

Istraživanje kinetike sušenja u sušioniku s pliticama

Baković, Ana

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:149:499304>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-03**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Ana Baković

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, rujan 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Ana Baković

ISTRAŽIVANJE KINETIKE SUŠENJA U SUŠIONIKU S PLITICAMA
DIPLOMSKI RAD

Voditelj rada: prof. dr. sc. Aleksandra Sander

Članovi ispitnog povjerenstva: prof. dr. sc. Aleksandra Sander

prof. dr. sc. Jasna Prlić Kardum

prof. dr. sc. Vesna Tomašić

Zagreb, rujan 2021.

Ovaj rad izrađen je na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilišta u Zagrebu, Zavod za mehaničko i toplinsko procesno inženjerstvo pod vodstvom mentorice prof. dr. sc. Aleksandre Sander, akademske godine 2020./2021.

Zahvaljujem se mentorici prof. dr. sc. Aleksandri Sander na prenesenom znanju, savjetima i pomoći pri izradi ovog rada. Također veliko hvala i svim ostalim djelatnicima Zavoda za mehaničko i toplinsko procesno inženjerstvo, Fakulteta kemijskog inženjerstva i tehnologije.

Veliko hvala mojim roditeljima i sestri na podršci u školovanju.

Sažetak

Sušenje je složena toplinska operacija kojom se smanjuje sadržaj vlage u proizvodu namijenjenom za različite svrhe. Predstavlja proces koji se često koristi u prehrambenoj i kemijskoj industriji.

U ovom radu je istraživana kinetika sušenja tikvica u šaržnom sušioniku s pliticama. Tikvice su povrće koje sadrži visok udio vlage zbog čega su osjetljive na propadanje tijekom vremena. Cilj rada je istražiti utjecaj temperature, brzine strujanja zraka i geometrije materijala (debljine ploške) na kinetiku sušenja tikvica. Dobivene eksperimentalne krivulje sušenja aproksimirane su Lewisovim, Pageovim, Henderson – Pabis, Weibull i Midilli et al modelom, a njihovi su parametri dovedeni u vezu s uvjetima provedbe procesa. Za ocjenu uspješnosti aproksimacije eksperimentalnih podataka sušenja korišten je indeks korelacije, R^2 .

Na temelju dobivenih podataka zaključeno je da je proces sušenja brži, a vrijeme trajanja procesa kraće pri višim temperaturama, većim brzinama strujanja zraka i pri manjim debljinama materijala.

Određen je efektivni difuzijski koeficijent za period padajuće brzine sušenja koji objedinjuje sve mehanizme, kao i difuzijski koeficijent za vodu za cijeli tijek sušenja primjenom normiranog Weibullovog modela. Ispitan je utjecaj uvjeta provedbe procesa na efektivni difuzijski koeficijent. Iz dobivenih podataka se očituje da vrijednost efektivnog difuzijskog koeficijenta raste sa porastom temperature, brzine strujanja zraka i debljine materijala.

Prije i poslije sušenja izmjerena je promjena promjera uzoraka, na temelju čega je zaključeno da se materijal skuplja u većoj mjeri pri višim temperaturama i brzinama strujanja zraka, te pri manjim debljinama uzoraka.

Ključne riječi: sušenje, tikvice, kinetika sušenja, matematički model, efektivni difuzijski koeficijent, skupljanje materijala

Summary

Drying is a complex thermal operation that reduces the moisture content in a product intended for various purposes. It is a process often used in the food and chemical industries.

This work investigated the drying kinetics of zucchini in a tray dryer. Zucchini is a vegetable that contains a high percentage of moisture, which is why they are susceptible to decay over time. This study aimed to investigate the influence of temperature, air flow rate, and material geometry (plate thickness) on the drying kinetics of zucchini. Drying kinetic curves obtained from the experimental data were approximated with Lewis, Page, Henderson - Pabis, Weibull and Midilli et al. models, and their parameters were correlated with the process conditions. The correlation index, R^2 , was used to evaluate the success of the approximation of the experimental drying data.

Based on the obtained data, it was concluded that the drying process is faster, and the duration of the process is shorter at higher temperatures, higher air flow rates and lower material thicknesses.

The effective diffusion coefficient for the period of decreasing drying speed, which combines all mechanisms, was determined, as well as the diffusion coefficient of water for the entire drying course using the standardized Weibull model. The influence of process conditions on the effective diffusion coefficient was examined. From the obtained data, it is evident that the value of the effective diffusion coefficient increases with increasing temperature, air flow rate and material thickness.

Before and after drying, the diameter of the samples was measured. Therefore, it is concluded that the material shrinks to a greater extent at higher temperatures and air flow rates and in the case of smaller sample thicknesses.

Key words: drying, zucchini, drying kinetics, mathematical model, effective diffusion coefficient, material shrinkage

Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. TEORIJSKI DIO.....	2
2.1. SUŠENJE.....	2
2.2. VLAGA U MATERIJALU.....	3
2.3. NAČINI DOVOĐENJA TOPLINE.....	6
2.4. KINETIKA SUŠENJA	8
2.5. MATEMATIČKI MODELI.....	11
2.6. KLASIFIKACIJA SUŠIONIKA	12
2.6.1. Šaržni sušionik s pliticama.....	13
2.7. SUŠENJE HRANE	14
2.7.1. Sušenje tikvica	16
3. EKSPERIMENTALNI DIO	18
3.1. SVRHA RADA.....	18
3.2. MATERIJAL	18
3.3. PRIPREMA MATERIJALA	19
3.4. PROVEDBA SUŠENJA.....	20
3.4.1. Konvekcijsko sušenje.....	21
3.5. MATEMATIČKO MODELIRANJE PROCESA SUŠENJA	21
4. REZULTATI I RASPRAVA	24
4.1. UTJECAJ UVJETA PROVEDBE PROCESA NA KINETIKU SUŠENJA.....	24
4.1.1. Utjecaj temperature.....	24
4.1.2. Utjecaj brzine strujanja zraka.....	27
4.1.3. Utjecaj debljine materijala	29
4.2. MATEMATIČKO MODELIRANJE KINETIKE SUŠENJA.....	31
4.2.1. Utjecaj temperature.....	32
4.2.2. Utjecaj brzine strujanja zraka.....	36
4.2.3. Utjecaj debljine materijala	38
4.3. UTJECAJ UVJETA PROVEDBE PROCESA NA EFEKTIVNI DIFUZIJSKI KOEFIČIJENT	41
4.3.1. Utjecaj temperature.....	41
4.3.2. Utjecaj brzine strujanja zraka.....	44
4.3.3. Utjecaj debljine materijala	46
4.4. SKUPLJANJE MATERIJALA	48
5. ZAKLJUČAK.....	50

6. POPIS SIMBOLA.....	51
7. LITERATURA	53
8. ŽIVOTOPIS.....	56

1. UVOD

Sušenje općenito predstavlja toplinski proces uklanjanja hlapive komponente (vlage) kako bi se dobio suhi, kruti produkt. U toj složenoj operaciji se istovremeno odvijaju procesi prijenosa topline, tvari i količine gibanja. Proces sušenja jedan je od najstarijih i najčešće korištenih toplinskih procesa koji se primjenjuje u kemijskoj, farmaceutskoj, tekstilnoj, prehrambenoj i poljoprivrednoj industriji. Često je posljednji korak u procesu proizvodnje.^{1,2,3}

Glavni cilj sušenja je smanjiti sadržaj vlage u proizvodu.¹ Budući da sušenje uključuje isparavanje vlage, toplinu je potrebno dovesti materijalu koji se suši. Načini prijenosa topline su: konvekcija sa zagrijanog plina koji je u kontaktu s materijalom, kondukcija sa zagrijane, čvrste površine koja je u kontaktu s materijalom i radijacija koje podrazumijeva generiranje topline unutar materijala koji je izložen takvom zračenju.^{3,4} Konvekcijsko sušenje sa zagrijanim zrakom predstavlja jednu od najčešćih tehnika sušenja, zahvaljujući jednostavnoj kontroli procesa.⁵

Mnogo prehrambenih proizvoda koji su od velike važnosti za ljudsko zdravlje i prehranu, kao što su voće i povrće, su kvarljivi.¹ U prehrambenoj industriji sušenje se provodi s ciljem smanjenja aktivnosti vode u osušenom proizvodu. Posljedično tome smanjuje se mikrobiološko i kemijsko propadanje proizvoda, odnosno povećava se kvaliteta proizvoda. Sušenjem se smanjuje volumen i masa samog proizvoda, čime se olakšava transport i skladištenje, i pritom se snižavaju troškovi vezani uz navedeno.⁵

U ovom je radu istražen utjecaj uvjeta provedbe procesa (temperatura, brzina strujanja zraka, debljina materijala) na kinetiku sušenja tikvica u šaržnom sušioniku s pliticama.

Materijal odabran za sušenje su tikvice, koje zbog visokog udjela vode imaju vrlo kratak period trajanja. U cilju produljenja životnog vijeka tikvica i sprječavanja njihovog propadanja, provodi se sušenje kao djelotvorna metoda očuvanja.⁵

Eksperimentalni podaci su aproksimirani pomoću nekoliko matematičkih modela te je analiziran utjecaj provedbe procesa na parametre matematičkih modela. To omogućuje predviđanje kinetičkih krivulja sušenja pri promjeni procesnih uvjeta.

2. TEORIJSKI DIO

2.1. SUŠENJE

Sušenje predstavlja jednu od najstarijih i najčešćih jediničnih operacija prisutnih u postrojenjima kemijske, farmaceutske, polimerne, prehrambene, poljoprivredne i tekstilne industrije. Osnovni parametri industrijskih procesa sušenja su ukupni troškovi i kvaliteta osušenog proizvoda.¹ Ponekad je sušenje samo dio proizvodnog procesa, primjerice u procesu proizvodnje papira, ali općenito razlozi njegova provođenja su smanjenje troškova prijevoza i skladištenja, produljenje životnog vijeka proizvoda, lako rukovanje materijalom, smanjenje vjerojatnosti pojave korozije i općenito, dobivanje proizvoda željenih specifikacija.² Sušenje je složen toplinski proces koji uključuje istovremeni prijenos topline, mase i količine gibanja. Cilj je smanjiti sadržaj vlage u proizvodu namijenjenom za različite svrhe.¹

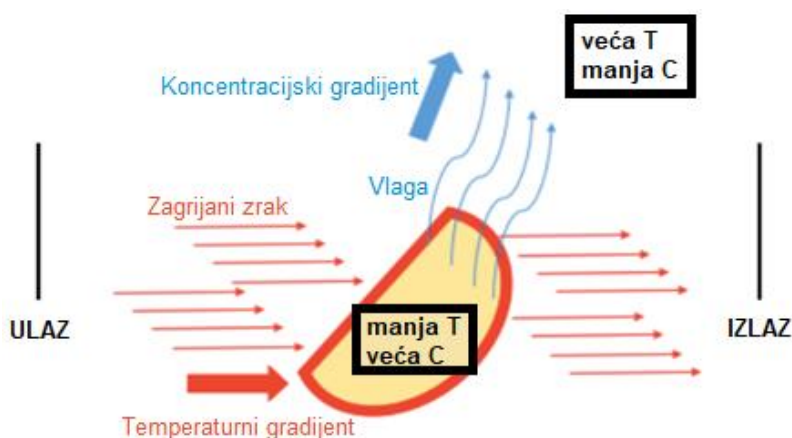
Ovaj se proces široko primjenjuje za uklanjanje vlage iz: kristalnih čestica anorganskih soli i organskih spojeva, bioloških materijala s ciljem sprječavanja mikrobiološke razgradnje, farmaceutskih proizvoda, deterdženata, drva i papira, bojila, katalizatora, raznih filmova i premaza te općenito svih proizvoda kod kojih visok sadržaj vlage rezultira prekomjernim troškovima prijevoza, distribucije i skladištenja. Nije svaki proces sušenja uspješan, primjerice pivarska industrija već desetljećima pokušava plasirati dehidrirano pivo na tržište, ali bezuspješno.³

Uz zadane radne uvjete i sigurnost, porast troškova energije i sve strože zakonske regulative vezane za onečišćenje okoliša imaju direktan utjecaj na dizajn i odabir industrijskih sušionika. Danas postoji preko 400 vrsta sušionika, ali obično ih se koristi oko 100.⁴ Sušenje se natječe s destilacijom kao jednom od energetski najintenzivnijih operacija zbog velike latentne topline isparavanja i neučinkovitosti upotrebe vrućeg zraka, kao najčešćeg sušnog medija. Prema nekoliko studija o nacionalnoj potrošnji energije SAD, Kanada i Francuska troše 10 – 15 %, dok Ujedinjeno Kraljevstvo, Njemačka i Danska troše 20 – 25 % energije za industrijske postupke sušenja. Potrošnja energije kreće se u rasponu od 5 % za kemijsku procesnu industriju do visokih 35 % za postupke izrade papira. Primjerice, u SAD-u se procjenjuju kapitalni izdaci za sušionike u iznosu od 800 milijuna dolara godišnje, stoga se glavni troškovi odnose na rad sušionika, a ne na njihov investicijski trošak.⁴ Zato danas važnu ulogu igra razvoj novih tehnologija za industriju sušenja, s ciljem poboljšanja proizvoda i racionalizacije potrošnje energije.¹

2.2. VLAGA U MATERIJALU

Sušenje predstavlja termički postupak uklanjanja vlage iz materijala s ciljem dobivanja suhog proizvoda. Materijal se prilikom procesa sušenja skuplja (engl. *shrink*) zbog gubitka vlage uslijed čega dolazi do pojave naprezanja, a intenzivno sušenje može izazvati kemijske i biološke promjene u materijalu. Zbog navedenog je bitni preduvjet za kvalitetno sušenje dobro poznavanje sorpcijskih izoterma.⁶

Način kojim je vlaga vezana u materijalu ograničava mjeru u kojoj se taj materijal može osušiti. Vlaga u materijalu može se klasificirati kao vezana, koju je teško ukloniti, i nevezana (slobodna) vlaga. Nevezana vlaga predstavlja vlagu u porama krutine koja se, ovisno o uvjetima okoline, može lako ukloniti mehaničkim ili termičkim metodama. Vezana vlaga definira se kao vlaga koja je dio strukture krutine ili je zarobljena u mikrostrukтури krutine.^{1,6}

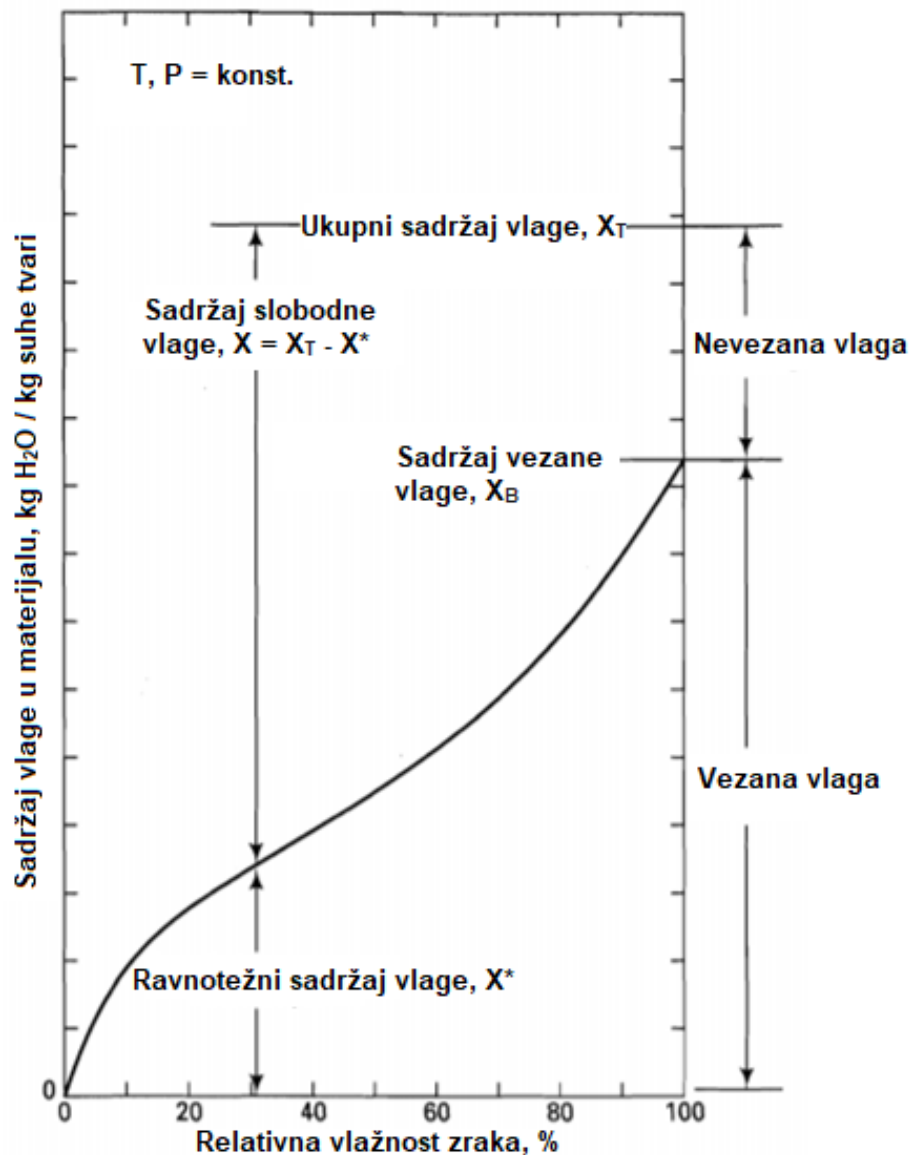


Slika 1. Shematski prikaz kriške jabuke izložene struji zagrijanog zraka¹⁰

Budući da sušenje krutog materijala uključuje desorpciju vlage, neophodno je povisiti temperaturu materijala ili sniziti parcijalni tlak vlage u okolnom zraku, slika 1. Metoda redukcije tlaka primjenjuje se u vakuum sušenju i sušenju zaleđivanjem (liofilizacija). Dovedena se toplina koristi za zagrijavanje materijala i isparavanje kapljevite vlage u vodenu paru, koja se mora odvesti od materijala koji se suši.⁷ Tijekom sušenja zagrijanim zrakom, porast temperature u materijalu uzrokuje porast unutarnjeg tlaka pri čemu se stvaraju gradijenti tlaka.¹ Pritom dolazi do migracije vlage iz unutrašnjosti na površinu krutine, koja se odvija putem jednog ili više mehanizama prijenosa.⁴ Glavni mehanizmi prijenosa tijekom sušenja su površinska difuzija vlage (na površini materijala), difuzija vlage u kapljevitoj i parnoj fazi zbog razlike u koncentraciji i kapilarni tok u granuliranim i poroznim materijalima zbog površinskih

sila.⁸ Dakle, prijenos vlage tijekom procesa sušenja može se odvijati pod kontrolom gradijenta tlaka, koncentracije ili temperature.⁹

Važan faktor kod definiranja mehanizma prijenosa vlage je veličina pora u materijalu koji se suši. Ukoliko je promjer pora veći od 10^{-7} m, vlaga se kreće kapilarnim tokom, a kroz pore promjera manjeg od 10^{-7} m prijenos vlage se odvija difuzijom.⁹

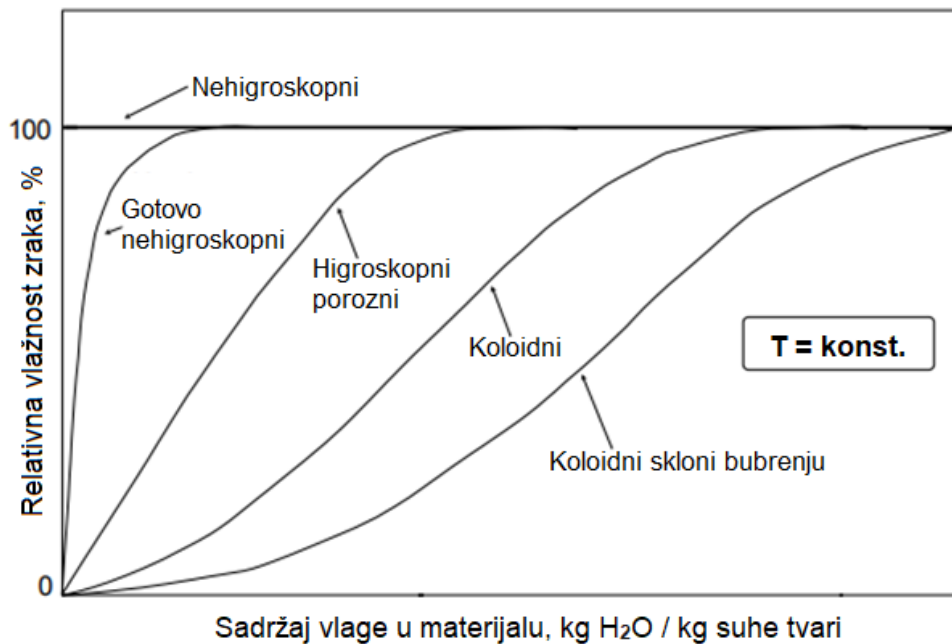


Slika 2. Tipična sorpcijska izoterma³

Početni sadržaj vlage predstavlja količinu vlage u materijalu u trenutku početka procesa sušenja.¹ U procesu sušenja krutog materijala izravnom toplinom (zagrijanim zrakom), količina vlage koja se može ukloniti iz materijala ograničena je ravnotežnim sadržajem vlage. Ravnotežni sadržaj vlage ovisi o temperaturi, tlaku i sadržaju vlage u sušnom mediju (zraku).

