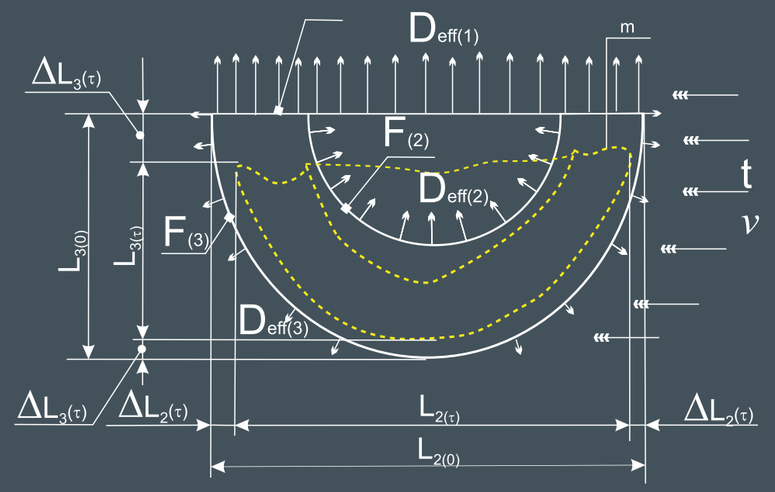
UNIVERZITET U NOVOM SADU
POLJOPRIVREDNI FAKULTET

KINETIKA PROCESA SUŠENJA VOĆA

Ivan Pavkov
Milivoj Radojčin



KINETIKA PROCESA SUŠENJA VOĆA

Ivan Pavkov, Milivoj Radojčin

KINETIKA PROCESA SUŠENJA VOĆA

M O N O G R A F I J A

Dr Ivan Pavkov

Dr Milivoj Radojčin

UNIVERZITET U NOVOM SADU

POLJOPRIVREDNI FAKULTET

Novi Sad, 2022.

EDICIJA „MONOGRAFIJA“

Osnivač i izdavač Edicije:

Poljoprivredni fakultet, Univerziteta u Novom Sadu

Trg Dositeja Obradovića 8, 21000 Novi Sad

Godina osnivanja:

1954

Glavni odgovorni urednik edicije:

Dr Nedeljko Tica, redovni profesor

Dekan Poljoprivrednog fakulteta Univerziteta u Novom Sadu

Članovi komisije za izdavačku delatnost:

Dr Branislav Vlahović, redovni profesor – predsednik

Dr Ivana Davidov, vanredni profesor

Dr Dejan Beuković, docent – član

Dr Ksenija Mačkić, docent – član

Udžbenik je odobren odlukom Nastavno–naučnog veća Poljoprivrednog fakulteta Univerziteta u Novom Sadu od **29.10.2022.** Sva prava zadržava izdavač.
ISBN 978 – 86- 7520 – 563 - 0

CIP - Каталогизација у публикацији
Библиотека Матице српске, Нови Сад

664.854

ПАВКОВ, Иван, 1976-
Kinetika procesa sušenja voća : monografija / Ivan Pavkov, Milivoj Radojčin. - Novi Sad : Poljoprivredni fakultet, 2023 (Novi Sad : Sajnos). - 144 str. : ilustr. ; 30 cm. - (Edicija Monografija / Poljoprivredni fakultet, Novi Sad)

Tiraž 20. - Bibliografija.

ISBN 978-86-7520-563-0

1. Радојчин, Миливој, 1982-
а) Воће - Сушење

COBISS.SR-ID 109365257

Autori:

Dr Ivan Pavkov, vanredni profesor, Poljoprivredni fakultet Univerzitet u Novom Sadu

Dr Milivoj Radojčin, vanredni profesor, Poljoprivredni fakultet Univerzitet u Novom Sadu

Glavni odgovorni urednik:

Dr Nedeljko Tica, redovni profesor

Dekan Poljoprivrednog fakulteta Univerziteta u Novom Sadu

Urednik:

Dr Milan Tomić, vanredni profesor

direktor Departmana za poljoprivrednu tehniku,

Poljoprivredni fakultet Univerziteta u Novom Sadu

Tehnički urednik:

Dr Ivan Pavkov, vanredni profesor, Poljoprivredni fakultet Univerziteta u Novom Sadu

Izrada crteža i unos teksta:

Autori

Recenzenti:

Dr Nenad Magazin, redovni profesor

Poljoprivredni fakultet, Univerzitet u Novom Sadu

Dr Aleksandra Tepić Horecki, redovni profesor

Tehnološki fakultet, Univerzitet u Novom Sadu

Dr Zdravko Šumić, docent

Tehnološki fakultet, Univerzitet u Novom Sadu

Izdavač:

Univerzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad

Zabranjeno preštampavanje i fotokopiranje. Sva prava zadržava izdavač.

Štampanje odobrio:

Komisija za izdavačku delatnost, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad

Tiraž:

20

Mesto i godina štampanja:

Novi Sad, 2022.

SADRŽAJ

UVOD 1
1. TEHNIKE SUŠENJA VOĆA 4
1.1. Konvektivno sušenje 4
1.2. Sušenje zamrzavanjem (liofilizacija) 5
1.3. Vakuum sušenje 8
1.4. Osmotsko sušenje 8
1.5. Kombinovano (hibridno) sušenje 10
2. OSOBINE VOĆA UTICAJNE NA KINETIKU PROCESA SUŠENJA 11
2.1. Anatomska građa voća - plod 11
2.2. Difuzija vode u biljnim ćelijama i tkivu 13
2.3. Hemijski sastav voća 14
2.4. Fizičke osobine voća promenljive tokom procesa sušenja 18
2.4.1. Dimenzije 18
2.4.2. Promena zapremine – zapreminsko skupljanje 19
2.4.3. Gustina 20
2.4.4. Kapilarnost mezokarpa voća 21
2.4.5. Površina razmene 22
2.5. Termofizičke osobine voća 22
2.5.1. Specifična toplota voća 23
2.5.2. Koeficijent toplotne i temperaturne provodljivosti 24
2.5.3. Koeficijent provođenja vlage i rastvorka – difuzivnost 25
2.5.4. Energija veze vlage i suve materije 32
2.5.5. Termogradijentni koeficijent 34
2.6. Ravnotežna vlažnost suvog voća i aktivnost vode 35
3. OSNOVE PROCESA SUŠENJA I MATEMATIČKO MODELOVANJE KINETIKE 39
3.1. Teorijski pristup izučavanju procesa sušenja 39
3.2. Transport toplote i mase vlage u unutrašnjosti materijala i razmena vlage na graničnoj površini 40
3.3. Kinetika sušenja voća 44
3.4. Matematičko modelovanje kinetike sušenja 48
3.5. Izbor matematičkog modela kinetike sušenja na osnosu statističkih pokazatelja 54

4. KINETIKA PROCESA SUŠENJA VOĆA 56
4.1. Konvektivno sušenje 56
4.2. Osmotsko sušenje 68
4.3. Sušenje smrzavanjem 78
4.4. Vakuum sušenje voća 84
4.5. Kombinovano sušenje voća 86
4.6. Mikrotalasno sušenje 95
5. UTICAJ PREDTRETMANA NA KINETIKU SUŠENJA VOĆA 98
5.1. Toplotni predtretmani 98
5.2. Hemijski predtretman 99
5.3. Ultrazvuk 100
5.4. Pulsno električno polje 101
5.4. Hladna plazma 106
6. UTICAJ PROCESA SUŠENJA NA KVALITET KONAČNOG PROIZVODA 107
6.1. Uticaj sušenja na promenu boje 107
6.2. Mehaničke osobine i tekstura 116
6.3. Oblik i zapremina 119
6.4. Hemijski kvalitet 124
LITERATURA 125

UVOD

Glavni deo svakog tehnološkog postupka proizvodnje sušenog voća čini proces sušenja. To je tehnološka operacija koja ima za cilj sniženje vlažnosti ploda uz uslov očuvanja niza prirodnih osobina svežeg voća, kako bi finalni proizvod bio što boljeg kvaliteta u pogledu fizičko-hemijskih, strukturno-mehaničkih i organoleptičkih pokazatelja. Voće kao materijal za sušenje spada u osetljivu grupu. Osnovni tehnološki zahtev za ovakve materijale je uspostavljanje procesa sušenja koji će obezbediti optimalne vrednosti gradijenta vlažnosti i temperature unutar materijala (*Pavkov, 2012; Radojčin, 2015*).

Poslednjih godina sušeno voće postaje veoma atraktivno, kako u pojedinim oblicima hrane tako i u naučnim istraživanjima. U primeni je veliki broj različitih metoda (tehnika) sušenja. Najčešće istraživane tehnike su: konvektivno sušenje (sušenje zagrejanim vazduhom), sušenje u vakuumu, osmotsko sušenje, sušenje smrzavanjem (liofilizacija) i kombinacija osmotskog sušenja sa ostalim nabrojanim tehnikama (kombinovano sušenje). Savremene tendencije u naučnim istraživanjima, usmerile su napore istraživača da se za svaku voćnu vrstu koja se podvrgava procesu sušenja utvrdi odgovarajuća tehnika sušenja i parametri procesa što je od presudnog značaja za dobijanje kvalitetnog krajnjeg proizvoda.

Razvoj industrije sušenja voća u svetu je praćen određenim ekonomskim rezultatima te afirmiše industriju sušenja voća kao značajnu privrednu granu. Organizacija za hranu i poljoprivredu Ujedinjenih nacija (FAO - OUN) sugeriše unapređenje industrije sušenja voća u svim delovima sveta. S obzirom na raspoložive proizvodne voćarske resurse u Srbiji, osim sušenja šljive, prerada ostalih voćnih vrsta sušenjem je na skromnom nivou. Jedan od razloga je nepoznavanje adekvatne tehnologije prerade, pogrešan izbor tehnike sušenja i parametara procesa. Iz tog razloga od posebnog su značaja za razvoj ove grane industrije istraživanja u oblasti kinetike procesa sušenja i implementacija rezultata u razvoj novih tehnologija, koje će omogućiti uspešnu preradu: kajsije, nektarine, kruške, dunje, jagode, borovnice, maline i drugih voćnih vrsta osetljivih na procese sušenja. Razvoj malih i srednjih preduzeća u poljoprivredi u znatnoj meri može biti ostvaren u domenu prerade sušenjem navedenih voćnih vrsta (*Vukoje, i Pavkov, 2010*).

Sušenje voća u Srbiji ima duboke korene. Najznačajnija voćna vrsta za sušenje je šljiva. Šljiva se smatra nacionalnim voćem i naravno nalazi se na prvom mestu u voćarskoj proizvodnji, ali i po pitanju sušenog voća. U 19. veku počelo je širenje i ulaganje u proizvodnju šljive. Šljiva je korišćena pre svega za proizvodnju rakije i pekmeza, ali tada počinje i intenzivnije sušenje. Sušena šljiva bila je jedan od najvažnijih izvoznih proizvoda u 19. veku u Srbiji. Koliki je bio značaj sušene šljive govore podaci da je Srbija 1879. ostvarila rekordan izvoz sušene šljive za

SAD po dobijanju povlašćenog statusa. Zlatno doba u proizvodnji i izvozu sušene šljive bio je period od 1881. do 1900. Sušenje u domaćoj radinosti se obavljalo prirodnim načinom na suncu, a pojavom seoskih sušnica koje su se zvale „pušnice“ dolazi do masovne proizvodnje sušene šljive (*Topić et al., 2017*). Prve konstrukcije sušara pojavile su se pred kraj 19. veka. Između dva svetska rata formiran je tip domaće sušare, a uporedo se razvijaju modernija rešenja. Industrijalizacija sušenja počinje podesetih godina prošlog veka. Izgradnjom industrijskih sušara tunelskog tipa 1958, a posebno uvođenjem sušara „CER“ počinje era modernog industrijskog sušenja šljive. Treći period kada je u pitanju proizvodnja sušene šljive odnosi se na period posle Drugog svetskog rata pa do početka devedesetih godina. Ovaj period karakterišu velike fluktuacije u proizvodnji sušene šljive. Prosečna izvezena količina suvih šljiva iznosila je oko 13.800 tona. Razlog velikom padu u izvozu bili su novi zahtevi tržišta i novi standardi kvaliteta.

U svetu je sve veći potražnja za sušenim voćem, o čemu svedoči pozitivan trend u proizvodnji sušenog voća koja je u protekloj deceniji povećana za skoro 1 milion tona i sada iznosi oko 3 miliona tona. Globalni izvoz sušenog voća iznosio je 4,13 milijardi dolara u 2019. godini, a ukupna veličina tržišta je prilično stabilna u poslednjih pet godina, iako je na njega negativno uticala pandemija Covid-19 2020. U 2020. sušeno voće je bilo 654. mestu najtrgovanijih proizvoda na svetu. Trgovina suvim voćem predstavlja 0,015% ukupne svetske trgovine. Skoro polovina prodatog suvog voća je suvo grožđe, zatim urme, brusnice, kajsije, suve šljive, smokve, breskve, jabuke i kruške. Ovi proizvodi se nazivaju "konvencionalnim" ili "tradicionalnim" sušenim voćem: voće koje je sušeno na suncu ili u sušarama zagrejanim vazduhom. Mnogim voćnim vrstama kao što su brusnice, borovnice, trešnje, jagode i mango se pre sušenja dodaju zaslađivači (saharozni sirup), odnosno obavlja se osmotsko sušenje ili kandiranje. Neki proizvodi koji se prodaju kao sušeno voće, poput papaje, kivija i ananasa, najčešće su kandirano voće. Danas se sušeno voće proizvodi u većini delova sveta, a potrošnja se javlja u svim kulturama i demografskim segmentima (*www.nutfruit.org*).

Najveći proizvođači sušenog voća u svetu su SAD i Turska sa udelom od 16% u ukupnoj svetskoj proizvodnji, zatim sledi Iran sa 13%, Saudijska Arabija sa 7% i Kina sa 5%. Što se tiče proizvodnje sušenog voća u Srbiji sušenja šljiva je i dalje na prvom mestu. Prosečna petogodišnja proizvodnja sušene šljive u našoj zemlji iznosi oko 5800 tona. Sa tom količinom osušene šljive Srbija zauzima treće mestu u svetu sa učešćem u ukupnoj svetskoj proizvodnji od 3%. Proizvodnja sušene šljive u svetu i u našoj zemlji fluktuira. Na ove fluktuacije najviše utiču vremenske prilike koje smanjuju rod sveže šljive. Najveći svetski proizvođač sušene šljive su SAD sa udelom od 35%, a za njima sledi Čile sa 30% udela u svetskoj proizvodnji (*www.nutfruit.org*). Druge vrste sušenog voća su prisutne u manjim količinama. Radi se o vrstama kao što su jabuka, kajsija, kruška, višnja, malina, borovnica, breskva, jagoda, aronija i dr.

Uspešna proizvodnja sušenog voća zahteva sveobuhvatno razumevanje svih tehnoloških operacija u proizvodnji sušenog voća, a posebno procesa sušenja. Poznavanje osobina materijala koji se suši od nivoa ćelije pa sve do celog ploda (histološke, fizičke, termofizičke, mehaničke, hemijske i senzorne osobine svežeg voća) neophodno je za pravilan izbor tehnike sušenja i parametara procesa sušenja. Proces sušenja je vremenski promenljiva termodifuziona operacija, čiji uticaj na tkivo voća izaziva brojne promene. Kinetika procesa sušenja beleži nastale promene, unutar materijala i na površini, u realnom vremenu i obezbeđuje kompletnu „sliku“ o uticaju parametara procesa. Na osnovu snimljene slike moguće je odabirati tehniku sušenja i

njene parametre u skladu sa željenim kvalitetom krajnjeg proizvoda. Najčešće se kinetika procesa sušenja opisuje dijagramima promene posmatrane veličine u vremenu, u toku trajanja procesa. Pa tako, promena vlažnosti i temperature materijala, promene dimenzija, zapremine, boje, oblika, nutritivnih i senzornih osobina samo su neki od podataka koji proističu iz kinetike procesa sušenja. Snimljeni podaci služe za modelovanje i optimizovanje procesa sušenja po različitim kriterijumima minimuma i maksimuma.

U monografskoj publikaciji obavljena je empirijska analiza različitih tehnika i procesa sušenja, sa posebnim osvrtom na toplotno i mehanički osetljive voćne vrste: kajsije, nektarine, kruške, dunje, maline, jagode i borovnice. Osnove publikacije obuhvataju: teorijske osnove iz oblasti histologije tkiva voćnih plodova, teorijske osnove sušenja zasnovane na teoriji prenosa mase i toplote, kao i rezultati sopstvenih eksperimentalnih istraživanja i istraživanja drugih autora. Od monografske publikacije se očekuje da prikazani rezultati budu korisni i primenljivi u budućim naučnim istraživanjima, boljem razumevanju zakonitosti procesa sušenja voća, ali i za rešavanje praktičnih problema sušenja voća u industriji.

1. TEHNIKE (METODE) SUŠENJA VOĆA

Sušenje je tehnološka operacija konzervisanja hrane uklanjanjem vlage. Osnovna pogonska sila koja pokreće proces sušenja je razlika u parcijalnim pritiscima vodene pare između fluida za sušenje i vlažnog materijala (izuzev osmotskog sušenja). U zavisnosti od primenjenog metoda aktiviranja pogonske sile sušenja, procesi sušenja se razvrstavaju na različite tehnike (metode) sušenja (*Jangam, et al., 2010*):

- konvektivno sušenje (sušenje zagrejanim vazduhom),
- sušenje zamrzavanjem (liofilizacija),
- vakuum sušenje,
- osmotsko sušenje,
- mikrotalasno sušenje,
- kavitaciono sušenje,
- sušenje pregrejanom vodenom parom,
- superkritično CO_2 sušenje,
- kombinovano (hibridno) sušenje.

Od nabrojanih tehnika sušenja, svoju praktičnu i industrijsku primenu u proizvodnju sušenog voća ima: konvektivno sušenje, sušenje smrzavanjem, vakuum sušenje, osmotsko sušenje i kombinovano sušenje. Sve ostale nabrojane tehnike sušenja pronalaze svoju primenu, za sada, jedino u okviru naučnih istraživanja.

1.1. Konvektivno sušenje

Konvektivno sušenje (sušenje zagrejanim vazduhom) je nazustupljenija tehnika sušenja voća. Pogonska sila sušenja aktivira se zagrevanjem voća toplim vazduhom pri čemu se povećava kinetička energija molekula vode koji isparavaju i stvaraju razliku između pritiska vodene pare u voću i vazduhu za sušenje.

Faktori koji utiču na kinetiku konvektivnog sušenja su:

- temperatura vazduha za sušenje,
- brzina vazduha u sloju materijala,
- apsolutna vlažnost vazduha,
- osobine voća i primenjeni predtretman (*Poglavlje 2 i 5*).

Temperatura vazduha je prvi dominantan faktor koji utiče na brzinu konvektivnog sušenja, sa porastom temperature vazduha raste i brzina sušenja. Prilikom izbora temperature potrebno je ostvariti najvišu moguću koja će najmanje uticati na zapreminsko skupljanje voća tokom procesa sušenja. Suviše visoke temperature utiču na pojavu velikih deformacija na površini voća i

pucanja perikarpa (kod voća koje se suši u formi celog ploda) pri čemu dolazi do curenja voćnog soka. Najviše temperature vazduha se koriste za sušenje šljive u formi celog ploda sa košticom, gde vrednost temperature vazduha dostiže maksimalno 80^{o}C (*Marković, 2009*). Kod ostalih voćnih vrsta optimalna temperatura vazduha je 65^{o}C *(Pavkov, et al., 2017a, 2018a, Stamenković, 2021)*. Nedovoljno visoke temperature vazduha usporavaju proces sušenja, što utiče na produženo zadržavanje voća u sušari, produženu izloženost kiseoniku (uticaj na promenu boje i hemijskog sastava), smanjenje učinka sušare i povećanje troškova sušenja.

Brzina vazduha za sušenje u sloju materijala je drugi dominantan faktor koji utiče na prenos toplote sa vazduha na površinu voća u sušari. Pri malim brzinama strujanja (< 0,5 m/s) stvara se laminaran režim strujanja koji je nepovoljan sa aspekta prenosa toplote. Takođe, stvara se povećana apsolutna vlažnost vazduha u graničnom sloju, sloj između kontaktne površine voća i vazduha, što utiče na povećanje parcijalnog pritiska vodene pare u graničnom sloju i usporava sušenje. Zadovoljavajuća brzina sušenja voća postiže se pri ostvarivanju turbulentnog režima strujanja vazduha u sloju materijala (>0,5 m/s). U industriji konstruktivnim rešenjima komore sušare pokušavaju se ostvariti što više brzine strujanja vazduha za režimu mirnog sloja materijala sa homogenim strujnim poljem u horizontalnoj i vertikalnoj ravni. U zavisnosti od dimenzija voća koji se suši brzine strujanja vazduha u sloju materijala se kreću od 1 – 5 m/s, sa povećanjem dimenzija voća povećava se i brzina vazduha.

Apsolutna vlažnost vazduha za sušenje utiče na parcijalni pritisak vodene pare u vazduhu, sa povećanjem njene vrednosti povećava se parcijalni pritisak vodene pare u vazduhu što utiče na usporavanje kinetike sušenja. S obzirom da se za sušenje koristi atmosfeski vazduh, ova vrednost zavisi od stanja okolnog vlažnog vazduha, odnosno od atmosferskih uslova. Uticaj apsolutne vlažnosti vazduha na brzinu sušenja je primetan ali nije dominanatan. Povišenjem temperature vazduha za sušenje (do dozvoljenih granica) umanjuje se ili potpuno eliminiše uticaj ovog faktora. U industrijskim pogonima za sušenje voća u konvektivnim sušarama vrednost apsolutne vlažnosti vazduha se najčešće ne snižava veštački (hlađenjem i kondezacijom vlage iz vazduha pre zagrevanja vazduha u zagrejaču na temperaturu za sušenje). Izuzetak su kondezacione sušare koje potpuno ili delimično recirkulišu vazduh i zagrevaju ga pomoću sistema toplotne pumpe. Ovaj tip sušara se retko koristi za sušenje voća zbog odnosa cene i učinka sušare.

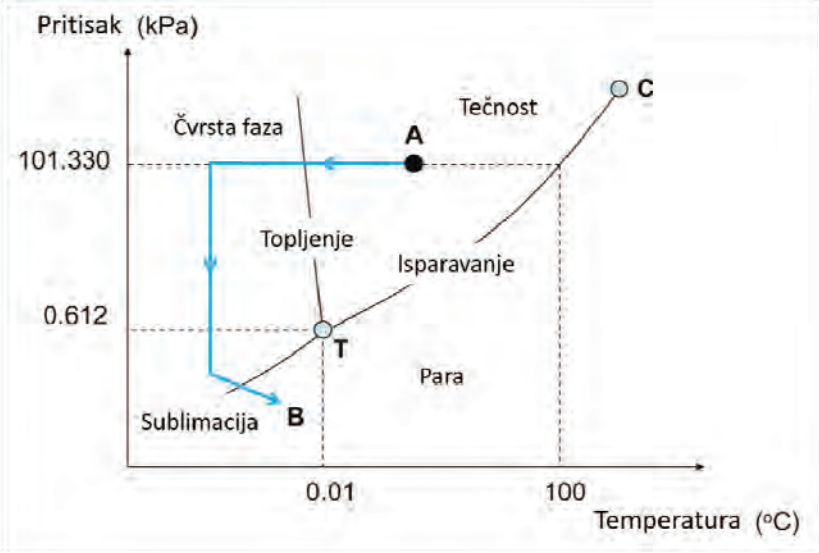
Voćne vrste osetljive na toplotne procese koji se odvijaju na temperaturama >60^{o}C, a koji dominiraju u ovoj tehnici kao što su: malina, kupina i jagoda ne mogu se dovoljno kvalitetno konvektivno osušiti. Ostale voćne vrste uz pravilan izbor tehnoloških operacija pripreme prilagođen za svaku voćnu vrstu, omogućava njihovo uspešno konvektivno sušenje.

1.2. Sušenje zamrzavanjem (liofilizacija)

Tehnika sušenja zamrzavanjem (liofilizacija) izaziva minimalne promene fizičkih, hemijskih i organoleptičkih osobina svežeg voća tokom procesa sušenja u odnosu na ostale tehnike sušenja. Tehnički, energetski i investiciono je zahtevna tehnika sušenja. Koristi se za sušenje voćnih vrsta koje imaju visoku nutritivnu vrednost, a ne mogu se dovoljno uspešno osušiti drugim tehnikama sušenja (malina, kupina, jagoda) Kinetika sušenja je najsporija u poređenju sa ostalim tehnikama sušenja (*Pavkov, et al., 2017b, Kešelj, et al., 2019, 2022*).

Sušenje zamrzavanjem izumeo je Žak-Arsen d'Arsonval na College de France u Parizu 1906. Kasnije, tokom Drugog svetskog rata, široko je primenjivano čuvanje krvnog seruma. Od tada je sušenje zamrzavanjem postalo jedan od najvažnijih procesa za očuvanje bioloških materijala osetljivih na visoke temperature. Tokom 1950-ih počelo je industrijsko sušenje hrane. Sušenje zamrzavanjem se trenutno koristi kao metoda konzervisanja hrane, farmaceutskih proizvoda i širokog spektra drugih proizvoda. Proces se odvija u odsustvu kiseonika, vode u tečnoj fazi pri niskim temperaturama što predstavlja dobru kombinaciju faktora za očuvanje visokog kvaliteta osušenog voća.

Sušenje smrzavanjem je zasnovano na sublimaciji leda, direktan prelazak leda iz čvrste u parnu fazu pod određenom temperaturom i apsolutnim pritiskom okoline. Na slici 1.1. je prikazan fazni dijagram vode, zavisnost agregatnog stanja vode u funkciji apsolutnog pritiska i temperature. Krive linije predstavljaju granice područja postojanja različitih agregatnih stanja vode. Tačka T predstavlja trojnu tačku u kojoj koegzistiraju sva tri agregatna stanja (0,01°C i 612 Pa). Kod ovog načina sušenja primenuje se fenomen sublimacije koja nastaje pri temperaturama ispod 0,01°C i pritiscima nižim od 612 Pa. Proizvod koji se suši liofilizacijom treba da prođe promene i faze od tačke A do tačke B. Proizvod prvo treba da se podvrgne zamrzavanju, zatim sniženju pritiska ispod vrednosti trojne tačke i na kraju je potrebno dovesti toplotu kako bi se pokrenuo proces sublimacije.



Slika 1.1. Fazni dijagram vode

(Agregatno stanja vode u zavisnosti od apsolutnog pritiska i temperature)

Na temperaturama i apsolutnom pritisku nižim od trojne tačke ravnotežnog stanja vode (0,01°C i 612 Pa), voda neposredno prelazi iz čvrste faze u parnu fazu (sublimira). Sublimacija leda odvija se usled razlike parcijalnog pritiska vlage na površini leda i apsolutnog pritiska okoline uz odovođenje toplote potrebne za promenu faze leda. Kako bi se ostvarili uslovi za sublimaciono sušenje u komori sušare, potrebno je prvo zamrznuti voće, zatim ostvariti apsolutni pritisak dovoljno nizak za sublimaciju leda iz voća, pažljivo dovoditi toplotu zamrznutom voću, kondukcijom ili zračenjem, dovoljne „samo" za prelaz leda iz čvrste u parno stanje. S obzirom da se najveći deo procesa odvija na temperaturama ispod 0°C u dubokom vakuumu, voće je

zamrznuto i nema zapreminskog skupljanja (nema promena početnih dimenzija i deformacija). Vlaga se unutar materijala kreće isključivo u obliku vodene pare.

Faktori koji utiču na kinetiku sušenja smrzavanjem su:

- dinamika zamrzavanja voća,
- temperatura voća u komori liofilizatora,
- apsolutni pritisak u komori liofilizatora,
- dinamika zagrevanja voća u liofilizatoru,
- osobine voća i primenjeni predtretman (*Poglavlje 2 i 5*).

Dinamika zamrzavanja voća određuje dimenziju kristala leda u zamrnutom voću. Veća brzina zamrzavanja voća stvara sitniju strukturu kristala leda koji prilikom formiranja manje oštećuju ćelijske zidove. Sa manjim oštećenjem ćelijskih zidova veći je otpor kretanju vodene pare kroz materijal i usporava se kinetika sušenja. Voće se zamrzava u komori ili tunelima za duboko zamrzavanje pri temperaturi fluida za zamrzavanje $\leq$-40^{o}C.

Uobičajena temperatura voća dovoljna za početak procesa sušenja smrzavanjem je -20^{o}C, sa apsolutnim pritikom od $\leq$1655 Pa (0,016 bar). Pogonska sila sušenja je razlika u pritisku vodene pare na površini leda (viši pritisak) i okolini (niži pritisak). Vodena para se kreće u pravcu nižeg parcijalnog pritiska vodene pare. Temperatura materijala ne utiče na kinetiku sušenja. Neophodno je obezbediti dovoljno nisku temperaturu voća na početku procesa sušenja da sva slobodna voda bude u čvrstoj fazi i da ne dođe do otapanja leda u kasnijim fazama sušenja.

Održavanje apsolutnog pritiska na zadatoj vrednosti u komori sušare (liofilizatora) je bitan faktor za neprekidnu sublimaciju leda i neprekidnost procesa sušenja voća. Njegova vrednost mora biti jednaka ili niža od granične vrednosti za sublimaciju leda na datoj temperaturi voća, za temperaturu voća -20^{o}C, apsolutni pritisak u komori je $\leq$1035 Pa (1,035 mbar). Niže temperature voća zahtevaju niže pritiske u komori sušare da bi led sublimirao. Vodena para iz voća prelazi u prostor komore sušare i povećava apsolutni pritisak, iz tog razloga potrebno ju je ukloniti iz komore. Najčešće se uklanja desublimacijom (prevodi se iz parne faze u led) na razmenjivaču toplote (isparivaču) koji se nalazi unutar komore liofilizatora, formira se led na isparivaču. Temperatura isparivača treba da je dovoljno niska da se na datom pritisku komore ostvari desublimacija vodene pare ($\leq$ -40^{o}C). Najniža vrednost apsolutnog pritiska u komori liofilizatora ne sme da pređe vrednost koja će izazvati sublimaciju leda sa površine isparivača. Uticaj vrednosti apsolutnog pritiska na kinetiku sušenja voća, u granicama sublimacije leda na datoj temperaturi, je zanemarljiv.

Da bi se ostvarila sublimacija leda unutar sušare pored temperature voća i apsolutnog pritiska potrebno je dovoditi toplotu voću da bi led sublimirao. S obzirom da u komori sušare vlada vakuum, toplota se dovodi zamrznutom voću zračenjem ili kondukcijom, zagrevanjem ploča na kojima se nalazi voće. Dinamika zagrevanja zamrznutog voća treba da bude usaglašena sa sublimacijom. U slučaju bržeg zagrevanja voća dolazi do otapanja leda i zaustavljanja sublimacije. U slučaju suviše sporog zagrevanja voća proces sublimacije se usporava ili potpuno zaustavlja.

1.3. Vakuum sušenje

Vakuum sušenje je tehnika sušenja osmišljena na težnji da se poveća dinamika isparavanja vode pri nižim temperaturama sušenja (≤50^{o}C). To se postiže sniženjem apsolutnog pritiska u komori sušare, prilikom čega se snižava vrednost ravnotežnog pritiska vodene pare (napon pare) što dovodi do intezivnijeg isparavanja vode iz voća. U isto vreme, zbog snižavanja pritiska unutar komore sušare, izvlačenjem vazduha, snižava se koncentracija kiseonika koji ima negativan efekat na oksidacione procese voća tokom sušenja. Zbog dužine trajanja procesa i cene konačnog proizvoda u procesima sušenja voća je manje prisutna od konvektivnog i sušenja smrzavanjem.

Faktori koji utiču na kinetiku vakuum sušenja su:

- temperatura voća u komori sušare,
- apsolutni pritisak u komori sušare,
- osobine voća i primenjeni predtretman (*Poglavlje 2 i 5*).

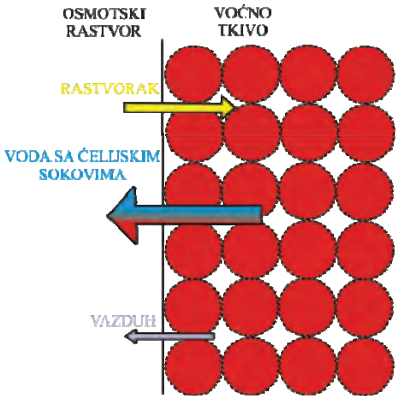
Temperatura unutar komore je bitan faktor kinetike vakuum sušenja. Visina temperature u procesima vakuum sušenja je ograničena maksimalnom dozvoljenom temperaturom termorazgradljivih sastojaka koji se žele očuvati u voću. Prenos toplote na voće u vakuum sušari obavlja se kondukcijom. Voće se postavlja na tacne (lese) koje se zagrevaju i prenose toplotu na voće preko dodirne površine. S obzirom da se voće skuplja tokom procesa sušenja, površina za prenos toplote se smanjuje, a sušenje usporava. Tokođe, isparavanjem vode na graničnoj površini voća troši se energija za promenu faze i snižava temperatura voća na toj površini. Toplota se brzo nadoknađuje na površini zagrevanja, ali na udaljenim površinama je sporije zagrevanje što izaziva sporije isparavanje. Prenos toplote na voće kod vakuum sušenja je manje intezivan u poređenju sa konvektivnim.

Apsolutni pritisak u komori sušare je pored temperature bitan faktor kinetike vakuum sušenja. Sa većim sniženjem apsolutnog pritiska ubrzava se kinetika sušenja. Maksimalna vrednost apsolutnog pritiska tokom vakuum sušenja voća treba da je neznatno viša od ravnotežnog pritiska vodene pare pri kom dolazi do ključanja vode na datoj temperaturi vakuum sušenja. Na ovaj način se izbegava ključanje vode unutar voća, posebno u početnim fazama sušenja kada je prisutna velika količina kapilarne vlage. Ključanje vode unutar voća oštećuje ćelijske zidove koji pucaju i dolazi do curenja voćnog soka, što je izraženo kod voćnih vrsta sa tankim ćelijskim zidovima.

1.4. Osmotsko sušenje

Tehnika osmotskog sušenja zasnovana na potapanju voća u koncetrovane rastvore šećera koncentracije rastvorka ≥50%. Proces osmotskog sušenja odvija se kao posledica delovanja osmotskog pritiska koji nastaje zbog razlike u koncentraciji molekula vode između osmotskog rastvora i voća. Razlike koncentracionih potencijala vode i rastvorka u sistemu biološki materijal – rastvor, rezultiraju pojavom masenih flukseva nekoliko komponenata sistema (*sl.1.2*). Gradijent koncentracije vode se snižava u tkivu materijala zbog prirode težnje mase da se nađe u stanju ravnoteže. Suprotnog smera od fluksa molekula vode je smer kretanja osmotskog rastvorka ka voćnom tkivu. Pošto je voda univerzalni rastvarač, delovi organske materije će sa

njom stvarati gelove. Gelova takve strukture nema u rastvoru, te u ovom slučaju postoji značajna razlika u njihovoj koncentraciji u odnosu na okolni rastvor. To je razlog što se ovde javlja i treći transport materije čiji je smer isti kao kod molekula vode. Međutim, intenzitet kretanja molekula vode iz tkiva značajniji je u odnosu na ulazak osmotskog rastvorka. Takođe, i molekuli vazduha, koji se nalazi inkorporiran u poroznoj strukturi tkiva, nakon potapanja napuštaju tkivo i tako oslobađaju određenu zapreminu za odvijanje osmotskog sušenja, ali ovi tokovi su zanemarljivi.



Slika 1.2. Šematski prikaz masenih flukseva biološkog materijala potopljenog u osmotski rastvor

Osmotskim sušenjem sporo se dostiže vlažnost voća bezbedna za čuvanje. Iz tog razloga tehnika osmotskog sušenja se koristi za delimično sniženje vlažnosti voća, najčešće kao predtretman ostalim tehnikama sušenja, osim u proizvodnji kandiranog voća gde je glavna tehnološka operacija. Ističe se pozitivan efekat osmotskog predtretmana kod voća koje je osetljivo na oksidacione procese koje je neophodno sumporisati radi očuvanja boje (kajsija, kruška, breskva, nektarina, dunja).

Faktori koji utiču na kinetiku osmotskog sušenja (*Pavkov, 2007, 2012*):

- temperatura osmotskog rastvora,
- koncentracija osmotskog rastvora,
- brzina strujanja osmotskog rastvora,
- maseni odnos rastvor:voće,
- osobine rastvorka,
- osobine voća i primenjeni predtretman (*Poglavlje 2 i 5*).

Temperatura osmotskog rastvora utiče na promene u strukturi ćelijske membrane. Sa povišenjem temperature membrana postaje permeabilnija za molekule vode, koji intenzivnije difunduju kroz tkivo prema graničnoj površini, snižava se otpor tkiva difuziji vlage. Takođe, promenom polupropustljivosti ćelijske membrane molekuli rastvorka intenzivnije difunduju iz osmotskog rastvora u unutrašnje slojeve voćnog tkiva. Sa povišenjem temperature ubrzva se kinetika osmotskog sušenja. Uobičajene temperature osmotskog rastvora za sušenje voća su 45 - 50^{o}C.

Više koncentracije rastvora imaju za posledicu pojavu većih koncentracionih gradijenata molekula vode i rastvorka, između granične površine voćnog tkiva i osmotskog rastvora. Povećanje koncentracije osmotskog rastvora utiče na bržu difuziju molekula vode u pravcu osmotskog rastvora i bržu difuziju molekula rastvorka iz rastvora u voće. Sa povećanjem

koncentracije osmotskog rastvora ubrzava se kinetika osmotskog sušenja. Koncentracije rastvorka u rastvoru koje se uobičajeno koriste pri osmotskom sušenju voća su 55-65%.

Brzina strujanja osmotskog rastvora u sloju materijala utiče na intezitet prenosa toplote sa rastvora na površinu voća u sušari i održavanje potencijala prenosa mase zbog mešanja rastvora. Bez strujanja ratvora u sušari ili pri izrazito malim brzinama strujanja stvara se laminaran režim strujanja koji je nepovoljan sa aspekta prenosa toplote. Takođe, stvara se povećana vlažnost rastvora u graničnom sloju. Brzina strujanja rastvora utiče na kinetiku osmotskog sušenja.

Maseni odnos voća i osmotskog rastvora bitan je za održavanje potencijala prenosa vlage tokom procesa sušenja. Tokom osmotskog sušenja smanjuje se koncentracija rastvora zbog prelaza vode iz voća u rastvor i prelaza rastvorka iz rastvora u voće. Maseni odnos ≥4:1 u korist rastvora je dovoljan da se održi zadovoljavajući potencijal prenosa vlage u procesima osmotskog sušenja gde se ne uparava rastvor tokom sušenja.

Izbor vrste osmotskog rastvorka je značajan za kinetiku osmotskog sušenja. Rastvorak treba da ispuni opšte zahteve u pogledu uticaja na miris, ukus i hranljivost suvog proizvoda. Promene nutritivnih vrednosti i organoleptičkih pokazatelja krajnjeg proizvoda su osnovni indikatori prilikom izbora. Pri osmotskom sušenju voća najčešće se koriste vodeni rastvori saharida, saharoza, glukoza i fruktoza, koji ispunjavaju navedene zahteve. Rastvori saharoze i glukoze, iste koncentracije i temperature, imaju različite vrednosti koeficijenata difuzije vlage i rastvorka. Povoljnije vrednosti difuzije molekula vode izmerene su upotrebom saharoze, a difuzije rastvorka upotrebom glukoze. U industriji proizvodnji svoju primenu pronalaze rastvori saharoze i glukozuno-fruktozni sirupi.

1.5. Kombinovano (hibridno) sušenje

Kombinovo (hibridno) sušenje voća je kombinacija više tehnika sušenja u cilju ubrzanja kinetike sušenja ili smanjenja negativnih uticaja pojedinih postupaka sušenja na krajnji proizvod. Kombinovano sušenje može biti u formi odvojenih postupaka ili simbioze dve tehnike sušenja unutar jedne komore sušare. Najčešća kombinacija u procesima sušenja voća je osmotsko sušenje, kao prvi postupak ili predtretman, sa ostalim tehnikama sušenja (konvektivno, liofilizacija, vakuum sušenje). U procesima sušenja gde je osmotsko sušenje predtretman cilj je popravljanje senzornih, fizičkih i mehaničkih osobina krajnjeg proizvoda na koje utiče osmotski rastvorak.

Tehnika mikrotalasnog sušenja koristi se u simbiozi sa konvektivnim i vakuum sušenjem. Upotrebom mikrotalasa unutar komore sušare ubrzava se zagrevanje unutrašnjih slojeva materijala čime se intezivira kinetika sušenja. Sličnu primenu ima i tehnika kavitacionog sušenja, u simbiozi sa ostalim tehnikama, koristi se ultrazvuk radi izazivanja kavitacije na površini i unutar zapremine voća da bi se ubrzala kinetika sušenja.

2. OSOBINE VOĆA UTICAJNE NA KINETIKU PROCESA SUŠENJA

Proučavanje procesa sušenja voća, a samim tim, procesa prenosa toplote i materije u kapilarno-koloidnim poroznim telima podrazumeva poznavanje strukture proučavanog biomaterijala. Biljne ćelije su osnovni strukturni elementi koji učestvuju u izgradnji biljnog tkiva. Upoznavanje sa strukturnim osobinama biljnih ćelija različitih funkcija i promenama koje se odigravaju u njoj tokom procesa sušenja značajni su za sveobuhvatno razumevanje kinetike procesa sušenja.

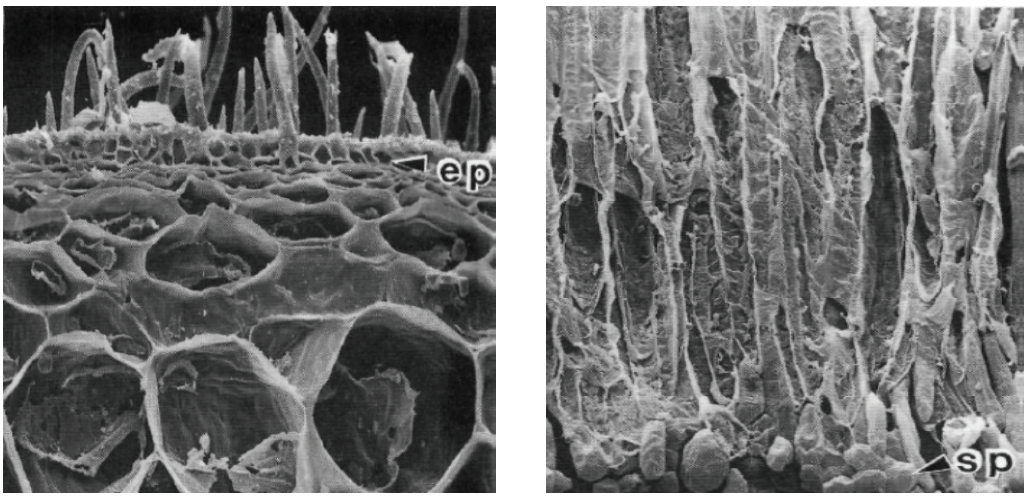
2.1. Anatomska građa voća -plod

Uticaj biofizičkih osobina ploda voća na procese sušenja zavisi pre svega od njihovih anatomsko-histoloških karakteristika, stepena zrelosti i uslova spoljne sredine u kojima je sazrevao. Plodovi voća sastoje se od slojeva tkiva različitih funkcija. Površina plodova pokrivena je pokožicom koja se sastoji iz epidermisa sa najčešće jednim slojem ćelija i hipodermisa sa više slojeva ćelija. Ćelije epidermisa se odlikuju zadebljalom spoljnom membranom, stranom ćelijskog zida koji se naziva kutikula. Kutikula je najčešće pokrivena tanjom ili debljom voštanom prevlakom (šljiva, nektarina, kruška). Pored ove prevlake na pokožici plodova nekih voćnih vrsta, breskva i kajsija, nalaze se i dlake koje zajedno sa kutikulom imaju zaštitnu funkciju. Građa ćelijskog zida epidermskih ćelija u tesnoj je vezi sa funkcijom ovog tkiva, zaštita od mehaničkih povreda i „suvišnog isparavanja vode“. Spoljna strana ćelijskog zida je jače zadebljana, jer je ona neposredno izložena spoljnim uticajima i nosilac je osnovne funkcije epidermisa. Razlikuju se tri sloja, unutrašnji od celuloze, zatim sloj od celuloze impregnirane kutinom i na kraju sloj od čistog kutina. Ovaj sloj je slabo propustljiv za vodu i vodenu paru, predstavlja barijeru za difuziju vode tokom sušenja.

Mezokarp čini glavnu masu ploda i izgrađen je od ćelija parenhima. Funkcija ovog tkiva je sakupljanje i čuvanje vode i organskih materija. Ćelije ovog tkiva su krupne, loptastog oblika sa tankim ćelijskim zidovima izgrađenim od celuloze koji dozvoljavaju tokom procesa sušenja intenzivnu difuziju vode sa mesta više koncentracije na mesto niže. Dimenzije ćelija mezokarpa kao i intercelularnog prostora se povećava od periferije ka centru ploda. Oblik biljnih ćelija je vrlo raznovrstan i zavisi pre svega od njihove funkcije. U osnovi oblik ćelije se može svesti na dva tipa: parenhimske ćelije (kojima su sve tri dimenzije – dužina, širina i visina približno jednake) i prozenhimske ćelije (kojima dužina više puta prevazilazi širinu, te imaju izdužen

oblik, a obično su na krajevima zašiljene (*Gvozdenović i Davidović, 1987; Kojić, 1998, Wills, 2007*).

Autori *Archibald and Melton* (1987) obavili su mikroskopsko skeniranje tkiva ploda kajsije sorte „*Moorpack*" pomoću elektronskog mikroskopa. Na osnovu snimaka (*sl. 2.1*) ustanovili su da tkivo kajsije čine ćelije različitog oblika i dimenzija. Na površini tkiva kajsije nalaze se malje različitih dužina. Ćelije u sloju epidermisa su malih dimenzija sa zadebljalim ćelijskim zidom (kutikulom) okrenutim prema površini ploda. Sloj hipodermisa čini 6-10 redova ćelija, čiji oblik i veličina se menjaju od tankih tangencijalno izduženih ćelija do ćelija loptastog oblika. Smer promene oblika i veličine je od ćelijskog sloja epidermisa do parenhima. Prvi sloj ćelija parenhima sačinjen je od loptastih ćelija sa tankim ćelijskim zidom, drugi sloj čine radijalno izdužene ćelije i treći sloj su ćelije malih dimenzija koje se naslanjaju na košticu, 1-4 reda. Ukupan broj redova ćelija perikarpa je 53-55 (*Archibald i Melton, 1987*).

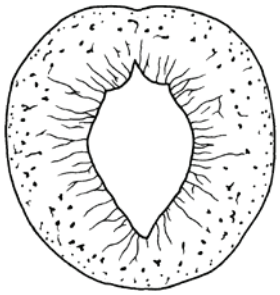


a) b)

Slika 2.1. Poprečni presek tkiva kajsije „Moorpack" (Archibald and Melton, 1987)
a) ćelije epidermisa, hipodermisa i loptaste ćelije parenhima, (ep –epidermis);
b) radijalno izdužene i male ćelije do koštice parenhima,(sp – male ćelije do koštice)

Između ćelija nalaze se manje ili veće šupljine, međućelijski prostor ili intercelulari koji su veoma značajni za difuziju vode i vodene pare do granične površine razmene tokom procesa sušenja. Tokom razvića ćelija intercelulari se uvećavaju i spajaju među sobom te grade sistem kanala ili hodnika – mikro i makro kapilara koji su ispunjeni vazduhom ili vodom. Pomoću naročitih otvora sistem mikro i makro kapilara je u vezi sa spoljašnjom sredinom.

Archibald i Melton (1987), pomoću elektronskog mikroskopa ustanovili su raspored mreže mikro i makro kapilara u tkivu kajsije. Mreža mikro i makro kapilara u delu radijalno izduženih ćelija parenhima je paralelna sa najdužom osom ćelija. Kapilare su različite dužine i rasprostiru se od koštice ploda do polovine tkiva parenhima, na slici (*sl. 2.2*) prikazane su linijama. U sredini tkiva raspored kapilara je nepravilan. Pri površini ploda nalazi se mreža kapilara malog prečnika, na slici prikazane su tačkama, koje su paralelne sa ćelijama epidermisa i protežu se od 7 do 14 reda ćelija ispod epidermisa. Između 18-25 reda ćelija, ispod epidermisa, nalazi se mreža manjeg broja kapilara većeg prečnika.



Slika 2.2. Poprečni presek tploda kajsije sa rasporedom mreže mikro i makro kapilara (Archibald i Melton, 1987)

2.2. Difuzija vode u biljnim ćelijama i tkivu

Difuzija u biljnim ćelijama i tkivu je kretanje molekula neke materije kroz ćelijske zidove sa mesta više koncentracije na mesto niže kocentracije sve do izjednačavanja koncentracije u određenom prostoru. Brzina difuzije zavisi od razlike u koncentraciji, od molekulske mase i naboja čestica. Što je masa molekula manja, brzina difuzije je veća. Brzina difuzije raste sa porastom temperature, a smanjuje se sa povećanjem viskoznosti (*Kastori, 1998; Jančić, 2004*).

Geometrija molekula vode obezbeđuje veoma važan dipolni karakter vode koji je pogonska sila za difuziju vode u biljnim tkivima. Naelektrisanje molekula vode je neutralno, ali raspored naboja u njemu nije ravnomeran, već s jedne strane preovlađuje pozitivni, a sa druge negativni naboj – dipolni karakter. Molekul vode nije simetrično građen već pod određenim uglom između oba H–atoma i O-atoma. Taj ugao je veoma važan za biološki dipolni karakter. Ovakvi dipoli usmeravaju se u električnim poljima poput sitnih magneta. Kako se protoplazma sastoji od organskih i neorganskih materija koje disperguju na jone pozitivnog ili negativnog naelektrisanja svojim naelektrisanjem privlače manji ili veći broj molekule vode i stvaraju vodeni omotač - hidratišu. Sila privlačenja molekula vode direktno je zavisna od intenziteta naelektrisanja organske i neorganske materije u protoplazmi ćelija i njenoj okolini. Broj molekula organskih i neorganskih materija u protoplazmi ćelije i njenoj okolini odnosno njihova koncentracija utiče na smanjenje vlažnosti i povećanje intenziteta naelektrisanja, a samim tim i na intenzitet difuzije vode u biljnom tkivu u pravcu niže vlažnosti (*Kojić, 1998; Kastori, 1998; Jančić, 2004*).

Sa aspekta sušenja, mogu se izdvojiti dva oblika difuzije za molekule vode unutar mezokarpa:

- difuziji između susednih ćelija, učestvuju plazmodezme (citoplazmatične niti) i
- kroz apoplast (sistem mikro i makro kapilara), gde se brzo i lako provodi voda i druge materije unutar mezokarpa između udaljenih ćelija.

U prilog ovoj konstataciji doprinose rezultati naučnog rada autora *Yang, et al.* (2010). U radu je urađeno snimanje mezokarpa *Angelica Slices* (tradicinalno kinesko lekovito bilje) pomoću elektronskog mikroskopa visoke rezolucije tokom konvektivnog sušenja. Na osnovu analize slika autori zapažaju sledeće puteve difuzije za molekule vode tokom sušenja: iz površinskog sloja ćelija u vazduh za sušenje, između ćelija pomoću citoplazmatičnih niti, kroz zid ćelije u makro i mikrokapilare i kroz makro i mikrokapilare u vazduh za sušenje.

Difuzija vode u biljnom tkivu zavisi od razlike u potencijalima vode susednih ćelija i sredine koja ih okružuje. Voda će difundovati kroz tkivo voća u pravcu nižeg potencijala vode ćelije. Potencijal vode ćelije ($\psi_{ćelije}$) zavisi od više različitih potencijala: količine osmotski aktivnih

materija (osmotski potencijal ψ_π), bubrenja i kapilarnih sila (matriks potencijal ψ_{matrix}) i hidrostatičkog pritiska (potencijal pritiska ψ_p). Mehanički pritisak i povišenje temperature povećava, a prisustvo rastvorene materije ili nekog matriksa, koloida ili površine sa električnim nabojem, smanjuje vodni potencijal ćelije. Prisustvo rastvorenih materija smanjuje koncentraciju odnosno udeo molekula vode u rastvoru. Koliko se koncentracija vode smanjuje toliko opada i njen vodni potencijal (*Kojić, 1998; Kastori, 1998; Jančić, 2004*). Iz navedenog sledi da je vodni potencijal ćelije jednak:

$$\psi_{ćelije} = -\psi_\pi + \psi_p + \psi_{matrix} \tag{2.1}$$

Osmotski potencijal (ψ_π) je po vrednosti jednak osmotskom pritisku rastvora u biljnom tkivu i ima negativan predznak. Sa povećanjem koncentracije rastvorenih čestica osmotski potencijal postaje više negativan. Koeficijent q je *Van't Hoff* - ov koeficijent čija je vrednost za neelektrolite (saharozu) = 1. Za izračunavanje osmotskog pritiska važi jednačina:

$$\psi_\pi = -q \cdot C \cdot R \cdot T \tag{2.2}$$

U biljnim ćelijama se pored rastvorenih osmotski aktivnih materija nalaze i rastvoreni koloidi makromolekula, hidratisani strukturni elementi i površine membrana koji takođe mogu da utiču na potencijal vode biljnog tkiva. Ovaj potencijal neće biti ravan nuli u ćelijskom zidu i kad se u njemu nalazi čista voda, pošto se u ćelijskom zidu nalaze kapilari i hidrofilni makromolekuli koji vezuju vodu. Sa povećanjem vezane vode smanjuje se broj slobodnih molekula vode i shodno tome potencijal vode. Vrednost toga izražava matriks potencijal i ima negativan predznak (ψ_{matrix}). Izvesnu količinu vode vezuje svaki rastvoreni molekul i jon i na taj način učestvuju u stvaranju matriks potencijala. U potpuno razvijenim, vakuliziranim ćelijama, matriks potencijal protoplazme i ćelijskog zida je mali u poređenju sa osmotskim potencijalom vakuole zbog čega se često zanemaruje (*Kastori, 1998*).

Potencijal pritiska (ψ_p) je analogan statičkom pritisku i raste kada voda ulazi u ćeliju, a snižava se kada voda izlazi iz ćelije. Potencijal pritiska je u živim ćelijama pozitivan, a u plazmoliziranim ćelijama je skoro nula. Sa gubitkom vode postepeno se smanjuje potencijal pritiska, a ćelijski sok postaje koncetrovaniji. Ako se sadržaj vode u ćeliji i dalje smanjuje dolazi do gubitka turgora i tada je potencijal pritiska ćelije ravan nuli, a potencijal vode ćelije izjednačava se sa osmotskim pritiskom (*Kastori, 1998*).

Voda difunduje sa mesta sa većim na mesto sa manjim, negativnijim vodnim potencijalom ćelije ($\psi_{ćelije}$), odnosno duž padajućeg gradijenta. Pri tome se smanjuje slobodna entalpija vode (egzoterman proces). Što je negativniji vodni potencijal jednog sistema od vodnog potencijala koji ga okružuje, na osnovu zakona *Fick* - a, voda ima utoliko veću naklonost da u taj sistem difunduje (*Kastori, 1998*).

2.3. Hemijski sastav voćnog tkiva

U hemijski sastav jestivog dela voćnog tkiva ulaze: voda, mineralne materije, ugljeni hidrati, celuloza, kiseline, pektini, belančevine, masti, tanini, fermenti, bojene i aromatične materije. Količina i odnos pojedinih sastojaka u plodu zavisi od vrste voća, sortne osobine, zrelosti ploda, kao i od uslova spoljne sredine i zdravstvenog stanja voćaka *(Đurić, 2003; Lučić, 1996)*.

Na osnovu pregleda podataka iz literature, u tabeli 2.1, prikazan je prosečan hemijski sastav mezokarpa za neke voćne vrste.

Tabela 2.1. Glavni hemijski sastojci mezokarpa zrelog ploda: kajsije, nektarine, kruške i maline (Janick i Paull, 2008)

Komponente	Jedinica	Kajsija	Nektarina	Kruška	Malina
Vlažnost	$\%_{wb}$	85,3	87,7	83,71	82,9
Ugljeni hidrati	%	8,54		9,80	7,19
Proteini	%	0,95	1,1	0,38	-
Ulje	%	0,13	0,1	0,12	-
Voćne kiseline	%	1,4	1	0,9	1,5
Mineralne materije	%	0,66	0,7	0,33	0,38
Dijetetska vlakna	%	1,54	3,1	3,1	1,6
pH - vrednost	-	3,69	3,6	4	1,15
Energetska vrednost	kJ	183	282	242	162

Vlaga u tečnom stanju je najzastupljeniji sastojak mezorkapa zrelog ploda voća 83,71 – 89%$_{wb}$ (tabela 2.1). Pored tečnog agregatnog stanja, u zavisnosti od temperature mezokarpa, može biti u parnom i čvrstom agregatnom stanju. Količina vode u svežem voću zavisi od osobine sorte i vlažnosti sredine u kojoj se plodovi razvijaju i sazrevaju.

Sadržaj vlage ili vlažnost izražava se na dva načina, vlažnost u odnosu na vlažnu bazu (jednačina 2.3) i vlažnost u odnosu na suvu bazu (jednačina 2.4). Ako je ukupna masa vlažnog materijala (m) jednaka zbiru mase vlage u materijalu (m_w) i mase suve materije materijala (m_{sm}) tada važe jednakosti:

$$\omega = \frac{m_w}{m}\left[\frac{kg_w}{kg}\right] \qquad \omega = \frac{m_w}{m}\cdot 100[\%_{wb}] \tag{2.3}$$

$$\omega^s = \frac{m_w}{m_{sm}}\left[\frac{kg_w}{kg_{sm}}\right] \tag{2.4}$$

$$\omega = \frac{\omega^s}{1+\omega^s}\left[\frac{kg_w}{kg}\right] \qquad \omega^s = \frac{\omega}{1-\omega}\left[\frac{kg_w}{kg}\right] \tag{2.5}$$

gde je: ω - vlažnost u odnosu na vlažnu bazu (kg_w/kg; $\%_{wb}$); ω^s - vlažnost u odnosu na suvu bazu (kg_w/kg_{sm}); m_w – masa vlage u voću (kg_w); m_{sm} – masa suve materije voća (kg_{sm}); m – masa vlažnog materijala (kg), w – vlaga, sm – suva materija, wb – vlažna baza (osnova).

Priroda obrazovanja različitih veza vlage sa materijalom, kao i energija veze, uslovljavaju mehanizam njenog uklanjanja pri sušenju, kao i energiju potrebnu za njeno uklanjanje. Iz tog razloga od velikog je značaja poznavanje stanja vlage u materijalu, kao i zakonitosti njenog uzajamnog delovanja sa suvim skeletom materijala koji se suši (*Pavkov, 2012*).

Voda se u ćeliji nalazi u dva oblika, i to kao vezana i slobodna. Od ukupne količine vode u ćeliji na vezanu vodu otpada svega 4-7%$_{wb}$. Ona je većim delom vezana za proteinske molekule i prema tome predstavlja deo protoplazmatične strukture. Slobodna voda sačinjava osnovnu masu vode u ćeliji i funkcioniše kao dispergens u sistemu protoplazmatičnih koloida, zatim, kao rastvarač mnogobrojnih materija, kao transportno sredstvo i najzad predstavlja sredinu za

metaboličke procese. Velika količina vode nalazi se u protoplazmi ćelija, obično od 75 do 90%$_{wb}$. Sposobnost protoplazme da održava veliku količinu vode uslovljena je uglavnom hidrofilnošću ćelija (*Kojić, 1998; Wills, 2007*).

Klasifikacija vlažnih biomaterijala na osnovu njihovih koloidno-fizičkih osobina, svrstava voće u grupu kapilarno-porozno koloidnih tela. Klasifikacija vrsta veza u ovakvim materijalima uzima u obzir kako prirodu obrazovanja različitih veza, tako i energiju koju je potrebno uložiti da bi se odgovarajuća veza razgradila. Saglasno klasifikaciji *Rebinder*-a, koja se primenjuje u tehnici sušenja, sve vrste veza vode i suve materije dele se na tri grupe: hemijski vezana vlaga, fizičko-hemijski vezana vlaga i fizičko-mehanički vezana vlaga *(Babić, Ljiljana i Babić, M., 2000; Voronjec, 1979)*.

Pod hemijski vezanom vlagom podrazumeva se onaj deo vlage koji je sa suvom materijom vezan izrazito snažnim (hemijskim) silama i može se iz materijala udaljiti samo hemijskim putem ili pri vrlo visokim temperaturama koje svakako premašuju maksimalne temperature (>1000^{o}C) pri najoštrijim režimima sušenja (*Nedeljkov i Stakić, 1994*). U većini procesa sušenja voća, koriste se značajno niže temperature sušenja, maksimalno 80^{o}C (konvektivno sušenje celog ploda šljive sa koštičom).

Fizičko-hemijski vezana vlaga javlja se u dva oblika: osmotski i adsorbciono vezana. Osmotski vezana vlaga nalazi se u ćeliji i slobodna je u smislu slabe energije veze, a po svojstvima se ne razlikuje od slobodne vode. Osmotski vezana vlaga u materijalu se premešta u vidu tečnosti putem difuzije kroz polupropustljive ćelijske zidove, zbog razlike u vodnim potencijalima između susednih ćelija. Adsorpciono vezanu vlagu čine molekuli parne faze vlage vezanih za čvrstu fazu druge materije. Zbog izuzetno jakih privlačnih sila, ovaj sloj vlage gubi osobine slobodne vlage i poprima svojstva čvrstog tela. Sile koje omogućuju ovakvo povezivanje su: fizičke i hemijske sile adsorpcije. Adsorpciono vezana voda uklanja se iz materijala isključivo prevođenjem u parnu fazu, nakon čega se ona unutar materijala premešta u parnom stanju *(Babić i Babić, 2000; Voronjec, 1979)*.

Fizičko-mehanički vezana vlaga sa materijalom može da bude površinska vlaga i kapilarna vlaga. Kapilarno vezana vlaga može se pojaviti u makrokapilarama (poluprečnik kapilare veći od 10^{-7} m) i u mikrokapilarama (poluprečnik kapilare manji od 10^{-7} m). Ona može da nastane ako postoji polimolekularno adsorbovan sloj vlage. Molekuli vodene pare će u ovom slučaju biti privučeni od strane molekula u tečnoj fazi. Stvaranjem više slojeva vlage, poprečni presek kapilara biće popunjen vlagom u tečnoj fazi. Kapilarno vezana vlaga može biti upijena i kao rezultat sorpcije (kapilarne kondenzacije) vodene pare iz okolnog vazduha. Površinska vlaga nastaje kada se poljoprivredni materijal nađe u neposrednom kontaktu sa vodom u tečnoj fazi, ona će se prilepiti za površinu ako su kapilare pune vode. Ona ima sve tipične karakteristike slobodne vode. Fizičko-mehanički vezana vlaga najlakše se oduzima materijalu, energija veze između vlage i materijala je najslabija, i to prvo površinska vlaga, a zatim kapilarna vlaga, čije udaljavanje teče znatno sporije i zavisi od prečnika kapilara *(Babić i Babić, 2000; Voronjec, 1979)*.

Ugljeni hidrati su posle vode najzastupljeniji sastojak jestivog dela plodova voća. U zelenim plodovima od ugljenih hidrata najzastupljeniji su skrob, celuloza, hemiceluloza i pektini, a u zrelim plodovima saharoza, glukoza i fruktoza. Količina šećera u plodovima zavisi u prvom redu od stepena zrelosti, a zatim od osobine sorte, zdravstvenog stanja voćnjaka i uslova gajenja.

Šećeri, zajedno sa voćnim kiselinama, predstavljaju osnovnu komponentu za formiranje ukusa *(Đurić, 2003)*.

Pektinske materije ulaze u sastav ćelijskih membrana, najviše ih ima u takozvanoj središnjoj lameli, menje u ćelijskom zidu, pa im je uloga vrlo značajna. Nerastvorljive pektinske materije igraju presudnu ulogu u održavanju čvrstoće jestivog dela ploda i zajedno sa celulozom i hemicelulozom, povezuju sastojke ćelija. U vodi rastvorljive pektinske materije bubre, te daju soku potrebnu koenzistenciju *(Niketić, 1988)*.

Celuloza kao i pektinske materije**,** ulazi u građu ćelijskih membrana ploda. Ima važnu ulogu u čvrstoći mesa ploda i znatno doprinosi transportabilnosti plodova. Zastupljena je od 0,43 do 1,10% u jestivom delu ploda, što zavisi od voćne vrste, sorte i zrelosti ploda *(Đurić, 2003)*.

Mineralne materije u svežem voću nalaze se najčešće u granicama od 0,3-0,8%. Kao redovni sastojci nađeni su: kalijum, kalcijum, magnezijum, gvožđe, mangan, natrijum, fosfor, sumpor, zatim u manjim količinama bakar, fluor, cink, jod i dr (*Niketić, 1988*).

Voće je bogat izvor vitamina, najviše vitamina C i β-karotena. Njihova količina zavisi od vrste voća, sorte kao i niza drugih činilaca. Vitamin C nije podjednako raspoređen u celom plodu. Najviše ga ima u pokožici i ispod nje. Drugi vitamin po važnosti i količini je β-karoten. Najviše ga sadrži kajsija, ananas, breskva.

U zavisnosti od primenjene tehnike sušenja i odbranih parametara procesa u velikoj meri zavisi stepen degradacije vitamina C. Temperatura na kojoj se odvija proces sušenja, prisustvo kiseonika i vreme trajanja procesa su faktori koji su dokazani kao najuticajniji na degradaciju vitamina C. Pri konvektivnom sušenju povišenje temperature vazduha dovodi do skraćenja vremena sušenja i smanjena degradacija vitamina C. Značajan uticaj visine temperature procesa sušenja zabeležen iznad 120^{o}C. Tehnike sušenja u kojoj se proces odvija bez prisustva kiseonika, liofilizacija, vakuum sušenje i osmotsko sušenje, beleže veće očuvanje vitamina C. Najbolji rezultati se postižu liofilizacijom voća, gde je očuvanje vitamina C potpuno u konačnom proizvodu (*Herbig i Renard, 2017; Verbeyst i Bogaerts, 2013; Stamenković et al., 2019a, 2019b, 2021*).

U manjim količinama voće sadrži i druge vitamine K, E. Vitamini su veoma značajni sastojci voća i u kombinaciji sa mineralnim materijama čine ih fiziološki veoma vrednim. Iz tih razloga, zadatak svakog tehnološkog procesa sušenja je da ih sačuva u najvećoj mogućoj meri *(Niketić, 1988)*.

Voćno tkivo ima karakterističan sastav aromatičnih materija koje se stabilno prenose i na proizvode koje se dobijaju preradom (kompot, džem, sušeno voće, rakija). Aromatične materije se najviše ispoljavaju u punoj zrelosti ploda. To su većinom lako isparljiva jedinjenja koja se lako hemijski menjaju, reagujući međusobno ili sa nekim drugim materijama *(Niketić, 1988)*.

Bojene supstance u tkivu voća nalaze se u pokožici i mesu ploda. Najzastupljeniji su hlorofili, karotenoidi i antocijani. Hlorofili i karotenoidi uslovljavaju pojavu zelene, žutozelene, žute i narandžaste boje pokožice i mesa, a antocijani uglavnom crvenu boju dela pokožice, a kod nekih vrsta voća i mesa ploda. U ovu grupu prirodnih boja ubrajaju se biljni fenoli, koji su u neoštećenim ćelijama bezbojni, ali pri oštećenju ćelija, one podležu enzimatskom, a zatim neenzimatskom tamnjenju *(Tepić, 2012; Niketić, 1988)*.

2.4. Fizičke osobine voća promenljive tokom procesa sušenja

Tokom procesa sušenja voća zbog gubitka vode u ćelijama i tkivu dolazi do skupljanja ćelijskih zidova, kao posledica toga nastaju promene u osnovnim fizičkim osobinama. Procesi sušenja utiču na promenu: dimenzija, zapremine, oblika, sopstvene gustine, poroznosti i kapilarnosti. Karakter i intezitet nastalih promena zavisi od: vrste voćnog tkiva, primenjene tehnologije i tehnike sušenja, parametra procesa sušenja. Poznavanje vrednosti osnovnih fizičkih osobina svežeg voća, međusobne zavisnosti između njih, karakter nastalih promena tokom procesa sušenja i dozvoljene granice u okviru kojih se one mogu menjati je značajno za pravilan odabir tehnike sušenja i pravilno upravljanje procesom sušenja voća. U literaturi je prisutan značajan broj rezultata istraživanja promena fizičkih osobina voća tokom različitih postupaka sušenja (*Rahman, 2009, Pavkov, 2012; Radojčin, 2015*).

2.4.1. Dimenzije

Dimenzije plodova voća ili komada voća podvrgnutih procesu sušenja izražavaju se pomoću tri karakteristične dimenzije: dužine, širine i debljine. Dužina je apsolutno najveća dimenzija, širina je najveća dimenzija normalna na pravac merenja dužine i debljina (ili visina) je najveća dimenzija normalna na pravce merenja dužine i širine (*Mohsenin, 1980*). Promene dimenzija voćnog tkiva tokom sušenja se mogu izraziti analogno ostalim dimenzionim promenama koje se sreću u literaturi (*Mayor i Sereno, 2004; Suzuki et al., 1976; Babić et al., 2008*, *Pavkov et al., 2008*) gde se one izražavaju u odnosu na početno stanje.

U radu *Babić et al.* (*2008*) obavljeno je merenje promena karakterističnih dimenzija (dužina, širina i debljina) oljuštenih komada dunje u obliku četvrtine ploda tokom osmotskog sušenja. Dimenzije komada dunje su merene na svakih 30 minuta tokom 180 minuta osmotskog sušenja. Koncentracija osmotskog rastvora varirana je na dva nivoa, 63,5% i 59,4%, a temperatura osmotskog rastvora je bila ista za sve eksperimentalne jedinice i iznosila je 45^{o}C. Rezultati merenja su izraženi preko promena karakterističnih dimenzija u odnosu na početno stanje. Zabeležene su veće promene kod uzoraka sušenih sa višom koncentracijom osmotskog rastvora i one su iznosile: za dužinu 9,5%, širinu 13,4% i debljinu 16,2% u odnosu na početno stanje. Nastale promene su u korelaciji sa intenzitetom gubitka vode iz tkiva u zavisnosti od koncentracije osmotskog rastvora.

U radu *Pavkov et al.* (*2008*) obavljeno je merenje promena dužine, širine i debljine tkiva jabuke u obliku jedne šestine celog ploda tokom osmotskog i konvektivnog sušenja. Tkivo jabuke je sušeno u osmotskom rastvoru sa koncentracijom variranom u dva nivoa, 55^{o}Bx i 65^{o}Bx i jednom temperaturom rastvora 45^{o}C, vreme trajanja osmotskog sušenja bilo je 180 minuta. Parametri konvektivnog sušenja su bili: temperatura vazduha za sušenje 50^{o}C, brzina vazduha za sušenje ispred sloja materijala 0,5 m/s i vreme trajanja sušenja bilo je 1300 minuta. Početna vlažnost tkiva jabuke je iznosila 87,04%$_{wb}$. Tokom osmotskog sušenja zabeležene su intenzivnije promene dimenzija tkiva jabuke u odnosu na početnu vrednost kod uzoraka sušenih sa višom

koncentracijom osmotskog rastvora. Posle 180 minuta za koncentraciju 65% promene su iznosile: dužina 9,4%, širina 18,7% i debljina 21%, a za koncentraciju 55°Bx promene su iznosile: 7,3%, širina 16,4% i debljina 17,2%. Intenzivnije promene dimenzija kod više koncentracije osmotskog rastvora je posledica većeg gubitka vode iz tkiva, za 65% gubitak vode iznosio je 10,8%, a za 55% gubitak vode iznosio je 9,5% u odnosu na početno stanje. Analizirajući rezultate merenja tokom konvektivnog sušenja autori navode da je promena dimenzija nelinearan proces. Najintenzivnije promene nastaju u prvih 1000 minuta sušenja. U kasnijem periodu došlo je do usporenja ovih promena, što je u korelaciji sa brzinom otpuštanja molekula vode u tom periodu. Promena dimenzija kriški jabuke tokom konvektivnog sušenja intenzivnija je kod tkiva prethodno osmotski sušenog sa koncentracijom 65% u prvom periodu sušenja. Kasnije dolazi do usporavanja u odnosu na voće sušeno sa koncentracijom 55% sa tendencijom izjednačavanja na kraju procesa.

