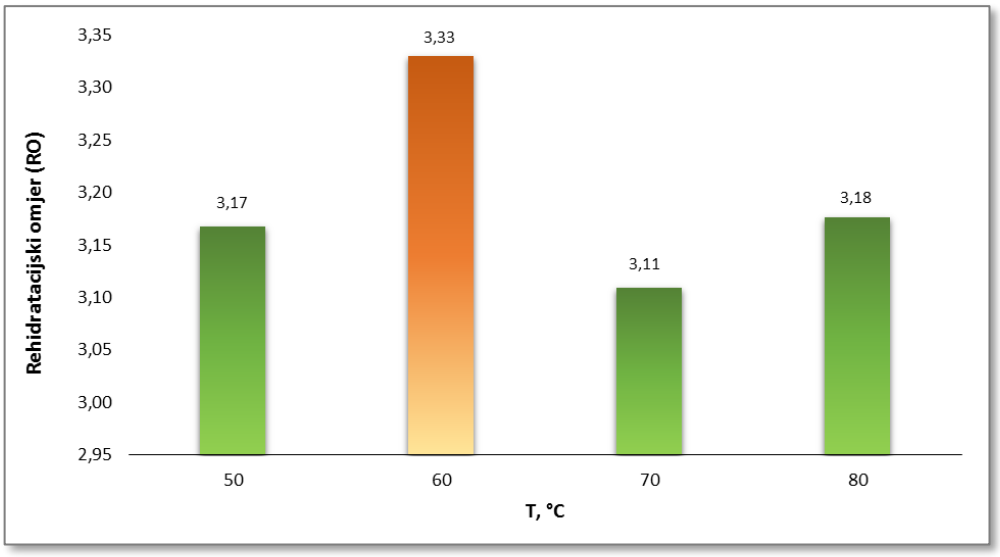
S druge strane, najmanja ukupna promjena boje (*ΔE* = 1,11), odnosno najmanja promjena boje (*C*ab* = 0,75), zabilježena je prethodnom obradom uzorka batata 0,3 %-tnom otopinom L-cisteina. Navedena ukupna promjena boje je za ljudsko oko slabo uočljiva (**Tablica 3**). Michael i Willson (1997) navode kako su niže *ΔE* vrijednosti kod uzorka bijelog batata (*Ipomoea batatas* Lam) zbog gubitka, oksidacije ili izomerizacije karotenoida, reakcije karamelizacije ili enzimske reakcije.

Tablica 5 Vrijednosti *L**, *a** i *b** parametara prije i nakon sušenja za neobrađene (NT) te prethodno obrađene uzorake batata

	NT		AK		4HR		LC		BL-v.v.		BL-v.p.	
	prije	*nakon*	*prije*	*nakon*	*prije*	*nakon*	*prije*	*nakon*	*prije*	*nakon*	*prije*	*nakon*
*L**	76,23	75,70	75,99	75,84	75,88	72	74,68	73,86	61,39	60,86	59,56	61,86
*a**	11,82	8,62	10,54	10,3	9,13	8,89	9,81	9,26	5,98	13,08	6,96	13,59
*b**	32,24	28,19	32,9	31,27	33,37	32,34	30,76	30,25	34,68	43,21	29,32	39,60

4.3. REHIDRATACIJA

U ovome poglavlju prikazani su rezultati rehidratacijskih omjera uzorka batata koji su izračunati na temelju mase osušenih uzoraka te mase uzoraka nakon provedene rehidratacije. Utjecaj temperature i prethodne obrade uzoraka na vrijednosti rehidratacijskog omjera prikazane su na **Slikama 20** i **21**.



