

# Utjecaj temperature zraka na kinetiku sušenja šampinjona u fluidiziranom sloju

---

Mesarov, Danijela

Master's thesis / Diplomski rad

2014

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:109:502344>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-22**

REPOZITORIJ

PTF OS

PREHRAMBENO-TEHNOLOŠKI FAKULTET OSIJEK

dabar  
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
PREHRAMBENO TEHNOLOŠKI FAKULTET OSIJEK

**Danijela Mesarov**

**UTJECAJ TEMPERATURE ZRAKA NA KINETIKU SUŠENJA  
ŠAMPINJONA U FLUIDIZIRANOM SLOJU**

Diplomski rad

Osijek, srpanj 2014.

## TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

DIPLOMSKI RAD

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

Prehrambeno-tehnološki fakultet Osijek

Zavod za procesno inženjerstvo

Katedra za tehnološke operacije

Franje Kuhača 20, 31000 Osijek, Hrvatska

**Znanstveno područje:** Biotehničke znanosti  
**Znanstveno polje:** Prehrambena tehnologija  
**Nastavni predmet:** Jedinичne operacije u prehrambenom inženjerstvu  
**Tema rada** je prihvaćena na X. sjednici Fakultetskog vijeća Prehrambeno-tehnološkog fakulteta Osijek u akademskoj godini 2012./2013., održanoj 12. srpnja 2013.  
**Mentor:** dr. sc. Mirela Planinić, doc.

### Utjecaj temperature zraka na kinetiku sušenja šampinjona u fluidiziranom sloju

Danijela Mesarov 63/DI

#### Sažetak:

U ovom radu ispituje se utjecaj temperature zraka na kinetiku konvekcijskog sušenja klobuka i stapki šampinjona. Sušenje je provedeno pri brzini strujanja zraka od 4,1 m/s i temperaturama zraka od 50 °C, 60 °C i 70 °C. Za aproksimaciju eksperimentalnih podataka primjenjena su tri matematička modela: Pageov, logaritamski i modificirani Henderson-Pabis model.

Najveća brzina sušenja klobuka i stapki šampinjona ostvarena je pri 70 °C. Za opisivanje kinetike konvekcijskog sušenja u fluidiziranom sloju pokazao se modificirani Henderson-Pabis model.

**Ključne riječi:** *konvekcijsko sušenje, fluidizirani sloj, kinetika sušenja, šampinjoni*

**Rad sadrži:** 45 stranica  
9 slika  
13 tablica  
16 literaturnih referenci

**Jezik izvornika:** Hrvatski

#### Sastav Povjerenstva za obranu:

- |    |                                  |               |
|----|----------------------------------|---------------|
| 1. | dr. sc. Srećko Tomas, red. prof. | predsjednik   |
| 2. | dr. sc. Mirela Planinić, doc.    | član-mentor   |
| 3. | dr. sc. Ana Bucić-Kajić, doc     | član          |
| 4. | dr. sc. Sandra Budžali, doc      | zamjena člana |

**Datum obrane: 18.7.2014**

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

## BASIC DOCUMENTATION CARD

GRADUATE THESIS

**University Josip Juraj Strossmayer in Osijek**  
**Faculty of Food Technology Osijek**  
**Department of process engineering**  
**Subdepartment of technological operations**  
Franje Kuhača 20, HR-31000 Osijek, Croatia

**Scientific area:** Biotechnical sciences  
**Scientific field:** Food technology  
**Course title:** Unit operations in food engineering  
**Thesis subject:** was approved by the Faculty Council of the Faculty of Food Technology at its session no. X. in accademic year 2012/2013, held on July 12, 2013  
**Mentor:** Mirela Planinić, PhD, assist. prof.

### **Effect of temperature on the kinetics of fluid-bed drying of champignons** Danijela Mesarov 63/DI

#### **Summary:**

The aim of this paper was investigation of drying temperature effect on fluid-bed drying kinetics of champignons (caps and pedicles). Drying was done in fluid-bed drier at 4,1 m/s (air velocity) and 50 °C, 60 °C and 70 °C (air temperature). Experimental data were approximated with three mathematical models: Page, logarithmic and modified Henderson-Pabis model.

The highest drying velocity was at 70 °C. Drying data are the best describes by modified Henderson-Pabis model.

**Key words:** *convection drying, fluid-bed drying, drying kinetisc, mushrooms*

**Thesis contains:** 45 pages  
9 figures  
13 table  
16 references

**Original in:** Croatian

#### **Defense committee:**

- |    |                                  |              |
|----|----------------------------------|--------------|
| 1. | dr. sc. Srećko Tomas, red. prof. | chair person |
| 2. | dr. sc. Mirela Planinić, doc.    | mentor       |
| 3. | dr. sc. Ana Bucić-Kajić, doc     | member       |
| 4. | dr. sc. Sandra Budžali, doc      | stand-in     |

**Defense date: 18.7.2014.**

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

*Zahvaljujem svojoj mentorici doc. dr. sc. Mireli Planinić koja mi je svojim stručnim znanjem i brojnim savjetima omogućila realizaciju ovog rada.*

*Veliko hvala svojim roditeljima i braći Miroslavu i Stjepanu na požrtvornosti i potpori.*

*Posebno hvala pokojnoj prijateljici Miri Mihoković koja me je svojim savjetima i toplim riječima bodrila kroz teške i turbulentne dane studiranja.*

*Zahvaljujem se prijateljima bez kojih studij ne bi prošao tako zabavno, a posebno mojim dragim kolegicama, prijateljicama i cimericama Mateji Fegeš i Valeriji Oljača na prijateljstvu, potpori i pomoći tijekom studiranja.*

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. TEORIJSKI DIO .....	1
2.1. ŠAMPINJONI ( <i>Agaricus bisporus</i> ).....	4
2.2. TEORIJA SUŠENJA.....	5
2.2.1. Vlažne tvari.....	7
2.2.1.1. Oblici vlažnih tvari .....	7
2.2.1.2. Oblici veza vlage i tvari u namirnicama .....	8
2.2.1.3. Sadržaj vlage i uloga aktiviteta vode u procesima sušenja .....	9
2.2.2. Konvekcijsko sušenje.....	10
2.2.3. Procesi pri kontaktu vlažne čvrste tvari i plina.....	11
2.2.4. Kinetika sušenja tvari .....	12
2.3 SUŠENJE U FLUIDIZIRNOM SLOJU .....	18
2.3.1. Primjena fluidizacije .....	19
2.3.1.1. Primjena fluidizacije u izvođenju fizikalnih operacija .....	19
2.3.1.2. Primjena fluidizacije u izvođenju kemijskih reakcija .....	20
2.3.2. Prednosti i nedostaci primjene fluidizacije .....	21
3. EKSPERIMENTALNI DIO .....	22
3.1. CILJ I SVRHA ISTRAŽIVANJA.....	23
3.2. MATERIJAL .....	23
3.3 METODE .....	23
3.3.1. Određivanje suhe tvari .....	23
3.3.2. Sušionik s fluidiziranim slojem „ Fluid Bed Dryer“ .....	24
3.3.2. Način provedbe sušenja .....	25
3.3.3. Matematičko modeliranje procesa sušenja .....	26
4. REZULTATI .....	28
4.1. Sušenje .....	29
4.2 Matematički modeli .....	36
5. RASPRAVA.....	39
5.1. SUŠENJE.....	40
5.2. MATEMATIČKO MODELIRANJE KINETIKE SUŠENJA.....	40

6. ZAKLJUČAK .....	42
7. LITERATURA .....	44

## Popis oznaka, kratica i simbola

### SIMBOLI

$a_w$  – aktivitet vode

$A$  - površina [ $m^2$ ]

$D_l$  - koeficijent difuzije [ $m^2/s$ ]

$dX/dt$  - brzina sušenja [ $kg_v/(kg_{st} s)$ ]

FL - ukupno kvadratno odstupanje

$H$  - apsolutna vlažnost zraka [ $kg_{vp}/kg_{sz}$ ]

$H_e$  - ravnotežna vlažnost zraka [ $kg_{vp}/kg_{sz}$ ]

$H_g$  - trenutna apsolutna vlažnost zraka [ $kg_{vp}/kg_{sz}$ ]

$m_{vp}$  – masa vodene pare [kg]

$m_{sz}$  – masa suhog zraka [kg]

$p$  – tlak pare vode u namirnici [Pa]

$p_e$  - ravnotežni parcijalni tlak vodene pare [Pa]

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

$p_o$  – tlak pare čiste vode [Pa]

$Q$  – količina topline [J]

R - koeficijent korelacije

$r$  – latentna toplina isparavanja vode [J/kg].

$t$  - vrijeme [s]

$T_g$  – temperatura suhog termometra [K]

$T_l$  – temperatura mokrog termometra [K]

$w$  – brzina [m/s]

$X$  - vlažnost materijala [ $kg_v/kg_{st}$ ]

$(X - X_R)$  – slobodna vlaga

$X(t)$  - vlažnost materijala u vremenu [ $kg_v/kg_{st}$ ]

$X_R$  ravnotežna vlažnost [%]

$X_0$  početna vlažnost [ $kg_v/kg_{st}$ ]

$X/tA$  – otparavanje [ $kg_v/m^2$ ]

$Xr/tA$  – toplina [ $J/s \cdot m^2$ ]



## GRČKI SIMBOLI

$\varphi$  – relativna vlažnost zraka [%]

$\sigma'$  - koeficijent prijenosa mase [ $\text{kg}/\text{m}^2\text{sPa}$ ]

$\rho$  - specifična masa [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$\alpha$  – koeficijent prijelaza topline [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]

## **1.UVOD**

Uslijed naglog porasta svjetske populacije povećala se potražnja za hranom, a time se povećala i proizvodnja iste. Nепrestano se pronalaze nova tehnološka rješenja temeljena na suvremenim znanstvenim dostignućima koja omogućuju veću i racionalniju proizvodnju. Povećana proizvodnja prehrambenih proizvoda stvara nove probleme glede njihova očuvanja i plasman u optimalno obliku.