Slika 2. prikazuje hipotetsku sorpcijsku izotermu tipičnog higroskopskog materijala. Dijagram daje odnos između relativne vlažnosti zraka i sadržaja vlage u materijalu, X , pri konstantnom tlaku i temperaturi. Ravnotežni oblik vlage u materijalu pri relativnoj vlažnosti od 100 % naziva se vezana vlaga, X_B . Kruti materijali koji sadrže vezanu vlagu karakteriziraju se kao higroskopski. Ako mokri materijal ima ukupni sadržaj vlage, X_T , koji je veći od X_B , višak vlage, $X_T - X_B$, naziva se nevezana (slobodna) vlaga. Pri relativnoj vlažnosti zraka manjoj od 100 %, ukupni sadržaj vlage je suma ravnotežnog sadržaja vlage, X^* , i sadržaja slobodne vlage, $X_T - X^*$.

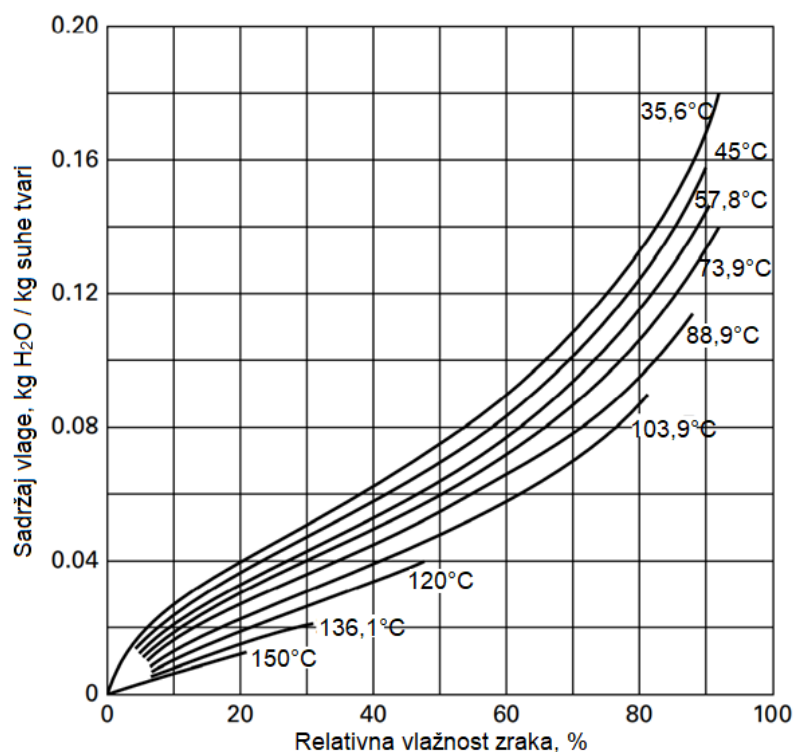
Ukoliko je zrak djelomično zasićen, tijekom sušenja se može ukloniti samo slobodna vlaga. Međutim, ako je relativna vlažnost zraka jednaka 0 i uz dovoljno vrijeme sušenja, krutina se može osušiti do stanja potpuno suhog materijala.³



Slika 3. Sorpcijske izoterme različitih vrsta materijala¹¹

Na slici 3. prikazane su krivulje ravnotežnog sadržaja vlage različitih vrsta materijala: gotovo nehigroskopskih, higroskopskih poroznih, koloidnih i koloidnih materijala sklonih bubrenju.

Temperatura ima značajan utjecaj na ravnotežni sadržaj vlage, što je vidljivo na primjeru sorpcijskih izoterma za sušenje pamuka na slici 4. Pri relativnoj vlažnosti zraka od 20 %, porastom temperature sa 35,6 °C na 150 °C dolazi do smanjenja sadržaja vlage u pamuku sa 0,037 na 0,012 kg H₂O / kg suhe tvari.³



Slika 4. Utjecaj temperature na ravnotežni sadržaj vlage pamuka pri tlaku od 1 atm³

2.3. NAČINI DOVOĐENJA TOPLINE

Budući da sušenje uključuje isparavanje vlage, toplina se mora dovesti materijalu koji se suši. Uobičajeni načini dovođenja topline materijalu tijekom procesa sušenja su sljedeći, slika 5.:

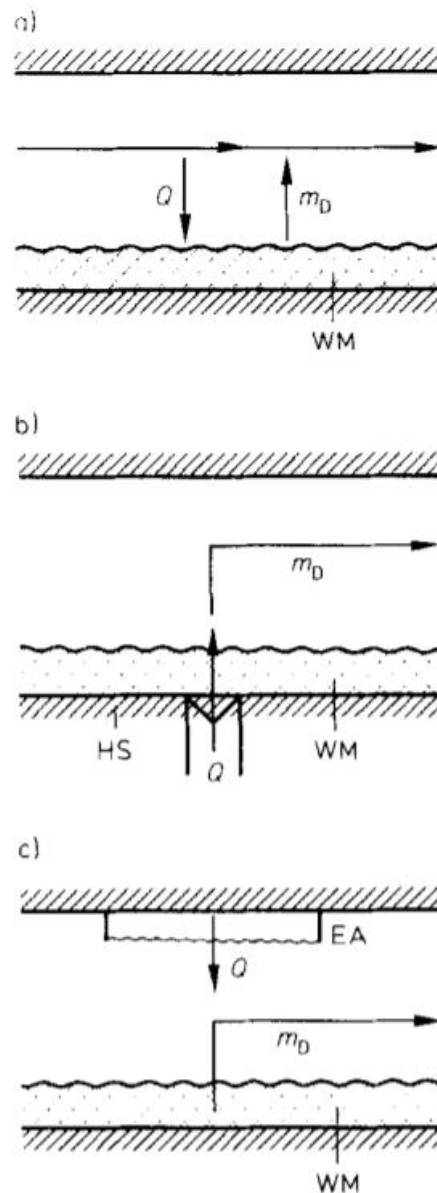
1. Konvekcija sa zagrijanog plina (zraka) koji je u kontaktu s materijalom.
2. Kondukcija sa zagrijane, čvrste površine koja je u kontaktu s materijalom
3. Radijacija koje podrazumijeva generiranje topline unutar materijala koji je izložen takvom zračenju

Konvekcija (izravno sušenje) predstavlja najčešću metodu sušenja krutina i materijala koji su u obliku paste. Toplina se dovodi putem zagrijanog medija koji struji iznad površine krutine, a isparena vlaga se odvodi istim sušnim medijem. Kao sušni medij najčešće se koristi zrak, ali mogu se koristiti i plinovi izgaranja, pregrijana para i inertni plinovi kao što je npr. N₂ koji se primjenjuje za uklanjanje organskih otapala iz krutina.

Kondukcija (neizravno sušenje) se primjenjuje za tanke i vrlo mokre materijale. Toplina potrebna za isparavanje vlage dovodi se putem zagrijane stacionarne ili pokretne površine, dok se isparena vlaga odvodi vakuumom ili strujom plina (nosač vlage). Toplinska učinkovitost

kondukcijskih sušionika veća je u odnosu na konvekcijske sušionike, a može se dodatno povećati kombinacijom navedene dvije metode.

Za dovođenje topline materijalu koriste se i razni izvori elektromagnetskog zračenja valne duljine u rasponu 0,2 m – 0,2 mm. Pritom se materijal zagrijava toplinom koja se apsorbira na njegovoj površini.^{3,4}



Slika 5. Metode sušenja: a) konvekcija b) kondukcija c) radijacija¹²

Termičko sušenje provodi se za posebne slučajeve i putem zamrzavanja (liofilizacija), vakuum sušenjem i visokofrekventnim sušenjem. Ponekad je potrebno kombinirati različite metode sušenja i vrste sušionika kako bi se postigao minimalni optimizirani trošak.¹²

2.4. KINETIKA SUŠENJA

Proučavanje kinetike sušenja doprinosi utvrđivanju prikladne metode sušenja i kontroli samog procesa, a važno je također za optimizaciju procesa. Kinetika sušenja služi za opis procesa uklanjanja vlage i njegovog odnosa s procesnim varijablama, stoga je dobro razumijevanje kinetike sušenja od velike važnosti za razvoj modela procesa sušenja.⁸

Proces sušenja karakteriziran je istodobnim prijenosom topline i tvari:

1. Prijenos topline iz okoline na mokru krutinu pri čemu dolazi do zagrijavanja materijala i isparavanja vlage sa površine
2. Prijenos tvari (vlage) iz unutrašnjosti na površinu krutine i njeno isparavanje zbog prijenosa topline

Vanjski uvjeti (temperatura, vlažnost, brzina i smjer strujanja zraka itd.) bitni su u procesu uklanjanja nevezane površinske vlage.^{4,7}

Prijenos vlage iz unutrašnjosti do površine porozne krutine je pod utjecajem unutarnjih svojstava (struktura materijala, temperatura, sadržaj vlage).

Kinetika sušenja opisuje promjenu sadržaja vlage i temperature materijala tijekom sušenja. Tijek sušenja definiran je vrstom i svojstvima materijala, vrstom prisutne vlage, odabranim načinom i uvjetima sušenja.^{9,12}

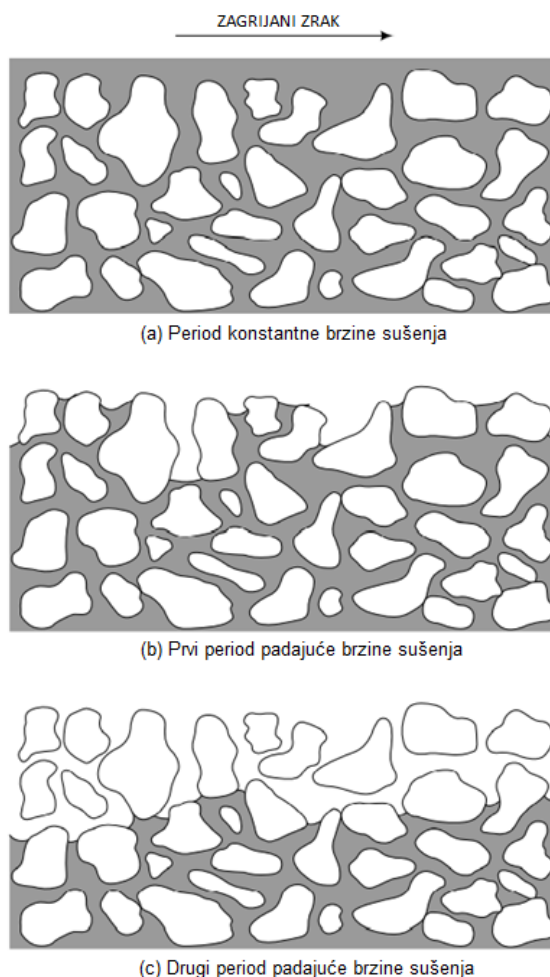
Slika 6. ilustrira stanje materijala tijekom pojedinih faza sušenja.

Na slici 7. prikazan je dijagram ovisnosti sadržaja vlage, brzine sušenja i temperature o vremenu. Na dijagramu se mogu uočiti tri karakteristična perioda sušenja:

1. Period stabilizacije (zagrijavanja)
2. Period konstantne brzine sušenja
3. Period padajuće brzine sušenja

Na početku procesa sušenja, u periodu stabilizacije, dolazi do porasta temperature materijala i tlaka vodene pare. Tanki sloj vlage na površini krutine zagrijava se do temperature mokrog termometra, a vlaga isparava sve brže. U tom periodu raste brzina sušenja sve do postizanja

konstantne temperature (temperature mokrog termometra), kada nastupa period konstantne brzine sušenja.

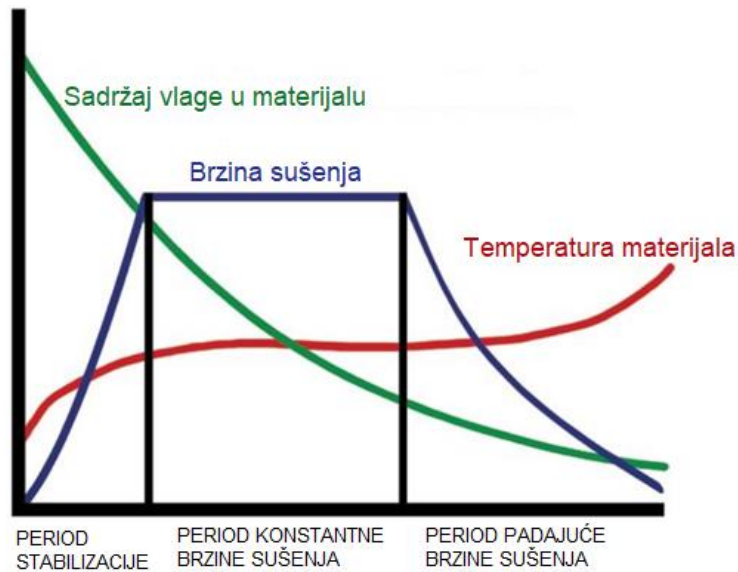


Slika 6. Stanje materijala tijekom pojedinih perioda sušenja³

Brzina sušenja je konstantna sve dok slobodna vlaga prekriva izloženu površinu krutine. Površinska vlaga može biti dio izvorne vlage na površini, ili može biti dovedena na površinu kapilarnim tokom i difuzijom. Brzina sušenja kontrolirana je vanjskim procesom prijenosa mase i topline između izložene površine i sušnog medija, dok proces migracije vlage iz unutrašnjosti na površinu ne utječe na brzinu u ovom periodu. Pretpostavlja se da je mokra krutina jednolike temperature (temperatura mokrog termometra), pa su jedini značajni otpori prijenosu topline i tvari vanjski, u plinskoj fazi. Kraj perioda konstantne brzine sušenja predstavlja točka kritičnog sadržaja vlage, u kojoj se vlaga prestane ponašati kao slobodna.^{1,3}

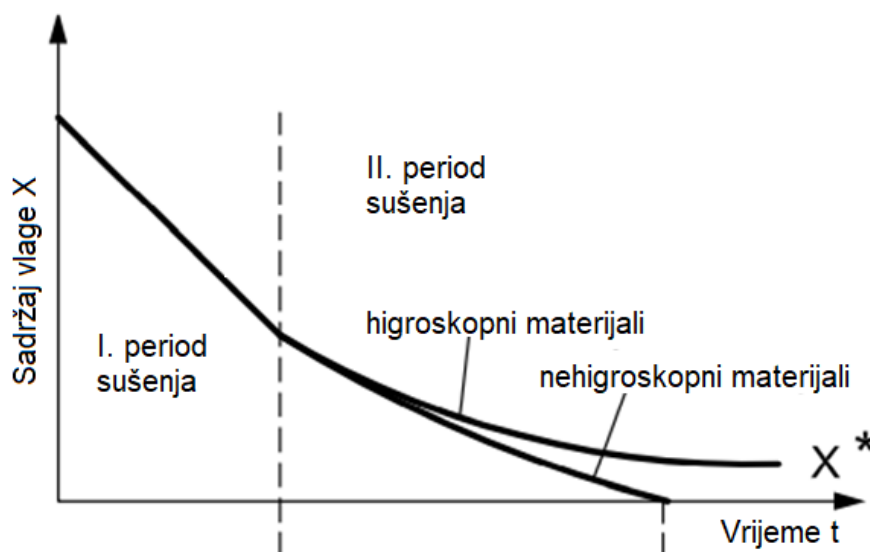
Ukoliko je početni sadržaj vlage u materijalu manji od kritičnog, ne postoji period konstantne brzine sušenja. U tom slučaju će brzina sušenja postići određenu maksimalnu vrijednost, nakon

koje će početi opadati.⁹ Kritični sadržaj vlage raste porastom brzine sušenja, debljine materijala koji se suši, kao i s većim promjerom pora.⁷



Slika 7. Promjena sadržaja vlage, brzine sušenja i temperature s vremenom¹³

Daljnijim sušenjem, sadržaj vlage nastavlja padati i započinje period padajuće brzine sušenja. Brzina sušenja opada sa smanjenjem sadržaja vlage u materijalu. Migracija vlage iz unutrašnjosti difuzijom ili kapilarnim tokom prema površini nije dovoljno brza i prijenos topline više nije ekvivalentan prijenosu vlage, a temperatura materijala raste sve do temperature sušnog medija ili temperature suhog termometra. Proces sušenja se odvija sve dok se ne postigne ravnotežni sadržaj vlage, kada je količina isparene vlage jednaka količini kondenzirane vlage na površini materijala.^{1,3}



Slika 8. Promjena sadržaja vlage tijekom sušenja higroskopnih i nehigroskopnih materijala⁷

Nehigroskopni materijali mogu se sušiti do potpuno suhog stanja, odnosno do sadržaja vlage $X = 0$ kg/kg, ako je relativna zasićenost sušnog zraka manja od 1, slika 8. U ovu skupinu materijala spadaju primjerice pakirani kompaktni materijali poput pijeska, koji nisu porozni. Sušenje higroskopnih materijala završava sa ravnotežnim sadržajem vlage.⁷

2.5. MATEMATIČKI MODELI

Predviđanje kontinuiranog ili šaržnog sušenja na temelju pouzdanih numeričkih i analitičkih pristupa vrlo su važni za dizajn procesa, proračun potrošnje energije te održavanje kvalitete materijala tijekom i nakon sušenja.¹

Matematički se modeli koriste u svrhu dizajna, optimizacije i upravljanja industrijskim sušionicima. Ne postoji jedinstven model koji bi se mogao primijeniti za opis kinetike sušenja različitih vrsta materijala.

Tablica 1. Najčešće korišteni matematički modeli za opis kinetike sušenja¹⁴

$\frac{X(t) - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \Psi = \frac{8}{\pi} \times e^{-\frac{\pi^2}{4x} D_{eff} \times t}$	II. Fickov zakon
$\Psi = A_0 \times e^{-k_0 \times t}$	Henderson i Pabis
$\Psi = A_0 \times e^{-k_0 \times t} + A_1 \times e^{-k_1 \times t}$	Sharaf – Eldeen, Blaisdell, Hamdy
$\Psi = e^{-K \times t}$	Lewis
$\Psi = e^{-K \times t^n}$	Page
$\Psi = e^{-(K \times t)^n}$	Overhults, White, Hamilton, Ross
$t = a \times \ln(\Psi) + b \times (\ln(\Psi))^2$	Thompson, Peart, Foster
$\Psi = 1 + a \times t + b \times t^2$	Wang, Sing

Sušenje predstavlja složen proces jer zahtjeva poznavanje velikog broja parametara koji utječu na kinetiku sušenja. Od velike je važnosti poznavanje geometrijskih karakteristika materijala (veličina, raspodjela veličina i oblik čestica te poroznost), kao i poznavanje prijenosnih svojstava materijala (koeficijent prijenosa tvari, efektivni difuzijski koeficijent i konstanta sušenja). Neki od modela za opis kinetike procesa sušenja dani su u tablici 1. Najčešće korišteni modeli su Lewisov i Pageov. Lewisov model pretpostavlja brzinu sušenja proporcionalnu razlici srednjeg sadržaja vlage materijala i ravnotežne vrijednosti sadržaja vlage u danim procesnim uvjetima. Pageov model predstavlja modifikaciju Lewisove jednadžbe uvođenjem empirijskog parametra n, čime se postiže bolje slaganje teorijskih i eksperimentalnih podataka.¹⁴

2.6. KLASIFIKACIJA SUŠIONIKA

U suvremenoj se industriji većina proizvoda u određenoj fazi podvrgava sušenju. Materijal mora imati određen sadržaj vlage kako bi bio pogodan za naknadnu preradu, oblikovanje ili peletiranje.⁴

Materijal koji se može sušiti u sušioniku uključuje zrnate i pločaste krutine, filmove, paste, kaše i tekućine. Stanje materijala u sušioniku može biti stacionarno ili pokretno, uz miješanje.³ Prema tome, ovisno o vrsti materijala i proizvoda postoje različite vrste sušionika. Svaki sušionik mora raditi pouzdano, sigurno i ekonomično. Troškovi rada i održavanja ne smiju biti previsoki, a potrošnja energije se mora svesti na najmanju moguću mjeru.¹⁵

Osnovna podjela sušionika je prema načinu rada, načinu dovodenja topline i stanju materijala u sušioniku.