2.4.2. Promena zapremine – zapreminsko skupljanje

Skupljanje (*shrinkage*) je promena zapremine voća koja dolazi do izražaja tokom procesa sušenja zbog gubitka vode. Oblici skupljanja voća mogu biti izotropno i anizotropno skupljanje. Skupljanje voća jednako po svim dimenzijama je izotropno skupljanje, nejednako skupljanje po dimenzijama naziva se anizotropno skupljanje. Tokom sušenja voća uobičajeno je anizotropno skupljanje, ali javlja se i izotropno (*Rahman, 2009)*.

Voćno tkivo znatno menja zapreminu sa promenom vlažnosti, a nešto manje i sa promenama temperature. *Urošević* (1986) navodi da svaka neujednačenost vlažnosti po preseku materijala izaziva pojavu unutrašnjih naprezanja zbog prateće neujednačenosti promene dimenzija (anizotropno skupljanje). Ovako nastala unutrašnja naprezanja mogu prouzrokovati niz nepoželjnih efekata po kvalitet osušenog materijala, kao što su pojave deformacija ili gubitak forme, pojava naprslina po površini ili unutar tkiva.

Način izražavanja promene zapremine i matematički modeli koji to opisuju veoma su različiti u literaturi. Skupljanje se može izraziti na dva načina: koeficijentom skupljanja S (*Mayor i Sereno, 2004; Suzuki et al. 1976; Viberg et al., 1998; Toğrul i İspir, 2007*) i zapreminskim skupljanjem *SV* (*Levicki i Jakubczik, 2004, Babić et al., 2008*). Međusobna korelacija je:

$$SV = \frac{V_o - V}{V_o} = \frac{\Delta V}{V_o} = 1 - S \ [-] \text{ ili } SV(\%) = \frac{\Delta V}{V_o} 100\% = 100\% - S \ [\%] \qquad (2.6)$$

gde je: *SV* – zapreminsko skupljanje (-, %); *S* – koeficijent skupljanja (-, %); V_0 – zapremina svežeg uzorka (cm^3); V_i – zapremina uzorka u posmatranom i-tom vremenskom trenutku (cm^3); ΔV - razlika zapremina.

U literaturi se mogu pronaći brojni matematički modeli koji opisuju skupljanje voća u zavisnosti od vlažnosti ili vremena sušenja. U tabeli (*tabela 2.2*) dato je nekoliko modela. Najveći broj modela ukazuje na lineranu zavisnost između vlažnosti voćnog tkiva i skupljanja.

Tabela 2.2. Matematički modeli koeficijenta skupljanja (S) i zapreminskog skupljanja (SV) tkiva voća tokom sušenja

R.br.	Model	Materijal (tehnika sušenja)	Referenca
1.	$SV\ (\%) = -\ 0{,}0005\tau^2 + 0{,}2421\tau + 0{,}0263$	četvrtine dunje (osmotsko)	*Babić et al., 2008*
2.	$S = 0{,}0927\omega^s + 0{,}07752$	kockice mrkve (konvektivno)	*Hatamipour i Mowla, 2002*
3.	$S = 0{,}0943 + 0{,}887\ \omega_i^s/\omega_0^s$	jagoda (mikrotalasno)	*Raghavan i Venkatachalapathy, 1999*
4.	$S = 0{,}2481 + 0{,}096\ \omega^s$	koluti jabuke (konvektivno)	*Moreira et al., 2000*

**SV* – zapreminsko skupljanje (%), *S* – koeficijent skupljanja (-), τ - vreme sušenja (min); ω_0^s, ω_i^s – vlažnost biljnog tkiva u odnosu na suvu bazu: sveže tkivo, u posmatranom i – tom vremenskom trenutku (kg_w/kg_{sm}).

2.4.3. Gustina

Gustina mezokarpa voća je fizička osobina koja definiše strukturu, kvalitet i difuzione osobine materijala tokom procesa sušenja. Ako se pretpostavi da je masa mezokarpa voća jednaka zbiru masa: suve materije, vode i gasa u kapilarama, mogu se definisati različite gustine (*Zogzas et al., 1994; Mitrevski, 2000; Rahman, 2009*):

Prividna gustina:

$$\rho_a = \frac{m_{sm} + m_w}{V_{sm} + V_w + V_v} \tag{2.7}$$

Stvarna gustina:

$$\rho = \frac{m_{sm} + m_w}{V_{sm} + V_w} \tag{2.8}$$

Gustina suve materije:

$$\rho_{sm} = \frac{m_{sm}}{V_{sm}} \tag{2.9}$$

gde je: ρ_a, ρ, ρ_{sm} - gustina tkiva: prividna, stvarna, suve materije (kg/m^3); m_w, m_{sm} – masa: vlage, suve materije (kg); V_{sm}, V_w, V_v.- zapremina: suve materije u tkivu, vlage u tkivu, vazduha u tkivu (m^3).

U tabeli (tabela *2.3*) date su vrednosti za stvarnu gustinu mezokarpa voća: kajsije, nektarine i kruške. U zavisnosti od vlažnosti materijala menja se stvarna gustina mezokarpa.

Tabela 2.3. Stvarna gustina mezokarpa voća u zavisnosti od vlažnosti

R.br.	Materijal (plod)	Stvarna gustina ρ [kg/m^3]		Temperatura t [^oC]		Vlažnost ω [kg/kg]		Referenca
		min	max	min	max	min	max	
1.	Kajsija	1003	1161	20	20	0,064	0,854	*Gezer et al., 2002*
2.	Nektarina	1044	1070	2	70	0,82	0,885	*Mujica et al., 2003*
3.	Kruška	1070	1460	28	60	0,120	0,870	*Fito et al., 2001*

U naučnim radovima *Krokida et al.*, (1997) i *Ramos et al*., (2003) grafički su prikazane zavisnosti stvarne gustine mezokarpa banane, jabuke, krompira, grožđa i mrkve od vlažnosti i primenjenog metoda sušenja. Primetna je izrazito nelinearna promena stvarne gustine sa promenom vlažnosti kod svih ispitivanih materijala i metoda sušenja.Vrednost stvarne gustine mezokarpa raste obrnuto proporcionalno sa smanjenjem vlažnosti tkiva. Autori *Phomkong,. et al.* (2006) izveli su empirijski model za predviđanje stvarne gustine mezokarpa nektarine tokom konvektivnog sušenja u zavisnosti od vlažnosti (jednačina 2.9).

$$\rho = 867 + 585 \cdot \left(\frac{\omega_i}{\omega_0} \right) - 411 \cdot \left(\frac{\omega_i}{\omega_0} \right)^2 \tag{2.9}$$

gde je: ρ - stvarna gustina mezokarpa (kg/m^3); ω_0, ω_i – vlažnost mezokarpa u odnosu na vlažnu bazu: na početku sušenja, u posmatranom i – tom vremenskom trenutku sušenja (kg_w/kg).

2.4.4. Kapilarnost mezokarpa voća

Kapilarnost mezokarpa voća (*Guine et al., 2006*) je definisana kao odnos ukupne zapremine pora ispunjenih vazduhom i ukupne zapremine mezokarpa. U radovima uobičajen naziv za ovako izraženu kapilarnost je prividna kapilarnost, jednačina (2.10).

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{sm}}{\rho} \tag{2.10}$$

gde je: ε - kapilarnost (-);ρ, ρ_{sm} - gustina tkiva: stvarna, suve materije (kg/m^3).

U tabeli 2.4 prikazane su izmerene vrednosti kapilarnosti za tkivo: kajsije, breskve i kruške u zavisnosti od vlažnosti tkiva.

Tabela 2.4. Kapilarnost mezokarpa voća u zavisnosti od vlažnosti

R.br.	Voćno tkivo	Kapilarnost ε [-]		Vlažnost tkiva ω [kg_w/kg]		Referenca
		min	max	min	max	
1.	Kajsija	0,022	0,557	0,064	0,854	*Fito et al., 2001*
2.	Breskva	0,046	0,091	0,820	0,885	*Mujica et al., 2003*
3.	Kruška	0,034	0,220	0,120	0,870	*Fito et al., 2001*

U naučnom radu *Guine et al.,* (*2006*) izmerena je zavisnost kapilarnosti mezokarpa kruške od vlažnosti tokom konvektivnog sušenja, kapilarnost se nelinearno snižavala sa sniženjem vlažnosti mezokarpa. Kapilarnost mezokarpa voća utiče na brzinu rehidracije, kapilarnija tkiva brže se rehidriraju. Takođe, kapilarnija tkiva imaju bolje strukturne osobine i teksturu (mekša su). Primenjen metod sušenja utiče na kapilarnost, konvektivno sušeno voće ima manju poroznost u poređenju sa voćem sušeno: liofilizacijom, mikrotalasnim sušenjem i vakuum sušenjem (*Ramos et al., 2003*). U literaturi se mogu pronaći brojni empirijski modeli koji modeluju kapilarnost mezokarpa voća u zavisnosti od vlažnosti (*Rahman, 2009*).

2.4.5. Površina razmene

Poznavanje površine razemne je neophodno u svim slučajevima kada se analiziraju transporti toplote i materije. Određivanje površine mezokarpa voća u obliku celog ploda ili dela ploda (polutka, četvrtina itd) je komplikovano zbog nepravilnog geometrijskog oblika.

U radu *Babić et al.* (*2009*) prezentovan je matematički model (jednačina 2.11) za izračunavanje površine polutki kajsije sorte „*Novosadska rodna*“ poznavanjem samo jedne dimenzije – širine ploda. Kao osnovu autori su iskoristili matematički model za izračunavanje površine polovine ploda kajsije na osnovu poznavanja triju karakterističnih dimenzija. Matematički model je rađen na osnovu merenja sve tri dimenzije ploda. Dužina, širina i debljina uzorka od 30 komada kajsije sorte ”*Novosadska rodna*” su izmerene ručno pomoću pomičnog merila. Takođe je obavljeno merenje površine 5 komada kontrolnih plodova kajsije, kao i jezgra metodom uskih nalepljenih traka sa milimetarskom mrežom. Korelacionom matricom je potvrđena zavisnost između širine ploda i ostale dve dimenzije. Ova zavisnost je iskorišćena za kreiranje novog matematičkog modela. Greška u proceni površine polutke kajsije u slučaju novog matematičkog modela je 4,8% u odnosu na metod nalepljenih traka. Prednost novog modela je u jednostavnosti, naime za izračunavanje površine polutke ploda potrebno je poznavati – izmeriti samo jednu dimenziju i to širinu.

$$F = \frac{\pi}{2}\cdot\left[\begin{array}{l}\left(63645\cdot B_{pl}^{2} + 6957{,}95\cdot B_{pl}^{3} + 543{,}036\cdot B_{pl}^{4} + 13{,}4206\cdot B_{pl}^{5} + 0{,}122568\cdot B_{pl}^{6}\right)^{\frac{1}{3}} \\ +\left(1{,}4485\cdot 10^{6} + 226664\cdot B_{pl} + 11747{,}9\cdot B_{pl}^{2} + 225{,}404\cdot B_{pl}^{3} + 1{,}43249\cdot B_{pl}^{4}\right) \\ -58{,}9977 + 4{,}94435\cdot B_{pl} + 0{,}23543\cdot B_{pl}^{2}\end{array}\right] \tag{2.11}$$

gde je: F – površina polutke kajsije (cm^2), B_{pl} – širina ploda (mm).

Matematički modeli za izračunavanje površine jedne četvrtine kruške sorte „*William“* bez semene kućice prikazan je u radu *Babić et al.* (*2011*). Autori su razvili zasebne matematičke modele za izračunavanje: površine cele kruške, površine semene lože i površine rezanja (površina koja nastaje sečenjem celog ploda na četvrtine). Sva tri modela koriste najveću dimenziju ploda – dužinu za izračunavanje površine u intervalu od 0 do 84,3 mm. Objedinjavanjem rezultata modela u jednačinu 2.12 izračunava se tražena površina.

$$F_{\check{c}etvrtina} = \frac{1}{4}\left[F_{cela\ kruška} + F_{semena\ loža}\right] + 2\cdot F_{rezanja} \tag{2.12}$$

gde je: F – površina (mm^2).

2.5. Teromfizičke osobine voća

Termofizičke osobine materijala spadaju u grupu osobina koje dominantno utiču na proces sušenja. Poznavanje ovih osobina je od velikog značaja za matematičko modelovanje i optimizaciju procesa sušenja koji obuhvataju zagrevanje ili hlađenje materijala (*Rahman, 2009)*. Termofizičke osobine svih kapilarno-porozno koloidnih materijala dele se na dve grupe, osobine od kojih zavisi prenos toplote i osobine od kojih zavisi prenos vlage.

Procesi prenosa toplote zavise uglavnom od:

- specifične toplote, c_p (kJ/kgK);
- koeficijenta temperaturne provodnosti, a_t (m^2/s);
- koeficijenta toplotne provodnosti, λ (W/mK),

dok su osobenosti procesa prenosa vlage određene:

- koeficijentom difuzije vlage, D_{ew}, (m^2/s);
- termogradijentnim koeficijentom, δ (kg/kgK).

Pored navedenih osobina, koje su značajne za transport vlage tokom liofilizacije, konvektivnog i vakuum sušenja, za osmotsko sušenje karakteristična je osobina:

- koeficijent difuzije rastvorka, D_{es}, (m^2/s)

Svi napred nabrojani koeficijenti su u opštem slučaju funkcije temperature, vlažnosti i strukture voća. Njihove vrednosti mogu se dobiti eksperimentalnim putem, a rezultati eksperimenata se prikazuju analitički, tabelarno ili grafički.

Objavljen je značajan broj naučnih radova gde su prikazani različiti metodi merenja termofizičkih karakteristika voća, kao i rezultati merenja (*Rahman, 2009*). Međutim, do danas nisu standardizovane metode koje se sa uspehom mogu koristiti pri određivanju termofizičkih karakteristika vlažnih koloidno kapilarnih-poroznih tela. Bitno je napomenuti da složena struktura voćnog tkiva, kao i složen karakter procesa prenosa toplote, usko povezan sa procesima prenosa vlage i rastvorka (osmotsko sušenje), dovodi do toga da za voćno tkivo istih osobina autori dobijaju različite vrednosti termofizičkih veličina, kao i različit karakter zavisnosti istih od temperature i vlažnosti tkiva.

2.5.1. Specifična toplota

Saglasno uslovnoj podeli vlažnog materijala na suvi deo (suvi skelet) i vlagu, i specifična toplota vlažnog materijala može se tretirati kao aditivna osobina. Određuje se kao aditivna veličina specifične toplote suve materije i specifične toplote vlage. Specifična toplota svedena na 1 kg vlažnog materijala može se izračunati na osnovu jednačine (2.13).

$$c_p = (1-\omega)\cdot c_{sm} + \omega \cdot c_w \tag{2.13}$$

gde je: c_p, c_{sm}, c_w – specifična toplota: vlažnog materijala, suve materije, vlage (kJ/kgK); ω - vlažnost materijala u odnosu na vlažnu bazu (kg_w/kg).

U tabeli (*tabela 2.5*) date su vrednosti specifične toplote za neke voćne vrste u zavisnosti od vlažnosti dobijene laboratorijskim merenjem. Sa porastom vlažnosti materijala raste vrednost specifične toplote.

Tabela 2.5. Specifična toplota za neke vrste voća u zavisnosti od vlažnosti mezokarpa

R.br.	Voće	Vlažnost ω [kg_w/kg]	Specifična toplota c_p [J/kgK]	Referenca
1.	Višnja sveža	0,84-0,90	3724 - 4100	*Ordinanz, 1996*
2.	Višnja suva	0,30	2134	*Ordinanz, 1996*
3.	Šljiva sveža	0,75 – 0,78	3514	*Ordinanz, 1996*
4.	Šljiva suva	28 - 35	2218 - 2469	*Ordinanz, 1996*

Na osnovu rezultata laboratorijskih merenja istraživači pokušavaju da matematičkim uobličavanjem rezultata dobiju upotrebljiv empirijski model. U literaturi je prisutan veliki broj modela koji za svaku vrstu hrane opisuje vrednost specifične toplote u zavisnosti od temperature i vlažnosti materijala (*Ramaswamy i Tung, 1981; Niesteruk, 1996, Singh et al., 1997*). *Heldman i Singh* (1981) predložili su univerzalni matematički model (jednačina 2.14) za izračunavanje specifične toplote prehrambenih materijala koristeći masene udele komponenti: ugljenih hidrata, proteina, masti i pepela na 20°C (*Heldman, D., R., 2002*).

$$c_p = 1424 \cdot m_{ugljohidrat} + 1549 \cdot m_{proteina} + 1675 \cdot m_{masti} + 837 \cdot m_{pepla} + 4187 \cdot m_{vode} \quad (2.14)$$

gde je: c_p – specifična toplota vlažnog materijala (kJ/kgK); $m_{ugljohidrat}$, $m_{proteina}$, m_{masti}, m_{pepela}, m_{vode} – maseni udeo: ugljenih hidrata, proteina, masti, pepela i vode (kg/kg_{sm}).

2.5.2. Koeficijent toplotne i temperaturne provodljivosti

Toplotna provodljivost vlažnih materijala je znatno veća od toplotne provodljivosti suvog materijala. Vlaga koja se nalazi u vlažnom materijalu ima znatno veću toplotnu provodljivost od vazduha koji se nalazi u porama suvog materijala. Toplotna provodljivost u biljnom tkivu zavisi od toplotne provodljivosti čvrstog skeleta, toplotne provodljivosti vlage (vode i vodene pare), poroznosti tkiva, provodljivosti vazduha, ukoliko se nalazi zarobljen u porama. Promena temperature i vlažnosti voća tokom sušenja i stalna fazna transformacija koja se dešava tokom procesa sušenja izazivaju stalnu promenu toplotne provodljivosti (*Nedeljkov i Stakić, 1994; Babić i Babić, 2000*).

$$\lambda = f\left(\rho,\ sastav\ materijala,\ \omega,\ t\right) \quad (2.15)$$

gde je: λ - koeficijent provođenja toplote (W/mK); ρ - gustina voća (kg/m^3); ω - vlažnost voća (kg_w/kg), t_m – temperatura voća (°C).

Veliki broj izmerenih vrednosti za koeficijent toplotne provodljivosti za različite prehrambene materijale je prisutan u literaturi, u tabeli (*tabela 2.6*) date su vrednosti mezokarp: kruške, nektarine, breskve i jagode.

Tabela 2.6. Koeficijent toplotne provodljivosti za neke vrste voća u zavisnosti od vlažnosti, sopstvene gustine i temperature mezokarpa

R.br.	Voće	Vlažnost ω [kg/kg]	Sopstvena gustina ρ [kg/m^3]	Temperatura t [°C]	Koeficijent toplotne provodljivosti λ [W/mK]	Referenca
1.	Kruška	0,868	1000	28	0,595	*Liang et al, 1999.*
2.	Nektarina	0,898	990	28	0,585	*Sweat, 1974.*
3.	Breskva	0,860	1012	28	0,580	*Phomkong et al., 2006.*
4.	Jagoda	0,888	900	28	0,462	*Sweat, 1974.*

Mattea et al. (1989, 1986) izveli su empirijske modele za izračunavanje koeficijenta toplotne provodljivosti za mezokarp kruške tokom konvektivnog sušenja na lesama u zavisnosti od vlažnosti (jednačine 2.16 i 2.17).

$$\lambda = 0{,}5963 - \frac{0{,}1931}{\omega^s} + \frac{0{,}0301}{\omega^{s2}} \tag{2.16}$$

$$\lambda = 0{,}513 - 0{,}301 \cdot \left[\exp\left(-1{,}107\omega^s\right)\right] \tag{2.17}$$

gde je: λ - koeficijent provođenja toplote (W/mK); ω^s - vlažnost mezokarpa u odnosu na suvu bazu (kg_w/kg_{sm}).

Koeficijent temperaturne provodljivosti je veličina koja je upravno proporcionalna koeficijentu provođenja toplote, a obrnuto proporcionalna srednjoj specifičnoj toploti i gustini materijala (*Babić i Babić, 2000; Rahman, 2009*):

$$a_t = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \tag{2.18}$$

gde je: a_t – koeficijent temperaturne provodljivosti (m^2/s); λ - koeficijent provođenja toplote (W/mK); c_p – specifična toplota vlažnog materijala (kJ/kgK); ρ - gustina tkiva (kg/m^3).

U tabeli (*tabela 2.7*) date su vrednosti za koeficijent temperaturne provodljivosti u zavisnosti od vlažnosti i temperature materijala za mezokarp: jabuke, breskve, jagode i višnje.

Tabela 2.7. Koeficijent temperaturne provodljivosti za neke vrste voća u zavisnosti od vlažnosti tkiva i temperature mezokarpa

R.br.	Voće	Vlažnost ω [kg_w/kg]	Temperatura t [^oC]	Koeficijent toplotne provodljivosti a_t [m^2/s]	Referenca
1.	Jabuka	0,85	30	$1{,}37 \cdot 10^{-7}$	*Singh, 1982*
2.	Breskva	-	27	$1{,}39 \cdot 10^{-7}$	*Gaffney, et al., 1980*
3.	Jagoda	0,92	5	$1{,}27 \cdot 10^{-7}$	*Gaffney, et al., 1980*
4.	Višnja	-	30	$1{,}32 \cdot 10^{-7}$	*Gaffney, et al., 1980*

2.5.3. Koeficijenti provođenja vlage i rastvorka - difuzivnost

Koeficijent difuzije je jedan od najvažnijih parametara za analizu i optimizaciju procesa sušenja voća. Za sve tehnike sušenja karakterističan je koeficijent difuzije vode (D_{ew}), a kod osmotskog sušenja prisutan je i koeficijent difuzije rastvorka (D_{es}). S obzirom da je u naučnim radovima iz kinetike sušenja voća dosta prisutan, biće mu poklonjena nešto veća pažnja.

Koeficijent difuzije je količina materije transportovana u jedinici vremena kroz jedinicu površine (upravne na pravac transporta), pri jediničnom padu koncentracije posmatrane komponente po jedinici dužine puta u pravcu difuzije. Koeficijent difuzije vlage (D_{ew}) je kompleksna veličina koja je u funkciji temperature i vlažnosti materijala. Pored ovih veličina na koeficijent utiču i hemijski sastav materijala, struktura materijala, energija veze, mehanizam

prenosa vlage (tečna difuzija, parna difuzija, kapilarni protok). Zbog toga je veoma teško utvrditi makar i približnu analitičku vezu koja bi važila u širem intervalu promene temperature i vlažnosti materijala. Zbog teškoća koje prate određivanje koeficijenta difuzije, intervali u kojima važe izrazi ili vrednosti su vrlo uski i merodavni su samo za neku određenu temperaturu ili vlažnost biomaterijala (*Babić i Babić, 2011, Pavkov, 2012*).

$$D_{ew} = f\left(\omega,\ t,\ E_a,\ mehanizam\ \ prenosa\ \ vlage,\ \ sastav\ \ tkiva\right) \tag{2.19}$$

gde je: D_{ew} – koeficijent difuzije vlage (m^2/s); ω - vlažnost materijala (kg_w/kg); t_m – temperatura materijala (^oC); *Ea* – energija veze vlage i suve materije (kJ/mol).

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

Za ocenjivanje uticaja parametara procesa sušenja na brzinu prenosa mase čest pristup u naučnoj literaturi je izračunavnje koeficijenata difuzije vlage ili rastvorka (osmotsko sušenje) na osnovu drugog *Fick* - ovog zakona, pri konstantnim procesnim uslovima. Na osnovu izračunatih koeficijenata difuzije vode čije se vrednosti za voće nalaze u opsegu od $10 \cdot 10^{-10}$ do $10 \cdot 10^{-8}$ m^2/s (*Pavkov et al.; 2016, 2017, 2018, 2021*) i difuzije rastvorka, od $10 \cdot 10^{-12}$ do $10 \cdot 10^{-11}$ m/s^2; (*Pavkov et al.; 2016, 2017, 2018, 2021*) ocenjuje se uticaj parametara procesa na brzinu prenosa mase. Danas postoje razvijeni softveri (*Table Curve*) koji na osnovu eksperimentalnih podataka promene vlažnosti i povećanja suve materije tokom trajanja procesa sušenja izračunavaju koeficijente $D_{ew\ i}$ D_{es}. Sam metod izračunavanja se ne sreće u literaturi, u nastavku teksta posvetiće se pažnja objašnjenju metoda izračunavanja pomenutih koeficijenata.

Engleski naučnik *John Crank* (1975) je rešavanjem diferencijalne jednačine drugog reda koja opisuje *Fick* - ov drugi zakon za geometrijska tela pravilnog oblika (sfera, cilindar, beskrajna ravna ploča, kocka, pravougaonik, paralelopiped) izveo analitičke izraze za difuziju. Izvedeni izrazi se koriste za izračunavanje koeficijenata difuzije molekula vode (D_{ew}) i rastvorka (D_{es}). Crank (1975) definiše različite jednačine za sisteme materijal - radni fluid u kojima ne dolazi do promene potencijala prenosa vlage i temperature na graničnoj površini razmene, konvektivno sušenje, sušenje u vakuumu i liofilizacija i za sisteme materijal - radni fluid gde dolazi do promene potencijala prenosa toplote i mase u sistemima zbog ograničene količine radnog fluida, osmotsko sušenje. U izvedenim modelima uvdeno je nekoliko pojednostavljenja, početnih i graničnih uslova koji se odnose na proces sušenja. Oblik pripremljenog voća izjednačava se sa pravilnim geometrijskim telima, bez obzira na njegovo odstupanje. Pa tako, borovnica, grožđe i malina izjednačavaju se sa sferom ekvivalentnog prečnika, voće sečeno na listiće sa beskrajno ravnom pločom poznate debljine, voće sečeno na pravougani oblik sa kockom, pravougaonikom ili paralopipedom poznatih diemzija stranica itd. U izvođenju jednačina zanemarena je promena početnih dimenzija i zapremine komada voća tokom sušenja. Dimenzije i zapremina voća se u procesima sušenja menjanju u pravcu smanjenja, osim u slučaju liofilizacije gde se promene mogu zanemariti. Polje vlažnosti materijala i polje temperature unutar zapremine smatraju se konstantnim vrednostima. Koeficijent difuzije vlage ili rastvorka tokom procesa sušenja ima pravac normalan na površinu razmene ili radijalan, što zavisi od posmatranog oblika materijala

koji se suši. Uvedena pojednastavljenja, početni i granični uslovi odstupaju od stvarnog stanja u toku procesa sušenja i prouzrokuju određenu grešku pri izračunavanju koeficijenta difuzije vlage i rastvorka u realnim procesima sušenja. Odstupanje proračunskih vrednosti od stvarnih, raste sa povećanjem vrednosti parametara procesa sušenja (temperatura radnog fluida, brzina radnog fluida, pritisak radnog fluida, dimenzije i zapremina pripremljenog voća za sušenje) (Crank, 1975).

Na primeru pripremljnog voća za sušenje u obliku sfere poluprečnika (r), objasniće se princip određivanja koeficijenta difuzije vlage za konvektivno sušenje, sušenje u vakuumu i liofilizaciju gde se smatra da ne dolazi do promene potencijala prenosa prenosa vlage i temperature na graničnoj površini razmene, odnosno da je radni medijum neograničene zapremine. U literaturnim navodima Crankova rešenja jednačina za difuziju vlage kroz materijal najčešće se primenjuju posmatrajući vlažnost materijala kao bezdimenzionalnu veličinu MR (moisture ratio). Veličina MR predstavlja koeficijent udaljenosti vlažnosti materijala od zadate krajnje ili ravnotežne vlažnosti materijala, računa se pomoću jednačine:

$$MR = \frac{\omega_\tau^s - \omega_{eq}^s}{\omega_o^s - \omega_{eq}^s} \tag{2.20}$$

gde je: ω_0^s - početna vlažnost materijala izražena u odnosu na suvu bazu (kg_w/kg_{sm}), ω_τ^s - vlažnost materijala u vremenskom trenutku τ izražena u odnosu na suvu bazu (kg_w/kg_{sm}), ω_{eq}^s – ravnotežna vlažnost materijala ili krajnja zadata vlažnost izražena u odnosu na suvu bazu (kg_w/kg_{sm}), τ - vreme sušenja (h, min, s).

Crank-ov predloženi model za izračunavanje koeficijenta difuzije molekula vode kroz materijal o obliku sfere (Pavkov, 2021):

$$MR = \frac{\omega_\tau^s - \omega_{eq}^s}{\omega_o^s - \omega_{eq}^s} = \frac{6}{\pi^2}\sum_{i=1}^{\infty}\frac{1}{i^2}\cdot exp\left(-\frac{i^2\pi^2 D_{ew}\tau}{r^2}\right) \tag{2.21}$$

gde je: D_{ew} – koeficijent difuzije vlage (m^2/s), τ - vreme sušenja (s), r – poluprečnik sfere (m), i – broj izmerenih podataka.

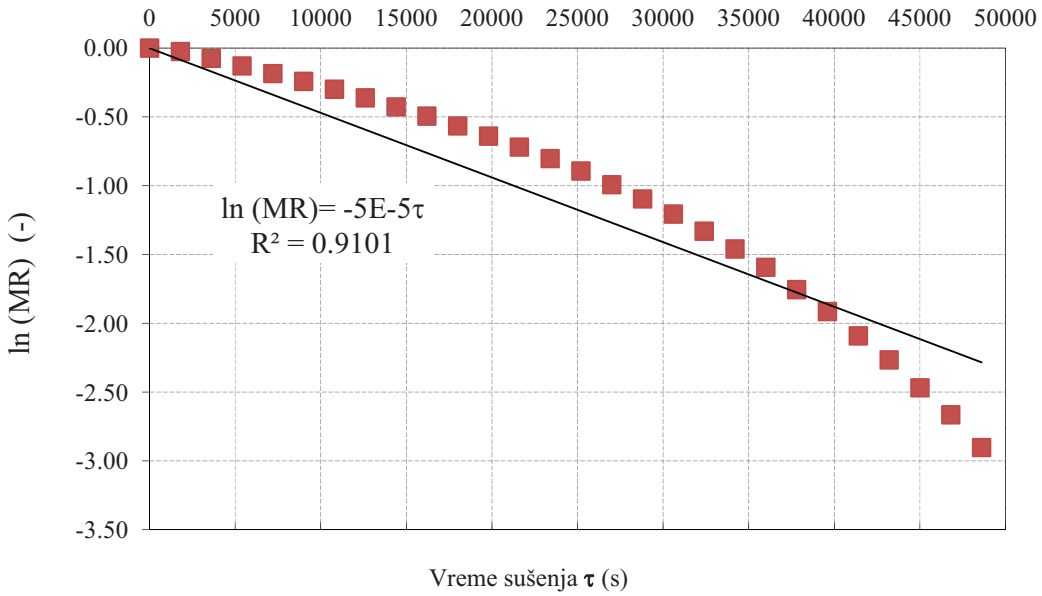
Za procese sušenja koji traju duže od 60 minuta, uz uvažavanje početnih i graničnih uslova, jednačina 2.21 može se napisati u logaritamskom obliku (jednačina 2.22):

$$ln(MR) = ln\left(\frac{\omega_\tau^s - \omega_{eq}^s}{\omega_o^s - \omega_{eq}^s}\right) = ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{ew}}{r^2}\right)\cdot\tau \tag{2.22}$$

Član $\ln(6/\pi^2)$ jednak je vrednosti koeficijenta koji određuje odsečak na ordinatnoj osi, a član ($\pi^2 D_{ew}/r^2$) jednak je vrednosti koeficijenta pravca polinoma fukcije ln(MR) = f(τ). Crtanjem rezultata u kordinatnom sistemu *ln(MR) - τ* određuje se jednačina prave u obliku polinoma koja sa najvećim koeficijentom determinacije aproksimira tačke na dijagramima, koeficijent prave (K_{MR}) koristi se u računanju koeficijenta difuzije D_{ew} molekula vlage pomoću jednačine (2.23):

$$K_{MR} = \frac{\pi^2 \cdot D_{ew}}{r^2} \rightarrow D_{ew} = \frac{K_{MR}\cdot r^2}{\pi^2} \tag{2.23}$$

Primer izračunavanja koeficijenta pravca polinoma (K_{MR} = -5 x 10^{-5}) pomoću dijagrama ln(MR) = f(τ) dat je na slici (2.3). Uvrštavanjem vrednosti poluprečnika plodova u jednačinu 2.23 i vrednosti π izračuva se vrednost koeficijenta difuzije vlage.



Slika 2.3. Linearan oblik vrednosti bezdimenzione vlažnosti u funkciji vremena konvektivnog sušenja borovnice temperature 70°C i brzine vazduha 1.5 m/s (Pavkov et al., 2017)

Jednačina za izračunavanje koeficijenta difuzije vlage u obliku sfere prihvaćena je kao pogodna za malinu (*Pavkov et al., 2017, 2019*), borovnicu (*Pavkov et al., 2017*), kajsiju u obliku polutke (*Pavkov, et al., 2021*).

U tabeli (tab. 2.8) prikazani su koeficijenti difuzije vlage pri konvektivnom sušenju borovnice za različite parmetre procesa, temperatura vazduha (60, 70, 80°C) i brzina strujanja vazduha (0,5 i 1,5 m/s). Sa porastom vrednosti parametara procesa sušenja raste i vrednost koeficijenta difuzije D_{ew}

Tabela 2.8. Koeficijent difuzije vlage (D_{ew}) pri konvektivnom sušenju borovnice (Pavkov et al., 2017)

Temperatura vazduha (°C)	Brzina vazduha (m/s)	D_{ew} (m^2/s)	R^2
60	0,5	$9,67 \times 10^{-12}$	0,997
	1,5	$1,45 \times 10^{-11}$	0,996
70	0,5	$3,38 \times 10^{-11}$	0,998
	1,5	$3,87 \times 10^{-11}$	0,998
80	0,5	$4,83 \times 10^{-11}$	0,998
	1,5	$9,67 \times 10^{-11}$	0,998

S obzirom da *Fick* - ov model podrazumeva materijal oblika savršene sfere, u naučnim radovima umesto poluprečnika sfere koristi se ekvivalentni prečnik, koji je po definiciji jednak prečniku sfere koja ima identičnu zapreminu kao oblik pripremljenog voća koji se koristi u eksperimentu (*Fang et al., 2009*).

Za voće sečeno na tanke listiće, diskove ili za sušenje voćne pulpe upotrebljava se jednačina za izračunavanje koeficijenta difuzije vlage za oblik beskonačne ravne ploče (jednačinom 2.24) (*Stamenković, 2019b*):

$$MR = \frac{\omega_\tau^s - \omega_{eq}^s}{\omega_o^s - \omega_{eq}^s} = \frac{8}{\pi^2}\sum_{i=1}^{\infty}\frac{1}{(2i+1)^2}\cdot exp\left(-\frac{(2i+1)^2\pi^2 D_{ew}\tau}{4L^2}\right) \quad (2.24)$$

gde je: D_{ew} – koeficijent difuzije vlage (m^2/s), τ - vreme sušenja (s), L – polovina debljina materijala (m), i – broj izmerenih podataka.

Za procese sušenja koji traju duže od 60 minuta, uz uvažavanje početnih i graničnih uslova, jednačina 2.24 može se napisati u obliku logaritamskom obliku (jednačina 2.25):

$$ln(MR) = ln\left(\frac{\omega_\tau^s - \omega_{eq}^s}{\omega_o^s - \omega_{eq}^s}\right) = ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{ew}}{4L^2}\right)\cdot\tau \quad (2.25)$$

Linearan oblik funkcije ln(MR) = f(τ) sa koeficijentom prave K_{MR} omogućuje izračunavanje koeficijenta difuzije vlage prema jednačini (2.26):

$$K_{MR} = \frac{\pi^2\cdot D_{ew}}{4L^2} \rightarrow D_{ew} = \frac{K_{MR}\cdot 4L^2}{\pi^2} \quad (2.26)$$

Tokom osmotskog sušenja voća dolazi do dva suprotnosmerna difuziona prenosa mase, difuzije vlage iz voća u osmotski rastvor i difuzije rastvorka iz osmotskog rastvorka u voće. Polazna osnova za izračunavanje karakterističnih koeficijenata difuzije su rezultati merenja promene vlažnosti i povećanje suve materije tokom osmotskog sušenja za konstantne uslove procesa (temperatura rastvora, koncentracija rastvora, brzina strujanja rastvora) pomoću kojih se izračunavaju gubitak vlage (WL, jednačina 2.25) i povećanje suve materije (SG, jednačina 2.28):

$$WL = \frac{m_0\omega_0^s - m_\tau\omega_0^s}{m_{s.m.(0)}} \quad (2.27)$$

$$SG = \frac{m_{s.m.(\tau)} - m_{s.m.(0)}}{m_{s.m.(0)}} \quad (2.28)$$

gde je: WL - gubitak vlage izražen u odnosu na suvu materiju (kg_w/kg_{sm}), SG - povećanje suve materije u odnosu na inicijalnu suvu materiju (kg_{sm}/kg_{ism}); i_{sm} – inicijalna (početna) suva meterija, ω_0^s - početna vlažnost izražena u odnosu na suvu materiju (kg_w/kg_{sm}), ω_τ^s - vlažnost izražena u odnosu na suvu materiju (kg_w/kg_{sm}) u vremenu τ trajanja procesa, $m_{s.m.(0)}$ - početna masa suve materije (kg_{sm}), $m_{s.m.(\tau)}$ - masa suve materije (kg_{sm}) u vremenu τ trajanja procesa, m_0 - početna masa uzorka (kg), m_τ - masa uzorka (kg) u vremenu τ trajanja procesa.

Na osnovu izračunatih vrednosti WL i SG izračunavaju se bezdimenzionalne veličine koje čine levu stranu jednačine drugog Fickovog zakona za difuziju vlage i rastvorka (Crank, 1975):

$$\frac{WL}{WL_{eq}} = 1 - \sum_{i=1}^{\infty} C_i\cdot exp\left(\frac{-q_i^2\cdot D_{ew}\tau}{r^2}\right) \quad (2.29)$$

$$\frac{SG}{SG_{eq}} = 1 - \sum_{i=1}^{\infty} C_i\cdot exp\left(\frac{-q_i^2\cdot D_{es}\tau}{r^2}\right) \quad (2.30)$$

$$C_i = \frac{6\alpha(\alpha+1)}{9+9\alpha+q_n^2\alpha^2} \quad (2.31)$$

$$tanq_n = \frac{3q_n}{3+\alpha q_n^2} \quad (2.32)$$

gde je: WL_{eq} – ravnotežna vlažnost (kg_w/kg_{sm}), SG_{eq}- ravnotežno stanje povećanja suve materije (kg_{sm}/kg_{ism}), r –poluprečnik sfere (m), D_{ew} – koeficijent difuzije vlage (m^2/s), D_{es} – koeficijent difuzije rastvorka (m^2/s), α - odnos zapremina osmotskog rastvora/zapremina sfera. Vrednosti WL_{eq} i SG_{eq} određuju se eksperimentalno.

Za difuziju u geometrijskim oblicima sfere, Furijerov broj $D_e\tau /r^2$ je veći od vrednosti 0,1 samo prvi izvod jednačina (2.29) i (2.30) je značajan ostali izvodi se mogu zanemariti, pa se jednačine svode na (*Pavkov et al., 2021*):

$$-Ln\left(\frac{1-\left(\frac{WL}{WL_{eq}}\right)}{C_1}\right) = q_1^2\left(\frac{-q_i^2 \cdot D_{ew}\tau}{r^2}\right) \tag{2.33}$$

$$-Ln\left(\frac{1-\left(\frac{SG}{SG_{eq}}\right)}{C_1}\right) = q_1^2\left(\frac{-q_i^2 \cdot D_{es}\tau}{r^2}\right) \tag{2.34}$$

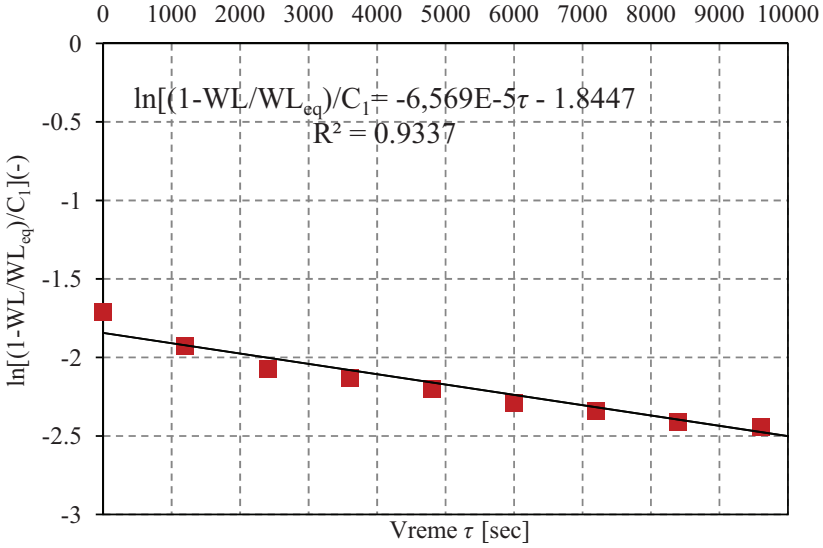
Za duže periode sušenja τ > 60 min, koeficijenti difuzije vlage i rastvorka se crtaju u kordinatnom sistemu - $\ln[(1\text{-}WL/WL_{eq})/C_1] = f(\tau)$ i $-\ln[(1\text{-}SG/SG_{eq})/C_1] = f(\tau)$. Pronalazi se jednačina prave u obliku polinoma koja sa najvećim koeficijentom determinacije aproksimira tačke na nacrtanim dijagramima. Na osnovu izračunatih koeficijenata pravca polinoma K_{WL} i K_{SG}, izračunavaju se koeficijenti difuzije K_{WL} i K_{SG}:

$$K_{WL} = \frac{-q_i^2 \cdot D_{ew}}{r^2} \rightarrow D_{ew} = \frac{-K_{WL} \cdot r^2}{q_i^2} \tag{2.35}$$

$$K_{SG} = \frac{-q_i^2 \cdot D_{es}}{r^2} \rightarrow D_{es} = \frac{-K_{SG} \cdot r^2}{q_i^2} \tag{2.36}$$

gde je: $q_i = 1.6385$

Primer funkcija - $\ln[(1\text{-}WL/WL_{eq})/C_1] = f(\tau)$prikazan je na slici 2.4, gde funkcija ima oblik - $\ln[(1\text{-}WL/WL_{eq})/C_1] = -6{,}569 \times 10^{-5}\ \tau$ (K_{WL}= $-6{,}569 \times 10^{-5}$). Uvrštavanjem vrednosti poluprečnika plodova u jednačinu 2.25 i vrednosti q_i izračuva se vrednost koeficijenta difuzije vlage tokom osmotskog sušenja za date parametre procesa.



Slika 2.4. Linearan oblik vrednosti gubitka vlage u funkciji vremena osmotskog sušenja poluke kajsije za temperaturu rastvora 40°C i koncentraciju rastvora 50°Bx (Pavkov et al., 2021)

U tabeli (tab. 2.9) prikazani su koeficijenti difuzije vlage (D_{ew}) i koeficijent difuzije rastvorka (D_{es}) pri osmotskom sušenju polutki kajsija za različite parmetre procesa, temperatura osmotskog rastvora (40, 60°C) i koncentracija osmotskog rastvora (50 i 65°Bx) računatih preko jednačina od (2.29) do (2.36). Analizom tabelarnih vrednosti evidentno je da sa porastom vrednosti parametara procesa sušenja rastu i vrednost koeficijenta difuzije vlage D_{ew} i rastvorka $D_{es,}$ odnosno intezivira se proces.

Tabela 2.9. Koeficijent difuzije vlage (D_{ew}) i rastvorka (D_{es}) pri osmotskom sušenju polutki kajsije (Pavkov, et al., 2021)

Temperatura rastvora t (°C)	Koncentracija rastvora C (oBx)	D_{ew} (m^2/s)	R^2	WL_{eq} (kg H_20/kg d.m.)	D_{es} (m^2/s)	R^2	SG_{eq} (kg d.m./kg i.d.m.)
40	50	$2{,}053 \times 10^{-10}$	0,9337	7,11±0,17	$3{,}103 \times 10^{-11}$	0,9165	0,476±0,051
	65	$2{,}339 \times 10^{-10}$	0,9675	7,75±0,36	$3{,}805 \times 10^{-11}$	0,9527	0,593±0,036
60	50	$2{,}560 \times 10^{-10}$	0,9144	7,47±0,21	$4{,}097 \times 10^{-11}$	0,9131	0,562±0,017
	65	$2{,}811 \times 10^{-10}$	0,9183	7,93±0,14	$4{,}236 \times 10^{-11}$	0,8831	0,783±0,044

U naučnim radovima za ocenu kinetike prenosa mase tokom sušenja voća u zavisnosti od parametara procesa često se koristi termin efektivna difuzivnost (*Park et al., 2002a,b; Singh i Gupta 2007; Toğrul, 2010; Toğrul i İspir, 2007; Kingsly et al., 2007*). S obzirom da je koeficijent difuzije vode i rastvorka promenljiv tokom vremena sušenja, efektivna difuzivnost je vrednost difuzivnosti posmatrane komponente koje se odnose na neku usrednjenu vrednost.

Kada postoje različiti mehanizmi i faktori koji utiču na proces, kao što je slučaj kod sušenja, teško je izdvojiti pojedinačne efekte na određeno svojstvo prenosa. Iz tog razloga rasprostranjen je takav pristup da se brzina unutrašnjeg prenosa vlage opisuje upotrebom efektivne difuzivnosti bez obzira na mehanizme koji su stvarno uključeni. Efektivna difuzivnost na taj način predstavlja smešu uticaja različitih pogonskih sila koje utiču na prenos vlage. Takođe se uviđa da efektivnu difuzivnost vlage ne treba posmatrati kao svojstvo materijala koji se suši, a umesto toga se preporučuje njeno posmatranje u svetlu svojstva parametara procesa koji kontrolišu kinetiku sušenja.

U tabeli (*tabela 2.10*) su date vrednosti za koeficijent difuzije molekula vode tokom konvektivnog sušenja kruške u obliku kocke zapremine 1 cm^3. Vrednosti su date za eksperimente sa osmotskim predtretmanom i bez osmotskog predtretmana pri različitim temperaturama vazduha i brzinama vazduha za sušenje ispred sloja materijala (*Park et al., 2002a*).

Tabela 2.10. Vrednosti koeficijenta difuzije vlage za tkivo kruške u obliku kockice za različite parametre konvektivnog sušenja (*Park et al., 2002a*)

Temperatura vazduha t [°C]	Brzina vazduha *v* [m/s]	Koeficijent difuzije vlage (bez osmotkog predtretmana) D_{ew} [m^2/s]	Koeficijent difuzije vlage (sa osmotskim predtretmanom) D_{ew} [m^2/s]
40	1,0	$2{,}06 \cdot 10^{-10}$	$1{,}87 \cdot 10^{-10}$
	2,0	$1{,}59 \cdot 10^{-10}$	$2{,}31 \cdot 10^{-10}$
60	1,0	$4{,}01 \cdot 10^{-10}$	$2{,}72 \cdot 10^{-10}$
	2,0	$3{,}18 \cdot 10^{-10}$	$4{,}34 \cdot 10^{-10}$
80	1,0	$7{,}64 \cdot 10^{-10}$	$5{,}58 \cdot 10^{-10}$
	2,0	$6{,}37 \cdot 10^{-10}$	$8{,}12 \cdot 10^{-10}$

2.5.4. Energija veze vlage i suve materije - energija aktivacije

Prema opštoj definiciji Židko (*1982*) energija veze vlage i suve materije je uložena energija ili izotermni rad koji je iskorišćen za premeštanje jednog mola pare na rastojanju od jednog angsterma (1A = 10^{-10} m) (*Babić, 2000; Valent, 2001*). Energija veze vlage sa suvom materijom određuje se iz izraza (*Židko, 1982*):

$$E_a = R \cdot T \cdot \frac{p_z}{p_m} = -R \cdot T \cdot \ln \varphi \qquad (2.37)$$

gde je: E_a - energija veze vlage i suve materije (J/mol); R - univerzalna gasna konstanta (J/molK); T – temperatura materijala (K); p_z – parcijalni pritisak zasićene vodene pare na liniji zasićenja vlažnog vazduha (Pa), p_m - parcijalni pritisak vodene pare na površini materijala (Pa); φ - relativna vlažnost vazduha (%).

Energija veze (E_a) predstavlja smanjenje slobodne energije za sušenje (R) pri konstantnoj temperaturi materijala (T), izraženo radom koji treba utrošiti da bi se 1 *mol* vode izdvojio iz materijala, bez promene faze i određuje se na osnovu izraza (2.37). Zbog vezivanja vode sa suvom materijom snižava se parcijalni pritisak zasićene vodene pare (p_z) na vrednost (p_m) uz odgovarajuće smanjenje slobodne energije. Veoma vlažan materijal u kontaktu sa okolinom, određene relativne vlažnosti (φ), sušiće se sve dok se ne postigne minimalna energija veze definisana jednačinom (2.37). Dalja difuzija vlage moguća je samo uz dodatno sniženje relativne vlažnosti okoline. Vrednost parcijalnog pritiska vodene pare na površini materijala (p_m) zavisi od vlažnosti materijala. Što je čvršća veza vlage sa materijalom, niža je vrednost parcijalnog pritiska vodene pare na površini materijala i obrnuto. Ukoliko je materijal veoma vlažan, tako da se u njemu nalazi slobodna voda, p_m ima vrednost p_z, relativna vlažnost φ = 1, a energija veze E_a = 0. Pri udaljavanju grube vlage (površinska vlaga) energija veze vlage je nula. Daljim sniženjem vlažnosti materijala koji se suši energija veze vlage raste, tako da energija veze monomolekularnog sloja adsorpciono vezane vlage ima značajnu vrednost *(Pavkov, 2012)*.

Toplota neophodna za isparavanje vode iz biljnog tkiva (r_m) je veća od potrebne toplote isparavanja slobodne vode (r_w). Prilikom isparavanja vode iz biljnog tkiva, sile međusobnih molekularnih veza (molekuli vode i suve materije biljnog tkiva) tako deluju da je potrebna dodatna energija da bi se pokrenulo isparavanje (*Katić, 1997*).

Energija fazne transformacije, odnosno količina toplote koju je potrebno utrošiti na isparavanje jedinične količine vezane vlage iz materijala koji se suši (r_m), jednaka je zbiru energije veze vlage (E_a) i energije fazne transformacije slobodne vode (r_w) uz ostale iste uslove (*Nedeljkov i Stakić, 1994*):

$$\boldsymbol{r_m = r_w + E_a} \qquad (2.38)$$

Vrednosti toplote isparavanja iz biljnog tkiva, na primeru zrna kukuruza u zavisnosti od vlažnosti zrna i njegove temperature sa poređenjem u odnosu na slobodnu vodu, tabelarno je prikazano (tabela 2.11).

Tabela 2.11. Vrednosti toplote isparavanja vode iz zrna kukuruza r_m [kJ/kg$_w$] *(Katić, 1997)*

Vlažnost zrna [%]	Temperatura zrna [^{o}C]		
	0	21	65
10	2937,13	2878,64	2736,59
12	2724,06	2686,45	2565,29
14	2602,89	2552,76	2439,95
15	2548,58	2516,24	2377,28
Slobodna voda (r_w)	2485,91	2437,45	2338,43

Analizom prikazane tabele evidentno je da sa porastom temperature i vlažnosti zrna snižava se vrednost toplote isparavanja. Razlike između potrebne količine toplote za isparavanje vode iz zrna i slobodne vode smanjuju se sa porastom temperature zrna. Ako se uzme u obzir da se zrno kukuruza suši do vlažnosti od 14% i uporede vrednosti r_m i r_w razlike su male. Energija veze vode i suve materije je zanemarljiva za vlažnosti materijala od početne do ravnotežne vlažnosti.

U naučnoj literaturi za energiju veze u upotrebi je termin energija aktivacije (*activaction energy*). Poznavanjem koeficijenta difuzije vlage, može se izračunati energija koja je dovedena molekulu vode u cilju prekidanja veze vlage i materijala i pokretanja mehanizma difuzije molekula vode u materijalu. Arrhenius-ova jednačina (2.39) povezuje energiju aktivacije sa koeficijentom difuzije vlage i temperaturom materijala koji se suši (*Domaz, 2009; Toğrul i Pehlivan, 2003; Kingsly et al., 2007; Singh i Gupta, 2007; Simal et al., 2005*).

Energija aktivacije je promenljiva tokom sušenja, kao i koeficijent difuzije vlage, njen proračun se odnosi na usrednjenu vrednost ove veličine tokom procesa sušenja, prema jednačini:

$$D_{ew} = D_0 \cdot \exp\left[-\frac{E_a}{RT}\right] \tag{2.39}$$

gde je: D_{ew}, – koeficijent difuzije vlage (m^2/s); D_0 – Arrhenijusov faktor (m^2/s); *Ea* – energija aktivacije (J/mol); R – univerzalna gasna konstanta (J/molK); T – temperatura materijala (K).

Istom metodom kao kod koeficijenata difuzije vlage, jednačina (2.39) se u logaritanskom obliku može izraziti preko jednačine (2.40). Crtanjem dijagrama u kordinatnom sistemu ln(D_{ew}) – 1/T, pronalazi se polinom koji najbolje aproksimira tačke na dijagramu. Vrednost koeficijenta pravca polinoma jednaka je vrednosti člana jednačine (-E_a/R), a vrednost člana polinoma koji predstavlja odsečak na osi jednaka je članu jednačine (lnD_0). Na ovaj način jednačina (2.40) postaje jednačina sa jednom nepoznatom (E_a).

$$\ln(D_{ew}) = \ln(D_0) + \left(-\frac{E_a}{R}\right) \cdot \frac{1}{T} \tag{2.40}$$

U tabeli (*tabela 2.12*) date su vrednosti za energiju aktivacije molekula vode tokom sušenja kajsije u obliku jedne polovine celog ploda. Vrednosti su date za eksperimente konvektivnog sušenja sa osmotskim predtretmanom, bez osmotskog predtretmana i brzinama vazduha za sušenje ispred sloja materijala (*Pavkov et al., 2021*).

Tabela 2.12. Vrednosti energije aktivacije vode za kajsiju u obliku polutke za različite parametre osmotskog i konvektivnog sušenja (*Pavkov et al., 2021*)

Pretreatment	Brzina vazduha (m/s)	E_a (kJ/mol)	R^2
Bez osmotskog sušenja	1,0	46,093	0,995
	1,5	49,930	0,963
Osmotsko sušenje (40°C, 50%)	1,0	38,312	0,964
	1.5	43,739	0,988
Osmotsko sušenje (60°C, 65%)	1,0	34,156	0,920
	1,5	35,280	0,876

U velikom broju naučnih radova na osnovu izračunatih vrednosti koeficijenata difuzije i energije aktivacije donosi se ocena o kinetici sušenja nekog materijala u zavisnosti od parametara procesa sušenja (*Domaz, 2009; Toğrul i Pehlivan, 2003; Kingsly et al., 2007; Singh i Gupta, 2007; Simal et al., 2005*). Analizirajući jednačinu (2.40) eksponent predstavlja odnos energije aktivacije i kinetičke energije vazduha za sušenje. Sa porastom temperature fluida za sušenje raste i vrednost koeficijenta difuzije vlage, a sami tim i energije aktivacije. Veće vrednosti energije aktivacije znače da se više energije efektivno koristi za prekidanje veza između molekula vode i suve materije, a samim tim efikasniji proces sušenja i brže sušenje.

2.5.5. Termogradijentni koeficijent

Termodifuzija je pojava transporta vlage pod dejstvom gradijenta temperature u materijalu, ovaj koeficijent je karakterističan za konvektivno sušenje, sušenje u vakuumu i liofilizaciju. U matematičkom izrazu *A. V. Likov*-a za fluks vlage (jednačina 3.3, Poglavlje 3) ona je obuhvaćena drugim sabirnikom i definisana preko termogradijentnog koeficijenta (δ, [$kg_w/kg_{sm}K$]). Uticaj iste na veličinu fluksa vlage u materijalu zavisi od karakteristika materijala i razmatranog procesa sušenja. Tek nakon analize konkretnih slučajeva može se govoriti o tome da li se može zanemariti ili ne (*Kanevče, 1981*).

Karakter zavisnosti termogradijentnog koeficijenta od vlažnosti uslovljen je vrstom procesa koji dominira u datom opsegu vlažnosti u zavisnosti od strukture materijala i veze vlage sa materijalom. Skoro kod svih materijala zapaža se sličan oblik zavisnosti. Kod koloidno kapilarno poroznih tela u opsegu vlažnosti do tačke ekstrema dominiraju difuzioni i efuzioni prenos parne faze. Sa povećanjem sadržaja vlage povećava se i koncentracija parne faze u kapilarama u odnosu na vazduh, a time i efekat termodifuzije. Što se tiče efuzije (prenos pare zbog razlike pritisaka pare u kapilarama) efekat je analogan. Kod niskih sadržaja vlage, potencijal prenosa pare efuzijom se ne menja značajno sa promenom temperature pošto pritisak blago zavisi od temperature, pa je $\delta \approx 0$. Pri određenom sadržaju vlage parcijalni pritisak pare u kapilarama se povećava sa povećanjem temperature u većem stepenu i para efundira u smeru suprotnom gradijentu temperature. Sa porastom vlažnosti zavisnost pritiska postaje izraženija, a time i termodifuzija. Kao zbir naznačenih efekata termodifuzije i termoefuzije dobija se jako povećanje δ od vlažnosti sve do maksimalne tačke. Posle tačke ekstrema vlaga se kreće uglavnom u obliku

tečnosti. Na taj način δ opada sa porastom vlažnosti i da su svi kapilari popunjeni tečnošću δ≈0 (*Kanevče, 1981, Urošević, 1986*).

U literaturi je mali broj podataka o ovoj veličini. Na osnovu eksperimentalnih i numeričkih istraživanja profila vlažnosti i temperature u kapilarno porozno-koloidnim materijalima tokom sušenja može se zaključiti da je uticaj termogradijentnog koefcijenta na transport vlage u materijalu mali i da se može zanemariti. (*Kanevče, 1998; Mitrevski, 2005, Wang et al., 2007*).

Može se zaključiti da heterogeni sastav i struktura voćnog tkiva, kao i različite veze vlage sa suvim skeletom utiču da su sve navedene termo-fizičke osobine (koeficijenti) koje karakterišu proces prenosa mase i toplote promenljive veličine tokom procesa sušenja. Koeficijenti su izrazite funkcije koncentracionih polja vlage i rastvorka, temperature i strukture voćnog tkiva. Ovo izaziva brojne teškoće pri njihovom eksperimentalnom ustanovljavaju, javlja se znatno rasipanje rezultata merenja i uske intervale pri kojima podaci važe. Pregledom dostupne literature pronađen je veliki broj podataka o analiziranim koeficijentima karakterističnih za različite voćne vrste. Poredeći ove literaturne podatke uočeno je da se oni međusobno veoma razlikuju.

2.6. Ravnotežna vlažnost i aktivnost vode

Ravnotežna vlažnost materijala je stanje mehaničke i termičke ravnoteže sistema: poljoprivredni materijal – okolni vlažni vazduh. Ova veličina pored vrste materijala zavisi od stanja vlažnog vazduha koji ga okružuje (*Babić i Babić, 2000*):

$$\omega_{eq} = f(t_v, \varphi, p, hemijskog\ sastava\ materijala) \tag{2.41}$$

gde je: ω_{eq} – ravnotežna vlažnost materijala (kg_w/kg); t_v – temperatura vazduha (^oC); φ - relativna vlažnost vazduha (%); p – pritisak vlažnog vazduha (P_a).

Pri određenoj vlažnosti bioloških materijala, parcijalni pritisak vodene pare u kapilarama materijala ima određenu vrednost. Kada je taj pritisak u ravnoteži sa parcijalnim pritiskom vodene pare u vlažnom vazduhu, pri određenoj temperaturi i pritisku vlažnog vazduha, prestaje razmena vodene pare između materijala i okoline, a vlažnost materijala se naziva ravnotežna vlažnost. Vrednosti ravnotežne vlažnosti za određeni materijal određuju se eksperimentalnim putem. Poznavanje vrednosti ravnotežne vlažnosti za neki materijal je od izuzetnog značaja za proces sušenja i bezbednog skladištenja (*Babić i Babić, 2000*). Za zrnaste poljoprivredne materijale u literaturi postoji veliki broj tabelarnih, grafičkih i analitičkih prikaza vrednosti ravnotežne vlažnosti pri određenim uslovima okoline, temperature i vlažnosti vazduha (*Babić i Babić, 2000; Katić, 1997*).

Kada je upitanju suvo voće u literaturi je široko zastupljen termin aktivnost vode (a_w). Aktivnost vode je definisana kao odnos parcijalnog pritiska vodene pare na površini biomaterijala (p_m) i parcijalnog pritiska zasićene vodene pare na liniji zasićenja (p_z) iste temperature kao i materijal (jednačina 2.42) (*Rahman, 2009*).

$$a_w = \frac{p_m}{p_z}[-] \tag{2.42}$$

gde je: a_w – aktivnost vode (-); p_m – parcijalni pritisak vodene pare na površini biomaterijala (Pa), p_z – parcijalni pritisak zasićene vodene pare u vazduhu nad slobodnom površinom vode za temperaturu vazduha koja jednaka temperaturi materijala (Pa).

Fizički smisao pojma aktivnost vode je izražavanje relativne količine slobodne vode u tkivu voća pri određenoj temperaturi koja može poslužiti kao osnova za život različitim nepoželjnim mikroorganizmima. Mikroorganizmi opstaju pri različitim vrednostima a_w, ispod određene vrednosti njihova aktivnost prestaje. Za voćna tkiva, granica ispod kojih prestaje aktivnost mikroorganizama je $a_w < 0,6$. Vrednosti a_w zavise hemijskog sastava, strukture, vlažnosti i temperature voća. Aktivnost vode utiče na hemijske i enzimatske promene. Povišene vrednosti aktivnosti vode utiču na tamnjenje tkiva, oksidaciju lipida, oksidaciju vitamina, razgradnju proteina i razgradnju vlakana. Tamnjenje tkiva postaje intenzivnije sa povećanim vrednostima a_w, dostižući maksimum u granicama između 0,6 i 0,7 *(Ratti i Mujumdar, 2005; Anthony, 1998, Scott i Bernard, 1983)*. U tabeli (*tabela 2.13*) date su vrednosti aktivnosti vode za suvo voće različite vlažnosti: kajsije, breskve, šljive i grejpfruta pri različitim temperaturama.

Tabela 2.13. Vrednost aktivnosti vode a_w za neke voćne vrste u zavisnosti od temperature i vlažnosti (Rattii i Mujumdar, 2005)

Voćna vrsta	Vlažnost voća [%$_{wb}$]	Temperatura voća [^oC]				
		5	20	30	45	60
Kajsija	7,75		0,10			
	14,79		0,35			
	24,2		0,60			
	60,2		0,90			
Breskva	10		0,40	0,40		0,50
	15		0,50	0,50		0,65
	20		0,60	0,60		0,78
Šljiva	6,1		0,30			
	15,88		0,40			
	26,13		0,60			
	52,8		0,8			
Grejpfrut	10	0,46	0,46		0,50	0,66
	15	0,52	0,52		0,59	0,71
	20	0,60	0,60		0,65	0,75

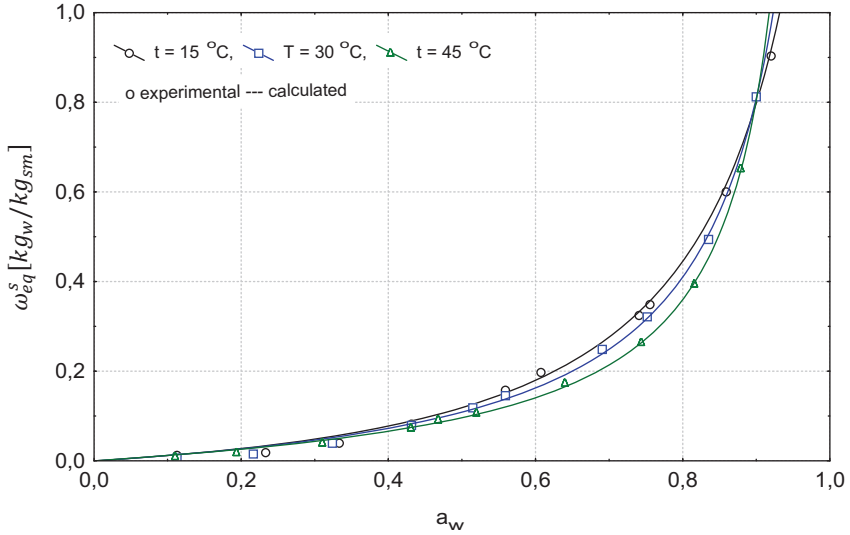
Izoterme sorpcije sušenog voća predstavljaju termodinamičku ravnotežu između aktivnosti vode (a_w) i ravnotežne vlažnosti sušenog voća (ω_{eq}) pri konstantnoj temepraturi i pritisku. Sorpcione izoterme uobičajeno su klasifikovane prema obliku u pet različitih tipova I, II, III, IV i V (*Basu et al., 2006, Brunauer et al., 1940*). Za većinu prehrambenih materijala su sigmoidnog oblika. Matematički modeli koji opisuju zavisnost ravnotežne vlažnosti voća od aktivnosti vode su veoma značajni za optimiziranje procesa sušenja voća. Naime, poznavanjem bezbedne vrednosti aktivnosti vode (a_w) za neki materijal – voće, pomoću modela izračunava se krajnja vlažnost voća do koje je potrebno sušiti. Izračunata vlažnost je jednaka ravnotežnoj vlažnosti materijala za date uslove sredine koja ga okružuje. Matematički modeli se mogu podeliti na: teorijske (*Brunauer et al., 1938; Guggenheim, 1966; Halsey, 1948; Lewicki, 2000; Mitrevski, 2016*), poluempirijske (*Peleg, 1993; Lewicki, 1998; Norrish, 1966*) i empirijske (*Henderson, 1952; Chen, 1997; Schuchmann et al., 1990*). Od svih modela kao najefikasniji i najčešće

korišćeni za modelovanje sorpcionih krivih je GAB (Guggenheim – Anderson – Boer) model (*Guggenheim, 1966;*) koji pripada grupi teorijskih modela (jednačina 2.41):

$$\omega_{eq}^{s} = \frac{P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot a_w}{(1 - P_3 \cdot a_w) \cdot (1 - P_3 \cdot a_w + P_2 \cdot P_3 \cdot a_w)} \tag{2.43}$$

gde je: ω_{eq}^{s}– ravnotežna vlažnost voća u odnosu na suvu bazu (kg_w/kg_{sm}); a_w – aktivnost vode (-); P_1, P_2, P_3 – parametri modela (-).

Autori Mitrevski et al. (2015) upotrebili su pet različitih modela za aproksimiranje izotermi sorpcije listića suve kruške na tri različite temperature okolnog vazduha (15°C, 30°C, 45°C). Zaključeno je da GAB model najpreciznije aproksimira eksperimentalne rezultate. Na slici 2.4. prikazan je izgled sorpcionih krivih, a u tabeli 2.13 izračunati parametri GAB modela.



Slika 2.4. Izoterme adsorpcije listića sušene kruške modelovane GAB modelom za temperaturu 15°C, 30°C i 45°C (Mitrevski, et al., 2015)

Tabela 2.14. Parametri modela GAB za modelovanje izotermi adsorpcije tkiva osušene kruške i kajsije i pri različitim temperaturama

Voćno tkivo	Opseg a_w	Temperatura tkiva [°C]	Konstante GAB modela			Referenca
			P_1	P_2	P_3	
Sušeni listići kruške	0,2-0,91	15	0,194	0,909	0,569	*Mitrevski, et al., 2015*
		30	0,125	0,927	0,880	
		45	0,084	1,003	1,317	
Sušena kajsija	0,1-0,91	15	3,9	1,119	11,599	*Rahman, 1995*
		20	10,05	0,9433	2,443	*Ayranci, et al., 1990*
		30	3,6	1,156	5,844	*Rahman, 1995*
		36	9,87	0,9849	1,908	*Ayranci, et al., 1990*

Pored GAB modela, autori razvijaju nove, preciznije, modele za aproksimaciju izotermi sorpcije sušenog voća. Mitrevski et al (2016, 2017) razvili su tri parametraski model (jednačina 2.42) koji aproksimira izoterme sorpcije listića sušene kruške na tri temperature i listiće dunje na četiri temperature sa visokim koeficijentom determinacije.

$$\omega_{eq}^{s} = \exp\left[P_1 + P_2 \frac{a_w}{\arctan a_w} + P_3 \left(\frac{a_w}{\arctan a_w} \right)^2 \right] \tag{2.45}$$

gde je: ω_{eq}^{s}– ravnotežna vlažnost voća u odnosu na suvu bazu (kg_w/kg_{sm}); a_w – aktivnost vode (-); P_1, P_2, P_3 – parametri modela (-).

Tabela 2.15. Triparametri modeli za modelovanje izotermi adsorpcije tkiva osušene kruške i dunje pri različitim temperaturama (Mitrevski et al 2016, 2017)

Voćno tkivo	Opseg a_w	Temp. tkiva [°C]	Konstante GAB modela			Referenca
			P_1	P_2	P_3	
Sušeni listići dunje	0,1-0,92	15	-20,56	19,86	-2,70	*Mitrevski, V., et al., 2016*
		30	-12,06	4,393	4,271	
		45	-2,419	12,93	11,93	
Sušeni listići dunje	0,1 – 0,92	15	19,289	-54,399	32,39	*Mitrevski, V., et al., 2017*
		30	8,1009	-10,081	2,1811	
		45	27,604	-40,061	9,1069	
		60	-5,8999	-6,1358	8,6669	

U literaturi je prisutan veliki broj rezultata istraživanja aktivnosti vode za različite voćne vrste, kao i modelovanju izotermi sorpcije. Može se uputiti kritika određenom broju radova zbog nepotpunosti informacija. Od velike je važnosti u radovima potpuno definisanje fizičkih osobina materijala za koga su izmerene vrednosti (vlažnost, dimenzije) i uslove pri kojima su vrednosti dobijene (adsorpcija, desorpcija, temperatura okoline, metod merenja). GAB model, kao i ostali modeli imaju široku praktičnu primenu.

3. OSNOVE PROCESA SUŠENJA I MATEMATIČKO MODELOVANJE KINETIKE

Sušenje poljoprivrednih materijala je složen proces razmene energije i materije između materijala i radnog fluida. Proces sušenja vlažnih materijala neraskidivo je povezan sa osnovnim zakonima prenosa materije (vlage) i energije u koloidno kapilarno poroznim materijalima. Zbog široke primene različitih tehnika sušenja voća, izučavanje kinetike matematičkim modelovanjem prenosa materije i toplote od velikog je praktičnog interesa. Istovremeno, mehanizam prenosa toplote i materije u koloidno kapilarno-poroznim telima u zavisnosti od primenjene tehnike sušenja je nedovoljno istražen, pa je izučavanje od velikog teorijskog interesa.