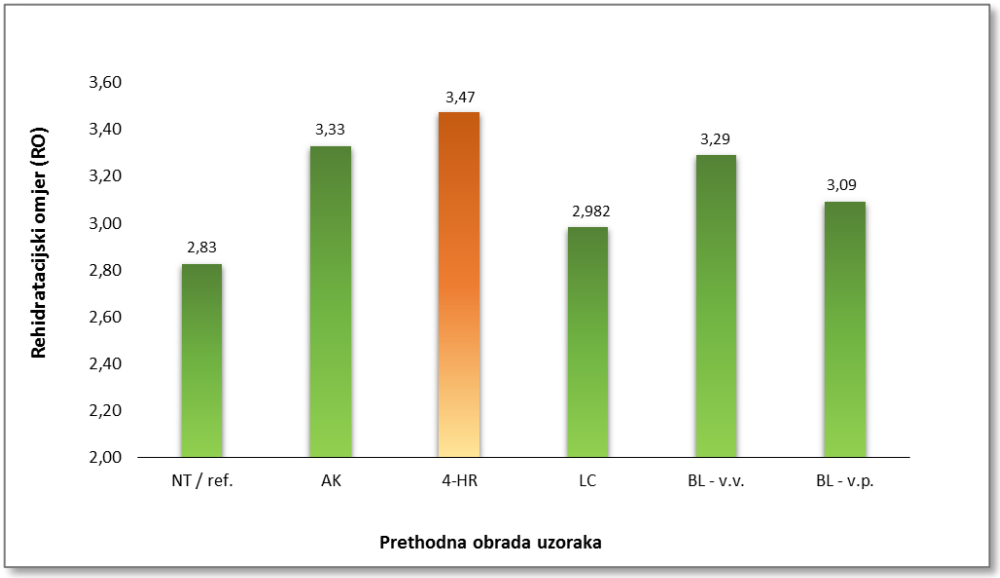
Slika 20 Utjecaj temperature sušenja (50 – 80 °C) uzorka batata na rehidratacijski omjer (RO)

Slika 20 prikazuje utjecaj temperature sušenja na vrijednosti rehidratacijaskih omjera. Uzorci su sušeni u tunelskom sušioniku u temperaturnom intervalu 50 – 80 °C i brzini strujanja zraka 2,8 m s^{-1}. Iz navedenog možemo uočiti da vrijednosti RO variraju između 3,11 – 3,33. Najviša vrijednost RO postignuta je pri temperaturi sušenja 60 °C (RO = 3,33). Ovi rezultati u korelaciji su s rezultatima ukupne promjene boje (*ΔE*) i promjene boje (*C*ab*) kod kojih se temperatura sušenja od 60 °C također pokazala kao optimalna.

S druge strane, najniža vrijednost RO postignuta pri temperaturi sušenja 70 °C (RO = 3,11). U slučaju kombiniranog sušenja bundeve (*Cucurbita moschata*), kombinacija konvekcijskog i mikrovalnog sušenja, također je postignut najniži RO pri temperaturi sušenja od 70 °C te autori navode da je razlog navedenog razaranje stanične strukture uzorka (Seremet i sur., 2016).

U pojedinim radovima uočena je korelacija između porasta temperature i izmjerenih rehidratacijskih omjera, pri čemu bi se vrijednosti RO s porastom temperature sušenja snizile (Seremet i sur., 2016; Velić, 2006) ili povisile (Aral i Beşe, 2016; Parin, 2004; Velić, 2006).

Međutim, u ovome radu ne postoji jasna korelacije između porasta temperature sušenja i vrijednosti RO. Slični rezultati dobiveni su infra-crvenim sušenjem uzoraka jabuke pri temperaturama 50 – 80 °C (Velić, 2006).