Obzirom na način rada, sušionike dijelimo na šaržne i kontinuirane. Šaržni sušionici se primjenjuju ako je kapacitet proizvodnje manji od 230 kg / h, dok se kontinuirani proces sušenja preferira u slučaju kapaciteta proizvodnje većeg od 900 kg / h. Kontinuirani sušionici zahtijevaju manje radne snage, zauzimaju manju površinu i daju proizvod ujednačene kvalitete.¹⁶

Prema načinu dovodenja topline razlikujemo izravno i neizravno sušenje. Izravno sušenje (konvektivno ili adijabatsko sušenje) podrazumijeva kontakt između materijala i zagrijanog plina koji služi za zagrijavanje materijala i odvođenje isparene vlage. U slučaju kontinuiranog načina rada, tok zagrijanog plina može biti istostrujan, protustrujan ili miješani. Protustrujni tok je najučinkovitiji, ali istostrujni tok je bolji u slučaju materijala osjetljivog na povišenu temperaturu. Neizravno sušenje (neadijabatsko) osigurava toplinu materijalu kondukcijom ili radijacijom sa zagrijane površine. Sušionici s neizravnim sušenjem mogu raditi pod vakuumom kako bi se snizila temperatura na kojoj isparava vlaga. Jedinice koje kombiniraju adijabatsko i neadijabatsko sušenje nazivaju se izravno – neizravni sušionici.^{3,15}

Schlünder je klasificirao sušionike prema vremenu zadržavanja materijala. Za vrlo kratko vrijeme sušenja (<1 min) primjenjuju se *flash* sušionici, sušionici s raspršivanjem i sušionici s bubnjem. Za vrlo dugo vrijeme sušenja (>1 h) koriste se tunelni i transportni sušionici te sušionici s pliticama. Na slici 9. prikazana je podjela sušionika i pripadajuće vrijeme sušenja.⁴

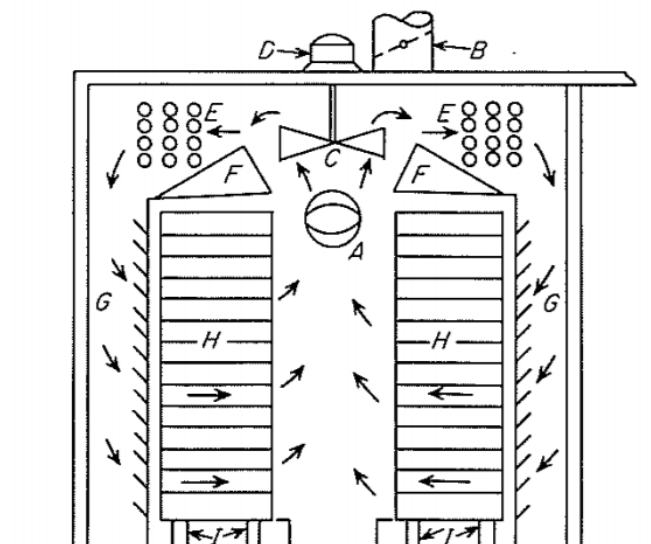
SUŠIONICI	TIPIČNO VRIJEME SUŠENJA				
	0–10 (s)	10–30 (s)	5–10 (min)	10–60 (min)	1–6 (h)
Konvekcijski					
Sušionici s pokretnom trakom				×	
Flash sušionici	×				
Sušionici s fluidiziranim slojem				×	
Rotacijski sušionici				×	
Sušionici s raspršivanjem		×			
Sušionici s pliticama (šaržni)					×
Sušionici s pliticama (kontinuirani)				×	
Kondukcijski					
Sušionici s bubnjevima		×			
Rotacijski sušionici s neizravnim grijanjem				×	
Rotacijski sušionici s cijevi (vrući plinovi/para)				×	
Sušionici s pliticama (šaržni)					×
Sušionici s pliticama (kontinuirani)				×	

Slika 9. Podjela sušionika i njihovo pripadajuće vrijeme sušenja⁴

2.6.1. Šaržni sušionik s pliticama

Najstariji i najjednostavniji šaržni sušionik je sušionik s pliticama. Sušionici s pliticama spadaju u konvekcijske sušionike u kojima se kao sušni medij koristi vrući zrak ili plinovi izgaranja. U pravilu rade u šaržnom i polušaržnom načinu rada.^{3,17}

Tipičan šaržni sušionik s pliticama, prikazan na slici 10., sastoji se od pravokutne metalne komore u kojoj se nalazi stalak za plitice na nosačima. Svaki stalak sadrži određeni broj plitica koje se pune materijalom, a preko kojih prelazi vrući zrak. Ako je materijal u obliku granula ili oblikovan u brikete, rezance ili pelete, dno plitice može biti perforirano kako bi vrući zrak mogao strujati kroz sloj materijala. Zagrijani zrak cirkulira između otvorenih plitica pomoću ventilatora i motora, a zagrijava se preko grijača smještenih u komori. Vlažan zrak se kontinuirano odvodi kroz ispušni kanal, a nadomješta se svježim suhim zrakom koji ulazi u komoru. Za svaki se prolaz može koristiti svježi zrak, međutim, ekonomičnije je recirkulirati ga. Stalci se nakon sušenja izvlače iz komore kako bi se suhi materijal mogao izvaditi iz plitica. Ključ za uspješno sušenje u ovoj vrsti sušionika je jednolika raspodjela vrućeg zraka koji struji u komori kako bi se postignulo ravnomjerno sušenje i ujednačena kvaliteta proizvoda.



Slika 10. Sušionik s pliticama: A) ulaz svježeg zraka B) ispušni kanal C) ventilator D) motor E) grijač G) pregrade za distribuciju zraka H) stalak s pliticama I) nosači stalka¹⁵

Primjenjuje se za sušenje gotovo svih vrsta materijala uz niski kapacitet proizvodnje. U ovoj je vrsti sušionika sušenje sporo, a ciklusi sušenja su u rasponu od jednog sata pa čak i do nekoliko dana. Imaju visoke radne troškove, obzirom da je potrebna radna snaga za punjenje i pražnjenje plitica. Najčešće se primjenjuju na vrijednim proizvodima kao što su boje i farmaceutici. Zbog svog jednostavnog i ekonomičnog dizajna, primjena sušionika s pliticama široko je rasprostranjena i u poljoprivrednom sektoru.^{3,15,18}

2.7. SUŠENJE HRANE

Utjecaj sadržaja vode u hrani na njenu kvarljivost poznat je još od davnina. Da bi se osigurala stalna zaliha hrane, očuvanje hrane provodilo se prirodnim sušenjem.

Povijest sušenja hrane datira na području Bliskog Istoka i orijentalnih kultura čak iz 20 tisuća godina pr. Kr. Stari Egipćani su plodove i voće sušili pomoću Sunčevih zraka. Na prijelazu u 20. stoljeće prirodno se sušenje (Sunčevom energijom) zamjenjuje sušenjem uz dovođenje topline. U Francuskoj se u kasnim 1700.-im godinama razvija oprema za sušenje voća i povrća na kontroliranoj temperaturi. Metode sušenja se razvijaju sve do danas, s ciljem postizanja što kvalitetnijeg proizvoda.^{19,20,}

Proces sušenja igra glavnu ulogu u svjetskoj proizvodnji i preradi hrane, jer u velikoj mjeri kontrolira kvalitetu konačnog proizvoda. Da bi se dobio osušeni proizvod dobre kvalitete i željene specifikacije, podrazumijeva se da mora proći kroz nekoliko fizikalnih, kemijskih ili bioloških promjena. Mnogi kvarljivi prehrambeni proizvodi, poput voća i povrća, podvrgavaju

se procesu sušenja s ciljem njihove stabilizacije, odnosno smanjenja sadržaja vlage u njima. Smanjenjem sadržaja vlage u prehrambenim proizvodima sprječava se rast mikroorganizama i propadanje proizvoda, produljuje se rok trajanja hrane, smanjuje se potreban volumen skladištenja i olakšava se transport.^{1,8,21}

Sušenje se primjenjuje na širok spektar prehrambenih proizvoda, od sirovih materijala do nusproizvoda:

- Nisko hidratizirani proizvodi (kukuruz, riža, pšenica, uljane sjemenke, itd.)
- Visoko hidratizirani proizvodi (mlijeko i mliječni proizvodi, voće i povrće, meso, riba, itd.)
- Međuproizvodi iz industrijskih procesa (ekstrakti kave i čaja, tjestenina, šećer, itd.)
- Industrijski nusproizvodi za stočnu hranu

Na sušenje voća i povrća utječu sljedeći čimbenici: vrijeme sušenja, temperatura sušenja, relativna vlažnost zraka, brzina strujanja zraka, površina i veličina (debljina) materijala. Od navedenih faktora, najveći utjecaj na proces sušenja voća i povrća imaju debljina materijala i temperatura sušenja.²¹

Općenito, voće i povrće u prirodi ima visok udio vlage koji se kreće u rasponu od 60 – 90 %. Budući da se suho voće uglavnom jede bez rehidracije, važno je da proizvod nije osušen do mjere krhkosti. Većina voća nakon sušenja trebala bi sadržavati oko 20 % vlage. Povrće sadrži manje kiselina od voća pa se suši do lomljivosti, pri čemu je sadržaj vlage oko 10 %. Međutim, ukoliko se proizvod ne osuši u dovoljnoj mjeri, to negativno utječe na kvalitetu proizvoda zbog promjena u kemijskim, biološkim i fizikalnim svojstvima. U tom kontekstu, znanstvenici rade na razvoju matematičkih modela i računalnih simulacija s ciljem postizanja što veće učinkovite dehidracije. Za precizno opisivanje kinetike sušenja prehrambenih proizvoda, matematičko modeliranje jedan je od najprikladnijih pristupa. Pomoću modela uzeti su u obzir čimbenici koji utječu na prijenos topline i mase između materijala i zraka, promjene fizikalnih svojstava materijala, vodene pare i zraka promjenom vlažnosti i temperature.^{1,22}

U prehrambenoj industriji se zbog svoje jednostavnosti i jednostavnog upravljanja uglavnom primjenjuju konveksijski sušionici. Karakteriziraju ih relativno niski kapitalni troškovi, ali i mala energetska učinkovitost. U konveksijskim sušionicima je, zbog male brzine sušenja, vrijeme sušenja relativno dugo. Posljedično tome, konveksijsko sušenje troši veliku količinu energije, čak 25 % ukupne energije koju troše industrije u razvijenim zemljama.⁵

Sveprisutna konkurencija zbog globalizacije, zajedno s rastućom potražnjom za kvalitetnijim proizvodima te s ciljem održivosti procesa s minimalnim utjecajem na okoliš rezultiraju neprekidnim razvojem novih metoda sušenja.²⁰

2.7.1. Sušenje tikvica

Promjene u prehrani sve većeg broja stanovništva skreću pozornost potrošača na povrće i voće koje ima odgovarajuća biološka svojstva, dobar okus i nisku kalorijsku vrijednost. Velik je izazov osigurati povrće i voće tijekom cijele godine jer je većina kvarljiva i dostupna samo u određenom periodu godine.

Konzumacija tikvica danas vrlo je popularna, jer predstavlja povrće bogato hranjivim sastojcima posebice prirodnim antioksidansima kao što su beta-karoten, fenoli i vitamin C. Tikvice obiluju proteinima, a imaju niski udio ugljikohidrata i masti zbog čega se preporučaju u niskokaloričnoj prehrani. Međutim, tikvice su sezonska namirnica i imaju kratak vijek trajanja, svega 1 – 2 dana. Koriste se mnoge metode kojima je cilj produljenje roka trajanja tikvica i stvaranje uvjeta za njihovo dugo skladištenje.^{23,24}

Konzerviranje, zamrzavanje, soljenje, vakuumsko pakiranje i sušenje neke su od metoda koje se mogu upotrijebiti za očuvanje tikvica. Sušenje predstavlja jednu od najstarijih i najčešće korištenih metoda konzerviranja hrane.²⁵

Procesom sušenja se smanjuje aktivnost vode u suhom proizvodu, uslijed čega je razvoj mikroorganizama spriječen, a enzimске i neenzimske promjene su ograničene. Rezidualni endogeni enzimi prisutni u povrću mogu uzrokovati promjene kvalitete tijekom skladištenja. *Polifenol oksidaza*, enzim često prisutan u povrću, uzrokuje neželjene modifikacije boje, a tako i okusa, u svježem povrću.^{23,24}

Sušenjem se smanjuje volumen i težina proizvoda, što rezultira manjim troškovima prijevoza i skladištenja. Osušena tikvica smatra se funkcionalnom hranom s velikom količinom vlakana i bioaktivnih spojeva te s niskim udjelom lipida. Može se koristiti kao sastojak u mješavini začina, ili se dodati u razna jušna jela i umake. Također, sušene tikvice mogu se koristiti kao zdrave grickalice ili se pržiti na ulju, pri čemu upijaju manje ulja nego svježe tikvice.⁵

Tikvice se, kao i druge biljne vrste iz porodice *Cucurbitaceae*, uglavnom suše u tankom sloju materijala. Tankoslojno sušenje prehrambenog materijala predstavlja sušenje u jednom sloju ploški pri čemu se može pretpostaviti ujednačena raspodjela temperatura unutar materijala

zbog male debljine. Jednadžbe koje opisuju kinetiku sušenja u tankom sloju imaju široku primjenu zbog svoje jednostavnosti.

Sušenje na otvorenom, predstavlja tradicionalnu metodu sušenja. Međutim, problemi vezani uz higijenu, iznimno dugo vrijeme sušenja i nisku kvalitetu konačnog proizvoda doveli su do razvoja različitih vrsta sušenja kao što su sušionici sa pliticama, vakuumski sušionik, sušionik s fluidiziranim slojem itd. Među njima, konvekcijsko sušenje pomoću vrućeg zraka jedna je od najpopularnijih metoda sušenja u području prehrambenih proizvoda. Objavljena su mnoga istraživanja o karakteristikama konvekcijskog sušenja različitog voća i povrća poput patlidžana, rajčica, višanja, breskva i sl. Međutim, u literaturi nedostaje podataka o karakteristikama sušenja tikvica.²⁵

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. SVRHA RADA

Svrha rada bila je odrediti utjecaj temperature, brzine sušenja i debljine uzorka na kinetiku sušenja tikvice u šaržnom sušioniku s pliticama. Eksperimentalni podaci su aproksimirani pomoću nekoliko matematičkih modela, a na temelju indeksa korelacije je određen model koji najbolje opisuje kinetiku sušenja tikvica.

3.2. MATERIJAL

U eksperimentu je korištena svježa tikvica, duljine 15 – 20 cm nabavljena sa lokalne tržnice, slika 11. Tikvice su skladištene u hladnjaku do provedbe eksperimenta. U literaturi⁵ su pronađene vrijednosti početnog sadržaja vlage u tikvici koji iznosi oko 95,50 %, odnosno oko 21,22 kg vode / kg suhe tvari. U ovom eksperimentu početni sadržaj vlage u tikvicama varira u rasponu od 14,44 – 23,58 kg vode / kg suhe tvari.

U tablici 2. dane su nutritivne vrijednosti tikvice.

Tablica 2. Nutritivne vrijednosti tikvice²⁶

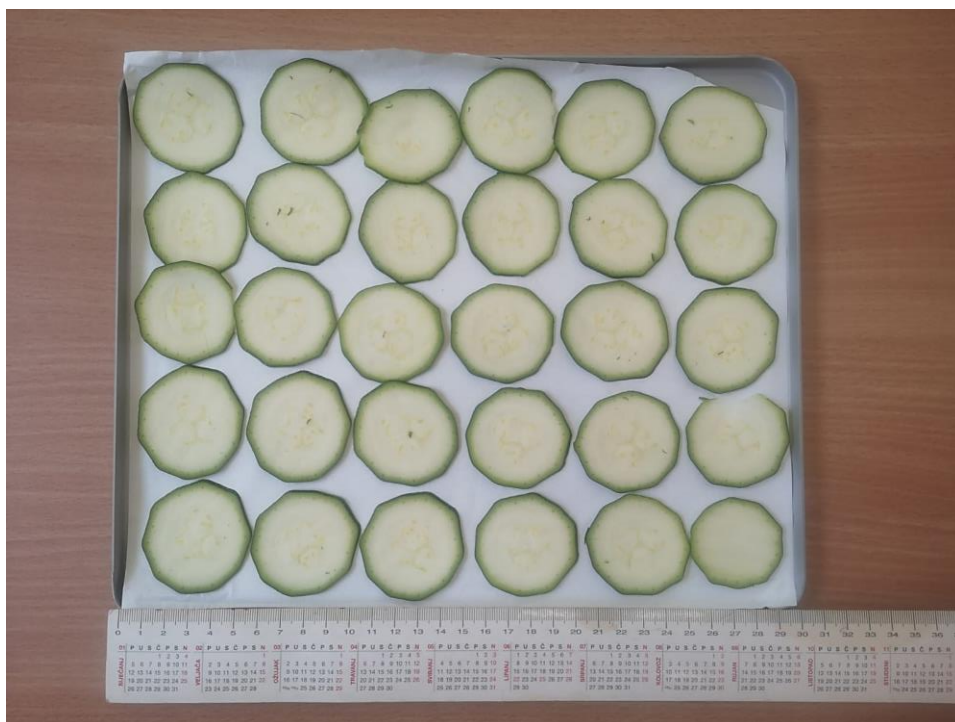
	Prehrambene vrijednosti u 100 grama tikvica
Kalorije	17 kcal
Kolesterol	0 mg
Kalij	261 mg
Protein	1,2 g
Masti	0,3 g
Natrij	8 mg
Ugljikohidrati	3,1 g
Vitamin C	17,9 mg



Slika 11. Svježa tikvica

3.3. PRIPREMA MATERIJALA

Svježe tikvice prije pripreme uzoraka izvađene su iz hladnjaka, te oprane. Uzorci su rezani su na ploške pomoću ručnog rezača, na 4 različite debljine: 1,10, 2,20, 3,35 i 6,05 mm. Ploške tikvica potom su raspoređene na plitice koje su prethodno obložene papirom na pečenje, kako bi se spriječilo lijepljenje za podlogu, slika 12.



Slika 12. Svježi uzorci tikvica pripremljeni za sušenje

3.4. PROVEDBA SUŠENJA

Sušenje tikvice do postizanja ravnotežnog sadržaja vlage provodi se u sušioniku s pliticama *Tray Dryer Armfield UOP8-MKII*, slika 13. U sušioniku s pliticama proces sušenja se provodi pri atmosferskom tlaku, na različitim temperaturama i pri različitim brzinama strujanja zraka, prikazanim u tablici 3. Nakon postizanja ravnotežnog sadržaja vlage u uzorku, što se očituje po konstantnoj masi, jedna ploška uzorka stavlja se IR sušionik *KERN Moisture analyser MLS-C*, slika 14., na infracrveno sušenje na temperaturu od 105 °C do postizanja potpuno suhog materijala.

Tablica 3. Uvjeti provedbe eksperimenta

Debljina uzorka, mm	Temperatura sušenja, °C	Brzina strujanja zraka, m s ⁻¹
2,20	60	0,50; 0,60; 0,80; 1,0
2,20	40; 50; 60; 70	0,50
1,10; 2,20; 3,35; 6,05	60	0,60



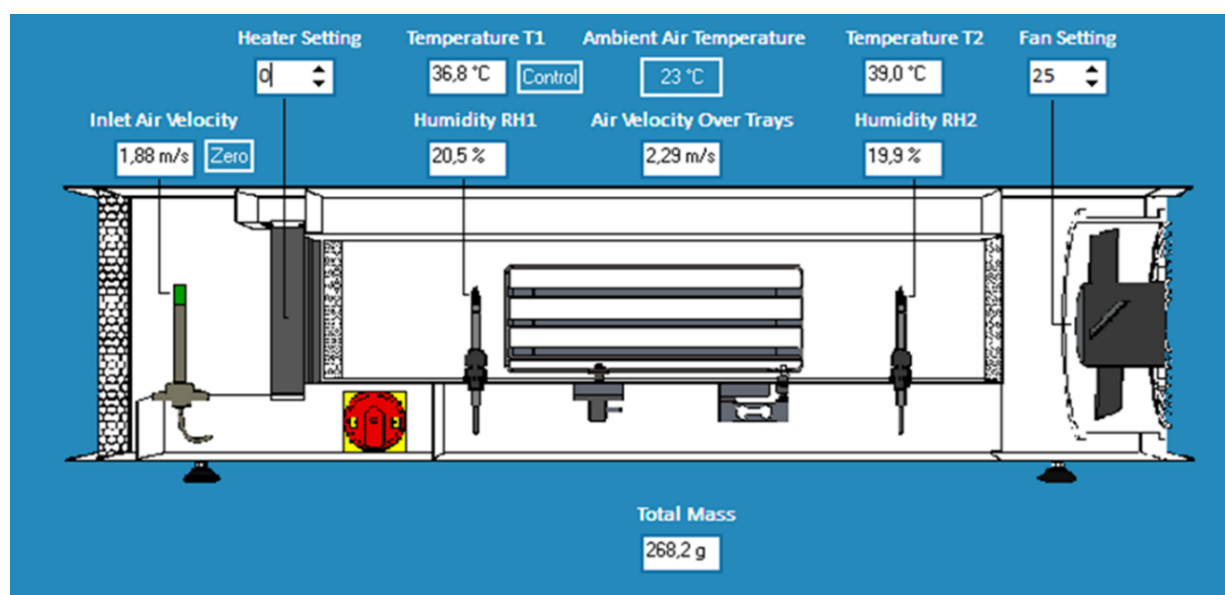
Slika 13. Sušionik s pliticama



Slika 14. Infracrveni sušionik

3.4.1. Konvekcijsko sušenje

Konvekcijski sušionik prikazan na slici 15., *Tray Dryer Armfield UOP8-MKII*, sastoji se od kvadratnog tunela, na čijem je kraju montiran ventilator aksijalnog protoka promjenjive brzine, kojeg pokreće električni motor. Zrak ulazi u komoru za sušenje pomoću ventilatora, a zagrijava se pomoću električnog grijača koji se nalazi ispred plitica. Zagrijani zrak prelazi preko senzora relativne vlažnosti i temperature prije nego što prođe iznad plitica. Komora s prozirnim ulaznim vratima sadrži tri plitice koje se nalaze u središtu tunela. Ukupni kapacitet plitica je približno 3 kg krute tvari. Nosač plitica nalazi se na čelijama za opterećenje koje služe za detekciju promjene mase tijekom sušenja tvari koja se nalazi na pliticama. Nakon prolaska iznad plitica, zrak prelazi preko drugog senzora za temperaturu i relativnu vlažnost, i izlazi iz sušionika u okolinu. Na ulazu u tunel očitava se ulazna brzina strujanja zraka, dok je brzina strujanja zraka iznad plitica nešto veća od ulazne kao posljedica manje površine poprečnog presjeka komore. Temperatura i relativna vlažnost zraka kontinuirano se mjere na dva senzora, postavljena ispred i iza plitica.²⁷