Konzerviranje hrane bio je uvijek jedan od osnovnih preokupacija čovjeka koja je proizašla iz potrebe da se prevlada vremenski i prostorni interval između njihovog pribavljanja i u svježem obliku i samog konzumiranja. Već je u danoj prošlosti postojalo iskustvo o nekim od principa na kojima se zasnivaju suvremeni procesi konzerviranja hrane.

Jedna od najstarijih, a vjerojatno i najraširenijih metoda konzerviranja hrane je konzerviranje sušenjem. Ta metoda podrazumijeva „prirodno sušenje“, uklanjanje vode sunčevim zračenjem i prirodnim strujanjem zraka i „umjetno sušenje“, koje se odvija pod kontrolnim (mikroklimatskim) uvjetima. Hrana se suši prije svega da bi se spriječilo njezino kvarenje djelovanjem mikroorganizama, ali je također važna uloga sušenja u sprečavanju kvarenja nastalog kemijskim promjenama. Sušenjem se još postiže smanjenje mase i volumena namirnice, što pridonosi ekonomičnijem pakiranju, transportu i skladištenju gotovog proizvoda.

Sušenje u sušioniku s fluidiziranim slojem je jedan od procesa sušenja koji je do sada dao veoma dobre rezultate. Takav način sušenja omogućuje nam na osnovi različitih metoda mjerenja veoma pouzdano određivanje procesnih veličina kao i njihovu međusobnu ovisnost, a isto tako se pri tome ostvaruje intenzivnija toplinska izmjena i rekuperacija topline kao i prijenos mase. (Tripalo i Viličić, 1992.)

Cilj ovog rada je bio odrediti utjecaj temperature sušenja na kinetiku konvekcijskog sušenja šampinjona (kloguka i stapki) u fluidiziranom sloju, u laboratorijskim uvjetima. Za opisivanje kinetike provedenih pokusa sušenja korišteni su tri matematička modela: Pageov, logaritamski i modificirani Henderson-Pabis model te je prema regresijskim parametrima (regresijski koeficijent i ukupno kvadratno odstupanje) odabran matematički model koji je pokazao najbolje slaganje s eksperimentalnim podacima.

## **2. TEORIJSKI DIO**

### 2.1. ŠAMPINJONI (*Agaricus bisporus*)

Čovjek se od davnina bavio skupljanjem gljiva za jelo. U drevnoj kineskoj civilizaciji i kulturi gljive su cijenjene već 7000 godina, a i starim Rimljanima bila su poznata razna jela od gljiva. U azijskim se zemljama koriste u prehrani i liječenju već tisuću godina. U staro doba ljudi su mislili da je to hrana bogova, možda čak da su nastale od groma, jer su se pojavljivale preko noći, nakon oluje.

Šampinjoni su jedna od najpoznatijih vrsta jestivih gljiva, svojstvenog mirisa i okusa, koja je sve više zastupljena u svakodnevnoj prehrani. Šampinjoni (**Slika 1**) imaju pravilan, polukuglast klobuk, bijelo-sive do smečkaste boje. Spadaju u red rijetkih gljiva koje se naveliko uzgajaju umjetno i prodaju na tržištu. Ova gljiva je bijele boje i jedinstvene arome. Mogućnosti pripreme su neograničene. Dostupne su tijekom cijele godine, konzervirane ili svježije.



**Slika 1** Šampinjon (*Agaricus bisporus*)

Klobuk je polukružno zaobljen, debelomesnat, a naraste 2,5 do 10 cm promjera i 0,5 do 2,5 cm debljine. Pokrovna kožica je svilenkasta ili malo perutasta, najčešće bijela, ali i zlatnožute, žućkastobijele ili svijetlosmeđe boje. Lamele su guste, u početku bijele, zatim crvenkaste i najposlije smeđe boje. Stručak je bijele boje, ravan ili malo svinut, pri dnu lukovičastog oblika. Obično je prilično kratak i do 10cm. Debljina je od 0,5 do 4,5 cm, a iznutra nije šupalj.

Prosječni sastav i energetska vrijednost šampinjona prikazana je u **Tablici 1**.

**Tablica 1** Nutritivna vrijednost na 100 g sirovih šampinjona

Nutritivna vrijednost na 100 g	
Energetska vrijednost	94 kJ (22 kcal)
Ugljikohidrati	3,28 g
Šećeri	1,65 g
Dijetalna vlakna	1,0 g
Masti	0,34 g
Proteini	3,09 g
Voda	92,43 g
Tiamin (vitamin B1)	0,081 mg
Riboflavin (vitamin B2)	0,402 mg
Niacin (vitamin B3)	3,607 mg
Pantotenska kiselina (vitamin B5)	1,497 mg
Vitamin C	2,1 mg
Željezo	0,50 mg

### 2.2. TEORIJA SUŠENJA

Sušenje je jedna od najstarijih i vjerojatno najraširenijih metoda konzerviranja namirnica.

Pod pojmom sušenje se podrazumijeva oduzimanje tekućine (najčešće vode) iz plinova, tekućina ili krutih tvari. Postoje tri tipa vode u namirnicama:

- slobodna voda - voda koja se nalazi u porama namirnice,
- vezana voda - voda vezana na ionske grupe kao što su karboksilne i amino grupe,
- imobilizirana voda - voda mehanički imobilizirana u staničnim strukturama.

Voda koja se uklanja postupkom sušenja je slobodna voda. Uklanjanje te vode može se općenito provoditi na različite načine:

- mehanički (centrifugiranjem)
- izmrzavanjem (iz plinova)
- kemijskim reakcijama

- adsorpcijom iz plinova
- isparavanjem.

Najčešći postupak oduzimanja vode u prehrambenoj, pa i procesnoj industriji je isparavanjem.

Sušenje je vrlo složen fizikalni proces, jer uključuje istovremeni prijenos topline, mase i količine gibanja u višefaznom sustavu i ovisi o strukturi materijala, vrsti veza vode s čvrstom tvari, geometriji tvari koja se suši, sustavu za sušenje i o fizikalnim i termodinamičkim parametrima sredstva za sušenje, kada se radi o konvekcijskom načinu sušenja.

U užem smislu riječi sušenje predstavlja tehnološku operaciju kojom se uklanja manja količina vode iz krutih ili gotovo krutih tvari pomoću topline, tj. isparavanjem ili hlapljenjem.

Isparavanje je proces koji se provodi kod temperature ključanja, a hlapljenje proces koji se provodi na temperaturama ispod temperature ključanja. Sušenje se najčešće provodi ispod temperature ključanja, tj. kod parcijalnih tlakova tekućine ispod ukupnog tlaka, u tom slučaju potreban je plin (zrak ili dimni plinovi) koji daju razliku parcijalnog tlaka do ukupnog i koji na taj način odnose tekućinu. (Ježek, 1999.)

Sušenje se može provesti na dva načina:

- adijabatski
- neadijabatski

Adijabatskim sušenjem toplina isparavanja se dovodi osjetnom toplinom zraka kojim se ujedno provodi sušenje. Neadijabatskim načinom sušenja toplina isparavanja se dovodi toplinom zračenja ili toplinom koja se provodi kroz stjenke u kontaktu s materijalom koji se suši.

Prema načinu dovođenja topline materijalu koji se suši možemo razlikovati slijedeće metode sušenja:

- konvekcijsko sušenje, kod kojeg se materijal suši u doticaju sa strujom plina (najčešće zrakom),
- kondukcijsko ili kontaktno sušenje, kod kojeg se materijal suši u doticaju sa zagrijanom površinom,

- liofilizacijsko sušenje, kod kojeg se materijal suši u zamrznutom stanju pod visokim vakuumom. Po načinu prijenosa topline ovo sušenje je analogno kontaktnom sušenju,
- radijacijsko sušenje, kod kojeg se materijal suši posredstvom polja visoke učestalosti.

U prehrambenoj i procesnoj industriji najčešće se primjenjuje konvekcijsko sušenje.

### 2.2.1. Vlažne tvari

#### 2.2.1.1. Oblici vlažnih tvari

Vlažnost nekog materijala obuhvaća sve one sastojke koji pri zagrijavanju isparavaju i što dovodi do smanjenja mase materijala. Gubitak mase utvrđuje se pomoću vage i predstavlja kao sadržaj vlage pri čemu se ne prave razlike između vode i drugih tekućih sastavnih dijelova materijala.

Voda, čiji sadržaj u namirnicama varira od 60 – 95 %, dominantna je i izuzetno bitna komponenta hrane. S druge strane, mnogi spojevi sadržani u hrani vežu na sebe vodu na različite načine, te tako povećavaju njenu ulogu kao sastavnog elementa namirnica. Stanje vode kao i njena cjelokupna distribucija od izuzetne je važnosti za normalno funkcioniranje svih bioloških sustava. Bitno svojstvo vode jeste i njen visoki specifični toplinski kapacitet, što znači da voda može primiti ili predati velike količine topline pri relativno malim promjenama temperature. (Tomas, 2000.)