3.1. Teorijski pristupi izučavanju procesa sušenja

Postoje tri teorijska pristupa u izučavanju procesa sušenja, odnosno prenosa energije i materije u koloidno-kapilarno poroznim materijalima. Oni se mogu podeliti u tri grupe u čijoj osnovi se nalaze pristupi: A.V. Likov – a, S. Witaker-a i B. Berger -a (*Kanevče, 1981; Mitrevski, 2005*).

Prvi pristup u izučavanju procesa prenosa toplote i materije u koloidno-kapilarno poroznim telima je najrasprostranjeniji. Ovaj pristup je na osnovu termodinamike nepovratnih procesa predložio i razvio poznati sovjetski naučnik *A.V. Likov*. Sušenje kao realni termodinamički proces teče samo pod uticajem konačnih razlika odgovarajućih potencijala. Kao rezultat ove teorije dobijen je sistem od dve linearne parcijalne diferencijalne jednačine drugog reda koje su u funkciji od: polja temperature i polja vlažnosti materijala. Rezultujući sistem jednačina rešen je u velikom broju slučajeva za različite početne i granične uslove. Dobijena rešenja doprinela su daljem razvoju uzajamno povezanih procesa prenosa toplote i mase, iako u većini slučajeva nisu u saglasnosti sa eksperimentalnim rezultatima zbog određenih nekorektnih uprošćavanja. Detaljna prezentacija teorije je u radovima *A.V. Likov*-a (*Likov i Mihailov, 1965; Likov, 1966; 1968*).

U drugom pristupu navedeni procesi se razmatraju polazeći od jednačina za neprekidne sredine. Sistem jednačina, koga u osnovi sačinjavaju jednačina kontinuiteta primenjena na vlažan materijal i na svaku fazu pojedinačno, jednačina kretanja i energetska jednačina, primenom tehnike zapreminskog usrednjavanja uz niz pretpostavki, svodi se na sistem jednačina koje opisuju prenos toplotne energije i materije u čvrstoj, tečnoj i parnoj fazi vlažnog tela. Teorija u tom obliku je veoma komplikovana. Nastaju veliki problemi u rešavanju povezanog sistema od više parcijalnih diferencijalnih jednačina sa velikim brojem koeficijenata u datim jednačinama. U literaturi nije naveden ni jedan primer konkretne primene ove teorije, čak i u

najjednostavnijem obliku za izračunavanje nestacionarnih polja temperature i vlažnosti materijala (*Kanevče, 1981; Mitrevski, 2005*).

U osnovi teorijskog pristupa koji predlaže Bereger (*Kanevče, 1981; Mitrevski, 2005*) leži pretpostavka da je proces prenosa materije ustvari kombinovani kapilarni prenos tečnosti usled postojanja gradijenta tečne faze i difuzije pare kroz preostali (slobodni) deo kapilara kao rezultat gradijenta parcijalnog pritiska vodene pare između materijala koji se suši i radnog fluida. Proces prenosa energije uslovljen je konduktivnim transportom toplote kroz čvrsti skelet materijala i latentnom toplotom promene faze. Pri tome se pretpostavlja da je proces promene faze daleko brži od procesa prenosa toplote i materije tako da su u svakom trenutku sve tri faze u međusobnoj lokalnoj dinamičkoj ravnoteži. Ovakav pristup rezultira sistemom od dve parcijalne diferencijalne jednačine prenosa materije i jednačina prenosa energije, sa tri nepoznate, a to su: sadržaj tečne faze, parne faze i temperatura materijala. Osnovni nedostatak ove teorije je nepostojanje eksperimentalnih vrednosti pojedinih koeficijenata, pretpostavka o konstantnim vrednostima koeficijenata, ne postoji eksperimentalna verifikacija dobijenih rezultata kao dokaz ispravnosti učinjenih pretpostavki kako prilikom izvođenja sistema jednačina tako i prilikom njegovog numeričkog rešenja.

3.2. Transport toplote i vlage u unutrašnjosti materijala i razmena vlage na graničnoj površini

Klasifikacija vlažnih biomaterijala na osnovu njihovih koloidno-fizičkih osobina, svrstava voće u grupu kapilarno-porozno koloidnih tela. Migracija vlage u materijalu nastaje usled postojanja gradijenata potencijala prostiranja vlage, a vlaga se prostire u obliku pare ili tečnosti od dela sa višim potencijalom do dela sa nižim potencijalom. Mehanizam prostiranja vlage zavisi od načina i oblika veze vlage sa skeletom (*Vasiljević, 1979; Pavkov, 2012*).

U zavisnosti od primenjene tehnike sušenja voća zavisiće i oblik agregatnog stanja vlage u kom se transportuje kroz skelet materijala do površine razmene. Konvektivno i vakuum sušenje prouzrokuje transport vlage kroz materijal do granične površine u parnom i tečnom stanju. Transport vlage u parnom stanju nastaje zbog razlike parcijalnih pritisaka vodene pare u vazduhu i kapilarama materija, a u tečnom, zbog razlike u osmotskim pritiscima između susednih ćelija materijala. Kod osmotskog sušenja dominantan je transport vlage u tečnom stanju, zbog razlike u osmotskim pritiscima između radnog fluida i materijala na graničnoj površini razmene i razlike u osmotskim pritiscima između susednih ćelija u materijalu. Takođe, jedan deo vlage se transportuje kroz materijal u parnom stanju, zanemarljivi deo. Sublimacija leda je pogonska sila sušenja smrzavanjem (liofilizacija), proces sušenja se odvija ispod tačke smrzavanja vode, pa je transport vlage kroz materijal isključivo u parnom stanju.

Površinska vlaga se izdvaja na samom početku procesa sušenja, u zavisnosti od primenjene tehnike sušenja vlaga prelazi u radni fluid u parnom stanju (konvektivno sušenje, vakuum sušenje, sušenje smrzavanjem) ili tečnom stanju (osmotsko sušenje). Kretanje kapilarne vlage u materijalu prati front sušenja, sloj tkiva voća u kome dolazi do stvaranja potencijala za transport vlage, a koji se pomera od granične površine do centra materijala. Kretanje kapilarne vlage može biti u tečnom i parnom stanju za konvektivno i vakuum sušenje, u tečnom stanju za osmotsko sušenje i u parnom stanju za sušenje smrzavanjem. Adsorpciono vezana vlaga u materijalu

transportuje se u obliku pare, difuzionim (molekularnim) putem. Potencijal prostiranja vlage u ovom slučaju je parcijalni pritisak vodene pare u materijalu. Osmotski vezana vlaga prostire se prvenstveno u obliku tečnosti i to difuzionim putem, a potencijal prostiranja je osmotski pritisak, osim u slučaju sušenja smrzavanjem kada se prenosi o obliku vodene pare, a potencijal prenosa je sublimacija leda.

Dakle, na potencijal prostiranja vlage u materijalu utiču: primenjena tehnika sušenja, oblik veze vlage sa suvim skeletom, gradijent vlažnosti, gradijent temperature, gradijent ukupnog pritiska, gradijent koncentracije rastvorljivih organskih komponenti u vodi, gradijent kapilarnog potencijala i od intenziteta fizioloških i biohemijskih procesa u njemu. Prema tome masa vlage, koja u jedinici vremena prolazi kroz jedinicu ekvipotencijalne površine je složena funkcija nabrojanih faktora, koja se u opštem obliku može napisati (*Pavkov, 2012*; *Babić, 1989; Vasiljević, 1979*):

$$M_w = f\left(\textit{tehnika sušenja},\ \textit{nacin vezivanja vlage},\ \nabla\omega,\ \nabla t,\ \nabla p,\ \nabla C,\ \nabla\psi,\ \textit{biološka aktivnost}\right) = \frac{dM_w}{F\cdot d\tau} \qquad (3.1)$$

gde je: M_w –materijalni fluks, masa vlage koja u jedinici vremena prolazi kroz jedinicu ekvipotencijalne površine u pravcu normale na nju (kg/m^{2}s); $\nabla\omega$, ∇t, ∇p, ∇C, $\nabla\psi$ - skalarna veličina gradijenta: vlažnosti, temperature, ukupnog pritiska, koncentracije i kapilarnog potencijala, τ - vreme sušenja (s).

U teorijskom sagledavanju kinetike procesa sušenja pažnja je usmerena ka iznalaženju sveobuhvatnog matematičkog opisa masenog fluksa vlage tokom sušenja. Da bi ovakvo rešenje bilo primenljivo neophodno je matematički opisati sve pomenute faktore. Ovakav pristup dovodi do kompleksnih i složenih matematičkih rešenja, veoma često neprimenljivih u praksi. Pravac razvoja matematičkih rešenja kinetike sušenja usmeren je ka pojednostavljenju uvođenjem niza pretpostavki o konstantnosti uticajnih faktora čije realno opisivanje usložnjava matematička rešenja.

Zbog uprošćavanja analize, za kinetiku sušenja pretpostavlja se da potencijal prenosa vlage zavisi samo od gradijenta vlažnosti i gradijenta temperature u materijalu. Tada će jednačina (3.1) napisana u skalarnom obliku biti (*Pavkov, 2012*; *Babić, Lj., 1984; Babić, Lj. i Babić, M., 2011*):

$$M_w = -\lambda_w\cdot\left(\nabla\omega \pm \delta\cdot\nabla t\right) = D_{ew}\cdot\rho_{sm}\cdot\left(\nabla\omega \pm \delta\cdot\nabla t\right) \qquad (3.2)$$

gde je: M_w –materijalni fluks, masa vlage koja u jedinici vremena prolazi kroz jedinicu ekvipotencijalne površine u pravcu normale na nju (kg/m^{2}s); λ_w – koeficijent provođenja vlage u materijalu (kg/ms); $\nabla\omega$, ∇t, - skalarna veličina gradijenta: vlažnosti i temperature u materijalu; δ - termogradijentni koeficijent (kg$_w$/kg$_{sm}$K); D_{ew} – koeficijent difuzije (difuzivnost) vlage (m^2/s), ρ_{sm} – gustina suve materije (kg$_{sm}$/m^3).

Jednačina 3.2 u diferncijalnom obliku je osnovni izraz za molekularnu difuziju u čvrstim telima ili prvi *Fick*-ov zakon (*Voronjec, 1979*) koji je analogan sa zakonom provođenja toplote, *Fourier*-ov zakon (*Bošnjaković, , 1976*), u obliku:

$$M_w = -D_{e_w}\cdot\rho_{sm}\cdot\frac{\partial\omega}{\partial n} \pm D_{ew}\cdot\rho_{sm}\cdot\delta\cdot\frac{\partial t}{\partial n} \qquad (3.3)$$

gde je: M_w –materijalni fluks, masa vlage koja u jedinici vremena prolazi kroz jedinicu ekvipotencijalne površine u pravcu normale na nju (kg/m^{2}s); $\frac{\partial \omega}{\partial n}, \frac{\partial t}{\partial n}$ - skalarna veličina gradijenta potencijala: vlažnosti i temperature u pravcu normale na ekvipotencijalnu površinu; δ - termogradijentni koeficijent (kg$_w$/kg$_{sm}$K); D_{ew} – koeficijent difuzije vlage (m^2/s); ρ_{sm} – gustina suve materije (kg$_{sm}$/m^3).

Da bi se jednačina 3.3 jednoznačno rešila potrebno je definisati polje vlage i polje temperature u materijalu, koje je promenljivo u vremenu, kao i fizičke osobine materijala. Analitički izrazi koji opisuju polje vlažnosti i polje temperature u materijalu, kinetiku sušenja, su sistem diferencijalnih jednačina koje opisuju unutrašnji prenos energije i mase za slučaj sušenja kapilarno poroznih koloidnih materijala. Te jednačine su (*Likov, 1968*):

$$\nabla \omega = \frac{\partial \omega}{\partial \tau} = D_{ew} \cdot \nabla^2 \omega + D_{ew} \cdot \delta \cdot \nabla^2 t \tag{3.4}$$

$$\nabla t = \frac{\partial t}{\partial \tau} = a_t \cdot \nabla^2 t + \frac{\phi \cdot r_w}{c_p} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial \tau} \tag{3.5}$$

gde je: $\nabla \omega$, ∇t, - skalarna veličina gradijenta: vlažnosti i temperature u materijalu; $\frac{\partial \omega}{\partial \tau}, \frac{\partial t}{\partial \tau}$ - nestacionarno polje: vlažnosti i temperature; D_{ew} – koeficijent difuzije vlage (m^2/s); δ - termogradijentni koeficijent (kg$_w$/kg$_{sm}$K); a_t – koeficijent temperaturne provodnosti (m^2/s); ϕ - kriterijum faznog prelaza - deo vlage odvedene iz jedinice zapremine vlažnog materijala u jedinici vremena u obliku pare ($0 < \phi < 1$); c_p – specifična toplota materijala (kJ/kgK); r_w – toplota faznog prelaza (kJ/kgK); ∇^2 – Laplace-ov operator (m^{-2}).

Sistem jednačina rešen je za granične uslove prvog, drugog i trećeg reda. Dobijena rešenja doprinela su daljem razumevanju i shvatanju uzajamno povezanih procesa prenosa toplote i materije, međutim imaju i niz nedostataka. Prvi od njih je što je uzeto da su koeficijenti konstantni. U okviru ovog rada, diskutovana je izrazita zavisnost koeficijenata prenosa toplote i materije od temperature i vlažnosti materijala. Drugi nedostatak sastoji se u tome što su dobijena analitička rešenja prilično komplikovana.

Funkcija 3.4 opisuje raspored vlažnosti u prostoru posmatranog tela koja se menja u vremenu - nestacionarno polje vlažnosti. Ako se iz jednačine 3.4 izuzme gradijent temperature (∇t), tada gradijent vlažnosti ($\nabla \omega$) može da se predstavi parcijalnom diferencijalnom jednačinom drugog reda, koja sa odgovarajućim graničnim i početnim uslovima definiše polje vlažnosti u posmatranom biomaterijalu u slučaju molekularne difuzije i naziva se drugi *Fick* – ov zakon (*Crank, 1975; Voronjec, 1979*):

$$\nabla \omega = \frac{\partial \omega}{\partial \tau} = D_{ew} \cdot \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} \right) = D_{ew} \cdot \nabla^2 \omega = D_{ew} \cdot \Delta \omega \tag{3.6}$$

gde je: $\nabla \omega$, - skalarna veličina gradijenta vlažnosti; $\frac{\partial \omega}{\partial \tau}$ - nestacionarno polje vlažnosti; D_{ew} – koeficijent difuzije vlage (m^2/s); x, y, z – kordinate u prostoru posmatranog tela; $\nabla^2 = \Delta$– Laplace-ov operator (m^{-2}).

Značajan broj istraživača koristi drugi *Fick* – ov zakon, kao jedan od teorijskih pristupa (*Fickian Diffusion Approch*) za razmatranje molekularne difuzije komponenata sistema, koji se javljaju tokom sušenja boloških materijala. Zasniva se na pretpostavci o nezavisnoj difuziji komponenata sistema, izotropnosti materijala i njegovog neskupljanja (*Shi, and Maguer, 2002*; *Rastogi et al., 2002).*

Jednačina 3.6 predstavlja parcijalnu nelinearnu, diferencijalnu jednačinu drugog reda koja ima jednu zavisno promenljivu, vlažnost materijala (ω), i četiri nezavisno promenljive (τ, x, y, z). Definiše vlažnost kao funkciju vremena i koordinata posmatrane tačke (polje vlažnosti) i omogućava izračunavanje gradijenta vlažnosti. Da bi se jednačina jednoznačno rešila potrebno je definisati: granične uslove, početne uslove, geometrijske uslove i fizičke karakteristike materijala merodavne za proces transporta vlage. Za različite granične i početne uslove i niz pretpostavki jednačina je rešena samo za najjednostavnije geometrijske oblike: sfera, kocka, cilindar, beskonačna ravna ploča.

Masa vlage koja je migracijom kroz materijal došla do granične površine, sa granične površine se ista količina materije transportuje u radni fluid prema zakonu prelaza materije. Prema *Dalton*-ovom modelu, masa vlage koja se u jedinici vremena predaje u parnom stanju radnom fluidu sa granične površine definisana je jednačinom (3.7). Sličan izraz se može napisati i za prelaz vlage u tečnom stanju u radni fluid (osmotsko sušenje), jednačina (3.8):

$$\frac{dM_{w(p)}}{F \cdot d\tau} = \beta_{w(p)} \cdot (p_m - p_{ps}) \tag{3.7}$$

$$\frac{dM_{w(t)}}{F \cdot d\tau} = \beta_{w(t)} \cdot (\omega^s - \omega^s_{eq}) \tag{3.8}$$

gde je: $dM_{w(p)}$, $dM_{w(t)}$ – masa vlage koja u jedinici vremena pređe sa jedinice granične površine u radni fluid: parnom i tečnom stanju (kg_w/m^2s); F – površina razmene (m^2), τ - vreme (s); $\beta_{w(p)}$ – koeficijent prelaza vlage sa granične površine u radni fluid u parnom stanju (s/m); $\beta_{w(t)}$ - koeficijent prelaza vlage sa granične površine u radni fluid u tečnom stanju (kg/m^2s) p_m, p_{ps} – parcijalni pritisak vodene pare: na površini materijala, u radnom fluidu (N/m^2); ω^s – vlažnost materijala na graničnoj površini (kg_w/kg_{sm}); ω_{eq} – ravnotežna vlažnost između materijala i osmotskog fluida poznatog stanja (kg_w/kg_{sm}).

Iz izraza 3.7 konstatuje se da potencijal prelaza vlage sa granične površine u gasoviti radni fluid (konvektivno, vakuum i sušenje smrzavanjem) zavisi od razlike parcijalnih pritisaka vodene pare u neposrednoj blizini granične površine i u radnom fluidu koji je daleko od te površine, kao i od koeficijenta prelaza materije. Kod izraza 3.8 konstatuje se da potencijal prelaza vlage sa granične površine u osmotski fluid zavisi od koeficijenta prelaza materije i razlike vlažnosti materijala na graničnoj površini i ravnotežne vrednosti vlažnosti materijala u osmotskom rastvoru poznatog stanja temperature i koncentracije rastvorka.

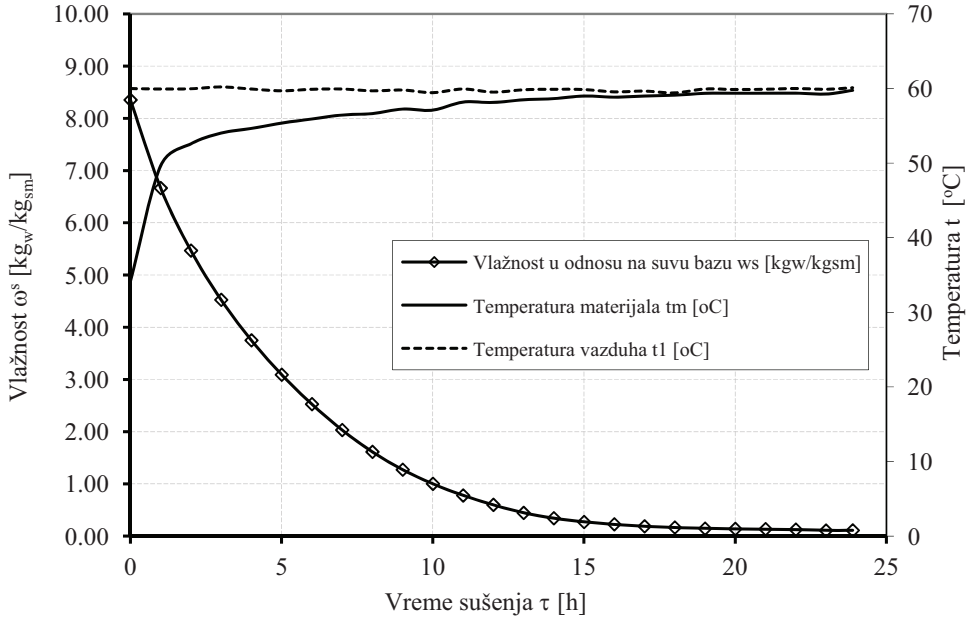
Izrazi 3.7 i 3.8 samo približno definišu pojavu prelaza materije sa granične površine materijala u radni fluid. Razlog leži u promenljivoj vrednosti koeficijenta prelaza vlage. Koeficijent je složena funkcija vlažnosti i temperature materijala, oblika materijala, režima strujanja radnog fluida i termofizičkih osobina materijala. Zbog ovih i drugih teškoća veoma je teško ustanoviti vrednosti koeficijenta prelaza vlage. Samim tim jednačine 3.7 i 3.8 bi se mogle koristiti uz ograničenje da je koeficijent prelaza vlage (β_w) konstantan.

Na osnovu prethodno sprovedene analize očigledno je da rešavanje savremenih naučnih problema iz oblasti sušenja podrazumeva primenu teorijskih i eksperimentalnih metoda istraživanja. Stepen korišćenja prvog ili drugog metoda zavisi od vrste problema. Nepostojanje adekvatnih teorijskih rešenja dovodi do šire primene eksperimentalnih metoda istraživanja. Nestacionarno prostiranje vlage i toplote u kapilarno poroznim koloidnim materijalima je zavisan od više potencijala. Teorija prenosa vlage i toplote koja obuhvata sve navedene i druge relevantne faktore dovodi do sistema jednačina čija složenost onemogućava praktičnu primenu. Stoga, značajno mesto u istraživanjima prenosa vlage i toplote zauzimaju eksperimentalna istraživanja.

3.3. Kinetika sušenja voća

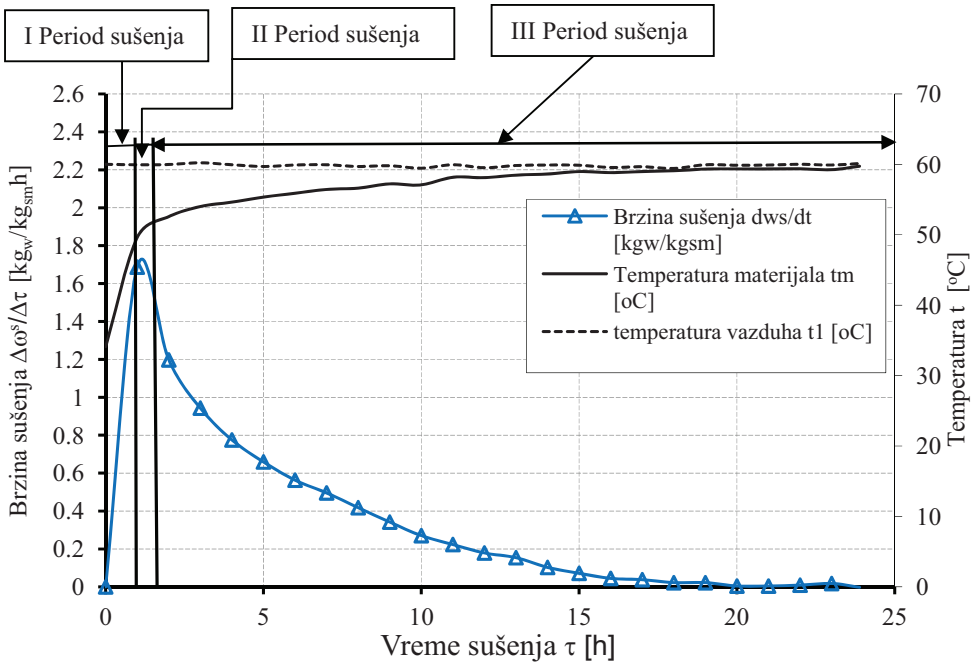
Upravljanje procesima sušenja voća zavisi od željenih karakteristika krajnjeg proizvoda. Moderan pristup pronalaženja optimalnih parametara procesa sušenja voća oslanja se na pažljivu analizu kinetike sušenja. Najčešće se kinetika sušenja grafički prikazuje krivama funkcionalne zavisnosti srednje vlažnosti, srednje temperature i brzine promene vlažnosti materijala koji se suši tokom vremena trajanja procesa. Pored ovih veličina, prikazuju se i promene fizičko-mehaničkih i hemijskih osobina materijala tokom sušenja.

Na slici 3.1 prikazana je karakteristična kinetička kriva promene srednje vlažnosti voća (polutke kajsija) tokom konvektivnog sušenja u zavisnosti od temperature i brzine vazduha za sušenje. Na istom dijagramu prikazana je promena temperature materijala u toku procesa sušenja. Kriva je dobijena merenjem vlažnosti i temperature materijala kontinualno tokom sušenja bez prekidanja procesa. Upisivanjem izmerenih vrednosti srednje vlažnosti i povezivanjem sa vremenom sušenja dobija se prikazana kriva.



Slika 3.1. Kinetička kriva srednje vlažnosti polutki kajsija izražena u odnosu na suvu bazu i temperature materijala tokom konvektivnog sušenja na temperaturi vazduha 60^oC i brzini vazduha ispred sloja 1,5 m/s (*Pavkov, 2012*)

Diferenciranjem dobijene kinetičke krive promene srednje vlažnosti voća (*sl.3.1*) u izabranom vremenskom intervalu, ($\Delta\omega^s/\Delta\tau$), dobija se izgled kriva kinetike brzine sušenja (*sl. 3.2.*).



Slika 3.2. Kinetička kriva brzine sušenja polutki kajsija izražena u odnosu na suvu bazu tokom konvektivnog sušenja na temperaturi vazduha 60°C i brzini vazduha ispred sloja 1,5 m/s (*Pavkov, 2012*)

Analizom kinetičke krive brzine sušenja zapažaju se tri karakteristična perioda sušenja voća, koji se pojavljuju kod svih tehnika sušenja:

I period – Period porasata brzine sušenja;

II period – Period konstantne brzine sušenja;

III period – Period opadajuće brzine sušenja.

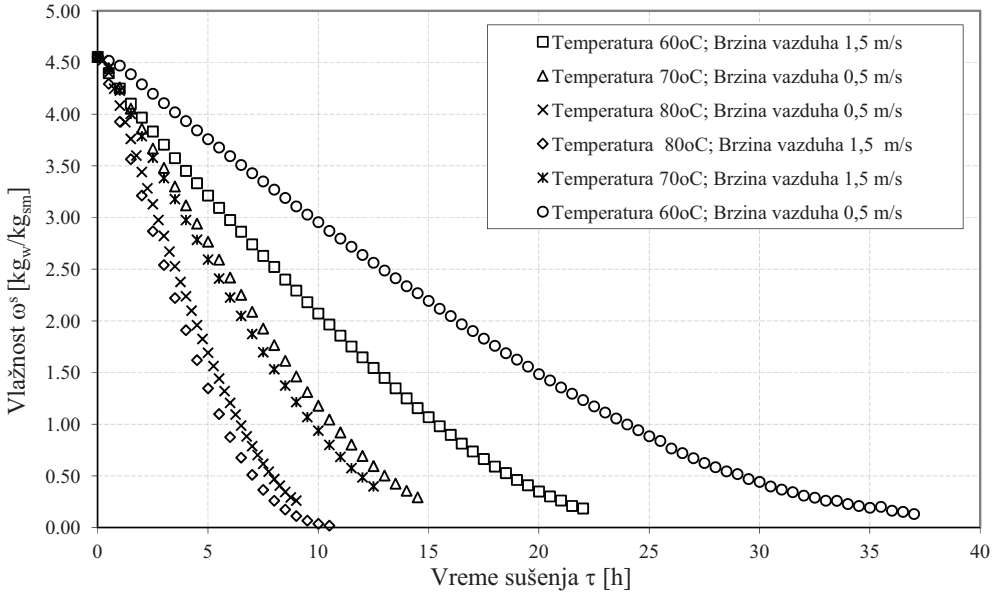
I period - Period povećanja brzine sušenja karakterističan je zbog naglog ubrzanja sušenja. Na početku procesa sušenja, materijal ima najveću vlažnost, intezitet prelaza vlage sa granične površine u radni fluid raste od 0 do maksimalne vrednosti. U ovom periodu površinska vlaga se uklanja iz materijala i deo kapilarne vlage koji se nalazi u blizini granične površine razmene. Kod konvektivnog i vakuum sušenja, u ovom periodu temperatura materijala intezivno raste. Intezivni porast temperature je posledica temperaturne razlike između materijala koji je unesen u sušaru sa temperaturom približno jednakoj okolini i fluida za sušenje. Intezitet porasta ove temperature zavisi od temperaturne razlike materijala i fluida za sušenje. Zagreva se materijal vlaga u njemu koja isparava i povećava pritisak vodene pare u materijalu. U ovom periodu brzina sušenja dostiže svoj maksimum, vreme trajanja ovog perioda jednako je završetku prelaza površinske vlage i dela kapilarne vlage u blizini površine razmene u fluid za sušenje. U poređenju sa III periodom sušenja, I prvi period traje kratko.

II period - u teoriji sušenja odlikuje konstantna brzina sušenja. Razlika pritiska vodene pare u materijalu i vazduhu je konstantna, kao i temperatura materijala. Postojanje ovog perioda zavisi

od vrste i dimenzija materijala koji se suši i primenjene tehnike sušenja. Karakterističan je kod blagih režima sušenja (imitacija prirodnog sušenja), sa niskim vrednostima procesnih parametara. Uočljiv je kod vakuum sušenja i liofilizacije tankih materijala. Kod konvektivnog sušenja voća ovaj period se na osnovu analize kinetičkih kriva brzine sušenja ne pojavljuje ili vremenski traje zanemarljivo kratko u odnosu na dužinu celog procesa.

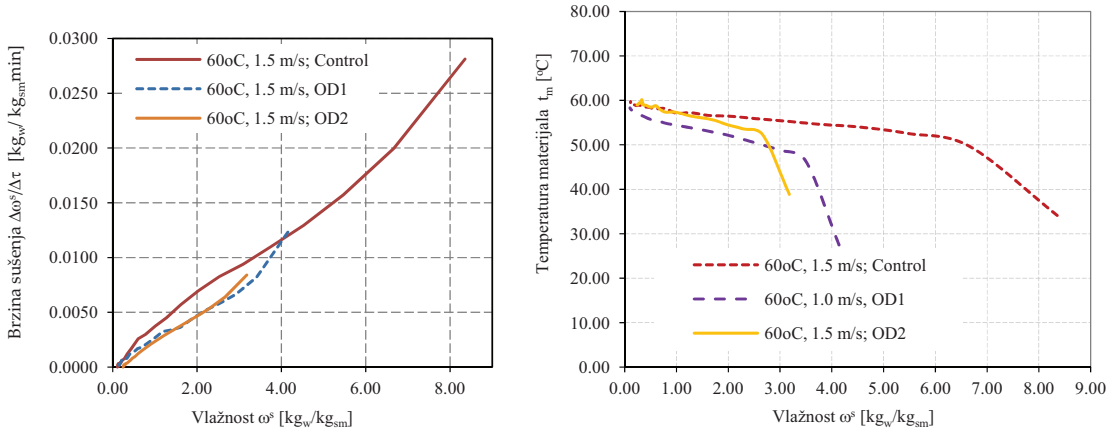
III period - period opadajuće brzine sušenja je dominantan period tokom procesa sušenja voća. Karakteriše ga opadanje brzine sušenja. U materijalu se smanjuje količina kapilarne vlage i dominantno se izdvaja adsorpciono i osmotski vezana vlaga. Pritisak vodene pare u materijalu konstantno se snižava. Pojavljuju se suvi slojevi materijala koji predstavljaju otpor kapilarnom i molarnom prenosu vlage do površine razmene. Vlažnost materijala se postepeno približava ravnotežnoj vlažnosti, a temperatura materijala postepeno raste u obrnutoj srazmeri sa brzinom isparavanja i približava se temperaturi fluida za sušenje. Kada materijal dostigne ravnotežnu vlažnost njegova temperatura se izjednačava sa temperaturom fluida za sušenje. Sa povećanjem inteziteta parametara procesa sušenja treći period ima intezivnije sniženje brzine sušenja i oblik krive je sigmoidan. Kod sporih procesa sušenja (prirodno sušenje, sušenje smrzavanjem), III period ima oblik blago strme linije koja se usporeno približava ravnotežnoj vlažnosti bez zakrivljenja krive ili sa veoma blagim zakrivljenjem.

Na slici 3.3. prikazane su kinetičke krive promene srednje vlažnosti konvektivnog sušenja borovnice na tri temperature vazduha (60, 70 i 80^{o}C) i dve brzine vazduha ispred sloja materijala (1,5 i 0,5 m/s). Objedinjeni prikaz različitih parametara procesa sušenja omogućuje vizuelnu ocenu njihovog uticaja na brzinu procesa sušenja i potrebno vreme do postizanja željene vlažnosti. Analizom slike, evidentno je da sa porastom temperature i brzine vazduha vreme sušenja se skraćuje.



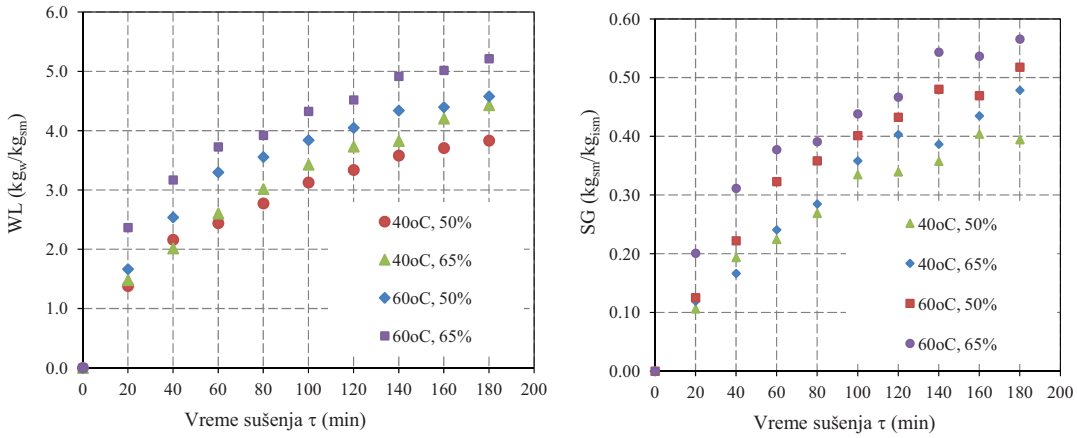
Slika 3.3. Kinetičke krive konvektivnog sušenja borovnice na temperaturama vazduha 60, 70 i 80^{o}C i brzina vazduha 0,5 i 1,5 m/s (Pavkov et al., 2017a)

Pored uobičajenih krivih kinetike sušenja (*slika 3.1, 3.2, 3.3*) za analizu sušenja koriste se krive zavisnosti brzine sušenja i temperature materijala od vlažnosti. Primer je dat na slici 3.4, gde je prikazana zavisnost brzine sušenja (a) i temperature materijala (b) od vlažnosti polutki kajsija sušene samo konvektivno (control) i kombinovano sa osmotskim predtretmanom (OD1, OD2) (*Pavkov et al., 2021*).



Slika 3.4. Kinetika zavisnosti brzine sušenja od vlažnosti materijala (a) i temperature materijala (b) za polutke kajsije sušene konvektivno (control) i sa osmotskim predtretmanom (OD1, OD2) (Pavkov et al., 2021)

Istraživanje kinetike osmotskog sušenja obuhvata merenje promene vlažnosti i povećanja suve materije kao dva glavna toka razmene mase. Izmereni podaci omogućuju formiranje krivih promene vlažnosti koja se definiše terminom gubitak vode (WL, jednačina 2.27) i povećanjem suve materije (SG, jednačina 2.28). Na slici 3.5. prikazan je primer kinetike osmotskog sušenja polutki kajsija pri dve različite temperature (40 i 60°C) i dve različite koncentracije osmotskog rastvora (50 i 65%) (*Pavkov, I., et al., 2021*).



Slika 3.4. Kinetika gubitka vlage (WL) i povećanja suve materije (SG) tokom osmotskog sušenja polutki kajsija na temperaturama osmotskog rastvora (40 i 60°C) i koncentraciji osmotskog rastvora (50 i 65%) (Pavkov et al., 2021)

3.4. Matematičko modelovanje kinetike sušenja

Matematički modeli kinetike sušenja u naučnoj literaturi se razvijaju za predviđanje kinetike prenosa mase i energije tokom procesa sušenja. U literaturi se mogu konstatovati tri pristupa modelovanju kinetike sušenja voća: teorijski, poluteorijski i empirijski (*Toğrul, 2010; Diamante, 2010, Pavkov et al., 2006*).

Većina teorijskih pristupa modelovanju procesa sušenja zasnovana je na nizu pretpostavki, a osnova je diferencijalna jednačina drugog *Fick*–ovog zakona (jednačina 3.6). Jednačina definiše nestacionarno polje posmatrane komponente sistema u prostoru. Da bi se jednoznačno rešila potrebno je definisati: granične uslove, početne uslove, geometrijske uslove i fizičke karakteristike materijala merodavne za proces transporta posmatrane komponente sistema (*Shi, 2002; Rastogi, 2002, Pavkov I., et al., 2006*). Engleski naučnik *Crank* (*1975*) je rešavanjem jednačine za geometrijska tela pravilnog oblika izveo analitičke izraze za difuziju molekula vode i rastvorka. Kao što je opisano u poglavlju 2.5.3. jednačine su ustanovljene za jednostavne geometrijske oblike: beskrajno ravnu ploču (*jednačina 2.24, 2.25, 2.26*), sferu (*jednačine 2.21 i od 2.29 do 2.36*), paralelopiped, beskrajni cilindar i cilindar. Na osnovu početnih i graničnih uslova izvedeni teorijski modeli se koriste za izračunavanje koeficijenata difuzije molekula vode (D_{ew}) i rastvorka (D_{es}, kod osmotskog sušenja). Na osnovu vrednosti izračunatih koeficijenata difuzije ocenjuje se uticaj izabranih parametara procesa sušenja na kinetiku prenosa mase. Osnovni stav koji se može izneti za teorijski pristup matematičkog modelovanja je da se pošlo od pretpostavke da je komad voća pravilnog geometrijskog oblika. Pri tome je takav geometrijski oblik tretiran pojedinačno. Uz čitav niz neophodnih pretpostavki pokušalo se doći do zaključaka koji će važiti za daleko veći broj komada voća. Rešavanje jednačina ovog tipa zahteva relativno složen matematički aparat.

Poluteorijski pristup matematičkog modelovanja kinetike sušenja nudi modele koji su uglavnom dobijeni pojednostavljenim rešenjem drugog *Fick*-ovog zakona. Modeli se mogu primenjivati samo u opsegu parametara sušenja za koji su izvedeni. Osnovna jednačina polu teorijskih modela promene srednje vlažnosti voća za konvektivno, vakuum i sušenje smrzavanjem u tankom sloju je *Lewis*-ova (jednačina 3.9). Izvedena je na osnovu pretpostavke da je tokom sušenja poroznih higroskopnih materijala u periodu opadajuće brzine sušenja, brzina promene vlažnosti proprcionalna razlici trenutne vlažnosti materijala i vrednosti vlažnosti materijala koji se nalazi u ravnoteži sa fluidom za sušenje:

$$\frac{d\omega}{dt} = -k(\omega_\tau^s - \omega_{eq}^s) \tag{3.9}$$

Nakon integracije jednačine:

$$MR = \frac{\omega_\tau^s - \omega_{eq}^s}{\omega_o^s - \omega_{eq}^s} = \exp(-k\tau) \tag{3.10}$$

gde je: MR – bezdimenzionalana vlažnost (-); ω_0^s - početna vlažnost materijala izražena u odnosu na suvu bazu (kg_w/kg_{sm}), ω_τ^s -vlažnost materijala u vremenskom trenutku τ izražena u odnosu na suvu bazu (kg_w/kg_{sm}) ω_{eq}^s – ravnotežna vlažnost materijala izražena u odnosu na suvu bazu (kg_w/kg_{sm}), k – konstanta brzine sušenja (s^{-1}) τ - vreme sušenja (s).

Model *Lewis* –a (jednačina 3.9), nije precizan, ima tendenciju precenjivanja brzine sušenja u početnim fazama sušenja, dok sa druge strane potcenjuje vrednosti pri kraju procesa sušenja. Kao korekcija *Lewis*-ovog modela predloženi je model *Page* – a:

$$MR = \frac{\omega_{\tau}^{s} - \omega_{eq}^{s}}{\omega_{o}^{s} - \omega_{eq}^{s}} = \exp\left(-k\,\tau^{n}\right) \tag{3.11}$$

Uvođenje empirijskog parametra (n) u jednačinu modela nema fizičko opravdanje, on nema fizičko značenje u procesu sušenja. Uvođenjem ovog parametra opravdano je boljem aproksimiranjem eksperimentalnih rezultata, mada je poređenje uticaja pojedinih parametara sušenja (temperatura, brzina vazduha, pritisak i dr) otežana jer se dva parametra jednačine, konstanta sušenja „k“ i eksponent „n“ ne menjaju na isti način, odnosno ne rastu i opadaju istovremeno.

Modifikovani modeli *Page* – a, *Henderson and Pabis*, *Midilli* i drugi (tabela 3.1) razvijeni su kao pokušaj boljeg aproksimiranja eksperimentalnih rezultata sušenja voća. U literaturi pojedini autori nabrojane modele koji su pokušaj unapređenja *Lewis* modela nazivaju i empirijskim modelima (*Korsrilabut et al., 2010*; *Vega-Galvez et al., 2008; Singh i Gupta, 2007; Simal et al., 2005; Park, 2002a*).

Tabela 3.1. Pregled poluteorijskih i empirijskih modela kinetike konvektivnog sušenja u tankom sloju

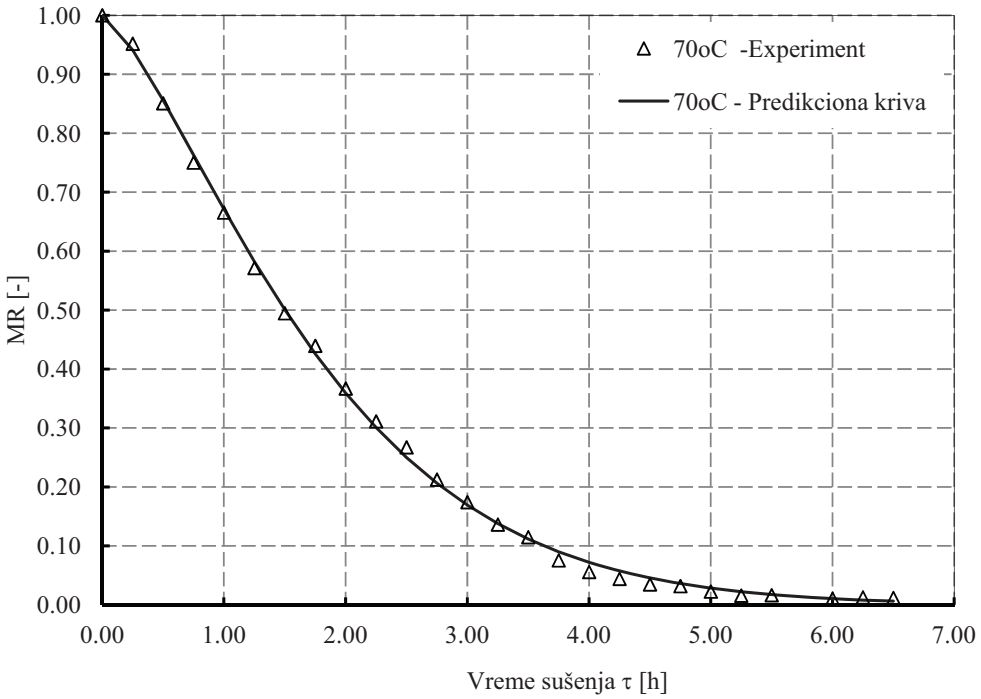
R.br.	Jednačina modela	Naziv modela	Literatura
Poluteorijski modeli:			
1.	$MR = \exp(-k\tau)$	Lewis (Newton)	*Lewis, 1921;*
2.	$MR = \exp(-k\tau^{n})$	Page	*Page, 1949*
3.	$MR = \exp(-(k\tau)^{n})$	Modifikivana Page	*Overhults, et al., 1973*
4.	$MR = a\exp(-k\tau)$	Henderson and Pabis	*Henderson i Perry, 1976*
5.	$MR = a\exp(-k\tau) + c$	Logarithmic	*Yagcioglu, et al., 1999*
6.	$MR = a\exp(-k_0\tau) + b\exp(-k_1\tau)$	Two -term exponential	*Henderson, 1974*
7.	$MR = a\exp(-k\tau)^{n} + b\tau$	Midilli	*Midilli, et al., 2002.*
8.	$MR = a\exp(-k_0\tau) + (1-a)\exp(-k_1 b\tau)$	Diffusin approach	*Kassem, 1998*
9.	$MR = a\exp(-k_0\tau) + (1-a)\exp(-k_1\tau)$	Verma	*Verma, et al., 1985*
10.	$MR = a\exp(-k_0\tau) + b\exp(-k_1\tau) + c\exp(-k_2\tau)$	Modified Henderson and Pabis	*Karathanos, 1999*
11.	$MR = a\exp(-c(\tau / L^{2}))$	Simplified Ficks diffusion (SFFD) equation	*Diamente i Munro, 1991*
12.	$MR = \exp(-k(\tau / L^{2})^{n})$	Modified Page eguation - II	*Diamente i Munro, 1993*
Empirijski modeli:			
13.	$\ln(-\ln MR) = a + b(\ln\tau) + c(\ln\tau)^{2}$	Diamante	*Diamente, et al., 2010*
14.	$MR = a + b\tau + c\tau^{2}$	Wangh and Singh	*Wang i Singh, 1978*
15.	$MR = a - b\cdot\exp\left[-(k\cdot\tau^{n})\right]$	Weibull	*Babalis, 2006*

Empirijski modeli direktno povezuju vlažnost sa vremenom sušenja i njihovi parametri nemaju fizičko značenje. Među ovim modelima širu primenu su našli modeli *Wang and Singh*, *Diamante* i *Weibull*. Pojedini istraživači koriste poluteorijske modele kinetike konvektivnog sušenja u tankom sloju za modelovanje kinetike osmotskog sušenja u gustom nepokretnom sloju (*Park et al., 2002b*).

Prikazi modela kinetike sušenja u tankom sloju u literaturi su brojni. Većina istraživača poredi modele među sobom sa ciljem pronalaženja modela koji će najbolje aproksimirati eksperimentalne rezultate promene srednje vlažnosti voća u vremenu sušenja u zavisnosti od parametara procesa. U tabeli 3.1 je dat prikaz poluteorijskih i empirijskih modela koji se najčešće koriste za matematičko opisivanje krivih kinetike konvektivnog sušenja, vakuum sušenja i sušenja smrzavanjem voća sa opšte prihvaćenim literaturnim nazivom modela.

Primer matematičkog modelovanja kinetike konvektivnog sušenja jagode poluteorijskim modelom prikazan je na slici 3.5 (Pavkov, et al, 2018a). Eksperimentalne vrednosti promene bezdimenzione vlažnosti (MR) aproksimirane su predikcionom krivom dobijenom iz *Page* modela (jednačina 3.11).

$$MR = \frac{\omega_\tau^s - \omega_{eq}^s}{\omega_o^s - \omega_{eq}^s} = \exp(-k\,\tau^n) = \exp\left(-(-0{,}3988)\tau^{1{,}3599}\right) \tag{3.12}$$



Slika 3.5. Matematičko modelovanje bezdimenzione vlažnosti (MR) jagode pri konvektivnom sušenju za temperaturu vazduha 70^{o}C i brzinu vazduha 1,0 m/s (Pavkov et al, 2018a)

Transformacijom jednačine (3.12), uz poznavanje inicijalne vlažnosti jagode i ravnotežne vlažnosti, moguće je u svakom vremenskom trenutku procesa sušenja izračunati vlažnost materijala:

$$\omega_\tau^s = \left[\left(\omega_0^s - \omega_{eq}^s\right) \cdot \left(exp^{(-0{,}3988\tau)^{1{,}3599}}\right)\right] + \omega_{eq}^s \tag{3.13}$$

S obzirom da su vrednosti ravnotežne vlažnosti male, mogu se zanemariti ($\omega^s_{eq} = 0$), pa model (jednačina 3.13) dobija pojednostavljen oblik koji sa dovoljnom tačnošću izračunava vlažnost jagode u izabranom vremenskom trenutku sušenja (τ):

$$\omega_\tau^s = \omega_0^s \cdot exp^{(-0{,}3988\tau)^{1{,}3599}} \tag{3.14}$$

Takođe, modeli se mogu koristiti za predikciju potrebnog vremena sušenja (τ) za željenu vlažnost materijala(ω^s_τ). U tom slučaju jednačina (3.13) transformiše se:

$$ln(MR) = -k\,\tau^n \tag{3.15}$$

$$\tau = \sqrt[n]{-\frac{\ln(MR)}{k}} = \sqrt[n]{-\frac{\ln\left(\frac{\omega_\tau^s - \omega_{eq}^s}{\omega_0^s - \omega_{eq}^s}\right)}{k}} = \sqrt[1{,}3599]{-\frac{\ln\left(\frac{\omega_\tau^s - \omega_{eq}^s}{\omega_0^s - \omega_{eq}^s}\right)}{0{,}03988}} \tag{3.16}$$

gde je: MR – bezdimenzionalana vlažnost (-); ω_0^s - početna vlažnost materijala izražena u odnosu na suvu bazu (kg_w/kg_{sm}), ω_τ^s -vlažnost materijala u vremenskom trenutku τ izražena u odnosu na suvu bazu (kg_w/kg_{sm}) ω_{eq}^s – ravnotežna vlažnost materijala izražena u odnosu na suvu bazu (kg_w/kg_{sm}), k = -0,3988 (h^{-1}) konstanta brzine sušenja, τ - vreme sušenja (h), n = 1,3599 – eksponent modela.

Kao što je rečeno, za svaku kombinaciju procesnih parametara izračunavaju se koeficijenti modela. U cilju postizanja univerzalnosti modela, odnosno da sa izračunatim koeficijentima modela pokrije se što veći broj kombinacja parametra procesa sušenja u literaturi je prisutan pristup proširivanja osnovnog poluteorijskog modela sa bezdimenzionim veličinama procesnih parametra sušenja. U radu *Pavkov* (2012) urađeno je direktno modelovanje vrednost vlažnosti četvrtina kruške koje su sušene kombinovanom tehnikom sušenja, osmotki + konvektivno. Autor proširuje Handeron i Pabis model sa parametrima osmotskog i konvektivnog sušenja, tako da dobija jedan model koji pokriva „polje“ između minimalnih i maksimalnih parametara procesa sušenja.

$$\omega^s = a \cdot \exp\left[-k \cdot \tau_k \cdot \left(\frac{t_{k1}}{t_{k1(ref)}}\right)^{n_1} \cdot \left(\frac{v_v}{v_{v(ref)}}\right)^{n_2}\right] \cdot \left(\frac{t_r}{t_{r(ref)}}\right)^{n_3} \cdot \left(\frac{C_r}{C_{r(ref)}}\right)^{n_4} \tag{3.17}$$

gde je: ω^s –vlažnost voća u odnosu na suvu bazu tokom konvektivnog sušenja (kg_w/kg_{sm}); τ_k – vreme konvektivnog sušenja (h); t_{k1} – temperatura vazduha (^oC); $t_{k1(ref)}$ – referentna temperatura vazduha (^oC); v_v – brzina kretanja vazduha ispred sloja materijala (m/s); $v_{v(ref)}$ – referentna brzina kretanja vazduha ispred materijala (m/s); t_r – temperatura rastvora (^oC); $t_{r(ref)}$ – referentna temperatura rastvora (^oC); C_r – koncentracija rastvora (^oC); $C_{r(ref)}$ – referentna koncentracija rastvora (^oC); *a, b, c* – konstante funkcije (-); *k* – konstanta sušenja (min^{-1}); n_1, n_2, n_3, n_4 – eksponenti funkcije (-).

Primer poluteorijskog pristupa za osmotsko sušenje voća u obliku tankih diskova su jednačine 3.18 i 3.19 koje predlažu *Rastogi et al.,* (*2002*) u obliku:

$$MR = 1 - 4 \cdot \left(\frac{D_{ew} \cdot \tau}{\pi \cdot L^2} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{3.18}$$

$$SG = 1 - 4 \cdot \left(\frac{D_{es} \cdot \tau}{\pi \cdot L^2} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{3.19}$$

gde je: *MR* – bezdimenziona vlažnost (-); *SG* –povećanje suve materije (kg_{sm}/kg_{ism}); D_{ew}, D_{es} – koeficijent difuzije: vode, rastvorka (m^2/s); *L* – polovina debljine beskrajne ravne ploče (m); τ - vreme (s).

Takozvani procesni model koji su izveli *Panagiotou et al.* (*1998*) je još jedan primer ovog pristupa modelovanju kinetike osmotskog sušenja. On nudi kompromis između teorijskog i empirijskog pristupa. Uzimajući u obzir faktore koji utiču na brzinu prenosa mase, autori su postavili teorijski model kinetike osmotskog sušenja voća (jednačina 3.20). Parametri jednačine WL_{eq} i K_{WL} su određeni aproksimiranjem eksperimentalnih rezultata merenja gubitka vode nelinearnim funkcijama (3.20) i (3.21):

$$WL = WL_{eq} \cdot \left[1 - \exp(-K_{WL} \cdot \tau) \right] \tag{3.20}$$

$$WL_{eq} = Y_{eo} \cdot \left(\frac{C_r}{100} \right)^{Y_{eC}} \cdot \left(\frac{t_r}{100} \right)^{Y_{et}} \tag{3.21}$$

$$K_{WL} = K_o \cdot \left(\frac{C_r}{100} \right)^{K_C} \left(\frac{t_r}{100} \right)^{K_t} \cdot \left(\frac{d}{10} \right)^{K_d} \cdot \left(1 + \left(\frac{v_r}{100} \right) \right)^{K_v} \tag{3.22}$$

gde je: *WL*, WL_{eq} – gubitak vode: u posmatranom trenutku, na kraju procesa sušenja (kg_w/kg); K_{WL} – konstanta gubitka vode (h^{-1}); τ - vreme (s); C_r – koncentracija osmotskog rastvora (kg_{sm}/kg); t_r – temperatura osmotskog rastvora (^oC); *d* - debljina uzorka voćnog tkiva (m); v_r – brzina strujanja osmotskog rastvora (m/s); Y_{eo}, K_o – koeficijenti funkcije; Y_{eC}, Y_{et}, K_C, K_t, K_d, K_v – eksponenti funkcije.

Model (jednačina 3.20) je razvijen da predvidi gubitak vode (*WL*) tokom osmotskog sušenja tri voćne vrste (jabuka, banana i kivi) pri različitim vrednostima uticajnih faktora. Voćno tkivo je pripremljeno u obliku cilindara različitih prečnika. Uticajni faktori su bili: koncentracija, temperatura i brzina strujanja rastvora, vrsta rastvorka i prečnik komada voća. Svi faktori su varirani u nekoliko nivoa. Rezultati provere modela ukazali su na dobro slaganje eksperimentalnih i proračunskih vrednosti gubitka vode. Istim pristupom autori su izveli i analitičke modele za povećanje suve materije tokom osmotskog sušenja (*SG* – jednačine 3.23, 3.24, 3.25) u tkivu voća, čija je provera, takođe pokazala dobro slaganje sa eksperimentalnim rezultatima (*Panagiotou et al.*, *1998*):

$$SG = SG_{eq} \cdot \left[1 - \exp\left(- K_{SG} \cdot \tau \right) \right] \tag{3.23}$$

$$SG_e = y_{eo} \cdot \left(\frac{C_r}{100} \right)^{y_{eC}} \cdot \left(\frac{t_r}{100} \right)^{y_{et}} \tag{3.24}$$

$$K_{SG} = k_o \cdot \left(\frac{C_r}{100} \right)^{k_c} \cdot \left(\frac{t_r}{100} \right)^{k_t} \cdot \left(\frac{d}{10} \right)^{k_d} \cdot \left(1 + \left(\frac{v_r}{100} \right) \right)^{k_v} \tag{3.25}$$

gde je: *SG, SG_{kraj}* – povećanje suve materije: u posmatranom trenutku, na kraju procesa sušenja (kg_{sm}/kg); K_{SG} – konstanta funkcije povećanja suve materije (h^{-1}); τ - vreme (h); C_r – koncentracija osmotskog rastvora (kg_{sm}/kg); t_r – temperatura osmotskog rastvora (^oC); *d* - debljina uzorka voćnog tkiva (m); v_r – brzina kretanja osmotskog rastvora (m/h); y_{eo}, k_o – koeficijenti funkcije povećanja suve materije; y_{eC}, y_{et}, k_C, k_t, k_d, k_v – eksponenti funkcije povećanja suve materije.

Najjednostavniji empirijski model kinetike osmotskog sušenja je *Hawkes*–ov model, (jednačina 3.26 i 3.27). Upotrebljen je za fitovanje eksperimentom dobijenih podataka gubitka vode i povećanja suve materije osmotski sušenih listića jabuke (*Reppa, 1998*):

$$WL = a \cdot \tau^{0,5} \tag{3.26}$$

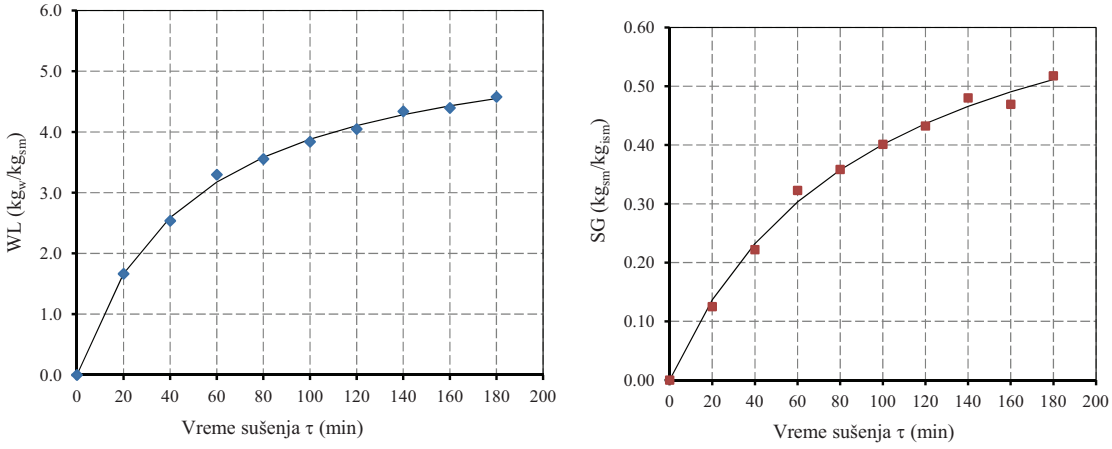
$$SG = a \cdot \tau^{0,5} \tag{3.27}$$

gde je: *WL* – gubitak vode (kg_w/kg); *SG* – povećanje suve materije (kg_{sm}/kg_{sm}); *a* – koeficijent funkcije; τ - vreme (h).

Empirijski *Page-ov* model je upotrebljen za modelovanje gubitka vode (WL) jednačina (3.28) i povećanja suve materije (SG) jednačina (3.29) tokom osmotskog sušenja polutki kasjija. Primer preciznosti predikcije kinetike modelovanih veličina izvedenim modelom dat je na slici 3.6. (*Pavkov, et al., 2021*):

$$WL = \frac{\tau}{k_{w1}+k_{w2}\tau} = \frac{\tau}{8{,}5438+0{,}1724\tau} \tag{3.28}$$

$$SG = \frac{\tau}{k_{s1}+k_{s2}\tau} = \frac{\tau}{120{,}99+1{,}2826\tau} \tag{3.29}$$



Slika 3.6. Matematičko modelovanje kinetike osmotskog sušenja gubitka vlage (WL) i povećanja suve materije (SG) polutki kajsija na temperaturama osmotskog rastvora 60°C i koncentraciji osmotskog rastvora 50% (Pavkov et al., 2021)

U radu *El-Aouar, A., A. et al.,* (*2006*) izveden je empirijski model koji povezuje modelovane komponente sistema sa uticajnim faktorima osmotskog sušenja. Upotrebljen je polinom (jednačina 3.24) za matematičko opisivanje promene vlažnosti u odnosu na vlažnu bazu, gubitka vode i povećanja suve materije tokom osmotskog sušenja kocki papaje (jednačina 3.30).

$$(\omega, WL, SG) = a + b_1 \cdot t_r + b_2 \cdot C_r + b_3 \cdot \tau + b_{12} \cdot t_r \cdot C_r + b_{13} \cdot t_r \cdot \tau + b_{23} \cdot C_r \cdot \tau \quad (3.30)$$

gde je: ω - vlažnost u odnosu na vlažnu bazu (kg_w/kg); *WL* – gubitak vode (kg_w/kg); *SG* – povećanje suve materije (kg_{sm}/kg); t_r,– temperatura osmotskog rastvora (^oC); C_r – koncentracija osmotskog rastvora (^oBx); τ - vreme (h), a, b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23} – koeficijenti funkcije.

3.5. Izbor matematičkog modela kinetike sušenja na osnovu statističkih pokazatelja

U literturi je ponuđen veliki broj različitih poluteorijskih i empirijskih modela kinetike sušenja (tabela 3.1) koji se upotrebljavaju za modelovanje. Odabir modela koji najbolje aproksimira eksperimentalne podatke obavlja se na osnovu vrednosti statističkih pokazatelja. Statistički pokazatelji koji se koriste u naučnoj literaturi su: koeficijent korelacije (R), koeficijent determinacije (R^2), hi-kvadrat (chi-square χ^2), srednja greška kvadrata (root mean square error, RMSE), srednja greška pristrasnosti (mean bias error, MBE) i koeficijent varijacije reziduala (coefficient residual variation, CRV) (*Diamante et al., 2010; Kaleta i Gornicki, 2010; Fang et al., 2009; Kingsly, 2007; Togrul, 2003, Pavkov et al., 2021*).

$$R = \sqrt{\frac{\Sigma_{i=1}^{N}(MR_{\exp(i)} - MR_{pre(i)})^2}{\Sigma_{i=1}^{N}(\overline{MR}_{\exp} - MR_{\exp(i)})^2}} \quad (3.30)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\Sigma_{i=1}^{N}(MR_{\exp(i)} - MR_{pre(i)})^2}{\Sigma_{i=1}^{N}(\overline{MR}_{\exp} - MR_{\exp(i)})^2} \quad (3.31)$$

$$\chi^2 = \frac{\Sigma_{i=1}^{N}(MR_{\exp(i)} - MR_{pre(i)})^2}{N - n} \quad (3.32)$$

$$MBE = \frac{1}{N}\Sigma_{i=1}^{N}(MR_{pre(i)} - MR_{\exp(i)}) \quad (3.33)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N}\Sigma_{i=1}^{N}(MR_{pre(i)} - MR_{\exp(i)})^2\right]^{1/2} \quad (3.34)$$

$$CRV = 100\% \cdot \frac{\sqrt{\chi^2}}{\overline{MR_{exp}}} \quad (3.35)$$

gde je: R – koeficijent korelacije (-), R^2 – koeficijent determinacije (-), χ^2 - hi – kvadrat (-); MBE - srednja greška pristrasnosti (-); RMSE - srednja greška kvadrata (-); CRV - koeficijent varijacije reziduala (%); $\overline{MR_{exp}}$ - aritmetička sredina eksperimentalnih bezdimenzinalnih vlažnosti, $MR_{exp(i)}$, $MR_{pre(i)}$ – bezdimenziona vlažnost: eksperimentalna vrednost, proračunska vrednost (-); *N* – broj merenja u kinetičkoj krivi; *n* – broj konstanti u matematičkom modelu, i – redni broj podatka.

Kod matematičkih modela kinetike sušenja veza između eksperimentalnih i matematički izračunatih je proporcionalna pa je koeficijent korelacije R u opsegu od 0 do 1. Povećanjem

korelacione veze eksperimentalnih i matematički dobijenih vrednosti koeficijent korelacije R se bliži 1. Koeficijent determinacije R^2, pokazuje intezivnost povezanosti eksperimentalnih i modelom dobijenih podataka. Koeficijent determinacije se izražava od 0% do 100% pri čemu veća vrednost koeficijenta determinacije označava veću povezanost promenljivih. Iako su koeficijenti R i R^2, najčešće korišćeni statistički pokazatelji aproksimacije kinetike sušenja matematičkim modelima koji imaju ne linearnu regresiju, pravilna upotreba R i R^2 je u slučaju linearne regresije. Zbog toga se pored R i R^2 izračunavaju i dopunski koeficijenti χ^2, MBE, RMSE i CRV. U slučaju ispitivanja modela kinetike sušenja pomoću MR vrednosti, χ^2 je bezdimenzionalna veličina. Niža vrednost hi-kvadrata označava bolju tačnost aproksimacije eksperimentalnih podataka odabranim matematičkim modelom. Srednja greška kvadrata RMSE, prikazuje devijaciju između eksperimentalnih i modelom izračunatih vrednosti. Niža devijacija snižava vrednost RMSE. Srednja greška prisrastnosti MBE je srednja vrednost greške između eksperimentalne vrednosti i vrednosti predviđene matematičkim modelom. Bolja predikcija matematičkog modela približava srednju grešku prisrastnosti vrednosti 0. Vrednost koeficijenta varijacije reziduala CRV < 20% ocenjuje model kao pouzdan za upotrebu.

4. KINETIKA PROCESA SUŠENJA VOĆA

Kinetika procesa sušenja opisuje dinamiku odvijanja fizičkih i hemijskih promena u voću u zavisnosti od procesnih parametara u toku trajanja procesa. Ne sme se zanemariti činjenica da je proces sušenja voća samo jedna od niza tehnoloških operacija u tehnologiji prerade voća sušenjem. U velikoj meri kinetiku procesa sušenja, pored osobina voća i primenjene tehnike sušenja, određuju pripremno-tehnološke operacije pre sušenja. Za sve tehnike sušenja je zajedničko prebiranje (uklanjanje prezrelih, nedovoljno zrelih, oštećenih i bolesnih plodova kao i primesa), pranje i ujednačavanje svežeg voća po veličini. Voćne vrste kao što su šljiva, malina, kupina, borovnica, ribizla, besemeno grožđe suše se u formi celog ploda, a jagoda reže. Koštunjave voćne vrste višnja i trešnja se iskoštičavaju i suše u formi celog ploda bez koštice. Krupnije voćne vrste zahtevaju rezanje i uklanjanje koštice ili semene kućice, tu spadaju kajsija, nektarina, breskva, kruška. Dunja se ljušti, a zatim reže. Jabuka se suši rezana sa semenom kućicom ili bez. Rezano voće može biti pripremljeno za sušenje u formi polovine, četrtine ili šestine celog ploda (kriške). Takođe, sveže voće se može rezati u pravilne geometrijske oblike malih dimenzija (kockice, diskovi, cilindri) što je uobičajeno za tehniku sušenja smrzavanjem radi skraćenja procesa sušenja. Dimenzije rezanog voća treba da obezbede ravnomerno sušenje u prihvatljivom vremenskom intervalu. Preporučljivo je da debljina rezanog voća bude do 30 mm, poželjno i manje, ostale dve dimenzije, dužina i širina mogu budu veće. Debljina $\leq$ 30 mm obezbeđuje difuzionu putanju molekula vode neophodnu za ravnomerno sušenje bez značajnijeg zapreminskog skupljanja i deformacija. Za tehniku konvektivnog i mikrotalasnog sušenja neophodno je rezano voće tretirati antioksidativnim predtretmanom (poglavlje 6), a zatim postaviti na lese (tacne) i komoru sušare. Za tehniku sušenja zamrzavanjem voće se prethodno zamrzava. Pored podataka o parametarima primenjene tehnike sušenja podaci o primenjenim pripremno-tehnološkim operacijama, početno stanje svežeg voća i krajnje stanje suvog voća, je neophodno za celokupno formiranje slike o kinetici procesa sušenja.

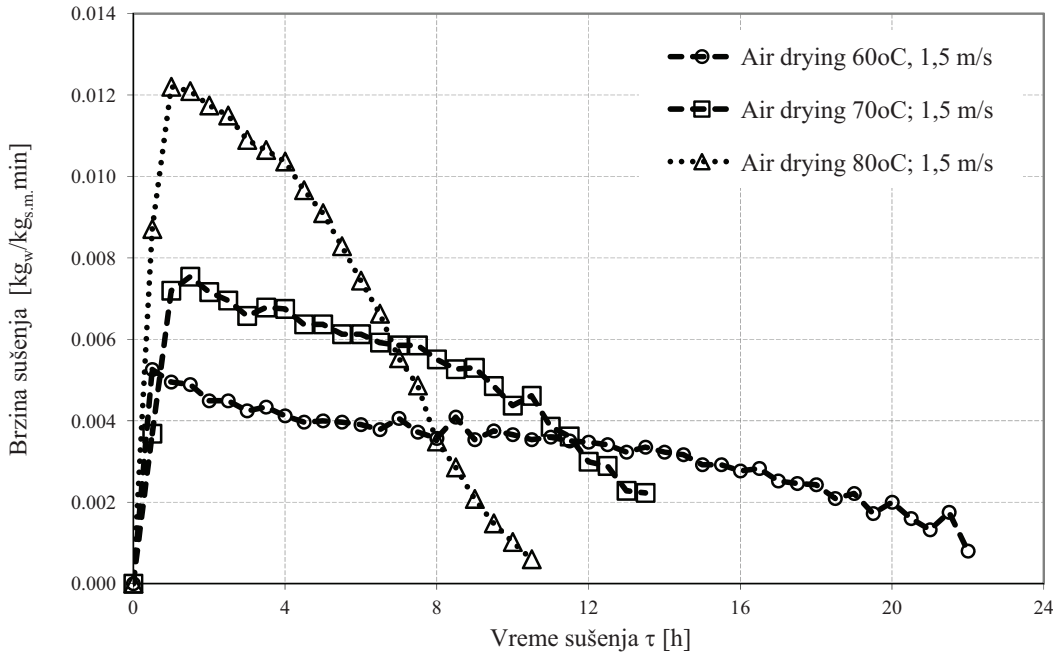
U okviru poglavlja prkazan je deo sopstvenih rezultata istraživanja različitih tehnika sušenja na laboratorijskim uređajima poluindustrijskog učinka, ali i drugih autora. Iz tog razloga prezentovani inženjerski podaci primenljivi su u praksi.

4.1. Konvektivno sušenje voća

Konvektivno sušenje je najčešća tehnika sušenja voća, pogodna je za većinu voćnih vrsta kao jedina tehnološka operacija ili u kombinaciji sa drugim tehnikama sušenja. Autori *Pavkov et al.* (2017a) obavili su istraživanje kinetike konvektivnog sušenja borovnice (*Vaccinium corymbosum*). Prosečna vlažnost svežih borovnica je iznosila 4,55 kg_w/k_{sm} (82,0 $\%_{wb}$), a prosečne dimezije plodova pre sušenja: dužina 15,90 mm, širina 15,47 mm i debljina 10,69 mm.

Borovnice su sušene konvektivno na tri vrednosti temperature vazduha (60, 70 i 80^{o}C) i dve brzine strujanja vazduha ispred sloja materijala (0,5 i 1,0 m/s), protok vazduha kroz komoru sušare iznosio je 162 m^3/h i 324m^3/h. Masa svežih plodova za jednu kombinaciju faktora 1,8 kg, a specifično opterećenje lesa je iznosilo 3,52 kg/m^2. Plodovi su sušeni do krajnje vlažnosti 0,26 kg_w/k_{sm} (20,6%$_{w.b.}$). Na slici 3.3 (Poglavlje 3) date su kinetičke krive promene vlažnosti borovnica u zavisnosti od istraživanih faktora konvektivnog sušenja. Vreme sušenja se skraćuje sa porastom temperature vazduha za sušenje, a konačna vlažnost je dostignuta za 535, 890 i 2010 minuta za temperature vazduha 80, 70 i 60^{o}C i brzinu strujanja vazduha ispred sloja materijala 0,5 m/s, redom. Za veću brzinu strujanja vazduha ispred sloja materijala 1,5 m/s i temperature vazduha 80, 70 i 60^{o}C konačna vlažnost je postignuta za 480, 810 i 1265 minuta, redom. Povišenejm temperature vazduha sa 60oC na 80oC, vreme sušenja se skraćuje tri puta. Na višim temperaturama vazduha za sušenje povećava se pritisak pare unutar materijala, formiraju se mikropukotine na perikarpu borovnica što vodi lakšem prelazu vodene pare u okolni vazduh i bržem sušenju. Poseban značaj na brzinu sušenja imaju povišene temperature vazduha prilikom sušenja celih plodova voća sa nenarušenom strukturom perikarpa (sušenje šljive sa košticom). Uticaj temperature vazduha na kinetiku sušenja borovnice ispitali su Lopez et al. (2010). Eksperiment je urađen sa temperaturama vazduha od 50^{o}C do 90^{o}C pri konstantnoj brzini vazduha 2,0 m/s. Sušenje borovnice 90^{o}C do ravnotežne vlažnosti traje približno 300 min, dok je potrebno preko 1500 minuta sušenja vazduhom temperature 50^{o}C.