Slika 15. Sučelje konvekcijskog sušionika

3.5. MATEMATIČKO MODELIRANJE PROCESA SUŠENJA

Sadržaj vlage materijala, X , je maseni omjer mase vlage u jediničnoj masi suhoga materijala, izraženo u mjernoj jedinici kg / kg:

$$X(t) = \frac{m_{vlage}}{m_{suhi\ materijal}} \quad (1)$$

Masa vlage određuje se kao razlika mase vlažnog materijala i mase suhog materijala:

$$m_{vlage} = m_{vlažni\ materijal} - m_{suhi\ materijal} \quad (2)$$

Početni sadržaj vlage u materijalu određuje se kao razlika između mase svježeg uzorka, $m_{vlažni\ materijal,0}$, i mase suhog uzorka nakon sušenja u IR sušioniku na 105 °C, $m_{suhi\ materijal}$:

$$X_0 = \frac{m_{vlažni\ materijal,0} - m_{suhi\ materijal}}{m_{suhi\ materijal}} \quad (3)$$

Tijekom sušenja prati se promjena mase vlažnog materijala, koju bilježi program sušionika. Uzorak se suši u sušioniku s pliticama sve do postizanja ravnotežnog stanja, a zatim se u infracrvenom sušioniku suši na 105 °C sve dok se ne ukloni sva nevezana vlaga. Na temelju mase uzorka dobivene na kraju sušenja u sušioniku s pliticama, $m_{ravnotežno}$, i mase suhog uzorka dobivene u infracrvenom sušioniku, $m_{suhi\ materijal}$, može se izračunati ravnotežni sadržaj vlage, X_{eq} :

$$X_{eq} = \frac{m_{ravnotežno} - m_{suhi\ materijal}}{m_{suhi\ materijal}} \quad (4)$$

Za aproksimaciju eksperimentalnih podataka korišteni su sljedeći matematički modeli uz pripadajuće formule:

- Lewis:²⁸

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \exp(-K \cdot t) \quad (5)$$

K – konstanta sušenja

- Page:²⁹

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \exp(-k \cdot t^n) \quad (6)$$

k, n – empirijske konstante modela

- Henderson-Pabis:³⁰

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = a_1 \cdot \exp(-k_1 \cdot t) \quad (7)$$

a_1, k_1 – konstante modela

- Weibull:³¹

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \exp\left(-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right) \quad (8)$$

α - parametar raspodjele – odgovara vremenu potrebnom da se ukloni oko 63 % vlage

β - parametar oblika – definira brzinu sušenja na početku sušenja

- Midilli et al.:³²

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = a_2 \cdot \exp(-k_2 \cdot t^{n_2}) + b \cdot t \quad (9)$$

a_2, k_2, n_2, b – konstante modela

Za ocjenu uspješnosti aproksimacije eksperimentalnih podataka sušenja korišten je indeks korelacije, R^2 , koji se računa prema sljedećem izrazu:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(X_{exp} - X_{rač})^2}{\sum(X_{exp} - X_{sr})^2} \quad (10)$$

Što je njegova vrijednost bliža vrijednosti 1, to je slaganje između modela i eksperimentalnih podataka bolje.

4. REZULTATI I RASPRAVA

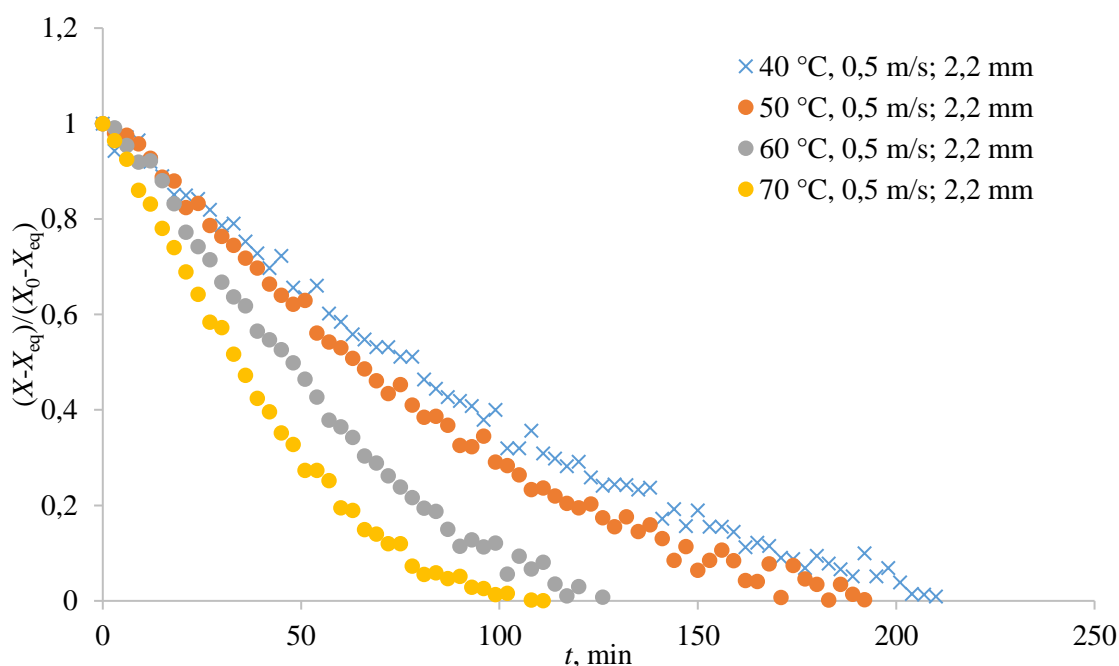
Ispitivana je kinetika sušenja tikvica pri različitim uvjetima provedbe procesa (različita temperatura, brzina strujanja zraka i debljina materijala). Temperatura okoline u kojoj je izveden eksperiment iznosi 25 °C, a relativna vlažnost okolišnog zraka mijenjala se ovisno o vremenskim prilikama (3,0 – 9,7 %) što utječe na kinetiku sušenja.

Na temelju eksperimentalnih podataka promjene mase uzoraka tikvice tijekom procesa sušenja, izračunate su vrijednosti sadržaja vlage materijala, X , te su grafički prikazane u ovisnosti o vremenu, t . Vrijednosti sadržaja vlage dane su u normiranom obliku zbog lakše usporedbe, obzirom na postojanje odstupanja u početnom sadržaju vlage među uzorcima.

4.1. UTJECAJ UVJETA PROVEDBE PROCESA NA KINETIKU SUŠENJA

4.1.1. Utjecaj temperature

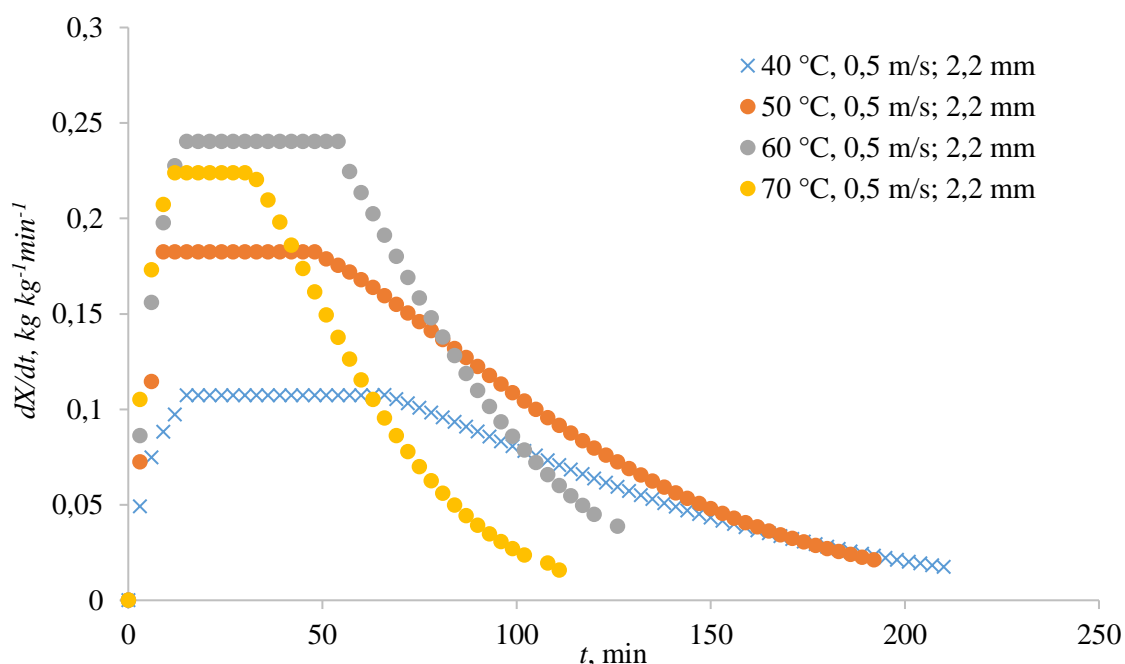
Na slici 16. prikazan je utjecaj temperature zraka na kinetiku sušenja uzorka tikvice debljine 2,2 mm, pri brzini strujanja zraka od 0,5 m s⁻¹. S porastom temperature sušenja skraćuje se vrijeme trajanja procesa.



Slika 16. Grafički prikaz promjene sadržaja vlage uzoraka tikvice s vremenom pri 40 °C, 50 °C, 60 °C i 70 °C

Porastom temperature dolazi do porasta pokretačke sile procesa prijenosa, odnosno povećanja brzine prijenosa topline i tvari, a posljedično tome i povećanja brzine sušenja, slika 17. Dakle,

pri nižim temperaturama je prisutna manja pokretačka sila, a otpori prijenosu topline i tvari su veći.



Slika 17. Grafički prikaz ovisnosti brzine sušenja uzorka tikvica o vremenu sušenja pri 40 °C, 50 °C, 60 °C i 70 °C

Tablica 4. Vrijednosti kritičnog sadržaja vlage i maksimalne brzine sušenja pri različitim temperaturama

$T, ^\circ\text{C}$	t_{kr}, min	$X_{kr}, \text{kg/kg}$	$(dX/dt)_{max}, \text{kg/kgmin}$
40	63	9,06765	0,1074
50	48	13,37304	0,1825
60	54	9,66513	0,2403
70	27	8,467449	0,2238

Pri većim se temperaturama postiže veća maksimalna brzina sušenja i postiže se u kraćem vremenu, odnosno period stabilizacije je kraći. Vrijeme trajanja perioda konstantne brzine sušenja se smanjuje s povećanjem temperature, pa je period konstantne brzine sušenja najkraći pri najvećoj temperaturi od 70 °C, tablica 4. Do odstupanja dolazi pri sušenju na temperaturi od 60 °C što se očituje na slici 17. Pri temperaturi od 60 °C postiže se veća maksimalna brzina sušenja nego pri 70 °C, što može biti posljedica razlike u relativnoj vlažnosti okolnog zraka. Pri temperaturi od 60 °C relativna vlažnost okolišnog zraka je nešto manja, što rezultira većom

pokretačkom silom za proces prijenosa tvari, a time i većom brzinom sušenja na toj temperaturi. Nakon perioda konstantne brzine sušenja slijedi nekoliko perioda padajuće brzine sušenja. Određene su vrijednosti kritičnog sadržaja vlage koje su prikazane u tablici 4. Povećanjem temperature smanjuje se vrijeme postizanja kritičnog sadržaja vlage (s odstupanjem pri 60 °C). Period konstantne brzine sušenja traje dokle god se na površini materijala nalazi tanki sloj vlage, odnosno dokle god je brzina kojom se vlaga iz unutrašnjosti doprema na površinu materijala dovoljno velika da nadoknadi isparenu vlagu. Brzina kretanja vlage kroz unutrašnju strukturu materijala ograničena je veličinom i raspodjelom veličina pora i manja je od brzine uklanjanja vlage s površine vlažnog materijala, zbog dodatnog otpora prijenosu tvari koji pruža materijal. U jednom trenutku, brzina kretanja vlage kroz unutrašnjost materijala više nije dovoljno velika da se osigura neprekinuti sloj vlage na površini materijala i tada započinje period padajuće brzine sušenja. Što je veća temperatura, veća je i brzina sušenja pa će u kraćem vremenu, odnosno pri višem sadržaju vlage materijala započeti period padajuće brzine sušenja. Zbog neujednačene strukture ploški tikvica (meso, korica, koštice) ne može se uočiti očekivani trend utjecaja temperature na kritični sadržaj vlage materijala. Neujednačena struktura tikvica razlog je postojanja više perioda padajuće brzine sušenja. Osim toga uzorci su se tijekom sušenja deformirali te je dolazilo do smanjenja veličina pora.

Tablica 5. Relativna i apsolutna vlažnost zraka, početni i ravnotežni sadržaj vlage materijala pri različitim temperaturama

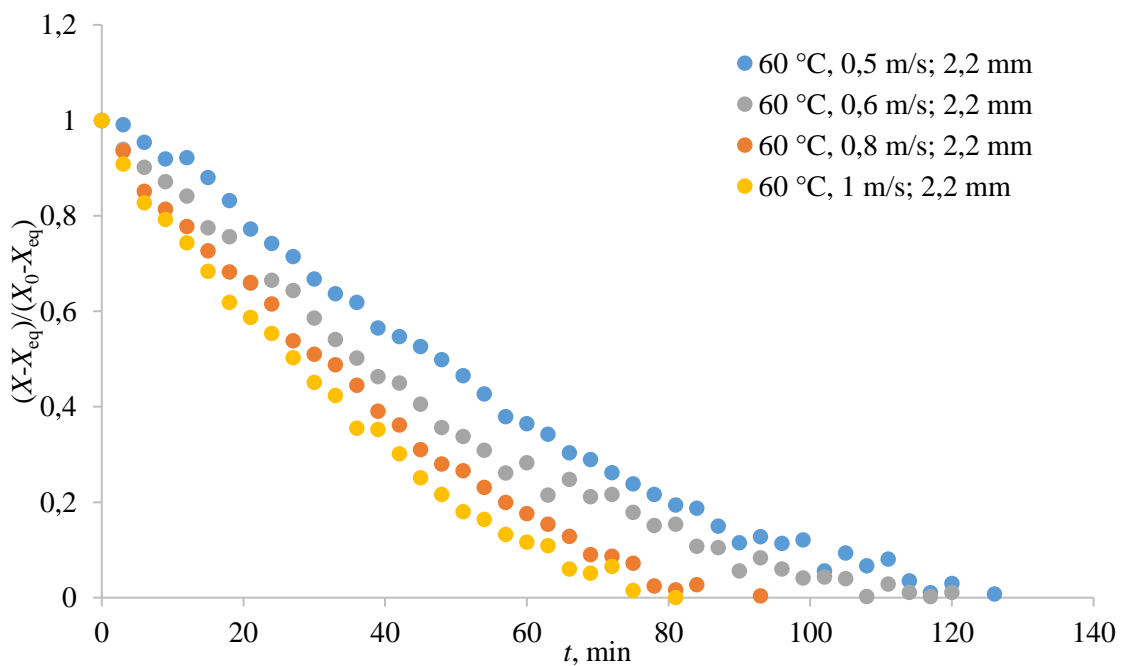
$T, ^\circ\text{C}$	$\varphi, \%$	$Y, \text{kg/kg}$	$X_0, \text{kg/kg}$	$X_{eq}, \text{kg/kg}$
40	9,7	0,004427	16,0816	0,1814
50	5,4	0,004121	21,4770	0,0594
60	3,0	0,003695	22,5783	0,0318
70	3,7	0,007167	14,4428	0,0743

U tablici 5. prikazane su relativna i apsolutna vlažnost zraka, kao i početni i ravnotežni sadržaj vlage materijala. S obzirom da zrak nije mogao biti kondicioniran, početna vlažnost zraka nije bila jednaka u svim eksperimentima. Isto tako, iako su sve tikvice kupljene na istom mjestu početni sadržaj vlage dosta je varirao. Vlažnost zraka i sadržaj vlage materijala utjecali su na nedostatak očekivanog trenda utjecaja temperature na kinetiku sušenja. Što je veći početni sadržaj vlage materijala i manja relativna te apsolutna vlažnost zraka to bi brzina sušenja trebala biti veća. Najmanja vlažnost zraka i najveći početni sadržaj vlage materijala prilikom

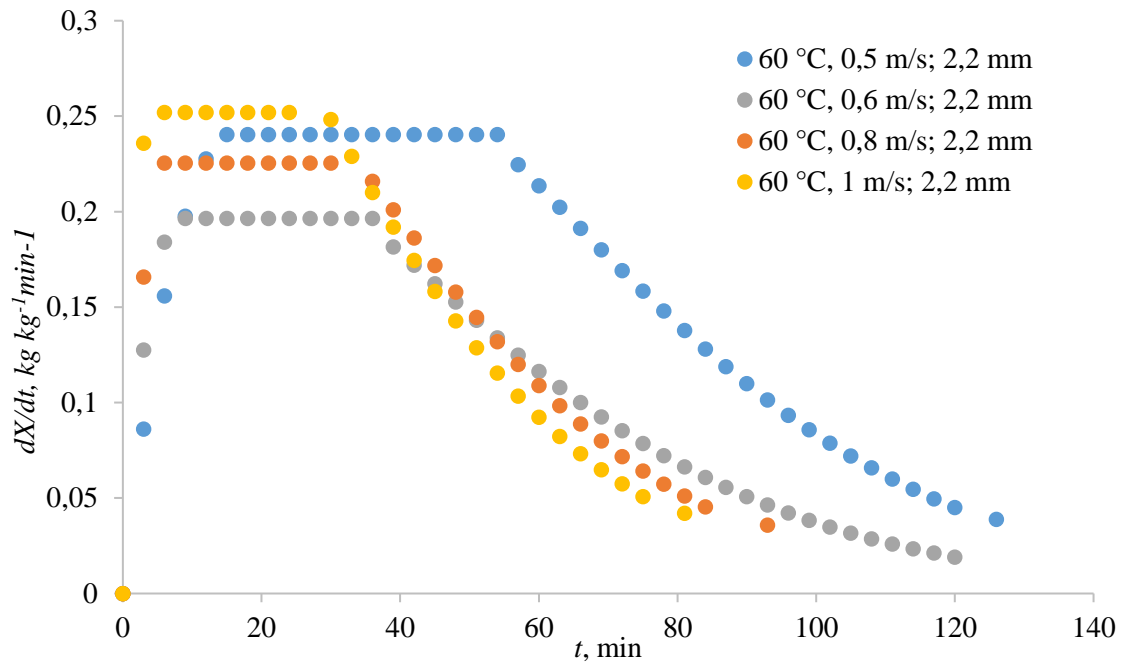
sušenja na 60 °C rezultirali su najvećom brzinom sušenja. Uz pretpostavku da su sve pore ispunjene vodom, veći početni sadržaj vlage materijala znači da ima više površinske vlage koja se uklanja tijekom perioda konstantne brzine sušenja. Ravnotežni sadržaj vlage materijala također bi trebao opadati s porastom temperature sušenja. Neočekivano veća vrijednost ostvarena pri najvišoj temperaturi sušenja, posljedica je najveće apsolutne vlažnosti ulaznog zraka.

4.1.2. Utjecaj brzine strujanja zraka

Na slikama 18. i 19. prikazan je utjecaj brzine strujanja zraka (0,5, 0,6, 0,8 i 1,0 m s⁻¹) na kinetiku sušenja uzorka tikvice debljine 2,2 mm, pri temperaturi od 60 °C. S porastom brzine strujanja zraka raste brzina sušenja te se smanjuje vrijeme potrebno da se postigne ravnoteža. Pri većim brzinama strujanja zraka povoljniji su hidrodinamički uvjeti, odnosno manji su otpori prijenosu (količine gibanja, topline i tvari), pa je veća brzina prijenosa topline i tvari.