Vlažne tvari u namirnicama se mogu naći u različitim oblicima. Vlažne čvrste tvari se ovisno o kemijsko - fizikalnim i strukturnim osobinama dijele u dvije skupine:

- kristalne tvari,
- koloidno disperzni sustavi

Kristalne tvari su uglavnom anorganskog porijekla. Uklanjanje vode i režim sušenja u širokom opsegu temperature i vlažnosti, nemaju utjecaja na strukturno-fizikalna svojstva ovih tvari.

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



- tipično koloidne tvari, kod kojih se uklanjanjem vlage javljaju kontrakcije, uz očuvanje elastičnih osobina,
- kapilarno-porozne tvari, kod kojih se uklanjanjem vlage javljaju neznatne kontrakcije, a istovremeno tvar postaje krhka i može se pretvoriti u prah,
- koloidno kapilarno-porozne tvari, kod kojih su stjenke kapilara elastične i pri sušenju dolazi do njihovog skupljanja bez da se narušava osnovna prostorna struktura tvari.

### 2.2.1.2. Oblici veza vlage i tvari u namirnicama

Uklanjanje vode iz namirnice provodi se kako bi se osigurala mikrobiološka stabilnost, reducirale kemijske reakcije kvarenja i na kraju smanjili troškovi skladištenja i transporta. Pri tome je potrebno voditi računa da se što više očuvaju organoleptička i nutritivna svojstva namirnice.

Uloga vode u namirnici ovisi o kemijskom sastavu i fizičkoj strukturi same namirnice, kao i obliku u kojem je voda prisutna. (Ježek, 1999.)

Oblik veze između tvari i vode može se odrediti po veličini, tj. sadržaju energije koju takva veza ima. Veličina, tj. sadržaj energije određuje se mjerenjem količine dovedene topline potrebne za isparavanje određene količine vode iz tvari koja se podvrgava sušenju.

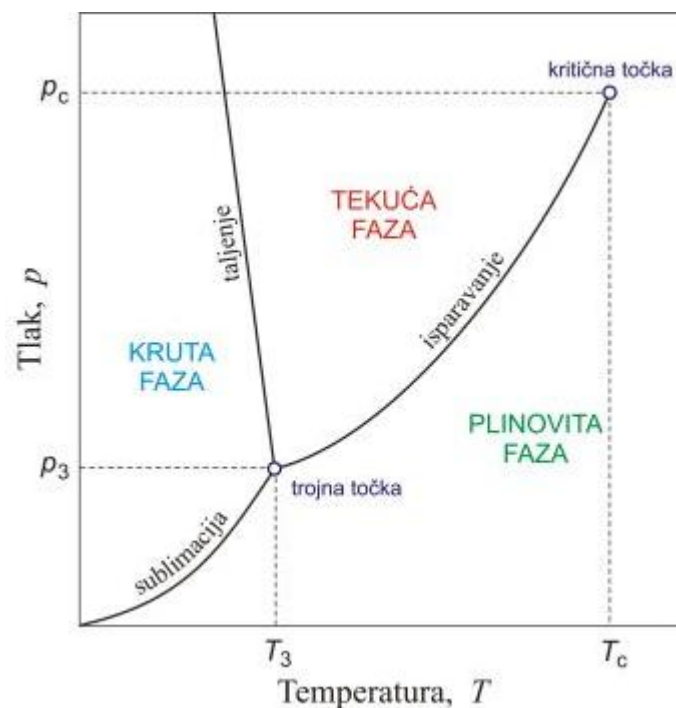
Oblici vezane vlage u tvarima mogu se podijeliti u četiri oblika vezane vlage, sa redoslijedom smanjenja energije veze:

- kemijski vezana voda – predstavlja vodu koja se nalazi u tvarima u točno određenim stehiometrijskim odnosima, veza vode i tvari je vrlo jaka. Kemijski vezanu vodu nije moguće ukloniti uobičajenim postupcima sušenja (do temperature 120 °C),
- adsorpciono vezana voda – predstavlja vodu vezanu na površini koloidnih čestica pod djelovanjem polarnih molekularnih sila. Ova veza vode i tvari spada u red fizikalno – kemijskih veza, koje imaju manji sadržaj energije od kemijskih veza. Njezino upijanje je praćeno izdvajanjem topline i kontrakcijom volumena sustava adsorbent – voda,
- osmotski vezana voda – predstavlja vodu koja difuzijom prodire kroz polupropusne membrane koje grade skelet gela. Ovakva veza vode i tvari spada također u red fizikalno - kemijskih veza,
- kapilarno vezana voda – predstavlja vodu koja ispunjava kapilare s polumjerom većim od  $10^{-7}$  m. Ona je vezana fizikalno - mehaničkim vezama koje imaju manju energiju od

fizikalno - kemijskih veza. Veza vode u kapilarama je uvjetovana silama površinske napetosti. (Mujumdar, 1995.)

### 2.2.1.3. Sadržaj vlage i uloga aktiviteta vode u procesima sušenja

Kod namirnica, tijekom sušenja dolazi do postupnog uklanjanja slobodne i dijela vezane vode, te do snižavanja vrijednosti aktiviteta vode ( $a_w$ ) u proizvodu. Ravnotežna stanja koja se uspostavljaju, pri određenim uvjetima, između pojedinih agregatnih stanja ili faza prikazuju se faznim dijagramom ili dijagramom stanja. Krivulje na faznom dijagramu vode (**Slika 2**) prikazuju ravnotežna stanja između dviju faza. Sve tri krivulje sijeku se u točki **O**, „trojnoj točki“ u kojoj su sve tri faze u ravnoteži. Krivulja isparavanja vode završava u točki **K**, kojoj odgovara kritična temperatura iznad koje se vodena para ne može prevesti u tekuće stanje.



**Slika 2** Fazni dijagram vode

Aktivitet vode u nekoj namirnici nije isto što i sadržaj vlage. Različiti proizvodi mogu imati jednak sadržaj vlage uz različite vrijednosti  $a_w$ . Sadržaj vlage može se definirati kao maseni postotak vlage u odnosu na suhu tvar proizvoda. (Lovrić, 2003.)

Pomoću vrijednosti aktiviteta vode može se procijeniti koliki dio slobodne vode stoji na raspolaganju za odvijanje biološke aktivnosti u hrani prisutnih mikroorganizama.

Vrijednost aktiviteta vode može se izraziti slijedećom jednadžbom: (Lovrić, 2003.)

$$a_w = \frac{p}{p_0} = \frac{RH}{100} \quad (1)$$

gdje je :

$a_w$  – aktivitet vode

$p$  – tlak pare vode u namirnici [Pa]

$p_0$  – tlak pare čiste vode [Pa]

$RH$  – ravnotežna vlažnost [%]

Vrijednosti  $a_w$  kreću se od 0 do 1 (čista voda). Voda ima izuzetnu važnost za rast i razvoj mikroorganizama, te je stoga jasan i selektivni utjecaj vrijednosti  $a_w$  na mikrobiološko kvarenje bioloških materijala. Veliki broj znanstvenih radova, dovodi u vezu aktivitet vode s brzinom odvijanja raznih, često degradativnih, kemijskih i biokemijskih promjena u namirnicama. Za normalnu aktivnost velikog broja bakterija potrebna vrijednost  $a_w$  iznosi od 0,92 do 0,96, za većinu kvasaca  $a_w$  iznosi oko 0,88, a za plijesni  $a_w$  se kreće od 0,75 do 0,80. Na vrijednost aktiviteta vode za pojedine namirnice utječu faktori kao što su temperatura, pH, različite komponente kemijskog sastava (npr. udio vode u odnosu na ugljikohidrate i proteine), količina dodane soli, te niz drugih faktora.

### 2.2.2. Konvekcijsko sušenje

Konvekcijskim sušenjem toplina se prenosi pretežno konvekcijom od toplog plina na površinu tvari koja se suši, jer se prijenos topline zračenjem i vođenjem može zanemariti, iako je u manjoj mjeri prisutan. (Lovrić, 2003.)

Konvekcija može biti prirodna i prisilna. Kod prirodne konvekcije razlike u temperaturama uzrokuju razlike gustoća koje zatim dovode do kretanja većih masa fluida. Dijelovi koji se zagrijavaju, šire se, te im se smanjuje gustoća i uslijed toga se izdižu ustupajući mjesto hladnijim i gušćim dijelovima fluida. Kod prisilne konvekcije se kretanje fluida postiže

mehaničkim putem, tj. strujanje fluida je izazvano nekom vanjskom silom (pumpa, ventilator). Intenzivnijim strujanjem fluida je i prijenos topline intenzivniji pa se zanemaruje toplina koja se istodobno razmjenjuje prirodnom konvekcijom. (Tomas, 2000.)

Dio topline prenosi se vođenjem u unutrašnjost tvari pri čemu raste temperatura tvari, a preostali dio se troši na isparavanje vlage s površine tvari. Vлага iz unutrašnjosti difundira do površine tvari nadomještajući vlagu isparenu s površine.