Slika 21 Utjecaj prethodne obrade uzoraka batata na vrijednosti rehidratacijskih omjera (RO)

(NT/ref. – neobrađeni uzorak, referentna vrijednost; AK – askorbinska kiselina; 4HR – 4-heksil-resorcinol; LC – L-cistein; BL-v.v. – blanširanje vrelom vodom; BL-v.p. – blanširanje vodenom parom)

Na **Slici 21** prikazan je utjecaj prethodne obrade uzorka na vrijednosti RO. Uzorci su sušeni u tunelskom sušioniku pri temperaturi sušenja 60 °C i brzini strujanja zraka 2,8 m s^{-1}. Iz grafičkog prikaza možemo uočiti kako najniži RO ima referentni odnosno neobrađeni uzorak (RO= 2,83) što ujedeno potvrđuje tezu kako prethodna obrada uzoraka poboljšava rehidratacijska svojstva i ubrzava tijek procesa sušenja u odnosu na neobrađene uzorke (Velić, 2006). S druge strane, najviše vrijednosti RO postignute su u slučaju potapanjea uzoraka u 0,5 %-tnoj otopini askorbinske kiseline tijekom 3 minute (RO = 3,33) i potapanja uzoraka u 0,15 %-tnoj otopini 4-heksil-rezorcinola tijekom 5 minuta (RO = 3,47).

5. ZAKLJUČCI

Na osnovi rezultata istraživanja provedenih u ovom radu, mogu se izvesti sljedeći zaključci:

- *Page*-ov eksponencijalni matematički model, unutar granica ispitanih procesnih parametara, pokazao se uspješnim za modeliranje kinetike sušenja batata. Navedeno potvrđuju statistička analiza eksperimentalnih podataka s visokim vrijednostima indeksa korelacije (R) koje se kreću u intervalu 0,9978 – 0,9996 za sva provedena eksperimentalna mjerenja.
- Iz grafičkog prikaza kinetike sušenja uzoraka batata vidljivo je da se pri višim temperaturama ranije postiže veća maksimalna brzina sušenja. Povećanjem temperature sušenja povećava se i parcijalni tlak vodene pare na površini uzorka koji pogoduje bržem uklanjanju vlage iz unutrašnjosti prema površini sušenih uzoraka batata.
- Oblik krivulja brzine sušenja batata je takav da se one mogu podijeliti samo na dva dijela, a to su period porasta brzine sušenja i period opadajuće brzine sušenja, dok im nedostaje period konstantne brzine sušenja. Ovakav oblik krivulja brzine sušenja je karakterističan za prehrambene materijale. Ipak, kod nižih temperatura sušenja batata može se uočiti postojanje dijela krivulje (nakon početnog brzog porasta brzine sušenja) koji bi se mogao aproksimirati konstantnom brzinom sušenja.
- Sušenje uzoraka batata predominantno se odvijalo u periodu opadajuće brzine sušenja, što znači da je difuzija bila osnovni mehanizam prijenosa tvari (vlage) kroz sušeneni materijal.
- Više temperature sušenja imaju negativan utjecaj na rekonstitucijska svojstava osušenih uzorka batata, izražena kao rehidratacijski omjer (RO) te promjenu boje uzoraka izraženu kao ukupna promjena boje (ΔE) i promjena boje (C^*ab).
- Temperatura sušenja od 60 °C pokazala se kao optimalna temperatura sušenja u odnosu na izmjerene vrijednosti ukupne promje boje (ΔE), promjene boje (C^*ab) te vijednosti rehidratacijskog omjera (kvalitativna svojstva osušenih uzoraka).
- Blanširanjem uzoraka vodenom parom tijekom 5 minuta i uranjanjem uzoraka u 0,15 %-tnoj otopini 4-heksil-rezorcinola tijekom 5 minuta značajno se skraćuje vrijeme sušenja i to za 45,8 % (BL-v.p.), odnosno 30 % (4-HR).

- Najmanja ukupna promjena boje (ΔE = 1,11), odnosno najmanja promjena boje (C^*ab = 0,75), zabilježena u slučaju prethodne obrade uzorka batata 0,3 %-tnom otopinom L-cisteina tijekom 5 minuta.
- Najviše vrijednosti rehidratacijskog omjera (RO) postignute su u slučaju potapanja uzoraka u 0,5 %-tnoj otopini askorbinske kiseline tijekom 3 minute (RO = 3,33) i potapanja uzoraka u 0,15 %-tnoj otopini 4-heksil-rezorcinola tijekom 5 minuta (RO = 3,47).