Slika 18. Grafički prikaz promjene sadržaja vlage uzorka tikvica s vremenom pri brzinama strujanja zraka od 0,5, 0,6, 0,8 i 1,0 m s⁻¹



Slika 19. Grafički prikaz ovisnosti brzine sušenja uzoraka tikvica o vremenu sušenja pri brzinama strujanja zraka od 0,5, 0,6, 0,8 i 1,0 m s⁻¹

Tablica 6. Vrijednosti kritičnog sadržaja vlage i maksimalne brzine sušenja pri različitim brzinama strujanja zraka

v , m/s	t_{kr} , min	X_{kr} , kg/kg	$(dX/dt)_{max}$, kg/kgmin
0,5	54	9,66513	0,2403
0,6	36	7,426029	0,1965
0,8	30	7,966577	0,2254
1,0	24	8,708053	0,2519

Pri većim brzinama strujanja zraka postiže se veća maksimalna brzina sušenja, i to u kraćem vremenu, tablica 6. Također se s porastom brzine strujanja zraka smanjuje vrijeme trajanja perioda konstantne brzine sušenja. Do odstupanja dolazi pri brzini strujanja zraka od 0,5 m s⁻¹ što se može uočiti na slici 19. Brzina sušenja je veća nego pri većim brzinama strujanja zraka, a vrijeme trajanja perioda konstantne brzine sušenja je dulje od očekivanog kada se usporedi s ostalim istraženim brzinama strujanja zraka. Razlog odstupanja može biti nejednolika struktura i početni sadržaj vlage uzoraka te neujednačeni okolišni uvjeti, tablica 7. Znatno veći početni sadržaj vlage materijala (do 36%) uvjetuje dulje vrijeme trajanja perioda konstantne brzine sušenja, dok najmanja vlažnost zraka za posljedicu ima veću brzinu sušenja od onih ostvarenih

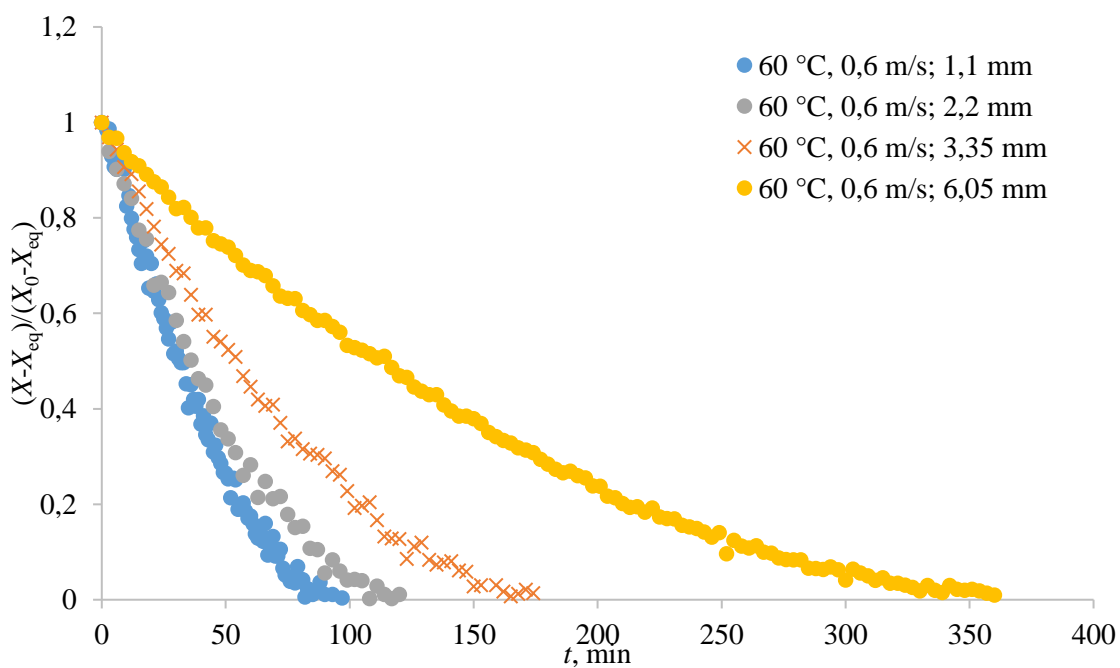
pri brzinama strujanja zraka od 0,6 i 0,8 m s⁻¹. Kritični sadržaj vlage materijala, pri najmanjoj brzini strujanja zraka, također je veći. S porastom brzine strujanja zraka kritični sadržaj vlage bi trebao rasti zbog različitih brzina kretanja vlage kroz unutrašnjost materijala te sa njegove površine. Pri većoj brzini strujanja zraka, vlaga se većom brzinom odvodi s površine materijala te se neprekinuti sloj vlage na površini materijala ne može održati jer se vlaga ne doprema dovoljno brzo na površinu. Također se može uočiti da se ravnotežni sadržaji vlage razlikuju. Iako se sušenje odvija pri istoj temperaturi i atmosferskom tlaku, zbog različite vlažnosti zraka i svojstava materijala na kraju sušenja ne postiže se isti ravnotežni sadržaj vlage.

Tablica 7. Relativna i apsolutna vlažnost zraka, početni i ravnotežni sadržaj vlage materijala pri različitim brzinama strujanja zraka

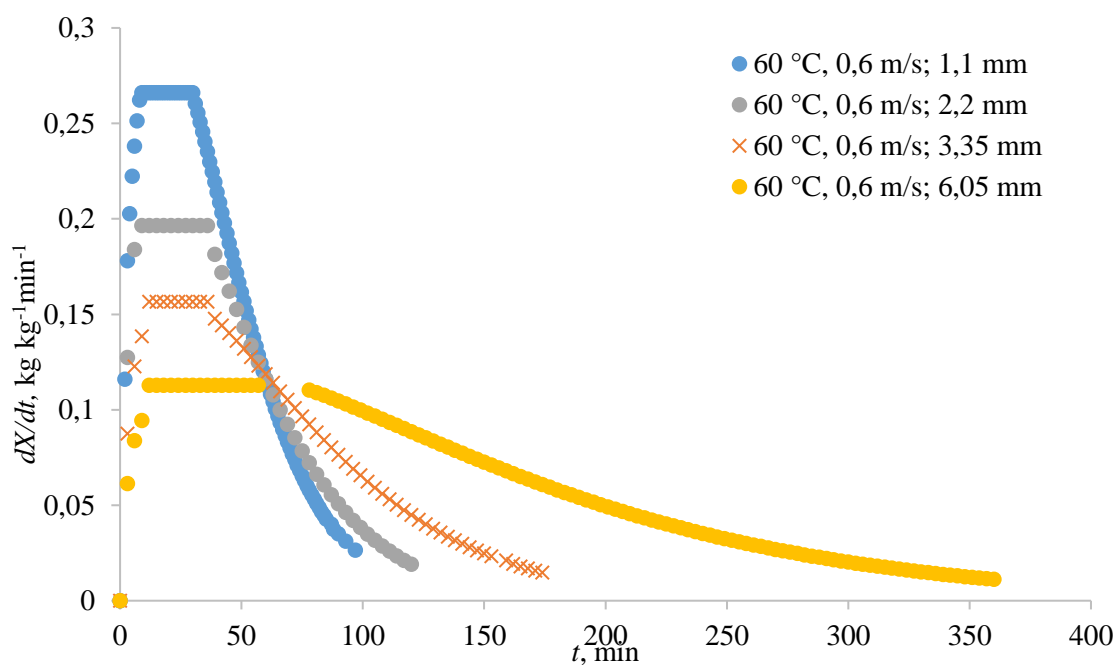
v , m/s	φ , %	Y , kg/kg	X_0 , kg/kg	X_{eq} , kg/kg
0,5	3,0	0,00370	22,5783	0,0318
0,6	3,2	0,00394	14,7198	0,0705
0,8	3,5	0,00432	15,5215	0,0924
1,0	3,6	0,00444	15,6679	0,0693

4.1.3. Utjecaj debljine materijala

Na slikama 20. i 21. prikazan je utjecaj debljine uzorka (1,10, 2,20, 3,35 i 6,05 mm) na kinetiku sušenja pri temperaturi od 60 °C i brzini strujanja zraka od 0,6 m s⁻¹. Na temelju dobivenih rezultata može se zaključiti da smanjenjem debljine uzorka raste brzina sušenja, odnosno smanjuje se vrijeme potrebno za sušenje. Vrijeme sušenja kraće je kod uzoraka manje debljine, jer sadrže manju masu vode koju je potrebno ukloniti i prisutni su manji unutrašnji otpori prijenosu tvari. Naime, tijekom perioda padajuće brzine sušenja otpor prijenosu tvari difuzijom kroz unutrašnjost materijala ovisi o putu difuzije, odnosno debljini materijala. Što je debljina uzorka manja, manji je i put difuzije te posljedično i pripadajući otpor (L/D). Kod uzoraka manje debljine postiže se veća maksimalna brzina sušenja, i to u kraćem vremenu. Vrijednosti maksimalne brzine sušenja za svaki eksperiment prikazane su u tablici 8. Vrijeme trajanja perioda konstantne brzine sušenja je najdulje kod najdebljeg uzorka, dok je najkraće kod najtanjeg uzorka.



Slika 20. Grafički prikaz promjene sadržaja vlage uzoraka tikvica različitih debljina (1,10, 2,20, 3,35 i 6,05 mm) s vremenom



Slika 21. Grafički prikaz ovisnosti brzine sušenja uzoraka tikvica različitih debljina (1,10, 2,20, 3,35 i 6,05 mm) o vremenu sušenja

Tablica 8. Vrijednosti kritičnog sadržaja vlage i maksimalne brzine sušenja pri različitim debljinama materijala

l , mm	t_{kr} , min	X_{kr} , kg/kg	$(dX/dt)_{max}$, kg/kgmin
1,10	30	8,476694	0,2661
2,20	36	7,426029	0,1965
3,35	39	9,070378	0,1566
6,05	60	16,31118	0,1128

U tablici 8. su prikazane vrijednosti kritičnog sadržaja vlage, i vremena u kojem se on postiže. S porastom debljine uzorka, povećava se vrijeme u kojima se postiže kritični sadržaj vlage, ali i njegova vrijednost. Kritični sadržaj vlage raste zbog većeg otpora prijenosu tvari u uzorcima veće debljine. Vrijednost je tim veća što je veći početni sadržaj vlage materijala.

Kao i u prethodnim eksperimentima neujednačenost početnih uvjeta (stanje okolišnog zraka te struktura i svojstva materijala) rezultiraju različitim ravnotežnim sadržajem vlage tikvica postignutim prilikom sušenja uzoraka različitih debljina, tablica 9. Bliske vrijednosti su ostvarene sušenjem uzoraka debljine 2,20 i 3,35 mm kada su razlike u vlažnosti zraka i početnog sadržaja vlage tikvica bile male.

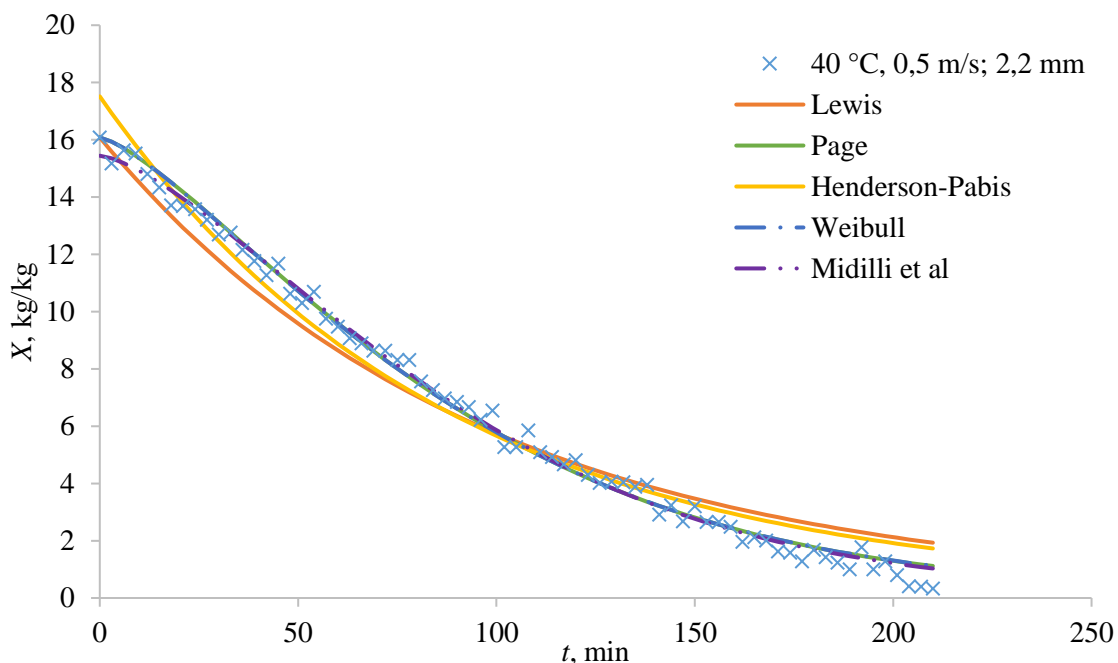
Tablica 9. Relativna i apsolutna vlažnost zraka, početni i ravnotežni sadržaj vlage materijala za različite debljine materijala

l , mm	φ , %	Y , kg/kg	X_0 , kg/kg	X_{eq} , kg/kg
1,10	4,1	0,00506	16,2339	0,0373
2,20	3,2	0,00394	14,7198	0,0705
3,35	3,5	0,00370	15,1384	0,0644
6,05	3,5	0,00432	23,5833	0,1364

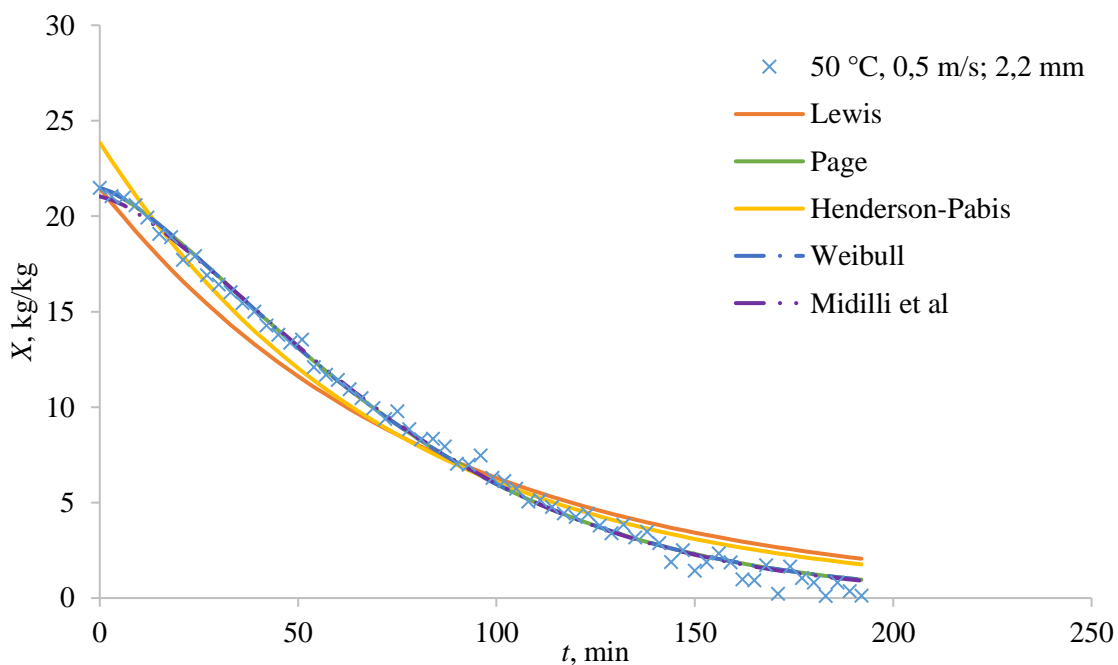
4.2. MATEMATIČKO MODELIRANJE KINETIKE SUŠENJA

Eksperimentalni podaci su aproksimirani Lewisovim, Pageovim, Henderson – Pabis, Weibull i Midilli et al modelom (slike 22. – 25. i 27. – 32). Parametri, kao i indeks korelacije R^2 , za svaki model prikazani su u tablicama 10 do 12.

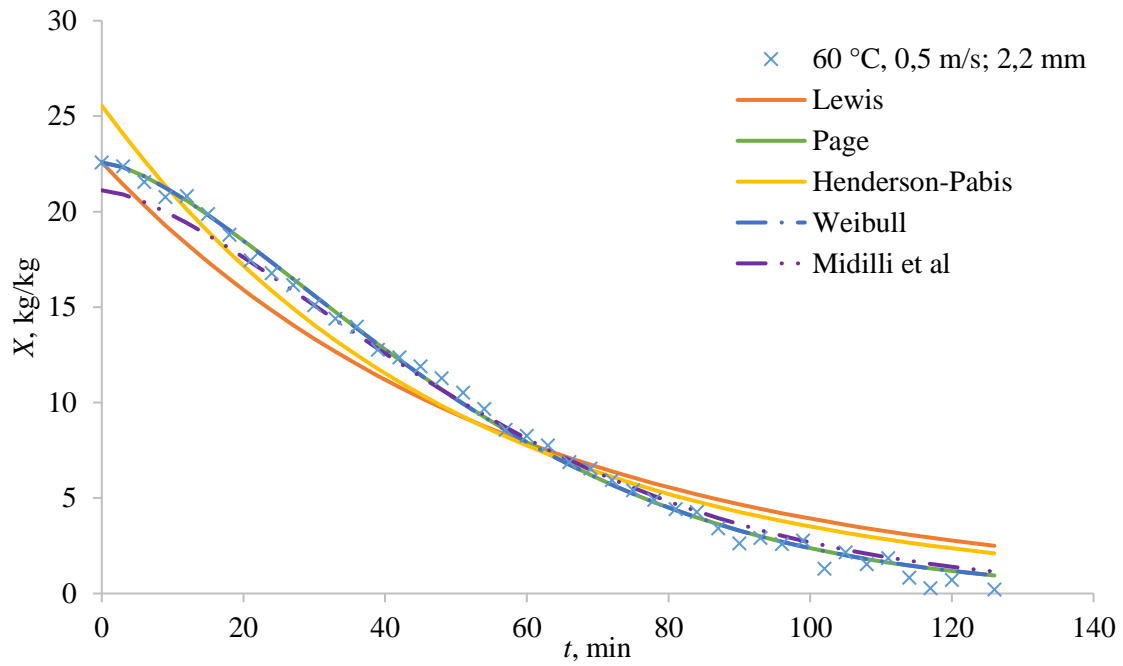
4.2.1. Utjecaj temperature



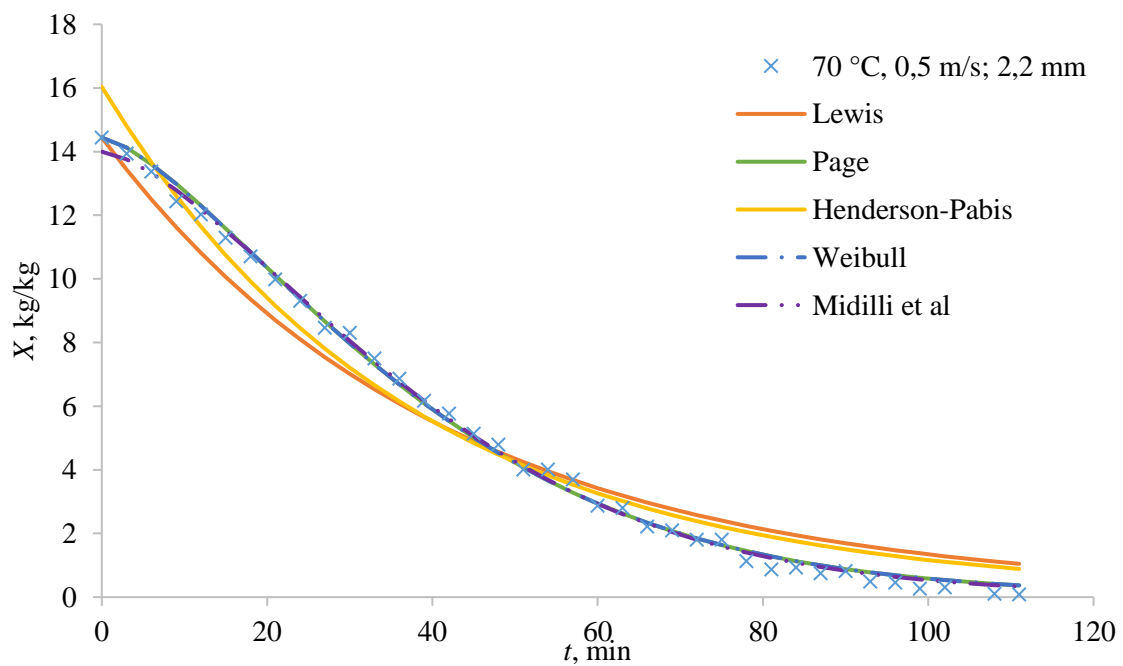
Slika 22. Aproksimacija eksperimentalnih podataka sušenja uzorka tikvice odabranim matematičkim modelima (40 °C, 0,5 m s⁻¹, 2,2 mm)



Slika 23. Aproksimacija eksperimentalnih podataka sušenja uzorka tikvice odabranim matematičkim modelima (50 °C, 0,5 m s⁻¹, 2,2 mm)



Slika 24. Aproksimacija eksperimentalnih podataka sušenja uzorka tikvice odabranim matematičkim modelima (60 °C, 0,5 m s⁻¹, 2,2 mm)



Slika 25. Aproksimacija eksperimentalnih podataka sušenja uzorka tikvice odabranim matematičkim modelima (70 °C, 0,5 m s⁻¹, 2,2 mm)

Tablica 10. Vrijednosti parametara modela korištenih za sušenje uzorka tikvice debljine 2,2 mm pri brzini strujanja zraka od 0,5 m s⁻¹

		TEMPERATURA			
		40 °C	50 °C	60 °C	70 °C
Lewis	$K \cdot 10^4, 1/s$	1,75	2,06	2,93	4,04
	R^2	0,9658	0,9639	0,9489	0,9621
Page	$k \cdot 10^6$	8,60	7,89	4,63	13,18
	n	1,35	1,38	1,51	1,43
	R^2	0,9937	0,9954	0,9964	0,9971
Henderson-Pabis	a_1	1,09	1,11	1,13	1,11
	$k_1 \cdot 10^4, 1/s$	1,92	2,29	3,32	4,47
	R^2	0,9762	0,9781	0,9694	0,9751
Weibull	β	1,34	1,38	1,51	1,43
	α, s	5814,06	4994,97	3486,03	2578,20
	R^2	0,9937	0,9954	0,9964	0,9971
Midilli et al	a_2	0,96	0,98	0,94	0,97
	$k_2 \cdot 10^6$	3,41	5,01	4,05	6,91
	n_2	1,45	1,43	1,51	1,51
	b	0	0	0	0
	R^2	0,9949	0,9957	0,9912	0,9978