Isparena vлага kontinuirano difundira u struji zraka kojom se vrši sušenje. U početku sušenja, sve dok difuzija vlage iz unutrašnjosti može nadoknaditi vlagu isparenu s površine tvari, prevladava tzv. površinsko sušenje. Brzina sušenja u ovom periodu ne ovisi o prirodi tvari, već ovisi samo o veličini mokre površine i parametrima plina (zraka) s kojim se sušenje vrši. Nakon toga razina vlage s kojom se vrši isparivanje pomiče se u unutrašnjost tvari i brzina sušenja tada ovisi o brzini difuzije isparene vlage iz unutrašnjosti do površine tvari, a to prirodno ovisi o tipu materijala koji se suši.

Kod konvekcijskog sušenja, materijal se može osušiti potpuno, tj. do sadržaja vlage koji je jednak nuli, samo ako je materijal nehigroskopan, a zrak kojim se provodi sušenje potpuno suh. Higroskopni materijali se, međutim, mogu osušiti samo do neke granične vlažnosti, tzv. ravnotežne vlažnosti tog materijala za parametre zraka kojim se provodi sušenje.

### 2.2.3. Proces pri kontaktu vlažne čvrste tvari i plina

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

- adsorpcija vode
- desorpcija vode

Hoće li se neka tvar sušiti ili vlažiti ovisi o ravnotežnim uvjetima. Da bi se neka tvar sušila mora se zagrijati do temperature na kojoj je parcijalni tlak vodene pare na površini sušene tvari veći od parcijalnog tlaka vodene pare u plinu. Ako je taj tlak manji, vлага iz plina će se adsorbirati u tvari. (Lovrić, 2003)

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

Prijelazom vlage u zrak raste vlažnost zraka. Vlažnost zraka može se izraziti kao apsolutna ili relativna vlažnost, pri čemu je:

- apsolutna vlažnost zraka:

$$H = \frac{m_{vp}}{m_{sz}} \quad (2)$$

gdje je :

$H$  - apsolutna vlažnost zraka [ $\text{kg}_{vp}/\text{kg}_{sz}$ ]

$m_{vp}$  - masa vodene pare [kg]

$m_{sz}$  - masa suhog zraka [kg]

- relativna vlažnost zraka:

$$\varphi = \frac{p_g}{p_e} \cdot 100 \quad (3)$$

gdje je:

$\varphi$  - relativna vlažnost zraka [%]

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

$p_e$  - ravnotežni parcijalni tlak vodene pare [Pa]

ili

$$\varphi \doteq \frac{H_g}{H_e} \cdot 100 \quad (4)$$

gdje je :

$H_g$  - trenutna apsolutna vlažnost zraka [ $\text{kg}_{vp}/\text{kg}_{sz}$ ]

$H_e$  - ravnotežna vlažnost zraka [ $\text{kg}_{vp}/\text{kg}_{sz}$ ]

### 2.2.4. Kinetika sušenja tvari

Kinetika sušenja tvari se bavi određivanjem brzine sušenja, proučavanjem transporta vlage i analizom krivulja sušenja.

Na **Slici 3** prikazane su krivulje tijekom sušenja za općeniti proces sušenja kod konstantnih vanjskih uvjeta plina koji se koristi za sušenje. Krivulje tijekom sušenja su:

- I) Krivulja sušenja (vlažnosti tvari)
- II) Krivulja brzine sušenja
- III) Ovisnost temperature tvari koja se suši o vremenu sušenja.

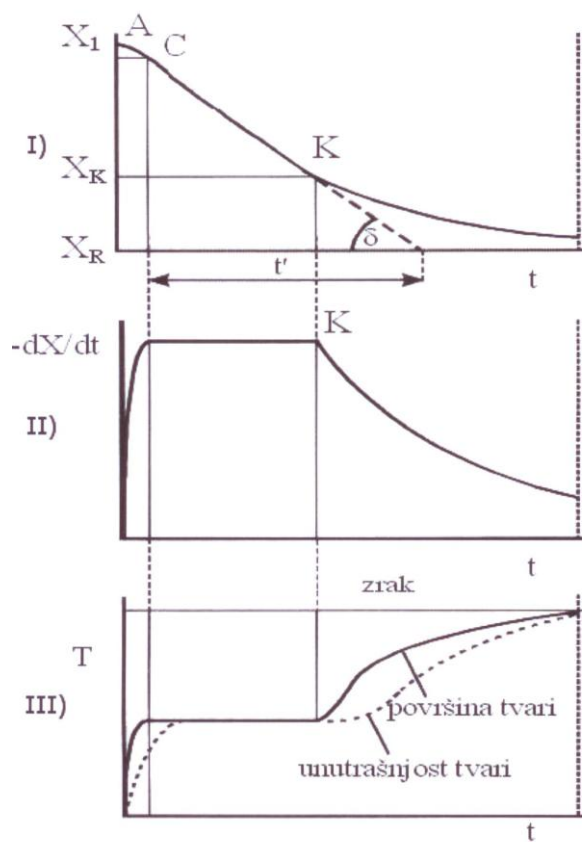
Krivulja sušenja predstavlja ovisnost između sadržaja vlage u namirnici i vremena trajanja sušenja, a krivulja brzine sušenja predstavlja ovisnost brzine sušenja o vremenu.

Promatramo li krivulju ovisnosti temperature tvari koju sušimo o vremenu sušenja uočavamo

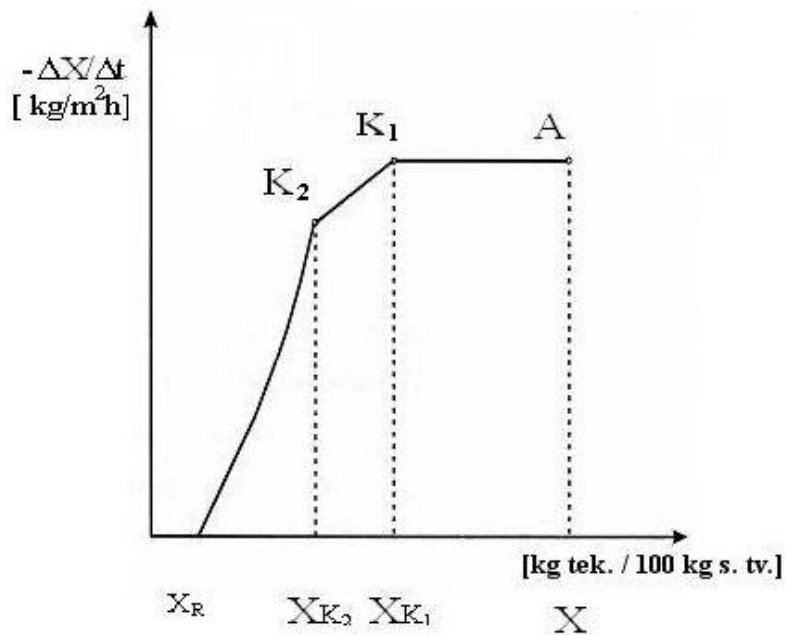
kratki segment A – C koji predstavlja zagrijavanje tvari. U ovom periodu se temperatura površine tvari približava konstantnoj vrijednosti (**Slika 3.III**). Segment C – K odgovara periodu konstantne brzine sušenja. U ovom periodu je cijela površina tvari koja se suši pokrivena slojem tekućine konstantne temperature. U točki K (kritična točka), u kojoj se završava ovaj period, tvar koju sušimo ima kritični sadržaj vlage ( $X_k$ ). Dio krivulje brzine sušenja iza točke K odgovara periodu opadajuće brzine sušenja.

U ovom primjeru proces sušenja podijeljen je na dva dijela. Dio krivulje brzine sušenja A – K predstavlja period konstantne brzine sušenja, a dio krivulje iza točke K predstavlja period opadajuće brzine sušenja (**Slika 3.II**).

Međutim, postoje autori koji period opadajuće brzine sušenja dijele na dva dijela, kao što je prikazano na **Slici 4**.



**Slika 3** Krivulja tijekom sušenja



**Slika 4** Krivulja brzine sušenja sa dva dijela opadajuće brzine sušenja i dvije kritične točke (K<sub>1</sub> i K<sub>2</sub>)

#### Period konstantne brzine sušenja

Brzina sušenja u ovom periodu ne ovisi o prirodi tvari koju sušimo, već je ovisna o veličini mokre površine, razlici parcijalnih tlakova para tekućine uz samu površinu tekućine i u glavnoj masi plina koji služi za sušenje, te o koeficijentu prijenosa mase, koji se mijenja u ovisnosti o procesnim parametrima. Ta ovisnost je dana slijedećom jednačinom:

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

gdje je :

$dX/dt$  - brzina sušenja [kg<sub>v</sub>/(kg<sub>st</sub> s)]

$A$  - površina [m<sup>2</sup>]

$\sigma'$  - koeficijent prijenosa mase [kg/m<sup>2</sup>sPa]

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

$p_e$  - ravnotežni parcijalni tlak vodene pare [Pa]

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

$$-\frac{dX}{A \cdot dt} = \sigma \cdot (H_e - H_g) \quad (6)$$

gdje je :

$\sigma$  - koeficijent prijenosa mase [ $\text{kg}/\text{m}^2\text{Pa}$ ]

$H_g$  - trenutna apsolutna vlažnost zraka [ $\text{kg}_{\text{vp}}/\text{kg}_{\text{sz}}$ ]

$H_e$  - ravnotežna vlažnost zraka [ $\text{kg}_{\text{vp}}/\text{kg}_{\text{sz}}$ ]

Koeficijent prijenosa mase  $\sigma$  ovisi o koeficijentu difuzije i debljini graničnog sloja. Za slučaj sušenja vlažne tvari zrakom Sherwood je preporučio slijedeću formulu za izračunavanje:

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

gdje je :

$\sigma'$  - koeficijent prijenosa mase [ $\text{kg}/\text{m}^2\text{sPa}$ ]

$\rho$  - specifična masa [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$w$  – brzina [ $\text{m}/\text{s}$ ]

Ova formula vrijedi za brzine strujanja zraka od 1 do 6 m/s kod uobičajenih tlakova i temperatura.