6. LITERATURA

Abonyi BI, Feng H, Tang J, Edwards CG, Chew BP, Mattinson DS, Fellman JK: Quality Retention in Strawberry and Carrot Purees Dried with Refractance WindowTM System. *Journal of Food Science* 67(3):1051-1056, 2002.

Adebowale AA, Adebowale LO, Awonorin SO: Effect of texture modifiers on the physicochemical and sensory properties of dried fufu. *Food Science & Technology International* 11(5):373-382, 2005.

Ahmed M, Akter MS, Eun JB: Peeling, drying temperatures, and sulphite-treatment affect physicochemical properties and nutritional quality of sweet potato flour. *Food Chemistry* 121:112-118, 2010.

Ahmed EM, Mirza S, Arreola AG: Ultrastructural and textural changes in processed carrot tissue. *Journal of Food Quality* 14:321-330, 1991.

Akpinar EK: Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. *Journal of Food Engineering* 73 (1):75-84, 2006.

Aladić K: Ispitivanje kinetike sušenja jabuke „Granny Smith" u tunelskom sušioniku. *Diplomski rad*, Prehrambeno-tehnološki fakultet Osijeku, Osijek, 2006.

AOAC: *Offcial Methods of Analysis*, Vol II, 16th ed., Association of Offcial Analytical Chemists, Arlington, USA, 1995.

Aral S, Beşe AV: Convective drying of hawthorn fruit (*Crataegus* spp.): Effect of experimental parameters on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration capacity. *Food Chemistry* 210:577–584, 2016.

Asami DK, Hong YJ, Barrett DM, Mitchell AE: Comparison of the total phenolic and ascorbic acid content of freeze-dried and air-dried marionberry, strawberry, and corn grown using conventional, organic, and sustainable agricultural practices. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 51(5):1237-1241, 2003.

Banga JR, Balsa-Canto E, Moles CG, Alonso AA: Improving food processing using modern optimization methods. *Trends in Food Science and Technology* 14 (4): 131-144, 2003.

Barbanti D, Mastrocola D, Pinnavaia G, Severini C, Dalla Rosa M: Air drying of fruit: effects of different pre-treatments on drying rate and product quality. U *Drying '91.* A.S. Mujumdar, I. Filkova, I. eds., str. 471-482. Elsevier Science Publisher, Amsterdam, 1991.

Barun I: Vakuum sušenje pentaeritritola. *Diplomski rad*. Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2008.

Bobic Z, Bauman I, Curic D: Rehydration ratio of fluid bed-dried vegetables. *Sadhana-Academy Proceedings in Engineering Sciences* 27(3):365-374, 2002.

Bogović M, Belko D, Božić Đ, Fabek S, Toth N, Novak B, Radojčić Redovniković I: Utjecaj folijarnog mineralnog gnojiva na sadržaj fenolnih spojeva u listu batata (*Ipomoea batatas* L.). *Hrvatski časopis za prehrambenu tehnologiju, biotehnologiju i nutricionizam* 8 (1-2):29-35, 2013.

Bolin HR, Huxsoll CC: Storage stability of minimally processed fruit. *Journal of Food Processing and Preservation* 13:281-292, 1989.

Boss EA, Filho RM, de Toledo ECV: Freeze drying process: real time model and optimization. *Chemical Engineering and Processing* 43(12):1475-1485. 2004.

Byler RK, Anderson CR, Brook RC: Statistical methods in thin layer parboiled rice drying models. *Transactions of the ASAE* 30 (2):533-538, 1987.

Carlin F, Nguyen C, Hilbert G, Chambroy Y: Modified atmosphere packing of fresh, «ready to use» grated carrots in polymeric films. *Journal of Food Science* 55:1033-1038, 1990.

Choe E, Lee J, Park K, Lee S: Effects of heat pretreatment on lipid and pigments of freeze-dried spinach. *Journal of Food Science* 66(8):1074-1079, 2001.