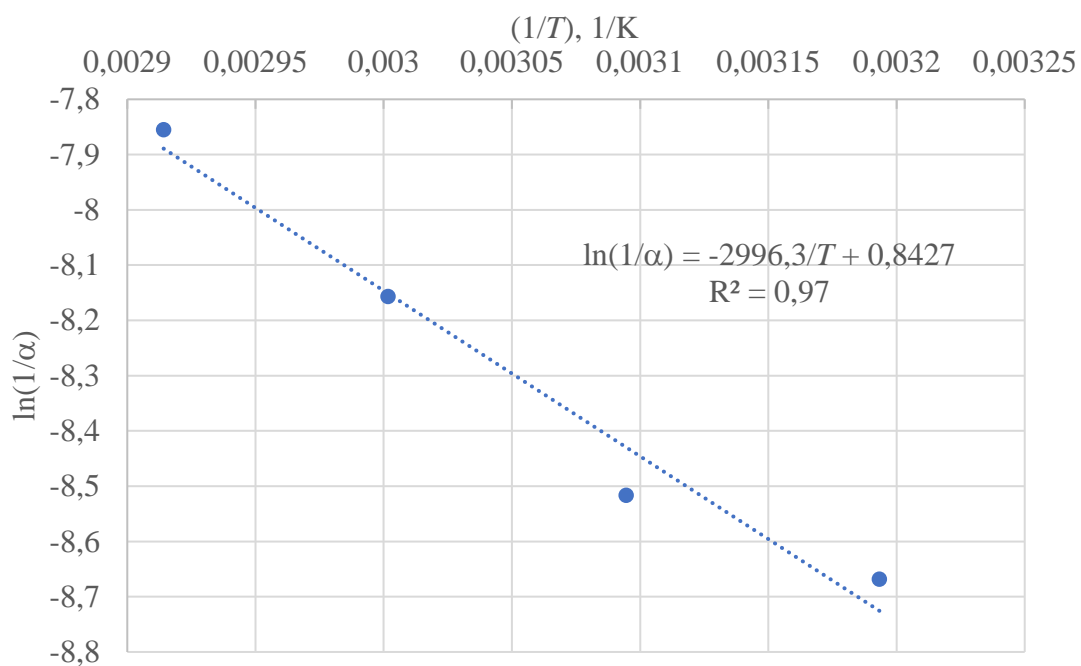
Na temelju vrijednosti R^2 može se zaključiti da eksperimentalne podatke (pri 40, 50 i 70 °C) najbolje opisuje Midilli et al model. Povećanjem temperature odstupanje Midilli et al modela se smanjuje. U slučaju eksperimenta provedenog pri 60 °C najviši indeks korelacije pokazuju Pageov i Weibull model. Najveće odstupanje eksperimentalnih podataka od modela prisutno je kod jednoparametarskog Lewisovog modela, koji pri svim temperaturama ima najniži indeks korelacije. Naime, navedeni model uspješno opisuje kinetiku sušenja materijala čiji je početni sadržaj vlage manji od kritičnog. Što je dulji period konstantne brzine sušenja to je odstupanje veće. S obzirom da Midilli et al model ne opisuje krivulju sušenja u periodu stabilizacije (ne procjenjuje precizno niti početni sadržaj vlage materijala), može se zaključiti da kinetiku sušenja tikvica najbolje opisuju Pageov i Weibullovi modeli. Konstante sušenja procijenjene primjenom Lewisovog te Henderson-Pabisovog modela rastu s porastom temperature, što je u skladu s očekivanim s obzirom da raste i brzina sušenja. Parametri Pageovog modela ne prate očekivani trend. Naime, s porastom temperature parametar k bi trebao rasti, a ukoliko su svi ostali uvjeti provedbe procesa jednaki (osim temperature) vrijednost parametra n ne bi se trebala mijenjati. Razlog odstupanja od očekivanog su različita svojstva zraka i vlažnog

materijala. Parametar Weibullovog modela α opada s porastom temperature, dok parametar β uglavnom raste (uz odstupanje pri 60 °C). Vrijeme potrebno da se ukloni 63 % vlage prisutne u materijalu približno je jednako vrijednosti parametra α (relativna pogreška do maksimalno 3%) što potvrđuje dobro slaganje modela i mjernih podataka. Povećanje vrijednosti parametra β s porastom temperature upućuje na smanjenje brzine sušenja na početku procesa.

S obzirom da se kinetika sušenja uspješno može opisati Weibullovim modelom, utjecaj temperature na parametar raspodjele može se opisati jednačbom Arrheniusovog tipa (11), slika 26.:

$$\ln\left(\frac{1}{\alpha}\right) = \ln\left(\frac{1}{\alpha_0}\right) - \frac{E_{a,\alpha}}{RT} \quad (11)$$

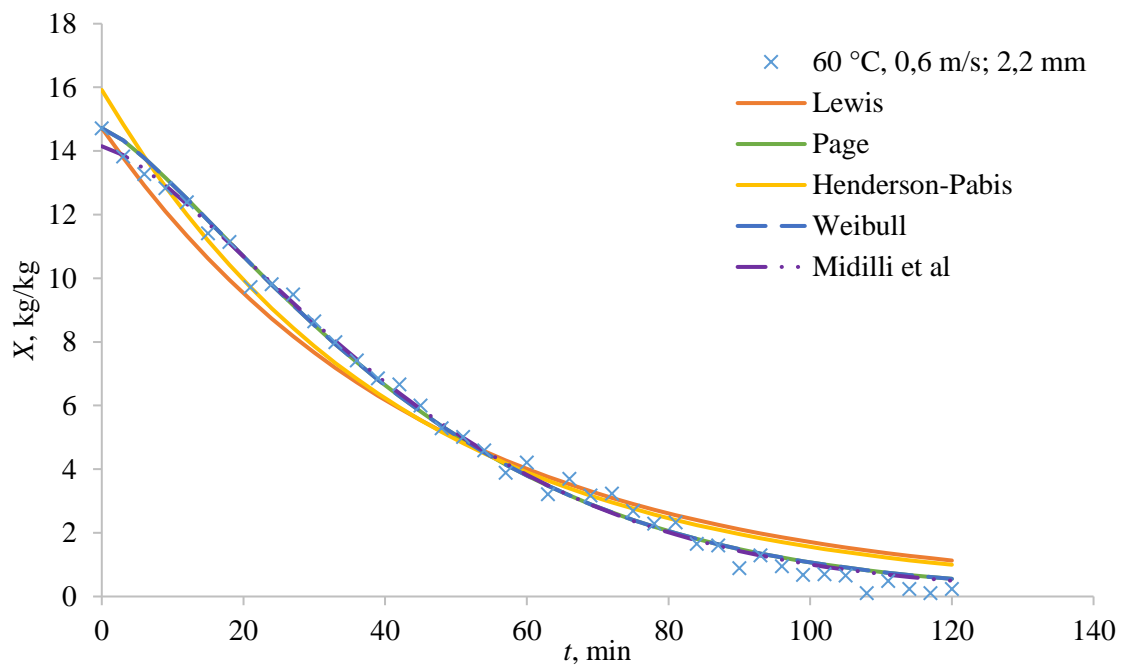
Gdje su: $(1/\alpha_0)$, s^{-1} – faktor frekvencije; E_a , kJ/mol – energija aktivacije; $R=8,314$ J/mol K – opća plinska konstanta i T , K – apsolutna temperatura.



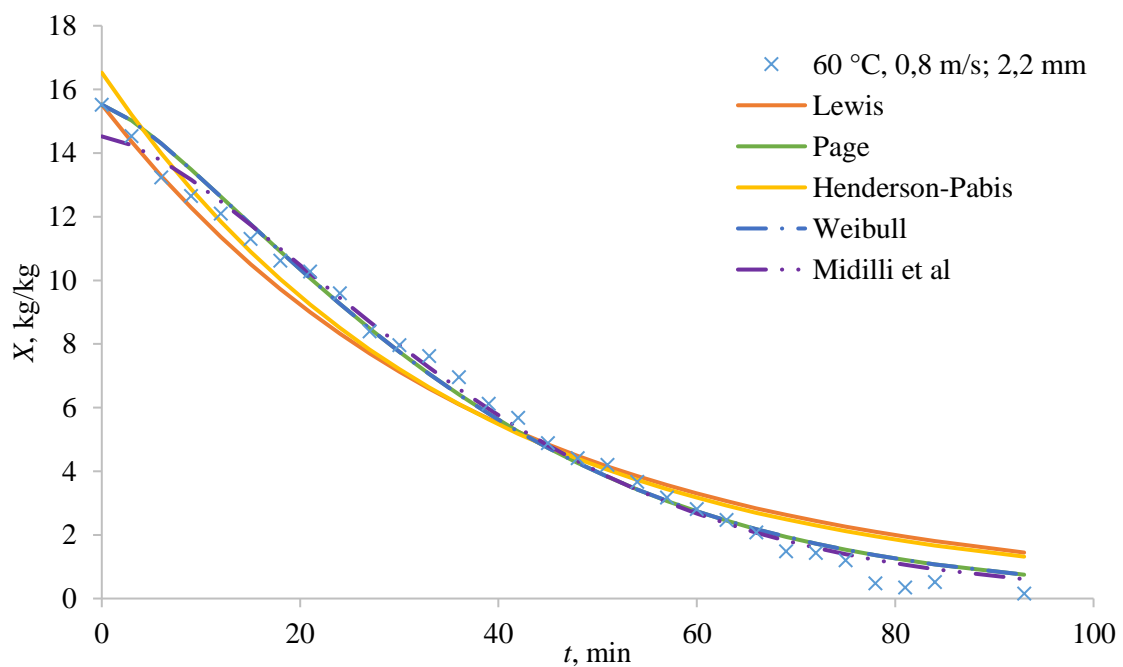
Slika 26. Procjena energije aktivacije i faktora frekvencije

Procijenjena energija aktivacije iznosi 24,91 kJ/mol a faktor frekvencije 2,323 s^{-1} .

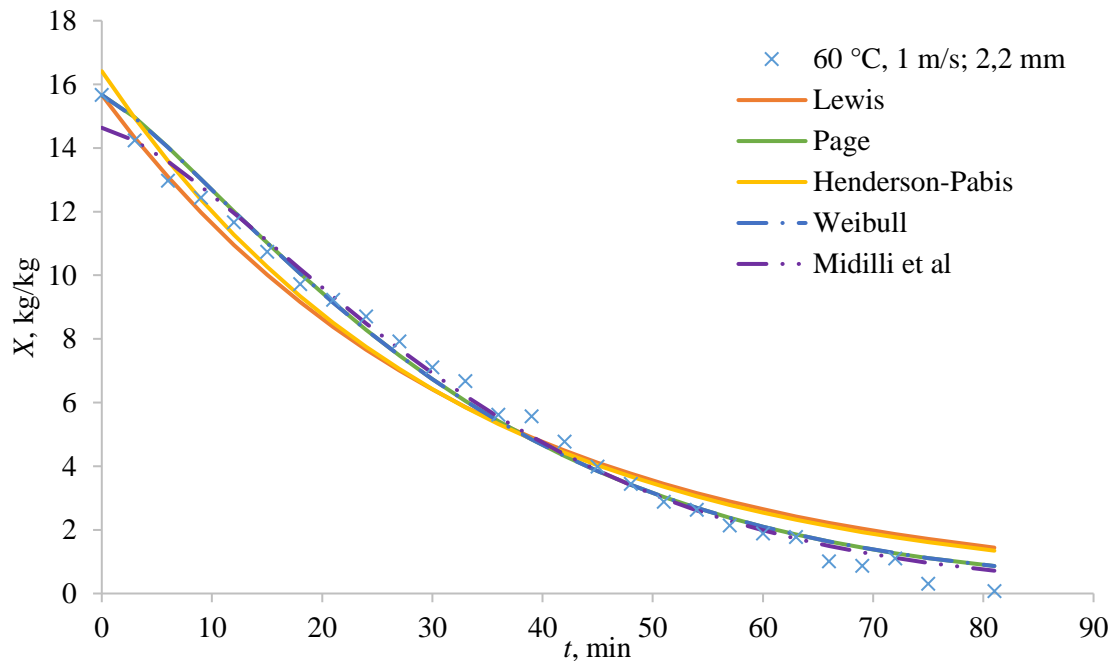
4.2.2. Utjecaj brzine strujanja zraka



Slika 27. Aproksimacija eksperimentalnih podataka sušenja uzorka tikvica odabranim matematičkim modelima ($60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0,6\text{ m s}^{-1}$, $2,2\text{ mm}$)



Slika 28. Aproksimacija eksperimentalnih podataka sušenja uzorka tikvica odabranim matematičkim modelima ($60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0,8\text{ m s}^{-1}$, $2,2\text{ mm}$)



Slika 29. Aproksimacija eksperimentalnih podataka sušenja uzorka tikvica odabranim matematičkim modelima (60 °C, 1,0 m s⁻¹, 2,2 mm)

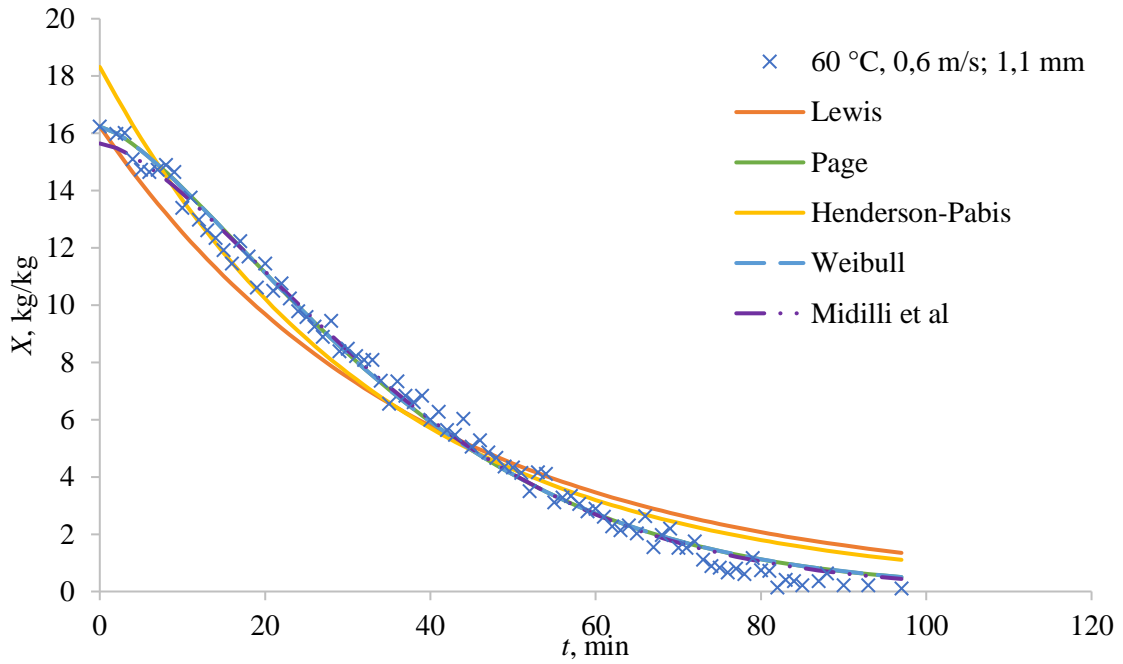
Od odabranih matematičkih modela, Pageov i Weibullov model najbolje opisuju kinetiku sušenja tikvica pri različitim brzinama strujanja zraka, slike 24., 27. – 29. i tablica 11. Iako je indeks korelacije Midilli et al modela najveći, zbog pogreške u procjeni početnog sadržaja vlage, ovaj model nije odabran kao najuspješniji. Isto odstupanje uočeno je primjenom Henderson-Pabisovog modela. Najveće odstupanje eksperimentalnih podataka od modela prisutno je kod Lewisovog modela, koji pri svim brzinama strujanja zraka ima najniži indeks korelacije. Konstante sušenja svih modela (osim Weibullovog, kojemu niti jedan parametar ne odgovara konstanti sušenja) rastu s porastom brzine strujanja zraka s obzirom da raste i brzina sušenja. Vrijednost parametra n opada s porastom brzine strujanja zraka. Vrijednosti parametara Weibullovog modela α i β opadaju s porastom brzine strujanja zraka. Vrijeme potrebno da se ukloni 63 % vlage prisutne u materijalu približno je jednako vrijednosti parametra α što potvrđuje dobro slaganje modela i mjernih podataka. Što je manja vrijednost parametra β veća je brzina sušenja na početku procesa, što je u skladu s literaturom³¹. Za sve istražene uvjete provedbe procesa sušenja tikvica u konvekcijskom tunelnom sušioniku parametar Midilli et al modela, b , jednak je nuli pa se model svodi samo na prvi član.

Tablica 11. Vrijednosti parametara modela korištenih za sušenje uzorka debljine 2,2 mm pri temperaturi od 60 °C

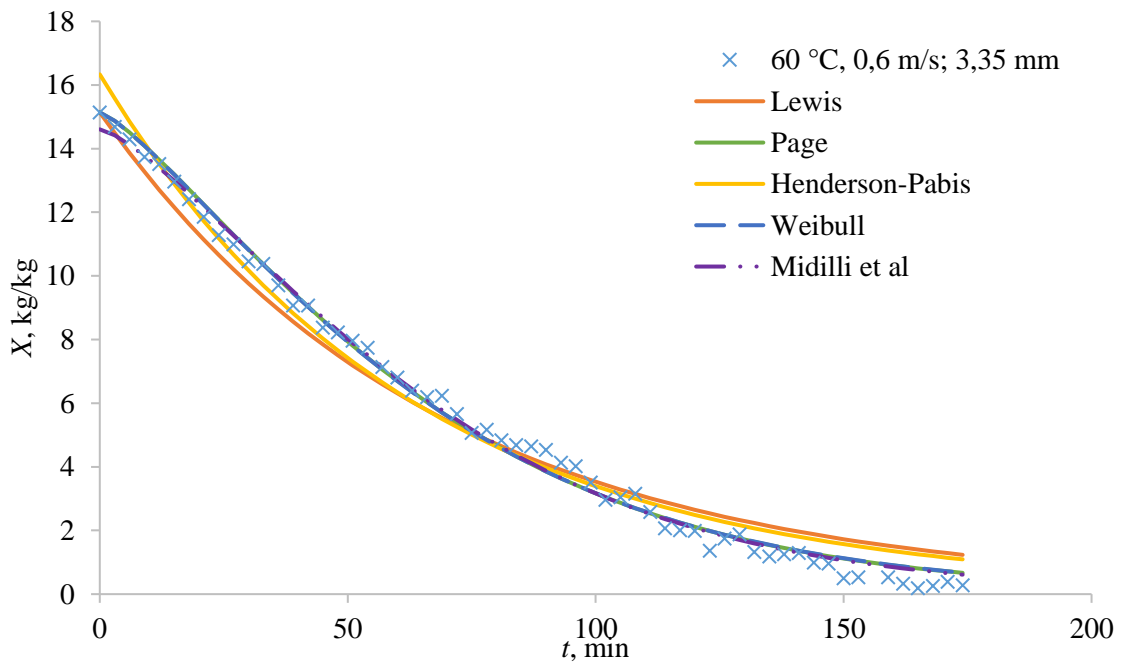
		BRZINA STRUJANJA ZRAKA			
		0,5 m s ⁻¹	0,6 m s ⁻¹	0,8 m s ⁻¹	1,0 m s ⁻¹
Lewis	$K \cdot 10^4, 1/s$	2,93	3,65	4,36	5,00
	R^2	0,9489	0,9713	0,9655	0,9727
Page	$k \cdot 10^5$	0,46	2,83	3,28	6,59
	n	1,51	1,32	1,33	1,26
	R^2	0,9964	0,9941	0,9896	0,9893
Henderson-Pabis	a_1	1,13	1,08	1,07	1,05
	$k_1 \cdot 10^4, 1/s$	3,32	3,94	4,65	5,25
	R^2	0,9694	0,9789	0,9712	0,9759
Weibull	β	1,50	1,32	1,33	1,26
	α, s	3486,03	2837,42	2351,52	2047,73
	R^2	0,9964	0,9941	0,9896	0,9893
Midilli et al	a_2	0,94	0,96	0,94	0,93
	$k_2 \cdot 10^5$	0,41	1,33	0,76	1,69
	n_2	1,51	1,40	1,51	1,43
	B	0	0	0	0
	R^2	0,9912	0,9951	0,9930	0,9926

4.2.3. Utjecaj debljine materijala

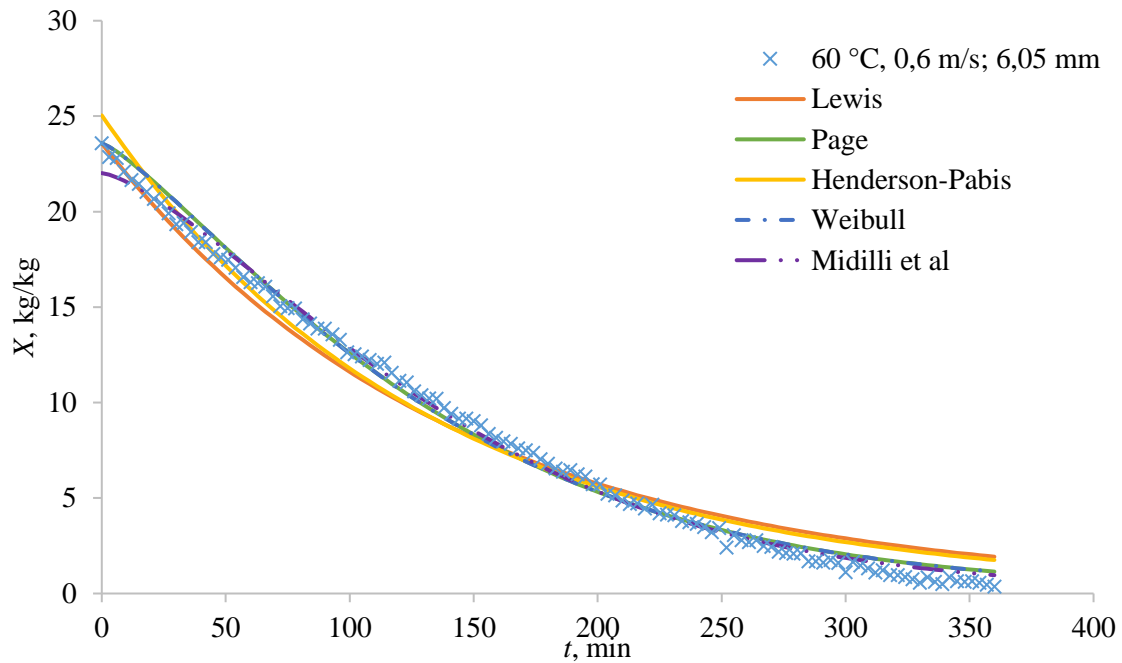
Kinetičke krivulje sušenja tikvica različitih debljina najbolje se opisuju Pageovim i Weibullovim modelom ($R^2 > 0,99$), slike 27., 30. – 32. i tablica 12. Midilli et al te Henderson-Pabis model nisu primjenljivi zbog odstupanja u procjeni početnog sadržaja vlage materijala. Najmanji indeks korelacije dobiven je primjenom Lewisovog modela zbog dugačkog perioda konstantne brzine sušenja. Konstante sušenja svih primijenjenih modela opadaju s porastom debljine materijala, što je u skladu s očekivanim jer su vrijednosti konstanti sušenja proporcionalne brzini sušenja. Vrijednost parametra Pageovog modela, n , opada s povećanjem debljine materijala što je u skladu s literaturnim podacima³³. Utjecaj debljine materijala na parametre Weibullovog modela u skladu su s utjecajem debljine na kinetiku sušenja.