Na slici 4.1 prikazana je kinetička kriva brzine sušenja, na kojoj su primetna dva perioda sušenja, period povećanja brzine sušenja i period opadajuće brzine sušenja, koji je dominantan tokom celog procesa. Period konstantne brzine sušenja nije zabeležen.



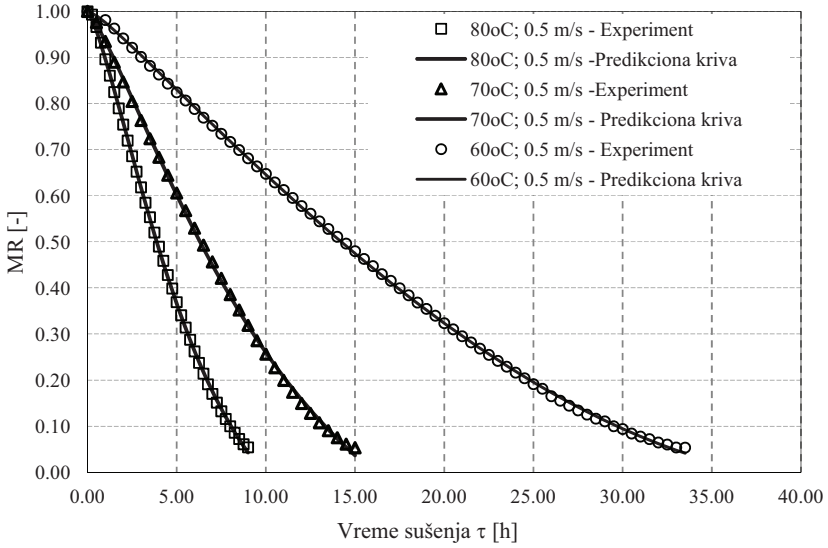
Slika 4.1. Kinetičke krive brzine sušenja borovnice za temperture vazduha 60, 70 i 80^{o}C i brzinu strujanja vazduha ispred sloja 1,5 m/s (Pavkov et al., 2017a)

U tabeli 2.8 (poglavlje 2) date su izračunate vrednosti koeficijenta difuzije vlage u zavisnosti od temperature i brzine vazduha za sušenje borovnice. Vrednosti se kreću od 9,67 x 10^{-12} m^2/s do 9,67 x 10^{-11} m^2/s. Rezultati pokazuju da se vrednosti D_{ew} povećavaju sa povišenjem vrednosti temperature i brzine vazduha za sušenje. Izračunate vrednosti energije aktivacije su 92,78 kJ/mol za brzinu strujanja vazduha za sušenje 1,5 m/s i 79,11 kJ/mol za brzinu vazduha za sušenje 0,5 m/s. *(Pavkov et al., 2017a).* Obavljeno je matematičko modelovanje dobijenih vrednost bezdimenzione vlažnosti (MR) borovnice tokom vremena sušenja sa 5 izabranih matematičkih modela (Newton, Page, Handerson and Pabis, Logarithmic, Midilli et al.). Na osnovu statističkih pokazatelja (R^2, $\chi^{2,}$ RMSE) model Midilli et al. ocenjen je kao najprecizniji za aproksimaciju eksperimentalnih vrednosti MR. Parametri modela su dati u tabeli 4.1. *(Pavkov et al, 2017).*

Tabela 4.1. Parametri Midilli et al. modela (Pavkov et al, 2017a)

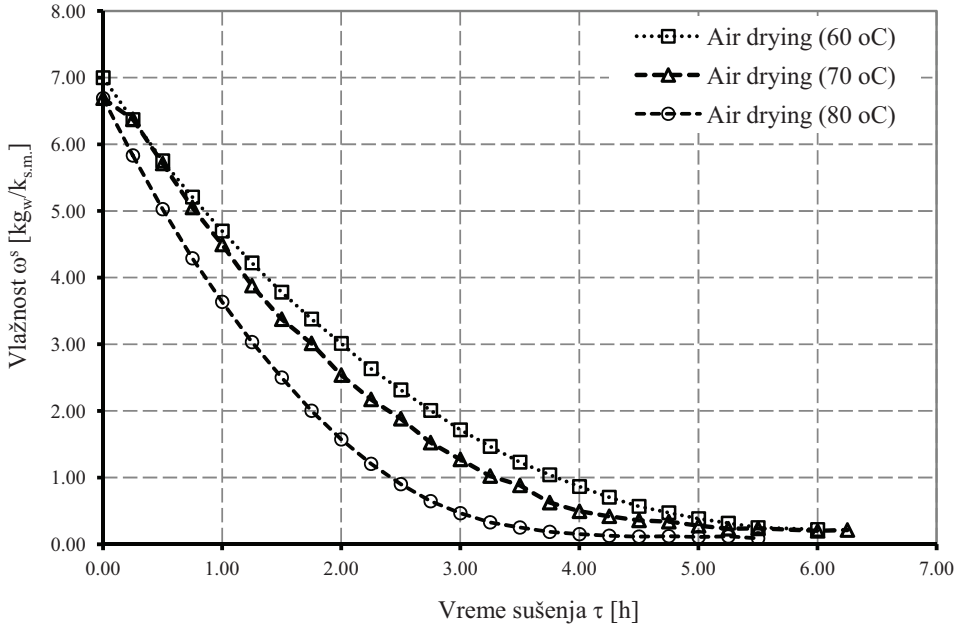
Midilli et al. model	Brzina vazduha (m/s)	Temperatura vazduha za sušenje			
		60°C			
		k	a	b	n
$MR = a\exp(-kt^n) + bt$	0,5	-0,053302	1	-0,079042	0,831829
	1,5	-0,049115	1	-0,011937	1,061867
		70°C			
	0,5	0,056566	1	-0,009186	1,266339
	1,5	0,063416	1	-0,010367	1,263571
		80°C			
	0,5	0,094989	1	-0,011632	1,36660
	1,5	0,126450	1	-0,014185	1,28856

Na slici 4.2. prikazana je preciznost predikcione krive dobijenog *Midilli et al.* modela za tri različite temperature vazduha i brzinu vazduha za sušenje ispred sloja materijala 0,5 m/s. Primetno je dobro slaganje proračunskih vrednosti bezdimenzione vlažnosti (MR) borovnica tokom vremena sušenja sa eksperimentalnim vrednostima. Model se sa velikom pouzdanošću može korisitit u praksi u okviru izvedenih parametara procesa sušenja.



Slika 4.2. Eksperimentalne vrednosti bezdimenzione vlažnosti (MR) i predikcione krive konvektivnog sušenja borovnice za tri temperature vazduha (60, 70 i 80°C) i brzinu strujanja vazduha 0,5 m/s (Pavkov et al., 2017b)

Autori *Pavkov et al.* (2018b) obavili su istraživanje kinetike konvektivnog sušenja listića jagode. Odabrani su sveži plodovi jagode sorte *Jolly* na početku pune tehnološke zrelosti pH = 3,24, prosečne mase 11,75 g, vlažnosti svežeg ploda 6,8 kg_w/kg_{sm} (87,14%$_{wb}$). Prosečne dimenzije svežeg ploda: dužina 31,55 mm, širina 30,1 mm, debljina 25,9 mm. Plodovi su posle pranja sečeni po uzdužnoj osi na listiće debljine 4,0 ±0,5 mm. Pre sušenja tretirani su 5% vodenim rastvorom askorbinske kiseline na 25°C u trajanju od 3 minuta. Listići su sušeni konvektivno na tri vrednosti temperature vazduha (60, 70 i 80°C) i jednoj brzini strujanja vazduha ispred sloja materijala (1,0 m/s), protok vazduha kroz komoru sušare iznosio je 324m^3/h. Specifično opterećenje lese svežim listićima jagode iznoslio je 1,56 kg/m^2. Dobijene kinetičke krive sušenja date su na slici 4.3. Vreme sušenja se skraćuje sa porastom temperature vazduha. Za dostizanje bezbedne vlažnosti za čuvanje 0,25 $kg_w/kg_{s.m.}$ (20%$_{wb}$) potrebno je 3,5 h (80°C); 5 h (70°C) i 5,5 h (60°C). Maksimalna brzina sušenja je postignuta pri temperaturi vazduha za sušenje 80°C, 0,0572 $kg_w/kg_{s.m.}$ min.



Slika 4.3. Kinetika konvektivnog sušenja listića jagode na na temperaturama vazduha 60, 70 i 80°C i brzini strujanja vazduha 1 m/s (Pavkov et al., 2018b)

U tabeli 4.2. prikazane su izračunate vrednosti koeficijenta difuzije vlage u zavisnosti od temperature vazduha. Vrednost energije aktivacije iznosila je 31,23 kJ/mol. Dobijene vrednosti su u saglasnosti sa rezultatima drugih autora (*Pitrowski et al., 2004, Doymaz, 2008; Gamboa-Santos et al., 2014a,b*).

Tabela 4.2. Vrednosti koeficijenta difuzije vlage za listiće jagode u zavisnosti od temperature vazduha za sušenje (Pavkov et al., 2018a)

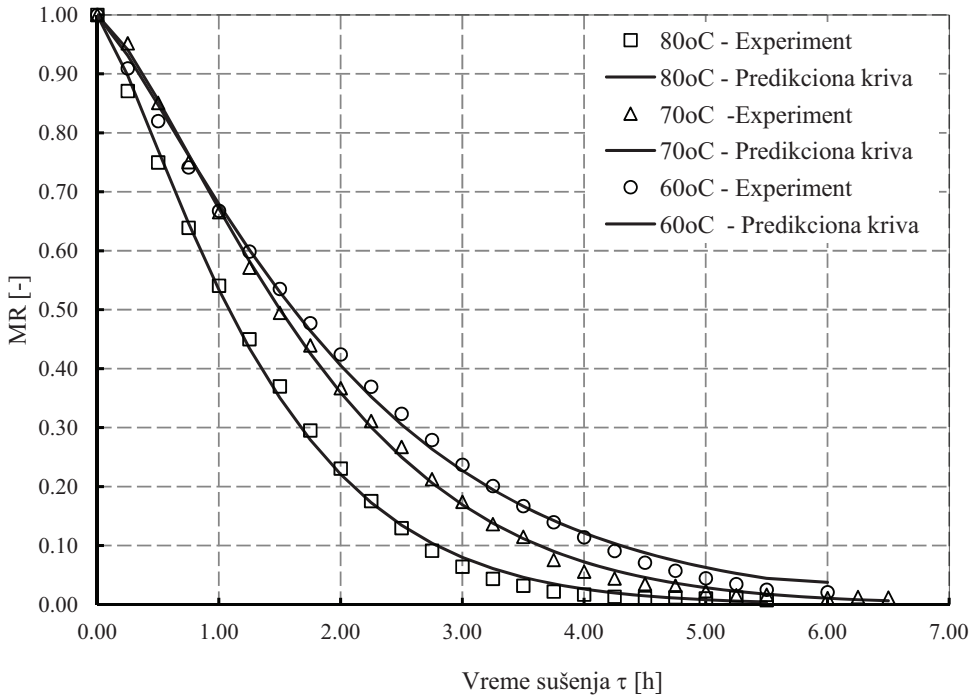
No.	Temperatura vazduha t (°C)	Koeficijent difuzije vlage D_{ew} (m^2/s)
1	60	8,29 x 10^{-10}
2	70	1,02 x 10^{-9}
3.	80	1,57 x 10^{-9}

U okviru rada obavljeno je matematičko modelovanje dobijenih vrednost bezdimenzione vlažnosti (MR) listića jagode u vremenu sa 5 izabranih matematičkih modela (Newton, Page, Handerson and Pabis, Logarithmic, Wang and Singh). Na osnovu statističkih pokazatelja (R^2, $\chi^{2,}$ RMSE) model *Page* ocenjen je kao najprecizniji za predikciju. Parametri modela su dati u tabeli 4.3. *(Pavkov et al., 2018b).*

Tabela 4.3. Parametri Page modela (Pavkov et al., 2018b)

Page model	Temperatura vazduha					
	60 °C		70 °C		80 °C	
	k	n	k	n	k	n
$MR = \exp(-kt^n)$	-0.3868	1.2234	-0.3988	1.3599	-0.6269	1.2695

Na slici (sl. 4.4) prikazane su predikcione krive dobijenog *Page* modela za sve tri različite temperature vazduha. Na osnovu prikazanog dijagrama evidentna je predikcija sa visokom preciznošću i može se korisiti u praksi u okviru parametara u kojim je izveden.



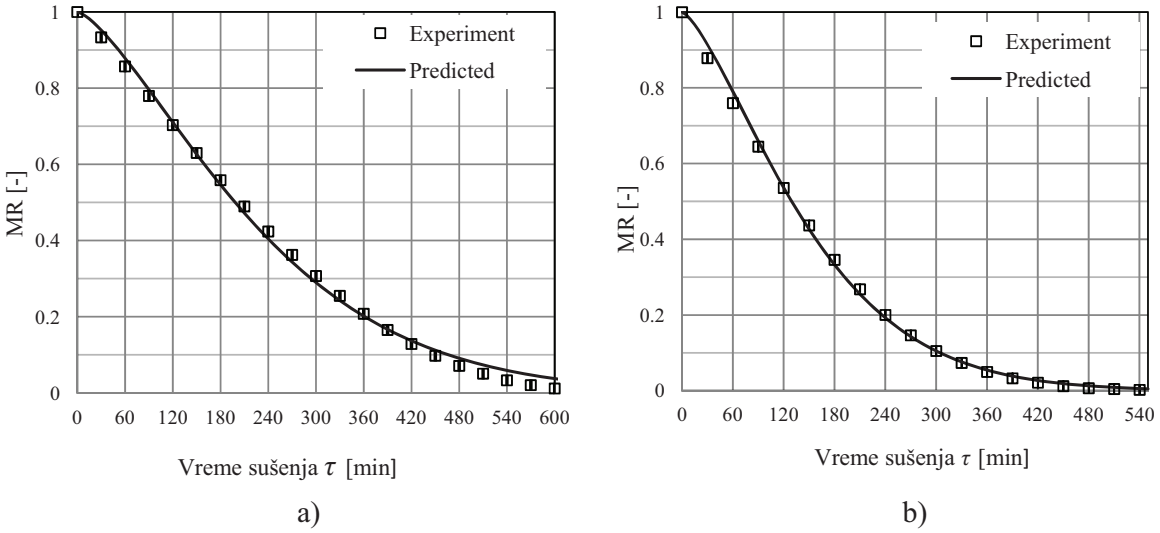
Slika 4.4. Eksperimentalne vrednosti bezdimenzione vlažnosti (MR) i predikcione krive konvektivnog sušenja listića jagode za tri temperature vazduha (60, 70 i 80°C) i brzinu vazduha 1,0 m/s (Pavkov et al., 2018b)

Autori Stamenković et al. (2019a) prikazali su rezultate konvektivnog sušenja kaše jagode na dve temperature vazduha (45 i 65°C) i jedna brzina vazduha ispred sloja materijala (1,5 m/s). Sveže jagode posle pranja vlažnosti 6,40 kg_w/k_{sm} (86,0%$_{wb}$) samlevene su pomoću blendera u formu kaše od koje je formiran na lesi sušare tanki sloj debljine 5 mm. Kao podloga na lesi je korišten papir za pečenje. Masa kaše za jednu kombinaciju faktora iznosila je 1,5 kg, sušena je do konačne vlažnosti 0,1 kg_w/k_{sm} (9,0%$_{w.b.}$). Za temperaturu vazduha 65°C konačna vlažnost je

dostignuta za 540 minuta, a za temperaturu vazduha 45°C potrebno je 600 minuta. Izračunati koeficijenti difuzije iznosili su $1{,}115\times10^{-8}$ m^2/s za temperaturu vazduha 45°C i 1,698 m^2/s za temperaturu vazduha od 65°C. Energija aktivacije iznosila je 18,806 kJ/mol. Obavljeno je matematičko modelovanje dobijenih vrednost bezdimenzione vlažnosti (MR) kaše jagode u vremenu sa 5 izabranih matematičkih modela (Extended Newton, Extended Page, Extended Handerson and Pabis, Extended Logarithmic, Extended Modified Page). Na osnovu statističkih pokazatelja (R^2, $\chi^{2,}$ RMSE) model *Extended Modified Page* ocenjen je kao najprecizniji za aproksimaciju eksperimentalnih vrednosti bezdimenzione vlažnosti (MR) kaše jagode tokom vremena sušenja. Parametri modela su dati u tabeli (*tab. 4.4*). Primenjen je pristup proširenja empirijskog modela Modified Page sa referentnom vrednošću temperature vazduha, gde je t_{ref}=45°C. Na ovaj način je dobijena univerzalnost modela, predikcione vrednosti MR se dobijaju za obe temperature vazduha za sušenje sa istim parametrima modela uz izmenu stvarne vrednosti temperature vazduha (t_e). Na slici *(sl. 4.5)* prikazani su eksperimentalni podaci bezdimenzione vlažnosti i predikcione vrednosti dobijene sa *Extended Modified Page* modelom.

Tabela 4.4. Parametri Extended Modified Page modela (Stamenković et al., 2019a)

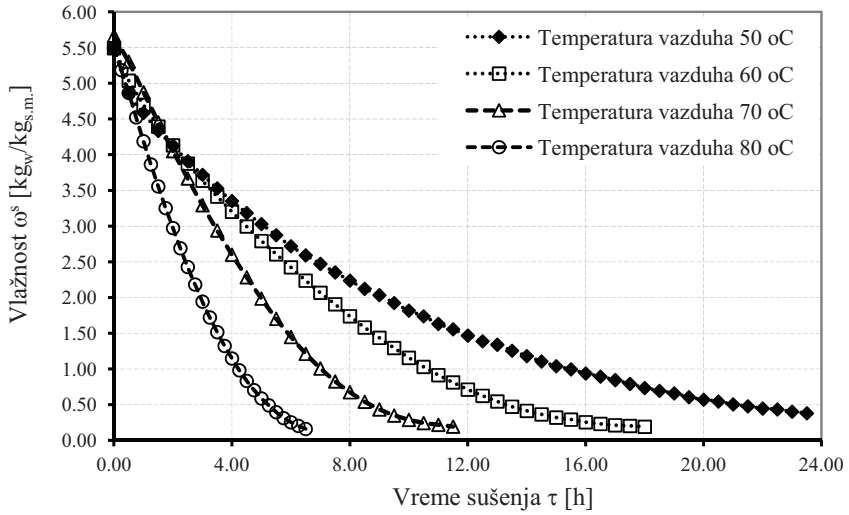
Extended Modified Page model	Parametri modela		
	k	n_1	n_2
$MR = \exp[-(k\tau)^{n1}\cdot(t_e/t_{ref})^{n2}]$	0,00388	1,40456	1,62799



Slika 4.5. Eksperimentalne vrednosti bezdimenzione vlažnosti (MR) i predikcione krive konvektivnog sušenja kaše jagode za temperaturu vazduha 45 °C (a) i 65°C (b) i brzinu vazduha 1,5 m/s (Stamenković et al., 2019a)

Malina spada u voćne vrste koje teško podnose tehniku konvektivnog sušenja, krajnji proizvod je nezadovoljavajućeg izgleda (*Sette et al., 2016; Kowalski et. al., 2016*). U radu Pavkov et al. (2017) obavljeno je istraživanje kinetike konvektivnog sušenja maline i uticaja parametara procesa na fizičke osobine krajnjeg proizvoda. Sveža malina sorte Polana je korišćena u istraživanju. Za svaku kombinaciju faktora upotrebljeno je 1,4 kg svežih plodova vlažnosti 5,49 $kg_w/kg_{s.m.}$ (84,6%$_{w.b.}$), sa dimezijama: dužina 22,60 mm, širina 21,05 mm i debljina 18,32 mm. Plodovi su sušeni u tankom nepokretnom sloju na temperaturama vazduha

50, 60, 70 i 80°C sa brzinom strujanja vazduha ispred sloja materijala 1,0 m/s i protokom vazduha kroz komoru sušare 324 m^3/h. Plodovi su sušeni do konačne vlažnosti 0,25 kg_w/kg_{sm} ($20\%_{w.b.}$). Na slici (sl. 4.6) prikazane su kinetičke krive promene srednje vlažnosti. Vreme trajanja procesa sušenja do konačne vlažnosti iznosilo je 360, 620, 915 i 1515 minuta pri temperaturama vazduha za sušenje 80, 70, 60 i 50°C za brzinu vazduha za sušenje ispred sloja materijala 1,0 m/s. Sa povećanjem temperature vazduha za sušenje od 50°C do 80°C vreme sušenja je skraćeno skoro 4 puta. Malina sušena na temperaturi vazduha nižim od 60°C potpuno je izgubila formu, a najmanje zapreminsko skupljanje maline zabeleženo je za temperaturu vazduha za sušenje 70°C gde su plodovi zadržali svoju prirodnu formu. Pri povišenim temperaturama (>60°C) vazduha nastaju veće brzine sušenja gde dolazi do brzog otpuštanja vlage na površini ploda i učvršćenja strukture koja zadržava formu svežeg ploda do kraja procesa sušenja.



Slika 4.6. Kinetika konvektivnog sušenja maline na temperaturama vazduha 50, 60, 70 i 80°C i brzini strujanja vazduha 1,0 m/s (Pavkov et al., 2017)

Koeficijent difuzije računat pomoću jednačine (2.19, poglavlje 2) dat je u tabeli (tab. 4.5) za sve vrednosti temperatura vazduha. Vrednosti D_{ew} rastu sa povišenjem temperature vazduha za sušenje i kreću se u rasponu vrednosti od 5,27 x 10^{-10} do 1,94 x 10^{-9} m^2/s. Vrednost energije aktivacije, računato jednačinom (2.37, poglavlje 2) iznosi 42,35 kJ/mol *(Pavkov et al., 2017)*.

Tabela 4.5. Vrednosti koeficijenta difuzije vlage za malinu u zavisnosti od temperature vazduha za sušenje (Pavkov et al., 2017)

Temperatura vazduha (°C)	Brzina vazduha (m/s)	*Koeficijent difuzije vlage D_{ew}* (m^2/s)
50	1,0	$5{,}27x10^{-10}$
60	1,0	$8{,}11x10-^{10}$
70	1,0	$1{,}41x10^{-09}$
80	1,0	$1{,}94x10^{-09}$

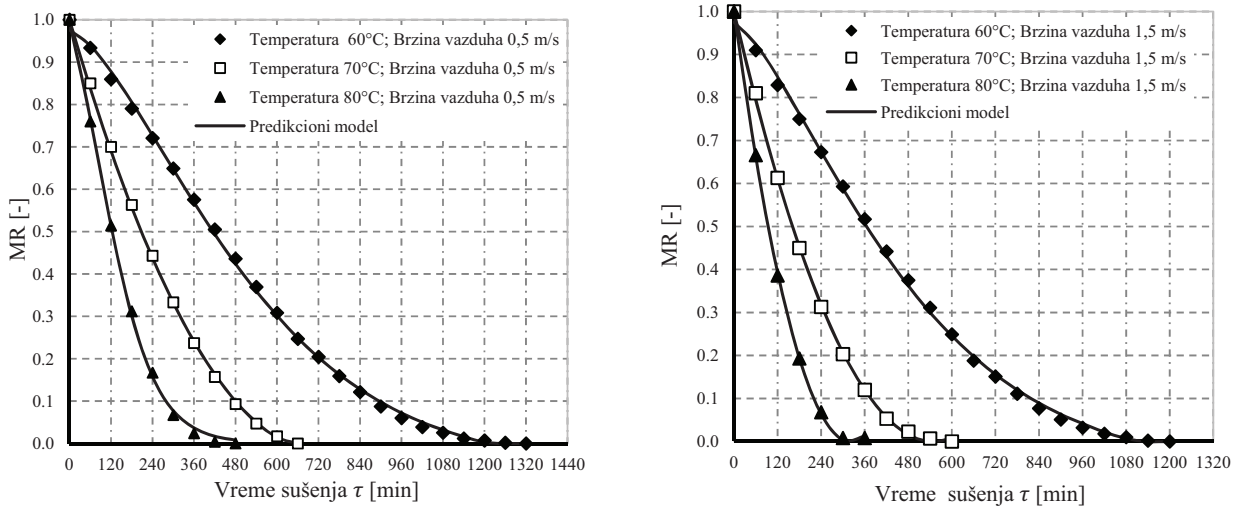
U tabeli 4.6. prikazani su parametri predikcionih modela promene bezdimenzione vlažnosti tokom konvektivnog sušenja maline sorte Polana na temperaturama vazduha 60, 70 i 80°C,

brzinama strujanja vazduha ispred sloja materijala 0,5 m/s i 1,5 m/s i konačnu vlažnost 0,11 kg_w/kg_{sm}. Modeli su ocenjeni na osnovu statističkih pokazatelja preciznosti (R, R^2, χ^2, RMSE, MBE), a kao najprecizniji od ukupno 14 proverenih modela u zavisnosti od režima sušenja istakli su se Midili, Wang and Singh i Logistic (*Stamenković et al., 2021*).

Tabela 4.6. Parametri predikcionih modela (Stamenković et al., 2021)

Brzina vazduha (m/s)	Temperatura vazduha (^oC)	Predikcioni model	a (-)	b (-)	k (min^{-1})	n (-)
0,5	60	Midili	0,9757	-0,0020	0,0358	1,4915
	70	Wang and Singh	-0,1683	0,0070	-	-
	80	Logistic	0,3361	1,3296	0,7738	-
1,5	60	Midili	0,9750	-0,0026	0,0506	1,4027
	70	Wang and Singh	-0,2178	0,0118	-	-
	80	Wang and Singh	-0,3725	0,0346	-	-
Midili-Kucuk: $MR = a\exp(-k\tau)^n + b\tau$						
Wang and Singh: $MR = a + b\tau + c\tau^2$						
Logistic: $MR = b/(1 + a\exp(k\tau))$						

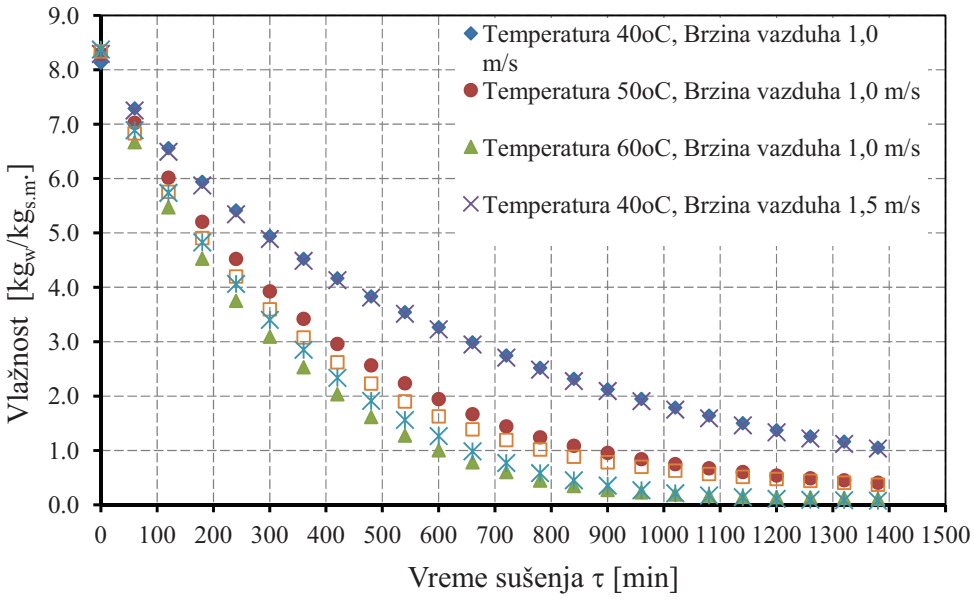
Midili model najbolje aproksimira krive kinetike sušenja pri temperaturi vazduha 60°C. Razlog je blago zagrevanje materijala u prvom periodu sušenja pri čemu brzina sušenja i temperatura uzorka sporije rastu i u odnosu na druge primenjene režime sušenja imaju najsporiji trend promene ovih veličina tokom prvog sata sušenja. Povišenjem temperature vazduha na 70°C, Wang and Singh model najbolje aproksimira eksperimentalne rezultate. Inteziviranjem procesa sušenja, povišenjem temperature vazduha model Logistic pokazuje veću tačnost u odnosu na model Wang and Singh pri brzini strujanja vazduha za sušenje 0,5 m/s. Tačnost dobijenih matematičkih modela prikazana je na slici 4.7.



a) b)

Slika 4.7. Eksperimentalne vrednosti bezdimenzione vlažnosti (MR) i predikcione krive konvektivnog sušenja maline za temperaturu vazduha 60, 70 i 80°C i brzinu strujanja vazduha 0,5 m/s (a) i 1,5 m/s (b) (Stamenković, Z., 2021)

Kajsija (*Prunus armeniaca*) je jedna od najcenjenijih koštičavih voćnih vrsta umerene klimatske zone zbog svog privlačnog izgleda i izrazite arome. Bogat je izvor antioksidanata, mineralnih materija i vitamina. Pored upotrebe u svežem stanju koristi se za razne oblike prerade (sušenje, zamrzavanje, želirani proizvodi, kompoti, sokovi i alkoholna pića). S obzirom na značajnu proizvodnju sveže kajsije u Srbiji i ekonomsku opravdanost prerade sušenjem od interesa je istražiti proces sušenja na domaćim sortama (*Vukoje et al., 2010; Keserović et al., 2018*). Auotri *Pavkov et al.*, (2021) istraživali su konvektivno sušenje ploda kajsije u formi jedne polovine celog ploda sorte Novosadska rodna. Plodovi su bili u punoj tehnološkoj zrelosti, vlažnost svežeg ploda 7,45 kg_w/kg_{sm} (88,16%$_{wb}$), i pH vrednost 3,03. Pre sušenja plodovi su oprani u svežoj vodi, a zatim sečeni na polutke metalnom oštricom po uzdužnoj brazdi ploda. Prosečne dimenzije polutki kajsija su bile: dužina 50,90 mm, širina 49,05 mm, debljina 22,05 mm, zapremina 27,58 cm^3. Polutke su raširene u tankom sloju na platsične perforirane tacne dimenzija 450 x 250 x 50 mm. Metalna komora od nerđajućeg čelika dimenzija 2000 x 320 x 510 mm (ili 0.327 m^3) korišćena je za sumporisanje suvim postupkom (SO_2). U komoru je postavljeno oko 40 kg polutki kajsija sa poroznošću 40% što je ostavilo 0,23 m^3 praznog prostora. Korišten je tehnički sumpor u prahu, 0,75 g sumpora po jednom kilogramu polutki je sagorevano u trajanju od 2h. Pripremljeni uzorci su postavljani u tunelsku sušaru sa lesama. Eksperiment sušenja zagrejanim vazduhom obavljen je na 40, 50, 60°C sa brzinom strujanja vazduha 1,0 i 1,5 m/s, protok vazduha kroz komoru sušare iznosio je 324 m^3/h i 486 m^3/h. Masa od 2 kg polutki kajsija poređana je u tankom sloju na četiri lese dimenzija 440 x 290 mm. Specifično opterećenje lese je bilo 4 kg polutki kajsija/m^2. Sferni deo polutki je položen na lesu, a sečeni deo polutke ukrenut je na gore. Sušenje jedne kombinacije faktora je trajalo 1340 minuta. Vlažnost polutki kajsija posle sumporisanja na početku procesa sušenja (τ = 0 minuta) iznosila je 8,295 kg_w/kg_{sm} (89,2%$_{wb}$). Na slici 4.8 prikazane su kinetičke krive promene srednje vlažnosti polutki kajsija u zavisnosti od temperature vazduha (40, 50 i 60°C) i brzine vazduha ispred sloja materijala (1,0 i 1,5 m/s).



Slika 4.8. Kinetika konvektivnog sušenja polutki kajsije na temperaturama vazduha 40, 50 i 60°C i brzinama strujanja vazduha 1,0 i 1,5 m/s (Pavkov et al., 2021)

Analizom kinetičkih krivih primetno je kod svih eksperimentalnih jednica da se povišenjem temperature vazduha i brzine vazduha proces sušenja intenzivira. Povišenjem temperature vazduha sa 40°C na 60°C proces se ubrzava 11,72%. U istraživanom opsegu parametara procesa sušenja, temperatura vazduha ima veći uticaj na brzinu sušenja od brzine vazduha ispred sloja.

Rezultati koeficijenta difuzije vlage (D_{ew}) polutki kajsija tokom konvektivnog sušenja prikazani su u tabeli (tab. 4.7). Može se zaključiti da se sa porastom temperature i brzine vazduha beleži povećanje vrednosti koeficijenta difuzije vlage. Primetno je da temperatura vazduha ima veći uticaj od brzine vazduha na porast vrednosti D_{eff}. Energija aktivacije za brzinu vazduha 1,0 m/s iznosi 46,093 kJ/mol, a za brzinu vazduha 1,5 m/s 49,93 kJ/mol. Sa porastom brzine vazduha intezivira se proces sušenja, što dovodi do povećane vrednosti energije aktivacije.

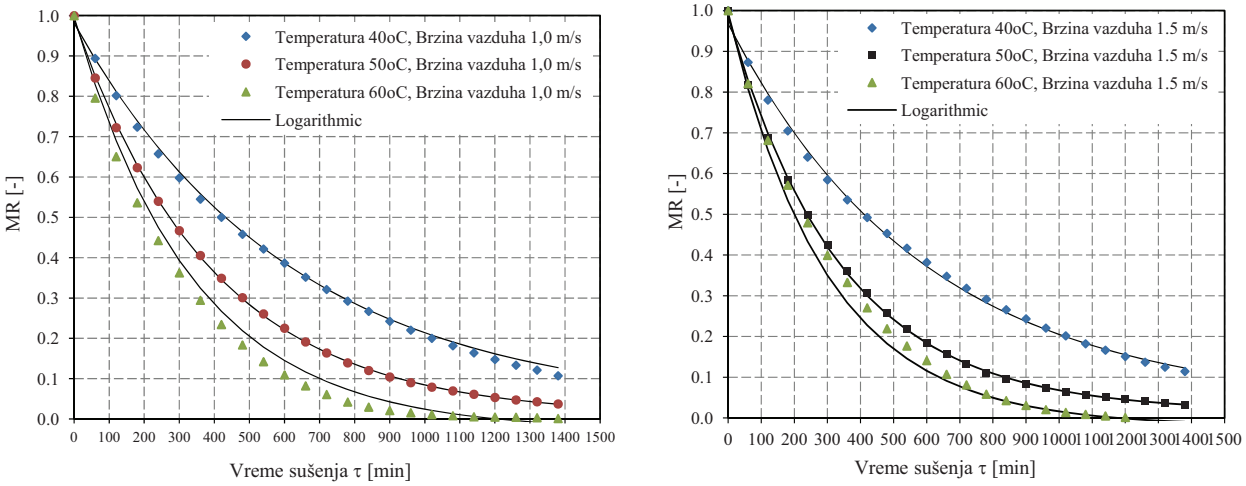
Tabela 4.7. Vrednosti koeficijenta difuzije vlage za polutke kajsije u zavisnosti od temperature i brzine vazduha za sušenje (Pavkov et al., 2021)

Brzina vazduha (m/s)	Temperatura vazduha (°C)	Koeficijent difuzije vlage D_{ew} (m^2/s)
1,0	40	$4{,}866 \times 10^{-11}$
	50	$7{,}918 \times 10^{-11}$
	60	$1{,}411 \times 10^{-10}$
1,5	40	$5{,}536 \times 10^{-11}$
	50	$8{,}268 \times 10^{-11}$
	60	$1{,}758 \times 10^{-10}$

Obavljeno je matematičko modelovanje dobijenih vrednost bezdimenzione vlažnosti (MR) polutki kajsija u vremenu sa 10 izabranih matematičkih modela (Newton, Page, Extended Handerson and Pabis, Modified Henderson and Pabis, Logarithmic, Modified Page, Verma, Two Term, Two Term Exponential, Diffusion Approach). Na osnovu statističkih pokazatelja (R^2, χ^2, RMSE, CRV) model *Logarithmic* ocenjen je kao najprecizniji za aproksimciju eksperimentalnih vrednosti bezdimenzione vlažnosti (MR) polutki kajsija tokom vremena sušenja u okviru parametara istraživanja. Parametri modela su dati u tabeli (*tab. 4.8*). Na slici *(sl. 4.9)* prikazani su eksperimentalni podaci bezdimenzione vlažnosti i predikcione vrednosti dobijene sa *Logarithmic* modelom.

Tabela 4.8. Parametri Logarithmic modela (Pavkov et al., 2021)

Logarithmic model	Brzina vazduha (m/s)	Temperatura vazduha (°C)	a (-)	b (-)	k (min^{-1})
MR=a exp(-kτ)+b	1.0	40	0,9558	0,0256	0,0016
		50	0,9828	0,0070	0,0025
		60	1,0250	-0,0287	0,0030
	1.5	40	0,9360	0,0313	0,0017
		50	0,9696	0,0155	0,0029
		60	1,0135	-0,0193	0,0034



(**a**) (**b**)

Slika 4.9. Eksperimentalne vrednosti bezdimenzione vlažnosti (MR) i matematički model kinetike konvektivnog sušenja polutki kajsija za temperaturu vazduha 40, 50 i 60°C i brzinu strujanja vazduha 1,0 m/s (a) i 1,5 m/s (b) (Pavkov et al., 2021)

Konvektivno sušenje voća u tankom nepokretnom sloju intenzivira se sa porastom temperature vazduha za sušenje ispred sloja materijala i brzine kretanja vazduha za sušenje u neporemećenom delu ispred sloja materijala. Autori *Torgrul i Pehlivan* (*2003*) su obavili istraživanja konvektivnog sušenja celog ploda kajsije na lesama. Prečnik plodova je bio 29,5-32 mm, a masa 15,38-15,77 g. Temperatura vazduha je bila 50, 60, 70 i 80°C, kao i brzina kretanja vazduha ispred sloja materijala od 0,2; 0,5; 1 i 1,5 m/s. Autori su na osnovu izračunatih koeficijenata difuzije vode (D_{ew}) ocenili da sa porastom oba uticajna faktora procesa raste brzina sušenja kajsije.

Ihns et al. (*2011*) su analizirali uticaj različitih temperatura vazduha pri sušenju tankih režnjeva kajsije na kinetiku sušenja, promenu boje, antioksidanse i sadržaj beta karotena. Eksperiment je obavljen na dva varijeteta kajsije, i to „*Southern Red*“ *i* „*Moorpak*“. Temperatura vazduha za sušenje je bila 60, 80 i 100°C dok je brzina strujanja vazduha ispred sloja materijala bila konstantna 0,2 m/s. Uzorci su sušeni do vlažnosti koja je iznosila 0,4 $kg_w/kg_{s.m}$. Za obe sorte kajsije brzina sušenja je rasla sa porastom temperature vazduha za sušenje. Na osnovu merenja promene boje autori zaključuju da sa porastom temperature sušenja smanjuje se ukupna promena boje. Rezultati merenja sadržaja beta karotena i antioksidanata u mezokarpu osušene kajsije ukazuju da su sa skraćenjem vremena sušenja promene manje u odnosu na svežu kajsiju.

Uticaj predtretmana na kinetiku konvektivnog sušenja breskve („*Shan-e-Punjab*“) istražili su *Kingsly et al.* (*2007*) poredeći kinetiku sušenja neblanširanih i blanširanog mezokarpa. Sveže breskve su iskoštičene i sečene na listiće debljine oko 3,5 mm. Blanširanje je obavljeno na temperaturi od 50°C u toku 2 minuta sa antioksidansima 1% kalijum-meta bisulfit i 1% aksorbinske kiseline. Na osnovu izračunatih efektivnih koeficijenata difuzije (D_{ew}) autori zaključuju da sa porastom temperature vazduha raste brzina sušenja. Takođe, upotrebom predtretmana (blanširanja), raste brzina sušenja u odnosu na neblanširano voće. Između upotrebljenih dodataka u rastvoru za blanširanje ne postoje statistički značajne razlike u odnosu na brzinu sušenja.

Uticaj dimenzija voća i osmotskog predtretmana na kinetiku konvektivnog sušenja ispitali su *Sankat et al.* (*1996*) na tkivu banane. Kolutovi oljuštene banane (*Cavendish*) isečeni su na debljinu 20, 10 i 5 mm. Kolutovi su podvrgnuti osmotskom predtretmanu sa rastvorom saharoze koncentracije 35, 50 i 65^{o}Bx na temperaturi 25^{o}C u trajanju od 36 sati. Sveži kolutovi i osmotski predtretirani kolutovi su sušeni u konvektivnoj sušari gde je temperatura vazduha za sušenje bila 40, 50, 60, 70 i 80^{o}C na konstantnoj brzini strujanja vazduha od 0,62 m/s. Na osnovu analize rezultata kinetike sušenja autori zaključuju da sa porastom temperature vazduha za sušenje i sa smanjenjem debljine kolutova raste brzina sušenja. Takođe, autori navode da sa porastom sadržaja šećera u tkivu banane smanjuje se brzina konvektivnog sušenja. U radu su prikazani rezultati merenja teksture i boje kolutova banane posle konvektivnog sušenja. Poredeći kolutove koji su sušeni bez i sa osmotskim predtretmanom pri istoj vlažnosti, tekstura i boja kolutova je bila značajno bolja kod kolutova koji su prethodno osmotski sušeni. Slične rezultate dobili su autori *Falade i Solademi* (*2010*) konvektivnim sušenjem kocki slatkog krompira različitih dimenzija.

Analiza profila vlažnosti i sadržaja šećera u tkivu kruške tokom konvektivnog sušenja u solarnoj sušari prikazana je u radu *Guine i Castro* (*2002*). Kao materijal korišćeni su plodovi kruške (sorta nije navedena) koji su oljušteni i postavljeni u konvektivnu sušaru. Temperatura vazduha za sušenje bila je 30, 40 i 50^{o}C. Kruške su sušene do vlažnosti 20%$_{wb}$, ukupno vreme sušenja je iznosilo 216 sati. Svakih 24 sata dva uzorka su upotrebljena za merenje profila vlažnosti i sadržaja šećera na prečnicima R, 3/4R, 1/2R i 1/4R (dimenzije plodova nisu navedene). Na osnovu analize rezultata merenja profil vlažnosti tkiva kruške u poprečnom preseku ploda je ujednačeniji tokom sušenja pri nižim temperaturama vazduha. Sadržaj šećera se tokom sušenja povećava u smeru kretanja vlage kroz tkivo. Na kraju sušenja najveći sadržaj šećera je izmeren u površinskom sloju, a najmanji u centru ploda.

Uticaj temperature vazduha za sušenje na vreme potrebno za redehidraciju istražili su P*erez i Schmalko* (*2009*) na ananasu. Mezokarp ananasa („*Cucurbita*“) sečen je u obliku diskova prečnika 20 mm i visine 25 mm. Sušenje je obavljeno u konvektivnoj sušari sa lesama na temperaturama vazduha od 50, 60 i 70^{o}C, brzina vazduha ispred sloja materijala iznosila je 2,5 m/s. Svi uzorci su sušeni do krajnje vlažnosti od 0,287 kg$_{w}$/kg$_{sm}$. Redehidracija je obavljena u vodi pri temperaturi ključanja, merena je zavisnost vremena redehidracije i promene vlažnosti. Ustanovljeno je da sa porastom temperature vazduha za sušenje raste vreme potrebno za redehidraciju suvog ananasa.

U radu *Vega-Galvez et al.* (*2008*) autori su na osnovu analize kinetičkih krivih konvektivnog sušenja listića jabuke („*Granny Smith*“) na različitim temperaturama vazduha za sušenje 40, 50, 60, 70 i 80^{o}C i brzini vazduha ispred sloja materijala 2 m/s, zaključili da ne postoji period konstantne brzine sušenja. Zapažen je samo period opadajuće brzine sušenja do ravnotežne vlažnosti. Takođe, konstatuju da sa povišenjem temperature vazduha za sušenje vreme sušenja se skraćuje. Do istog zaključka došli su *Guine i Castro* (*2002*) u toku konvektivnog sušenja tkiva kruške u obliku oljuštenog celog ploda u solarnoj sušari na temperaturama 30, 40 i 50^{o}C. U ovom slučaju su zbog male brzine sušenja i velikih dimenzija plodova karakteristični periodi izraženiji.

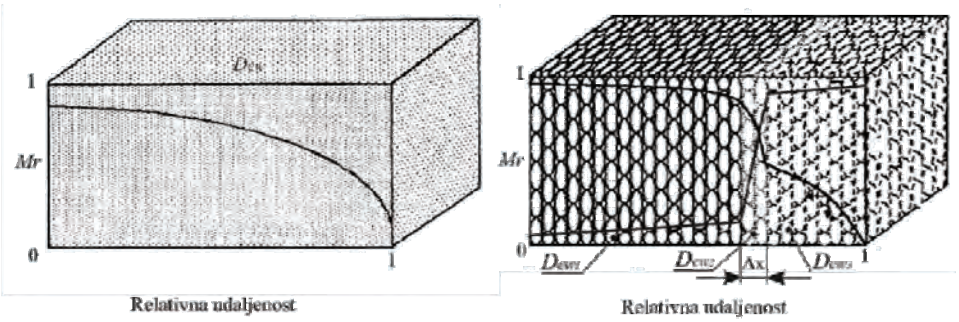
Pregledom dostupne literature iz oblasti sušenja voćnog tkiva nisu pronađeni rezultati merenja koji istražuju uticaj apsolutne vlažnosti vazduha na kinetiku sušenja. Autori *Voronjec i Antonijević* (*1996*) teorijski analiziraju potencijal vlažnog vazduha za sušenje u zavisnosti od

njegove apsolutne vlažnosti. Autori navode da vlažan vazduh niže temperature, ali i niže apsolutne vlažnosti može imati istu ili veću sposobnost izdvajanja vlage iz materijala od vazduha više temperature i apsolutne vlažnosti. Istraživanje uticaja temperature vazduha za sušenje, brzine vazduha za sušenje i apsolutne vlažnosti vazduha na kinetiku konvektivnog sušenja zrna kukuruza u elementarnom sloju kao jedan od faktora sušenja istražio je *Nedeljkov* (*1981*). Statističkom analizom je dokazan uticaj apsolutne vlažnosti vazduha na brzinu sušenja, sa porastom apsolutne vlažnosti vazduha opada brzina sušenja.

Na osnovu stavova u literaturi, može se zaključiti da su temperatura vazduha za sušenje i brzina vazduha za sušenje ispred sloja materijala dva najuticajnija faktora na kinetitku prenosa mase tokom konvektivnog sušenja voćnog tkiva. Pored njih takođe utiču: apsolutna vlažnost vazduha, dimenzije materijala, osobine tkiva, vrsta primenjenog predtretmana. Najveći broj naučnih radova istražuje kinetiku konvektivnog sušenja voćnog tkiva prethodno pripremljenog rezanjem osnovnog prirodnog oblika na pravilne geometrijske oblike ili diskove malih dimenzija.

4.2. Osmotsko sušenje

Sam mehanizam osmotskog sušenja nije u potpunosti razjašnjen kao ni promene koje nastaju u strukturi ćelija tkiva koje je podvrgnuto ovom procesu. Promena stanja ćelijske membrane nisu razmatrana u prvobitnim studijama, smatrano je da su koeficijenti difuzije, u biološkom materijalu, konstantni tokom procesa. Međutim, stanje ćelijske membrane se menja od delimične do potpune permabilnosti usled promena u njenoj strukturi. Ovakve promene utiču i na promenu vrednosti koeficijenta difuzije vode (D_{ew}) i rastvorka (D_{es}) tokom procesa. Objašnjenje promenljive vrednosti koeficijenta difuzije vode, kao dominantnog procesa, u biološkim materijalima predložili su *Rastogi et al.* (*2002*). Autori su uporedili razlike između mehanizama osmotskog kretanja vode iz homogenog (nebiološkog) i nehomogenog (biološkog) materijala, što je slikovito prikazano na slici (*sl.4.10*).



a) *b)*

Slika 4.10. Mehanizam osmotskog sušenja (Rastogi et al., 2002)
a) homogen – nebiološki materijal; b) nehomogen – biološki materijal
(D_{ew}, D_{ew1}, D_{ew2}, D_{ew3} – koeficijent difuzije vode (m^2/s); Mr – bezdimenziona vlažnost materijala (-); Δx – front dehidracije-sušenja)

U homogenom materijalu (*sl. 4.10a*) pretpostavlja se konstantna brzina difuzije vode (koeficijent difuzije D_{ew}) koja se javlja zbog ujednačenog gradijenta vlažnosti. U biološkim materijalima (*sl. 4.11b*) pretpostavlja se da se dehidracioni front (Δx) pomera ka središtu

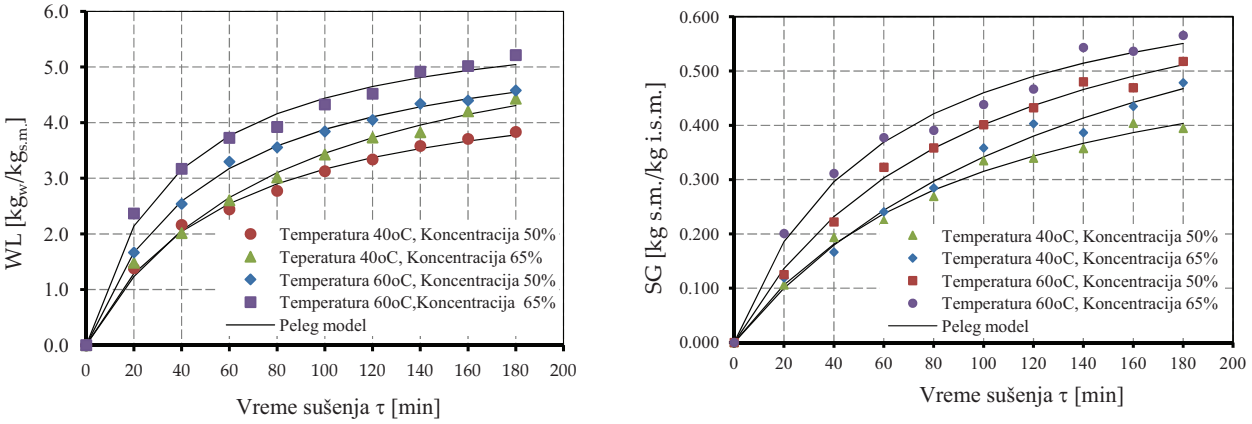
materijala tokom osmotskog sušenja. U području dehidracionog fronta dolazi do dezintegracije ćelijske membrane. Ovo rezultira stvaranju tri različite oblasti, gde svaka ima određene karakteristike. Voda difunduje iz centra materijala do fronta dehidracije, difuzija vode kroz front dehidracije i difuzija vode kroz dehidrirano područje u okolni rastvor. U početku voda difunduje iz spoljašnjeg sloja materijala u osmotski rastvor, što dovodi do povećanja osmotskog pritiska na površini. Kada osmotski pritisak dostigne kritičnu vrednost ćelijska membrana puca i skuplja se što ima za posledicu promenu ćelijske propustljivosti. Koeficijent difuzije vode kroz ove izmenjene ćelije je u svakom trenutku vremena obeležen sa D_{ew3}. Kako se proces nastavlja, front dehidracije se kreće ka centru materijala. U ovom frontu ćelije su u procesu dezintegracije, iz tog razloga brzina prenosa mase se naglo povećava. Na ovom preseku relativno velika količina vode napušta ćelije sa koeficijentom difuzije D_{ew2} ($D_{ew2} >> D_{ew3}$). Ćelije u centru materijala su još uvek neizmenjenog koeficijenta difuzije (D_{ew1}) koji je mnogo manji od koeficijenta D_{ew2} *i* D_{ew3}.

Brzina difuzije molekula vode iz voća zavisi od više faktora kao što su: temperatura i koncentracija osmotskog rastvora, osobina rastvoraka, vrste voća, pripremno tehnoloških operacija, dimenzija i oblika voća, masenih odnosa između materijala i osmotskog rastvora kao i brzine strujanja rastvora.

Stefanović i Urošević (*1995*) na osnovu obavljenih istraživanja osmotskog sušenja različitih voćnih vrsta zaključuju da sa porastom temperature i koncentracije šećera u rastvoru, raste i brzina prelaska molekula vode iz voća u rastvor. Povišenjem temperature rastvora omogućava se rad sa višim koncentracijama šećera i bitno olakšava odvijanje samog procesa zbog smanjenja viskoznosti rastvora. Sa druge strane, takođe se navodi da povišene temperature rastvora ubrzavaju neželjene enzimatske reakcije kojima se razaraju složena organska jedinjenja koja voću daju aromu, miris i specifičnu hranljivost.

Autori Pavkov et al. (2012, 2021) istražili su osmotsko sušenje ploda kajsije u formi jedne polovine celog ploda sorte „Novosadska rodna“. Plodovi su bili u punoj tehnološkoj zrelosti, vlažnost svežeg ploda 7,45 $kg_w/kg_{s.m.}$ (88,16%$_{wb}$), i pH vrednost 3,03. Pre sušenja plodovi su oprani u svežoj vodi, a zatim sečeni na polutke metalnom oštricom po uzdužnoj brazdi ploda. Prosečne dimenzije polutki kajsija su bile: dužina 50,90 mm, širina 49,05 mm, debljina 22,05 mm, zapremina 27,58 cm^3. Isečene polutke su podvrgnute suvom postupku sumporisanja u komori za sumporisanje. Korišten je tehnički sumpor u prahu, sagorevano je 0,75 g sumpora po jednom kilogramu polutki u trajanju od 2h. Posle postupka sumporisanja polutke su premeštane u osmotsku sušaru zapremine 0,034 m^3, sa cirkulacionom pumpom i razmenjivačem toplote. Radni fluid je bila saharoza rastvorena u destilovanoj vodi, maseni odnos osmotski rastvor: polutke kajsije 10:1. Osmotsko sušenje je obavljeno na dva nivoa temperature i koncentracije osmotskog ratvora, 40 i 60^oC; 50 i 65%. Oko 4 kg sumporisanih polutki kajsija postavljeno je u perforiranu metalnu korpu i potopljeno u rastvor. Sušenje je trajalo 3h sa konstantnom brzinom strujanja rastvora ispred sloja materijala 0,01033 m/s. Na slici 4.11a prikazana je kinetika gubitaka vode (WL) iz polutki kajsija tokom osmotskog sušenja. Posle 180 minuta procesa, najveći WL ostvaren je pri najvišim procesnim parametrima (60^oC, 65%) i iznosio je 5,214 kg_w/kg_{sm}, a najmanji 3,832 kg_w/kg_{sm} za najnižu temperaturu i koncentraciju osmotskog rastvora (40^oC, 50%). U toku prvih 60 minuta procesa, WL je najintezivniji. U odnosu na vlažnost polutki kajsija u početnom uzorku (8,304 $kg_w/kg_{s.m}$) izgubi se od 30% - 44% vode, a za ostalih 120 minuta 17-18%. Ukupno za 180 minuta osmotskog sušenja snizi se vlažnost u opsegu 47% do 62% u odnosu na početnu. U zavisnosti od procesnih parametara, najniža vlažnost posle 180

minuta procesa iznosi 3,187 kg_w/kg_{sm}. Kinetika povećanja suve materije (SG) prikazana je na slici 4.11b. Posle 180 minuta, u zavisnosti od procesnih parametara iznosilo je: 0,565 $kg_{sm./}kg_{ism.}$ (60^oC, 65%), 0,517 kg_{sm}/kg_{ism} (60^oC, 50%), 0,478 kg_{sm}/kg_{ism} (40^oC, 65%), 0,394 kg_{sm}/kg_{ism} (40^oC, 50%). Najintezivnije SG dešava se u prvih 40 minuta procesa, 0,311 kg_{sm}/kg_{ism} (60^oC, 65%), 0,222 kg_{sm}/kg_{ism} (60^oC, 50%), 0,193 kg_{sm}/kg_{ism} (40^oC, 50%) , 0,166 kg_{sm}/kg_{ism} (40^oC, 65%). Do kraja procesa kinetika SG se usporava.



(**a**) (**b**)

Slika 4.11. Kinetičke krive gubitka vode (WL) i povećanja suve materija (SG)tokom osmotskog sušenja polutki kasjija u zavisnosti od temperature (40 i 60^oC) i koncentracije rastvora (50 i 65%)

Matematičko modelovanje procesa omogućuje nam da izračunamo vrednosti traženih parametara za bilo koje posmatrano vreme. U tabeli 4.9. prikazani su rezultati konstanti osmotske dehidratacije Peleg-ovog modela za WL i SG. Generalno, Pelegov model sa izračunatim konstanatma sušenja pokazuje dobru predikciju eksperimentalnih podataka. Za modele WL vrednosti konstanti Peleg-ovog modela, k_{w1} i k_{w2} se smanjuju sa porastom temperature, dok sa porastom koncentracije osmotskog rastvora k_{w1} ne može se utvrditi zavisnost, a k_{w2} se smanjuje. Konstante k_{s1} i k_{s2} pri modelovanju SG, sa porastom temperature se smanjuju, a sa promenom koncentracije ne može se utvrditi zavisnost. Rezultati predikcije WL i SG sa Pelegovim modelom prikazani su na slici 4.12.

Tabela 4.9. Prametri matematičkog modela kinetike osmotskog sušenja gubitka vode WL (k_{w1}, k_{w2}) i povećanja suve materije SG (k_{s1}, k_{s2}) (Pavkov, et al., 2021)

Peleg model	Parametar	t (^oC)	C (%)	$k_{w1 \text{ or } s1}$	$k_{w2 \text{ or } s2}$
$WL = \frac{\tau}{k_{w1} + k_{w2}\tau}$	WL	40	50	11,544	0,200
			65	13,0325	0,1597
		60	50	8,5438	0,1724
			65	6,0601	0,1646
$SG = \frac{\tau}{k_{s1} + k_{s2}\tau}$	SG	40	50	155,82	1,6133
			65	176,64	1,1571
		60	50	120,99	1,2826
			65	80,298	1,3699

U tabeli 4.10 prikazane su vrednosti efektivne difuzivnosti vode (D_{ew}) i rastvorka (D_{es}) računato preko Fick-ovog modela. Vrednosti D_{ew} se nalaze se u opsegu od 2,053 x 10^{-10} m^2/s do 2,811 x 10^{-10} m^2/s. Vrednosti D_{es} nalaze se u opsegu od 3,103 x 10^{-10} m^2/s do 4,236x 10^{-10} m^2/s. Sa porastom temperature i koncentracije osmotskog rastvora raste i vrednost difuzivnosti vode i rastvorka.

Tabela 4.10. Koeficijenti difuzije vode i rastvorka tokom osmotskog sušenja polutki kajsija (Pavkov et al., 2021)

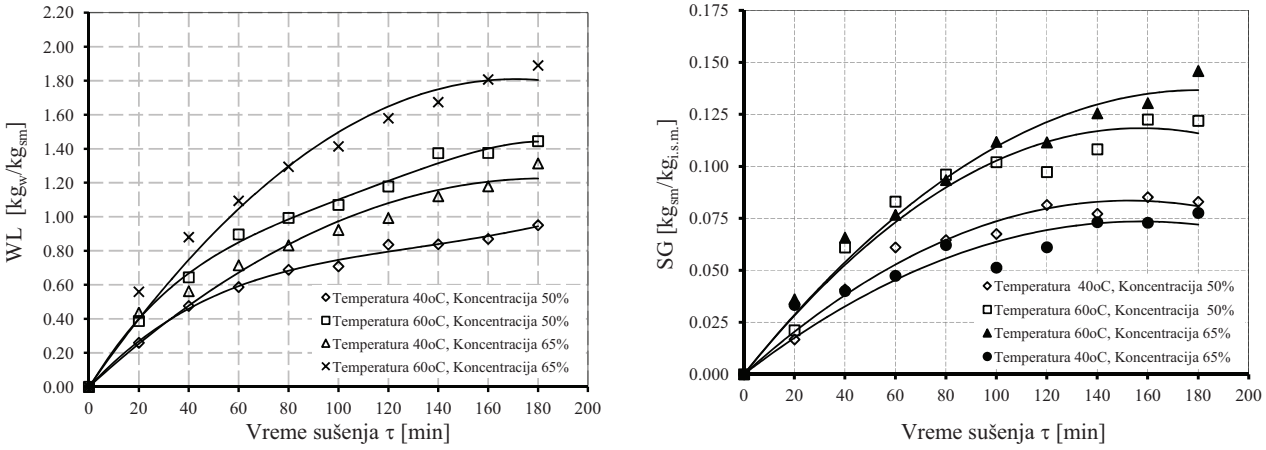
Osmotski rastvor		WL		SG	
t (^oC)	C (%)	D_{ew} (m^2/s)	WL_{eq} (kg_w/kg_{sm})	D_{es} (m^2/s)	SG_{eq} (kg_{sm}/kg_{ism})
40	50	2,053 x 10^{-10}	7,11±0.17	3,103 x 10^{-11}	0.476±0.051
	65	2,339 x 10^{-10}	7,75±0.36	3,805 x 10^{-11}	0.593±0.036
60	50	2,560 x 10^{-10}	7,47±0.21	4,097 x 10^{-11}	0.562±0.017
	65	2,811 x 10^{-10}	7,93±0.14	4,236 x 10^{-11}	0.783±0.044

Khoyi i Hesari, (*2007*) istraživali su uticaj temperature i koncentracije rastvora saharoze na kinetiku sušenja tkiva kajsije. Sveže tkivo kajsije sorte „*Nasiry*“, prosečne vlažnosti 0,75 kg_w/kg_{sm} je sečeno na listiće debljine 5 mm. Koncentracije rastvora su bile 50, 60 i 70^{o}Bx, a temperature rastvora 30, 40, 50 i 60^{o}C. Takođe, varirani su i maseni odnosi rastvora i tkiva kajsije 5:1, 10:1 i 15:1. Vreme osmotskog sušenja iznosilo je 6 sati. Najveće sniženje vlažnosti i povećanje suve materije zabeleženo je u kombinaciji najviše temperature i koncentracije osmotskog rastvora. Na osnovu najpovoljnijeg odnosa gubitka vode i povećanja suve materije (WL/SG) autori preporučuju sledeće parametre za osmotsko sušenje listića kajsije: temperatura rastvora 50^{o}C, koncentracija rastvora 60^{o}Bx i maseni odnos 10:1.

Babić et al. (*2004, 2007*) istraživali su uticaj parametara osmotskog sušenja na kinetiku sušenja polutki kajsija („*Novosadska rodna*“). Temperatura rastvora je varirana na dva nivoa (45 i 55^{o}C) kao i koncentracija rastvora (55 i 65^{o}Bx), vreme osmotskog sušenja iznosilo je 120 minuta. Na osnovu analize rezultata autori zaključuju da sa porastom temperature i koncentracije osmotskog rastvora raste brzina migracije molekula vode iz polutki kajsija u osmotski rastvor.

Istraženo je osmotsko sušenje kruške u formi jedne četvrtine celog ploda u rastvoru saharoze sorte „*William*“ vlažnosti 4,66 kg_w/kg_{sm} (82,3%$_{wb}$). Prosečne fizičke osobine su bile: dužina 86,66 mm, širina 32,88 mm, debljina 31,74 mm, zapremina 40,97 cm^3. Isečene četvrtine su podvrgnute suvom postupku sumporisanja u komori za sumporisanje. Korišten je sumpor u prahu, sagorevano je 0,75 g sumpora po jednom kilogramu četvrtina u trajanju od 2h. Posle postupka sumporisanja četvrtine su premeštene u osmotsku sušaru zapremine 0,034 m^3. Poroznost sloja četvrtina krušaka u osmotskoj sušari je iznosio 41,64%. Osmotski rastvor je strujao kroz komoru sušare pomoću cirkulacione pumpe, a zagrevan razmenjivačem toplote. Radni fluid je bila saharoza rastvorena u destilovanoj vodi, maseni odnos osmotski rastvor : materijal, 10:1. Osmotsko sušenje je obavljeno na dva nivoa temperature i koncentracije ratvora, 40 i 60^{o}C; 50 i 65%. Oko 4 kg sumporisanih četvrtina kruški postavljeno je u perforiranu metalnu korpu i potopljeno u rastvor. Sušenje je trajalo 3h sa konstantnom brzinom strujanja rastvora ispred sloja materijala 0,01033 m/s. Na slici 4.12 prikazane su kinetičke krive promene

gubitka vode četvrtina kruške (a) i povećanja suve materije (b). Po isteku 180 minuta osmotskog sušenja najveće sniženje vlažnosti četvrtina kruške u odnosu na suvu bazu zabeleženo je kod kombinacije temperature osmotskog rastvora od 60°C i koncentracije od 65%, a najmanje kod 40°C i 50%. Kod svih kombinacija vrednosti temperature i koncentracije rastvora uočava se nagli porast brzine sušenja u početku procesa. Najintenzivniji je pri temperaturi rastvora 60°C i koncentraciji rastvora 65% što se moglo očekivati. Povećanje suve materije (SG) je najintenzivnije pri temperaturi rastvora 60°C i koncentraciji rastvora 65%, a slične vrednosti su zabeležene pri istoj temperaturi rastvora i nižoj vrednosti koncentracije. Porast suve materije pri temperaturi rastvora 40°C i koncentracijama od 50% i 65% pokazuje male razlike (*Pavkov, 2012*).



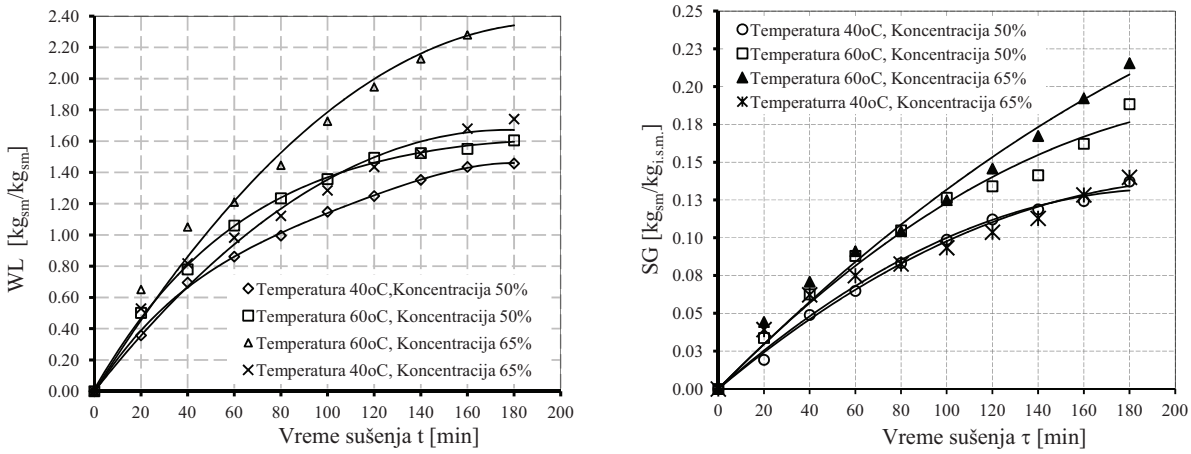
(**a**) (**b**)

Slika 4.12. Kinetičke krive gubitka vode (WL) i povećanja suve materija (SG) tokom osmotskog sušenja četvrtina kruške u zavisnosti od temperature (40 i 60°C) i koncentracije osmotskog rastvora (50 i 65%) (Pavkov, 2012)

Park et al. (*2002b*) istraživali su osmotsko sušenje mezokarpa kruške u rastvoru saharoze. Kruške sorte „*D'Anjou"* sečene su na kockice zapremine oko 1cm^3, koncentracije osmotskog rastvora su iznosile 40, 55 i 70%, a temperature rastvora 40, 50 i 60°C, dok je vreme trajanja osmotskog sušenja iznosilo 5h. Najveće sniženje vlažnosti i povećanje suve materije zabeleženo je u kombinaciji najviše temperature i koncentracije osmotskog rastvora. Posle 120 minuta osmotskog sušenja, gubitak vode i povećanje suve materije se značajno snižava kod svih kombinacija faktora.

Rezulatati osmotskog sušenja nektarina u formi jedne polovine celog ploda sorte „*Fantasia*", vlažnosti 4,58 kg_w/kg_{sm} (82%$_{wb}$) dužine 56,20 mm, širine 54,34 mm, debljine, zapremine 41,73 cm$^{3.}$ Isečene polutke nektarina su podvrgnute suvom postupku sumporisanja u komori za sumporisanje. Korišten je sumpor u prahu, sagorevano je 0,75 g sumpora po jednom kilogramu svežih polutki u trajanju od 2h. Posle postupka sumporisanja četvrtine su premeštene u osmotsku sušaru zapremine 0,034 m^3, gde je poroznost sloja unutar osmotske sušare iznosila 33,79%. Oko 4 kg sumporisanih polutki netarina postavljeno je u perforiranu metalnu korpu i potopljeno u rastvor, sa masenim odnosom rastvor:materijal, 10:1. Sušenje je trajalo 3h sa konstantnom brzinom strujanja rastvora ispred sloja materijala 0,01033 m/s. Najveće sniženje vlažnosti u odnosu na suvu bazu zabeleženo je kod kombinacije temperature osmotskog rastvora 60°C i

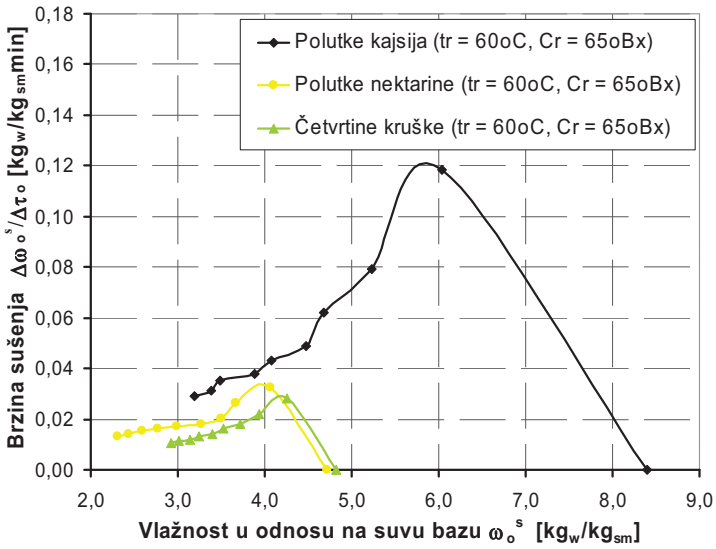
koncentracije 65%, a najmanje kod temperature osmotskog rastvora 40°C i koncentracije 50%. Brzina sušenja ima intenzivan porast u periodu zagrevanja materijala pri svim kombinacijama temperature i koncentracije rastvora. Nakon toga pri kombinaciji temperature 60°C i koncentracije rastvora 65%, srednja brzina sušenja je i dalje značajno veća u odnosu na ostale kombinacije. Kod ostalih kombinacija nivoa faktora razlike u srednjim brzinama sušenja se postepeno snižavaju i izjednačavaju. Najveće povećanje suve materije u mezokarpu nektarina zabeleženo je kod kombinacije temperature osmotskog rastvora od 60°C i koncentracije od 65%. Najmanje povećanje suve materije zabeleženo je kod kombinacija koncentracije osmotskog rastvora sa nižom vrednošću temperature osmotskog rastvora.