Chua KJ, Chou SK: A comparative study between intermittent microwave and infrared drying of bioproducts. *International Journal of Food Science and Technology* 40:23-39, 2005.

Collins L, Sidhu HS, Mullins CA: Drying tomatoes through osmotic treatment and dehydration. *Tennessee Agricultural Science* 182:24–27, 1997.

Crapiste GH: Simulation of drying rates and quality changes during the dehydration of foodstuffs. U *Food preservation technology series: Trends in food engineering*, str. 135-138, Technomic Publishing Co., Inc., Lancaster, SAD, 2000.

Crowe JH, Crowe LM, Carpenter JF, Rudolph AS, Winstrom CA, Spargo BJ, Anchordoguy TJ: Interactions of sugars with membranes. *Biochimica and Biophysica Acta* 947:367-384, 1988.

Curry JC, Burns EE, Heidelbough ND: Effect of sodium chloride on rehydration of freeze-dried carrot. *Journal of Food Science* 41:176-179, 1976.

Diamante LM, Munro PA: Mathematical modelling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar Energy* 51:271-276, 1993.

Di Matteo M, Cinquanta L, Galiero G, Crescitelli S: Physical pre-treatment of plums (Prunus domestica). Part 1. Modelling the kinetics of drying. *Food Chemistry* 79(2):227- 232, 2002.

Doymaz I: Infrared drying of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) slices. *J Food Sci Technol* 49(6):760–766, 2012.

Doymaz I, Pala M: The effects of dipping pretreatments on air-drying rates of the seedless grapes. *Journal of Food Engineering* 52(4):413-417, 2002.

Feng H, Tang J, Dixon-Warren SJ: Determination of moisture diffusivity of red delicious apple tissues by thermogravimetric analysis. *Drying Technology* 18:1183-1199, 2000.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAOSTAT) 2013. http://faostat3.fao.org/browse/Q/*/E [27.07.2016.]

Forni E, Torregiani D, Battiston P, Polesello A: Research into changes of pectic substances in apricot and peaches processed by osmotic dehydration. *Carbohydrate Polymers* 6:379-381, 1986.

Grahovac M: Ekonomika i organizacija proizvodnje presadnica batata. *Završni rad*. Poljoprivredni fakultet u Osijeku, Osijek, 2014.

Hegedušić V: *Vrednovanje sirovina i proizvoda sušenjem te njihova priprema za sušenje*, Sušenje u prehrambenoj industriji, Prehrambeno-biotehnološki fakultet, Zagreb, 4-5, 1991.

Heredia-Leon JC, Talamas-Abbud R, Mendoza-Guzman V, Solis-Martinez F, JimenezCastro J, Barnard J, Quintero-Ramos A: Structural and physical properties of dried Anaheim chilli peppers modified by low-temperature blanching. *Journal of the Science of Food & Agriculture* 84 (1):59-65, 2004.

Howard LR, Yoo KS, Pike LM, Miller GH: Quality changes in diced onions stored in film packages. *Journal of Food Science* 59:110-112,117, 1994.

Huaman Z: *Systemic Botany and Morphology of the Sweetpotato plant*. International potato center (CIP), Lima, Peru, 1992.

Jaros M, Pabis S: Theoretical Models for Fluid Bed Drying of Cut Vegetables. *Biosystems Engineering* 93(1): 45-55, 2006.

Ježek D: Prijelaz topline između uronjenog orebrenog grijača i sloja čestica prehrambenih proizvoda različitih dimenzija. *Disertacija*. Prehrambeno-biotehnološki fakultet, Zagreb, 3–68, 1999.

Karathanos VT, Anglea S, Karel M: Collapse of structure during drying of celery. *Drying Technology* 11:1005-1023, 1993.

Kirić L: Kinetika konvekcijskog sušenja i rehidratacije smrznute "oblačinske" višnje. *Diplomski rad*, Prehrambeno-tehnološki fakultet Osijek, Osijek, 2009.