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

Količinu tekućine koja ispari u jedinici vremena po jedinici površine ( $Q/tA$ ,  $\text{W}/\text{m}^2$ ) moguće je izračunati iz količine topline ( $Q$ ) koja se prenosi s medija kojim se suši na površinu tekućine uz poznat koeficijent prijelaza topline ( $\alpha$ ) ili poznatu latentnu toplinu isparavanja vode ( $r$ ). Za otparavanje  $X/tA$  [ $\text{kg}_v/\text{s}\cdot\text{m}^2$ ] potrebna je toplina  $Xr/tA$  [ $\text{J}/\text{s}\cdot\text{m}^2$ ] za čiji prijenos vrijedi (Ježek, 2003.):

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

gdje je :

$Q$  – količina topline [J]

$X/tA$  – otparavanje [ $\text{kg}_v/\text{m}^2$ ]

$Xr/tA$  – toplina [ $\text{J}/\text{s}\cdot\text{m}^2$ ]

$\alpha$  – koeficijent prijelaza topline [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]

$T_g$  – temperatura suhog termometra [K]



$T_1$  – temperatura mokrog termometra [K]

$\sigma$  – koeficijent prijenosa mase [ $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ]

$H_g$  – trenutna apsolutna vlažnost zraka [ $\text{kg}_{\text{vp}}/\text{kg}_{\text{sz}}$ ]

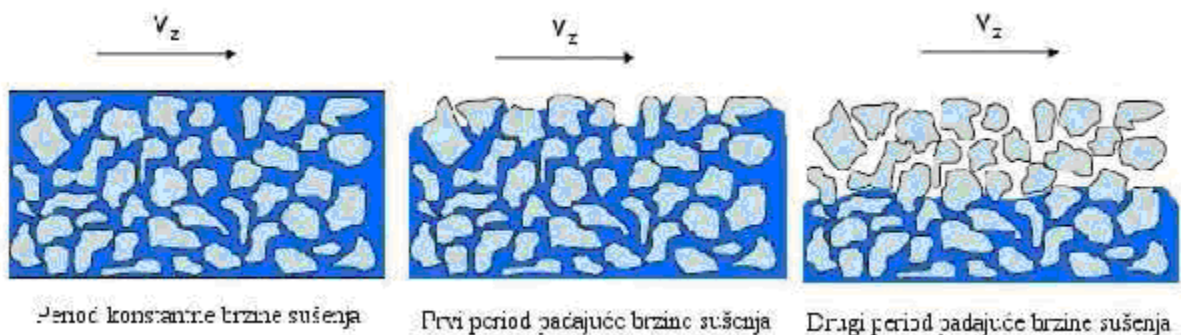
$H_e$  – ravnotežna vlažnost zraka [ $\text{kg}_{\text{vp}}/\text{kg}_{\text{sz}}$ ]

$r$  – latentna toplina isparavanja vode [ $\text{J}/\text{kg}$ ].

### Period opadajuće brzine sušenja

Period opadajuće brzine sušenja počinje kada se dostigne kritični sadržaj vlage  $X_{K1}$  (**Slika 4**). Brzina sušenja u području opadajuće brzine sušenja ovisi o debljini sušenog materijala, jer ta brzina pada s porastom puta što ga mora prevaliti tekućina unutar sušenog materijala. Iza kritične točke  $K_1$  tekućina se povlači u pore materijala, tj. na površini se javljaju dijelovi koji nisu pokriveni tekućinom. Kako idemo prema točki  $K_2$ , nivo tekućine se sve više povlači u pore i dodirna površina između zraka i tekućine se sve više smanjuje.

Povlačenje tekućine u unutrašnjost materijala prikazana je na **Slici 5**. Nakon točke  $K_2$ , gdje je vlaga povučena iz svih površinskih pora na brzinu sušenja najviše utječe difuzija para tekućine iz unutrašnjosti na površinu tvari.



**Slika 5** Prikaz promjene vlažne tvari prilikom sušenja  
(tijekom perioda konstantne i padajuće brzine sušenja)

U periodu opadajuće brzine sušenja oblik krivulje sušenja ovisi o strukturi materijala koji se suši, brzini sušenja u periodu konstantne brzine sušenja i o kritičnom sadržaju vlage.

Brzina strujanja medija koji se koristi za sušenje u ovom periodu ima sve manji utjecaj na brzinu sušenja za razliku od perioda konstantne brzine sušenja gdje je utjecaj značajan.

## 2. Teorijski dio

Razlog takvoj promjeni je sve veća ovisnost brzine sušenja o brzini konduktivnog prijenosa topline i brzini difuzije para tekućine kroz poroznu tvar.

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

U homogenim, čvrstim tvarima prijenos vlage prema površini se najvjerojatnije odvija, molekularnom difuzijom tekućine. Brzina prijenosa vlage je određena drugim Fickovim zakonom (Ježek, 2003.):

$$\frac{dX}{dt} = D_1 \frac{\sigma^2 \cdot X}{\sigma \cdot x^2} \quad (9)$$

gdje je :

$dX/dt$  - brzina sušenja [ $\text{kg}_v/(\text{kg}_{st} \text{ s})$ ]

$D_1$  - koeficijent difuzije [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$X$  - vlažnost materijala [ $\text{kg}_v/\text{kg}_{st}$ ]

$\sigma$  - koeficijent prijenosa mase [ $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ]

Integracija ove jednadžbe se vrši pod pretpostavkom da je  $D_1$  konstantna vrijednost, a tvar koja se suši u obliku ravne ploče, čija je jedna strana u kontaktu sa medijem za sušenje, a baze i druge strane su izolirane. Za slučaj da je vrijeme sušenja vrlo dugo, jednadžba poprima oblik:

$$\frac{X_K - X_R}{X - X_R} = \frac{8}{\pi^2} \cdot e^{-D \cdot t \cdot \left(\frac{\pi}{2l}\right)^2} \quad (10)$$

gdje je:

$X$  - vlažnost materijala [ $\text{kg}_v/\text{kg}_{st}$ ]

$t$  - vrijeme [s]

$D_1$  - koeficijent difuzije [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

Diferenciranjem ove jednadžbe dobije se izraz za brzinu sušenja:

$$\frac{dX}{dt} = -\frac{\pi \cdot D_1}{a \cdot l^2} \cdot (X - X_R) \quad (11)$$

gdje je :

$(X - X_R)$  – slobodna vlaga

$D_1$  – koeficijent difuzije [ $m^2/s$ ]

$X$  – vlažnost materijala [ $kg_v/kg_{st}$ ]

$dX/dt$  – brzina sušenja [ $kg_v/(kg_{st} s)$ ]

Iz ove jednadžbe možemo vidjeti da je brzina sušenja upravo proporcionalna sadržaju slobodne vlage  $(X - X_R)$  i koeficijentu difuzije  $D_1$ , kao i da je vrijeme sušenja funkcija kvadrata debljine tvari koja se suši.

Dvije prethodne jednadžbe vrijede za jednodimenzionalni prijenos tvari koji je karakterističan za čvrste tvari oblika ravne ploče, čija je debljina zanemariva u odnosu na druge dvije dimenzije. U praksi se uzima da je  $D_1$  konstantno, pa jednadžba (11) poprima slijedeći oblik:

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

gdje je :

$dX/dt$  – brzina sušenja [ $kg_v/(kg_{st} s)$ ]

$(X - X_R)$  – slobodna vlaga

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

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

### 2.3 SUŠENJE U FLUIDIZIRNOM SLOJU

U konvekcijskim sušionicima s fluidizacijom, materijal se suši u struji zagrijanog zraka (plina), koji kroz fluidizacijsku kolonu struji odgovarajućom brzinom dovoljnom da se materijal dovede u tzv. kvazifluidno stanje.

S obzirom na relativno veliku brzinu strujanja zraka, potrebnu za ostvarivanje fluidizacije, vanjski otpori prijenosu tvari su zanemarivi te se sušenje odvija pod kontrolom unutrašnjih

otpora samog materijala (Other, 1956.). U takvom sustavu zagrijanog medija za sušenje i materijala koji se suši ostvaruje se vrlo dobar kontakt medija sa svim površinama materijala, što osigurava jednoliko sušenje materijala uz istodobno vrlo brz prijenos topline do površine materijala i prijenos mase sa površine materijala.

Ovakav način sušenja nudi brojne prednosti u odnosu na konvencionalne metode sušenja (konvekcijско sušenje) koje su u svojim radovima potvrđivali razni istraživači, a najznačajnije od njih su skraćivanje potrebnog vremena sušenja uz dobivanje kvalitetnog proizvoda (Other, 1960.).

Na temelju kvalitete dobivenog produkta nakon sušenja i nakon skladištenja, sušenje u fluidiziranom sloju dalo je kvalitetniji i stabilniji produkt u odnosu na sušenje u solarnom i mikrovalnom sušioniku.