Slika 30. Aproksimacija eksperimentalnih podataka sušenja uzorka tikvice odabranim matematičkim modelima (60 °C, 0,6 m s⁻¹, 1,10 mm)



Slika 31. Aproksimacija eksperimentalnih podataka sušenja uzorka tikvice odabranim matematičkim modelima (60 °C, 0,6 m s⁻¹, 3,35 mm)



Slika 32. Aproximacija eksperimentalnih podataka sušenja uzorka tikvice odabranim matematičkim modelima (60 °C, 0,6 m s⁻¹, 6,05 mm)

Tablica 12. Vrijednosti parametara modela korištenih za sušenje uzorka različite debljine pri brzini strujanja zraka od 0,6 m s⁻¹ na temperaturi od 60 °C

		DEBLJINA UZORKA			
		1,1 mm	2,2 mm	3,35 mm	6,05 mm
Lewis	$K \cdot 10^4, 1/s$	4,32	3,65	2,45	1,19
	R^2	0,9549	0,9713	0,9748	0,9770
Page	$k \cdot 10^5$	1,62	2,83	2,25	1,19
	n	1,42	1,32	1,28	1,25
	R^2	0,9928	0,9941	0,9942	0,9934
Henderson-Pabis	a_1	1,13	1,08	1,08	1,06
	$k_1 \cdot 10^4, 1/s$	4,88	3,94	2,64	1,27
	R^2	0,9724	0,9789	0,9821	0,9815
Weibull	β	1,42	1,32	1,28	1,25
	α, s	2381,30	2837,42	4199,05	8638,98
	R^2	0,9928	0,9941	0,9942	0,9934
Midilli et al	a_2	0,96	0,96	0,97	0,93
	$k_2 \cdot 10^5$	0,76	1,33	1,14	0,27
	n_2	1,51	1,40	1,36	1,41
	b	0	0	0	0
	R^2	0,9937	0,9951	0,9950	0,9961

4.3. UTJECAJ UVJETA PROVEDBE PROCESA NA EFEKTIVNI DIFUZIJSKI KOEFICIJENT

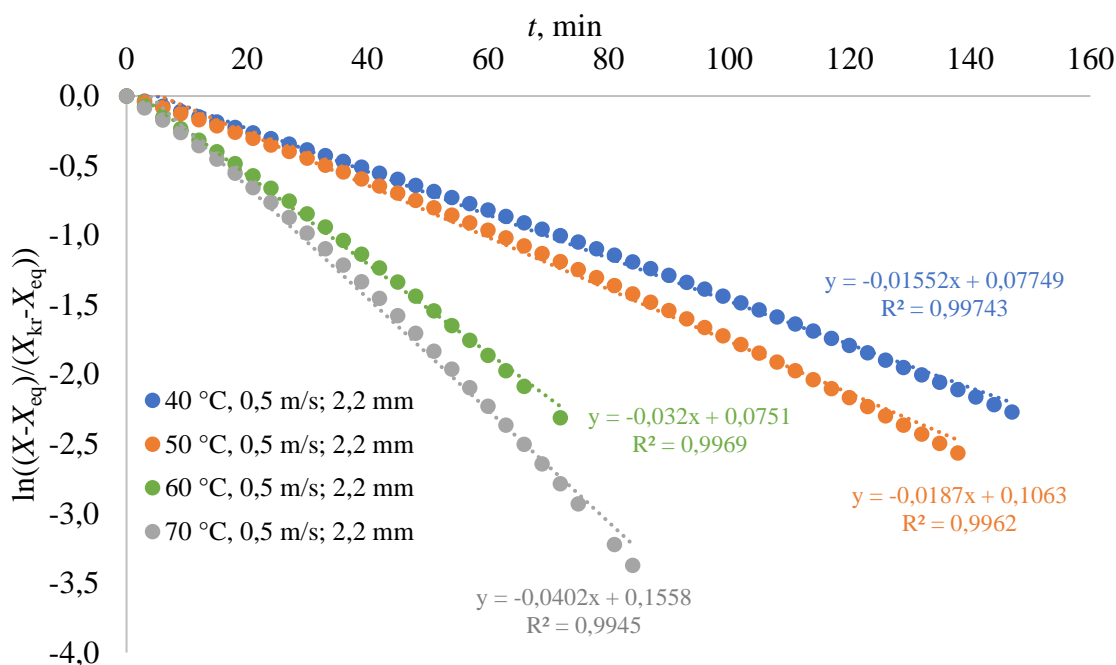
Kako na temelju eksperimentalnih podataka nije moguće sa sigurnošću odrediti kojim se mehanizmom kreće vlaga kroz unutrašnjost materijala, za period padajuće brzine sušenja određen je efektivni difuzijski koeficijent koji objedinjuje sve mehanizme (kapilarni tok, difuzija pare, difuzija kapljevine, Knudsenova difuzija). Iz nagiba linearnih ovisnosti prirodnog logaritma neostvarene promjene sadržaja vlage materijala o vremenu, prikazanih na slikama 33., 36. i 38., izračunava se D_{eff} .

$$nagib = \frac{\pi^2 * D_{eff}}{l^2} \quad (12)$$

pri čemu se l odnosi na debljinu uzorka tikvice, odnosno ploče, ako se sušenje odvija samo s jedne strane.

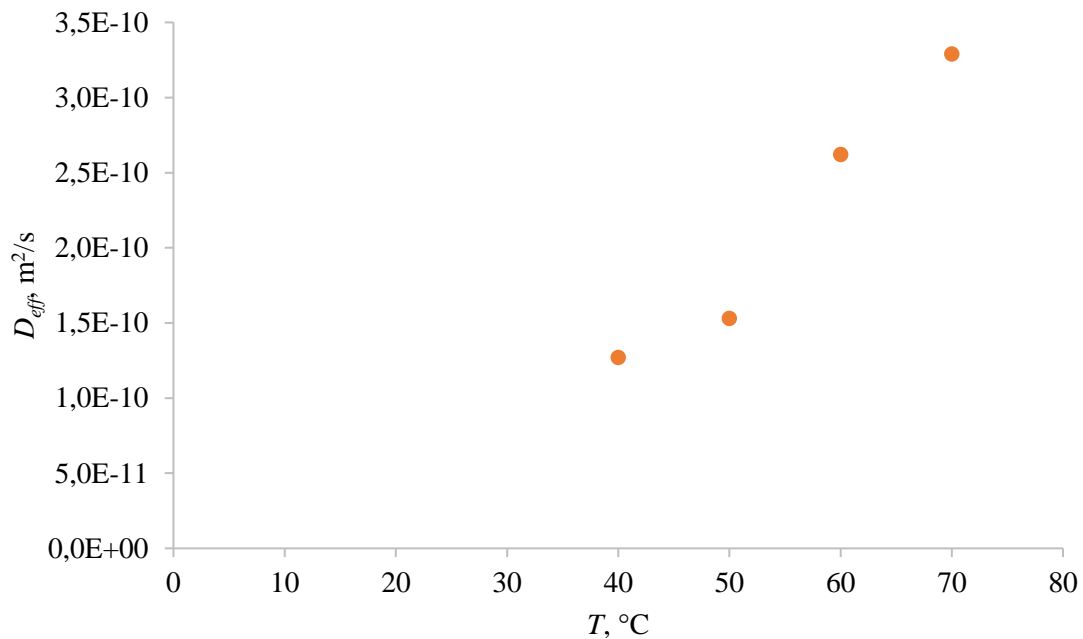
4.3.1. Utjecaj temperature

S obzirom na male promjene u nagibu pravaca prisutnih zbog postojanja više od jednog perioda padajuće brzine sušenja, za cijeli je period procijenjen jedinstveni efektivni difuzijski koeficijent, slika 33.



Slika 33. Određivanje efektivnog difuzijskog koeficijenta za sušenje uzorka tikvice pri različitim temperaturama u periodu padajuće brzine sušenja

Na slici 34. prikazana je ovisnost procijenjenih vrijednosti efektivnog difuzijskog koeficijenta, D_{eff} , o temperaturi, T . Kako s porastom temperature raste i brzina sušenja dolazi i do porasta vrijednosti efektivnog difuzijskog koeficijenta. Procijenjene su vrijednosti reda veličine koji odgovara literaturnim vrijednostima³¹ efektivnog difuzijskog koeficijenta za sušenje povrća.



Slika 34. Grafički prikaz ovisnosti efektivnog difuzijskog koeficijenta o temperaturi

S obzirom da se kinetika sušenja tikvica može uspješno opisati Weibullovim modelom, moguće je procijeniti i difuzijski koeficijent za vodu primjenom normiranog Weibullovog modela³⁴(lit):

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \exp\left(-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right) = \exp\left(-\left(\frac{t \cdot D}{L^2}\right)^\beta\right) \quad (13)$$

Gdje su D , m²/s – koeficijent difuzije vode a L , m – debljina materijala (sušeno s jedne strane). Model pretpostavlja da je brzina sušenja pod kontrolom difuzije vode, odnosno da se glavni otpor nalazi na strani materijala koji se suši.

Geometrijski faktor, R_g , izračunat je korištenjem izraza:

$$R_g = \frac{D}{D_{eff}} \quad (14)$$

Brzina difuzije vode kroz unutrašnju strukturu materijala raste s porastom temperature pa zbog toga rastu i vrijednosti difuzijskog koeficijenta, tablica 13. Difuzijski koeficijent za vodu procijenjen je na temelju ovisnosti sadržaja vlage materijala o vremenu za cijeli tijek sušenja, odnosno uključuje i period konstantne brzine sušenja pa je i njegova vrijednost veća od efektivnog difuzijskog koeficijenta. Vrijednosti geometrijskog faktora manje su od literaturnih^{31,34}. Naime, na geometrijski faktor utječe kontrolirajući mehanizam odnosno glavni otpor prijenosu tvari. Za tanku ploču je njegova vrijednost 0,1 kada je proces pod kontrolom vanjskih uvjeta, te 13,1 kada se glavni otpor nalazi na strani materijala. Kako se procijenjene vrijednosti nalaze unutar navedenog intervala može se zaključiti da na brzinu sušenja utječu i vanjski i unutrašnji otpori. Osim toga, vrijednost geometrijskog faktora nije stalna (što je također navedeno u literaturi), već opada s porastom temperature. Razlog tome je vrlo vjerojatno promjena geometrijskih karakteristika uzoraka tikvica tijekom sušenja zbog skupljanja koje je izraženije pri višoj temperaturi.

Tablica 13. Utjecaj temperature na difuzijski koeficijent vode, D i geometrijski faktor, R_g

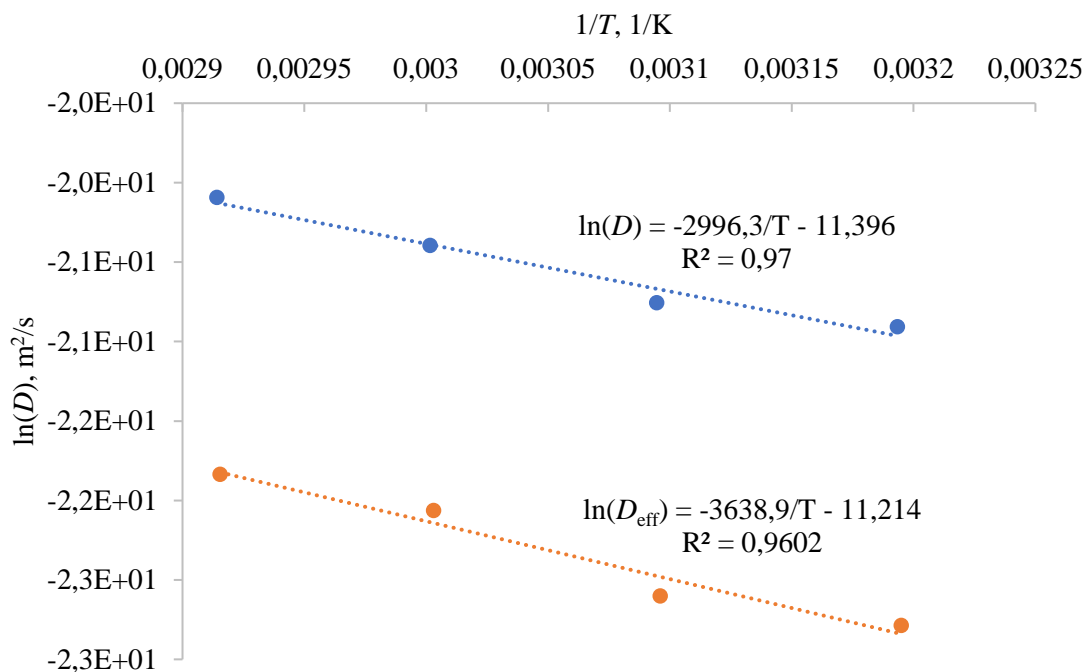
$T, ^\circ\text{C}$	$D_{eff} \cdot 10^{10}, \text{m}^2/\text{s}$	$D \cdot 10^9, \text{m}^2/\text{s}$	R_g
40	1,270	0,833	6,6
50	1,529	0,970	6,3
60	2,620	1,388	5,3
70	3,290	1,877	5,7

Ovisnost difuzijskog koeficijenta o temperaturi također se može opisati jednadžbom Arrheniusova tipa:

$$\ln D = \ln D_0 - \frac{E_a}{RT} \quad (15)$$

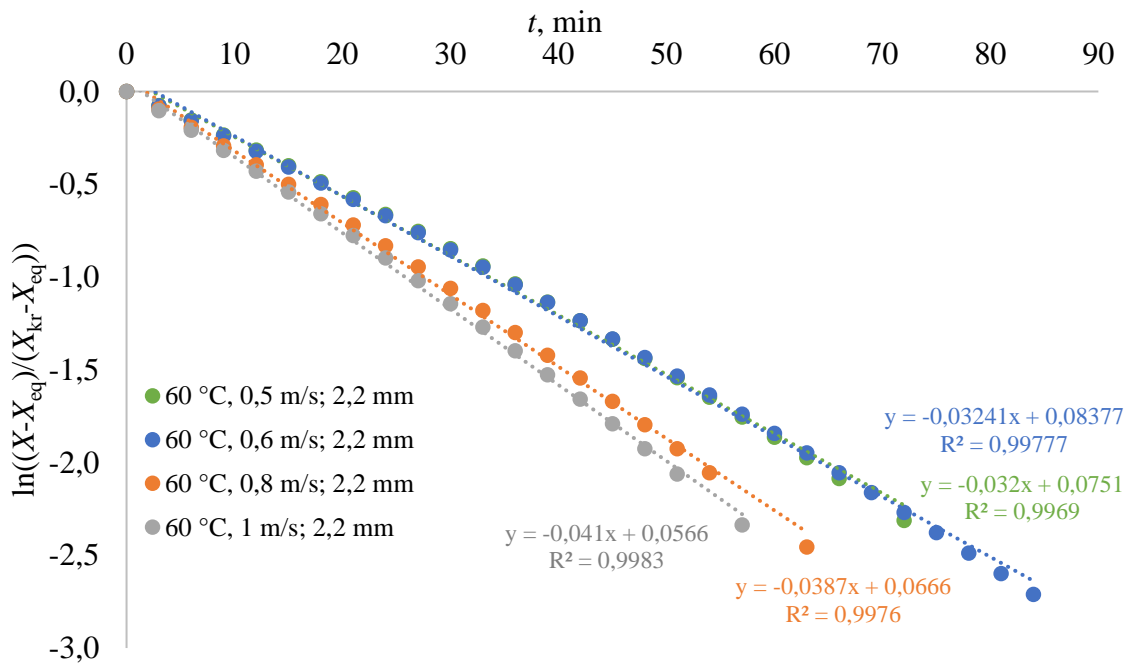
Na slici 35. prikazana je navedena ovisnost za procijenjene vrijednosti difuzijskog koeficijenta za vodu i efektivnog difuzijskog koeficijenta.

Energije aktivacije za difuziju vode i kombinirani mehanizam (efektivni difuzijski koeficijent) su 24,91 kJ/mol i 30,25 kJ/mol, a pripadajući faktori frekvencije $1,12 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ i $1,35 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$.



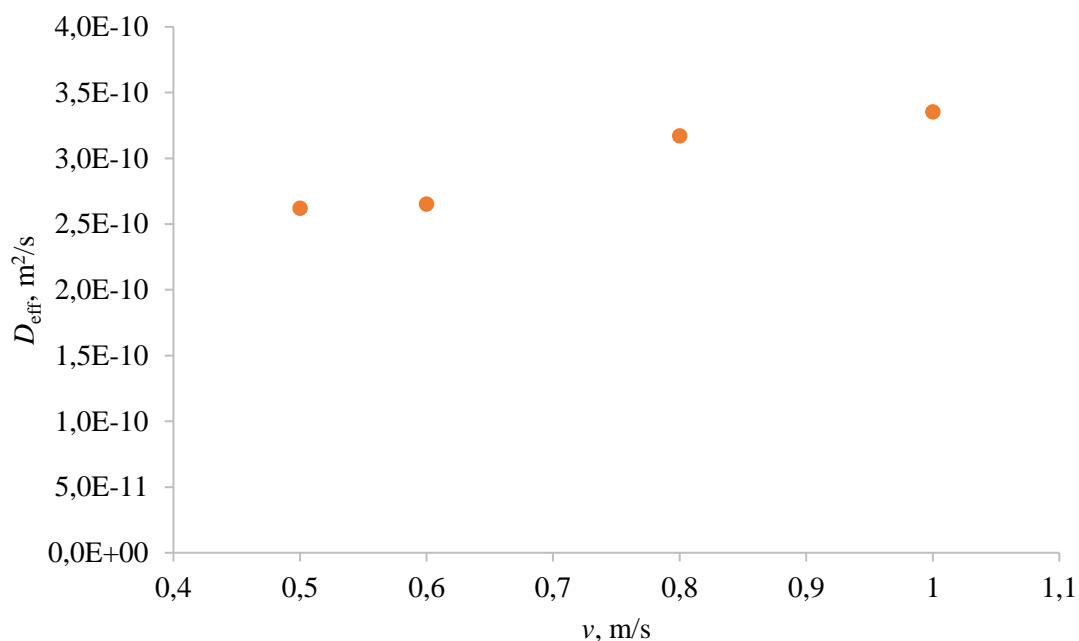
Slika 35. Procjena energije aktivacije i faktora frekvencije – utjecaj temperature na difuzijski koeficijent (za vodu i efektivni difuzijski koeficijent)

4.3.2. Utjecaj brzine strujanja zraka



Slika 36. Određivanje efektivnog difuzijskog koeficijenta za sušenje uzorka tikvica pri različitim brzinama strujanja zraka u periodu padajuće brzine sušenja

Na slici 36. prikazana je ovisnost neostvarene promjene sadržaja vlage materijala o vremenu tijekom perioda padajuće brzine sušenja pri različitim brzinama strujanja zraka. S porastom brzine strujanja zraka raste nagib pravca, iz čega se može zaključiti da raste i brzina prijenosa tvari difuzijom.