Kompany E, Allaf K, Bouvier JM, Guigon P, Maureaux A: A new drying method of fruits and vegetables – quality improvement of final product. U *Drying '91.* A. S. Mujumdar, I. Filkova, I. eds., str. 499-506. Elsevier Science Publisher, Amsterdam, 1991.

Krokida MK, Maroulis ZB: Structural properties of dehydrated products during rehydration. *International Journal of Food Science & Technology* 36(5):529-538, 2001.

Kunzek H, Muller S, Vetter S, Godeck R: The significance of physico chemical properties of plant cell wall materials for the development of innovative food products (review). *European Food Research & Technology* 214(5):361-376, 2002.

Lenart A, Iwaniuk B, Lewicki PP: Water transfer during rehydration of dewatered apple, pumpkin and carrot. U *Properties of Water in Foods,* str. 118-129. Warsaw, Agricultural University Press, Warsaw, 1992.

Lewicki PP: Effect of pre-drying treatment, drying and rehydratation on plant tissue properties: A review. *International Journal of Food Properties* 1(1):1-22, 1998.

Lewicki PP, Witrowa-Rajchert D, Mariak J: Changes of structure during rehydration of dried apples. *Journal of Food Engineering* 63:347-350, 1997.

Lin YP, Tsen JH, King VA E: Effects of far-infrared radiation on the freeze-drying of sweet potato. *Journal of Food Engineering* 68:249-255, 2005.

Lončarić A: Optimiranje i racionalizacija sušenja jabuka. *Seminarski rad*. Prehrambeno-tehnološki fakultet Osijek, Osijek, 2011.

Lovrić T: *Procesi u prehrambenoj industriji s osnovama prehrambenog inženjerstva*. Hinus, Zagreb, 2003.

Lovrić T, Piližota V: *Konzerviranje i prerada voća i povrća.* Nakladni zavod Globus, Zagreb,

35-210, 1994.

Marabi A, Jacobson M, Livings SJ, Saguy IS: Effect of mixing and viscosity on rehydration of dry food particulates*. European Food Research and Technology* 218:339-344, 2004.

Marabi A, Livings S, Jacobson M, Saguy IS: Normalized Weibull distribution for modeling rehydration of food particulates. *European Food Research and Technology* 217:311-318, 2003.

Masi P, Riva M: Modelling grape drying kinetics. U *Preconcentration and Drying of Food Materials, S. Bruin, ed.*, str. 203-214. Elsevier, Amsterdam, 1988.

Michael AA, Wilson PW: Relationship between hunter colour values and b-carotene contents in white-fleshed African sweet potatoes (*Ipomoea batatas* Lam). *Journal of the Science of Food and Agriculture* 73:301-306, 1997.

Mrkić V: Utjecaj uvjeta sušenja na biološki aktivne spojeve i antiradikalsku snagu brokule i luka*. Disertacija*. Prehrambeno-biotehnološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 4-16, 2005.

Mudahar GS, Buhr JR, Jen JJ: Infiltred biopolymers effect on quality of dehydrated carrot. *Journal of Food Science* 57:526-529, 1991.

Mudahar GS, Toledo RT, Floros JD, Jen JJ: Optimization of carrot dehydration process using response surface methodology. *Journal of Food Science* 54:714-719, 1989.

Negi PS, Roy SK: Effect of blanching and drying methods on beta-carotene, ascorbic acid and chlorophyll retention of leafy vegetables. *Lebensmittel-Wissenschaft + Technologie. Food Science + Technology* 33(4):295-298, 2000.

Negi PS, Roy SK: The effect of blanching on quality attributes of dehydrated carrots during long-term storage. *European Food Research & Technology* 212(4):445-448, 2001.

Neuman HJ: Dehydrated celery: effects of pre-drying treatments and rehydration procedures on reconstitution. *Journal of Food Science* 37:437-441, 1972.