(**a**) (**b**)

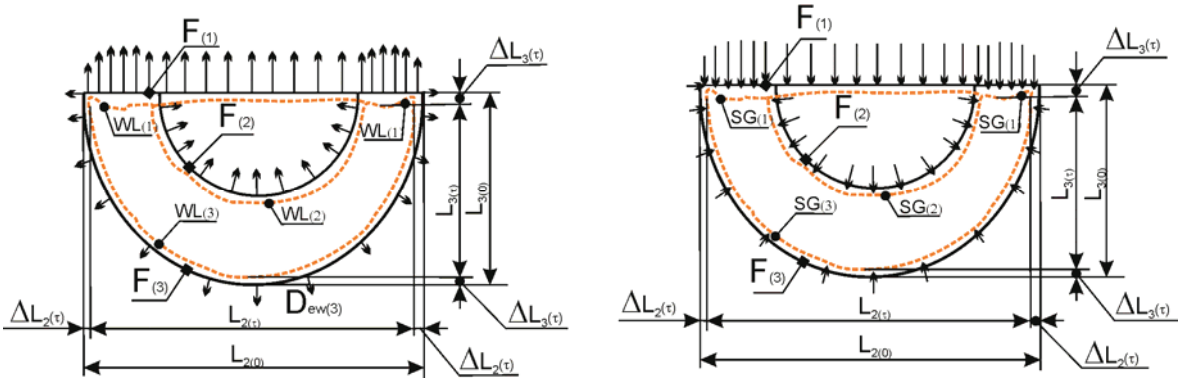
Slika 4.13. Kinetičke krive gubitka vode (WL) i povećanja suve materija (SG) tokom osmotskog sušenja polovina nektarina u zavisnosti od temperature (40 i 60°C) i koncentracije osmotskog rastvora (50 i 65%) (Pavkov, 2012)

Za prethodno prezentovane rezultate o osmotskom sušenju polovina kajsija, četvrtina kruški i polovina nektarina na slici 4.14. prikazana je zavisnost brzine osmotskog sušenja ($\Delta\omega_o^s/\Delta\tau_o$) pri kombinaciji najviših nivoa uticajnih faktora (t_r = 60°C i C_r = 65%). U prvom periodu sušenja najveću brzinu sušenja postiže mezokarp kajsije u obliku polutke. U opsegu istih vrednosti vlažnosti kajsija u obliku polutke ima najveću brzinu sušenja, zatim nektarina u obliku polutke, a najmanju kruška u obliku četvrtine. Razlike voćnog tkiva u hemijskom sastavu, strukturi, dimenzijama i zapremini utiču na razlike u brzinama sušenja.



Slika 4.14. Zavisnost brzine osmotskog sušenja ($\Delta\omega_o^s/\Delta\tau_o$) od vlažnosti voća izraženo u odnosu na suvu bazu (ω_o^s) za polutke kajsija, polutke nektarina i četvrtine kruške

Intenzitet migracije molekula vode iz voćnog tkiva, kao i intenzitet migracije molekula rastvorka u voćno tkivo, tokom osmotskog sušenja zavisi od vrste ćelija i stanja ćelijskog zida kroz koje difunduje posmatrana komponenta. Na primeru polutke kajsije razmotriće se mehanizam osmotskog sušenja voća u obliku polovine celog ploda. Na slici 4.15 a) i b) prikazana je šema poprečnog preseka polutke kajsije.



Slika 4.15. Mehanizam osmotskog sušenja polutki kajsije sa razmenom mase i zapreminskim skupljanjem (Pavkov et al., 2021)

a) Gubitak vode WL; b) Povećanje suve materije SG

[$F_{(1)}$- Površina nastala rezanjem $F_{(2)}$ – Površina nastala vađenjem koštice, $F_{(3)}$ – Površina, $L_{2(o)}$, $L_{2(\tau)}$ – širina poluke kajije na početku procesa i vremenu τ, $L_{3(o)}$, $L_{3(\tau)}$ – debljina polutke na početku procesa i vremenu τ, $WL_{(1)}$, $WL_{(2)}$, $WL_{(3)}$ – gubitak vode kroz površine $F(_1)$, $F(_2)$, $F(_3)$, $SG_{(1)}$, $SG_{(2)}$, $SG_{(3)}$ – solid gain kroz površine $F(_1)$, $F(_2)$, $F(_3)$, Δ - razlika, → smer difuzije vode i rastvorka, ▪▪▪▪ - dimenzije polutke posle osmotskog sušenja]

Prilikom formiranja polutke presecanjem celog ploda na pola formirana je površina označena kao F_1. Vađenjem koštice formirana je površina označena kao F_2, a površinu F_3 predstavlja spoljna površina ploda - pokožica. Formiranjem površine F_1, rezanjem oštećuju se ćelije, sečivo

prolazi kroz tkivo. Na toj površini se nalazi najveći broj ćelija parenhima, koje su najvećih dimenzija i loptastog oblika, ćelijski zid je polupropustljiv i služe za skladištenje vode (*Archibald i Melton, 1987*).

Pretpostavlja se da je tokom osmotskog sušenja brzinsko polje osmotskog rastvora jednako na svim površinama i da je temperatura voća jednaka po preseku materijala. Zbog oštećenja ćelija na površini $F_{(1)}$, prelaz molekula vode u rastvor je intenzivniji ($WL_{(1)}$) sa ove površine. U suprotnom smeru se dešava intenzivniji prelaz molekula rastvorka ($SG_{(1)}$). Na površini $F_{(2)}$ je intenzitet prelaza molekula vode ($WL_{(2)}$) i molekula rastvorka ($SG_{(2)}$) manji nego na površini $F_{(1)}$. Ćelije su u prirodnom neoštećenom stanju, pripadaju grupi sprovodnih ćelija (*Archibald i Melton, 1987*). Na spoljnoj površini $F_{(3)}$ nalaze se ćelije epidermisa čija je prirodna uloga da štite plod od spoljnih uticaja. Koeficijenti prelaza molekula vode i rastvorka ($WL_{(3)}$, $SG_{(3)}$) su manji u odnosu na ostale dve površine. Najveći prelaz vode dešava se na površini F_1 pa je vlažnost voća na toj površini najmanja. Vlažnost tkiva površine $F_{(2)}$ je veće od $F_{(1)}$. Najvlažnije tkivo se nalazi u neposrednoj blizini površine $F_{(3)}$ pa sledi $WL_{(3)} > WL_{(2)} > WL_{(1)}$. Tokom trajanja osmotskog sušenja formira se profil vlažnosti ostalih slojeva tkiva. On se formira u zavisnosti od udaljenosti sloja od graničnih površina. Shodno tome, povećanje suve materije u tkivu voća je najveće u slojevima ćelija površine jedan $F_{(1)}$ ($SG_{(1)}$), zatim površine $F_{(2)}$ ($SG_{(2)}$), a najmanje kod površine $F_{(3)}$ ($SG_{(3)}$). Difuzija molekula rastvorka nastavlja se kroz tkivo, najvećim delom preko kapilara (*Barat et al., 2001*) i kroz citoplazmatične niti (*Yang et al.*, 2010). Dominantno najveća koncentracija molekula šećera ostaje u površinskim slojevima, u odnosu na koncentraciju u slojevima udaljenijim od karakterističnih površina (*Riva et al., 2005*). Upravo ovakav raspored koncentracije molekula šećera na karakterističnim površinama ($SG_{(1)} > SG_{(2)} > SG_{(3)}$) je od izuzetne važnosti za održanje kvaliteta voća tokom tehnike konvektivnog sušenja. Prelaskom vode u osmotski rastvor dolazi do kontrakcije zapremine polutke i promene početnih dimenzija ploda. Na slikama 4.15 a) i b) promena dimenzija prikazana je isprekidanim linijama u poprečnom preseku. Autor Pavkov (2012) merenjem promena dimenzija voća tokom osmotskog sušenja, polutki kajsija, četvrtina kruške i polutki nektarina ustanovio je da najveće srednje relativno skupljanje ostvaruje se po debljini, zatim po širini, a najmanje po dužini. Vrednosti su izmerene za vreme osmotskog sušenja τ_o = 180 min, pri temperaturi osmotskog rastvora od 60^{o}C i koncentraciji osmotskog rastvora od 65% (*Pavkov et al. 2012*).

Na višim temperaturama veća je rastvorljivost rastvorka osmotskog rastvora, a kao posledica toga dolazi do porasta osmotskog pritiska, pa i intenzivnijeg transporta molekula vode. Potrebno je ipak odrediti optimalnu temperaturu rastvora za izvođenje procesa osmotskog sušenja, jer ćelijska membrana pri dužim izlaganjima višoj temperaturi gubi svoju selektivnost. Gubitak selektivnosti prouzrokuje povećanje difuzije osmotskog rastvorka u tkivo i narušava originalni kvalitet biomaterijala. Preporučene temperature za osmotsko sušenja voća su 45-55^{o}C. (*Saputra, 2001*).

Brzina prenosa mase, vode i rastvorenih organskih materija raste sa porastom brzine kretanja osmotskog rastvora. Brzina kretanja sirupa je jedan od bitnih faktora, čiji adekvatan nivo obezbeđuje minimalizaciju ili eliminaciju otpora prenosa mase od strane tečnosti. U literaturi je mali broj radova koji se bave istraživanjem uticaja brzine kretanja osmotskog rastvora na kinetiku osmotskog sušenja. U radu *Stefanović i Urošević* (*1995*) se na osnovu analize kinetičkih krivih zavisnosti brzine osmotskog sušenja od brzine relativnog kretanja sirupa i plodova voća

preporučuje da treba ići na maksimalne brzine kretanja sirupa koje dato voće može da podnese, a da se ne razori.

Izbor vrste i koncentracije osmotskog rastvorka je značajno. Koncentrovani rastvor neke materije mora da ispuni opšte zahteve u pogledu njegovog uticaja na miris, ukus, hranljivost i toksičnost suvog proizvoda, koji se koriste za ljudsku ishranu. Promene nutritivnih vrednosti i organoleptičkih pokazatelja krajnjeg proizvoda su osnovni indikatori prilikom izbora. Pri osmotskom sušenju voća najčešće se koriste rastvori vode i saharida (saharoza, glukoza i fruktoza), koji ispunjavaju navedene zahteve. Uporednim ispitivanjem rastvora saharoze i glukoze, iste koncentracije i temperature, dobijene su različite vrednosti koeficijenata difuzije. Povoljnije vrednosti difuzije molekula vode izmerene su upotrebom saharoze, a difuzije rastvorka upotrebom glukoze (*Reppa et al., 1998; Saputra, 2001*). Uočeno je da kombinacija saharoze i dodatka male mase natrijum-hlorida u osmotski rastvor prouzrokuje više vrednosti difuzionih koeficijenata od pojedinačnih rastvora ovih komponenata (*Sacchetti et al., 2001; Taiwo et al., 2003*).

Togrul i Ispir (*2007*) su istražili uticaj rastvora fruktoze, glukoze, maltodekstirina, saharoze i sorbitola na sniženje vlažnosti i povišenje suve materije tokom osmotskog sušenja kajsije. U eksperimentu je korišćen ceo plod prosečnog prečnika 3 cm. Koncentracija svih rastvora je bila 70%, temperatura rastvora je bila ambijentalna, vreme trajanja osmotskog sušenja je bilo 8 dana, maseni odnos rastvora i kajsija je bio 25:1. Zabeleženi su sledeći rezultati: sniženje vlažnosti tkiva kajsije bilo je slično kod rastvora fruktoze, maltodekstrina i saharoze, pa zatim glukoze, a najmanje kod rastvora sorbitola. Najveće povišenje suve materije u tkivu kajsije je zabeleženo upotrebom rastvora maltodekstrina, zatim kod fruktoze, slično kod saharoze i sorbitola, a najmanje kod glukoze.

Autori *Riva et al.* (*2005*) istraživali su uticaj različitih vrsta osmotskih rastvora na strukturne osobine kockica kajsije sorte „*Tondia di Costigliole*“. Upotrebili su rastvor saharoze 60% i rastvor sorbitola 60% (E420). Takođe, korišćen je izotonični rastvor saharoze koncentracije 13%. U sve rastvore dodata je aksorbinska kiselina (1%) i NaCl (0,5%). Temperatura rastvora je iznosila 25^{o}C, a vreme osmotskog sušenja 30 i 60 min. Povećanje suve materije bilo je slično kod rastvora saharoze i sorbitola, dok je gubitak vode bio veći kod rastvora saharoze. Najveće povećanje aksorbinske kiseline u tkivu kajsije zabeleženo je primenom rastvora saharoze. Zapreminsko skupljanje voća bilo je slično kod rastvora saharoze i sorbitola, a najmanje kod izotoničnog rastvora. Promena boje tkiva kod rastvora saharoze i sorbitola je bila minimalna u odnosu na početnu, dok je kod izotoničnog rastvora zabeleženo potamnjenje tkiva.

Različite vrste voća, zbog razlike u strukturi tkiva, nejednako reaguju na osmotsko sušenje. Autori Fernandez et al. (*2004*) su istraživali gubitak vode i povećanje suve materije za mezokarp breskve („*Baby Gold*“), višnje („*Bianca di Verona*“), kajsije („*Reale*“) i jabuke („*Granny Smith*“). Voće je pripremljeno u obliku diskova debljine oko 2 cm, korišćen je rastvor saharoze različitih koncentracija (50-70%) i različite temperature rastvora (23-30^{o}C). Na osnovu rezultata eksperimenta kod breskve je zabeležen najbolji odnos sniženja vlažnosti i povišenja suve materije (WL/SG). Zatim slede jabuke, višnje i na kraju kajsije. Autori nastale razlike objašnjavaju međusobnim razlikama u teksturi tkiva i osobinama ćelija koje grade tkivo.

Prenos mase tokom osmotskog sušenja raste ako se u procesu primeni potpritisak - vakuum. *Fito* (*1994, 2001*) je objasnio ovu pojavu preko gradijenta pritiska i kapilarnog toka. Za neke voćne vrste, naprimer jabuka, karakteristično je prisustvo intercelularnog prostora – pora, u

parehimskom tkivu. Zapremina pora zauzima 20% ukupne zapremine jabuke. Ove pore su ispunjene vazduhom koji može biti uklonjen primenom podpritiska. Sniženje pritiska prouzrokuje ekspanziju i izlazak vazduha zarobljenog u porama. Povratkom na atmosferski pritisak u pore ulazi osmotski rastvor, na taj način se povećava aktivna površina za odvijanje prenosa mase. Primenjeni vakuum utiče na brzinu dostizanja ravnoteže. Tretman vakuumom može da se primenjuje tokom čitavog procesa osmotskog sušenja, ali njegova upotreba je uobičajena na početku procesa, ako se radi o izmeni sastava materijala. Ovaj proces u literaturi se naziva vakuum impregnacija. Autori *Mujica-Paz et al.* (*2003*) istraživali su uticaj primene potpritiska tokom osmotskog sušenja za različite koncentracije rastvora za kocke: jabuke („*Golden Delicious*"), dinje („*Reticulado*") i manga („*Manila*"). Sa porastom koncentracije i vrednosti potpritiska intenzivira se gubitak vode i povišenje suve materije kod sve tri istraživane voćne vrste.

Pored vakuuma, još nekoliko tehnika je ispitivano sa ciljem intenziviranja prenosa mase. Ove tehnike uključuju podvrgavanje materijala visokim hidrostatičkim pritiscima, pulsirajućem električnom polju visokog intenziteta, ultrazvuku i centrifugalnoj sili. Nabrojane tehnike su ubrzale procese prenosa mase, ali su negativno uticale na kvalitet krajnjeg proizvoda (*Rastogi et al., 2002; Taiwo et al., 2001*).

Bitna razlika osmotskog sušenja u odnosu na druge procese sušenja leži baš u pomenutoj impregnaciji (oblaganja) tkiva osmotskim rastvorom. Deo osmotskog rastvora ne ulazi u ćeliju nego se zadržava u međućelijskom prostoru. Do određene mere, impregnacija omogućava promenu nutritivnih, funkcionalnih i senzornih osobina voća koje se podvrgava procesu osmotskog sušenja (*Reppa et al., 1998)*. Rastvorak koji je difundovao u tkivo voća veoma je efikasan inhibitor enzima polifenoloksidaze koji je odgovoran za oksidaciju odnosno tamnjenje na rezanim površinama voćnog tkiva. Takođe, rastvorak sprečava gubitak isparljivih jedinjenja (aromatične materije) koji daju prirodnu aromu tkivu tokom sušenja čak i kod intenzivnijih parametara procesa (*Ponting, 1973*).

Torreggiani i Bertolo (*2001*) su na osnovu istraživanja dokazali da osmotski predtretman kocke kajsije povoljno utiče na stabilnost vitamina C i umanjuje promenu boje tokom konvektivnog sušenja. *Radojčin et al.* (*2009*) su istražili uticaj osmotskog sušenja kocki dunje u rastvoru saharoze na promenu boje. Dimenzije su bile 15 x 15 x 15 mm, sorte „*Leskovačka*" osmotski su sušene na temperaturama osmotskog rastvora (40 i 60^{o}C) i koncentracijama osmotskog rastvora (50 i 65%). Kasnije su dosušivane u konvektivnoj sušari sa lesama na temperaturi vazduha od 60^{o}C. Boja je merena tokom osmotskog sušenja i na kraju konvektivnog sušenja. Na osnovu rezultata merenja autori zaključuju da primena osmotskog sušenja kao predtretmana konvektivnom sušenju, pozitivno utiče na očuvanje prirodne boje suve dunje. Takođe je istraživan uticaj osmotskog predtretmana na mehaničke osobine kocki osušene dunje (*Babić et al., 2007, 2008*). Mehaničke osobine osušene dunje se značajno poboljšavaju primenom osmotskog sušenja kao predtretmana konvektivnom sušenju u poređenju sa drugim tretmanima. Osušeni materijal ima malu promenu modula elastičnosti u odnosu na svež materijal.

Primena tehnike osmotskog sušenja kao predtretmana utiče na nižu vrednost aktivnosti vode. Ravnotežne vlažnosti materijala imaju više vrednosti ako je primenjena osmoza, u poređenju sa drugim predtretmanima. *Moreira et al.* (*2009*) su merili vrednosti aktivnosti vode listića jabuke debljine 5 mm sušene bez predtretma i sa osmotskim predtremanom u dve vrste rastvora. Sveži

listić jabuke imao je vrednost aktivnosti vode 0,989, a za istu vlažnost dobijeni su sledeći rezultati: konvektivno sušeni 0,545; osmotski u rastvoru saharoze 0,440 i u rastvoru kukuruznog sirupa 0,482. Sličan rezultat su dobili autori *Korsrilabut et al.* (*2010*) za kocke dinje („*Sun Lady*"). Konstatovano je da sa porastom koncentracije šećera koji je difundovao iz osmotskog rastvora, se snižava vrednost aktivnosti vode pri istoj vlažnosti i temperaturi tkiva.

Uticaj osmotskog predtretmana na zadržavanje prirodne arome ispitan je na primeru dinje. Poređenjem zamrznutog tkiva dinje koje je samo konvektivno sušeno, u odnosu na tkivo koje je prethodno osmotski sušeno. Kod tkiva koje je samo konvektivno sušeno, povećan je sadržaj alkoholnih sastojaka koji prouzrokuju negativnu aromatsku notu zbog pojave fermentacije (*Bignardi et al., 2000*).

Istraživanjima osmotskog sušenja bioloških gelova utvrđeno je da postojanje polupropustljive ćelijske membrane nije neophodan uslov za odvijanje procesa osmoze. Ova činjenica dobija na značaju pri radu sa tkivima čija je ćelijska struktura narušena tokom prerade (rezanje, čuvanje u zamrznutom stanju itd). Ispitivanja pomoću visokih vrednosti hidrostatičkog pritiska i intenzivnih električnih polja kao predtretmana osmotskom sušenju, ukazuju da je osmotsko sušenje moguće iako su ćelijske membrane tkiva oštećene (*Rastogi et al., 2002*).

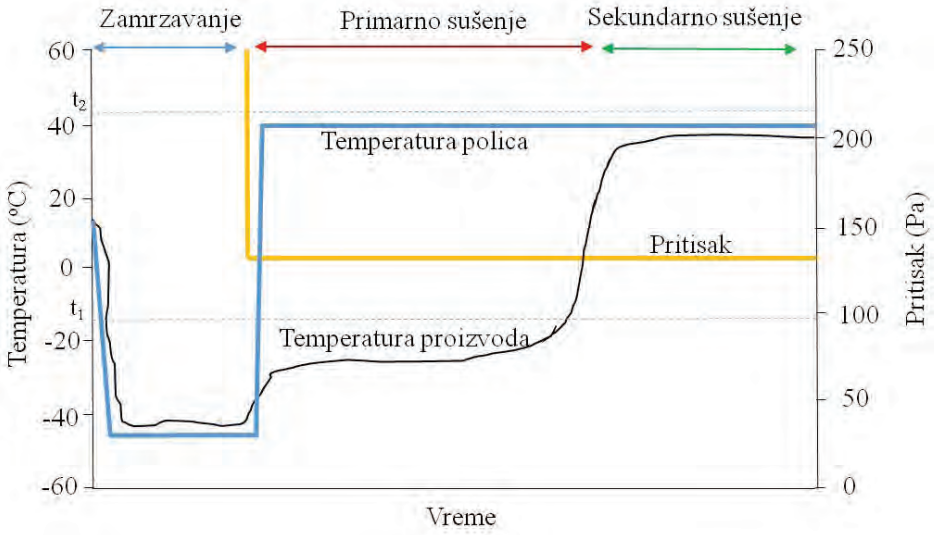
Na osnovu iznetih različitih istraživanja, može da se zaključi da su temperatura i koncentracija osmotskog rastvora dva najuticajnija spoljna faktora na brzinu prenosa mase tokom procesa. Pored njih takođe utiču: brzina strujanja rastvora, dimenzije materijala, osobine rastvorka, maseni odnos materijal-rastvor i osobine tkiva. Bitno je napomenuti da se nabrojani faktori mogu menjati u određenim granicama, ali uz uslov očuvanja originalnog kvaliteta voća.

4.3. Sušenje zamrzavanjem

Prerada voća tehnikom sušenja zamrzavanjem (liofilizacija) obezbeđuje krajnji proizvod visokog nutritivnog, senzorskog i vizuelnog kvaliteta. Ovom tehnikom se mogu sušiti sve voćne vrste veoma uspešno. Zbog visoke cene krajnjeg proizvoda, svoju ekonomsku opravdanost liofilizovano voće pronalazi u konditorskoj i farmaceutskoj industriji. Uobičajeno je da se liofilizuju maline, borovnice, jagode, ali i druge voćne vrste. Na visoku cenu krajnjeg proizvoda utiče značajan broj faktora, neki od njih su: visoka investicija u pogon za liofilizaciju voća, proces sušenja voća je spor - vremenski dugo traje (30-48h), kao glavni energent se koristi električna energija, konačan proizvod je niske vlažnosti ≈ 5-8%$_{wb}$, što određuje nepovoljan maseni odnos svežeg i suvog voća, ≈10-8:1. Takođe, proizvod zahteva pakovanje odmah po završetku sušenja u paronepropusnu amabalažu, sa malom nasipnom visinom zbog krtosti (lomljivosti).

Proces sušenja se sastoji iz tri faze (slika 4.16):

- I faza - zamrzavanje proizvoda;
- II faza - primarno sušenje sublimacijom leda i
- III - faza sekundarno sušenje – niskotemperaturno vakuum sušenje – sušenje do krajnje vlažnosti (kod pojedinih proizvoda).



Slika 4.16. Faze sušenja zamrzavanjem sa kinetičkom krivom temperature materijala i temperature polica (t_1 – kritična temperature kolapsa, t_2 – temperature staklaste tranzicije) (Ratti, 2013)

I faza – zamrzavanje voća. Brzina zamrzavanja utiče na kinetiku procesa sušenja voća liofilizacijom. Kinetika nukleacije leda i rast kristala određivaće fizičke osobine i morfologiju zamrznutog voća (*Hottot et al., 2007*). Morfologija leda u direktnoj je korelaciji sa brzinom sublimacije. Formiranje brojnih, malih kristala leda dovodi do povećanja otpora prenosu mase. U industrijskim pogonima za liofilizaciju voća uobičajeno je da se voće zamrzava na pokretnoj traci u tunelu ili komori za zamrzavanje, a zatim se zamrznuti proizvod unosi u liofilizator. Proces zamrzavanja voća može se obaviti i u liofilizatoru, gde je to vremenski duže nego na klasičan način, što značajno snižava preradni kapacitet pogona.

II faza - Primarno sušenje je termin koji se koristi za glavni period sušenja u kojem se odvija sublimacija leda. Ovaj period je dominantan, uklanja se fizičko-mehanički i najveći deo osmotski vezane vlage. U komori liofilizatora snižava se apsolutni pritisak i dovodi toplotna energija zamrznutom voću da bi led sublimorao-isparavao (≥ latentna toplota leda). Toplota se može dovoditi kondukcijom, radijacijom i mikrotalasima. U slučaju konduktivnog zagrevanja, zamrznuto voće je poređano na police koje imaju mogućnost kontrolisanog zagrevanja. Konduktivan prenos toplote ima ograničenja, zbog manje površine zagrevanja zamrznutog voća, zagreva se samo površina kontakta između voća i police i deo energije prenesen zračenjem sa polica na ostale površine zamrznutog voća. Nešto efikasnije zagrevanje se obavlja infracrvenim zračenjem, gde se zracima obuhvata veća površina. Kod ovog načina zagrevanja treba pažljivo izabrati udaljenost izvora zračenja od zamrznutog voća, frekfenciju i intenzitet zračenja (*Nowak i Lewicki, 2005*). Tokom procesa liofilizacije količina dovedene toplote treba da bude jednaka latentnoj toploti mase leda koji se nalazi u frontu (polju razmene) sublimacije. Front sublimacije se pomera od površine voća ka unutrašnjosti. Na početku procesa liofilizacije temperatura celokupne zapremine zamrznutog voća je -20°C. Kada proces liofilizacije otpočne srednja temperatura zamrznutog voća, posmatrano po zapremini, postepeno se povisuje sve do 0°C (sl. 4.16 i 4.18) kada se smatra da je sublimacija završena. Na kraju ove faze sušenja plod voća je vlažnosti ≈5-7%, što je dovoljno za završetak procesa. Temperatura površine isparivača na kome

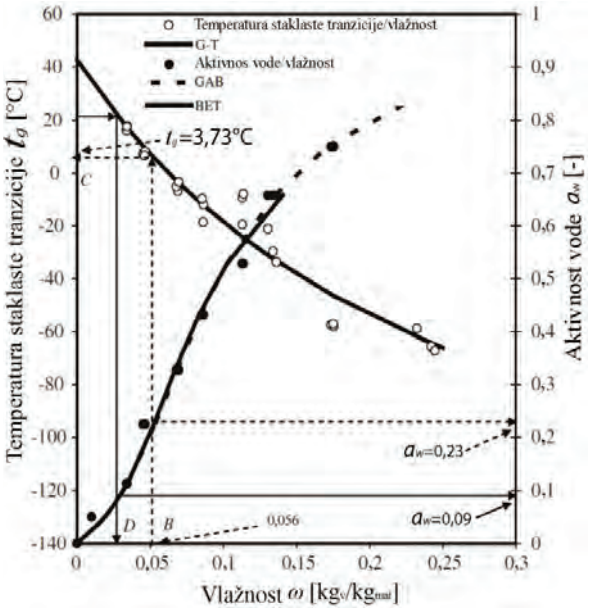
se obavlja desublimacija je oko -60 do -80^{o}C u zavisnosti od vrste liofilizovanog materijala i kapaciteta isparivača (*Assegehegn et al., 2020*). Od velike je važnosti da temperatura leda na isparivaču bude niža od vrednosti apsolutnog pritiska komore sa voćem na kome se odvija sublimacija leda iz voća. U protivnom led neće desublimirati, a kinetika liofilizacija će se usporiti ili prestati.

III faza - Sekundarni period sušenja se odvija u oblasti niskotemperaturnog vakuum sušenja. Srednja temperatura voća u liofilizatoru je ≥ 0,1^{o}C Ova faza se uvodi ako se žele postići niske vlažnost karajnjeg proizvoda (< 5%), što kod sušenog voća nije potrebno U ovoj fazi isparava zaostala osmotski vezana vlaga i adsopciono vezana valga. U ovoj fazi brzina sušenja značajno se smanjuje zbog male količine zaostale vode, velikih toplotnih otpora, otpora transportu mase kroz porozni materijal, kao i zbog načina na koji je voda vezana za strukturu materijala. U pojedinim slučajevima sekundarno sušenje započinje u unutrušnjim delovima voća čija je temperatura ≥ 0,1^{o}C, dok u delovima voća gde je temperatura ≤ 0^{o}C još uvek traje proces sublimacije. Ovaj period sušenje može se izvesti pri višim temperaturama zbog efikasnijeg transporta zaostale vode. Tokom tehnike sušenja smrzavanjem postoji opasnost od pojave staklaste tranzicije koja izaziva zapreminsko skupljanje proizvoda tokom procesa sušenja, prelaz u gumenasto stanje. Neophodno je obratiti pažnju da vlažnost voća i temperatura zagrevanja budu niži od temperature staklaste tranzicije koja izaziva zapreminsko skupljanje liofilizovanih proizvoda. Izazov u procesu sušenja liofilizacijom je identifikovati kraj primarnog perioda sušenja i početak sekundarnog kako bi se povišenjem temperature ploča ubrzalo sušenje i time umanjili troškovi, a u isto vreme izbegla staklasta tranzicija koja može dovesti do kolapsa proizvoda i ugrožavanja kvaliteta. U tabeli 4.11. date su vrednosti početka staklaste tranzicije u zavisniosti od vlažnosti i temperature malina.

Tabela 4.11. Početak staklaste tranzicije u zavisnosti od temperatrure i vlažnosti malina osušenih tehnikom zamrzavanja (Syamaladevi et al., 2010; 2012; Stamenković, 2021).

Aktivnost vode a_w [-]	Vlažnost u odnosu na vlažnu bazu, ω [kg_v/kg_{mat}]	Temperatura početka staklaste tranzicije u gumeno stanje, t_g [°C]	Stanje malina skladištenih na sobnoj temperaturi (23°C)
0,05	0,022±0,000	39,6±1	Staklasto
0,07	0,019±0,000	38,9±0	Staklasto
0,11	0,034±0,000	17,1±1	Gumeno
0,23	0,046±0,001	7,3±1	Gumeno
0,33	0,069±0,001	-5,031±	Gumeno
0,43	0,086±0,001	-12,0±5	Gumeno
0,53	0,112±0,001	-19,4±6	Gumeno
0,66	0,134±0,003	-19,7±6	Gumeno
0,75	0,175±0,001	-57,0±0	Gumeno
0,86	0,242±0,007	-65,5±4	Gumeno

Na slici 4.18 prikazane su krive zavisnosti temperature staklaste tranzicije i sadržaja vlage u prahu maline. Prema dijagramu za vlažnost praha 5,6%$_{wb}$ temperatura početka staklaste tranzicije je 3,73°C. Snižavanjem vlažnosti materijala temperatura početka staklaste tranzicije raste. Ista analogija staklaste tranzicija voća primenjuje se i za skladištenje suvog voća, gde se vlažnost suvog voća mora prilagoditi planiranoj temperaturi skladištenja.

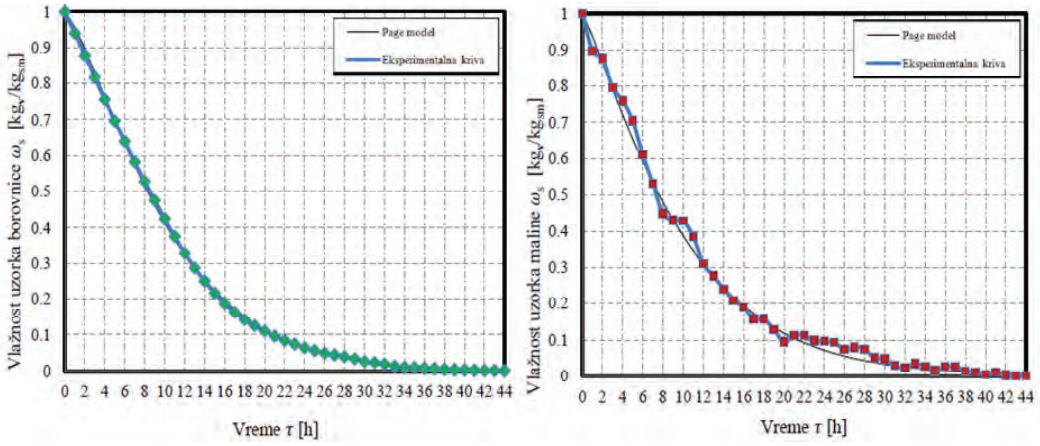


Slika 4.18. Krive zavisnosti temperature staklaste tranzicije i sadržaja vlage u prahu maline (Syamaladevi i sar., 2009; Stamenković, 2021)

Kinetičke krive promene bezdimenzione vlažnosti sušenja smrzavanjem voća su retke u naučnoj literaturi. Kešelj et al. (2022) istraživali su uticaj temperature zamrzavanja ploda američke borovnice na kinetiku sušenja (-20°C, -40°C). Istraživanja su izvedena na liofilizatoru marke Martin Christ na kojem je uz modifikacije omogućeno kontinualno praćenje kinetike sušenja. Stanje ravnotežne vlažnosti u slučaju početne temperature plodova na -20°C postignuto je nakon 36 časova (*sl.4.19a*), dok je u slučaju zamrzavanja na -40°C postignutno nakon 40 časova procesa (*sl.4.19b*). Pritisak tokom procesa liofilizacije iznosio je 60 Pa. Početna vlažnost uzoraka u prvom eksperimentu (-20°C) bila je 71%, a u drugom (-40°C) 76%. Autori zaključuju da sitnija struktura leda formirana zamrzavanjem-40°C je uticala na veći otpor kretanja vodene pare kroz slojeve materijala, ali takođe navode da razlika u početnim vlažnostima je mogući razlog dužeg vremena sušenja uzoraka. Obavljeno je modelovanje kinetičkih krivih promene srednje vlažnosti sa pet modela, Newton, Page, Modified Page, Logarithmic i Handerson i Pabis. Na osnovu statističkih pokazatelja (R, R^2, χ^2, RMSE, MBE) model Page ocenjen je kao najprecizniji. Aproksimiranje eksperimentalnih podataka sa predikcionom krivom dato je na slici (*sl.4.19a i b*), a parametri modela u tabeli (*tab. 4.12*).

Tabela 4.12. Parametri Page modela kinetike sušenja (Kešelj et al, 2022)

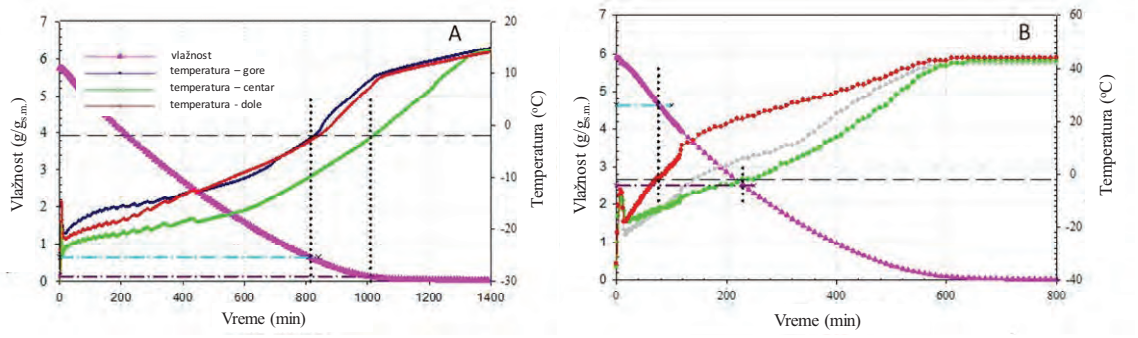
Page model	Temperatura zamrzavanja (°C)	n (-)	k (min^{-1})
MR=exp(-kτ^n)	-20	1,2977	0,0446
	-40	0,0651	1,1646



a) b)

Slika 4.19. Kinetičke krive promene vlažnosti borovnice tokom liofilizacije za temperaturu zamrzavanja -20°C i -40°C (Kešelj et al., 2022)

U radu autora Nowak i Jakubczyk (2020) obavljeno je istraživanje uticaja zagrevanja materijla preko polica na kinetiku sušenja listića jabuke (*sl.4.20*). Autori su izmerili kinetiku promene srednje vlažnosti, temperaturu na površini listića jabuke, površina gore, površina dole i centar listića jabuke. Na slici A su rezultati za temperaturu polica od 10°C, a na slici B za temperaturu polica 40°C. Apsolutni pritisak u komori bio je 63 Pa, a početna temperatura materijala -20°C. Na osnovu prikazanih kinetičkih krivih, evidentno je da pri temperaturi police 10°C vreme sušenja do konačne vlažnosti traje 1000 minuta, a za 40°C vreme sušenja je 600 minuta. Pažljivom analizom temperaturnih krivih može se zaključiti da se za nižu temperaturu police ceo proces sušenja se završio u drugoj fazi, odnosno u liofilizaciji. Sa početne vlažnosti 5,8 kg_w/kg_{sm} (85%$_{wb}$) posle 200 minuta procesa, za višu temperaturu police vlažnost se spušta do 2,8 kg_w/kg_{sm} (71,4%) i prelazi u treću fazu, odnosno izlazi iz liofilizacije u niskotemperturno vakuum sušenje (temperatura materijala >0°C) do vlažnosti 0,08 kg_w/kg_{sm} (7,4%$_{wb}$). U tom periodu postoji verovatnoća da je došlo do staklaste tranzicije koju autori ne spominju. U toku drugog perioda sušenja - liofilizacije idvojeno je 139,65 g vode, a tokom vakuum sušenju 640,6 g vode, računato na 1000 g početnog materijala. Brzina zagrevanja materijala je bila veća od brzine sublimacije leda, voda u materijalu je prešla u tečno stanje. U zavisnosti šta se želi dobiti od krajnjeg proizvoda zavisi da li je ovakav trend prihvatljiv ili ne. Postavlja se pitanje, zašto se voće zamrzavalo i trošila energija kada je mali deo vlage izdovjen sublimacijom leda. U trećoj fazi sušenja u opasnosti je pojava staklaste tranzicije, kolapsa strukture, degradacije termorazgradivih sastojaka (ako su postojali), u ovom slučaju suve jabuke. Vreme sušenja je skraćeno, ali sa znatnim uticajem na krajnji kvalitet proizvoda. Postavlja se pitanje u ovom slučaju, opravdanost ovakve dinamike zagrevanja materijala, da li je potrebno raditi skup postupak liofilizacije kada se veliki deo vode isparava u tečnom stanju tokom treće faze u vakuum sušenju.



Slika 4.20. Kinetika sušenja zamrzavanjem listića jabuke debljine 1 cm.

A – temperatura polica 10°C, B – temperatura polica 40°C (Nowak et al., 2020)

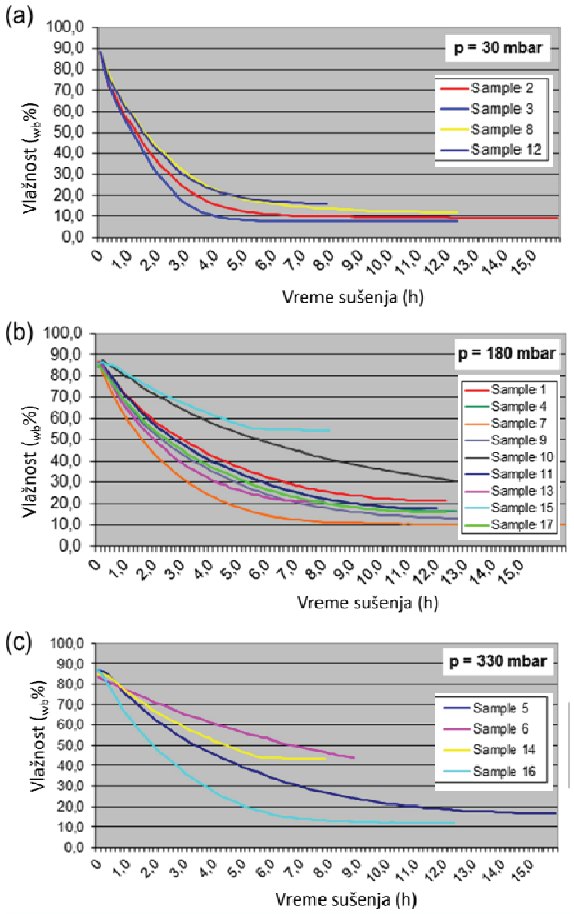
Tokom poslednje decenije, liofilizirana hrana je postala veoma popularna, posebno za voće kao što je bobičasto (Nowak i Jakubczyk, 2020). Hamami i Rene (1997) objavili su da optimalni parametri za sušenje jagode zamrzavanjem 30 Pa i 50°C temperatura ploča za sušenje, te da se pri ovim uslovima ne gube prirodni mirisi i arome niti nastaju strani. Prednosti sušenja zamrzavanjem, u pogledu hemijskog i nutritivnog kvaliteta, u odnosu na druge metode sušenja navode brojni autori. Međutim, u poređenju u odnosu na druge tehnologije sušenja, sušenje zamrzavanjem ima visoku potrošnju energije, prevashodno električne, i produženo vreme sušenja (Sete et al., 2016; Stamenković et al., 2019b; Hamami i Rene 1997; Lachowicz et al., 2019). Kešelj et al (2017) poredili su potrošnju energije između konvektivnog sušenja i liofilizacije maline, izračunato je da je za postupak liofilizacija potrebno 1,91 puta više enrgije računato u kJ. Međutim, potrošnja energije za liofilizaciju se može smanjiti skraćivanjem vremena trajanja postupka liofilizacije primenom pretretmana (poglavlje 5) u pripremi voća za zamrzavanje. Lammerskitten et al. (2019) su došli do rezultata da PEF predtretman kriški jabuke intenzivira kinetiku sušenja zamrzavanjem i na taj način smanjuje vreme sušenja za 57% u poređenju sa netretiranim uzorcima. Munzenmayer et al., (2020) istraživali su liofilizaciju borovnice sa predtretmanom CO_2 laserom kojim pravi mikroperforacije na pokožici ploda borovnice i ubrzava prenos mase, skraćuje vreme sušenja bez uticaja na kvalitet krajnjeg proizvoda.

Efekat sušenja liofilizacijom treba posmatrati sa ekonomskog aspekta i aspekta kvaliteta osušenog proizvoda. Cena proizvoda uglavnom zavisi od trajanja procesa sušenja. Zbog toga su parametri procesa i drugi uslovi podešeni da period sušenja bude što kraći. Međutim, ubrzavanje procesa sušenja podešavanjem odgovarajućih parametara, može da dovede do urušavanja kvaliteta osušenog proizvoda. Povišenjem temperature tacni za smeštaj materijala ubrzava se proces sublimacije, ali može doći do staklaste tranzicije, otapanja proizvoda i potpunog kolapsa strukture ili do termičke degradacije termolabilnih komponenti (Nowak i Jakubczyk, 2020). Uprkos mnogim prednostima vezanim za sušenje zamrzavanjem, visoki početni troškovi su i dalje ograničavajući faktor za proizvođače.

4.4. Vakuum sušenje voća

Vakuum sušenje je tehnika sušenja voća manje intezivnom kinetikom u odnosu na konvektivno sušenje. Isparavanje vode iz materijala odvija se pri smanjenim apsolutnim pritiscima i nižim temperaturama, što uzrokuje samo neznatni broj hemijskih, senzornih i nutritivnih promena (*Durance i Vang, 2002; Drouzas i Schubert, 1996*). Ova tehnika sušenja predstavlja alternativu konvektivnom sušenju za sušenje toplotno osetljivih voćnih vrsta pri temperaturama nižim od 50^{o}C. Orikasa et al. (2014) utvrdili da je vakuumski osušen ploda kivija kvalitetniji u odnosu na onaj osušen toplim vazduhom u pogledu askorbinske kiseline i očuvanja boje. Prilikom sušenja u vakuumu proizvod se smešta u komoru u kojoj je se snižava apsolutni pritisak pomoću vakuum pumpe sa ciljem ubrzanja isparavanja vode na nižim temperaturama. U osnovi vakuum sušara se sastoji od komore sa grejanim tacnama za smeštaj proizvoda i vakuum pumpe. Na usporenu kinetiku sušenja utiče dinamika zagrevanja materijala koje se najčešće obavlja konduktivno preko grejnih ploča (tacni) na koje se smešta voće. Pored grejnih ploča, za pospešivanje efikasnosti zagrevanja voća unutar sušare, a samim tim i kinetike sušenja, može se koristiti infracrveno zračenje ili mikrotalasi. Sniženjem pritiska (vakuuma) u komori, izaziva i sniženje pritiska unutar zapremine materijala koji se suši delujući kroz mikro i makropore, a na taj način povećava se granična površina isparavanja vlage što se ogleda u ravnomernijem sušenju materijala u odnosu na konvektivno sušenje (u pojedinim slučajevima). Uniformnost sušenja jedna je prednosti ove tehnike, međutim, brzina sušenja je ograničena visinom temperature zagrevanja voća i apsolutnim pritiskom na kom neće doći do ključanja vode unutar materijala. U slučaju sušenja poroznih materijala sa niskom toplotnom provodljivošću, temperatura površine materijala raste, dok temperatura unutar materijala ne raste istom brzinom, što usporava proces sušenja.

U istraživanju *Šumić et al.* (2016) analiziran je uticaj različitih vrednosti temperatura grejnih ploča (48, 63 i 78^{o}C) i apsolutnog pritiska (30, 180 i 330 mbar) na kinetiku vakuum sušenja crvene ribizle i kvalitet finalnog proizvoda. Crvena ribizla je specifična voćna vrsta koja se retko nalazi u komercijalnom uzgoju, a zbog svojih karakteristika i benefita po ljudsko zdravlje interesantna je sirovina za vakuum sušenje. Kinetičke krive promene vlažnosti prikazane su na slici (*sl.4.21*) za izvedena merenja (sample 1-17) pri različitim vrednostima pritisaka i temperature grejnih ploča. Na osnovu dijagrama evidentno je da sušenje pri povišenim vrednostima apsolutnog pritisaka (330 mbar) rezultira sporijim procesom sušenja i uzorcima visoke krajnje vlažnosti. Optimizacijom istraživanog opsega parametara procesa vakuum sušenja odabrani su kao najpovoljniji temperatura grejnih ploča 70,2^{o}C i apsolutni pritisak 39 mbar, pri kojim krajnji proizvod postiže konačnu vlažnost 14,03%$_{wb}$ za vreme sušenja od 8h, aktivnost vode 0,382 i kapacitet rehidratacije 35,29%. Autori su pored sušenja u vakuumu obavili eksperimente sušenja liofilizacijom i zagrejanim vazduhom. Sušenjem liofilizacijom pri pritisku od 0,01 mbar, početnoj temperaturi uzoraka od -30^{o}C i trajanju od 72 časa, postignuta je vlažnosti od 12,57%, dok je pri konvektivnom sušenju vazduhom temperature 78^{o}C i trajanju od 8 časova izmerena vlažnost uzoraka od 19,98%.



No	Temperatura ploča (°C)	Pritisak (mbar)	Vreme sušenja (h)	Krajnja vlažnost (%)
Sample 1	63	180	12	22,98
Sample 2	63	30	16	10,23
Sample 3	78	30	12	8,09
Sample 4	63	180	12	17,68
Sample 5	63	330	16	17,5
Sample 6	48	330	12	60,67
Sample 7	78	180	16	10,07
Sample 8	48	30	12	14,56
Sample 9	63	180	12	13,36
Sample 10	48	180	16	37,8
Sample 11	63	180	12	18,88
Sample 12	63	30	8	17,22
Sample 13	78	180	8	21,62
Sample 14	63	330	8	51,64
Sample 15	48	180	8	68,99
Sample 16	78	330	12	12,76
Sample 17	63	180	12	16,42

Slika 4.21. Kinetika vakuum sušenja crvene ribizle za različite temperature (48, 63, 78°C) i apsolutni pritisk (30, 180, 330) (Šumić et al., 2016)

Istraživanja kinetike vakuum sušenja trešnje i uticaja na kvalitet obavili su autori *Vakula et al.,* (2020). Sušenje je obavljeno pri vrednostima temperature grejnih ploča od 50, 55, 60, 65 i 70°C i apsolutnog pritisaka 20, 65, 110, 150 i 220 mbar do ravnotežne vlažnosti na datom apsolutnom pritisku i temperaturi. Kombinovanjem navedenih vrednosti obavljeno je 27 eksperimentalnih merenja. Zabeležen je veći uticaj apsolutnog pritiska na brzinu sušenja. Svi uzorci sušeni na apsolutnom pritisku 20 mbar imali su kraće vreme sušenja (≈7,5-9,5h) u odnosu na uzorke sa višim pritiskom (10,5-15h). Najveća brzina sušenja zabeležena je kod uzoraka osušenih na temperaturi ploča 70°C i apsolutnom pritisku 20 mbar. Predikcija procesa sušenja obavljena je preko bezdimenzione vlažnost (MR) korišćenjem modela: Henderson-Pabis, modifikovani Henderson-Pabis, Ficks, Peleg, Logarithmic, Two term i Midilli et al. Na osnovu statističkih pokazatelja (R^2, RMSE, χ^2) model Midilli at al. ocenjen je kao najprikladniji za aproksimaciju vakuum sušenja trešnje pri istraživanim uslovima. Parametri modela dati su u tabeli (tab.4.13).

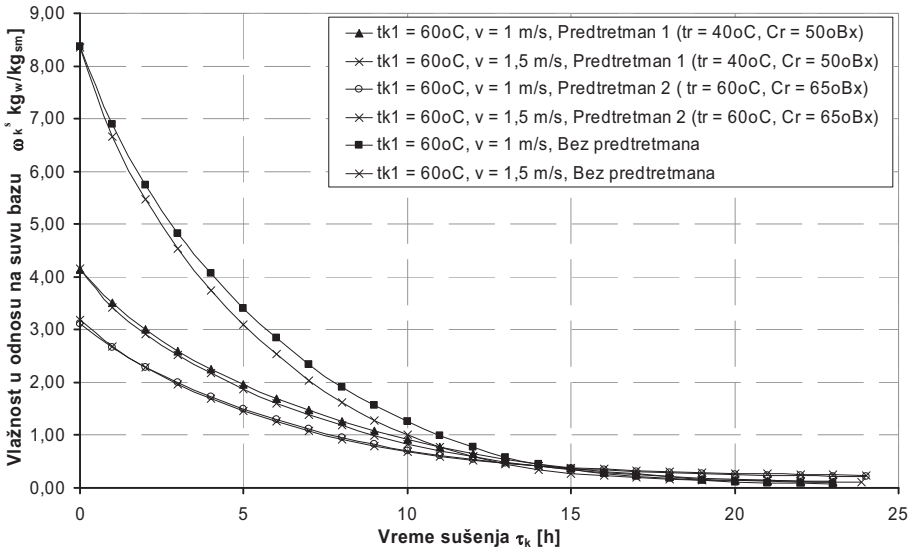
Tabela 4.13. Parametri Midilli et al. modela kinetike vakuum sušenja trešnje (Vakula et al., 2020)

Model Midilli et al	Temperatura ploča (°C)	Apsolutni pritisak (mbar)	a	k (1/h)	n	b (h^{-1})
$MR = a \cdot \exp(-k\tau^n) + b \cdot \tau$	50	20	1,02	0,0004	3,32	-0,0768
		65	1,01	0,0020	1,86	-0,0333
		110	1,00	0,0093	1,50	-0,0066
		155	1,01	0,0165	1,45	0,0009
		200	1,01	0,0437	1,13	0,0284
	60	20	1,00	0,0046	1,97	-0,0738
		65	1,01	0,0099	0,74	-0,0589
		110	1,01	0,0520	1,04	-0,0018
		155	1,01	0,0387	0,63	-0,0167
		200	1,01	0,0210	0,78	-0,0125
	70	20	0,99	0,0274	1,77	-0,0318
		65	1,00	0,0323	1,37	-0,0278
		110	1,01	0,0188	0,97	-0,0418
		155	1,01	0,0317	1,32	0,0067
		200	1,02	0,0568	0,92	-0,0095

4.5. Kombinovano sušenje

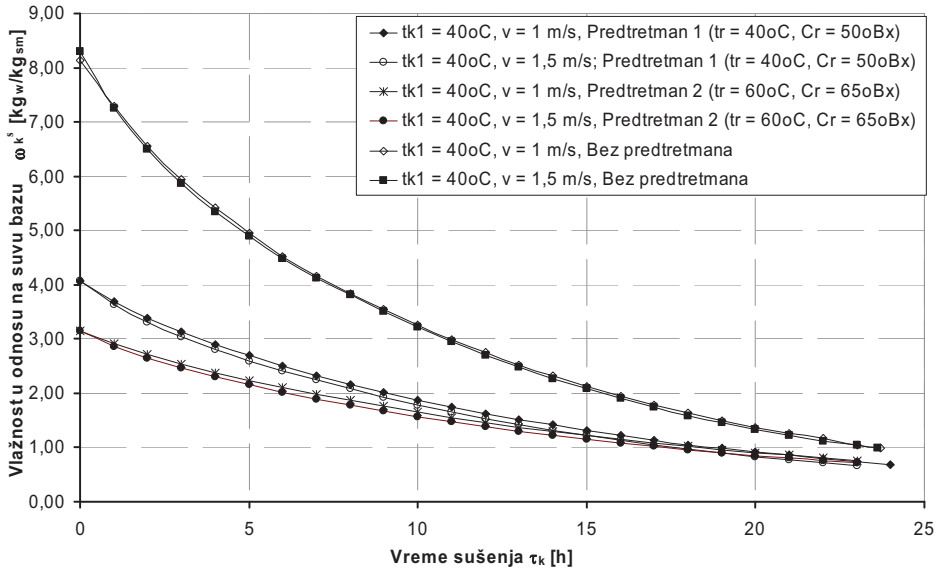
Uobičajena tehnologija sušenja kajsije, kruške i nektarine obuhvata pripremnu tehnološku operaciju očuvanja boje sumporisanje i sušenje zagrejanim vazduhom. Sumporisanje usporava enzimatske i neenzimatske reakcije, kao i mikrobiološko kvarenje tokom dugoročnog skladištenja. Operacija sumporisanja, a zatim sušenje zagrejanim vazduhom utiče na promenu senzornih (zakišeljava proizvod), nutritivnih i fizičkih osobina suvog voća, kao i redukciju fenolnih jedinjenja, karotenoida i vitamina C. U poslednje vreme, u svetu, raste potražnja za sušenim voćem bez sumpora sa boljim funkcionalnim osobinama. Kombinovana tehnika sušenja, osmotsko sušenje kao predtretman sušenju zagrejanim vazduhom omogućuje smanjenu upotrebu sumpora i unapređuje kvalitativne atribute sušenog voća (*Torreggiani et al., 2001; Sakooei-Vayghan et al., 2020*).

Na slikama 4.22 i 4.23 prikazani su zbirni dijagrami kinetičkih krivih promene srednje vlažnosti (ω_k^s) polutki kajsija u odnosu na suvu bazu u zavisnosti od vremena (τ_k) konvektivnog sušenja za: temperaturu vazduha ispred sloja materijala 60°C (*sl.4.22*) i 40°C (*sl.4.23*); brzinu kretanja vazduha ispred sloja materijala od 1,0 m/s i 1,5 m/s; osmotskog predtretmana 1 (40°C i 50%), predtretmana 2 (40°C i 50%) i bez osmotskog predtretmana (samo konvektivno).



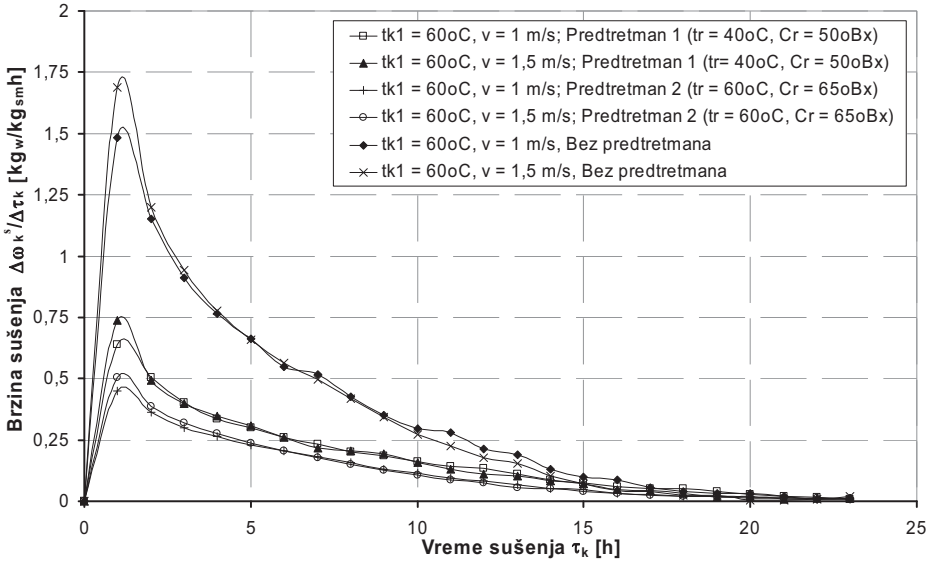
Slika 4.22. Kinetičke krive promene srednje vlažnosti polutki kajsija u odnosu na suvu bazu (ω_k^s) tokom vremena sušenja - τ_k u zavisnosti od temperature vazduha - t_{k1} = 60^{o}C, brzine strujanja vazduha ispred sloja materijala - v_v = 1 m/s i 1,5 m/s i predtretmana (Pavkov, 2012)

Sa slika se uočava da više temperature vazduha za sušenje utiču na intenzivnije sniženje vlažnosti polutki. Poređenjem krivih u zavisnosti od upotrebljenog predtretmana, zbog razlika u početnim vlažnostima polutki kajsija, intenzivnije se suše uzorci bez predtretmana, a zatim uzorci sušeni sa predtretmanom 1 (C_r = 50^{o}Bx, t_r = 40^{o}C), a najmanji intenzitet sa predtretmanom 2 (C_r = 65^{o}Bx, t_r = 60^{o}C). Na nižoj temperaturi vazduha za sušenje 40^{o}C (*slika 4.23*), dostignuta je niža krajnja vlažnost uzoraka kod predtretmana 1 i 2 u odnosu na uzorke sušene bez prethodnog predtretmana. Krajnja vlažnost za polutke kajsija kod primenjenih predtretmana 1 i 2 su približno iste.



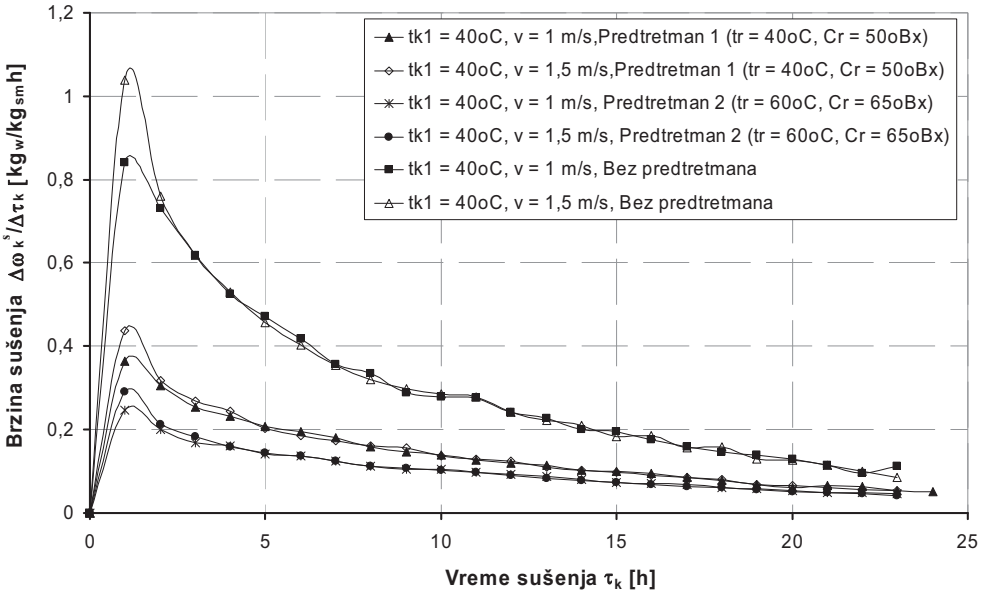
Slika 4.23. Kinetičke krive promene srednje vlažnosti polutki kajsija u odnosu na suvu bazu (ω_k^s) tokom vremena sušenja - τ_k u zavisnosti od temperature vazduha - t_{k1} = 40^{o}C, brzine strujanja vazduha ispred sloja materijala - v_v = 1 m/s i 1,5 m/s i predtretmana (Pavkov, 2012)

Na osnovu grafika konstatuje se da u zavisnosti od temperature vazduha za sušenje u okviru istog predtretmana se beleži najveće sniženje srednje vlažnosti pri višoj vrednosti brzine kretanja vazduha. Na slikama 4.24 i 4.25 prikazane su kinetičke krive brzine sušenja ($\Delta\omega_k^s/\Delta\tau_k$) kajsija u obliku polutke u zavisnosti od vremena (τ_k) tokom konvektivnog sušenja za: temperaturu vazduha ispred sloja materijala 60°C (sl.4.24) i 40°C (sl.4.25); brzinu vazduha ispred sloja materijala 1.0 m/s i 1,5 m/s; predtretmane 1, 2 i bez predtretmana.



Slika 4.24. Kinetičke krive brzine sušenja polutki kajsija ($\Delta\omega_k^s/\Delta\tau_k$) u odnosu na suvu bazu tokom vremena sušenja - τ_k u zavisnosti od temperature vazduha - t_{k1} = 60°C, brzine strujanja vazduha ispred sloja materijala - v_v = 1 m/s i 1,5 m/s i predtretmana (Pavkov, 2012)

Kinetičke krive brzine sušenja poseduju dva perioda sušenja. Prvi period je karakterističan porastom brzine sušenja i dostizanja maksimalne brzine isparavanja molekula vode iz materijala. Ovaj period traje u toku prvih 60 minuta procesa. Ovakvo isparavanje molekula vode nastaje zbog površinski vezane vlage, koja uglavnom isparava na površini materijala, nema zone suvog materijala, nakon čega brzina sušenja opada. U drugom periodu brzina sušenja se postepeno snižava zbog povlačenja fronta isparavanja u unutrašnjost materijala, počinju da se stvaraju suvi slojevi. Vrednost koeficijenta difuzije vlage, u prvom periodu sušenja, intezivno raste i dostiže svoj maksimum, a u drugom periodu sušenja njegova vrednost se postepeno snižava kako se materijal približava ravnotežnoj vlažnosti.

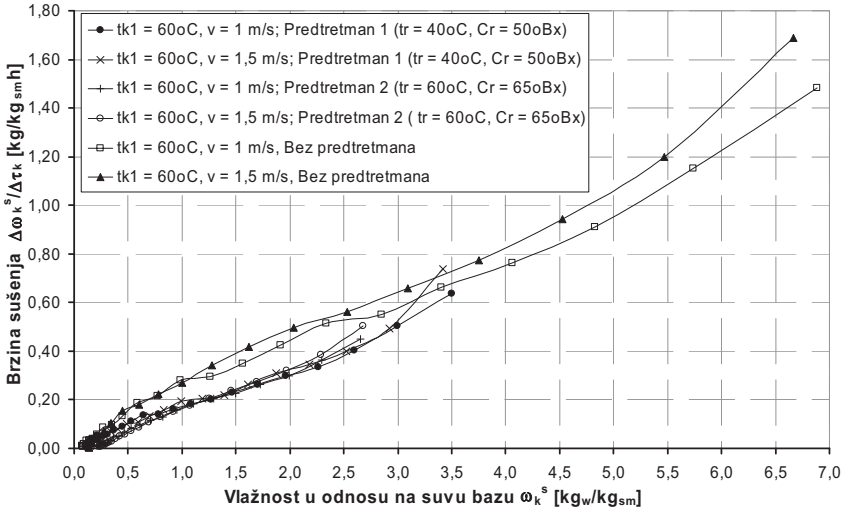


Slika 4.25. Kinetičke krive brzine sušenja polutki kajsija ($\Delta\omega_k^s/\Delta\tau_k$) u odnosu na suvu bazu tokom vremena sušenja - τ_k u zavisnosti od temperature vazduha - $t_{k1} = 40^oC$, brzine strujanja vazduha ispred sloja materijala - $v_v = 1$ m/s i 1,5 m/s i predtretmana (Pavkov, 2012)

Poređenjem prvog perioda sušenja u zavisnosti od primenjenog predtretmana, konstatuje se da najveću brzinu sušenja postižu uzorci sušeni bez predtretmana, a zatim uzorci sušeni sa predtretmanom 1 ($C_r = 50^oBx$, $t_r = 40^oC$), a najmanju brzinu sušenja sa predtretmanom 2 ($C_r = 65^oBx$, $t_r = 60^oC$). Ovakva pojava se tumači različitim vrednostima početnih vlažnosti kajsije. Viša vlažnost polutki kajsija ima za posledicu veći sadržaj površinski vezane vlage i kapilarno vezane vlage kod vlažnijih uzoraka.

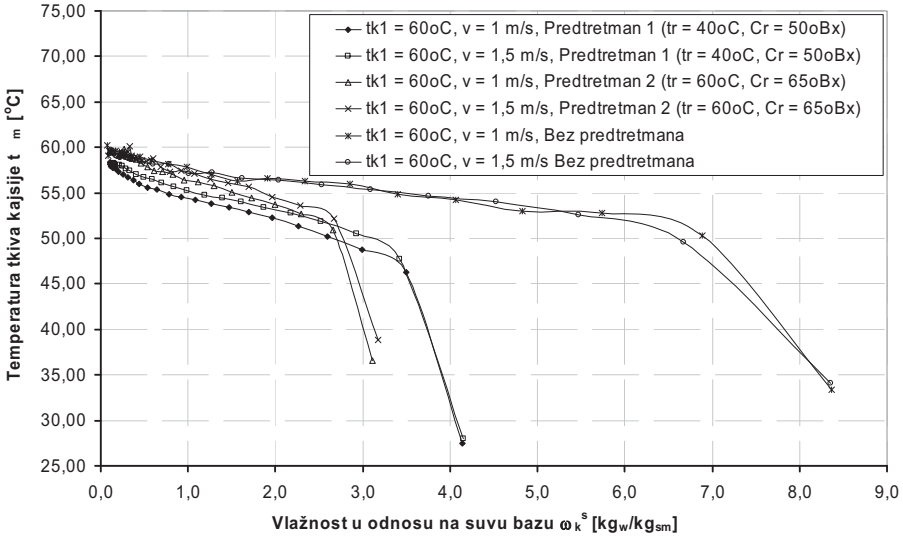
Srednje brzine sušenja za različitu kombinaciju faktora posmatrano u istom vremenskom trenutku, kako je prikazano na dijagramima (*slike 4.24 i 4.25)*, nisu međusobno uporedive zbog različitih vlažnosti polutki kajsija u posmatranom vremenskom trenutku. Radi lakšeg upoređivanja vrednosti formiran je dijagram prikazan na slici 4.26. Prikazana je zavisnost srednje brzine sušenja *($\Delta\omega_k^s/\Delta\tau_k$)* od srednje vlažnosti polutki kajsija u odnosu na suvu bazu (ω_k^s) za temperaturu vazduha za sušenje ispred sloja materijala 60°C, brzinu kretanja vazduha ispred sloja materijala 1 m/s i 1,5 m/s, predtretmane 1 i 2 i bez predtretmana. Posmatrajući izračunate vrednosti srednjih brzina sušenja pri istoj srednjoj vlažnosti, najveća vrednost srednje brzine sušenja ostvaruje se kod uzoraka sušenih bez predtretmana. Brzine sušenja za primenjene predtretmane 1 i 2 približno su iste do vlažnosti $\omega_k^s = 1$ kg_w/kg_{sm}, što odgovara vremenu sušenja oko 10 sati, u kasnijem periodu brzina sušenja kod predtretmana 1 je nešto veća pri istoj vlažnosti u odnosu na suvu bazu.

Na osnovu prikazanih grafika primetan je uticaj izabranih vrednosti brzine kretanja vazduha ispred sloja materijala na kinetiku, ali je manje izražen nego izabrani predtretmani i temperature vazduha za sušenje.



Slika 4.26. Zavisnost srednje brzine sušenja ($\Delta\omega_k^s/\Delta\tau_k$) od vlažnosti polutki kajsija (ω_k^s) u odnosu na suvu bazu za temperaturu vazduha - $t_{k1} = 60^oC$, brzine strujanja vazduha ispred sloja materijala - v_v = 1 m/s i 1,5 m/s i predtretmana (Pavkov, et al., 2021)

Na slici 4.27 prikazane su vrednosti temperature polutki kajsija (t_m) izmerene na dubini od oko 5 mm od gornje površine. Temperature materijala su prikazane u zavisnosti od vlažnosti tkiva mezokarpa u odnosu na suvu bazu (ω_k^s) pri temperaturi vazduha za sušenje od 60°C, brzine kretanja vazduha ispred sloja materijala od 1,0 m/s i 1,5 m/s, predtretmane 1 i 2 i bez predtretmana. Sa dijagrama se uočava da pri istoj vlažnosti materijala postoji razlika u temperaturama materijala u zavisnosti od upotrebljenog predtretmana. Niže temperature materijala postižu se kod polutki kajsija prethodno pripremljenih sa predtretmanima 1 i 2. Ove razlike su izraženije u prvih 10 sati sušenja, a u kasnijem periodu sušenja su manje izražene. Uzorci kod kojih su upotrebljene više brzine kretanja vazduha za sušenje ispred sloja materijala brže se zagrevaju.



Slika 4.27. Zavisnost temperature polutki kajsija (t_m) od vlažnosti tkiva (ω_k^s) u odnosu na suvu bazu za temperaturu vazduha - $t_{k1} = 60^oC$, brzine strujanja vazduha ispred sloja materijala - v_v = 1 m/s i 1,5 m/s i predtretmana (Pavkov, et al., 2021)

Rezultati koeficijenta difuzije vlage (D_{ew}) polutki kajsija tokom kombinovanog sušenja prikazani su u tabeli 4.14. Vrednosti se kreću od 2,761 x 10^{-11} do 1,785 x 10^{-10} m^2/s. Kod svih eksperimentalnih jedinica sa porastom temperature i brzine vazduha zabeleženo je povećanje vrednosti efektivne difuzivnosti vlage. Primetno je da temperatura vazduha ima veći uticaj od brzine vazduha na porast vrednosti D_{ew}. Poređenjem vrednosti koeficijenata difuzije iz tabele 4.14 može se zaključiti da osmotski predtretman utiče na smanjenje vrednosti D_{ew}, sa porastom procesnih parametara osmotske dehidratacije, temperature i koncentracije rastvora, vrednosti D_{ew} opadaju.