### 2.3.1. Primjena fluidizacije

U fluidiziranim sistemima moguće je izvesti mnoštvo procesa. Vrlo često se pri tome u usporedbi s odgovarajućim procesima u sistemima koji se ne nalaze u tom stanju ostvaruju vrlo značajne tehnološko-ekonomske prednosti. Zbog toga je područje primjene fluidizacije u tehnici vrlo široko. Ono se dijeli i prema procesima koji se izvode s pomoću fluidizacije. Svi se ti procesi mogu svrstati u dvije temeljne skupine.

#### 2.3.1.1. Primjena fluidizacije u izvođenju fizikalnih operacija

Fizikalne operacije u izvođenju kojih se može primjeniti fluidizacija mogu se podijeliti na mehaničke operacije, operacije s prijenosom topline i operacije s prijenosom topline i tvari.

Najvažnije *mehaničke operacije* koje se izvode s pomoću fluidizacije jesu operacije miješanja, klasiranja i sortiranja, te neke transportne operacije. *Miješanje* fluidizacijom često se primjenjuje u priređivanju ili za održavanje suspenzije čvrstih tvari u kapljevinama ili plinovima. *Klasiranje i sortiranje* s pomoću fluidizacije obuhvaća važne operacije pneumatskog i hidrauličkog klasiranja, odnosno sortiranja. Od *transportnih operacija* s pomoću fluidizacije dolazi u obzir i operacije hidrauličkog transporta.

Zbog razmjerno velikog toplinskog kapaciteta, velike specifične površine i vrtložnog gibanja njihove čvrste tvari, fluidizirani slojevi se u tehnici prijenosa topline mogu upotrijebiti kao sredstvo kako za zagrijavanje tako i za hlađenje sa specijalnim vrlo važnim svojstvima. Tako

oni omogućavaju postizanje visokih koeficijenata prijalza topline, bilo da se taj prijelaz ostvaruje posredstvom stjenki, bilo da se ostvaruje izravnim dodirrom s medijem koji treba zagrijati, odnosno hladiti.

Operacije s prijenosom topline i tvari koje se mogu izvoditi s pomoću fluidizacije vrlo su brojne, npr. sušenje, isparavanje, sublimacija, kristalizacija, apsorpcija, ekstrakcija i neke njima suprotne, kao što su: vlaženje, desublimacija, otapanje i desorpcija. (Tripalo i Viličić, 1976.)

### 2.3.1.2. Primjena fluidizacije u izvođenju kemijskih reakcija

Kemijske reakcije u izvođenju kojih se može primijeniti fluidizacija mogu se podijeliti na tzv. *homogene reakcije* (reakcije u homogenim sistemima) pri kojima čvrsti materijal služi kao nosilac ili kao sredstvo za odvođenje topline, reakcije tzv. *heterogene katalize* (reakcije pojedinih sastojaka fluidizatora koje se odvijaju pod utjecajem čvrste tvari fluidiziranog sistema kao katalizator) i *reakcije u kojima je sudionik sama čvrsta tvar fluidiziranog sistema*. Primjena fluidizacije u *homogenim reakcijama* u kojima je čvrsta tvar nosilac topline ili sredstvo za odvođenje topline zapravo je slična već opisanim slučajevima fizikalnih operacija s prijenosom topline, samo što se pri tome radi o odvođenju, odnosno o privođenju topline reakcije (prvo kad se radi o egzotermnim, drugo kad se radi o endotermnim reakcijama). Već opisana svojstva fluidiziranih sistema omogućuju da se takve reakcije izvode praktički izotermno.

Sve razlike temperatura koje mjestimice mogu nastati, mogu se smjesta izjednačiti. Najčešće homogene reakcije koje se izvode na ovakav način jesu različite pirolize. U te procese treba ubrojiti i neka spaljivanja (npr. muljevitih ili kapljevitih otpadaka industrije na ugrijanom, fluidiziranom pijesku).

Od reakcija *heterogene katalize* koje se izvode s pomoću fluidizacije najpoznatije su one koje se izvode u različitim procesima krekovanja i one koje se izvode u tzv. Fischer-Tropschovim sintezama. U novije vrijeme na ovaj se način izvode i različite druge reakcije heterogene katalize.

Najpoznatije reakcije u kojima je fluidizirana čvrsta tvar sudionik jesu tzv. heterogene reakcije (reakcije u heterogenim sistemima čvrstih tvari i fluida); izvode se u različitim

procesima rasplinjavanja i švelovanja ugljena, nekim procesima prženja (posebno materijala koji sadrže sulfide, kao što je npr. pirit radi dobivanja sumpor-dioksida) i pečenja (npr. vapnenca). Ovom tehnikom izvode se u novije vrijeme i neke nuklearne reakcije. (Tripalo i Viličić, 1976.)

### 2.3.2. Prednosti i nedostaci primjene fluidizacije

Prednosti fluidizacije u odnosu na istovjetne operacije s mirujućim slojem:

- lakim uklanjanjem čestica iz sustava osigurava se kontinuiranost operacije
- ravnomjerna raspodjela temperature u cijelom volumenu sloja
- gibanje čestica preko površine izmjene topline uzrokuje visoku izmjenu topline od stjenke na sloj (visoki koeficijent prijenosa topline)
- relativno nizak pad tlaka kroz fluidizirani sloj
- ušteda katalizatora u slučaju njegovog korištenja u reaktorima i fermentorima.

Nedostaci fluidizacije u usporedbi s procesima u sustavima s mirujućim slojevima:

- otpor krutih čestica strujanju plina
- pojava erozija reaktora i fermentora
- brzo miješanje čestica tvari u fluidiziranim sustavima uzrokuje nejednolično vrijeme njihovog zadržavanja u aparaturi
- erozija čestica i stvaranje sitnih frakcija.

### **3.EKSPERIMENTALNI DIO**

### 3.1. CILJ I SVRHA ISTRAŽIVANJA

Svrha ovog rada je istraživanje utjecaja temperature sušenja na kinetiku konvekcijskog sušenja šampinjona u fluidiziranom sloju u laboratorijskim uvjetima te izbor prikladnog matematičkog modela za predviđanje kinetike sušenja.

Pokusi sušenja pripremljenih uzoraka (šampinjona) provedeni su u struji zagrijanog zraka konstantne brzine strujanja od 4,10 m/s u konvekcijskom sušioniku s fluidiziranim slojem pri temperaturama zraka od 50 °C, 60 °C i 70 °C uz kontinuirano mjerenje mase uzoraka svakih 5 minuta.

### 3.2. MATERIJAL

Materijal koji se koristio u ovom radu bili su svježi šampinjoni, koji su neposredno prije sušenja sortirani i očišćeni od grubih nečistoća. Razdvojeni su klobci od stapki te su odvojeno rezani na uzdužne ploške debljine 3 mm.

### 3.3 METODE

#### 3.3.1. Određivanje suhe tvari

Suha tvar je određivana pomoću uređaja HR73 Halogen Moisture Analyzer tvrtke Mettler Toledo (*Slika 6*).

Suha tvar je određivana sušenjem usitnjenog uzorak mase 5 g pri 105 °C standardnim načinom sušenja uz *switch off* kriterij 3, pri čemu je pojedinačna analiza u prosjeku trajala 18 min. Udio suhe tvari određen je kao srednja vrijednost tri paralelna određivanja za svaki uzorak prije sušenja.





**Slika 6** Uređaj za određivanje vlage u uzorku

#### **3.3.2. Sušionik s fluidiziranim slojem „Fluid Bed Dryer“**

Sušionik s fluidiziranim slojem „Fluid Bed Dryer FBD 2000“ (**Slika 7**) je kompaktan i lako prenosiv sušionik. Njegov snažan ventilator omogućuje izuzetno dobar prijenos topline te osigurava mnogo brže i homogenije sušenje od sušenja zagrijanim zrakom pri čemu je uzorak u mirujućem sloju, sušenja mikrovalovima ili od vakuum sušenja. Vrijeme sušenja je od nekoliko sekundi do nekoliko minuta. Ventilator propuhuje veliki volumen zraka iz baze fluidizatora u specijalnu komoru u kojoj su smješteni uzorci koje se suše. Zagrijani zrak prolazi kroz difuznu pregradu koja raspršuje zrak prilikom njegovog ulaska u kolonu. Filter vrećica na vrhu kolone zadržava uzorke, a dozvoljava toplom zraku, vlagi i plinovima da izađu van, a izrađena je od materijali koji podnosi visoke temperature sušenja. Kolona je od stakla volumena 2 L. Prednost staklene kolone je što omogućuju pažljivo promatranje procesa fluidizacije.