Nieto B, Salvatori DM, Castro MA, Alzamora SM: Structural changes in apple tissue during glucose and sucrose osmotic dehydration: shrinkage, porosity, density and microscopic features. *Journal of Food Engineering* 61(2):269-278, 2004.

Okos MR, Campanella O, Narsimhan G, Singh RK, Weitnauer AC: Food Dehydration. U *Handbook of food engineering 2nd edition, Heldman D R, Lund D B (ed)*, str. 601-745. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2007.

Oliveira FAR, Silva CLM: Freezing influences diffusion of reducing sugars in carrot cortex. *Journal of Food Science* 57:932-934, 1992

Parin H: Effect of pretreatment and air temperature on the drying rate, rehydration capacity and color of artichoke. *Diplomski rad*, Graduate school of natural and applied sciences of Middle east technical university, 2004.

Picchioni GA, Watada AE, Roy S, Whitaker BD, Wergin WP: Membrane lipid metabolism, cell permeability and ultrastructural changes in lightly processed carrot. *Journal of Food Science* 59:597-601, 605, 1994.

Piližota V: *Tehnologija konzerviranja i prerade voća i povrća: Povrće konzervirano sušenjem*. Prehrambeno-tehnološki fakultet Osijek, Osijek, 2016.

Piližota V, Nedić Tiban N: *Tehnologija prerade sirovina biljnog podrijetla II – Enzimsko posmeđivanje*. Prehrambeno-tehnološki fakultet Osijek, Osijek, 2014.

Piližota V, Šubarić D: Control of enzymatic browning of foods. *Food Tehnology Biotehnology* 36(3):219-227, 1998.

Planinić M, Tomas S, Velić D: Influence of drying parameters and browning inhibitor on infrared drying of apple. U *The 4th Croatian Congress of Food Technologists, Biotechnologists and Nutritionist*, str. 75-76. Prehrambeno-biotehnološki fakultet, Opatija, 2001.

Poovaiah BW: Role of calcium in prolonging storage life of fruits and vegetables. *Food Technology* 40(5):86-89, 1986.

Potter NN, Hotchkiss HJ: *Food Science*. Chapman & Hall, New York, 5th ed., 200-232, 1995.

Pozderović A: *Tehnologija prerade sirovina biljnog podrijetla II – Osnove tehnologije vina*. Prehrambeno-tehnološki fakultet Osijek, Osijek, 2013.

Rahman MS, Perera CO: Drying and food preservation. U *Handbook of food preservation, Rahman M S (ed)*, str. 173-216. Marcel Dekker, New York, 1999.

Riva M, Masi P: The influence of the blanching procedure on the quality and shelf-life of dried apples. U *Progress in Food preservation Processes*, str. 31-38. CERIA, Brussels, vol. 1. 1988.

Rolle S, Chism GW: Physiological consaequences of minimally processed fruit and vegetables. *Journal of Food Quality* 10:157-177, 1987.

Roos Y, Karel M: Effects of water and molecular weight on glass transition in amorphous carbohydrates and carbohydrate solutions. *Journal of Food Science* 56:1676-1681, 1991.

Sander A: Komparativna istraživanja kinetike sušenja čvrstih materijala. *Disertacija.* Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 3-40, 2003.

Seow CC, Ng KB, Bourne MC: Effect of blanching treatments on physiochemical properties of dehydrated carrots, celery and green beans*. ASEAN Food Journal 7(4):184-188, 1992.*

Seremet LC, Botez E, Nistor OV, Andronoiu DG, Mocanu GD: Effect of different drying methods on moisture ratio and rehydration of pumpkin slices. *Food Chemistry* 195:104–109, 2016.

Shapton DA: *Principles and practices for the safe processsing of foods*. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 224, 325-333, 1998.

Sharma GK, Semwal AD, Arya SS: Effect of processing treatments on the carotenoids composition of dehydrated carrots. *Journal of Food Science & Technology-Mysore* 37(2):196-200, 2000.