Slika 37. Grafički prikaz ovisnosti efektivnog difuzijskog koeficijenta o brzini strujanja zraka

Na slici 37. prikazan je utjecaj brzine strujanja zraka na efektivni difuzijski koeficijent, D_{eff} . Porastom brzine strujanja dolazi do porasta efektivnog difuzijskog koeficijenta, zbog veće brzine sušenja.

Tablica 14. Utjecaj brzine strujanja zraka na difuzijski koeficijent vode, D i geometrijski faktor, R_g

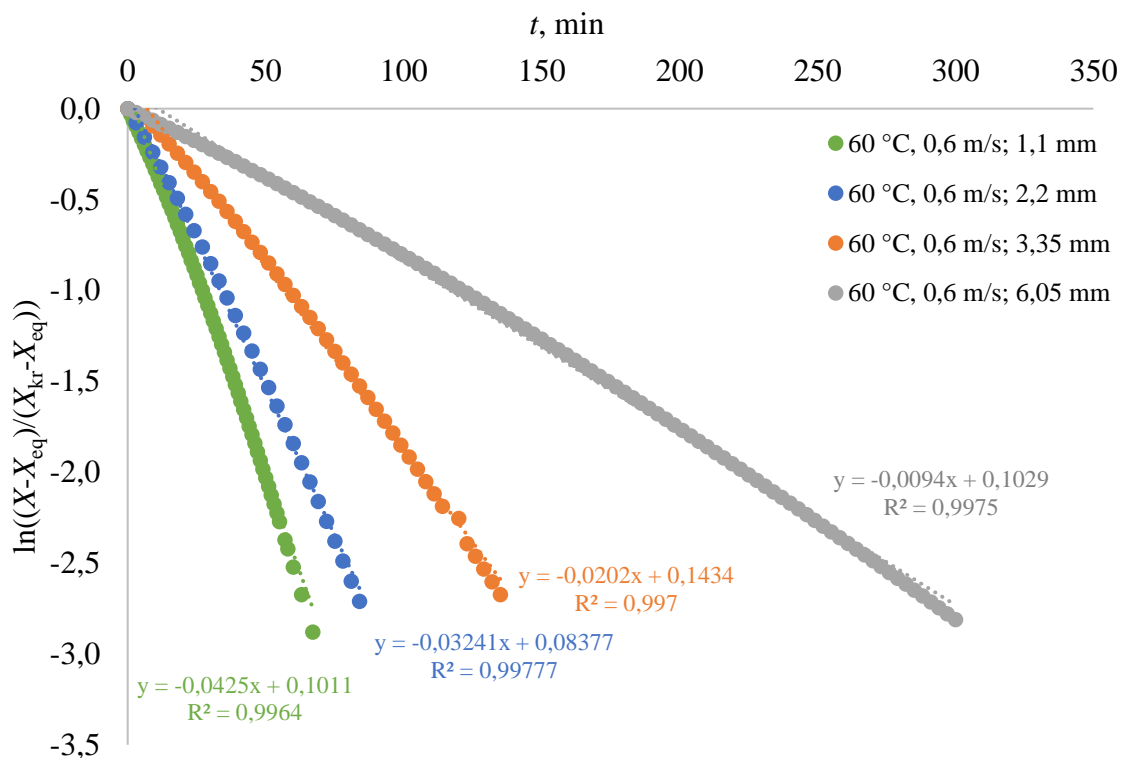
$v, \text{ m/s}$	$D_{\text{eff}} \cdot 10^{10}, \text{ m}^2/\text{s}$	$D \cdot 10^9, \text{ m}^2/\text{s}$	R_g
0,5	2,620	1,388	5,3
0,6	2,652	1,706	6,4
0,8	3,170	2,058	6,5
1,0	3,352	2,364	7,1

U tablici 14. prikazan je utjecaj brzine strujanja zraka na koeficijent difuzije vode procijenjen na temelju normiranog Weibullovog modela te geometrijski faktor. Koeficijent difuzije vode i

geometrijski faktor raste s porastom brzine strujanja zraka. Koeficijent difuzije raste zbog povoljnijih hidrodinamičkih otpora, odnosno smanjenja vanjskog otpora procesa prijenosa tvari. Porast vrijednosti geometrijskog faktora upućuje na povećanje unutrašnjeg otpora prijenosu tvari u odnosu na vanjski otpor, odnosno znatniju promjenu unutrašnje strukture materijala pri većim brzinama strujanja zraka.

4.3.3. Utjecaj debljine materijala

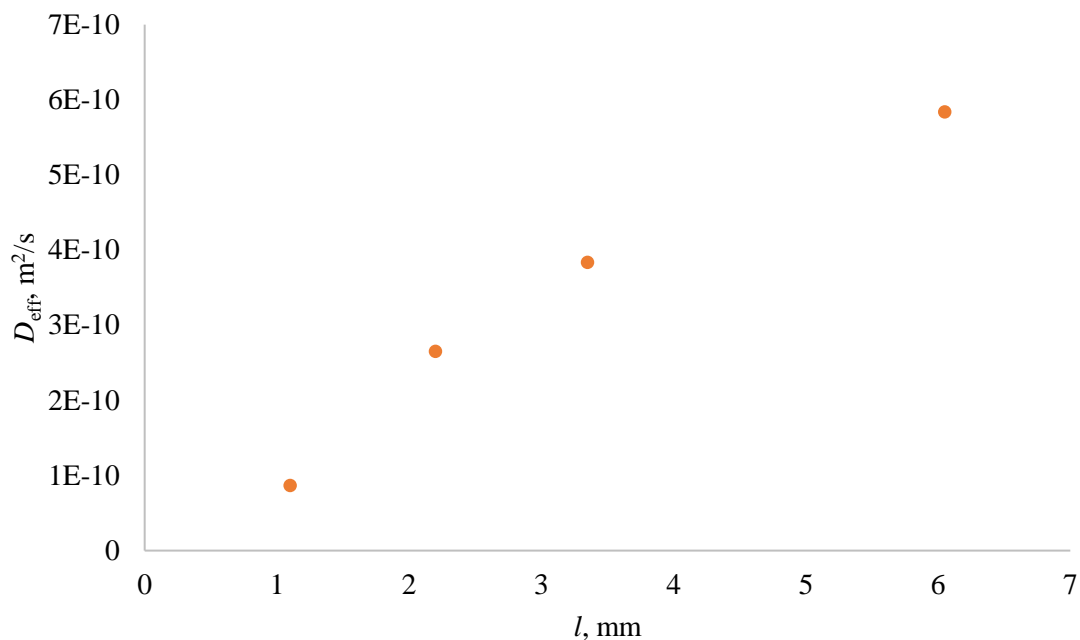
Na slici 38. prikazana je ovisnost neostvarene promjene sadržaja vlage materijala tijekom perioda padajuće brzine sušenja pri sušenju pločica tikvica različitih debljina. Smanjenje debljine uzorka rezultira porastom nagiba pravca što upućuje na porast brzine prijenosa tvari difuzijom.



Slika 38. Određivanje efektivnog difuzijskog koeficijenta za sušenje uzorka tikvica različite debljine u periodu padajuće brzine sušenja

Na slici 39. prikazane su vrijednosti efektivnog difuzijskog koeficijenta, D_{eff} , za različite debljine uzorka, l . Može se uočiti da povećanjem debljine uzorka dolazi do porasta efektivnog

difuzijskog koeficijenta. Brzina sušenja, s druge strane, opada s porastom debljine materijala. Uzorci veće debljine, vjerojatno su se u manjoj mjeri deformirali, pa su pore većeg promjera što osigurava veću brzinu prijenosa vlage difuzijom.



Slika 39. Grafička ovisnost efektivnog difuzijskog koeficijenta o debljini materijala

Koeficijent difuzije vode te geometrijski faktor, također rastu s porastom debljine uzoraka tikvica, tablica 15. Kao što je već spomenuto, porast geometrijskog faktora posljedica je većeg utjecaja unutrašnjeg otpora na brzinu sušenja.

Tablica 15. Utjecaj debljine materijala na difuzijski koeficijent vode, D i geometrijski faktor, R_g

L , mm	$D_{eff} \cdot 10^{10}$, m^2/s	$D \cdot 10^9$, m^2/s	R_g
1,10	0,869	0,508	5,8
2,20	2,652	1,706	6,4
3,35	3,838	2,673	7,0
6,05	5,841	4,237	7,3

4.4. SKUPLJANJE MATERIJALA

Skupljanje materijala (engl. *shrinkage*) uobičajena je pojava koja se uočava tijekom procesa sušenja, ne samo tikvica već svih higroskopnih materijala prirodnog porijekla. Gubitak vode i zagrijavanje uzrokuju naprezanja u strukturi materijala, što vodi do promjene oblika i smanjenja dimenzija uzorka. Na slici 40. prikazani su uzorci tikvica prije i nakon sušenja, na kojima se vidljivo uočava deformacija uzoraka. Tijekom sušenja došlo je do savijanja materijala i promjene oblika i volumena uzorka. Na početku i kraju sušenja izmjeren je promjer uzoraka, a dobivene su vrijednosti prikazane u tablici 16.



Slika 40. Deformacija uzorka tikvice prije i nakon sušenja

Pri višim temperaturama i brzinama strujanja zraka, te manjim debljinama pločica tikvica uzorci su se skupljali u većoj mjeri, pri čemu je utjecaj temperature bio najznačajniji. Veća promjena u vanjskim dimenzijama uzoraka uvjetuje veće smanjenje promjera pora što u konačnici rezultira većim otporima prijenosu tvari tijekom perioda padajuće brzine sušenja.

Tablica 16. Promjena dimenzija uzorka tikvice prije i nakon sušenja

		promjer prije sušenja, mm	promjer nakon sušenja, mm	razlika u promjeru, mm (%)
T, °C	40	5,40	4,30	1,10 (20,4)
	50	5,50	4,20	1,30 (23,6)
	60	5,10	3,80	1,30 (25,5)
	70	5,20	3,20	2,00 (38,5)
v, m s⁻¹	0,50	5,10	3,80	1,30 (25,5)
	0,60	4,40	3,10	1,30 (29,6)
	0,80	4,70	3,30	1,40 (29,8)
	1,00	5,20	3,30	1,90 (36,5)
l, mm	1,10	4,50	2,80	1,70 (37,8)
	2,20	4,40	3,10	1,30 (29,6)
	3,35	4,40	3,10	1,30 (29,6)
	6,05	4,40	3,20	1,20 (27,3)

Na brzinu sušenja utječu i uvjeti provedbe procesa (temperatura i brzina strujanja zraka) i svojstva materijala (geometrijske karakteristike), ali njihov doprinos nije jednako zastupljen. Iako porastom temperature raste brzina sušenja i brzina difuzije kroz unutrašnjost materijala, značajnije smanjenje veličina pora nije utjecalo na ukupnu brzinu sušenja. Naime, tijekom perioda konstantne brzine sušenja ukloni se od 37,7 do 43,6 % vlage prisutne u tikvicama (uz odstupanje pri 60 °C) neovisno o temperaturi, pa se može zaključiti da vanjski uvjeti u većoj mjeri utječu na kinetiku sušenja. Isto se može zaključiti vezano za utjecaj brzine strujanja zraka na kinetiku sušenja. S porastom brzine strujanja zraka, uz približno jednak početni sadržaj vlage materijala te smanjenje vremena trajanja perioda konstantne brzine sušenja, opada i udio vlage koji se tijekom tog perioda uklanja (49,6 do 44,4 %). Međutim, uočeno je da i efektivni difuzijski koeficijent i otpor prijenosu tvari difuzijom rastu s porastom debljine materijala. Istovremeno se smanjuje udio vlage koja se ukloni tijekom perioda konstantne brzine sušenja (sa 47,8 na 30,8 %). Što je više vlage prisutno u porama to se njihov promjer manje reducira, pa je i brzina difuzije veća. Ukupna je brzina manja jer deblji materijal sadrži više vode koju je potrebno ukloniti sušenjem do postizanja ravnotežnog stanja.

5. ZAKLJUČAK

Ispitana je kinetika sušenja tikvica u laboratorijskom sušioniku s pliticama za različite uvjete provedbe procesa (temperatura, brzina strujanja zraka, debljina materijala). Za opis dobivenih eksperimentalnih podataka korišteni su Lewisov, Pageov, Henderson – Pabis, Weibull i Midilli et al model. Na temelju dobivenih rezultata izvode se sljedeći zaključci:

- Dobivene kinetičke krivulje sušenja pokazuju očekivane trendove s obzirom na uvjete provedbe procesa.
- Povećanjem temperature sušenja i brzine strujanja zraka, te smanjenjem debljine uzorka brzina sušenja je veća, odnosno sušenje kraće traje. Najveći utjecaj od ispitivanih uvjeta na kinetiku sušenja tikvica ima debljina materijala, a najmanji brzina strujanja zraka.
- Od odabranih modela najviši stupanj korelacije postiže Midilli et al, a najniži Lewisov model. S obzirom da Midilli et al model ne opisuje krivulju sušenja u periodu stabilizacije, može se zaključiti da kinetiku sušenja tikvica najbolje opisuju Pageov i Weibullov model.
- Vrijednost parametra k raste s porastom brzine strujanja zraka i smanjenjem debljine uzorka, a vrijednost parametra n opada s porastom brzine strujanja zraka i debljine uzorka. Parametri Pageovog modela ne prate očekivani trend kod promjene temperature. S povećanjem temperature i brzine strujanja zraka, te smanjenjem debljine uzorka parametar Weibullovog modela α opada. Parametar β raste s porastom temperature, a smanjuje se s porastom brzine strujanja zraka i debljine uzorka.
- Za cijeli period padajuće brzine sušenja procijenjen je jedinstveni efektivni difuzijski koeficijent koji objedinjuje sve mehanizme prijenosa vlage. Vrijednost efektivnog difuzijskog koeficijenta raste s porastom temperature, brzine strujanja zraka i debljine uzorka.
- Primjenom normiranog Weibullovog modela procijenjen je difuzijski koeficijent za vodu za cijeli tijek sušenja. Njegova vrijednost također raste s porastom temperature, brzine strujanja zraka i debljine uzorka.
- Pri višim temperaturama i brzinama strujanja zraka, te manjim debljinama ploški uzorci se skupljaju u većoj mjeri, pri čemu je utjecaj temperature najznačajniji.

6. POPIS SIMBOLA

SIMBOLI:

a_1 – konstanta Henderson-Pabis modela

a_2 – konstanta Midlli et al modela

b – konstanta Midlli et al modela

D – koeficijent difuzije vode, m^2/s

D_{eff} – efektivni difuzijski koeficijent, m^2/s

dX/dt – brzina sušenja, $kg/kgmin$

E_a – energija aktivacije, kJ/mol

K – konstanta Lewisovog modela

k – konstanta Pageovog modela

k_1 – konstanta Henderson-Pabis modela

k_2 – konstanta Midlli et al modela

L – debljina materijala (sušeno s jedne strane), m

l – debljina ploške, mm

m – masa, kg

n – konstanta Pageovog modela

n_2 – konstanta Midlli et al modela

R – opća plinska konstanta, $J/mol K$

R^2 – indeks korelacije

R_g – geometrijski faktor

T – temperatura, $^{\circ}C$

t – vrijeme, min

v – brzina strujanja zraka, m/s

X , sadržaja vlage u materijalu, kg/kg

Y – apsolutna vlažnost zraka, kg/kg

α - parametar raspodjele Weibullovog modela

$(1/\alpha_0)$ – faktor frekvencije, s^{-1}

β - parametar oblika Weibullovog modela

φ – relativna vlažnost zraka, %

INDEKSI:

0 – početno

eff – efektivno

eq – ravnotežno

g – geometrijski

kr – kritično

max – maksimalno

7. LITERATURA

1. J. M. Delgado, A. Gilson Barbosa De Lima., *Drying and Energy Technologies*, Vol. 63 *Advance Structured Materials*, Springer, 2016, str. 1-26.
2. B. Fox, G. Bellini, L. Pellegrini, *Fermentation and Biochemical Engineering Handbook*, Elsevier Inc., 2014, str. 283-305.
3. J. D., Seader, E. J. Henley, *Separation Process Principles*, John Wiley&Sons, Inc., Danvers, 2006, str. 726-778.
4. A. S., Mujumdar, *Handbook of Industrial Drying*, Third Edition, CRC Press, 2007, str. 4-24.
5. N. Bagheri, S. T. Dinani, Investigation of ultrasound-assisted convective drying process on quality characteristics and drying kinetics of zucchini slices, *Heat and Mass Transfer*, Springer-Verlag GmbH, Germany, (2019) 2153-2163.
6. R. B. Keey, *Drying: Principles and Practice*, First Edition, Oxford, New York, Pergamon Press, 1972
7. A. Mersman, M. Kind, J. Stichlmair, *Thermal Separation Tehnology: Principles, Methods, Process Design*, Springer, New York, 2011, str. 561-590.
8. U. E. Inyang I. O. Oboh, B. R. Etuk, Kinetic Models for Drying Techniques – Food Materials, *Advances in Chemical Engineering and Science*, 8 (2018) 27-48.
9. A. Sander, *Toplinski separacijski procesi (interna skripta); Jedinične operacije u ekoinženjerstvu; I dio*, 2011, str. 112-152.
10. S. Mullen, B. Rogers, H. Worman, E. N. Martinez, *The Drying of Apples in a Laboratory Tray Drier*, Purdue University, (2018) 9-20.
11. P. K. Nema, B. Pal Kaur, A. S. Mujumdar, *Fundamental Principles of Drying*, B. Pal Kaur, V. S. Sharanagat and P. K. Nema (ur.), *Drying Technologies for Foods: Fundamentals & Applications*, New India Publishing Agency, New Delhi, 2015, str. 1-22.
12. K. Sattler H. J. Feindt, *Thermal Separation Processes – Principles and Design*, First Edition, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1995, str. 317-387.
13. R. Hoffmann, *Drying Non-Uniform and Heat-Sensitive Products*, Wisconsin Oven Corp., *Process Heating*, (2018) 1-4.
14. A. S. Mujumdar, *Handbook of Industrial Drying*, Marcel Dekker, Inc., New York, 1995
15. W. L., McCabe, J. C. Smith, P. Harriott, *Unit Operations of Chemical Engineering*, Fifth Edition, McGraw-Hill, 1993, str. 767-809.

16. G. Towler, R. Sinnott, Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design, Elsevier Inc., 2008, str. 570-572.
17. C. T. Kiranoudis, Z. B. Marouliqa, D. Marinos-Kouris, M. Tsamparlis, Design of Ikkay Dryers for Food Dehydration, Journal of Food Engineering, Elsevier Inc., 32 (1997) 269-291.
18. S. Misha, S. Mat, M. H. Ruslan, K. Sopian, E. Salleh, Review on the Application of a Tray Dryer System for Agricultural Products, World Applied Sciences Journal, 22 (3) (2013) 424-433.
19. URL: <https://www.tehnologijahrane.com/enciklopedija/aktivnost-vode-i-konzervisanje-namirnica> (pristup 10.06.2021.)
20. H. Sabarez, Drying of Food Materials, CSIRO Food and Nutrition, Elsevier Inc., Australia, (2016) 1-10.
21. E. Tsotsas, A. S. Mujumdar, Modern Drying Technology, Vol. 3 Wiley-VCH Verlag & Co., Weinheim, 2011, str. 1-4.
22. J. A. Harrison, E. L. Address, Preserving food: Drying fruits and vegetables, University of Georgia Cooperative Extension Service (2000) 1-12.
23. B. Stępień, M. Paśławska, R. Maślankowski, M. Surma, K. Jałoszyński, Impact of Spouted-Microwave Drying on the Selected Mechanical and Rheological Properties of Zucchini, Institute of Agricultural Engineering, Wrocław University of Life Sciences, (2016) 20(2): 143-150.
24. A. E. Hesham, F. B. Gamil, A. I. Amir, K. M. Robiel, S. A. Hatem, The Effect of Different Drying Methods on the Nutrients and Non-nutrients Composition of zucchini (green squash) rings, Journal of Applied Sciences Research, (2013) 9(8): 5380-5389.
25. N. Kutlua, A. Ischia, Drying Characteristics of Zucchini and Empirical Modeling of Its Drying Process, International Journal of Food Studies, (2017) 232-244.
26. URL: <https://hr.healthandmedicineinfo.com/zucchini-HNG> (pristup 12.07.2021.)
27. Instruction manual Tray Drier UOP8 – MKIII, Issue 3
28. W. K. Lewis, The rate of drying of solid materials. Industrial & Engineering Chemistry, (1921) 13(5): 427-432.
29. G. E. Page, Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers, Unpublished MS Thesis, Purdue University, West Lafayette, (1949)
30. S. M. Henderson, Grain drying theory (I) temperature effect on drying coefficient, Journal of agricultural engineering research, (1961) 6(3): 169-174.

31. O. Corzo, N. Bracho, A. Pereira, A. Vásquez, Weibull distribution for modeling air drying of coroba slices. *LWT-Food Science and Technology*, (2008) 41(10): 2023-2028.
32. A. Midilli, H. Kucuk, Z. Yapar, A new model for single-layer drying, *Drying technology*, (2002), 20(7), 1503-1513.
33. A. Sander, B. Cerjak, & B. Domitrović, The Influence of Granulometric Properties and Drying Conditions on the Drying Kinetics of a Nonhygroscopic Material. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, (2010) 24(2): 139-147.
34. A. Marabi, S. Livings, M. Jacobson, & I. S. Saguy, Normalized Weibull distribution for modeling rehydration of food particulates. *European Food Research and Technology*, (2003) 217(4): 311-318.