Tabela 4.14. Vrednosti koeficijenta difuzije vode za kombinovano sušenje polutki kajsija (Pavkov, et al., 2021)

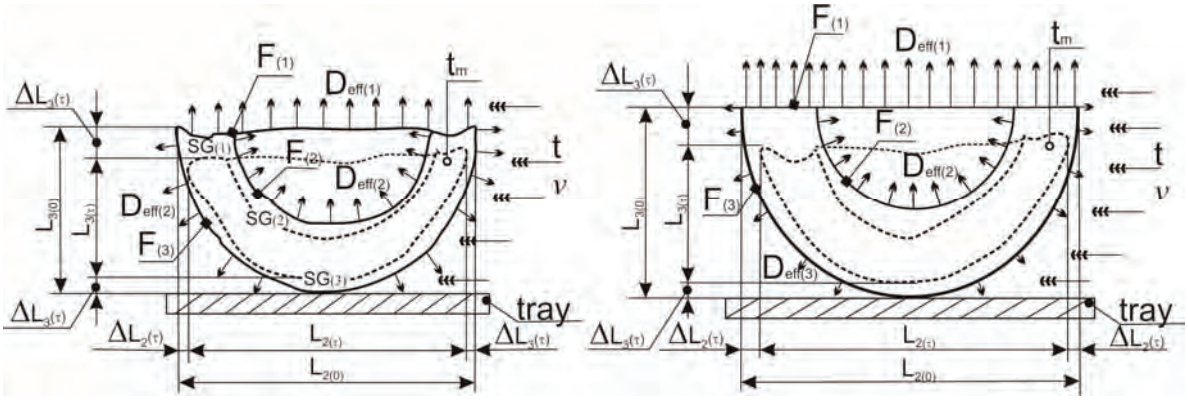
Osmotsko sušenje	Brzina vazduha (m/s)	Temperatura vazduha (^oC)	D_{ew} (m^2/s)
Temperatura rastvora 40^{o}C Koncentracija rastvora 50%	1,0	40	4,640 x 10^{-11}
		50	7,337 x 10^{-11}
		60	1,123 x 10^{-10}
	1,5	40	5,155 x 10^{-11}
		50	7,908 x 10^{-11}
		60	1,416 x 10^{-10}
Temperatura rastvora 60^{o}C Koncentracija rastvora 65%	1,0	40	2,761 x 10^{-11}
		50	3,399 x 10^{-11}
		60	6,098 x 10^{-11}
	1,5	40	2,848 x 10^{-11}
		50	3,334 x 10^{-11}
		60	6,463 x 10^{-11}

Energija aktivacije za sve eksperimentalne jedinice nalazi se u opsegu od 34,156 kJ/mol do 49,930 kJ/mol. Osmotski predtretman snižava vrednost energije aktivacije u odnosu na kontrolni uzorak. Takođe, sa porastom brzine vazduha intenzivira se proces sušenja, što dovodi do povećane vrednosti energije aktivacije.

Tabela 4.15. Energija akivacije za kombinovano sušenje polutki kajsija (Pavkov, et al., 2021)

Osmotsko sušenje	Brzina vazduha (m/s)	E_a (kJ/mol)
Temperatura rastvora 40^{o}C Koncentracija rastvora 50%	1,0	38,312
	1,5	43,739
Temperatura rastvora 40^{o}C Koncentracija rastvora 50%	1,0	34,156
	1,5	35,280

Na slici 4.28 grafički je upoređena razmena mase i promene dimenzija polutki kajsija sušene, tehnikom kombinovanog sušenja (a) i tehnikom konvektivnog sušenja (b). Punom linijom su nacrtane dimenzije polutki pre konvektivnog sušenja, a tačkasta linija posle završenog sušenja.



Slika 4.28. Razmena mase tokom konvektivnog sušenja polutki kasija : a) sa osmotskim predtretmanom, b) bez osmotskog predtretmana (kontrolni uzorak). $F_{(1)}$- Površina nastala rezanjem $F_{(2)}$ – Površina nastala vađenjem koštice, $F_{(3)}$ – Površina, $L_{2(o)}$, $L_{2(\tau)}$ – širina polutke kajsije na početku procesa i vremenu τ, $L_{3(o)}$, $L_{3(\tau)}$ – debljina polutke kajsije na početku procesa i vremenu τ, $D_{eff(1)}$, $D_{eff(2)}$, $D_{eff(3)}$ – difuzija i isparavanje vode kroz površine $F(_1)$, $F(_2)$, $F(_3)$, Δ - razlika, ▪▪▪▪ - tačkasta linija dimenzije posle sušenja, tm – tempertaura kajsije na dubini od 5 mm, t – topao vazduh, v – brzina vazduha, « - smer strujanja vazduha, → - isparavanje vode sa površina $F(_1)$, $F(_2)$, $F(_3)$ (Pavkov et al., 2021).

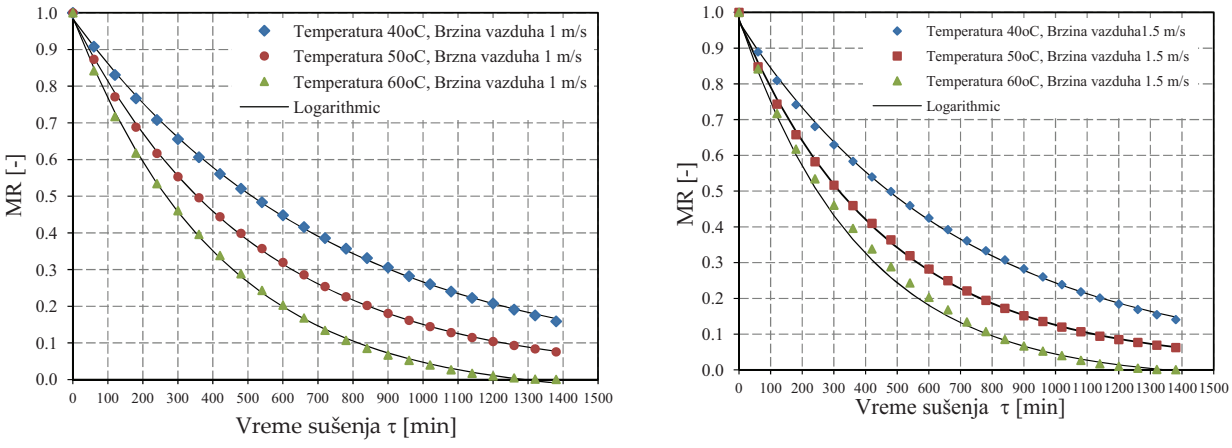
Tokom konvektivnog sušenja prelaz vlage sa površine polutki kajsija u vazduh i difuzija molekula vode kroz tkivo ka površini razmene je intenzivniji kod polutki kasija sušenih bez osmotskog predtretmana. Slojevi ćelija koji čine površinu $F_{(1)}$ imaju najintenzivniji prelaz vlage u vazduh, zatim sa površine $F_{(2)}$, a najsporiji prelaz vlage je sa površine $F_{(3)}$. Kod polutki kasija sušenih samo konvektivnom tehnikom sušenja na početku procesa zbog povišenog sadržaja vlage koja je kapilarno vezana, proces isparavanja je na površinama $F_{(1)}$, $F_{(2)}$ i $F_{(3)}$, tokom procesa front isparavanja se pomera prema unutrašnjosti materijala. Slojevi ćelija tkiva koji se nalaze bliže površini intenzivnije su suše u odnosu na udaljenije slojeve, temperatura materijala raste (*sl.4.28b*), a zapremina se smanjuje. Zbog brzog premeštanja fronta isparavanja ka centru zapremine dolazi do presušivanja spoljnih slojeva, a unutrašnji slojevi ćelija su vlažniji, formira se neravnomerno polje vlažnosti u materijalu. Različite vlažnosti između slojeva ćelija koje čine površina $F_{(1)}$, $F_{(2)}$ i $F_{(3)}$ uticale su na izmereni intenzitet skupljanja ($\Delta_{L3(0-\tau)} > \Delta_{L2(0-\tau)} > \Delta_{L1(0-\tau)}$). Formirani su unutrašnji naponi između slojeva i veće deformacije početnog oblika kod konvektivno sušenog uzorka u odnosu na kombinovano sušene uzorke. Kod polutki kajsija prethodno tretiranih sa osmotskim predtretmanom zbog prisustva molekula rastvorka u tkivu u rasporedu $SG_{(1)} > SG_{(2)} > SG_{(3)}$, (*sl. 4.28a*) sušenje površina $F_{(1)}$, $F_{(2)}$ *i* $F_{(3)}$ je ujednačenije. Manje dimenzije na početku sušenja uzoraka prethodno osmotski sušenih, obezbeđuju kraću putanju za difuziju molekula vode, što takođe utiče na formiranje homogenog polja vlažnosti unutar materijala Front isparavanja vode duže se zadržava u površinskim slojevima ćelija polutki, te se sporije pomera ka unutrašnjim slojevima. Shodno tome, temperatura tkiva na dubini od 5 mm sporije raste kod uzoraka tretiranih osmotskim sušenjem u odnosu na konvektivno sušeni uzorak (*sl.4.27*). Iste rezultate merenja temperature materijala prijavili su autori za sušenje kajsije (*Bozkir et al., 2006*) i diskova banane (*Sankat et al. 1996*). Presušivanje površinskih slojeva manje je izraženo kod kombinovano sušenih uzoraka. Niža temperatura

materijala je posledica trošenja toplote na kidanje novonastalih veza između suve materije, rastvorka i vlage u tkivu kajsije, formira se adsorpciono vezana vlaga. Povećanje udela adsorpciono vezane vlage snižava vrednost aktivnosti vode (*Azoubel et al., 2009*).

Autori Pavkov et al (2021) obavili su matematičko modelovanje dobijenih vrednost bezdimenzione vlažnosti (MR) polutki kajsija u vremenu tokom kombinovanog sušenja sa 10 izabranih matematičkih modela (Newton, Page, Extended Handerson and Pabis, Modified Henderson and Pabis, Logarithmic, Modified Page, Verma, Two Term, Two Term Exponential, Diffusion Approach). Na osnovu statističkih pokazatelja (R^2, $\chi^{2,}$ RMSE, CRV) model *Logarithmic* ocenjen je kao najprecizniji za aproksimciju eksperimentalnih vrednosti bezdimenzione vlažnosti (MR) polutki kajsija tokom vremena sušenja u okviru parametara istraživanja. Parametri modela su dati u tabeli (tab. 4.16). Na slici *(sl. 4.29)* prikazani su eksperimentalni podaci bezdimenzione vlažnosti i predikcione vrednosti dobijene *Logarithmic* modelom.

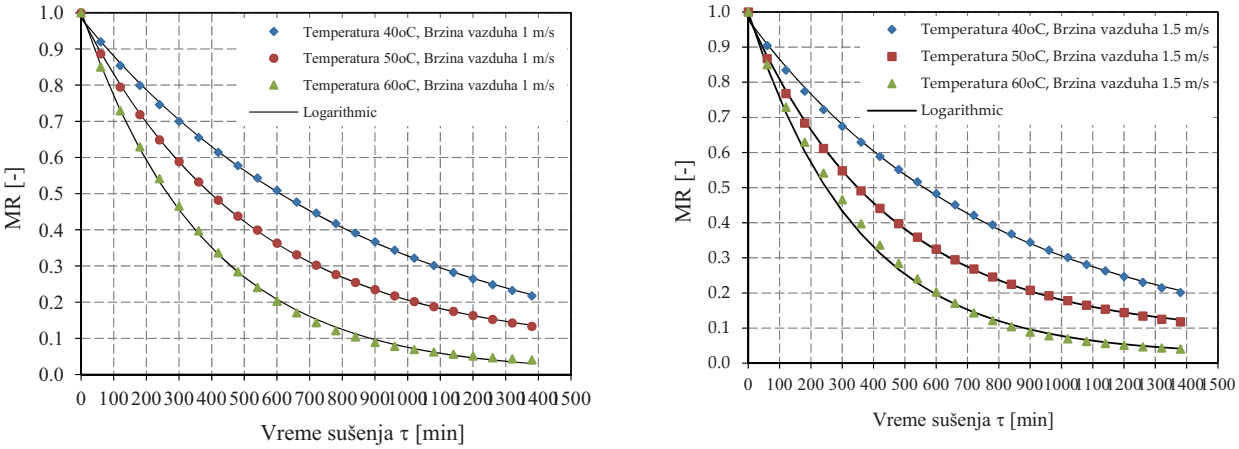
Tabela 4.16. Parametri Logarithmic modela (Pavkov et al, 2021)

Logarithmic model	Osmotsko sušenje	Brzina vazduha (m/s)	Temperatura vazduha (°C)	a (-)	b (-)	k (min^{-1})
MR=a exp(-kτ)+b	Temperatura rastvora 40°C Koncentracija rastvora 50%	1,0	40	0,9649	0,0192	0,0014
			50	0,9747	0,0094	0,0019
			60	1,0349	-0,0474	0,0024
		1,5	40	0,9557	0,0178	0,0014
			50	0,9624	0,0146	0,0022
			60	1,0122	-0,0297	0,0026
	Temperatura rastvora 60°C Koncentracija rastvora 65%	1,0	40	0,9576	0,0279	0,0012
			50	0,9193	0,0715	0,0019
			60	0,9985	0,0050	0,0027
		1,5	40	0,9268	0,0507	0,0013
			50	0,9060	0,0797	0,0022
			60	0,9756	0,0236	0,0029



(**a**) (**b**)

Slika 4.29. Eksperimentalne vrednosti bezdimenzione vlažnosti (MR) i predikcione krive kinetike kombinovanog sušenja polutki kajsija za temperaturu vazduha 40, 50 i 60°C, brzinu vazduha 1,0 m/s (a) i 1,5 m/s (b) i osmotski predtretman OD (40°C, 50%) (Pavkov et al., 2021)

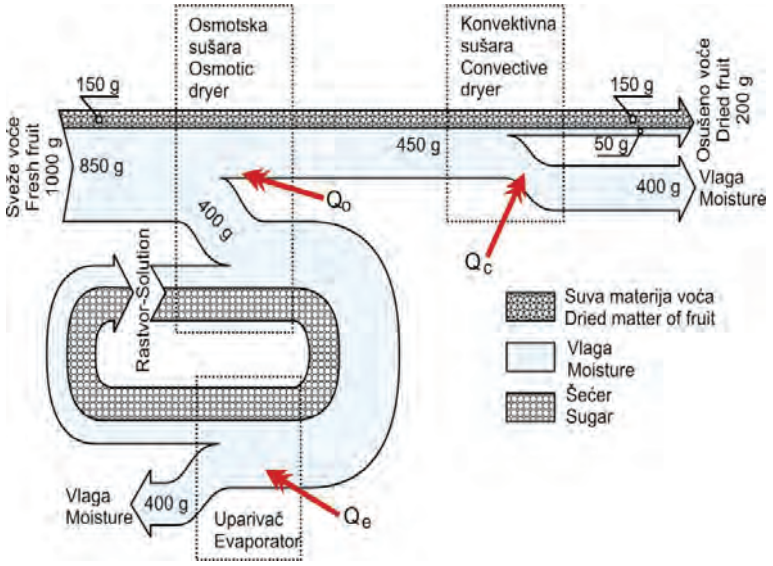


(**a**) (**b**)

Slika 4.30. Eksperimentalne vrednosti bezdimenzione vlažnosti (MR) i predikcione krive kinetike kombinovanog sušenja polutki kajsija za temperaturu vazduha 40, 50 i 60°C, brzinu vazduha 1,0 m/s (a) i 1,5 m/s (b) i osmotski predtretman OD (60°C, 65%) (Pavkov et al., 2021)

Uticaj osmotskog predtretmana na kinetiku sušenja kocki kruške (*d'Anjou*) istražili su *Park et al.* (*2002a*). Merenja su obavljena na kockama kruške zapremine oko 1 cm^3 koje su osmotski sušene u rastvoru saharoze koncentracije 55%, pri temperaturi rastvora 40°C i vremenu trajanja sušenja od 310 minuta. Temperatura vazduha za sušenje je bila 40, 60 i 80°C, a brzina kretanja vazduha je bila 1,0 i 2,0 m/s. Na osnovu rezultata merenja autori zaključuju da brzina sušenja raste sa porastom temperature vazduha za sušenje i brzine kretanja vazduha ispred sloja materijala. Analizom kinetičkih krivih brzine konvektivnog sušenja autori zaključuju da kocke kruške koje su prethodno osmotski sušene imaju veću brzinu sušenja od svežih iznad vlažnosti 1,0 kg_w/kg_{sm}. Ispod naznačene vlažnosti brzine osmotski sušenih kocki su niže od brzine sušenja netretiranih kocki. Slično istraživanje obavio je autor *Guine* (*2006*) sa mezokarpom kruške. Autor navodi da sa povećanjem šećera u plodu kruške raste otpor difuziji vode kroz tkivo tokom konvektivnog sušenja. Povećanjem udela šećera u mezokarpu kruške smanjuje se brzina konvektivnog sušenja, što posebno dolazi do izražaja pri nižim vlažnostima. Autori *Azoubel et al.* (*2009*) su takođe istražili efekat osmotskog predtretmana na kinetiku sušenja listića jabuke. Zaključuju da sa porastom sadržaja šećera u tkivu jabuke se snižava brzina konvektivnog sušenja. Isti autori navode da listići jabuke koji su prethodno osmotski sušeni imaju bolju teksturu, aromu, izgled i nižu vrednost aktivnosti vode od listića jabuke sušenih bez osmotskog predtretmana pri istoj vlažnosti tkiva.

Babić et al. (*2004, 2005b*) analizirali su maseni i energetski bilans kombinovane tehnologije sušenja voća. Osmotskim sušenjem voća sa 85% na 75% vlažnosti odstranjuje se polovina vlage iz voća koju je potrebno ukloniti do vlažnosti bezbedne za čuvanje. Pri osmotskom sušenju iz 1 kg svežeg voća odstranjuje se 400 g vlage. Ako se konvektivno sušenje obavlja do vlažnosti 25% potrebno je odvesti još 400 g vlage. Prvih 400 g vlage iz voća prešlo je u rastvor šećera, a drugih 400 g u vazduh za sušenje (*slika 4.31*).



Slika 4.31. Maseni bilans kombinovanog sušenja voća (Babić et al., 2005b)

4.6. Mikrotalasno sušenje

Mikrotalasno sušenje voća, koliko je poznato autorima, nije pronašlo svoju industrijsku primenu u sušenju voća, ali je zastupljeno u naučnim istraživanjima. U okviru teksta posvetiće mu se pažnja, od osnova do mogućih aplikacija. Mikrotalasi su elektromagnetni talasi (elektromagnetno zračenje) koji su kombinacija oscilujućeg električnog i magnetnog polja u obliku međusobno upravnih talasa u frekvencijama između 300 MHz i 300 GHz, talasne dužine od 1,0 mm do 1,0 m. Interakcija mikrotalasa sa materijalom zavisi od njegovih karakteristika (frekvencije, talasne dužine) i prirode materijala, naročito dielektrične permitivnosti. Mehanizam mikrotalasnog zagrevanja zasnovan je na oscilacijama jona i molekula kada je materijal izložen električnom polju koje uzrokuje oscilacije jona i konverziju kinetičke energije u toplotnu. Dipolarni molekuli materijala, molekuli vode, slučajno raspoređeni bivaju orijentisani u skladu sa polarnošću polja. Orijentacija molekula je odgovorna za generisanje energije. Ova dipolarna rotacija će stvoriti trenje između molekula, što će dovesti do unutrašnjeg stvaranja toplote (dielektrično zagrevanje) (*Jean-Claude i Hamoud-Agha, 2019*). Kada su elektromagnetni talasi usmereni direktno ka materijalu, deo zračenja odbija se od površine, a deo zračenja se apsorbuje. Apsorpcija zračenja rezultira smanjenjem amplitude unutrašnjeg električnog polja, odnosno njegove snage. Dubina penetracije se definiše kao udaljenost prodiranja u materijal za koji je apsorbovano 63% upadne snage elektromagnetnog talasa. Dubina prodiranja zavisi od dielektričnih osobina, kao i talasne dužine.

Voda apsobuje mikrotalase i pri tome dolazi do konverzije energije u toplotnu *(Jean-Claude i Hamoud-Agha, 2019*). Mikrotalasi obezbeđuju zagrevanje voća, ne samo površinsko, nego i po zapremini, sa malim utroškom energije. Preporučuje se sušenje voća konstantnom snagom mikrotalasa *(Cohen i Yang, 1995)*. Vlada različito mišljenje po pitanju homogenosti i kontrole zagrevanja mikrotalasima. Pojedini istraživači potvrđuju homogeno zegrevanje materijala, drugi ga navode kao nedostatak (*Sagar i Kumar, 2010; Jean-Claude i Hamoud-Agha, 2019; Cohen i*

Yang, 1995). Razlozi neravnomernog zagrevanja su: veličina proizvoda, fenomen rezonance, heterogeni sasatav materijala, oblik proizvoda.

U slučaju, voća većih dimenzija dolazi do potpunog apsorbovanja energije elektromagnetnog zračenja pre nego što dosegne centar proizvoda. Zbog toga svi delovi voća neće biti izloženi dejstvu elektromagnetnih talasa i zagrevanja. Voće manjih dimenzija će se brže zagrevati zbog bolje penetracije talasa. Međutim, manji proizvodi su osetljiviji na varijacije snage elektromagnetnog polja. Fenomen dimenzionalne rezonance: u nekim slučajevima talas se reflektuje od donje ivice proizvoda, što dovodi do pojave interferencije, odnosno slabljenja ili pojačavanja uticaja zračenja. Ovo dovodi do stvaranja hladnih tačaka (preneseni i reflektovani talasi se međusobno poništavaju) i/ili vrućih tačaka (preneseni i reflektovani talasi se sabiraju). Ukoliko je proizvod sastavljen od različitih komponenata različitih dielektričnih konstanti to vodi ka koncentrisanju energije i stvaranju mesta viših temperatura i selektivnog pregrevanja. Voće ima slabu toplotnu provodljivost, te često dolazi do lokalnog pregrevanja. Oblik pripremljenog voća za sušenje ima značajnu ulogu u homogenosti zagrevanja mikrotalasima. Oblik utiče na dubinu prodiranja talasa i pojavu toplih ili hladnih tačaka. Prisustvo oštrih ivica i pravih uglova vodi ka pregrevanju na ovim mestima (*Jean-Claude i Hamoud-Agha, 2019*).

Zbog energije usmerene po čitavoj zapremini proizvoda, unutrašnji pritisak vodene pare intezivno raste po čitavoj zapremini voća, rezultira povećanom brzinom sušenja (*Onwude et al., 2016; Morais et al., 2018*). Zavisno od vrste materijala, mikrotalasi ne mogu u nekim slučajevima da obezbede sušenje i zbog toga se kombinuju sa konvektivnim ili vakuum sušenjem. Iako mikrotalasno i konvektivno sušenje nezavisno imaju nedostatke, njihovim kombinovanjem postiže se poboljšanje procesa. Na primer, primena mikrotalasa skraćuje vreme sušenja banane (60^oC) za oko 64%.

Konvencionalno sušenje, toplim vazduhom, kombinuje se sa mikrotlasnim zagrevanjem, pri čemu strujanje vazduha omogućuje odnošenje vlage, a zagrevanje po čitavoj zapremini proizvoda ubrzava difuziju od unutrašnjosti ka površini. Ovo je naročiti bitno u drugom periodu sušenja kada je transport toplote limitiran pri konvektivnom sušenju (Jean-Claude i Hamoud-Agha, 2019). Pojedini istraživači dolaze do zaključaka da podrška konvektivnom sušenju mikrotalsima skraćuje vreme kod mrkve (25-90%) (Prabhanjan et al., 1995), kivija (40-89 %) (Maskan, 2001), banane (64.3 %) (Maskan, 2000), brusnice (60-82.5 %) (Beaudry et al., 2004), crnog luka (do 80%) (Sharma and Prasad, 2006), gljiva (75 %) (Bhattacharya et al., 2015) i raštana (up to 70 %) (Alibas, 2009). Mikrotalasno sušenje kombinovano sa konvektivnim sušenjem u poslednjoj fazi procesa skraćuje vreme u poređenju samo sa konvektivnim sušenjem. Primena mikrotalsnog zračenja na početku sušenja ubzava zagrevanje unutrašnjih slojeva proizvoda.

Sušenje zamrzavanjem predstavlja jedan poseban oblik sušenja u vakuumu. Odlikuje se očuvanjem visokog kvaliteta osušenog proizvoda. Glavni nedostatak ovog načina sušenja je ograničen transport toplote, pri čemu nema konstantnog perioda sušenja. S obzirom da je voda u zamrznutom stanju, ne kreće se ka površini proizvoda pomoću kaplirnih sila nego samo difuzijom. Pojava suve porozne strukture odmah ispod površine proizvoda vodi ka smanjenom transportu toplote. Mikrotalasi umesto, ili kao dodatak, pločama za zagrevanje materijala mogu biti korisni za ubrzanje procesa sušenja (*Gaukel et al., 2017*). Međutim, pri tretmanu mikrotalasima u vakuumu dolazi do pojave neujednačenih termičkih svojstava zbog neujednačenosti distribucije mikrotalasa. Posebno je formiranje plazme značajan problem pri

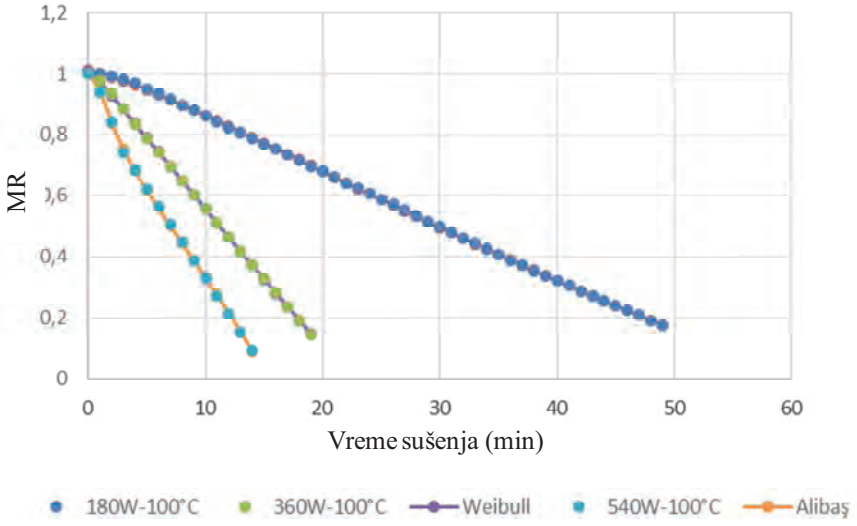
niskim apsolutnim pritiscima, jer može dovesti do lokalizovanog odmrzavanja proizvoda (*Wray i Ramasvami, 2015*). Kada su nezamrznuti delovi prisutni pored zamrznutih delova, nezamrznuti delovi se prvenstveno zagrevaju zbog velikih razlika u dielektričnim svojstvima vode i leda. To će dovesti do topljenja i kolapsa strukture proizvoda. Međutim, dejstvom mikrotalasa niskoenergetskog nivoa može značajno ubrzati proces sušenja zamrzavanjem.

Parit i Prabhu (2017) na osnovu svojih istraživanja mikrotalasnog sušenja listića jabuke preporučuju upotrebu mikrotalsanog tretmana u prvoj fazi sušenja bez uticaja na kavalitet. Zaključuju da sa povećanjem snage mikrotalsnog zračenja ubrzava proces sušenja. Mikrotalasni tretaman može se primeniti pri sušenju listića jabuke u trajanju od 3 do 5 minuta, pri čemu se smanjuje vlažnost za 20%. Kvalitet suvog grožđa sušenog konvektivno potpomognuto mikrotalasima značajno je bolji od sušenog samo zagrejanim vazduhom u pogledu boje, oštećenja, kristalizovanog šećera, lepljivosti itd. U poređenju sa konvektivnim sušenjem, primena mikrotalasa skraćuje vreme sušenja (*tab. 4.18*) (*Orsat et al., 2006*).

Tabela 4.18. Poređenje kombinovanog (konvektivno-mikrotalasno) i konvektivnog sušenja grožđa (Orsat et al., 2006)

Metod sušenja	Temperatura vazduha (ºC)	Protok vazduha (kg/s)	Vreme sušenja (h)
Konvektivno	50	0,0210	23,66
	60	0,0204	16,75
Mikrotalasno	50	0,0210	5,58
	60	0,0204	3,86

Istraživanjem mikrotalsno-konvektivnog sušenja bavili su se i drugi istarživači iz Turske. Karaaslan et al. (2017) poredili su uticaj snage mikrotalsnog zračenja, temperature vazduha unutar mikrotalsne sušare i kombinaciju različitog mikrotalasnog zračenja i temperatura vazduha. Na slici 4.32. prikazani su rezultati efekta različitih vrednosti snage mikrotalasa i temperatura vazduha na vreme sušenja. Vreme sušenja za postizanje konačne vlažnosti za grožđe sorte sultana iznosi 49, 19 i 14 minuta za primenjene vrednosti snaga mikrotalsnog zračenja od 180, 360 i 540 W respektivno, pri čemu je temperatura vazduha bila 100^{o}C.



Slika 4.32. Vreme sušenja grožđa sorte sultana kombinacijom mikrotalasno-konvektivnog sušenja pri različitim vrednostima snage mikrotalasnog zračenja (Karaaslan et al. 2017)

5. UTICAJ PREDTRETMANA NA KINETIKU SUŠENJA VOĆA

Različite strategije mogu se primeniti kako bi se poboljšao proces sušenja i/ili poboljšala svojstva sušenog voća. Strategije obično uzimaju u obzir modifikaciju parametara sušenja ili svojstava materijala. Pristup koji se zasniva na promeni parametara procesa sušenja, kao što su temperatura, protok vazduha, vlažnost vazduha, vakuum, koncetracija rastvora, obično je dovoljan da se intenzivira prvi i drugi period sušenja, koji je regulisan spoljnim otporom prenosa mase. Intenziviranje perioda opadajuće brzine sušenja obično se može postići uvođenjem predtretmana koji će promeniti svojstva materijala, na primer, njegove dimenzije ili osobine ćelijske strukture. Smanjenje dimenzija, koje može u velikoj meri intenzivirati kinetiku sušenja, nije uvek moguće. Narušavanje ćelijske strukture može se postići toplotno, blanširanjem, ili hemijskim tretmanima (*Sobukola et al., 2008; Doymaz, 2008*). Dodatno, ovo se može uraditi netermalnim metodama kao što su tretman visokog hidrostatičkog pritiska, hladnom plazmom, ultrazvukom ili pulsnim električnim poljem (*Witrowa-Rajchert et al., 2014*). Netermički predtretmani, u principu, omogućavaju bolje očuvanje termoosetljivih jedinjenja i povezani su sa manjom potrošnjom energije u poređenju sa toplotnim predtretmanima. Postojeća naučna istraživanja i poluinudustrijske probe pokazuju da među netermičkim predtretmanima ultrazvuk i pulsno električno polje najviše obećavaju za intenziviranje procesa sušenja. Korišćenje predtretmana pre sušenja voća ne mora da rezultira poboljšanju kinetike. Odluci o primeni predtretmana prethode istraživanja u vezi sa željenim kvalitetom sušenog voća.

5.1. Toplotni predtretmani

Toplotni predtretmani imaju dugu istoriju primene u procesima prerade i sušenja voća. Smatraju se klasičnim postupkom koji se obavlja pomoću tople vode ili vodene pare. Zagrevanjem voća uništavaju se mikroorganizmi, što proizvod čini pasterizovanim, inaktiviraju se enzimi, što pozitivno utiče na stabilnost boje, i postiže se delimično kuvanje, što proizvod može da učini ukusnijim i pogodnijim za konzumaciju. Ovaj tretman se široko primenjuje zbog svoje jednostavnosti. Osim toga, utiče i na ubrzanje kinetike procesa sušenja voća (*Doymaz, 2015; Filho et al., 2016*). Međutim, toplotni predtretman ima negativan uticaj na kvalitet sušenog voća. Primetan je gubitak nutritijenata, rastvaranjem ili ispiranjem. Voće namenjeno sušenju često je u stadijumu zrelosti u kojem nakon toplotnog predtretmana dolazi do narušavanja teksture i kvaliteta osušenog proizvoda. Toplotni predtretmani se prvenstveno primenjuju kod voća gde je potrebno očuvati prirodnu boju i izazvati mikropukotine na perikarpu i time

obezbediti ili ubrzati kinetiku procesa sušenja. Preporučena temperatura vode je u granicama od 80^{o}C do vrednosti ključanja. Vreme trajanja toplotnih predtretmana je od nekoliko desetina sekundi do 10 minuta (*Ćirić i Vračar, 1989*).

Toplotni tretmani se više primenjuju u preradi povrća. U preradi voća sušenjem zamenjeni su drugim tretmanima fizičkim, hemijskim, električnim, ultrazvučnim. Mikrotalasni tretman pokazao je u mnogim eksperimentima prednosti u odnosu na konvencionalne načine blanširanja koji se ogledaju u bržem zagrevanju proizvoda, smanjenom utrošku energije, vremena i manjim nutritivnim gubicima. Glavni nedostatak ovog tretmana je visoka cena opreme, neuniformna distribucija energije, poteškoće u predviđanju i praćenju modela zagrevanja.

Osim mikrotalasa toplotni tretman moguće je izvesti metodama kao što je elektrokonduktivno zagrevanje ili omsko zagrevanje na principu Džulovog efekta. U poređenju sa mikrotalasnim zagrevanjem, omsko zagrevanje ima viši stepen iskorišćenja. Osim toga mikrotalasno zagrevanje ima ograničenu dubinu delovanja dok je omsko bez ograničenja. Međutim ovaj način zagrevanja zahteva direktan kontak sa voćem. Rezultati istraživanja obavljeni sa omskim tretmanom niskih frekvencija govore o pogodnosti za naknadno sušenje. Vlažnost grožđa tretiranog ovim načinom, nakon 10 časova konvektivnog sušenja, smanjuje se sa 81,2% na 23,8%, dok kod netretiranih uzoraka dostiže vlažnost od 38,3% (*Salenge i Sasrty, 2005*).

5.2. Hemijski predtretmani

Hemijski predtretmani koji se koriste u procesima sušenja voća mogu se obaviti pomoću tečnih rastvora i gasova. Hemijski predtretmani obuhvataju:

- Primenu sulfita;
- Primenu kiselina;
- Primenu askorbinske kiseline i
- Primenu baznih rastvora.

Primena sulfita (sumporisanje) je široko rasprostanjen predtretman u preradi hrane. U proizvodnji sušenog voća se koristi za sprečavanje posmeđivanja tokom sušenja i skladištenja. Ovaj tretman se obično izvodi upotrebom gasa sumpor-dioksida ili sulfidnih soli rastvorljivih u vodi (kalijum i natrijum bisulfit). Oni deluju kao redukciona sredstva, sprečavajući oksidativne promene, a samim tim i enzimsko potamnjivanje. Nedostatak ovih jedinjenja je što imaju neugodan miris, navode na kašalj i štetni su po zdravlje (*Tepić, 2012*). Osim antioksidativnog delovanja, sumporisanje olakšava sušenje uticanjem na propustljivost ćelijske membrane voća (*Lewicki, 1998*). Breskve tretirane 1% rastvorom kalijum-metabisulfita se suše 12,5 – 14,3% brže od netretiranih (*Kingsly et al., 2007*). *Karabulut et al. (2007*) u svojim istraživanjima uticaja sumporisanja na kinetiku sušenja kajsije, navode skraćenje vremena sušenja od 3,6 – 38,54% u poređenju sa nesumporisanim materijalom. Različiti procesni parametri kao što su koncentracija rastvora ili gasa, vreme izlaganja, stadijum zrelosti voća, veličina plodova utiču na usvajanje sulfita i time i na njegovu efikasnost i koncentraciju u sušenom voću. Sa popularizacijom organskih proizvoda, sulfiti postepeno gube svoje mesto u proizvodnji sušenog voća.

Jedan od načina sprečavanja enzimatskog tamnjenja je acidifikacija supstrata, dodatkom vinske ili limunske kiseline do pH 3 (*Tepić, 2012*). Limunska kiselina najčešće je korišćeno sredstvo za sprečavanje tamnjenja voća. Osim ove uloge potvrđen je uticaj na ubrzavanje procesa sušenja (*Hiranvarachat et al., 2011*). Tretiranje uzoraka dunje 4% rastvorom limunske

kiseline u trajanju od 1 minut, skraćuje vreme konvektivnog sušenja za 16%, dok tretman jabuke 0,5% rastvorom limunske kiseline u trajanju od 2 minuta takođe utiče na skraćenje vremena sušenja (*Doymaz et al., 2015*). Pored pozitivnih efekata, tretman rastvorima kiselina ima i svojih negativnih strana. Zhu et al. (2007) objavljuju da tretman kockica jabuke rastvorom limunske i askorbinske kiseline izaziva smanjenje suve materije do 19,28%. Askorbinska kiselina se takođe koristi u tretmanu voća pre sušenja, međutim smatra se manje efikasnim sredstvom, te se uglavnom kombinuje sa limunskom kiselinom.

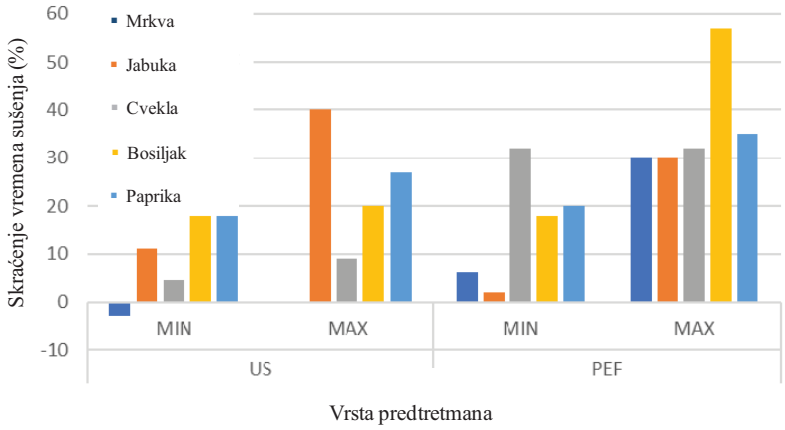
Rastvori baza kao natrijum hidroksid, kalijum hidroksid ili kalijum karbonat uglavnom se koriste za tretman bobičastog voća i voća koje ima debelu pokožicu. Tretman rastvorima ovih baza utiče na rastvaranje voštane prevlake ili razgradnju mikrostrukture epikutikularnog sloja voska (*Bingol et al., 2012; Doymaz i Pala, 2002*). Na ovaj način se poboljšava propustljivost pokožice, ubrzava difuzija i brzina sušenja (*Corona et al., 2016; Doymaz i Altıner, 2012*). Ubrzanje procesa sušenja tretmanom rastvorima baza zavisi od hemijskog sastava voća, koncentracije rastvora, pH, temperature i vremena izlaganja (*Esmaiili et al., 2007*). Tarhan (2007) navodi da tretman šljive rastvorima kalijum i natrijum hidroksida značajno ubrzava process konvektivnog sušenja. Tretman šljive potapanjem u emulziju koja se sastoji od 5% kalijum karbonata i 2% etil oleata, skraćuje vreme konvektivnog sušenja za 29,4% (*Doymaz, 2004*). Tretmani voća rastvorima baza takođe imaju nedostatke. Potapanjem voća u rastvor baza dolazi do ispiranja suve materije, degradacije i oksidacije askorbinske kiseline. Ovi tretmani se preporučuju u slučajevima kada se mora skratiti vreme sušenja (*Carranza-Concha et al., 2012*).

5.3. Ultrazvuk

Ultrazvuk se može opisati kao mehanički talas praćen cikličnim promenama zvučnog pritiska sa frekvencijom koja je nečujna za ljude (>20 kHz). Ultrazvuk se može koristiti kao niskofrekventni, ali visokoenergetski ili kao visokofrekventni, ali niskoenergetski. Prvi slučaj je obično povezan sa ubrzavanjem različitih operacija kao što su ekstrakcija, zamrzavanje i odmrzavanje, emulgovanje i homogenizacija ili sušenje, dok je drugi uglavnom povezan sa kontrolnim, analitičkim i dijagnostičkim procedurama (*Tao i Sun, 2014*). Primena ultrazvuka niske frekvencije ali visokog intenziteta izaziva različite pojave u zavisnosti od vrste medijuma gde se širi. Primena ultrazvuka u sistemima fluida dovodi do kavitacije i mikrotokova, što intenzivira prenos mase i toplote, ali može dovesti i do stvaranja slobodnih radikala i reaktivnih vrsta kiseonika. Kavitacija dovodi do erozije i degradiranja površine ili strukture materijala sa kojima su kontaku (*Ashokkumar, 2015; Wu i Nyborg, 2008*). Kada se ultrazvuk širi kroz čvrsti materijal, na primer matriks hrane, ciklična kompresija i ekspanzija materijala dovodi do takozvanog ponašanja koje se naziva efekat sunđera i može dovesti do stvaranja mikro-kanala, koji olakšavaju prenos mase između tretiranog materijala i njegove okoline (*de la Fuente-Blanco et al., 2006; Milano et al., 2006*). Ultrazvuk se može primeniti direktnim i kontaktnim metodama ili indirektno korišćenjem ultrazvučnih kupatila (*de la Fuente-Blanco et al., 2006*). U slučaju sušenja, ultrazvuk se može koristiti ne samo pre sušenja, već i tokom procesa (*Musielak et al., 2016*).

Literaturni podaci o uticaju ultrazvuka na kinetiku sušenja su dvosmisleni i efekti tretmana u velikoj meri zavise od matrice hrane (slika 5.1). Postoje navodi koji ukazuju na to da ultrazvuk može smanjiti vreme sušenja jabuka za 11–40% u poređenju sa neobrađenim materijalom

(*Magalhães et al., 2017; Nowacka et al., 2012*), a postoje i članci koji pokazuju da predtretman ultrazvukom nema efekta na kinetiku procesa sušenja, ili da čak može produžiti sušenje (*Nowacka i Wedzik, 2016*). Kinetika sušenja voća zavisi ne samo od vrste sirovine, već i od parametara ultrazvučnog tretmana. Uticaj vremena sonikacije jedno je od pitanja koja se najviše proučavaju. Utvrđeno je da odnos između vremena sonikacije i vremena trajanja sušenja nije linearan. Na primer, sonikacija 20 minuta tkiva jabuke skraćuje vreme sušenja zagrejanim vazduhom više nego tretman od 30 minuta (*Nowacka et al., 2012*). Slični rezultati su dobijeni i za druge sirovine, kao što su ananas ili listovi peršuna (*Fernandes et al., 2008a; Sledz et al., 2014*).



Slika 5.1. Minimalno (MIN) i maksimalno (MAX) vreme sušenja toplim vazduhom za različite proiozvode sa predtretmanom ultrazvukom (US) i pulsnim električnim poljem (PEF) (Radojčin et al., 2021)

Mogućnost intenziviranja procesa sonikacijom je takođe prikazana drugim metodama sušenja, kao što je konvektivno sušenje uz pomoć mikrotalasa ili u vakuumu. Pokazano je da sušenje vazduhom uz pomoć mikrotalasa i ultrazvuka skraćuje vreme sušenja za 79% u poređenju sa tradicionalnim, konvektivnim procesom bez drugih tretamana. Pored toga, uzorci proizvedeni uz pomoć tratmana ultrazvukom pokazali su veću poroznost i bolja svojstva rehidracije od netretiranog materijala (*Szadzinska et al., 2018*).

Vakuum sušenje nektarine uz tretman ultrazvukom za 50% vremena je kraće od kontrolnog procesa, a uzorci tretirani ultrazvukom su pokazali veće očuvanje fenola i manju promenu boje. Autori ove studije su naveli da postoji udruženi efekat vakuum sušenja i tretmana ultrazvukom (*da Silva et al., 2019*). Pozitivan dodatni uticaj ultrazvuka tokom sušenja na rehidrataciju i zadržavanje boje takođe je dokazano kod ljubičastog krompira (*Liu et al., 2016*).

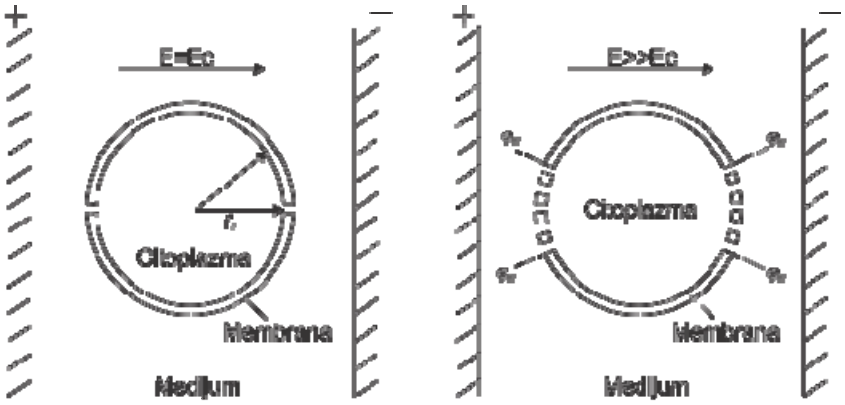
5.4. Pulsno električno polje – PEF

Pulsno električno polje (PEF – pulsed electrical field) je tehnologija zasnovana na elektro tehnologiji, jer za svoju primenu uključuje električno polje. Tretman hrane u električnom polju zavisi od ekspozicije materijala kratkotrajnim impulsima koje karakteriše visok intenzitet električnog polja koji varira od 0,1 do 50 $kVcm^{-1}$, a zavisi od željenog tehnološkog efekta

(*Timmermans et al,, 2019; Kayalvizhi et al., 2016*). Tretman u pulsnom električnm polju dovodi do perforacije ćelijske membrane usled fenomena i procesa elektroporacije (*Weaver i Chizmadzhev, 1996*). Biljna ćelija poseduje hemijski i električni gradijent između spoljašnje i untrašnje strane zida ćelije. Električni gradijent se javlja zbog prisustva viška negativnih jona na unutrašnjoj strani membrane i istog broja pozitivnih jona sa spoljašnje starne membrane. Ovo uspostavlja transmembranski potencijal vrednosti 0,1 V zvan potencijal mirovanja. Kada se primeni električno polje, joni unutar ćelije kreću se duž polja do površine membrane. Kao rezultat toga dolazi do slobodnog pražnjenja električnog polja akumuliranog sa obe strane membrane (*Zimmermann et al., 1976*). Akumulacija ovog površinskog pražnjenja rezultira povećanjem razlike potencijala duž membrane. Električno polje indukuje dodatni transmembranski potencijal $\Delta\varphi$, veći od prirodnog potencijala ćelije $\Delta\varphi_r$. Indukovani transmembranski potencijal (definisan kao razlika između intra i ekstra ćelijskih potencijala) je neravnomerno raspoređen po površini ćelijske membrane, odnosno razlika potencijala je velika na mestima membrane blizu elektroda. Do prekida ćelijske membrane dolazi kada ukupni transmembranski potencijal (zbir indukovanog potencijala i potencijala mirovanja) dostigne graničnu vrednost, odnosno kritični transmembranski potencijal $\Delta\varphi_c$:

$$\Delta\varphi_c = 1.5 E_c r_c \qquad (5.1)$$

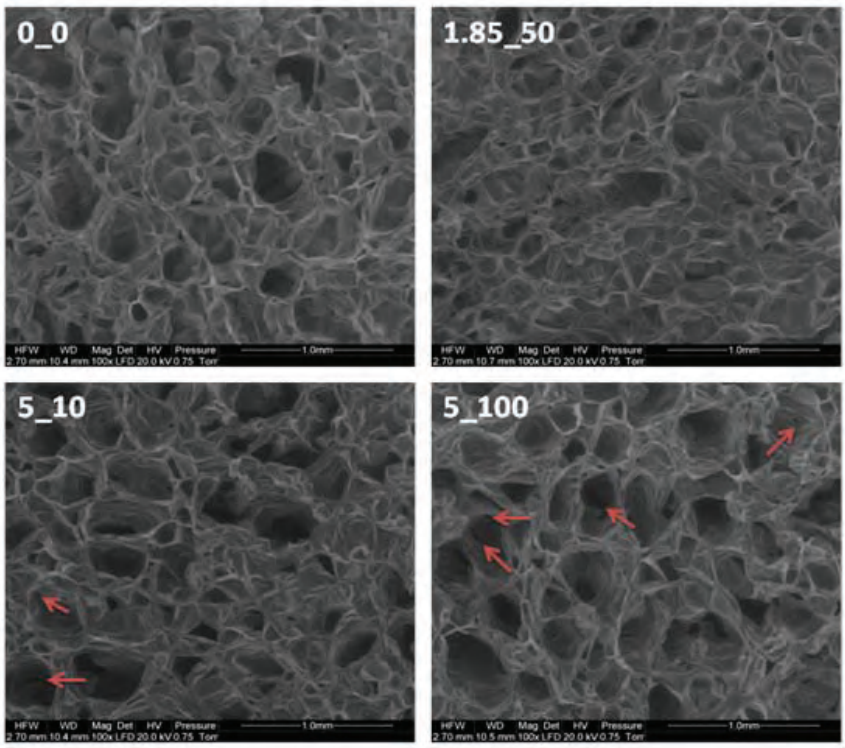
gde je E_c - kritična jačina električnog polja, r_c – prečnik ćelije (*sl.5.2*).



(a) (b)

Slika 5.2. Šematski prikaz ćelije izložene električnom polju. a) Pri dostizanju kritične vrednosti jačine električnog polja dolazi do pojave oštećenja na ćelijskoj membrani b) Pri značajno većim snagama električnog polja dolazi do elektroporacije ćelijske membrane. E-snaga električnog polja, Ec-kritična snaga električnog polja, φ_c-transmembranski potencijal, r_c-prečnik ćelije (Zimmermann,1986)

Utvrđeno je da je granični napon za mnoge ćelije približno 1 V (*Ho i Mittal, 1996*). Elektroporacija može biti ireverzibilna ili reverzibilna, u zavisnosti od indukovanog transmembranskog potencijala ćelije koja je tretirana, što zauzvrat zavisi od različitih faktora. Među njima su prečnik ćelije i spoljašnje električno polje, koji su najvažniji (*Kotnik et al., 2015*). Slika 5.3 predstavlja mikroskopsku sliku tkiva jabuke tretiranog PEF-om pri različitim parametrima sa naznačenim rupturama u ćelijskoj strukturi.



Slika 5.3. SEM slike neobrađenih (0_0) i PEF tretiranog (1,85_50 – E=1,85 kVcm-1, n=50 impulsa; 5_10 – E=5 kVcm-1, n=10 impulsa; 5_100 – E=5 kVcm-1, n=100 impulsa) tkiva jabuke. Crvene strelice ukazuju na oštećenja i pukotine u ćelijskoj strukturi. Uvećanje od x100. E – jačina električnog polja primenjenog pri PEF [kVcm-1]; n – broj impulsa. (Radojčin et al., 2021)

Povratnu elektroporaciju karakterišu male i nepostojane pore koje se zatvaraju nakon dejstva električnog polja. Elektroporacija se smatra dinamičkim procesom koji se sastoji od tri faze: formiranje pora, širenje pora i zatvaranje pora. Povratna elektroporacija proučavana je i koristi se u biotehnološkim procesima transfera genetičkog materijala unutar ćelija bakterija radi poboljšanja spajanja ćelija (*Chang et al., 1992*).

Tokom PEF tretmana materijal je smeštem između dve elektrode unutar komore koje formiraju pulsno električno polje. Vreme tratmana definisano je kao:

$$\tau = n\tau_p \tag{5.2}$$

gde je: τ_p – trajanje pulsa, n – broj pulseva

Povećanjem broja pulseva povećava se utrošak enegije, a povećanje trajanja pulsa dovodi do porasta temperature proizvoda. Tokom tretamana proizvod je u bliskom kontaktu sa elektrodama. Pod pretpostavkom da je proizvod homogen, prosečna jačina električnog polja iznosi:

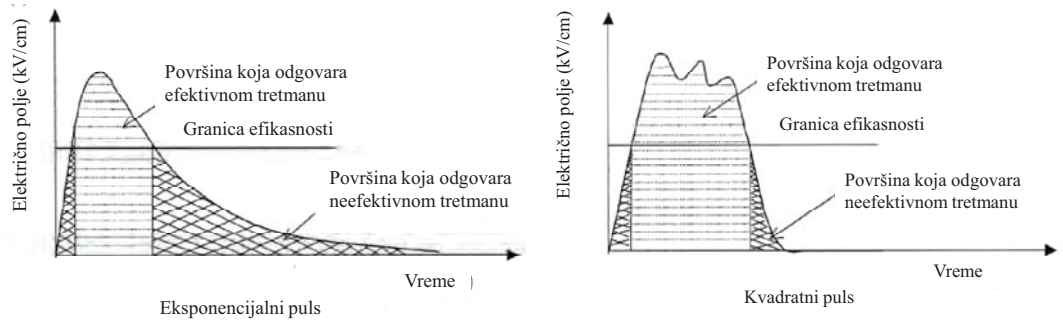
$$E=V/d \tag{5.3}$$

gde je V – voltaža kroz uzorak, d – rastojanje između elektroda

Oblik komore definiše takođe ravnomernu distribuciju električnog polja. Ravnomerno električno polje obezbeđuje homogeniji tretman. Osim broja pulseva i vremena trajanja pulseva, tretman je definisan i drugim parametrima, kao što su oblik pulsa i frekvencija. Električni pulsevi

mogu imati različit oblik, kao što je eksponencijalno opadajući, kvadratni i oscilatorni. Monopolarni eksponencijalni i monopolarni i bipolarni kvadratni oblik pulsa se najčešće primenjuju u praksi.

Utrošak energije pri PEF tretmanu je veoma bitan parametar zbog održivosti ovog netoplotnog tretmana. Utrošak energije zavisi od broja pulseva i isporučene energije svakom pulsu. Poredeći eksponencijalni sa kvadratnim pulsem, kvadratni omogućuje optimizaciju potrošnje energije zbog činjenice da se ruptura ćelije dešava samo pri graničnim vrednostima električnog polja. Osim toga kvadratni oblik pulsa održava graničnu vrednost duže vreme i omogućuje uštedu energije (površina koja odgovara neefektivnom tratmanu – *sl.5.4*).



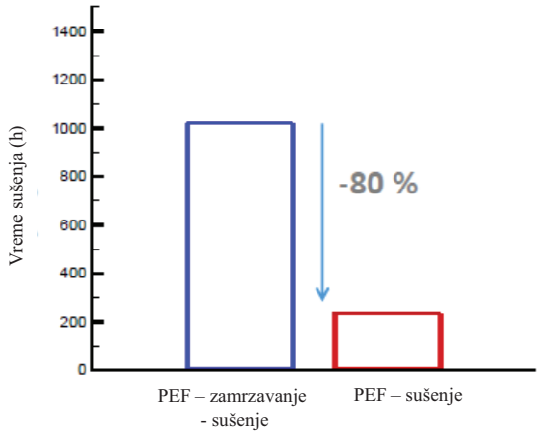
(a) *(b)*

Slika 5.4. Oblici električnog pulsa koji se primenjuju pri PEF tretmanu. a) oblik eksponencijalnog opadajućeg pulsa b) oblik pseudokvadratnog pulsa (Gongóra-Nieto et al., 2002).

Većina aplikacija u preradi hrane uključuje nepovratnu elektroporaciju. Takav tretman PEF se može koristiti za poboljšanje ekstrakcije, ceđenja soka, zamrzavanja, osmotske dehidracije ili sušenja *(Gabrić et al., 2018*). Pojedini podaci pokazali su da se reverzibilna elektroporacija takođe može primeniti za poboljšanje sušenja. Za razliku od ultrazvuka, velika većina naučnih publikacija pokazuje da PEF predtretman olakšava prenos mase tokom sušenja voća. Skraćenje procesa sušenja primenom PEF-a varira od 2% do 57% u poređenju sa netretiranim materijalom. Ovakvi podaci navode se za sušenje jabuke i listove bosiljka (*sl.5.1*). Efekat PEF-a na sušenje zavisi od mnogo različitih faktora koji se odnose na svojstva materijala i parametre tretmana: intenzitet električnog polja, uložena energija, broj impulsa, širina impulsa i geometrija ili metod sušenja (*Wiktor et al., 2020*). Na primer, intenziviranje sušenja zavisi od indeksa dezintegracije ćelija (CDI) materijala (koji varira od 0 do 1, za neobrađene i hipotetički potpuno dezintegrisane uzorke). Na primer, efektivni koeficijent difuzije vode jabuka podvrgnutih sušenju toplim vazduhom bio je jednak 1,044, 1,090 i 1,252 m^2/s, za netretirane uzorke, uzorke sa CDI=0,33 i sa CDI=0,88, respektivno (*Wiktor i sar, 2013*). Ostermeier et al. (2020) za dvostepeno konvektivno sušenje tkiva luka navode veći koeficijent difuzije vode pri tretmanu PEF-om. Tretman je takođe karakterisan povećanjem od 14,5% pirogrožđane kiseline i 47% višim koeficijentom rehidratacije.

PEF tretman se takođe preporučuje kao predtretman za ubrzanje prenosa mase tokom osmotskog sušenja. Rastogi et al. (1999) istraživali su uticaj pulsnog električnog polja na osmotsko sušenje mrkve. Mrkva u obliku diskova tretirana je pulsnim električnim poljem eksponencijalnog oblika sa pet pulseva specifične energije od 0,04 do 2,25 kJ/kg. Jačina električnog polja bila je od 0,22 do 1,6 kV/cm. Autori izjavljuju da tretman pulsnim električnim

poljem utiče na smanjenje sadržaja vode, ali i povećanje sadržaja suve materije tokom osmotskog sušenja. Taiwo et al. (2001) poredili su uticaj toplotnog tretmana toplom vodom i pulsnog električnog polja na proces osmotskog sušenja listova jabuke. Kod uzoraka tretiranih PEF-om došlo je do većeg gubitka vode i do minimalnog povećanja sadržaja suve materije.
Izlaganje materijala PEF tretmanu je takođe prikazano kao efikasan metod za poboljšanje sušenja zamrzavanjem. Wu et al. (2011) su objavili da je primena 30 impulsa pri intenzitetu električnog polja od 1 $kVcm^{-1}$ skraćuje vreme sušenja zamrzavanjem za 22,5% u poređenju sa netretiranim jabukama. Veće skraćenje vremena sušenja zamrzavanjem od 31,5%, zabeleženo je za krompir tretiran sa 45 impulsa na 1,5 $kVcm^{-1}$ u poređenju sa netretiranim materijalom. Veoma interesantan pristup za korišćenje PEF-a u procesu sušenja zamrzavanjem demonstrirali su Lammerskitten et al. (2019a). U ovom slučaju, autori nisu zamrzli kriške jabuke pre sušenja zamrzavanjem, već je do zamrzavanja došlo unutar komore za sušenje zamrzavanjem kao rezultat pada pritiska tokom početnih faza sušenja zamrzavanjem. Ovako obrađeni materijal zadržao je prvobitni oblik (malo skupljanje pri sušenju) i odlikovao se visokim indeksom hrskavosti, visokom poroznošću i sličnim hemijskim svojstvima kao neobrađeni materijal (Lammerskitten et al., 2019b). Slične nalaze su izneli i Fauster et al. (2020) za liofilizirane jagode. Neki od istraživačkih radova su ukazali da PEF takođe može poboljšati sušenje u vakuumu, slično kao što poboljšava sušenje na vazduhu i sušenje zamrzavanjem. Kako su izvestili Liu et al. (2019) PEF predtretman kod šargarepe smanjio je vreme sušenja u vakuumu za 33–55% i poboljšao očuvanje karotenoida. Lammerskitten et al. (2020) istraživali su uticaj pulsnog električnog polja kao predtretmana sušenju jagode liofilizacijom. Tretman pulsnim električnim poljem obavljen je eksponencijalnim opadajućim impulsom u interavalu od 0,5 sekundi i trajanju pulsa od 40 ms. Jačina električnog polja bila je 1 kV/cm, a primenjena specifična energija 1 kJ/kg materijala. Autori navode brži gubitak mase tokom sušenja kao prednost tretmana pulsnim električnim poljem. Wiktor et al. (2019) navode da primena pulsnog električnog polja u slučaju sušenja ploda jagode liofilizacijom, omogućuje eleminisanje procesa prethodnog zamrzavanja i ovo navode kao jedan potpuno novi pristup sušenju zamrzavnajem. Pri tome se vreme sušenja skraćuje za 80%.



Slika 5.5. Vreme sušenja jagode liofilizacijom sa i bez prethodnog zamrzavanja

Broj publikacija iz oblasti PEF-a i sušenja je u porastu, međutim istraživanja bi trebalo da se fokusiraju i na kombinaciju PEF-a sa drugim nekonvencionalnim metodama sušenja, poput

infracrvenog sušenja ili mikrotalasnog vakuumskog sušenja. Najveći broj radova odnosi se na konvektivno i sušenje zamrzavanjem. Iako su neke od tehnika sušenja u kombinaciji sa PEF-om dobro testirane, potrebne su studije optimizacije, koristeći napredne metode eksperimentalnog planiranja. Takav pristup bi mogao da se bavi pitanjima vezanim za potencijalnu modifikaciju parametara sušenja, kako bi se dobio najbolji mogući kvalitet i ekonomski rezultati. PEF je pronašao komercijalnu primenu gde predstavlja zamenu toplotnim tretmanima, ali u procesima sušenja se još uvek komercijalno ne primenjuje. Štaviše, postoji jaz u znanju o efikasnosti PEF kao predtretmana pre sušenja za unapređenje pilot i industrijskih procesa i aspekata održivosti njegovog korišćenja.

5.5. Hladna plazma

Plazma se smatra četvrtim, kvazi neutralnim, poput gasa, stanjem materije. To je, u stvari, jonizovani gas koji je mešavina anjona i katjona, elektrona, slobodnih radikala, molekula u pobuđenom stanju i nejonizovanih molekula (*Pankaj et al., 2014*). Prisustvo veoma aktivnih molekula, ili reaktivne vrste kiseonika, čine plazmu potencijalnim sredstvom za dekontaminaciju hrane i površina u kontaktu sa hranom. Većina literaturnih podataka o mogućoj upotrebi plazme u preradi hrane bavi se konzervisanjem i mikrobiološkim kvalitetom (*Niemira, 2012*). Međutim, primena plazme takođe može da modifikuje površinska svojstva materijala koji se tretiraju, poput nekih polimera (*Encinas et al., 2012*). Nedavno su objavljeni rezultati primene hladne plazme kao metode prethodnog tretmana za poboljšanje sušenja. Takav pristup je povezan sa pomenutom mogućnošću modifikacije površine i strukture primenom plazme fizičkim i hemijskim procesima – plazma može urezati velike šupljine u strukturu materijala, što olakšava naknadno uklanjanje vlage tokom sušenja *(Bao et al., 2021*). Vreme sušenja godži bobica se skraćuje za 50% primenom hladne plazme kao predtretmana. Štaviše, osušeni materijal tretiran plazmom pokazao je bolja rekonstruktivna svojstva i veće očuvanje fenola u poređenju sa netretiranim materijalom. Autori ove studije su naveli da je pored promene površine usled tretmana hladnom plazmom došlo i do dezintegracije ćelijske strukture (*Zhou et al., 2020*). Ubrzanje sušenja i ušteda energije navodi se za konvketivno sušenje grožđa, gde je hladna plazma primenjena kao predtretman u trajnju od 10, 20, 30,40, 50 i 60 sekundi. U radu se navodi da tretman plazmom značajno povećava koeficijent difuzije vode, skraćuje vreme sušenja za 26,27% i smanjuje utrošak energije za 26,30% (*Ashtiani et al., 2020*). Ipak, podaci o uticaju zračenja hrane plazmom pre sušenja su ograničeni, ali se čini da je metoda veoma obećavajuća, posebno za olakšavanje sušenja materijala koji se sastoji od debelog perikarpa kao na primer bobičasto voće ili povrće kao paprika (Zhang et al., 2019). Štaviše, pošto se plazma sastoji od veoma reaktivnih hemijskih molekula, istraživanja bi takođe trebalo da se fokusiraju na promene hemijskih svojstava i aspekte bezbednosti takve tretirane hrane. Još jedno važno pitanje u vezi sa korišćenjem ove metode je mogućnost skaliranja uređaja.

6. UTICAJ PROCESA SUŠENJA NA KVALITET KONAČNOG PROIZVODA

Potrošači u Srbiji, za sada, nemaju razvijenu naviku svakodnevne kupovine sušenog voća, osim u slučaju sušene šljive tokom Božićnih praznika. Prosečan potrošač doživljava sušeno voće kao jednu vrstu prirodne poslastice. Veoma često, sušeno voće se u marketima nalazi u blizini proizvoda konditorske industrije, ponegde i na istim policama. U ovoj grupi proizvoda postoji oštra konkurencija, gde senzorna ocena proizvoda od strane potrošača bitno utiče na odluku o izboru. Takođe, jednu manju grupu potrošača, sa tendencijom rasata, čine konzumenti zdrave hrane, koji pored senzorne ocene analiziraju i nutritivni sastav. Prema tome, senzorna svojstva sušenog voća, ona koja se mogu oceniti ljudskim čulima: izgled, boja, miris, ukus, konzistencija i opšte stanje proizvoda, su prvi parametar kvaliteta konačnog proizvoda od kog zavisi uspeh proizvodnje.

U cilju sniženja troškova investicije u opremu i potrošnju toplotne energije za sušenje voća, pojedini manji proizvođači pribegavaju sušenju voća tradicionalnim metodama, kao što je sušenje na suncu, sušenje na otvorenom, sušenje produktima sagorevanja drveta. Ove metode značajno degradiraju senzorni kvalitet sušenog voća, nutritivni sastav, utiču na mikrobiološku ispravnost i bezbednost konačnog proizvoda. Nedostaci tradicionalnih metoda sušenja, nekontrolisani uslovi, doveli su do razvoja tehnologija i tehnika sušenja u kontrolisanim uslovima. Međutim, od svežeg do sušenog voća, potrebno je kontinualno prilagođavati parametre svih tehnoloških operacija u nizu, a posebno procesa sušenja prema željenom kvalitetu konačnog proizvoda da bi proizvodnja bila uspešna.

6.1. Uticaj procesa sušenja na promenu boje

Boja sušenog voća je veoma značajan parametar kvaliteta i senzorne ocene. Ovo svojstvo pripisuje se spektralnoj raspodeli svetlosti. U hemijskim analizama pod bojom podrazumeva se prisustvo pigmenata u proizvodu, s tim da intenzitet boje direktno zavisi od sadržaja pigmenata. Primarni pigmenti koji učestvuju u definisanju boje su hlorofil (zelena boja), karotenoidi (žuta, narandžasta i crvena boja), antocijani (crvena, plava), flavonoidi (žuta) i betalaini (crvena). Boja se meri intenzitetom i talasnom dužinom dominantnog pigmenta. Potrošači su uvek spremni da lepu i karakterističnu boju konačnog proizvoda brže prihvate. Pritom, važno je da boja po poprečnom preseku suvog voća bude ujednačena. Kvalitet boje sušenog voća u prvom redu zavisi od boje svežeg voća, a gubitak ili promena najčešće je rezultat neadekvatnog tehnološkog

procesa proizvodnje. Osnovno merilo sa senzornu ocenu boje suvog voća je poređenje sa prirodnom bojom svežeg voća. U proizvodnji sušenog voća treba težiti što manjem odstupanju od prirodne boje sirovine, kako po nijansi, tako i po intenzitetu. Izgled sušenog voća određuje uglavnom površinska boja i ona je prvi osećaj koji potrošač shvata i koristi kao sredstvo da prihvati proizvod (*Costa et al., 2011; Grossman i Visenblit, 1999; Leon et al., 2006, Vračar, 2001; Barrett et al., 2010*).

Merenje boje može se izvesti na dva načina: vizuelnom ocenom i instrumentalnom analizom. Vizuelna analiza boje hrane je procena putem čula (*Melendez–Martinez et al., 2005*). Vizuelno merenje boje podrazumeva merenje bez instrumenata, ali u kontrolisanim uslovima osvetljenja, sa referentnim standardnim setom boja koji se upoređuje sa posmatranim uzorkom. Ovo predstavlja pronalaženje boje koja se poklapa sa bojom uzorka i spada u kategoriju organoleptičkih (senzorskih) metoda analiza kvaliteta hrane (*Figura i Teixeira, 2007*). Kao rezultat vizuelne analize, dobija se određena boja za koju postoji određena opisna reč. Različiti ljudi tumače boje na različite načine. Stoga, subjektivno definisanje boje ne može biti dovoljno precizno za naučnu i stručnu komunikaciju o boji. Objektivni pristupi u merenju i definisanju boje pomogli bi da se umanje navedeni problemi (*Lee, 2000*). U slučaju instrumentalnog merenja, boja je izražena pomoću koordinata boja, numerički korišćenjem kolorimetara ili spektrofotometara.

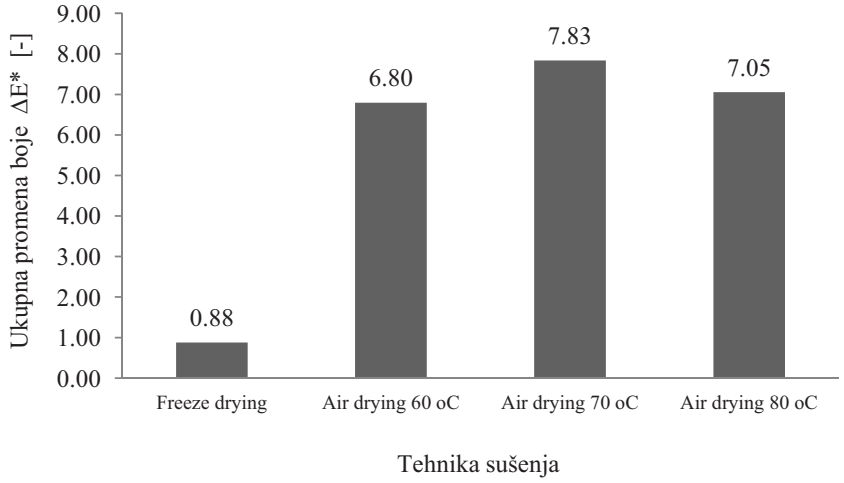
Kolorimetri su najčešće korišćeni instrumenati za merenje boje prehrambenih i drugih proizvoda zbog lakoće korišćenja i interpretacije podataka o boji (*Pathare et al., 2013*). Boja objekta može se opisati pomoću nekoliko koordinatnih sistema boja (*Clydesdale, 1978; Francis 1980; Hunter i Harold, 1987*). Neki od najpopularnijih sistema su RGB (crvena, zelena i plava), koji se koristi kod monitora; Hunter Lab, CIE L*a*b*, CIE XYZ , CIE L*u*v*, CIE Yxy i CIE LCH. Oni se razlikuju u simetriji prostora u koordinatnom sistemu koji definiše tačke u tom prostoru. Najčešći pristup merenja boje voća u naučnim radovima je sistemom CIELAB koordinate (L^*, a^*, b^*). Parametar a^* obuhvata pozitivne vrednosti za crvene boje i negativne vrednosti za zelene. Parametar b^* obuhvata pozitivne vrednosti za žute boje i negativne vrednosti za plave. Parametar sjajnost L^* nalazi se na vertikalnoj osi. Ovaj parametar ima opseg od crne do bele boje (*Granato i Masson, 2010*). Na osnovu ovih parametara određene su sledeće veličine: hromatičnost C^*, nijansa boje h^* i ukupna promena boje ΔE^*.

Nijansa boje h^* je atribut kojim se boja na tradicionalan način definiše kao crvenkasta, zelenkasta itd. Nijansa opisuje vrstu boje, npr. crvena, zelena, žuta. Hromatičnost je merilo jasnoće, zasićenosti, čistoće boje. Koristi se da se odredi stepen razlike jedne nijanse boje pri istoj sjajnosti. Opisuje udaljenost boje od sive boje, koja se nalazi u centru dvodimenzijalne kružnice. Na primer, crvena boja je vrlo zasićena, ružičasta je manje zasićena, a obe se opisuju kao crvenkaste. Veća vrednost predstavlja intenzivniju boju. Promene boje mogu se meriti kao razlika između početnih vrednosti boje i trenutnih. Ovaj koncept nazvan je ukupna promena boje (ΔE^*). Ukupna promena boje i hromatičnost smatraju se najosetljivijim parametrima za merenje boje voća i proizvoda od voća. Vrednost razlika izmerenih parametara boja <5,0, početno i krajnje stanje uzoraka, nije senzorno uočljiva – vidljiva za čovekovo oko (*Patras i sar, 2011*).