Shih MC, Kuo CC, Chiang W: Effects of drying and extrusion on colour, chemical composition, antioxidant activities and mitogenic response of spleen lymphocytes of sweet potatoes. *Food Chemistry* 117:114-121, 2009.

Simal S, Deyá E, Frau M, Rosseló C: Simple modelling of air drying curves of fresh and osmotically pre-dehydrated apple cubes. *Journal of Food Engineering* 33:139-150, 1997.

Simal S, Rossello C, Berna A, Mulet A: Heat and mass transfer model for potato drying. *Chemical Engineering Science* 22(49):3739-3744, 1994.

Singh NJ, Pandey RK: Convective air drying characteristics of sweet potato cube (*Ipomoea batatas* L.). *Food and bioproducts processing* 90:317–322, 2012.

Sokele E: *Prijenos topline*. Prehrambeno tehnološki fakultet Osijek, Osijek, 1-64, 1998.

Srivastava S, Genitha TR, Yadav V: Preparation and Quality Evaluation of Flour and Biscuit from Sweet Potato. *Food Processing & Technology* 3:12, 2012.

Suarez C, Viollaz PE: Shrinkage effect on drying behavoir of potato slabs. *Journal of Food Engineering* 13(2):103-114, 1991.

Šubarić D: Inhibicija polifenol-oksidaze u svrhu sprječavanja enzimskog posmeđivanja. *Doktorska disertacija*. Prehrambeno-biotehnološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu, str. 2- 51, 1999.

Taiwo KA, Angersbach A, Knorr D: Influence of high intensity electric field pulses and osmotic dehydration on the rehydration characteristics of apple slices at different temperatures. *Journal of Food Engineering* 52(2):185-192, 2002.

Talla Puiggali JR, Jomaa W, Jannot Y: Shrinkage and density evolution during drying of tropical fruits: application to banana. *Journal of Food Engineering,* 64(1):103-109, 2004.

Togrul T, Pehlivan D: Modelling of drying kinetics of single apricot. *Journal of Food Engineering* 58(1):23-32, 2003.

Toledo TR: *Fundamentals of Food Process Engineering*. Westport, Connecticut: Avi Publishing Company, Inc., 128-383, 1980.

Tomas S: *Sušenje, apsorpcija*. Prehrambeno-tehnološki fakultet Osijek, Osijek, 1–14, 2000.

Tripathi RN, Nath N: Effect of starch dipping on quality of dehydrated tomato slices. *Journal of Food Science and Technology* 26:137-141, 1989.

Tsami E, Katsioti M: Drying kinetics for some fruits: Predicting of porosity and color during dehydration. *Drying Technology* 18(7):1559-1581, 2000.

Turner I, Mujumdar AS: *Mathematical Modeling and Numerical Techniques in Drying Technology*. Marcel Dekker, Inc., New York, Basel, Hong Kong, 83-435, 1996.

Van Hal M: Quality of sweet potato flour during processing and storage. *Journal of Food Reviews International* 16:1-37, 2000.

Velić D: Optimiranje i modeliranje procesa sušenja voća i povrća. *Doktorski rad*, Prehrambeno-tehnološki fakultet Osijek, Osijek, 2006.

Vetter S, Kunzek H: The influence of the pre-drying treatment on the hydration properties of dried cell wall materials from apples. *European Food Research and Technology* 216(2):129-137, 2003.

Wang J, Chao Y: Drying characteristics of irradiated apple slices. *Journal of Food Engineering* 52(1):83-88, 2002.

Wang J, Sheng K: Far-infrared and microwave drying of peach. *LWT - Food Science and Technology* 39:247-255, 2006.

Winaro FG: Sweet potato processing and by-product utilization in the tropics. U *Sweet potato. Proceedings of the first International Symposium*, str. 373-384, AVRDC, Shandu, Tainan, , 1982.

Woolfe JA: *Sweet potato: An untapped resource*. Cambridge University Press, Cambridge, 1992.

Yoo B, Lee CM: Thermoprotective effect of sorbited on proteins during dehydration. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 41:190-192, 1993.