#### ***Tehničke karakteristike sušionika s fluidiziranim slojem „Fluid Bed Dryer FBD 2000“:***

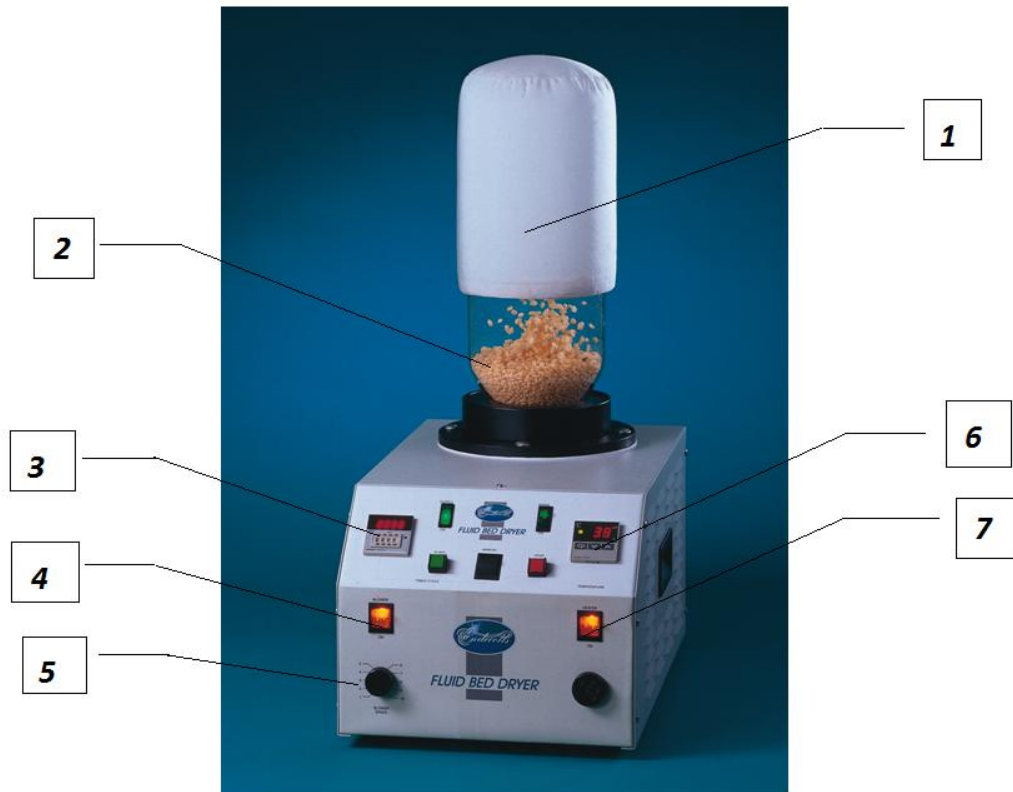
Max težina uzorka: 5 kg

Određena voltaža: 240 V; 50 Hz

Potrošnja energije: 2,6 kW

Dimenzije: 260 x 320 x 505 mm

Masa: 19 kg



**Slika 7** Sušionik s fluidiziranim slojem (1 - filter vrećica; 2 - kolona; 3 - prikaz vremena; 4 - prekidač ventilatora; 5 - regulator brzine rada ventilatora; 6 - prikaz temperature; 7 - prekidač grijača)

#### 3.3.2. Način provedbe sušenja

Nakon uključivanja sušionika podešavala se brzina strujanja zarka na 4,10 m/s te željena radna temperatura (50 °C, 60 °C ili 70 °C). Kolona za fluidizaciju, zajedno s filter vrećicom, postavljena je na sušionika i zagrijavana na željenu temperaturu sušenja. Prije stavljanja uzorka u kolonu određena je masa kolone zajedno s filter vrećicom te je nakon stavljanja uzorka povovo zabilježena masa kolone s uzorkom, nakon čega se započelo s procesom sušenja uzorka. Svakih 5 min vršeno je određivanje mase kolone s uzorkom. Sušenje je prekidano kada su dva uzastopna mjerenja mase kolone s uzorkom imale jednaku vrijednost. Pri svakoj temperaturi sušenja provedena su po dva paralelna sušenja klobuka i stapki.

### 3.3.3. Matematičko modeliranje procesa sušenja

Eksperimentalni podaci provedenih pokusa izraženi su kao bezdimenzionalna vlažnost ( $X'$ ) uzorka u određenom vremenu sušenja:

$$X' = \frac{X(t) - X_R}{X_0 - X_R} \quad (14)$$

gdje je:  $X(t)$  - vlažnost materijala u vremenu ( $t$ ),  $X_R$  ravnotežna vlažnost, a  $X_0$  početna vlažnost materijal u vremenu  $t = 0$ .

Budući da je za biološke materijale ravnotežnu vlažnost teško odrediti, za potrebe ovog proračuna bezdimenzionalna vlažnost uzorka izračunavala se kao omjer trenutne vlažnosti materijala i početne vlažnosti sirovog materijala:

$$X' = \frac{X(t)}{X_0} \quad (15)$$

Dobiveni eksperimentalni podaci (po dva paralelna određivanja za svaki pokus) matematički su obrađeni korištenjem računalnih programskih paketa Microsoft® Office Excel 2007, te Statistica 7 (StatSoft, Inc., USA) uz korištenje nelinearne Quasi-Newton regresijske metode izračuna parametara zadani matematičkih modela sušenja.

Za aproksimaciju eksperimentalnih podataka sušenja upotrijebljeni su sljedeći matematički modeli:

- Pageov model:  $X' = e^{(-k \cdot t^n)}$  (16)

- Logaritamski model:  $X' = A \cdot e^{(-k \cdot t)} + C$  (17)

- modificirani Henderson-Pabisov model:  $X' = G \cdot e^{(-S \cdot t^N)}$  (18)

Za ocjenu uspješnosti aproksimacije eksperimentalnih podataka sušenja matematičkim modelima, korišteni uz koeficijent korelacije ( $R$ ) i ukupno kvadratno odstupanje (FL):

• koeficijen korelacije:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X'_{pre,i} - X'_{eks,i})^2}{\sum_{i=1}^N (X'_{ekp} - X'_{eks,i})^2}} \quad (19)$$

• ukupno kvadratno odstupanje:

$$FL = \sum_{i=1}^N (X'_{pre,i} - X'_{eks,i})^2 \quad (20)$$

## **4.REZULTATI**

U ovom poglavlju prikazani su rezultati dobivenih eksperimentalnim radom, tj. rezultati dobiveni tijekom konvekcijskog sušenja u fluidiziranom sloju klobuka i stapki šampinjona.

Eksperimentalne/mjerene vrijednosti mase uzoraka tijekom sušenja prevedene su u bezdimenzionalnu vlažnost uzoraka što je poslužilo za izradu krivulja sušenja te modeliranje kinetike sušenja pomoću odabranih matematičkih modela.

Krivulje sušenja (ovisnost vlažnosti uzoraka o vremenu sušenja) za klobuke i stapke šampinjona procjenjene su prema modificiranom Henderson-Pabisovom modelu za koji su dobiveni najniža vrijednost ukupnog kvadratnog odstupanja (L.F.) i najviša vrijednost koeficijenta korelacije (R).

### 4.1. Sušenje

Prikazani su rezultati konvekcijskog sušenja klobuka i stapki u fluidiziranom sloju, na način da iza eksperimentalnih krivulja sušenja slijede i rezultati aproksimacije eksperimentalnih podataka odabranim matematičkim modelima.

Rezultati su prikazani kako slijedi:

- Sušenje klobuka na temperaturama 50 °C , 60 °C i 70 °C (masa uzorka i vlažnost uzorka)
- Sušenje stapki na temperaturama 50 °C , 60 °C i 70 °C (masa uzorka i vlažnost uzorka)
- Parametri matematičkih modela za klobuke i stapke na temperaturama 50 °C , 60 °C i 70°C
- Ovisnost bezdimenzionalne vlažnosti klobuka i stapki o vremenu sušenja prema aproksimaciji prema modificiranom Henderson-Pabis modelu.

**Tablica 2** Vrijednosti za mase uzorka i izračunate vlažnosti uzorka tijekom vremena sušenja *klobuka*, dobivene eksperimentalnim putem pri temperaturi 50 °C (za dva paralelna pokusa)

50 °C / I.			50 °C / II.		
t/min	m/g	X/(kg <sub>v</sub> /kg <sub>st</sub> )	t/min	m/g	X/(kg <sub>v</sub> /kg <sub>st</sub> )
0	71,23	11,65	0	71,62	11,65
5	59,10	9,50	5	60,48	9,69
10	51,61	8,17	10	53,22	8,40
15	46,10	7,19	15	47,51	7,39
20	41,65	6,40	20	42,99	6,60
25	37,89	5,73	25	39,17	5,92
30	34,72	5,17	30	35,62	5,29
35	31,92	4,67	35	32,98	4,83
40	29,49	4,24	40	30,33	4,36
45	27,29	3,85	45	27,93	3,93
50	25,30	3,49	50	25,90	3,58
55	23,50	3,17	55	23,95	3,23
60	21,78	2,87	60	22,18	2,92
65	20,22	2,59	65	20,48	2,62
70	18,79	2,34	70	18,81	2,32
75	17,42	2,09	75	17,11	2,02
80	16,16	1,87	80	16,08	1,84
85	15,02	1,67	85	15,40	1,72
90	13,93	1,47	90	14,88	1,63
95	13,03	1,31	95	13,78	1,43
100	12,17	1,16	100	12,84	1,27
105	11,35	1,02	105	12,00	1,12
110	10,63	0,89	110	11,19	0,98
115	9,99	0,77	115	10,51	0,86
120	9,41	0,67	120	9,82	0,73
125	8,88	0,58	125	9,35	0,65
130	8,48	0,51	130	8,17	0,44
135	8,01	0,42	135	7,88	0,39
140	7,67	0,36	140	7,66	0,35
145	7,41	0,32	145	6,89	0,22
150	7,10	0,26	150	6,66	0,18
155	6,88	0,22	155	6,46	0,14
160	6,70	0,19	160	6,37	0,13
165	6,53	0,16	165	6,15	0,09
170	6,43	0,14	170	6,06	0,07
175	6,31	0,12	175	5,92	0,04
180	6,19	0,10	180	5,86	0,04
185	6,16	0,09	185	5,78	0,02
190	5,91	0,05	190	5,76	0,02
195	5,89	0,05	195	5,76	0,02