Prilikom prerade voća sušenjem dolazi do veće ili manje degradacije boje, stvaranja nepoželjnih oksidativnih produkata, kao i do stvaranja obojenih polimera, koji nastaju kao rezultat raznih kompleksnih reakcija. Ove pojave su obuhvaćene terminom enzimsko i neenzimsko potamnjivanje. Između ove dve pojave je veoma teško povući oštru granicu, pošto

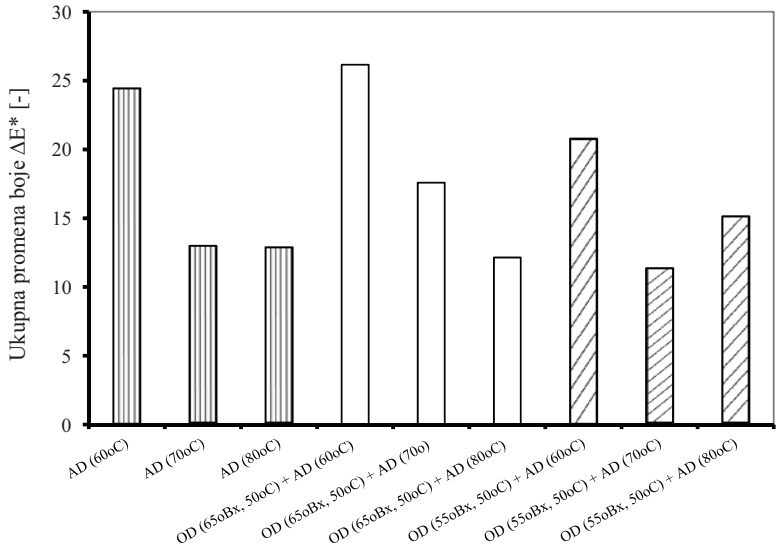
se obe promene dešavaju paralelno. Obično se stvaraju intermedijarni produkti koji međusobno ili sa drugim sastojcima, stupaju u reakcije, pa je teško ustanoviti koje su reakcije i degradacioni procesi katalizirani enzimima, a koji nisu (*Tepić, 2012*). Enzimske i neenzimske reakcije rezultuju formiranjem rastvorljivih braon, sivo i tamno obojenih pigmentata. Najvažnij enzimi koji su uključeni u proces potamnjivanja su polifenoloksidaze, koje katalizuju oksidaciju polifenolnih jedinjenja (*Barrett i sar, 2010*). Enzimsko tamnjenje je proces uočljiv već u prvim fazama pripreme voća za sušenje (ljuštenje, rezanje, usitnjavanje, iskoštičavanje) kada dolazi do oštećenja ćelija. Pored polifenoloksidaza, u procesima potamnjivanja deluju i peroksidaze, ali se reakcije odvijaju sporije. Kod jabučastog i koštičavog voća enzimsko potamnjivanje je izraženije jer sadrže više polifenoloksidaze (*Tepić, 2012*). Za razliku od enzimskog, neenzimsko potamnjivanje odvija se sporo, zapaža se tek nakon dužeg ili kraćeg vremena skladištenja. Do neenzimskog potamnjivanja dolazi kada se sirovina podvrgava predugom toplotnom tretmanu u prisustvu velikih količina kiseonika (parenje, blanširanje, pasterizacija, sterilizacija, konvektivno sušenje) (*Tepić, 2012*). Bojene materije (pigmenti) koje daju odgovarajuću boju voću dele se na nerastvorljive i rastvorljive u vodi. Takođe su različito otporne na toplotni tretman. Hlorofili su prilično otporni na toplotu, ali kod preduge sterilizacije, pogotovo ako se proizvod odmah ne ohladi, može doći do gubitka boje. Hlorofil je osetljiv na kiselu sredinu, ali stabilan kada je u pitanju bazna sredina. Karotenoidi su otporni na toplotu, ali su osetljivi na dejstvo svelosti (Barrett et al., 2010). Antocijani su osetljivi na toplotu i nisku pH vrednost. Flavonoidi su veoma osetljivi na povišene temperature (*Tepić, 2012*).

Autori Pavkov et al. (2019) istražili su uticaj tehnike konvektivnog sušenja za tri temperature vazduha (60, 70 i 80^{o}C) na ukupnu promenu boje borovnice i uporedili sa sušenjem smrzavanjem (*sl. 6.1*). Merenje boje je obavljeno na početku i kraju procesa sušenja. Tehnika sušenja smrzavanjem je najmanje uticala na ukupnu promenu boje. S obzirom da su razlike u ukupnoj promeni boje za sve temperature vazduha oko ≈1 (6,8-7,83) što izlazi iz mogućnosti vidljivosti za ljudsko oko (ΔE*>5), ocenjeno je da visina temperature vazduha na ukupnu promenu boje pri konvektivnom sušenju borovnica je zanemarljiva u istraživanom opsegu za senzornu ocenu gotovog proizvoda. Odsustvo kiesonika kod tehnike sušenja zamrzavanjem, kao i temperature voća niže od 0^{o}C tokom sušenja obezbedile su minimalne ukupne promene boje.



Slika 6.1. Ukupna promena boje borovnice za konvektivno sušenje (60, 70, 80^{o}C) i sušenje zamrzavanjem (Pavkov et al., 2019)

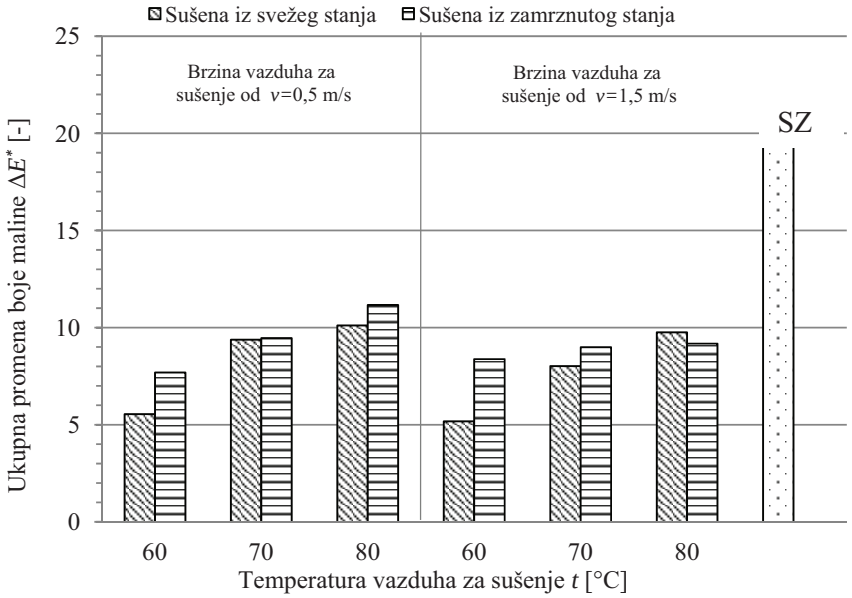
Na slici 6.2. prikazan je uticaj konvektivnog sušenja pri različitim temperaturama vazduha i kombinovanog sušenja, osmotsko+konvektivno, na ukupnu promenu boje listića jagode. Vrednosti ukupne promene boje su se kretale od 12 - 26. Autori zaključuju da uticaj osmotskog sušenja na očuvanje boje nije zabeležen u istraživanom opsegu parametara sušenja. Najveći uticaj na promenu boje ima temperatura vazduha za sušenje. Najveća ukupna promene boje kod svih tretmana zabeležena je na nižoj temperaturi vazduha (60^{o}). Razlog ovakvog trenda ukupne promene boje je uticaj visine temperature na vreme trajanja sušenja i izloženost listića jagode kiseoniku i oksidativnim procesima (*Pavkov et al., 2018*).



Slika 6.2. Ukupna promena boje listića jagode za konvektivno (AD) i kombinovano sušenje, osmotsko (OD) + konvektivno (AD) (*Pavkov et al., 2018*)

Stamenković (*2021*) istražio je uticaj konvektivnog sušenja maline sorta Polana pri različitim režimima konvektivnog sušenja iz različitog početnog stanja (sveža i zamrznua) na ukupnu promenu boje (*sl.6.3*). Kao kontrolnu grupu autor je koristio maline osušene liofilizacijom. Autor navodi da je najmanja promena boje ostvarena konvektivnim sušenjem vazduhom temperature 60°C, pri brzini vazduha od 1,5 m/s, pri čemu je ΔE^{*}=5,18. Temperatura vazduha za sušenje maline od 60°C je mogući optimum u pogledu očuvanja boje, obzirom da brzina vazduha za sušenje nema izražen uticaj na promenu boje pri ovoj temperaturi vazduha. Pri konvektivnom sušenju najveća promena boje ostvarena je vazduhom temperature 80°C i pri brzini vazduha od 0,5 m/s, za oba početna stanja maline pri čemu je sušenjem maline iz svežeg stanja ukupna promena boje ΔE^{*}=11,17, a nakon sušenja iz zamrznutog stanja ΔE^{*}=10,12. Neočekivano, najveća ukupna promena boje ostvarena je sušenjem zamrzavanjem u vrednosti od ΔE^{*}=19,60, koja je uzrokovana porastom sva tri parametra boje L^{*}, a^{*} i b^{*}. U literaturi se mogu naći slični navodi, uticaja sušenja zamrzavanjem na promenu boje bobičastog voća. Bustos i sar. (2018), su izmerili slične rezultate u pogledu promene a^{*} vrednosti boje bobičastog voća nakon sušenja zamrzavanjem. Poređenjem konvektivnog sušenja i sušenja zamrzavanjem bobičastog voća razlika a^{*} vrednosti, ostvarena ovim tehnikama, iznosila je Δa^{*}=25,62, pri čemu sušenje zamrzavanjem prouzrokuje znatno veću a^{*} vrednost. Povećanje a^{*} vrednosti nakon sušenja maline zamrzavanjem pored promena u pogledu pigmentacije, značajnu ulogu ima i strukturna

promena ploda, nakon konvektivnog i sušenja zamrzavanjem. Nakon sušenja zamrzavanjem, slobodna voda iz maline zamenjuje se vazduhom, pa promena boje koja naginje crvenoj nijansi može biti posledica različitih mehanizama difuzije i prelamanja svetlosti koja prolazi kroz materijal. Ovaj efekat je verovatno izraženiji kod voća sa definisanim, jarkim i zasićenim nijansama, kao što je slučaj kod malina (*Stamenković, 2021*). Iako se sušenje zamrzavanjem pominjalo kao "blaga" tehnika sušenja, ipak dovodi do većih promena boje maline u poređenju sa sušenjem toplim vazduhom (*Sette et al., 2016)*.



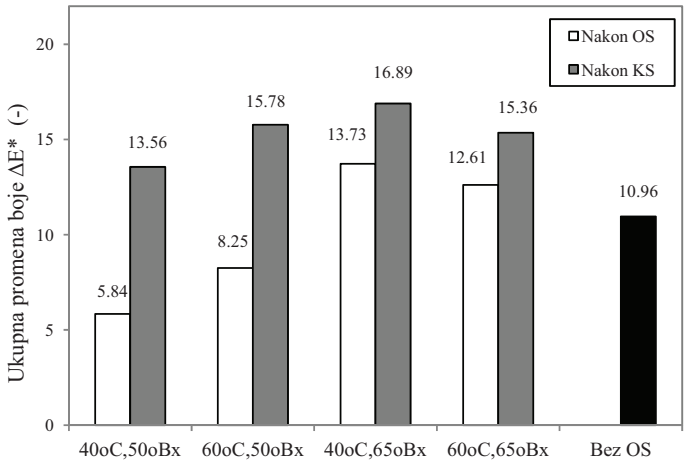
Slika 6.3. Promena boje ploda maline sorte Polana, nakon konvektivnog sušenja i sušenja zamrzavanjem (SZ) (Stamenković, 2021)

Zepka et al. (2009) proučavali su kinetiku termičke degradacije karotenoida jabuke pomoću HPLC uređaja. Nastale promene povezali su sa CIELab parametrima boje. Krive razlaganja karotenoida i promene boje imale su dvofazno ponašanje koje je najbolje opisano eksponencijalnom funkcijom. Ispitivanjem hemijskih i fizičkih parametara došlo se do zaključka da parametar boje, kao na primer ΔE^*, može biti dobar pokazatelj degradacije trans-β-kriptoksantina i trans-β-karotena. Pott et al., (2005) navode da visoke temperature vazduha i predugo sušenje rezultiraju primetnom pojavom crvene boje na listićima osušenog manga. Ova promena se može pripisati procesu tamnjenja (Milardova reakcija) koje nastaje tokom sušenja (*Adam et al., 2000*). Arslan i Ozcan (2010) proučavali su uticaj sušenja na suncu, konvektivnog (50 i 70°C) i konvektivno-mikrotalasnog (210 W i 700 W) na promenu boje kriški crvene paprike. Uzorci sušeni na suncu, a zatim mikrotalasno (700 W) imali su najveće L^*, a^* *i* b^* vrednosti boje. Temperature vazduha od 50 i 70°C pri konvektivnom sušenju dovele su do smanjenja sjajnosti, udela crvene i žute boje. Smanjenje L^* vrednosti može se pripisati formiranju braon pigmenta tokom sušenja, zbog značajnog smanjenja sadržaja šećera i amino kiselina (*Park i Lee, 1975*). Maskan (2001) navodi da parametar boje sjajnost L^* kivija, dostiže vrednost 40 nakon 5 minuta mikrotalasnog sušenja i 325 minuta konvektivnog sušenja.

Osmotsko sušenje često se predstavlja kao dobar predtretman konvektivnom sušenju u cilju očuvanja boje. Pojedini autori navode da osmotsko sušenje umanjuje promene koje nastaju enzimskom aktivnošću. Rahman i Mujumdar (2007) navode da sloj šećera koji se formira na

površini voća tokom osmotskog sušenja predstavlja barijeru vazduhu tokom konvektivnog sušenja i sprečava potamnjivanje tkiva. Falade i Shogaolu (2009) navode da vrednost parametra L^* bundeve tretirane osmotskim rastvorom koncentracije 40% raste sa povišenjem temperature vazduha za sušenje, dok vrednost parametra L^* uzoraka tretiranih rastvorom koncentracije 50% i 60% opada pri povišenju temperature vazduha za sušenje. Osmotski tretman ne utiče na promenu parametra a^* (crvena boja) kod jagode, ali značajno utiče na promenu ukupne boje ΔE^* (*Changrue et al., 2008*). Ponting et al. (1966) navode temperaturu osmotskog rastvora od 49°C kao graničnu vrednost iznad koje dolazi do enzimatskog potamnjenja tkiva i gubitka arome. Međutim, veliki je broj istraživanja u kojima se primenjuje osmotsko sušenje rastvorom temperature preko 50°C. Najčešće se pogoršanje kvaliteta voća povezuje sa sušenjem toplim vazduhom, pri čemu enzimatsko tamnjenje može biti uzrok promene boje, ali i ukusa. Ovaj problem može se rešiti kontrolom procesa sušenja, tretmanom hemijskim sredstvima (sumpor-dioksid) ili primenom osmotskog predtretmana. Tako Rodrigues et al. (2003) navode da je boja osmotski tretirane papaje veoma slična boji svežeg voća.

Pri osmotskom sušenju kockica dunje veća promena ukupne boje ΔE^* izmerena je kod uzoraka koji su tretirani osmotskim rastvorom koncentracije saharoze 65% od onih tretiranih rastvorom od 50% (*Radojčin, 2015*). Sličan zaključak donosi Zhao et al. (2014) prilikom osmotksog sušenja tkiva manga. Međutim, nakon konvektivnog sušenja smanjuje se uticaj na boju uzoraka tretiranih rastvorom veće koncentracije. Ovde se potvrđuju navodi o antioksidativnoj ulozi rastvora saharoze koji se nalazi na površini voća tokom konvektivnog sušenja. Merenje promene boje obavljeno je i na uzorcima koji nisu bili izloženi osmotskom predtretmanu (*sl.6.4*)

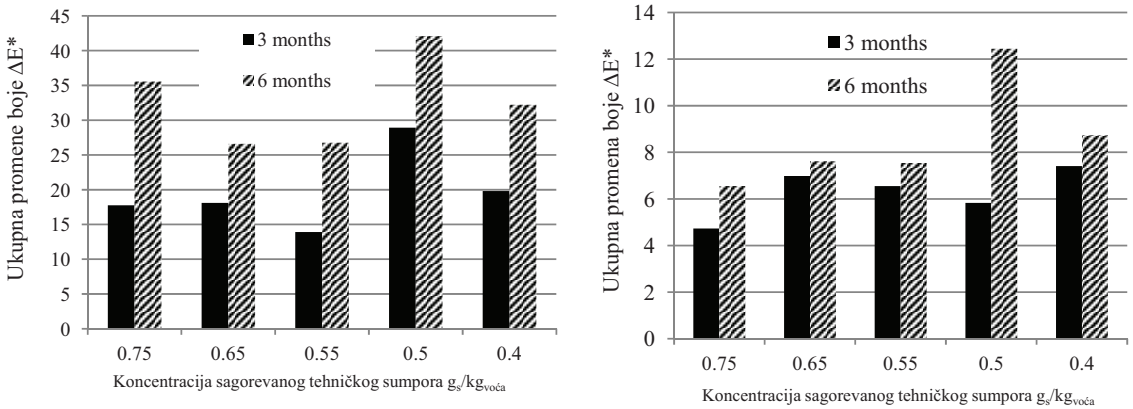


Slika 6.4. Ukupna promena boje nakon osmotskog i konvektivnog sušenja (Radojčin, 2015)

Kowalski et al., (2016) testirali su različite tehnike sušenja maline, sušenje toplim vazduhom u odnosu na kombinovano hibridno sušenje koje se sastoji od istovremenog sušenja toplim vazduhom, mikrotalasima i ultrazvukom, na kinetiku, potrošnju energije i kvalitet proizvoda. Rezultati pokazuju da kombinovano hibridno sušenje značajno ubrzava sušenje i iskorišćenje energije. Međutim, ukupna CIELab promena u boji (ΔE) kretala se od 12 do 15, što implicira značajnu degradaciju boje sušenih malina.

Pored uticaja procesa sušenja na promenu boje sušenog voća, značajne promene se mogu desiti u procesu skladištenja. Autori Kešelj et al. (2019) istražili su temperature skladištenja

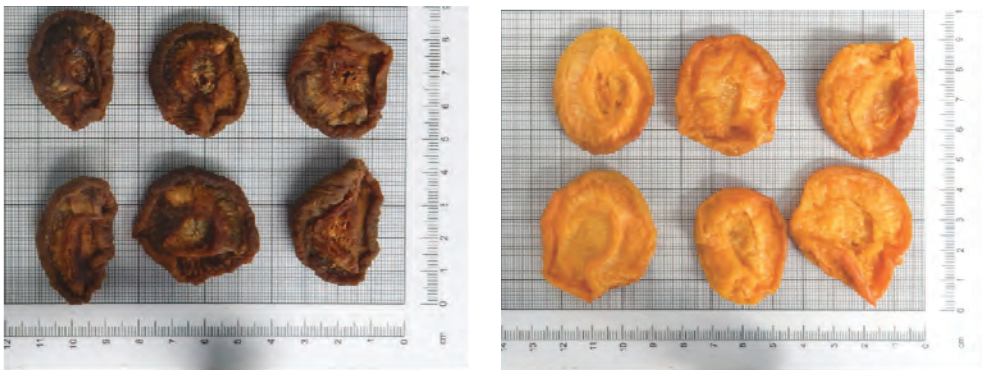
kombinovano sušenih polutki kajsija tretiranih SO_2 u pripremi za sušenje. Isečene poluke kajsija tretirane su SO_2 spaljivanjem tehničkog sumpora u prahu u koncentraciji 0,4, 0,5, 0,55, 0,65 i 0,75 grama sumpora po kilogramu polutki kajsija ($g_s/kg_{voća}$). Polutke su zatim sušene u rastvoru glukozno-fruktoznog sirupa koncentracije 60% na temperaturi 40°C u trajanju od jednog sata, a zatim dosušivane zagrejanim vazduhom temperature 60°C tokom 20h, gde je krajnja vlažnost suvih kajsija iznosila 29,1%$_{wb}$. Osušene kajsije su postavljene u plipropilenske kutijice i hermetički zatvorene, a zatim čuvane na sobnoj temperaturi 25°C i u rashladnoj komori na temperaturi 3°C bez prisustva svetla. Koncentracija sagorevanog sumpora nije imala značajnog uticaja na ukupnu promenu boje uskladištene kajsije, dok je dokazan značajan uticaj temperature (sl. 6.5). Ukupna promena boje posle 6 meseci iznosila je $\Delta E^*=41$ na temperaturi 25°C i $\Delta E^*=12,5$ na temperaturi 3°C. Autori nisu istraživali uticaj vlažnosti suve kajsije na promenu boje tokom skladištenja koja je bila relativno visoka (29,1%$_{wb}$), a svakako da se ne treba isključiti.



(a) (b)

Slika 6.5. Ukupna promena boje suvih kajsija za period skladištenja od 3 i 6 meseci i dve temperature skladištenja 25°C (a) i 3°C (b) (Kešelj et al., 2019)

Na slici 6.6. dati je izgled polutki kajsija posle 6 meseci skladištenja za obe temperature i koncentraciju sagorevanog sumpora od 0,5 $g_s/kg_{voća}$. Vidljive su značajne razlike u očuvanu boje u zavisnosti od temperature skladišetanja suvih kajsija.



(a) *(b)*

Slika 6.6. Ukupna promena boje suvih kajsija za period skladištenja od 6 meseci i dve temperature skladištenja 25°C (a) i 3°C (b) (Kešelj et al., 2019)

Modelovanje kinetika promene boje prehrambenih proizvoda je kompleksan fenomen, a pouzdani modeli za predviđanje promena, koji se mogu koristiti u inženjerskim proračunima su ograničeni (*Ahmed et al., 2002*). Zbog toga se radi proučavanja kinetike promene boje obavljaju eksperimentalne studije i primenjuju različiti empirijski modeli. Modelovanje kinetike potrebno je radi dobijanja informacija u cilju opisivanja toka reakcije kao funkcije eksperimentalnih promenljivih (*Van Boekel, 1996*). Postoje brojne reference o kinetici promene boje hrane. U većini istraživanja korišćene su linearne i eksponencijalne funkcije (*tab. 6.1*). Za većinu prehrambenih i poljoprivrednih proizvoda, vremenska zavisnost promene boje može se opisati modelima koji se koriste za predviđanje promene bezdimenzionalne vlažnosti (*Krokida et al., 2001*):

$$C = C_0 + k_0\tau \tag{6.1}$$

$$C = C_0 \exp k_1\tau \tag{6.2}$$

gde je: C - merena vrednost parametra boje, C_o – početna vrednost parametra boje, τ - je vreme trajanja nekog procesa, k_o i k_1 – konstante funkcije. Arhenijusova jednačina se takođe primenjuje za modelovanje kinetike promene boje (*Stamp i Labuza, 1983*).

Navedeni modeli korišćeni su za izračunavanje stepena potamnjivanja voćnog tkiva (*Stamp i Labuza, 1983*). U istraživanjima je primećeno da se promene *a** i *b** vrednosti, hromatičnost i indeksa potamnjenja dovoljno dobro opisuju eksponencijalnom funkcijom. Promene vrednosti *L**, ukupne promena boje *ΔE** i nijansa boje *h** uspešno se opisuju linearnom funkcijom (*Demirhan i Ozbek, 2009*).

Tabela 6.1. Odabrane publikacije kinetike promene boje voća i povrća tokom sušenja

Proizvod	Način prerade	Parametri boje	Primenjeni modeli	Literatura
Bosiljak	Mikrotalasno sušenje	*L*, ΔE*, h*, a*, b**	Linearni i eksponencijalni	Demirhan i Ozbek (2009)
Crni luk	Konvektivno sušenje	Indeks potamnjenja	Linearni	Kaymak-Ertekin i Gedik (2005)
Jabuka, banana, krompir, mrkva	Konvektivno, vakuumsko, mikrotalasno, osmotsko i sušenje zamrzavanjem	*a*, b**	Eksponencijalni	Krokida et al., (2001)
Jabuka, banana	Osmotsko sušenje	*L*, a*, b**	Eksponencijalni	Krokida et al., (2000)
Jabuka, banana, krompir, mrkva	Konvektivno, vakuum sušenje	*ΔL*, Δa*, Δb**	Eksponencijalni	Krokida et al., (1998)
Avokado, banana, jagoda	Konvektivno sušenje	*ΔL*, Δa*, Δb**	Eksponencijalni	Tsami i Katsioti (2000)
Jabuka	Konvektivno, vakuum sušenje	Indeks potamnjenja	Linearni	Voegel-Turenne et al., (1997)
Kivi	Konvektivno, mikrotalasno, konvektivno + mikrotalasno	*L*, a*, b**, hromatičnost *C**, *h**, *ΔE**, indeks potamnjenja	Linearni i eksponencijalni	Maskan (2001)

Radojčin (2015) za opisivanje kinetike promene boje tokom osmotskog sušenja dunje koristi matematički model predložen od strane autora Krokida et al. (1998). Model je prethodno korišćen za opisivanje kinetike sušenja. Modelom se opisuje promena svakog parametra boje *L*,a* i b**.

$$\frac{C-C_e}{C_0-C_e} = \exp(-k_c\,\tau) \tag{6.3}$$

gde su: C - parametar boje (*L*,a* i b**), C_o i C_e - vrednosti parametara boje na početku i nakon osmotskog sušenja, k_c – koeficijent funkcije, τ – vreme sušenja.

Vrednosti izračunatih koeficijenata k_c i pripadajuće vrednosti koeficijenata determinacije date su u tabeli 6.2 za parametre boje b* i L* pri osmotskom sušenju dunje na dve temperature (40, 60°C) i koncentracije rastvora (50, 65%).

Tabela 6.2. Vrednosti koeficijenata k_c i koeficijenata determinacije za parametre boje ΔL i Δb* za osmotsko sušenje dunje*

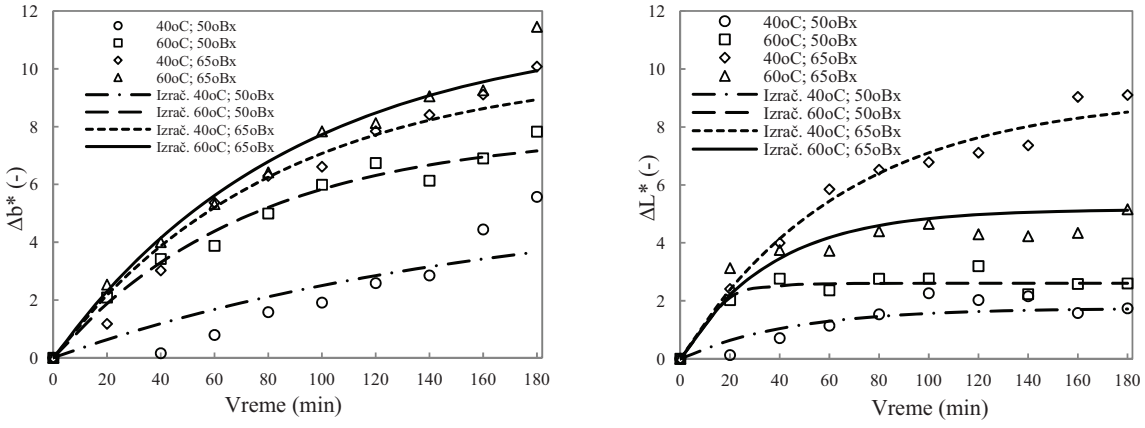
Temperatura rastvora (°C)	Koncentracija rastvora (%)	b^*		L^*	
		k_c	R^2	k_c	R^2
40	50	0,005947	0,7553	0,022623	0,7816
60	50	0,013656	0,9755	0,083036	0,9037
40	65	0,012082	0,9662	0,030625	0,9748
60	65	0,011214	0,9739	0,027703	0,8415

Verifikacija dobijenog modela preko vrednosti promene boje *Δb** i *ΔL** uzoraka dunje tokom osmotskog sušenja prikazane su na slikama 6.7 a) i b). Umesto apsolutnih vrednosti parametara *b** i *L** izmerenih na uređaju, prikazane su njihove razlike u odnosu na vrednosti koje su imali uzorci na početku sušenja.

Ovim modelom eksplicitno su izračunate vrednosti promene parametara boje *Δb** i *ΔL**:

$$\Delta b^* = b^* - b_0^* = b_e^* + (b_o^* - b_e^*)\exp(-k_c t) - b_0^* \tag{6.4}$$

$$\Delta L^* = L^* - L_0^* = L_e^* + (L_o^* - L_e^*)\exp(-k_c t) - L_0^* \tag{6.5}$$



(a) *(b)*

Slika 6.7. Promene vrednosti Δb(a) i ΔL* (b) uzoraka dunje tokom osmotskog sušenja (Radojčin, 2015)*

6.3. Mehaničke osobine i tekstura

Tekstura predstavlja kompleks kvalitativnih i kvantitativnih osobina i presudan je faktor u prihvatanju voća od strane konzumenata. Iako je termin u širokoj upotrebi, tekstura nije decidno i jednoznačno definisan atribut. To je termin koji obuhvata strukturne i mehaničke osobine hrane i njihovu čulnu percepciju u ruci ili ustima. Neke definicije teksture ograničavaju upotrebu samo na senzorne osobine ili mehaničke osobine direktno povezane sa senzornim. Termin tekstura se ponekad širi i na neke mehaničke osobine od komercijalnog interesa koji ne mogu biti direktno vezane za potrošače, kao što je otpornost na mehanička oštećenja (*Abbott i Harker, 2004*).

Pojmova koji se koriste za opisivanje teksture voća su: tvrdo, čvrsto, meko, hrskavo, brašnjavo, žvakljivo, topivo, vunasto, lepljivo, suvo i sočno. Nema prihvaćene instrumentalne metode za merenje svake od ovih osobina. U stvari, postoje određene nesuglasice među senzornim, hortikulturnim i inženjerskim upotrebama pojedinih termina, posebno čvrstoće (*Bourne, 2002*). Teksturne osobine voća su u vezi sa strukturnim, fiziološkim i biohemijskim karakteristikama živih ćelija, njihovim promenama tokom vremena i njihovim promenama tokom procesa kao što su kuvanje ili zamrzavanje. Neprekidne fiziološke promene u živim ćelijama, plus svojstvena varijabilnost proizvoda otežavaju ocenjivanje teksture voća. Zbog stalnih promena, merenja teksture često su relevantna samo u vreme ocene, to jest, ona se obično ne mogu koristiti za predviđanje stanja mnogo kasnije u periodu skladištenja ili u marketinškom lancu (*Abbott i Harker, 2004; Bourne, 2002*).

Za razumevanje teksture proizvoda, važno je identifikovati glavne elemente čvrstoće tkiva i utvrditi elemente koji su odgovorni za teksturne osobine proizvoda. Na primer, možda je neophodno izbeći žilava vlakna kod merenja teksture mekih tkiva, jer mala količina vlakana stvara veštački visoku vrednost otpora koja se ne slaže sa senzornom ocenom mekoće. S druge strane, važno je da se izmeri čvrstoća vlakana prilikom određivanja žilavosti, na primer kod špargle ili brokolija. Prema tome, razvoj metoda i rešenje za mnoge probleme teksture zahteva dobro razumevanje anatomije tkiva unutar voća, strukturu njihovih ćelija i biološke promene koje se dešavaju tokom sazrevanja i prerade sušenjem (*Abbott i Harker, 2004*).

Ono što je zajedničko za svo voće je to da je svo relativno meko kada se jede (sirovo ili kuvano), uglavnom zbog prisustva parenhima ćelija. Ove parenhimske ćelije nisu drvenaste, a njihovi primarni zidovi odvojeni su morfološki izraženim delom poznatim kao središnja lamela, koja razdvaja susedne ćelije, a bogata je pektinskim materijama. Jedinstvena mešavina matriksa (pektina i hemicelulozne) i polisaharidnih (celuloza) vlakana u ćelijskom zidu uglavnom određuje mehanička svojstva ovih ćelija. Polisaharidi dodeljuju ćelijskom zidu dva važna, ali naizgled nespojiva svojstva. Prvo svojstvo je plastičnost ćelijskog zida koje dozvoljava njegovo širenje kako ćelija raste. Drugo je krutost ćelijskog zida, koje obezbeđuje čvrstoću i određuje oblik ćelija. Međutim, sam po sebi, ćelijski zid nije u stanju da pruži znatnu mehaničku otpornost. Interakcija između krutosti zida i unutrašnjeg hidrostatičkog pritiska (turgora) sadržaja ćelije pruža mehaničku podršku (Abbott i Harker, 2004). Turgor daje ćeliji elastičnost, dok celuloza obezbeđuje čvrstoću, a pektini i hemiceluloza kao deo središnje lamele obezbeđuju plastičnost i određuju stepen moguće deformacije ćelije, navode Lewicki i Pawlak (2003). Povišene temperature voćnog tkiva tokom sušenja često dovode do degradacije pektinskih

polimera putem β - eliminacije, koje je obično u vezi sa stepenom metil esterifikacije pektina (*Waldron et al., 1997*). Uz gubitak turgora ovaj proces odgovoran je za termičko omekšavanje tkiva. Posleubirajući tretmani uključuju uranjanje ili infiltriraciju kalcijuma čime se održava čvrstoća širokog spektra voća tokom skladištenja (*Conway et al., 1994*). Glen i Poovaiah (1990) ispitivali su uticaj tretmana kalcijumom na čvrstoću kore jabuke. Ispitivanje je obavljeno testom zatezanja. Rezultati ukazuju da prekid tkiva tretiranog kalcijum može da se opiše kao razaranje (rupture) ćelija, dok prekid tkiva u kontrolnom uzorku može da se opiše kao razdvajanje ćelija (cell de-bonding). Iako dokazi ukazuju da kalcijum utiče na teksturu kroz interakciju sa ćelijskim zidom (pektinom), može da se pretpostavi da postoji uticaj kroz i na ćelijsku membranu.
Ćelijski zid može uticati i na percepciju o sočnosti kroz njegovu sposobnost da održi i otpusti tečnost. U nekim plodovima, ćelijski zid bubri znatno tokom sazrevanja (*Redgwell et al., 1997*). Pretpostavlja se da hidratisani zidovi ćelija, a možda i prisustvo slobodnog soka na površini neoštećenih ćelija mogu biti odgovorni za osećaj sočnosti kod voća (*Harker et al., 1997*). Smatra se da gubitak sočnost kod koštuničavog voća nastaje kada pektini vezuju vodu u želatinastu strukturu unutar ćelijskog zida (*Ben-Arie i Lavee, 1971*).

Istraživanjima mikrostrukturnih promena koje nastaju na ćelijama voća definisana su tri mehanizma prekida tkiva *(Harker et al., 1997*):
- Ćelije mogu da se razdvoje po svojim granicama i naglo da oslobode tečnost koju sadrže. Ovaj mehanizam se opisuje kao prelom ćelije (cell fracture).
- Mali delovi ćelije mogu se odvojiti izazivajući kolaps i oslobađanje tečnosti. Pri tome neke ćelije ostaju netaknute. Ovaj mehanizam se opisuje kao razaranje ćelije (cell rupture).
- Ćelije se mogu odvojiti i pri tome ostati neoštećene pri čemu nema gubitka tečnosti. Ovaj mehanizam se opisuje kao razdvajanje ćelija (cell-to-cell debonding).

Tekstura nekog proizvoda može se oceniti na brojne načine: izgledom proizvoda, osećajem u ruci, prilikom rezanja, zvucima prilikom ugriza i žvakanja, ali najvažnije od svega je osećaj u ustima tokom konzumiranja. Szczesniak (1963) predlaže profil teksture, sistematski pristup za senzornu analizu teksture na osnovu mehaničkih, geometrijskih i drugih karakteristika. Mehaničke karakteristike uključuju osnovne (čvrstoća, tvrdoća, elastičnost i dr.) i sekundarne parametre (lomljivost, žvakljivost). Geometrijske osobine se odnose na veličinu, oblik proizvoda i orijentaciju čestica. Tekstura može biti ograničavajući faktor u prihvatljivosti sušenog voća ukoliko su teksturne osobine izvan opsega prihvatljivosti potrošača. Međutim, ljudi imaju različita očekivanja i nameću različite granice pri oceni teksture za različite proizvode. Očekivanja potrošača su u skladu sa već poznatim osobinama istih ili sličnih proizvoda.
Odnos instrumentalnih merenja specifičnih senzornih osobina i njihov odnos prema prihvatljivosti potrošača mora se uzeti u obzir prilikom ispitivanja (*Shewfelt, 1993*). Instrumenti mogu biti dizajnirani da oponašaju ljudske metode testiranja ili osnovna mehanička merenja i mogu statistički bit povezani sa ljudskim shvatanjem i rasuđivanjem kategorije kvaliteta. Međutim, samo ljudi mogu oceniti kvalitet, ali instrumenti kojima se mere osobine vezane za kvalitet od vitalnog su značaja za istraživanje i kontrolu (*Abbot i sar, 1997*). Mogućnost merenja teksturnih osobina je kritična za procenu i kontrolu kvaliteta. Instrumentalna merenja imaju prednost u odnosu na senzorno ocenjivanje za istraživačke i komercijalne svrhe, jer instrumenti smanjuju varijacije koje mogu biti posledica ljudskog faktora. Instrumenti su precizniji, a mogu da obezbede i zajednički način komunikacije među istraživačima, preduzećima, regulatornim agencijama i potrošačima. Često se sugeriše da relevantnost instrumentalnih merenja zavisi od

toga koliko dobro predviđaju senzorne osobine (*Voisey, 1971*). Međutim, opravdana je upotreba instrumentalnih merenja mehaničkih osobina koje su u vezi sa ponašanjem voća i povrća, kao što su na primer otpornost na udar ili rezanje.

Sušenje izaziva promene hemijskih osobina hranjivih komponenti i fizičkih osobina kao što su promene boje, oblika, gustine, poroznosti i mehaničkih osobina. Promene mehaničkih osobina bitne su zbog njihove veze sa teksturom i senzorskim karakteristikama materijala, a time kvalitetom i prihvatljivošću proizvoda od strane potrošača (*Rao i Quintero, 2005*).

Lewicki i Pawlak (2003) istraživali su uticaj osmotskog sušenja na teksturne osobine tkiva jabuke. Autori navode da osmotsko sušenje jabuke šećernim rastvorom koncentracije 61,5% ne dovodi do razaranja ćelija. Ćelije postaju manje, a međućelijski prostor se povećava. Povećanje međućelijskog prostora iznosi više od 30% tokom 120 minuta osmotskog procesa sušenja. Međutim, autori smatraju da bi produženjem osmotskog predtertmana došlo do dezintegracije tkiva. Prinzivalli et al. (2006) proučavali su uticaj osmotskog sušenja rastvorom temperature 25^{o}C na ćelijsku strukturu, teksturu i sastav pektina u plodu jagode. Rezultati analize pokazuju da duže vreme izlaganja mezokarpa jagode osmotskom rastvoru izaziva značajne promene teksture tkiva. Autori navode da postoji dobra povezanost između promena teksture, ćelijske strukture i modifikacije sastava pektina.

Pored analize na mikrostrukturnom nivou u literaturi se mogu pronaći analize uticaja osmotskog sušenja na višem strukturnom nivou. Krokida et al. (2000) navode da osušeni uzorci jabuke i banane prethodno osmotski tretirani pokazuju veći otpor ka razaranju od uzoraka samo konvektivno osušenih, pri istoj vlažnosti. Autori ovaj rezulatat objašnjavaju povećanjem otpora pri plastičnom deformisanju zbog apsorbcije šećera u voćno tkivo. Mayor et al. (2007) proučavali su uticaj osmotskog sušenja na mehaničke osobine tkiva bundeve. Uzorci bundeve cilindričnog oblika tretirani su rastvorom saharoze koncentracije između 30-60% i temperature 12-38^{o}C. Nije potvrđen značajan uticaj parametara osmotskog rastvora na ispitivane mehaničke osobine. Nastale promene mehaničkih osobina autori povezuju sa promenom vlažnosti uzoraka. Osmotsko sušenje primenjuje se kao predtretman zamrzavanju. Na ovaj način produžava se mogućnost skladištenja uz očuvanje teksture, boje i arome nakon odmrzavanja (*Yetenayet i Hosahalli, 2010*).

Tokom mikrotalasnog sušenja energija je usmerena u celokupnu zapreminu proizvoda što izaziva brzi porast temperature isparavanje vode unutar proizvoda. Ovaj fenomen izaziva povećanje unutrašnjeg pritiska i potiskuje vodu ka površini proizvoda. Povećanje unutrašnjeg pritiska sprečava skupljanje proizvoda tokom sušenja, što ima pozitivan efekat na teksturu. Povećava se poroznost i moć rehidratacije (*Jean-Claude i Hamoud-Agha, 2019*). Poboljšanje teksturnih osobina kombinovanjem mikrotalasnog sušenja sa drugim tehnikama zabeleženo je kod sušenja listića banane (*Drouzas i Schubert, 1996*), brusnice (*Yongsawatddigul i Gunasekaran, 1996*), jagode (*Wardhani et al., 2021*), jabuke (*Andres et al., 2004*).

Liofilizirani proizvodi imaju vrhunski kvalitet, bolje očuvanu boju, ukus, izgled, veći odnos rehidratacije i hrskaviji su u poređenju sa proizvodima sušenim tradicionalnim tehnologijama sušenja. Konvencionalno sušeno voće ima tendenciju da bude tvrdo i teško za grickanje, ali sa optimalnim sadržajem vlage postaje prijatno za konzumaciju. Sušenje toplim vazduhom obično ima destruktivan uticaj na strukturu plodova, jer sušenje izaziva strukturni kolaps u tkivima voća usled uklanjanja vlage (*Fernandes et al., 2008b*). Vrednosti promenljivih veličina (temperatura, vlaga i deformacija tokom sušenja), stanje materijala (staklenog i gumenog) i spoljašnje sredine,

kao i drugih uslova sušenja, može značajno uticati na konačnu teksturu sušenih proizvoda (*Gulati i Datta, 2015*). U istraživanjima uticaja parametara sušenja liofiliozacijom na teksturne osobine, navodi se da povišene temperature polica za smeštaj voća dovode do povećanja krutosti kranjeg proizvoda. Ovaj podatak može biti značajan zbog toga što je povezan sa mehaničkom otpornošću proizvoda prilikom manipulacije i transporta (*Silva-Espinoza et al., 2019*). Sa druge starane, testovi probijanja obavljeni na liofiliziranim plodovima jagode nakon rehidratacije, ne pokazuju uticaj temperature polica na teksturne osobine (*Hammami i Rene, 1997*). Minimalna degradacija teksture liofilioziranih jagoda nastaje pri temperaturi polica od 15^{o}C i brzini zagrevanja od 1,6 ^{o}C/min ili pri 45^{o}C i brzini zagrevanja od 0,4^{o}C/min. Primena niske temperature polica sa visokim stepenom zagrevanja i visoke temperature polica sa niskim stepenom zagrevanja obezbeđuje otapanje proizvoda i kolaps voćnog tkiva (*Iwaniw i Mittal, 1990*). Pritisak kao drugi bitan parametar procesa liofilizacije ima neznatan uticaj na teksturu finalnog proizvoda (*Silva-Espinoza et al., 2019*).

Sušenje se često kombinuje sa različitim predtretmanima radi ubrzanja procesa, uštede energije, poboljšanja kvaliteta i dr. Predtretman jagode u pulsnom električnom polju, nakon sušenja liofilizacijom obezbeđuje bolje očuvanje teksture i oblika (*Wiktor et al., 2019*).



(a) (b)

Slika 6.8. Uticaj PEF tretmana na teksturu jagode nakon sušenja liofilizacijom (a- jagoda bez PEF-a; b - jagoda tretirana PEF-om) (*Wiktor et al., 2019*)

6.3. Oblik i zapremina

Jedna od bitnijih fizičkih promena do koje dolazi tokom sušenja biomaterijala je promena geometrijskih karakteristika. To su promene oblika i zapremine (*Frias et al., 2010*). Promena oblika materijala tokom procesa sušenja odražava se na kvalitet krajnjeg proizvoda. Veličina ovih promena zavisi od mehanizma transporta vlage, odnosno, metod i uslovi sušenja utiču na intenzitet promene oblika i zapremine. Tokom konvektivnog sušenja značajno se menja zapremina materijala i smanjuje sposobnost rehidratacije. Poznavanje fizičkih osobina voća važno je zbog projektovanja opreme za preradu, sušenje i skladištenje. Pored toga fizičke osobine su deo kompleksa senzorskih osobina koje su veoma bitne za konzumaciju.

Promena zapremine često se izražava zapreminskim skupljanjem. Zapreminsko skupljanje najčešće predstavlja odnos između zapremine materijala pre i posle sušenja. Promene zapremine materijala koje nastaju prilikom procesa osmotskog sušenja mogu se posmatrati na različitim strukturnim nivoima, na mikrostrukturnom i makrostrukturnom nivou, odnosno na nivou ćelije i nivou veličine posmatranog uzorka. Sušenje i gubitak vode izaziva promene ćelijske

mikrostukture i zapremine (*Koc et al., 2008*). Kao posledica smanjenja vlažnosti i promene osobina ćelijske membrane, dolazi do pojave skupljanja i deformacije ćelije, plazmolize, razdvajanja ćelija i prekidanja veza između ćelija. Smanjenje vlažnosti izaziva promene u ćelijskoj strukturi, što vodi ka promenama oblika i smanjenju dimenzija (*Mayor, 2006b*).

Voće je ćelijski biomaterijal koji se sastoji od trodimenzionalne čvrste mreže koja sadrži veliku količinu tečnosti. Čvrsti deo čine biopolimeri, najčešće celuloza i pektini. Struktura i mehaničke osobine tih elemenata definišu zapreminu, veličinu i oblik uzorka.

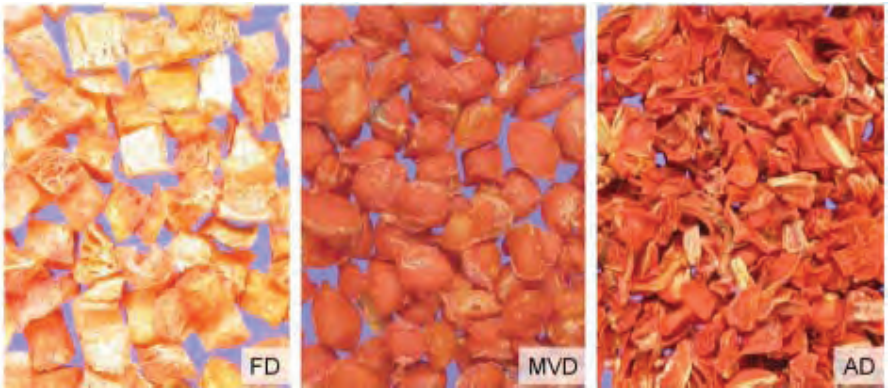
Značajan broj autora bavio se ispitivanjem zavisnosti promene zapremine i vlažnosti biomaterijala. Pri višim vlažnostima materijala promena zapremine skoro u potpunosti kompenzuje gubitak vlažnosti. U tom periodu zapremina se smanjuje linearno sa smanjenjem vlažnosti materijala. Pri nižim vlažnostima materijal prelazi iz "gumenog" ka "staklastom" stanju, pri čemu se zapremina smanjuje. Promenama stanja od "gumenog" ka "staklastom" podložni su šećeri (glukoza, fruktoza, saharoza) koji se nalaze u rastvoru protoplazme. Celuloza i pektini ne podležu nevedenim promenama (*Aguilera et al., 1998*). U završnoj fazi sušenja zapremina vode koja napusti tkivo veća je od smanjenja zapremine uzorka (*Lozano et al., 1983; Krokida i Maroulis, 1997; Moreira et al., 2000*). Ovo ponašanje materijala može objasniti odstupanje od linearnosti promene zapremine materijala tokom finalne faze konvektivnog sušenja. Tokom procesa sušenja, kada materijal dostigne niske vrednosti vlažnosti, krutost koju tada materijal dostigne utiče na prekidanje procesa promene zapremine i formiranje porozne strukture.

Otpor prema promeni oblika i zapremine svakako zavisi od strukture i hemijskog sastava materijala. Materijal sa većim sadržajem vlage i tanjim ćelijskim zidom pretrpeće veće promene zapremine od materijala sa manjim sadržajem vlage i ćelijskim zidom bogatim celulozom i ligninom. Promena zapremine biomaterijala tokom sušenja najčešće je anizotropna zbog orijentacije biljnih vlakana (*Rossello et al., 1997; Mulet et al., 2000*).

Najmanji uticaj na promenu zapremine ima sušenje zamrzavanjem ili liofilizacija. Kod materijala koji je zamrznut dolazi do isparavanja vode iz čvrstog stanja bez prisustva tečne faze. Ovaj način sušenja je primenu našao uglavnom kod jagodastog i bobičastog voća. Pavkov i sar. (2017) ispitivali su uticaj konvektivnog sušenja i sušenja zamrzavanjem na promenu zapremine i oblik ploda maline sorte polana. Prema njihovim navodima sušenje toplim vazduhom temperature 70^{o}C i 80^{o}C, brzine 1 m/s dovodi do promene zapremine od 23,17% i 43,13% respektivno. Sušenje vazduhom temperature od 50^{o}C dovodi do potpunog kolapsa ploda.

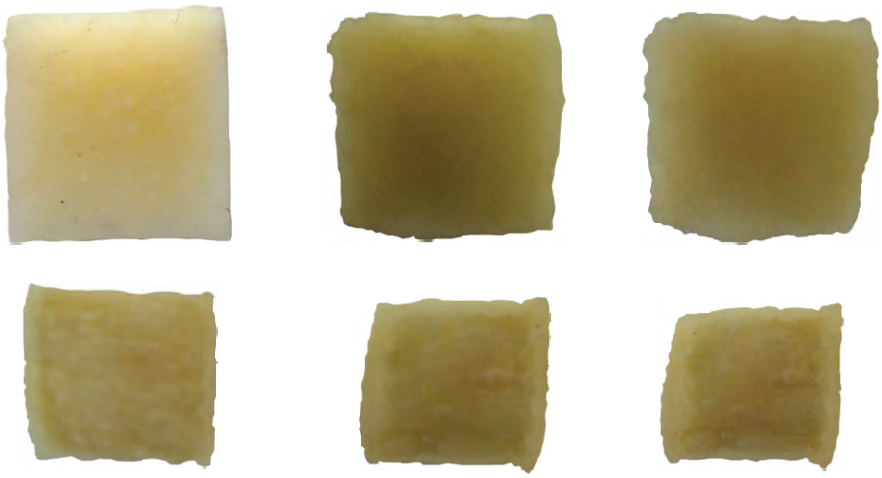
Stamenković et al. (2019) poredili su uticaj sušenja maline sorte polana različitim vrednostima temperature vazduha (60, 70 i 80^{o}C), brzine strujanja vazduha (0,5 i 1,5 m/s) i različitih početnih stanja (sveža i zamrznuta). Najmanja promena zapremine (35,74%) izmerena je pri sušenju sveže maline vazduhom temperature 60^{o}C i brzine strujanja od 1,5 m/s. Isti autori navode da promena zapremine pri sušenju liofilizacijom iznosi 16,49%. Očuvanje zapremine je bolje ako se poredi mikrotalasno-vakuum sušenje sa konvektivnim sušenjem zagrejanim vazduhom što je već dokazano za jagode (*Bruijn and Bórquez, 2014*), šargarepu (*Cui et al., 2008; Rother et al., 2011*) i jabuke (*Sham et al., 2001*). Jedan od razloga za to je efekat koji se zove puffing/naduvavanje, koji se javlja kada je brzina isparavanja unutar proizvoda veća od brzine transporta pare ka spoljašnjosti proizvoda. Nastali nadpritisak dovodi do ekspanzije proizvoda, što rezultira većim zadržavanjem zapremine finalnog proizvoda. Ovo je ilustrovano na slici 6.9, gde su kockice šargarepe osušene mikrotalsno-vakuum, naduvane u upoređuju sa

kockicama sušenim zagrejanim vazduhom i liofilizacijom. Kao što se i očekivalo, liofliziranі proizvodi su veoma porozni, ali bleđi, dok mikrotalasno-vakuum sušenje daje intenzivniju boju, ali porozan proizvod koji liči na jastučić, jer ponekada je prisutan jedan vazdušni mehur unutrar proizvoda (*Gaukel et al., 2017*). Konvektivno sušeni uzorci pokazuju uobičajeni problem velikog skupljanja. Brzina rehidracije je najbolja za proizvode osušene zamrzavanjem. To je zato što imaju otvorenu strukturu pora i zbog kapilarnih efekata – apsorbuju vodu u roku od nekoliko sekundi. Naduvani uzorci, iako prilično porozni, obično imaju zatvorenu površinu i ne mogu da iskoriste kapilarni efekat. Međutim, ipak su bolji od sušenih zagrejanim vazduhom (*Rother et al., 2011*). Iako je eksperiment obavljen sa mrkvom, isti fenomem prisutan je i kod sušenja voća.



Slika 6.9. Kockice mrkve liofilzirane (FD), mikrotalsno-vakuum sušene (MVD), konvektivno sušene (AD)

Osmotsko sušenje kao predtretman konvektivnom pozitivno utiče na očuvanje oblika i na smanjenje zapremine, navodi Karathanos (1996). Mayor i Sereno (2004) navode da je promena zapremine uzoraka tikve u obliku cilindra prečnika 15 mm i dužine 25 mm linearna u odnosu na promenu vlažnosti tokom osmotskog sušenja. Mayor i sar, (2011) proučavali su promene zapremine bundeve tokom osmotskog sušenja. Analizom promena dimenzija uzoraka zaključuju da je promena zapremine tokom osmotskog sušenja izotropna. Ovo se može objasniti velikim stepenom izotropnosti bundevinog tkiva. Radojčin (2015) analizirao je uticaj osmotskog sušenja na uzorke dunje. Na slici 6.10 prikazani su uzorci dunje u različitim momentima osmotskog sušenja rastvorom temperature 40^{o}C i koncentracije 65^{o}Bx. Može se uočiti konstantno smanjenje zapremine i dimenzija. Skupljanje tkiva nije jednako na svim mestima i u svim pravcima. Skupljanje je veće na središnjem delu uzorka, a manje na krajevima. U različitim pravcima je primetno različito skupljanje uzorka, što je posledica anizotropnosti tkiva dunje. Zbog toga se oblik uzorka menja iz kvadratnog u pravougaoni. Na osnovu uočenih promena može se reći da je skupljanje tkiva anizotropno. Razlog anizotropnog skupljanja tkiva može biti orijentacija vlakana i nehomogena struktura materijala. Osim toga, orijentacija vlakana i struktura materijala mogu da utiču na formiranje povoljnijih puteva transporta vlage, što dovodi do intenzivnijeg skupljanja tkiva u jednom pravcu. Mulet et al. (2000) ukazuju na anizotropno skupljanje tkiva krompira i karfiola tokom konvektivnog sušenja. Međutim, Mayor (2006b) i Trujillo et al. (2007) navode da je skupljanje tkiva bundeve i goveđeg mesa tokom osmotskog sušenja izotropno. Analiziranjem podataka o promeni oblika biomaterijala, koji se mogu naći u literaturi, može se zaključiti da osim primenjenog metoda sušenja, promena oblika zavisi i od vrste materijala.



Slika 6.10. Promena oblika kocke dunje tokom osmotskog sušenja u rastvoru temperature 40^{o}C i koncentracije 65% (Radojčin, 2015)

Na osnovu dostupnih podataka o promeni zapremine tokom procesa osmotskog sušenja, Radojčin (2015) predlaže jednačinu koja može poslužiti za izračunavanje promene zapremine tokom osmotskog sušenja (jednačina 6.6). Smanjenje zapremine tokom osmotskog sušenja uzrokovano je prelaskom vode iz materijala u rastvor. Smanjenje zapremine delimično nadoknađuje saharoza koja ulazi u tkivo. Promena zapremine gasne faze koja se nalazi u tkivu, takođe utiče na promenu ukupne zapremine (*Mayor i Sereno, 2004*). Provera ovih opšte prihvaćenih stavova može se obaviti izračunavanjem zapremine vlage koja napušta uzorak i saharoze koja difundije u uzorak. Jednačina 6.6 iskorišćena je za izračunavanje promene zapremine uzoraka dunje tokom osmotskog sušenja:

$$SV = \frac{\frac{(m_0\omega_0 - m_i\omega_i)}{\rho_w} - \frac{m_{si} - m_{s0}}{\rho_s}}{\frac{m_0}{\rho_t}} 100 \qquad (6.6)$$

gde je: m_o – početna masa uzorka, m_i – masa uzorka u određenom momentu sušenja, ω_o – početna vlažnost uzorka, ω_i – vlažnost uzorka u određenom momentu sušenja, m_{so} – masa suve materije svežeg uzorka, m_{si} – masa suve materije u određenom momentu osmotskog sušenja, ρ_w – gustina vode, ρ_s – gustina saharoze, ρ_t – gustina tkiva dunje.

Deljenjem jednačine 6.6 sa gustinom vode ρ_w, sledi:

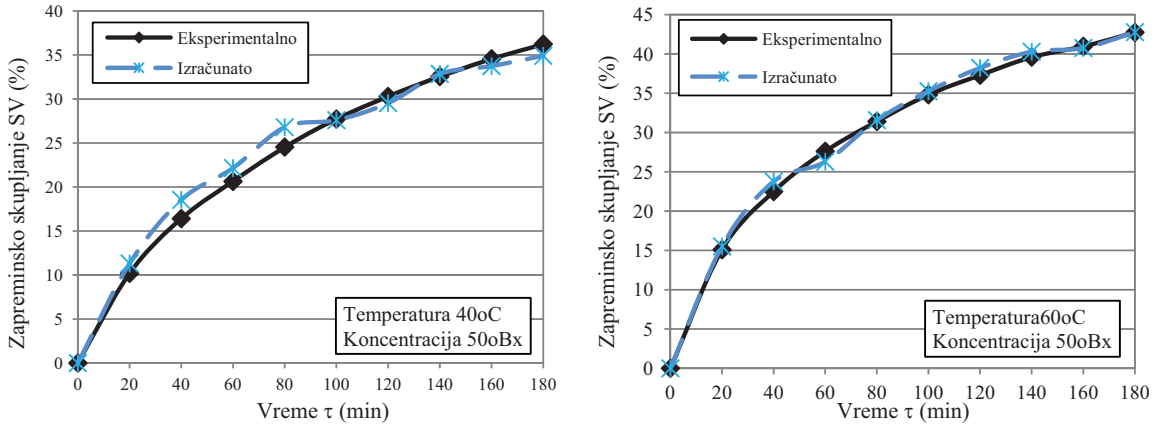
$$SV = \frac{(m_0\omega_0 - m_i\omega_i) - \frac{m_{si} - m_{s0}}{\frac{\rho_s}{\rho_w}}}{\frac{m_0}{\frac{\rho_t}{\rho_w}}} 100 \qquad (6.7)$$

Gustina tkiva dunje izmerena je metodom potapanja uzorka u tečnosti poznate gustine 0,96457 kg/dm^3, a gustina kristala saharoze iznosi 1,587 kg/dm^3 (*Asadi, 2006*). Vrednost gustine vode je usvojena i iznosi 1 kg/dm^3. Potrebno je obaviti korekciju jednačine 6.7, množenjem imenioca sa

1,1, zbog vazduha koji se nalazi u tkivu (Koc, 2008). Ubacivanjem ovih brojčanih vrednosti u jednačinu dobija se krajnji oblik jednačine za izračunavanje promene zapremine uzorka dunje u obliku kocke:

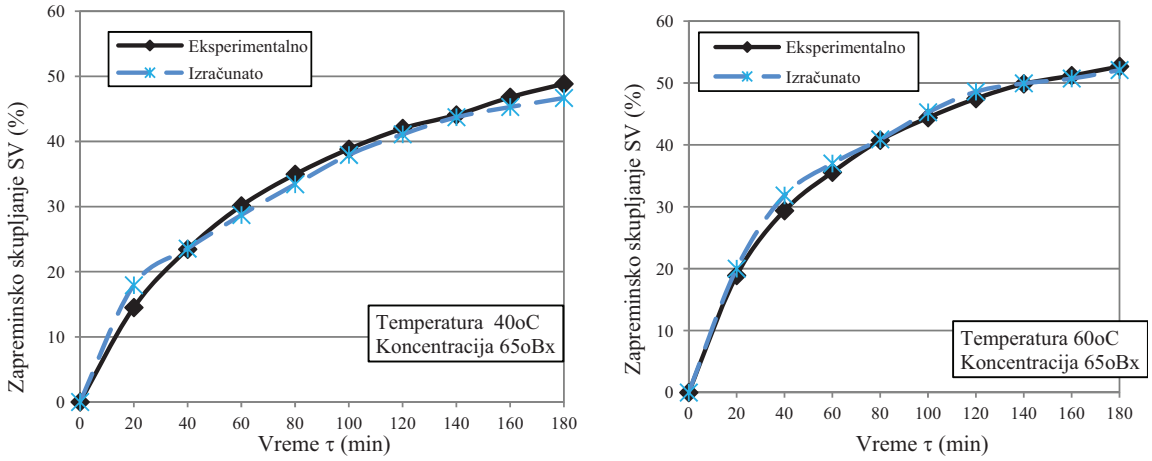
$$SV = \frac{(m_0\omega_0 - m_i\omega_i) - \frac{m_{si} - m_{s0}}{1{,}587}}{\frac{m_0}{0{,}96457}1{,}1}100 \tag{6.8}$$

Na slikama 6.11 i 6.12 prikazane su izmerene vrednosti promene zapremine i izračunate vrednosti upotrebom jednačine 6.8. Stepen slaganja eksperimentalnih podataka sa izračunatim određen je izračunavanjem koeficijenata korelacije (R) i srednje procentualne greške (SPG). Na osnovu ovih vrednosti i grafičkog prikaza eksperimentalnih i izračunatih vrednosti zapreminskog skupljanja, može se zaključiti da jednačina 6.8 može uspešno poslužiti za predviđanje promene zapremine dunje tokom osmotskog sušenja u istraživanom opsegu parametara eksperimenta.



(a) (b)

Slika 6.11. Eksperimentalne i izračunate vrednosti promene zapremine SV tokom osmotskog sušenja pri dve temperature i koncentracije osmotskog rastvora (Radojčin, 2015)
(a) 40°C , 50°Bx (b) 40°C , 50°Bx



Slika 6.12. Eksperimentalne i izračunate vrednosti promene zapremine SV tokom osmotskog sušenja pri dve temperature i koncentracije osmotskog rastvora (Radojčin, 2015)
(a) 40°C , 65°Bx (b) 40°C , 65°Bx

6.4. Hemijski kvalitet

Uticaj sušenja na voće uglavnom se ogleda u gubitku sadržaja bioaktivnih supstanci, vitamina, fenola, flavonoida, antocijana itd. Primenom različitih tehnika sušenja gubici mogu biti veći ili manji. Nastale promene u hemijskom sastavu često su direktno proporcionalne promenama fizičkih osobina. Konvektivno sušenje se naglašava kao najagresivnije, a liofilizacija kao najblaži metod, kako po pitanju fizičkog, tako i hemijskog kvaliteta krajnjeg proizvoda. Primenjene više temperature i produženo izlaganje kiseoniku mogu na kraju da smanje sadržaj vitamina tokom sušenja plodova (*Kamiloglu et al., 2015*). Ipak, studije zaključuju da sušenje na suncu, čak i na nižim temperaturama (24,5 - 40,3 °C), takođe može uticati na značajno smanjenje sadržaja vitamina u plodovima (Mohammed et al., 2020). Osim vrednosti temperature vazduha za sušenje, na hemijski i nutritivni kvalitet utiču i drugi faktori, kao što je dužina trajanja procesa. Usled sušenja voća do nivoa vlažnosti od 10% ili niže, relativno povećanje koncentracije mineralnog sadržaja, ukupne kiselosti, ugljenih hidrata i ukupnih šećera je značajno veće u sušenom voću u poređenju sa svežim uzorcima. Ove nalaze su u velikoj meri podržali Suna et al. (2014), koji su ustanovili jasnu pozitivnu korelaciju između suve materije i mineralnih elemenata u različitim voćnim sortama tokom i nakon sušenja. Povišene temperature imaju negativan uticaj na određene hemijske profile. Sušenje toplim vazduhom, sušenje zamrzavanjem pokazali su značajne promene u sadržaju vitamina B i C u borovnicama, trešnjama, brusnicama i jagodama (*Nemzer et al., 2018*). Liofilizirani uzorci, osim borovnica, pokazali su veći nivo termolabilnog vitamina C u poređenju sa uzorcima sušenim drugim dvema metodama. U konvektivno osušenim uzorcima izmeren je najmanji sadržaj vitamina C. Stabilnost vitamina B u uzorcima sušenim drugim dvema metodama je u velikoj meri zavisila od vrste materijala. Konkretno, borovnice i trešnje su pokazale značajno veći ukupni vitamin B tokom sušenja liofiloizacijom, dok je kod brusnica i jagoda, refrativno sušenje pokazalo značajno veće očuvanje ukupnog vitamina B. Uslovi rada tokom konvektivno infracrvenog sušenja mogu značajno uticati na fluktuacije hranljivih elemenata u voću kao što je jagoda (Adak et al., 2017). Viša temperatura vazduha za sušenje povećava koncentraciju hemijskih elemenata kao što su N, P, K i Mn, dok se sadržaj Zn i Ca smanjuje. Primenom različite snage infracrvenog zračenja utvrđeno je povećanje koncentracije N, P i K, dok je smanjen sadržaj Ca, Mg, Fe, Mn i Zn. Dalje, različite brzine vazduha za sušenje povećavaju koncentraciju N, P i K i smanjuju sadržaj Ca, Mg, Fe i Zn, stoga je važno optimizovati proces sušenja kako bi se obezbedio najbolji hemijski sastav osušenog proizvoda. U eksperimentima sušenja jagode različitim vrednostima temperatura vazduha, različitim snagama infracrvenog zračenja i brzinama vazduha od 1, 1,5 i 2 m/s, autori navode temperaturu vazduha od 60^{o}C kao optimalnu za očuvanje ukupnih fenola, antocijana i antioksidativne aktivnosti. Veći nivoi ukupnih fenola i antocijanina utvrđeni su pri brzini strujanja vazduha od 1,0 m/s, dok povećanje brzine strujanja na 2,0 m/s dovodi do većih vrednosti antioksidativne aktivnosti. Štaviše, povećanjem infracrvene snage sa 100 V na 300 V povećava se antioksidativna aktivnost, ukupni sadržaj antocijanina i fenola. Shodno tome, autori su zaključili da je opseg od 200V–300V poželjno sušenje jagode (*Adak et al., 2017*). Analiza uticaja procesa sušenja na nutritivni kvalitet voća je često prisutna u naučnoj literaturi. Poseban fokus je na novim tehnikama sušenja i predtretmanima u cilju očuvanja nutritivnog i hemijskog kvaliteta. Nove tehnike, hibridne tehnike i naročito netermalni predtretmani porede se sa konvencionalnim tehnikama sušenja.

LITERATURA

1. Abbott J.A., and Harker R.F. (2004). Texture. The horticulture and Food Research Institute of New Zealand Ltd. Mt. Albert Research Centre, Auckland, New Zealand.
2. Abbott, J.A., Lu, R., Upchurch, B.L., Stroshine, R.L. (1997). Technologies for nondestructive quality evaluation of fruits and vegetables. Horticultural Review, 20, 1-120.
3. Adak, N., Heybeli, N., Ertekin, C. (2017). Infrared drying of strawberry. Food Chemistry, 219, 109–116.
4. Adam, E., Mühlbauer, W., Esper, A., Wolf, W., Spiess, W. (2000). Quality changes of onion (*Allium cepa L.*) as affected by the drying process. Food/Nahrung, 44(1), 32–37.
5. Aguilera, J.M., Cuadros, T.R., del Valle, J.M. (1998). Differential scanning calorimetry of low-moisture apple products. Carbohydrate Polymers, 37, 79-86.
6. Ahmed, J., Kaur, A., Shivhare, U. (2002). Color degradation kinetics of spinach, mustard leaves, and mixed puree. Journal of Food Science, 67 (3), 1088–1091.
7. Alibas, I. (2009). Microwave, Vacuum, and Air Drying Characteristics of Collard Leaves. Drying Technology, 27, pp.1266–1273.
8. Andres, A., Bilbao, C., Fito, P. (2004). Drying kinetics of apple cylinders under combined hot air–microwave dehydration. Journal of Food Engineering, 63, pp.71–78.
9. Anthony, J., Fontana, (1998). Water Activity: Why it is Important for Food Safety; First NSF International Conference on Food Safety, November 16-18, Albuquerque, NM, p. 177-185.
10. Archibald, R., Melton, L., (1987). The Anatomy of the Fleshy Pericarp of Maturing Moorpac Apricots, Prunus Armeniaca. New Zealand Journal of Botany, 25, p. 181-184.
11. Arslan, D., Özcan, M. (2010). Dehydration of red bell-pepper (*Capsicum annuum L.*): change in drying behavior; color and antioxidant content. Food and Bioproducts Processing, 89 (4), 504–513.
12. Asadi, M. (2006). Beet-Sugar Handbook, John Wiley & Sons, USA.
13. Ashokkumar, M. (2015). Applications of ultrasound in food and bioprocessing. Ultrasonics Sonochemistry, 25, pp.17–23.
14. Ashtiani, S.H.M., Rafiee, M., Morad, M.M., Khojastehpour, M., Khani, M.R., Rohani, A., Shokri, B., Martynenko, A. (2020). Impact of gliding arc plasma pretreatment on drying efficiency and physicochemical properties of grape. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 63(102381), 1–16.
15. Assegehegn, G., Brito-de la Fuente, E., Franco, J.M., Gallegos, C. (2020). Freeze-drying: A relevant unit operation in the manufacture of foods, nutritional products, and pharmaceuticals. Advances in Food and Nutrition Research, 93, pp. 1–58.
16. Ayranci, E., Ayranci, G., Dogantan, Z. (1990). Moisture Sorption Isotherms of Dried Apricot, Fig and Raisin at 20^{o}C and 36^{o}C, Journal of Food Science, 55, p. 1591-1593.

17. Azoubel, M., Patricia, El-Aouar, A., A., Tonon, V., Renata, Kurozawa, L., E., Antonio, A., G., Murr, F., E., X., Park, K., J. (2009). Effect of Osmotic Dehydration on the Drying Kinetics and Quality of Cashew Apple, International Journal of Food Science and Technology, 44, p. 980-986.
18. Babalis, S., J., Papanicolaou, E., Kyriakis, N., Belessiotis, V., G. (2006). Evaluation of Thin - Layer Drying Models for Describing Drying Kinetics of Figs (*Ficus carica*), Journal of Food Engineering, 75, p. 205-214.
19. Babić Ljiljana, Matić-Kekić Snežana, Babić M., Dedović, N., Pavkov I. Surface Area And Volume Modeling Of The Williams Pear (*Pyrus communis*), International Journal of Food Properties, dostupan on line od 18.03.2011., DOI: 10.1080/10942912.2010.506020.
20. Babić, Ljiljana (1984). Kinetika konvektivnog sušenja kukuruza u debelom sloju, Magistarska teza, Fakultet poljoprivrednih znanosti, Sveučilište u Zagrebu, Zagerb, s. 136.
21. Babić, Ljiljana, (1989). Uticaj nekih hibrida kukuruza na brzinu sušenja sloja zrna debljine 100-300 mm, Doktorska disertacija, Fakultet poljoprivrednih znanosti, Sveučilište u Zagrebu, Zagerb, s. 221.
22. Babić, Ljiljana, Babić, M. (2011). Sušenje i skladištenje (drugo izdanje), Poljoprivredni fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, s. 306.
23. Babić, Ljiljana, Babić, M., Pavkov, I. (2004). Uticajni faktori na promenu vlažnosti polutki kajsije pri osmotskom sušenju, Savremena poljoprivredna tehnika, Novi Sad, 30(3-4), s. 117-126.
24. Babić, Ljiljana, Babić, M., Pavkov, I. (2007). The Quality Indicators of Osmotic Dried Apricot (*Prunus armeniaca*), Agriculturae Conspectus Scientificus, 72 (4), p. 335-341.
25. Babić, Ljiljana, Matić-Kekić, Snežana, Babić, M., Pavkov, I., Radojčin, M. (2009). Estimation of an Apricot (*Prunus armeniaca*) Halves Surface Area, PTEP -Časopis za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi, Novi Sad, 13(1), s. 19-22.
26. Babić, M. (1995). Istraživanje uticaja osnovnih fizičkih osobina zrna pšenice na karakteristike strujanja vazduha kroz nasuti sloj. Doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, s. 96.
27. Babić, M., Babić, Ljiljana (2005a). Hidropneumatska tehnika (autorizovana predavanja), Poljoprivredni fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, s. 38.
28. Babić, M., Babić, Ljiljana (2007). Fizičke osobine poljoprivrednih materijala (autorizovana predavanja), Poljoprivredni fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, s. 62.
29. Babić, M., Babić, Ljiljana, Pavkov, I. (2004a). Domaća proizvodnja sušene kajsije, Voćarstvo i vinogradarstvo, Novi Sad, 2(4), s. 10-14.
30. Babić, M., Babić, Ljiljana, Pavkov, I. (2004b). Maseni i energetski bilansi sušenja kajsije, Savremena poljoprivredna tehnika, Novi Sad, 30(3-4), s. 127-133.
31. Babić, M., Babić, Ljiljana, Pavkov, I. (2005b). Energetski i maseni bilans kombinovanog sušenja voća, PTEP -Časopis za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi, Novi Sad, 9(3-4), s. 54-56.
32. Babić, M., Babić, Ljiljana, Pavkov, I., Radojčin, M. (2008). Promene fizičkih osobina dunje (*Cydonia oblonga mill.*) tokom osmotskog sušenja, PTEP - Časopis za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi, 12(3), s. 101-107.
33. Babić, M., Babić, Ljiljana, Radojčin, M., Pavkov, I., Karadžić, B. (2007). Promena čvrstoće dunje (*Cydonia Oblonga Mill.*) tokom osmotskog sušenja, PTEP – Časopis za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi, Novi Sad, 11(3), s. 82 – 85.
34. Bao, T., Hao, X., Shishir, M.R.I., Karim, N., Chen, W. (2021).Cold plasma: An emerging pretreatment technology for the drying of jujube slices. Food Chemisrty, 337, 127783.
35. Barat, J., M., Fito, P., Chiralt, A. (2001). Modeling of Simultaneous Mass Transfer and Structural Changes in Fruit Tissues, Journal of Food Engineering, 49, p. 77-85.

36. Barrett, D. M., Beaulieu, J. C., Shewfelt, R. (2010). Color, flavor, texture, and nutritional quality of fresh-cut fruits and vegetables: desirable levels, instrumental and sensory measurement, and the effects of processing. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 50 (5), 369–389.
37. Basu, S., Shivhare, U.S., Mujumdar, A.S., Models for sorption isotherms for foods: A review, *Drying Technology, 24* (2006), 8, pp. 917-930.
38. Bchir, B., Besbes, S., Attia, H., Blecker, C. (2009). Osmotic Dehydration of Pomegrante Seeds: Mass Transfer Kinetics and Differential Scanning Calorimetry Characterization, International Journal of Food Science and Technology, 44, p. 2208-2217.
39. Beaudry, C., Raghavan G.S.V., Ratti, C., Rennie, T.J. (2004). Effect of four drying methods on the quality of osmotically dehydrated cranberries. Drying Technology 2004:22(3):521–539.
40. Ben-Arie, R. and S. Lavee. (1971). Pectic changes occurring in Elberta peaches suffering from woolly breakdown. Phytochemistry, 10, 531-538.
41. Bhattacharya, M., Srivastav, P.P., Mishra, H.N. (2015). Thin-layer modeling of convective and microwave-convective drying of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*). Journal of Food Science and Technology, 52,pp.2013–2022.
42. Bignardi, B., Lupi, D., Scalzo., Mastrelli, A., Torreggiani, D. (2000). Partial Removal of Water Before Frezing to Obtain Quality Frozen Cantaloup Melon Balls. In Poster presented final congress „Osmotic Treatment in Food Processing„ EU-FAIR concerted action CT&-1118 „Improvement of Overall Food Quality by Application of Osmotic Treatments in Conventional and New Process“, Karlsruhe, Germany, 23-24 June, 2000.
43. Bingol, G., Roberts, J.S., Balaban, M.O., Devres, Y.O. (2012). Effect of dipping temperature and dipping time on drying rate and color change of grapes. Drying Technology, 30(6), pp.597–606.
44. Bošnjaković, F. (1976). Nauka o toplini – drugi dio, Tehnička knjiga, Zagreb, s. 315.
45. Bourne, M.C. (2002). Food Texture and Viscosity. (2nd ed.). Elsevier Science, London.
46. Bozkir, O. Thin-layer Drying and Mathematical Modeling for Washed Dry Apricots. J. Food Eng. **2006**, 77, 146–151.
47. Bruijn, J. de., Bórquez, R. (2014). Quality retention in strawberries dried by emerging dehydration methods. Food Resourses.International, 63,42–48.
48. Brunauer, S., Deming, L.S., Deming, W.E., Teller, E., (1938). On a theory of the van der Waals adsorption of gases, Journal of the American Chemical Society, 62 (1), pp. 1723-1732.
49. Brunauer, S., Emmett, P., H., Teller, E. (1938). Adsorptio of Gase sin Multimolecular Layers. Journal of the American Chemical Society, 60, p. 309-319.
50. Carranza-Concha, J., Benlloch, M., Camacho, M.M., Martınez-Navarrete, N. (2012). Effects of drying and pretreatment on the nutritional and functional quality of raisins. Food and Bioproducts Processing, 90(C2), pp.243–248.
51. Chang., D.C., Chassy, B.M., Saunders, J. A., Sowers, A.E. (1992). Guide to electroporation and electrofusion, 9-167, 429-457 London, CA: Academic Press.
52. Changrue, V., Orsat, V., Raghavan, G.S.V. (2008). Osmotically dehydrated microwave-vacuum drying of strawberries. Journal of Food Processing and Preservation, 32 (5), 798-816.
53. Chen, X., D. (1997). A New Water Sorption Equilibrium Isotherm Model, Food Reasrch International, 30, p. 755-759.
54. Chirife, J., Favetto, G., J. (1992). Some Physical-Chemical Basis of Food Preservation by Combined Methods. Food Research International, 25, 5, p. 389-396.

55. Ćirić, D., Vračar, LJ. (1989). Unapređenje tehnologije sušenja voća. Jugoslovensko Voćarstvo 23, 647-651.
56. Clydesdale, F. M. (1978). Colorimetry—methodology and applications. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 10 (3), 243–301.
57. Cohen, J.S., Yang, T.C.S. (1995). Progress in food dehydration. Trends in Food Science & Technology, 6, pp.20–25.
58. Conway, W.S., Sams, C.E., Wang, C.Y., Abbott. J.A. (1994). Additive effects of postharvest calcium and heat treatment on reducing decay and maintaining quality in apples. Journal of the American Society for Horticultural Science, 119, 49-53.
59. Corona, O., Torchio, F., Giacosa, S.,Segade, R., Planeta, D., Gerbi, V., Squadrito, M., Mencarelli, F., Rolle, L. (2016). Assessment of postharvest dehydration kinetics and skin mechanical properties of "muscat of alexandria" grapes by response surface methodology. Food and Bioprocess Technology, 9(6), pp.1–10.
60. Costa, C., Antonucci, F., Pallottino, F., Aguzzi, J., Sun, D., Menesatti, P. (2011). Shape analysis of agricultural products: a review of recent research advances and potential application to computer vision. Food and Bioprocess Technology, 4 (5), 673–692.
61. Crank, J. (1975). Mathematics of Diffusion, Oxford University Press, London, p. 56-57.
62. Crank, J. Mathematics of diffusion. 2nd ed., Clarendon Press: Oxford, Grate Britain, 1975; pp 24-68.
63. Cui, Z.W., Li, C.YC., Song, F., Song, Y. (2008). Combined Microwave-Vacuum and Freeze Drying of Carrot and Apple Chips. Drying Technology, 26,1517–1523.
64. Cuthberstan, R., C., Lothain, E., Forrest, I., S. (1990). Solute Concentration Measurment Apparatus, Patent No. 4934177, United States Patent, p. 1-13.
65. da Silva, E.S., Brandão, S.C.R., da Silva, A.L., da Silva, J.H.F., Coêlho, A.C.D., Azoubel, P.M. (2019). Ultrasound-assisted vacuum drying of nectarine. Journal of Food Engineering, 246, pp.119–124.
66. de la Fuente-Blanco, S., de Sarabia, E.R.-F., Acosta-Aparicio, V.M., Blanco-Blanco, A., Gallego-Juárez, J.A. (2006). Food drying process by power ultrasound. Ultrasonics, 44, pp.e523–e527.
67. Demirhan, E., Ozbek, B. (2009). Color change kinetics of microwave-dried basil. Drying Technology, 27 (1), 156–166.
68. Diamente, L., M., Ihns, R., Savage, P.,G., Vanhanen, L. (2010). A New Mathematical Model for Thin Layer Drying of Fruits, International Journal of Food Science and Technology, 45, p. 1956-1962.
69. Diamente, L., M., Munro, P., A. (1991). Mathematical Modelling of the Thin Layer Solar Drying of Sweet Potato Slices, Solar Energy, 51, p. 271-276.
70. Domaz, I. (2009). Thnin-Layer Drying of Spinach Leaves in a Convective Dryer, Journal of Food Process Engineering, 32, p. 112-125.
71. Doymaz, I. (2004). Effect of dipping treatment on air drying of plums. Journal of Food Engineering, 64(4), pp.465–470.
72. Doymaz, I. (2008). Influence of blanching and slice thickness on drying characteristics of leek slices. Chemical Engineering and Processing, 47, pp.41–47.
73. Doymaz, I., Altıner, P. (2012). Effect of pretreatment solution on drying and color characteristics of seedless grapes. Food Science and Biotechnology, 21(1), pp.43–49.
74. Doymaz, I., Demir, H., Yildirim, A. (2015). Drying of quince slices: effect of pretreatments on drying and rehydration characteristics. Chemical Engineering Communications, 202(10), pp.1271–1279.
75. Doymaz, I., Pala, M. (2002) . The effects of dipping pretreatments on air drying rates of the seedless grapes. Journal of Food Engineering, 52(4), pp.344.

76. Doymaz, Ibrahim. (2008). Convective drying kinetics of strawberry. Chemical Engineering and Processing, 47, 914-919.
77. Drouzas, A. E. and Schubert, H. (1996). Microwave application in vacuum drying of fruits. Journal of Food Engineering, 28,203–209.
78. Durance, T. D. and Wang J. H. (2002). Energy Consumption, Density, and Rehydration Rate of Vacuum Microwave- and Hot-Air Convection- Dehydrated Tomatoes. Journal of Food Science 67,2212–2216.
79. Đurić, B. (2003). Gajenje kajsije – drugo dopunjeno izdanje, Poljoprivredni fakultet, Univerzitet u Novom Sadu , Novi Sad, s. 209.
80. El-Aouar, A., A., Azoubel, P., M., Barbosa, J., L., Murr, F., E., X., M. (2006). Influenece of the Osmotic Agent on the Osmotic Dehydration of Papaya (*Carica papaya L*), Journal of Food Engineering, 75, p. 267-274.
81. Encinas, N., Abenojar, J., Martínez, M.A. (2012). Development of improved polypropylene adhesive bonding by abrasion and atmospheric plasma surface modifications. The International Journal of Adhesion and Adhesives, 33, 1–6.
82. Esmaiili, M., Sotudehgharebagh, R., Cronin, K., Mae, M., Rezazadeh, G. (2007). Grape drying: a review. Food Reviews International, 23(3), pp.257–280.
83. Falade, K.O., Shogaolu, O.T. (2009). Effect of pretreatments on air-drying pattern and color of dried pumpkin (*Cucurbita Maxima*) slices. Journal of Food Process Engineering, 33(6), pp.1129 – 1147.
84. Falade, O., K., Solademi, O., J. (2010). Modeling of Air Drying of Fresh and Blanched Sweet Potato Slices, Internatioal Journal of Food Science and Technology, 45, p. 278-288.
85. Fang, S., Wang, Z., Hu, X. (2009). Hot Air Drying of Whole Fruit Chinese Jujube (*Zizyphus jujuba Miller*): Thin-Layer Mathematical Modelling, International Journal of Food Science & Technology, 44, p. 1818 – 1824.
86. Fauster, T., Giancaterino, M., Pittia, P., Jaeger, H. (2020). Effect of pulsed electric field pretreatment on shrinkage, rehydration capacity and texture of freeze-dried plant materials. LWT, 121, 108937.
87. Fernandes F.A.N., Gallão M.I., Rodrigues S. (2008). Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment on cell structure: Melon dehydration. LWT – Food Science and Technology, 41, 604-610.
88. Fernandes, F.A.N., Linhares, F.E., Rodrigues, S. (2008a). Ultrasound as pre-treatment for drying of pineapple. Ultrasonics Sonochemistry, 15, pp.1049–1054.
89. Fernandez, C., M., O., Mazzanti, G., Le Maguer, M. (2004). Development of Methods to Classify Mass Transfer Behavior of Plant Tissues During Osmotic Dehydration, Food and Bioproducts Processing, 82(C1), p. 49-53.
90. Figura, L. O., Teixeira, A. A. (2007). Food physics: physical properties-measurement and application. New York: Springer.
91. Filho, L.M., Frascareli, E.C., Mauro, M.A. (2016). Effect of an edible pectin coating and blanching pretreatments on the air-drying kinetics of pumpkin (*Cucurbita moschata*). Food and Bioprocess Technology, 9(5), pp.859–871.
92. Fito, P. (1994). Modeling of Vacuum Osmotic Dehydration of Food, Journal of Food Engineering, 22, p. 313-328.
93. Fito, P., Chirlat, A., betoret, N., Gras, M., Chafer, M., Martinez-Monzo, J., Andres, A., Vidal, D. (2001). Vacuum Impregnation and Osmotic Dehydration in Matrix Engineering. Application in Functional Fresh Food Development. Journal of Food Engineering, 49, p. 175-183.
94. Francis, F. (1980). Colour quality evaluation of horticultural crops. Horticultural Science, 15 (1), 4–15.

95. Gabrić, D., Barba, F., Roohinejad, S., Gharibzahedi, S.M.T., Radojčin, M., Putnik, P., Bursać Kovačević, D. (2017). Pulsed electric fields as an alternative to thermal processing for preservation of nutritive and physicochemical properties of beverages: A review. Journal of Food Process Engineering, 41(1).
96. Gaffney, J., J., Baird, C., D., Eshleman, W., D. (1980). Review and Analysis of Transient Method for Determining Thermal Diffusivity of Fruits and Vegetables, ASHRAE Transaction, 86(2), p. 261-265.
97. Gamboa-Santos, Juliana, Megías-Pérez, R., Soria, Cristina , Olano, A., Montilla, A., Villamiel, M. (2014a). Imapct of processing conditions on the kinetic of vitamin C degradation and 2-furoylmethyl amino acid formation i dried strawberries. Food Chemistry, 153, 164-170.
98. Gamboa-Santos, Juliana, Montilla, Antonia, Andres carcel, J., Villamiel, M., Garcia-Perez, J.V. (2014a). Air-borne ultrasound application in the convective drying of strawberry, Journal of Food Engineering, 128, 132-139.
99. Gaukel, V., Siebert, T., Erle, U. (2017). Microwave-assisted drying. The Microwave Processing of Foods (Second Edition), Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, pp.152-178.
100. Gezer, I., Haciseferogullari, H., Demir, F. (2002). Some Physical Properties of Hacihaliloglu Apricot Pit and its Kernel. Journal of Food Engineering, 56, p. 49-57.
101. Glenn, G.M., Poovaiah. B.W. (1990). Calcium-mediated postharvest changes in texture and cell wall structure and composition in 'Golden Delicious' apples. Journal of the American Society for Horticultural Science, 115, 962-968.
102. Góngora-Nieto, M.M., Sepúlveda, D.R., Pedrow, P., Barbosa-Cánovas, G.V., Swanson, G.V. (2002). Food processing by pulsed electric fields: Treatment delivery, inactivation level, and regulatory aspects. Lebensmittel- Wissenschaft und Technologie Journal, 35(5), pp.375-388.
103. Granato, D., Masson, M. L. (2010). Instrumental color and sensory acceptance of soy-based emulsions: a response surface approach. Ciência e Tecnologia de Alimentos, 30 (4), 1090–1096.
104. Grossman, R. L., Wisenblit, J. Z. (1999). What we know about consumers' color choices. Journal of Marketing Practice: Applied Marketing Science, 5 (3), 78–88.
105. Guggenheim, E., A. (1966). Application of Statistical Mechanics. Clarendon pres Oxford, p. 186-206.
106. Guine, R., P., F. (2006a). Moisture Diffusivity in Pears: Experimental Determination and Derivation of Mathematical Prediction Model, International Journal of Food Science and technology, 41, p. 1177-1181.
107. Guine, R., P., F., Castro, J., A., A., M. (2002). Pear Drying Process Analysis Drying Rates and Evolution of Water and Sugar Concentrations in Space and Time, Drying Technology, 20(7), p. 1515-1526.
108. Guine, R., P., F., Ramos, M., A., Figueiredo, M. (2006b). Shrinkage Characteristics and Porosity of Pears During Drying. Drying Technology, 24, p. 1525-1530.
109. Gulati, T., Datta, A.K. (2015). Mechanistic understanding of case-hardening and texture development during drying of food materials. Journal of Food Engineerign, 166, 119–138.
110. Gvozdenović, D., Davidović, M. (1987). Berba čuvanje i pakovanje voća. Nolit, Beograd.
111. Hadžić, Olga, Takači, Đurđica (1998). Matematika, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, s. 212.
112. Halsey, G. (1948). Physical Adsorption on Non-Uniform Surfaces. Journal of Chemical Physics, 16, p. 931-937.
113. Hammami, C., René, F. (1997). Determination of freeze-drying process variables for strawberries. Journal of Food Engineering, 32, 133–154.

114. Hammami, C., Rene, F., Marin, M. (1999). Process-quality optimization of the vacuum freeze-drying of apple slices by the response surface method. International Journal of Food Science & Technology, 34, 145–160.
115. Harker, F.R., Redgwell, R.J., Hallett, I.C., Murray, S.H. (1997). Texture of fresh fruit. Horticultural Review, 20, 121-224.
116. Hatamipour, M., S., Mowla, D. (2002). Shrinkage of Carrots During Drying in an Inert Medium Fluidised Bed, Journal of Food Engineering, 55(3), p. 247-252.
117. Heldman, D., R. (2002). Prediction Models for Thermophysical Properties of Foods, Food Processing Operations Modeling Design and Analysis, Irudayaraj, J (Ed.) Marcel Dekker Inc, New York, p. 302.
118. Heldman, D., R., Singh, R., P. (1981). Food Process Engineering, 2nd ed., Van Nostrand Reinhold, New York, p. 205.
119. Henderson, S., M., (1961) A Basic Concept of Equilibrium Moisture, Agricultural Engineering, 33, p. 29-31.
120. Henderson, S., M., (1974). Progress in Developing the Thin-Layer Drying Equation. Transactions of ASAE, 17, p. 1167-1168/1172.
121. Henderson, S., M., Perry, R., L. (1976). Agricultural Process Engineering, Connecticut: AVI Publishing Co., Inc, p. 302-339.
122. Herbig, A., Renard, C. (2017). Factors that impact the stability of vitamin C at intermediate temperatures in a food matrix. Food Chemistry, 220, 444-451.
123. Hiranvarachat, B., Devahastin, D., Chiewchan, N. (2011). Effects of acid pretreatments on some physicochemical properties of carrot undergoing hot air drying. Food and Bioproducts Processing 89(2), pp.116–127.
124. Ho, S.Y., Mittal, G.S. (1996). Electroporation of cell membranes: a review. Critical Reviews in Biotechnology, 16, pp.349-362.
125. Hottot, A., Vessot, S., Andrieu, J. (2007). Freeze drying of pharmaceuticals in vials: Influence of freezing protocol and sample configuration on ice morphology and freeze-dried cake texture. Chemical Engineering Processes,46, pp. 666–674.
126. Hunter, R. S., Harold, R. W. (1987). The measurement of appearance. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience.
127. Iglesias, H., A., Chirife, J. (1982). Handbook of Food Isotherms. New York: Academic Press, p. 347.
128. Ihns, R., Diamante, L., M., Savage, G., P., Vanhanen, L. (2011). Effect of Temperature on the Drying Characteristics, Color, Antioxidant and Beta-Carotene Contents of Two Apricot Varieties, International Journal of Food Science and Technology, 46, p. 275-283.
129. Internet stranica: http://www.yellowtang.org/cells.php
130. Iwaniw, D.C.; Mittal, G.S. (1990). Process optimization of freeze-dried strawberries. Canadian Agricultural Engineering, 32, 323–328.
131. Jančić, R. (2004). Botanika farmaceutika, dugo dopunjeno izdanje, Javno preduzeće Službeni list SCG, Beograd. s. 272.
132. Jangam, S., V., Law, L., C.; Mujumdar, A., S. (2010): Drying of Foods, Vegetables and Fruits – Volume 1, ISBN 978-981-08-6759-1, Published in Singapore, str. 228.
133. Janick, J., Paull, E., R. (2008). The Encyclopedia of Fruit & Nuts, CAB international, Oxfordshire, UK.
134. Kaleta, Agnieszka, Gornicki, K. (2010). Evaluation of Drying Models of Apple (*Var. Mclntosh*) Dried in a Convective Dryer. International Journal of Food Science & Technology, 45, p. 891-898.
135. Kamiloglu, S., Toydemir, G., Boyacioglu, D., Beekwilder, J., Hall, R.D., Capanoglu, E. (2015). A review on the effect of drying on antioxidant potential of fruits and vegetables. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 56, S110–S129.

136. Kamish, F., Karatas, F. (2009). Effects of Sulphurisation on Vitamins (A, C and E) and Malondialdehyde in Apricots, International Journal of Food Science and Technology, 44, p. 987-993.
137. Kanevče, G. (1998). Numerical Study of Drying, Proceedings of the 11th International Drying Symposium (IDS 98), p. 256-263, Halkidiki, Greece, August 19-22.
138. Kanevče, G., (1981). Nestacionarni prenos energije i materije u koloidno-kapilarnoporoznim materijalima. Doktorska disertacija. Tehnološki fakultet, Novi Sad, Srbija. s. 160.
139. Karaaslan, S., Ekinci, K., Akbolat, D. (2017). Drying characteristics of sultana grape fruit in microwave dryer. Infrastructure And Ecology Of Rural Areas, 4(1), pp.1317-1326.
140. Karabulut, I., Topcu, A., Duran, A., Turan, S., Ozturk, B. (2007). Effect of hot air drying and sun drying on color values and b-carotene content of apricot (*Prunus armenica, L.*). LWT – Food Science and Technology, 40(5), pp.753–758.
141. Karathanos, V., T. (1999). Determination of Water Content of Dried Fruits by Drying Kinetics, Journal of Food Engineering, 39, p. 337-344.
142. Kassem, A., S. (1998). Comparative Studies on Thin Layer Drying Models for Wheat, In: 13 th International Congress on Agricultural Engineering, vol. 6, Marocco, February 2-6.
143. Kastori, R. (1998). Fiziologija biljaka, Feljton, Novi Sad. s. 527.
144. Katić, Z. (1997). Sušenje i sušare u poljoprivredi. Multigaf, d.o.o., Zagreb, R. Hrvatska, s. 406.
145. Kayalvizhi, V., Pushpa, A.J.S., Sangeetha, G., Antony, U. (2016). Effect of pulsed electric field (PEF) treatment on sugarcane juice. Journal of Food Science and Technology, 53, pp.1371–1379.
146. Kešelj, K., , Babić M., Pavkov, I., Radojčin, M., Stamenković, Z., Tekić, D., Ivanišević, M. (2019). Effects of storage and sulfurization with sulfur dioxide of different concentration on changes in the color of dried apricots. Journal on Processing and Energy in Agriculture 23(4), pp.190-194.
147. Kešelj, K., Pavkov, I., Radojčin, M., Stamenković, Z. (2017). Comparison of energy consumption in the convective and freeze drying of raspberries. Journal on Processing and Energy in Agriculture, 21(4), pp. 192-196.
148. Kešelj, K., Pavkov, I., Radojčin, M., Stamenković, Z., Ivanišević, M. (2022). Matematičko modelovanje kinetike sušenja zamrzavanjem američke visokožbunaste borovnice. Zbornik radova XXXIV Nacionalna konferencija sa međunarodnim učešćem procesna tehnika i energetika u poljoprivredi - PTEP 2022, 03-08. april 2022, Sokobanja, hotel „Moravica“, Srbija, 21-27.
149. Khoyi, M., R., Hesari, J. (2007). Osmotic Dehydration Kinetics of Apricot Using Sucrose Solution, Journal of Food Engineering, 78, p. 1355-1360.
150. Kingsly, R., P., Goyal, R., K., Manikantan, M., R., Ilyas, S., M. (2007). Efects of Pretreatments and Drying Air Temperature on Drying Behaviour of Peach Slice, International Journal of Food Science and Technology, 42, p. 65 -69.
151. Koc, B., Eren, I. And Ertekin, F.K. (2008). Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: The effect of drying method. Journal of Food Engineering, 85, 340–349.
152. Kojić M., Pekić, Sofija (1998). Botanika, Izdavačko preduzeće „Nauka“, Beograd. s. 523.
153. Korsrilabut, J., Borompichaichartkul, C., Duangmal, K. (2010). Effect of Invert Sugar on the Drying Kinetics and Water Mobility of Osmosed-Air Dried Cantalupe, International Journal of Food Science and Technology, 45, p. 1524-1531.
154. Kotnik, T., Frey, W., Sack, M., Meglič, S.H., Peterka, M., Miklavčič, D. (2015). Electroporation-based applications in biotechnology. Trends in Biotechnology, 33, pp.480–488.

155. Kowalski, J.,S.; Pawlowski, A., Szadzinska, J., Lechtanska, :, Stasiak, M. (2016). High power airborne ultrasound assist in combined drying of raspberries. Innovative Food Science and Emerging Technologies. 34, 225-233.
156. Krokida, M. K., Karathanos, V. T., Maroulis, Z. B. (2000). Compression analysis of dehydrated agricultural products. Drying Technology, 18 (1–2), 395–408.
157. Krokida, M., K., Maroulis, Z., B. (1997). Effect of Drying Method on Shrinkage and Porosity, Drying Tecnology, 15(10), p. 2441-2458.
158. Krokida, M.K., Maroulis, Z.B. And Marinos-Kouris, D. (1998). Effect of drying method on physical properties of dehydrated products. In Proceedings of the 11th International Drying Symposium (IDS'98), Halkidiki, Greece.
159. Krokida, M.K., Maroulis, Z.B. Saravacos, G.D. (2001). The effect of the method of drying on the colour of dehydrated products. International Journal of Food Science and Technology, 36(1), pp.53-59.
160. Lachowicz, S., Michalska, A., Lech, K., Majerska, J., Oszmianski, J., Figiel, A. (2019). Comparison of the effect of four drying methods on polyphenols in saskatoon berry. LWT Food and Science Technology, 2019, 111, pp.727–736.
161. Laguerre, J.-C., Hamoud-Agha, M.M. (2019). Microwave heating for food preservation. In Food Preservation and Waste Exploitation; Socaci, S.A., Farca¸s, A.C., Aussenac, T., Laguerre, J.C., Eds.; IntechOpen: London, UK.
162. Lammerskitten, A., Mykhailyk, V., Wiktor, A., Toepfl, S., Nowacka, M., Bialik, M., Czyzewski, J., Witrowa-Rajchert, D., Parniakov, O. (2019a). Impact of pulsed electric fields on physical properties of freeze-dried apple tissue. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 57, 57.
163. Lammerskitten, A., Wiktor, A., Mykhailyk, V., Samborska, K., Gondek, E., Witrowa-Rajchert, D., Toepfl, S., Parniakov, O. (2020). Pulsed electric field pre-treatment improves microstructure and crunchiness of freeze-dried plant materials: Case of strawberry. Lebensmittel- Wissenschaft und Technologie Journal , 134, 110266.
164. Lammerskitten, A., Wiktor, A., Siemer, C., Toepfl, S., Mykhailyk, V., Gondek, E., Rybak, K., Witrowa-Rajchert, D., Parniakov, O. (2019b). The effects of pulsed electric fields on the quality parameters of freeze-dried apples. Journal of Food Engineering, 252, 36–43.
165. Lee, H. S. (2000). Objective measurement of red grapefruit juice color. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 48 (5), 1507–1511.
166. Leon, K., Mery, D., Pedreschi, F., Leon, J. (2006). Color measurement in L* a* b* units from RGB digital images. Food Research International, 39 (10), 1084–1091.
167. Lerici, C., L., Pinnavaia, G., Dalla Rosa, M., Bartolucci, L. (1985). Osmotic Dehydration of Fruit: Influence of Osmotic Agents on Drying Behaviour and Product Quality, Journal of Food Science, 50, p. 1217-1226.
168. Lewicki, P. P, Jakubczyk, Ewa (2004). Effect of Hot Air Temperature on Mechanical Properties of Dried Apples, Journal of Food Engineering, 64, p. 307–314.
169. Lewicki, P., P. (1998). A Three Parameter Equation for Food Moisture Sorption Isotherms, Journal of Food Engineering, 21, p. 127-144.
170. Lewicki, P., P. (2000). Raoults Law Based Food Water Sorption Isotherm, Journal of Food Engineering, 43, p. 31-40.
171. Lewicki, P.P. (1998). Effect of pre-drying treatment, drying and rehydration on plant tissue properties: A review. International Journal of Food Properties, 1(1), pp.1–22.
172. Lewicki, P.P., Pawlak, G. (2003). Effect of drying on microstructure of plant tissue. Drying Technology, 21(4), 657–683.
173. Lewis, W., K. (1921). The Rate of Drying of Solid Materials, Industrial Engineering Chemistry, 13, p. 427-432.

174. Liang, X., Zhang, Y., Gek, X. (1999). The Measurment of Thermal Conductivities of Solid Fruits and Vegetables, Measurment Science and Technology, 10, p. 82-86.
175. Likov, A., V. (1965). Application of Irreversible Thermodynamics Methods to Investigation of Heat and Mass Transfer, International Journal of Heat and Mass Transfer, 9, p. 139-152.
176. Likov, A., V. (1968). Teorija suški, Moskva.
177. Likov, A., V., Mikhailov, Y., A. (1965). Theory of Energy and Mass Transfer, Pergamon Press, New York.
178. Liu, C., Pirozzi, A., Ferrari, G., Vorobiev, E., Grimi, N. (2019). Effects of pulsed electric fields on vacuum drying and quality characteristics of dried carrot. Food and Bioprocess Technology, 13, 45–52.
179. Liu, Y., Sun, Y., Yu, H., Yin, Y., Li, X., Duan, X. (2016). Hot air drying of purple-fleshed sweet potato with contact ultrasound assistance. Drying Technology, 35, pp.564–576.
180. López, Jessica, Uribe, Elsa, Vega-Gálvez, A., Miranda, Margarita, Vergara, Judith, Gonzalez, E., Di Scala, Karina. (2010). Effect of Air Temperature on Drying Kinetics, Vitamin C, Antioxidant Activity, Total Phenolic Content, Non-enzymatic Browning and Firmness of Blueberries Variety O´Neil. Food Bioprocess Technol, 3, 772-777.
181. Lozano, J.E., Rotstein, E., Urbicain, M.J. (1983). Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture contents. Journal of Food Science, 48, 1497–1502.
182. Lučić, P, Đurić, Gordana, Milić, N. (1996). Voćarstvo I, Institut za istraživanja u poljoprivredi Srbija, Subotica, s. 529.
183. Lutovska, M., Mitrevski, V., Pavkov, I., Babić, M., Mijakovski, V., Geramitcioski, T., Stamenković, Z. (2017). Different Methods of Equilibrium Moisture Content Determination. Journal on Processing and Energy in Agriculture, 21, 2, 91-96.
184. Magalhães, M.L., Cartaxo, S.J.M., Gallão, M.I., García-Pérez, J.V., Cárcel, J.A., Rodrigues, S., Fernandes, F.A.N. (2017). Drying intensification combining ultrasound pre-treatment and ultrasound-assisted air drying. Journal Food Engineering 215, pp.72–77.
185. Maskan M. (2000). Microwave/air and microwave finish drying of banana. Journal of Food Engineering, 44, pp.71-78.
186. Maskan, M. (2001). Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. Journal of Food Engineering, 48, pp.169-175.
187. Mattea, M., Urbicain, M., J., Rotstein, E. (1989). Effective Thermal Conductivity of Cellular Tissues During Drying: Prediction by a Computer Assisted Model, Journal of Food Science, 54(1), p. 194-197.
188. Mattea, M., Urbicain, M., J., Rotstein, E. (1986). Prediction of Thermal Conductivity of Vegetables Foods by the Effective Medium Theory, Journal of Food Science, 51(1), p. 113-117.
189. Mayor, L, Sereno, A., M. (2004). Modeling Shrinkage During Convective Drying of Food Materials: a Review, Journal of Food Engineering, 61, p. 373–386.
190. Mayor, L., Cunha, R.L., Sereno, A.M. (2007). Relation between mechanical properties and structural changes during osmotic dehydration of pumpkin, Food Research International, 40 (4), 448-460.
191. Mayor, L., Moreira, R., Chenlo, F., Sereno , A. M. (2006b). Kinetics of osmotic dehydration of pumpkin with sodium chloride solutions. Journal of Food Engineering , 74 (2), 253-262.
192. Mayor, L., Moreira, R., Sereno , A. M. (2011). Shrinkage, density, porosity and shape changes during dehydration of pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) fruits. Journal of Food Engineering , 103 (1), 29-37.

193. Mayor, L.L. (2006a). Characterization and modelling of structural changes in fruits and vegetable tissue submitted to dehydration processes. Phd Thesis, Department of Chemical Engineering of the University of Porto, Portugal.
194. Meléndez-Martínez, A., Vicario, I., Heredia, F. (2005). Instrumental measurement of orange juice colour: a review. Journal of the Science of Food and Agriculture, 85 (6), 894–901.
195. Miano, A.C., Ibarz, A., Augusto, P.E.D. (2016). Mechanisms for improving mass transfer in food with ultrasound technology: Describing the phenomena in two model cases. Ultrasonics Sonochemistry, 29, pp.413–419.
196. Midilli, A., Kucuk, H., Yapar, Z. (2002). A New Model for Single Layer Drying, Drying Technology, 20, p. 1503-1513.
197. Milić, D., Radojević, V. (2003). Proizvodno – ekonomska i upotrebna vrednost voća i grožđa, Autori, Novi Sad. s. 200.
198. Mitrevski, V. (2005). Istražuvanje na procesite na sušenje so primena na inverznata postapka, Doktorska disertacija. Tehnički fakultet, Bitola, BJR Makedonija. s. 172.
199. Mitrevski, V., Lutovska, M., Mijakovski, V., Pavkov, I., Babić, M., Radojčin, M. (2015). Adsorption ishoterms of Pear at Several Temperatures. Thermal Science, 19, 3, 1119-1129.
200. Mitrevski, V., Lutovska, M., Pavkov, I., Mijakovski, V., Popovski, F. (2016). The Power Series as Water Sorption Isotherm Models. Journal of Food Process Enginering, 39, 178-185.
201. Mitrevski, V., Mitrevska, C., Mijakovski, V., Pavkov, I., Geramitcioski, T. (2017). Mathematical Modeling of the Sorption Isohterms of Quince. Thermal Science, 21, 5, 1965-1973.
202. Mohammed, S., Edna, M., Siraj, K. (2020). The effect of traditional and improved solar drying methods on the sensory quality and nutritional composition of fruits: A case of mangoes and pineapples. Heliyon, 6, e04163.
203. Mohsenin, N., N. (1980). Physical Properties of Plant and Animal Materials, Gordon and Breach, Science Publishers, Inc, New York, America. p. 742.
204. Morais, R.M.S.C., Morais, A.M.M.B., Dammak, I., Bonilla, J., Sobral, P.J.A., Laguerre, J.C., Afonso, M.J., Ramalhosa, E.C.D. (2018). Functional dehydrated foods for health preservation. Journal of Food Quality, 2018, pp.1–29.
205. Moreira, Azoubel, Patricia, El-Aouar, A., A., Valeriano, Tonon, Renata, Emy, Kurozawa, Emy, Louise, Colato, Antonio, Graziella, Xidieh, Murr, Fernanda, Elizabeth, Park, K., J. (2009). Effect of Osmotic Dehydration on the Drying Kinetics and Quality of Cashew Apple. International Journal of Food Science and Technology, 44, p. 980-986.
206. Moreira, R., Figueiredo, A., Sereno, A. (2000). Shrinkage of Apple Disk During Drying by Warm Air Convection and Freze Drying, Drying Technology, 18(1-2), p. 279-294.
207. Mujica-Paz, H., Valdez-Fragoso, A., Lopez-Malo, A., Palou, E., Welti-Chanes, J. (2003). Impregnation Properties of Some Fruits at Vacuum Pressure. Journal of Food Engineering, 56, p. 307-314.
208. Mulet, A., Garcia-Reverter, J., Bon, J., Berna, A. (2000). Effect of shape on potato and cauliflower shrinkage during drying. Drying Technology, 18 (6), 1201-1219.
209. Munzenmayer, P., Ulloa, J., Pinto, M., Ramirez, C., Valencia, P., Simpson, R., Almonacid, S. (2020). Freeze-drying of blueberries: Effects of carbon dioxide (CO_2) laser perforation as skin pretreatment to improve mass transfer, primary drying time, and quality. Foods, 9, 211.
210. Musielak, G., Mierzwa, D., Kroehnke, J. (2016). Food drying enhancement by ultrasound–A review. Trends in Food Science & Technology, 56, pp.126–141.

211. Nedeljkov, M. (1981). Istraživanje kinetike procesa konvektivnog sušenja kukuruza u elementarnom sloju, Magistarski rad, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, s. 130.
212. Nemzer, B., Vargas, L., Xia, X., Sintara, M., Feng, H. (2018). Phytochemical and physical properties of blueberries, tart cherries, strawberries, and cranberries as affected by different drying methods. Food Chemistry, 262, 242–250 .
213. Niemira, B.A. (2012). Cold plasma decontamination of foods. The Annual Review of Food Science and Technology, 3, pp.125–142.
214. Niesteruk, R. (1996). Changes of Thermal Properties of Fruits and Vegetables During Drying, Drying Technology, 14, p. 415-419.
215. Niketić-Aleksić, Gordana (1988). Tehnologija voća i povrća, Poljoprivredni fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, s. 398.
216. Norrish, R., S. (1966). An Equation for the Activity Coefficients and Equilibrium Relative Humidities of Water in Confectionery Syrups, Journal of Food Technology, 1, p. 25-39.
217. Nowacka, M., Wedzik, M. (2016). Effect of ultrasound treatment on microstructure, colour and carotenoid content in fresh and dried carrot tissue. Applied Acoustics, 103, pp.163–171.
218. Nowacka, M., Wiktor, A., Sledz, M., Jurek, N., Witrowa-Rajchert, D. (2012). Drying of ultrasound pretreated apple and its selected physical properties. Journal Food Engineering 113, pp.427–433.
219. Nowak, D., Jakubczyk. E. (2020). The Freeze-Drying of Foods—The Characteristic of the Process Course and the Effect of Its Parameters on the Physical Properties of Food Materials. Foods, 9(10), pp. 1488.
220. Nowak, D., Lewicki, P.P. (2005). Quality of infrared dried apple slices. Drying technology, 23, 831–846.
221. Onwude, D.I.; Hashim, N.; Chen, G. (2016). Recent advances of novel thermal combined hot air drying of agricultural crops. Trends in Food Science & Technology. 57, 132–145
222. Ordinanz, W., O. (1996). Specific Heat of Foods in Cooling, Food Inndustry, 18, p. 101-104.
223. Orikasa, T.; Koide, S.; Okamoto, S.; Imaizumi, T.; Muramatsu, Y.; Takeda, J.; Shiina, T.; Tagawa, A. Impacts of hot air and vacuum drying on the quality attributes of kiwifruit slices. J. Food Eng. 2014, 125, 51–58.
224. Orsat, V., Changrue, V., Vijaya Raghavan, G.S. (2006). Microwave drying of fruits and vegetables. Stewart Postharvest Review, 6(4).
225. Ostermeier, R., Parniakov, O., Töpfl, S., Jäger, H. (2020). Applicability of pulsed electric field (PEF) pre-treatment for a convective two-step drying process. Foods, 9, 512.
226. Overhults, D., G., White, H., E., Hamilton, H., E., Ross, I., J. (1973). Drying Soybean With Heated Air, Transactions of ASAE, 16, p. 112-113.
227. Page, G., E. (1949). Factors Influencing the Maximum Rates of Air Drying Shelled Corn in Thin Layers, MSc Theis, Prude University, p. 185.
228. Panagiotou, N., M., Karathanos, V., T., Maroulis, Z., B. (1998). Mass Transfer Modeling of the Osmotic Dehydration of Some Fruits, International Journal of Food Science and Technology, 33, p. 267-284.
229. Pankaj, S.K., Bueno-Ferrer, C., Misra, N.N., Milosavljević, V., O'Donnell, C.P., Bourke, P., Keener, K.M., Cullen, P.J. (2014). Applications of cold plasma technology in food packaging. Trends in Food Science & Technology, 35, pp.5–17.
230. Pantelić, I. (1984). Primena statističkih metoda u istraživanjima i procesima proizvodnje, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, s. 532.
231. Parit, R.H., Prabhu, C.S. (2017). Microwave Fruit and Vegetables Drying. International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology, 4, Special Issue 2, pp.82-84.

232. Park, C., Lee, K. (1975). A study on influence of drying methods upon the chemical changes in red pepper: Part 2. Changes of free amino acid, free sugar. Korean Journal of Nutrition, 8, 33–37.
233. Park, K., J., Bin, Adriana, Brod, F., P., R. (2002a). Drying of Pear dAnjou With and Without Osmotic Dehydration, Journal of Food Engineering, 56, p. 97-103.
234. Park, K., J., Bin, Adriana, Brod, F., P., R., Park, Tatiane, H., K., B. (2002b). Osmotic Dehydration Kinetics of Pear Danjou (*Pyrus communis L.*), Journal of Food Engineering, 52, p. 293-298.
235. Pathare P.B., Opara, U.L., Fahad, J.S. (2013). Colour Measurement and Analysis in Fresh and Processed Foods: A Review. Food and Bioprocess Technology, 6, 36–60.
236. Patras, A., Brunton, N. P., Tiwari, B., Butler, F. (2011). Stability and degradation kinetics of bioactive compounds and colour in strawberry jam during storage. Food and Bioprocess Technology, 4, 1245–1252.
237. Pavkov, I., (2007). Kinetika osmotskog sušenja kajsije, Magistarska teza, Poljoprivredni fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, s. 103.
238. Pavkov, I., Babić M., Babić, Ljiljana, Radojčin, M., Stojanović, Č. (2010). Effects of Osmotic Dehydration Factors on Convective Drying Kinetics of Pears Slices (*Pyrus Communis L.*), Journal on Processing and Energy in Agriculture, 14(3), p. 125-130.
239. Pavkov, I., Babić, Ljiljana, Babić, M. (2005). Difuzioni i toplotni procesi osmotskog sušenja voća, PTEP – Časopis za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi, Novi Sad, 9(5), s. 137 – 139.
240. Pavkov, I., Babić, Ljiljana, Babić, M. (2007). Matematički model kinetike osmotskog sušenja kajsije, PTEP – Časopis za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi, Novi Sad, 11(3), s. 98 – 101.
241. Pavkov, I., Babić, Ljiljana, Babić, M., Radojčin M. (2008). Promene fizičkih osobina jabuke tokom kombinovane tehnologije sušenja, PTEP - Časopis za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi, 12(3), s. 127-131.
242. Pavkov, I., Babić, Ljiljana, Babić, M., Radojčin M. (2009). Osmotic Drying of Apricot (*Prunus armeniaca*) in Sucrose Solution, Agriculturae Conspectus Scientificus, 74 (3), p. 253-257.
243. Pavkov, I., Babić, Ljiljana, Babić, M., Radojčin, M.(2009). Kinetics of the Combined Drying Technology of Pear Slice (Pyrus), PTEP - Časopis za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi, 13 (2), p. 111-116.
244. Pavkov, I., Radojčin, M., Stamenković, Z., Krstan, K., Bikić, S., Mitrevski, V., Ponjičan, O. (2017a). Convective Drying of Blueberries: Effect of Experimental Parameters on Drying Kinetics and Mathematical Modeling. Proceedings. The Third International Symposium on Agricultural Engineering, 20th-21st October 2017, Belgrade–Zemun, Serbia. str. I1-I10.
245. Pavkov, I., Stamenković, Z., Radojčin, M., Kešelj, K., Bikić S., (2019). Air drying of blueberry fruits: drying kinetics, mathematical modeling and physical properties. Journal on Processing and Energy in Agriculture 23(4), pp.151-157.
246. Pavkov, I., Stamenković, Z., Radojčin, M., Krstan, K., Bikić, S., Lutovska, M. (2018a). Mathematical Modeling of Air Draying Strawbery with Osmotic Prettreatment. Proceedings, 9th International congres of Food Technologists, Biotechnologists and Nutritionists, 3-5. oktobar 2018, Hotel Interkontinental, Zagreb, Republika Hrvatska, str. 12-15.
247. Pavkov, I., Stamenković, Z., Radojčin, M., Krstan, K., Bursić, V., Bikić, S., & Mitrevski, V. (2018b). Osmotsko i konvektivno sušenje jagode - uticaj eksperimentalnih parametara

na kinetiku sušenja, boju i rehidrataciju. Journal on Processing and Energy in Agriculture, 22(2), 58-64.
248. Pavkov, Ivan; Stamenković, Zoran; Radojčin, Milivoj; Babić, Mirko; Bikić, Siniša; Mitrevski, Vangelče; Lutovski, Monika., (2017b) Convective and Freeze Drying of Raspberry: Effect of Experimental Parameters on Drying Kinetics, Physical Properties and Rehydration Capacity. Proceedings of Fifth Intenational Conference Sustainable Postharvest and Food Technologies - INOPTEP 2017, pp. 261-267.
249. Peleg, M. (1988). An Empirical-Mmodel for the Description Moisture Sorption Curves. Journal of Food Science, 53(4), p. 1216-1219.
250. Peleg, M. (1993). Assessment of a Semi Empirical Four Parameter General Model for Sigmoid Moisture Sorption Isotherms, Journal of Food Process Engineering, 16, p. 21-37.
251. Perez, N., E., Schmalko, M., E. (2009). Convective Drying of Pumpkin: Influence of Pretreatmnet and Drying Temperature, Journal of Food Process Engineering, 32, p. 88-103.
252. Phomkong, W., Szednicki, G., Driscoll, R. H. (2006). Thermo-Physical Properties of Stone fruit, Drying Technology, 24, p. 195-200.
253. Piotrowski, D., lenart, A., Wardzynski, A. (2004). Influence of osmotic dehydration on microwave-convective drying of frozen strawberries. Journal of Food Engineering, 65, 519-525.
254. Ponting, J. D., Watters, G. G., Forrey, R. R., Jackson, R., Stanley, W. L. (1966). Osmotic Dehydration of Fruits. Food Technology, 20. p. 125-128.
255. Ponting, J., D. (1973). Osmotic Dehydration of Fruits – Recent Modifications and Applications, Process Biochemistry, 8, p. 18-20.
256. Pott, I., Neidhart, S., Muhlbauer, W., Carle, R. (2005). Quality improvement of non-sulphited mango slices by drying at high temperatures. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 6 (4), 412–419.
257. Prabhanjan, D.G., Ramaswamy, H.S., Raghavan, G.S.V. (1995). Microwave assisted convective air drying of thin layer carrots. Journal of Food Engineering, 25, pp.283-293.
258. Prinzivalli, C., Brambilla, A., Maffi, D., Lo Scalzo, R., Torreggiani, D. (2006) Effect of osmosis time on structure, texture and pectic composition of strawberry tissue. European Food Research and Technology, 224, 119–127.
259. Priručnik za industriju šećera, Prva knjiga, Poslovna zajednica Jugoslavije, Beograd, 1980.
260. Radojčin, M. (2015). Uticaj osmotskog i konvektivnog sušenja na fizičke osobine dunje (Cydonia oblonga Mill.). Poljoprivredni fakultet Novi Sad.
261. Radojčin, M., Babić, M., Babić, Ljiljana, Pavkov, I., Stojanović, Č. (2010). Color Parameters Change of Quince During Combined Drying, Journal on Processing and Energy in Agriculture, 14(2), p. 81-84.
262. Radojčin, M., Pavkov, I., Bursać Kovačević, D., Putnik, P., Wiktor, A., Stamenković, Z., Kešelj, K., Gere, A. (2021). Effect of Selected Drying Methods and Emerging Drying Intensification Technologies on the Quality of Dried Fruit: A Review. Processes, 9(1), 132.
263. Raghavan, G., S., V., Venkatachalapathy, K. (1999). Shrinkage of Strawberries During Microwave Drying. Drying Technology, 17 (10), p. 2309-2321.
264. Rahman, M., S. (1995). Food Properties Handbook, CRC Press, Taylor & Francis Group, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, p. 1-86.
265. Rahman, M., S. (2009). Food Properties Handbook (Second Edition), Taylor & Francis Group, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, p. 861.
266. Rahman, S.M., Mujumdar, A.S. (2007). Effect of osmotic treatment with concentrated sugar and salt solutions on kinetics and color in vacuum contact drying, Journal of Food Processing and Preservation, 31 (6), 671-687.

267. Ramaswamy, H., S., Driscoll, R.. H. (1981). Thermo physical Properties of Apple in Relation to Freezing, Journal of Food Science, 46, p. 724-729.
268. Ramos, I., N., Brando, T., R., S., Silva, C., L., M. (2003). Structural Changes During Air Drying of Fruits and Vegetables, Food Science Technology International, 9(3) p. 201-206.
269. Rao, V.N.M., Quintero, X. (2005). Rheological properties of solid foods. In M.A. Rao, S.S.H. Rizvi, A.K. Datta (Eds.), Engineering Properties of Foods (3rd. Ed.). Taylor and Francis Group: Boca Raton, US.
270. Rastogi, N. K., Eshtiaghi, M. N., and Knorr, D. (1999). Accelerated mass transfer during osmotic dehydration of high intensity electrical field pulse pretreated carrots. Journal of Food Science, 64, pp.1020-1023.
271. Rastogi, N., K., Angersbach A., Knorr, D. (2000). Evalution of Mass Transfer Mechanisms During Osmotic Treatment of Plant Materials. Journal of Food Science, 65, p. 1016-1021.
272. Ratti, C. (2013). Freeze drying for food powder production, In Handbook of Food Powders: Processes and Properties;Woodhead, Publishing: Cambridge, UK, pp. 57–84.
273. Ratti, Cristina, Arun S. Mujumdar (2005). Draying of Fruits, Processing Fruits, CRC press LLC, p. 562.
274. Redgwell, R.J., MacRae, E., Hallett, I., Fischer, M., Perry, J., Harker, R. (1997). In vivo and in vitro swelling of cell walls during fruit ripening. Planta 203, 162-173.
275. Reppa, A., Mandala, J., Kostaropoulos, E., Saravacos, D. (1998). Influence of Solution Temperature and Concentration on the Combined Osmotic and Air Drying, Proceedings of the 11th International Drying Symposium (IDS'98), Volume A, Thessaloniki, Greece, p. 860-867.
276. Riva, M., Campolongo, S., Leva, A., A., Maestrelli, A., Torreggiani, D. (2005). Structure-Property Relationships in Osmo-Air-Dehydrated Apricot Cubes, Food Research International, 38, p. 533-542.
277. Rodrigues, A.C.C., Cunha, R.L., Hubinger, M.D. (2003). Rheological properties and colour evaluation of papaya during osmotic dehydration processing. Journal of Food Engineering, 59, 129-135.
278. Rossello, C., Simal, S., SanJuan, N., Mulet, A. (1997). Nonisotropic mass transfer model for green bean drying. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 45, 337-342.
279. Rother, M., Steimle, P., Gaukel, V., Schuchmann, H.V. (2011). How to meet the freeze drying standard in combined drying processes: pre and finish drying of carrot dice. Drying Technology, 29, pp.266–277.
280. Sacchetti, G, Gianotti, A, Dalla, Rosa, M. (2001) Sucrose – Salt Combined Effects on Mass Transfer Kinetics and Product Acceptability. Study on Apple Osmotic Treatments, Journal of Food Engineering 49, p. 163 – 173.
281. Sagar, V.R.; Kumar, P.S. (2010). Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: A review. Journal of Food Science and Technology, 47, 15–26.
282. Salengke, S., Sastry, S.K. (2005). Effect of ohmic pretreatment on the drying rate of grapes and adsorption isotherm of raisins. Drying Technology, 23(3), pp.551–564.
283. Sankat, C.K.; Castaigne, F.; Maharaj, R. The Air Drying Behaviour of Fresh and Osmotically Dehydrated Banana Slices. Int. J. Food Sci. Technol. **1996**, 3, 123–135.
284. Sankat, K., C., Castaigne, F., Maharaj, R. (1996). The Air Drying Behaviour of Fresh and Osmotically Dehydrated Banana Slices, International Journal of Food Science and Technology, 3, p. 123-135.
285. Saputra, D. (2001). Osmotic Dehidration of Pinepple, Drying Technology, 19(2), p. 415-425.
286. Saravacoos, G., D, Charm, S., E. (1962). A Study of the Mechanism of Fruit and Vegetable Dehydration, Food Technology, 16, p. 78 -81.

287. Sardi Horticulture, (2001). Sauth Research and Development Institute, Urrbrea, Australia, p. 154.
288. Schuchmann, H., Roy, I., Peleg, M. (1990). Empirical Models for Moisture Sorption Isotherms at Very High Water Activities, Journal of Food Science, 55, p. 759-762.
289. Scott, V., N., Bernard, D., T. (1983). Influence of Temperature on the Measurment of Water Activity of Food and Salt Systems, Journal of Food Science, 48, p. 552-554.
290. Sette, P., Salvatori, D., Schebor, C. (2016). Physical and mechanical properties of raspberries subjected to osmotic dehydration and further dehydration by air- and freeze-drying. Food and Bioproducts Processing, 100, pp.156–171.
291. Sham, P.W.Y.,. Scaman, C.H., Durance, T.D. (2001). Texture of vacuum microwave dehydrated apple chips as affected by calcium pretreatment, vacuum level, and apple variety. Journal of Food Science, 66,1341–1347.
292. Sharma, G.P., Prasad, S. (2006). Optimization of process parameters for microwave drying of garlic cloves. Journal of food engineering, 75(4), pp.441–446.
293. Shewfelt, R. (1993). Measuring quality and maturity. In R. L. Shewfelt & S. E. Prussia (Eds.), Postharvest handling: a systems approach (pp. 99–124). San Diego: Academic.
294. Shi, J., Maguer, M., L. (2002). Osmotic Dehydration of Foods: Mass Transfer and Modeling Aspects, Food Reviews International, 18 (4), p. 305-335.
295. Silva-Espinoza, M.A., Ayed, C., Foster, T., Camacho, M.D.M., Martinez-Navarrete, N. (2019). The impact of freeze-drying conditions on the physico-chemical properties and bioactive compounds of a freeze-dried orange puree. Foods, 9, 32.
296. Simal, S., Femenia, A., Garau, M., C., Rossello, C. (2005). Use of Exponential, Pages and Diffusional Models to Simulate the Drying Kinetics of Kiwi Fruit, Journal of Food Engineering, 66, p. 323-328.
297. Singh, B., Gupta, A., K. (2007). Mass Transfer Kinetics and Detemination of Effective Diffusivity During Convective Dehydration of Pre-osmosed Carrot Cubes, Journal of Food Engineering, 79, s. 459-470.
298. Singh, B., Sanjeev, M. (2008). Effect of Osmotic Pretreatment on Equilibrium Moisture Content of Dehydrated Carrot Cubes, International Journal of Food Science and Technology, 43, p. 532-537.
299. Singh, P., C., Singh, R., K., Bhamidipati, S., N., Barone, P. (1997). Thermophysical Properties of Fresh and Roasted Coffee Powders, Journal of Food and Preocessing Engeenering, 20, p. 31-38.
300. Singh, R., P. (1982). Thermal Diffusivity in Food Processing, Food Technology, 36(2), p. 87-93.
301. Sledz, M., Nowak, P., Witrowa-Rajchert, D. (2014). Drying of parsley leaves pre-treated by ultrasound. ZPPNR, 579, pp.91–99.
302. Službeni list SFRJ (1983). Pravilnik o metodama uzimanja uzorak i vršenja hemijskih i fizičkih analiza radi kontrole kvaliteta proizvoda od voća i povrća, 29/83.
303. Sobukola, O.P., Dairo, O.U., Odunewu, A.V. (2008). Convective hot air drying of blanched yam slices. International Journal of Food Science and Technology, 43, pp.1233–1238.
304. Stamenković, Z. (2021). Kinetika konvektivnog sušenja maline u tankom nepokretnom sloju. Doktorska disertacija. Poljoprivredni fakultet, Novi Sad.
305. Stamenković, Z., Pavkov, I., Radojčin, M., Kešelj, K., Vakula, A., Novaković, T. (2019a). Mathematical modeling of the kinetics of strawberry pulp convective drying and the effect of ascorbic acid on strawberry pulp color preservation. Journal on Processing and Energy in Agriculture, 23, (4), 170-175.

306. Stamenković, Z., Pavkov, I., Radojčin, M., Tepić Horecki, A., Kešelj, K., Kovačević, D.B., Putnik, P. (2019). Convective drying of fresh and frozen raspberries and change of their physical and nutritive properties. Foods, 2019, 8, pp.251.
307. Stamenković, Z., Radojčin, M., Pavkov, I., Bikić, S., Ponjičan, O., Bugarin, R., Kovács, S., Gere, A. (2020). Ranking and multicriteria decision making in optimization of raspberry convective drying processes. Journal of Chemometrics, 34, 4, e3224.
308. Stamp, J., & Labuza, T. (1983). Kinetics of the Maillard reaction between aspartame and glucose in solution at high temperatures. Journal of Food Science, 48(2), 543–544.
309. StatSoft, Inc., 2010. STATISTICA (Data Analysis Software System), Version 10. www.statsoft.com
310. Stefanović M., Urošević M. (1995). Praktična primena osmotskog sušenja poljoprivrednih proizvoda, Revija Agronomska saznanja, 5(1), s. 2-7.
311. Šumić, Z., Vakula, A., Tepić, A., Čakarević, J., Vitas, J., Pavlić, B. (2016). Modeling and optimization of red currants vacuum drying process by response surface methodology (RSM). Food Chemistry, 203, pp.465–475.
312. Suna, S., Tamer, C.E., Inceday, B., Sinir, G.Ö., Çopur, Ö.U. (2014). Impact of drying methods on physicochemical and sensory properties of apricot pestil. The Indian Journal of Traditional Knowledge. 3, 47–55.
313. Suzuki, K., Kubota, K., Hasegawa, T., Hosaka, H. (1976). Shrinkage in Dehydration of Root Vegetables, Journal Food Science, 41, p. 1189–1193.
314. Sweat, V., E. (1974). Experimental Values of Thermal Conductivities of Selected Fruits and Vegetables, Journal of Food Science, 39, p. 1081-1083.
315. Syamaladevi, R.M., Manahiloh, K.N., Muhunthan, B., Sablani, S.S. (2012). Understanding the influence of state/phase transitions on ice recrystallization in Atlantic Salmon (Salmo salar) during frozen storage. Food Biophysics, 7, pp. 57–71. doi: 10.1007/s11483-011-9243-y.
316. Syamaladevi, R.M., Sablani, S.S., Tang, J., Powers, J., Swanson, B.G. (2011). Stability of anthocyanins in frozen and freeze-dried raspberries during long-term storage: in relation to glass transition. Journal of Food Science, 76, pp. 414–421. doi: 10.1111/j.1750-3841.2011.02249.x.
317. Syamaladevi, R.M., Sablani, S.S., Tang, J., Powers, J., Swanson, B.G. (2009). State diagram and water adsorption isotherm of raspberry (Rubus idaeus). Journal Food Engineering, 91, pp.460–467.
318. Szadzinska, J., Łechtanska, J., Pashminehazar, R., Kharaghani, A., Tsotsas, E. (2018). Microwave- and ultrasound-assisted convective drying of raspberries: Drying kinetics and microstructural changes. Drying Technology, 37, pp.1–12.
319. Szczesniak, A.S. (1963). Classification of textural characteristics. Journal of Food Science, 28, 385-389.
320. Taiwo, K.A., Angersbach, A., Ade-Omowaye, B.I.O., Knorr, D. (2001). Effects of pretreatments on the diffusion kinetics and some quality parameters of osmotically dehydrated apple slices. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 49, pp.2804–2811.
321. Tao, Y., Sun, D.-W. (2014). Enhancement of food processes by ultrasound: A review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 55, pp. 570–594.
322. Tarhan, S. (2007). Selection of chemical and thermal pretreatment combination for plum drying at low and moderate drying air temperatures. Journal of Food Engineering, 79(1), pp.255–260.
323. Tatić, B., Petković, B. (1991). Morfologija biljaka. IDP Naučna Knjiga, Beograd, Srbija, s. 492.
324. Tepić, A. (2012). Bojene materije voća. Monografija. Tehnološki fakultet, Novi Sad.

325. Timmermans, R.A.H., Mastwijk, H.C., Berendsen, L.B.J.M., Nederhoff, A.L., Matser, A.M., Van Boekel, M.A.J.S., Groot, M.N. (2019). Moderate intensity Pulsed Electric Fields (PEF) as alternative mild preservation technology for fruit juice. International Journal of Food Microbiology, 298, pp.63–73.
326. Toğrul, İ, T. (2010). Modeling of Heat and Moisture Transport During Black Grapes, International Journal of Food Science and Technology, 45, p. 1146-1152.
327. Toğrul, İ, T. Pehlivan, D., (2003). Modeling of Drying Kinetics of Single Apricot, Journal of Food Engineering, 58, p. 23-32.
328. Topić, R., Živković, M., Živković, J. (2017). Konvencionalni i nekonvencionalni načini sušenja šljive. Zbornik Međunarodnog kongresa o procesnoj industriji – Procesing, [S.l.], v. 29, n. 1, p. 349-363.
329. Torgul, T., I., Ispir, A. (2007). Effect on Effective Diffusion Coeffcients and Investigation of Shrinkage During Osmotic Dehydration of Apricot, Energy Conversion and Managment, 48, p. 2611-2621.
330. Torreggiani, Danila, Bertolo, G. (2001). Osmotic Pre-Tretments in Fruit Processing: Chemical, Physical and Structural Effects. Journal of Food Engineering, 49, p. 247-253.
331. Trujillo, F.J., Wiangkaew, C., Pham, Q.T. (2007). Drying modeling and water diffusivity in beef meat. Journal of Food Engineering, 78 (1), 74-85.
332. Urošević, M. (1986). Uticaj veličina amplitude i perioda promene parametara režima sušenja u sistemima gustog sloja, Doktorska disertacija, Tehnološki fakultet, Novi Sad, Srbija. s. 174.
333. Vakula, A., Pavlić, B., Tepić Horecki, A., Jokanović, M., Daničić, T., Dulić, J., Šumić, Z. (2020). Sweet cherry (*Prunus avium L.*) vacuum drying: Kinetics modelling andtextural properties. Hemijska industrija, 74(5), pp.293-303.
334. Valent, V. (2001). Sušenje u procesnoj indrustriji. Monografija, Tehnološko - metalurški fakultet, Beograd.
335. Van Boekel, M.A.J.S. (1996). Statistical Aspects of Kinetic Modeling for Food Science Problems. Journal of Food Science, 61(3), pp.477-486.
336. Vasiljević, M., B. (1979). Kinetika konvektivnog sušenja kukuruza, Magistarski rad, mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd. s. 83.
337. Vega-Galvez, A., Miranda, M., Bilbao-Sainz, C., Uribe, E., Lemus-Mondaca, R. (2008). Empirical Modeling of Drying Process for Apple (*CV. Granny Smith*) Slices at Different air Temperatures, Journal of Food Processing and Preservation, 32, p. 972-986.
338. Verbeyst, L., Bogaerts, R., Van der Plancken, I., Hendrickx, M., Van Loey, A. (2013). Modelling of Vitamin C Degradation during Thermal and High-Pressure Treatments of Red Fruit. Food Bioprocess Technol, 6, 1015–1023.
339. Verma, L., R., Bucklin, R., A., Endan, J., B., Wratten, F., T. (1985). Effect of Drying Air Parameters on Rice Drying Models, Transactios of ASAE, 28, p. 296-301.
340. Viberg, U., Freuler, S., Gekas, V., Sjöholm, I. (1998). Osmotic Pretreatment of Strawberries and Shrinkage Effects, Journal of Food Engineering**,** 35(2), p. 135–145.
341. Voisey, P.W. (1971). Modernization of texture instrumentation. Journal of Texture Studies, 2, 129-195.
342. Voronjec, D., (1979). Tehnološke operacije. Mašinski fakultet, Beograd, Srbija. s. 276.
343. Voronjec, D., Antonijević, D. (1996). Termodinamičke mogućnosti određivanja potencijala sušenja, Termotehnika, 1, XXII, s. 39-50.
344. Vračar, Lj. (2001): Priručnik za kontrolu kvaliteta svežeg i prerađenog voća, povrća i pečurki i osvežavajućih bezalkoholnih pića. Tehnološki fakultet, Novi Sad.
345. Vukoje, V., Pavkov, I. (2010). Analysis of Economic Justification of Drying of Apricots by Combined Technology, Journal on Processing and Energy in Agriculture, 14 (1), p. 40-43.

346. Waldron, K.W., Smith, A.C., Parr, A.J., Parker, M.L. (1997). New approaches to understanding and controlling cell separation in relation to fruit and vegetable texture. Trends in Food Science and Technology, 8, 213-221.
347. Wang, C., Y., Singh, R., P. (1978). A Single Layer Drying Equation for Rough Rice, St. Joseph, MI: ASAE Paper No. 78-3001.
348. Wang, W., Chen, G., Mujumdar, A., S. (2007). Physical Interpretation of Solids Drying: An Overview on Mathematical Modeling Research, Drying Technology, 25, p. 659–668.
349. Wardhani, N.S.K., Nihayatuzain, A., Sari, A.R. (2021). Microwave Vacuum Drying on Fruit: A Review. Proceedings of the 2nd International Conference on Smart and Innovative Agriculture (ICoSIA 2021). Advances in Biological Sciences Research, 19, pp.309-316.
350. Weaver, J.C., Chizmadzhev, Y.A. (1996). Theory of electroporation: A review. Bioelectrochemistry and Bioenergetics, 41, pp.135–160.
351. Wiktor, A., Iwaniuk, M., Sledz, M.,Nowacka, M., Chudoba, T., Witrowa-Rajchert, D. (2013). Drying kinetics of apple tissue treated by pulsed electric field. Drying Technology, 31, 112–119.
352. Wiktor, A., Parniakov, O., Nowacka, M., Dadan, M., Rybak, K., Witrowa-Rajchert, D. (2019). Principles and applications of pulsed electric field. 6th International conference sustainable postharvest and food technologies - INOPTEP 2019 and 31th national conference processing and energy in agriculture - PTEP 2019, April 07th – 12th, 2019, Kladovo, Serbia, pp.218.
353. Wiktor, A., Singh, A.P., Parniakov, O., Mykhailyk, V., Mandal, R., Witrowa-Rajchert, D. (2020). PEF as an alternative tool to prevent thermolabile compound degradation during dehydration processes. In Pulsed Electric Fields to Obtain Healthier and Sustainable Food for Tomorrow; Barba, F., Parniakov, O.,Wiktor, A., Eds.; Academic Press: London, UK, pp. 155–202.
354. Wills, R., McGlasson, B., Graham, D., Joyce, D., (2007). Postharvest, University of New South Wales Press Ltd, Sydney, Australia, p. 592.
355. Witrowa-Rajchert, D., Wiktor, A., Sledz, M., Nowacka, M. (2014). Selected emerging technologies to enhance the drying process: A review. Drying Technology, 32, pp.1386–1396.
356. Wray, D., Ramaswamy, H.S. (2015). Novel Concepts in Microwave Drying of Foods. Drying Technology, 33, pp769–783.
357. Wu, J., Nyborg, W.L. (2008). Ultrasound, cavitation bubbles and their interaction with cells. Advanced Drug Delivery Reviews, 60, pp.1103–1116.
358. Wu, Y., Guo, Y., Zhang, D. (2011). Study of the effect of high-pulsed electric field treatment on vacuum freeze-drying of apples. Drying Technology, 29, pp.1714–1720.
359. www.nutfruit.org
360. Yagcioglu, A., Degirmencioglu, A., Cagatay, F. (1999). Drying Characteristics of Laurel Under Different Conditions. In: Proceedings of the 7th Intrenational Congress on Agricultural Mechanization and Energy, Adana, Turkey, May 26-27, p. 565-569.
361. Yang, J., Di, Q., Jiang, Q, Zhao, J. (2010). Application of Pore Size Analyzers in Study of Chinese Angelica Slices Drying, Drying Technology, 28, p. 214-221.
362. Yetenayet B, Hosahalli R. (2010). Going beyond conventional osmotic dehydration for quality advantage and energy savings. Ethiopian Journal of Applied Sciences and Technology (EJAST), 1 (1), 1-15.
363. Yongsawatdigul, J., Gunasekaran, S. (1996). Microwave-vacuum drying of cranberries.1. Energy use and efficiency. Journal of Food Processing and Preservation, 20, pp.121–143.
364. Zepka, L. Q., Borsarelli, C. D., Da Silva, M.A.A.P., Mercadante, A. Z. (2009). Thermal degradation kinetics of carotenoids in a cashew apple juice model and its impact on the system color. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 57 (17), 7841–7845.

365. Zhang, X.-L., Zhong, C.-S., Mujumdar, A.S., Yang, X.-H., Deng, L.-Z., Wang, J., Xiao, H.-W. (2019). Cold plasma pretreatment enhances drying kinetics and quality attributes of chili pepper (Capsicum annuum L.). Journal of Food Engineering, 241, pp.51–57.
366. Zhou, Y.-H., Vidyarthi, S.K., Zhong, C.-S., Zheng, Z.-A., An, Y., Wang, J., Wei, Q., Xiao, H.-W. (2020). Cold plasma enhances drying and color, rehydration ratio and polyphenols of wolfberry via microstructure and ultrastructure alteration. LWT, 134, 110173.
367. Zhu, Y.I., Pan, Z., Mchugh, T.H. (2007). Effect of dipping treatments on color stabilization and texture of apple cubes for infrared dry-blanching process. Journal of Food Processing and Preservation, 31(5), pp.632–648.
368. Židko, V., I., Rezičkov, V., A., Ukolov, B.S. (1982). Zernosušenie i zernosušilki, Kolos, Moskva, s. 239.
369. Zimmermann, U. (1986). Electrical breakdown, electropermeabilization and electrofusion Reviews of Physiology, Biochemistry and Pharmacology, 105, pp.176-256.
370. Zogzas, N., P., Maroulis, Z., B., Marions-Kouris, D. (1994). Densities, Shrinkage and Porosity of Some Vegetables During Air Drying, Drying Technology, 12(7), p. 1653-1666.