**Tablica 3** Vrijednosti za mase uzorka i izračunate vlažnosti uzorka tijekom vremena sušenja klobuka, dobivene eksperimentalnim putem pri temperaturi 60 °C (za dva paralelna pokusa)

60 °C / I.			60 °C / II.		
t/min	m/g	X/(kg <sub>v</sub> /kg <sub>st</sub> )	t/min	m/g	X/(kg <sub>v</sub> /kg <sub>st</sub> )
0	70,52	10,64	0	71,17	10,90
5	57,74	8,53	5	58,05	8,71
10	47,69	6,87	10	50,40	7,43
15	40,50	5,68	15	44,67	6,47
20	34,83	4,75	20	39,88	5,67
25	30,16	3,98	25	35,63	4,96
30	26,29	3,34	30	31,87	4,33
35	22,92	2,78	35	28,38	3,75
40	19,99	2,30	40	25,26	3,22
45	17,44	1,88	45	22,49	2,76
50	15,23	1,51	50	19,93	2,33
55	13,21	1,18	55	17,69	1,96
60	11,57	0,91	60	15,87	1,65
65	10,28	0,70	65	13,78	1,30
70	9,27	0,53	70	12,24	1,05
75	8,42	0,39	75	10,90	0,82
80	8,01	0,32	80	9,81	0,64
85	7,42	0,22	85	8,93	0,49
90	7,11	0,17	90	8,19	0,37
95	6,89	0,14	95	7,64	0,28
100	6,85	0,13	100	7,27	0,22
105	6,51	0,07	105	6,99	0,17
110	6,43	0,06	110	6,76	0,13
115	6,41	0,06	115	6,59	0,10
120	6,29	0,04	120	6,52	0,09
125	6,29	0,04	125	6,44	0,08
			130	6,41	0,07
			135	6,37	0,07
			140	6,35	0,06
			145	6,35	0,06



**Tablica 4** Vrijednosti za mase uzorka i izračunate vlažnosti uzorka tijekom vremena sušenja klobuka, dobivene eksperimentalnim putem pri temperaturi 70 °C (za dva paralelna pokusa)

70 °C / I.			70 °C / II.		
t/min	m/g	X/(kg <sub>v</sub> /kg <sub>st</sub> )	t/min	m/g	X/(kg <sub>v</sub> /kg <sub>st</sub> )
0	71,30	11,19	0	70,84	10,63
5	52,01	7,89	5	51,23	7,41
10	40,04	5,84	10	40,11	5,59
15	32,46	4,55	15	31,49	4,17
20	26,24	3,49	20	24,86	3,08
25	20,94	2,58	25	19,73	2,24
30	17,30	1,96	30	15,73	1,58
35	14,31	1,45	35	12,71	1,09
40	11,92	1,04	40	10,43	0,71
45	10,10	0,73	45	8,85	0,45
50	8,77	0,50	50	7,77	0,28
55	7,75	0,32	55	7,13	0,17
60	7,04	0,20	60	6,72	0,10
65	6,65	0,14	65	6,46	0,06
70	6,37	0,09	70	6,29	0,03
75	6,24	0,07	75	6,21	0,02
80	6,20	0,06	80	6,17	0,01
85	6,20	0,06	85	6,15	0,01
			90	6,15	0,01

**Tablica 5** Vrijednosti za mase uzorka i izračunate vlažnosti uzorka tijekom vremena sušenja *stapki*, dobivene eksperimentalnim putem pri temperaturi 50 °C (za dva paralelna pokusa)

50 °C / I.			50 °C / II.		
t/min	m/g	X/(kg <sub>v</sub> /kg <sub>st</sub> )	t/min	m/g	X/(kg <sub>v</sub> /kg <sub>st</sub> )
0	71,50	9,45	0	70,73	10,10
5	58,99	7,87	5	60,18	8,44
10	51,40	6,73	10	53,33	7,37
15	45,71	5,87	15	48,25	6,57
20	41,15	5,19	20	44,03	5,91
25	37,32	4,61	25	40,47	5,35
30	33,74	4,07	30	37,47	4,88
35	30,59	3,60	35	34,73	4,45
40	27,49	3,13	40	32,28	4,07
45	24,79	2,73	45	30,09	3,72
50	22,22	2,34	50	28,05	3,40
55	19,98	2,00	55	26,26	3,12
60	18,01	1,71	60	24,53	2,85
65	16,26	1,45	65	22,92	2,60
70	14,76	1,22	70	21,28	2,34
75	13,45	1,02	75	19,84	2,11
80	12,33	0,85	80	18,45	1,90
85	11,37	0,71	85	17,23	1,70
90	10,55	0,59	90	16,14	1,53
95	9,91	0,49	95	15,13	1,38
100	9,34	0,40	100	14,12	1,22
105	8,86	0,33	105	13,32	1,09
110	8,43	0,27	110	12,57	0,97
115	8,14	0,22	115	11,87	0,86
120	7,92	0,19	120	11,27	0,77
125	7,63	0,15	125	10,76	0,69
130	7,52	0,13	130	10,28	0,61
135	7,37	0,11	135	9,83	0,54
140	7,30	0,10	140	9,43	0,48
145	7,19	0,08	145	9,14	0,43
150	7,14	0,07	150	8,86	0,39
155	7,09	0,07	155	8,56	0,34
160	7,09	0,07	160	8,09	0,27
			165	7,90	0,24
			170	7,76	0,22
			175	7,60	0,19

**Tablica 6** Vrijednosti za mase uzorka i izračunate vlažnosti uzorka tijekom vremena sušenja *stapki*, dobivene eksperimentalnim putem pri temperaturi 60 °C (za dva paralelna pokusa)

60 °C / I.			60 °C / II.		
t/min	m/g	X/(kg <sub>v</sub> /kg <sub>st</sub> )	t/min	m/g	X/(kg <sub>v</sub> /kg <sub>st</sub> )
0	70,82	10,63	0	70,68	10,11
5	58,18	8,55	5	57,13	7,98
10	50,19	7,24	10	48,57	6,64
15	44,13	6,25	15	41,95	5,60
20	38,97	5,40	20	36,36	4,72
25	34,40	4,65	25	31,31	3,92
30	30,35	3,98	30	26,73	3,20
35	26,59	3,37	35	22,73	2,57
40	23,18	2,81	40	19,27	2,03
45	20,21	2,32	45	16,37	1,57
50	17,67	1,90	50	13,98	1,20
55	15,40	1,53	55	12,04	0,89
60	13,43	1,21	60	10,9	0,71
65	11,85	0,95	65	9,38	0,47
70	10,56	0,73	70	8,51	0,34
75	9,49	0,56	75	7,95	0,25
80	8,65	0,42	80	7,54	0,19
85	8,06	0,32	85	7,22	0,14
90	7,56	0,24	90	7,01	0,10
95	7,20	0,18	95	6,96	0,09
100	7,05	0,15	100	6,74	0,06
105	6,82	0,12	105	6,62	0,04
110	6,67	0,10	110	6,57	0,03
115	6,52	0,07	115	6,48	0,02
120	6,49	0,07	120	6,48	0,02
125	6,43	0,06			
130	6,23	0,02			
135	6,21	0,02			
140	6,18	0,01			
145	6,14	0,008			
150	6,14				

**Tablica 7** Vrijednosti za mase uzorka i izračunate vlažnosti uzorka tijekom vremena sušenja *stapki*, dobivene eksperimentalnim putem pri temperaturi 70 °C (za dva paralelna pokusa)

70 °C / I.			70 °C / II.		
t/min	m/g	X/(kg <sub>v</sub> /kg <sub>st</sub> )	t/min	m/g	X/(kg <sub>v</sub> /kg <sub>st</sub> )
0	70,88	10,49	0	71,36	10,62
5	54,73	7,87	5	54,07	7,81
10	44,50	6,21	10	43,11	6,02
15	35,97	4,83	15	34,22	4,57
20	28,87	3,68	20	27,12	3,42
25	23,14	2,75	25	21,55	2,51
30	18,39	1,98	30	17,16	1,79
35	14,76	1,39	35	13,82	1,25
40	12,00	0,94	40	11,44	0,86
45	9,98	0,62	45	9,73	0,58
50	8,67	0,41	50	8,54	0,39
55	7,92	0,28	55	7,72	0,26
60	7,17	0,16	60	7,17	0,18
65	6,82	0,11	65	7,16	0,17
70	6,56	0,06	70	6,47	0,05
75	6,42	0,04	75	6,35	0,03
80	6,32	0,02	80	6,23	0,02
85	6,25	0,01	85	6,19	0,01
90	6,23	0,01	90	6,19	0,01
95	6,23	0,01			

## 4.2 Matematički modeli

**Tablica 8** Procijenjeni parametri *Pageovog* matematičkog modela (16) te koeficijent korelacije (*R*) i ukupno kvadratno odstupanje (*F.L.*) za sušenje *klobuka* na temperaturama 50 °C, 60 °C i 70 °C

	<b>k</b>	<b>n</b>	<b>F.L.</b>	<b>R</b>
<b>50 °C</b>	0,041310	0,871754	0,0177	0,9982
<b>60 °C</b>	0,039776	0,972770	0,4345	0,9945
<b>70 °C</b>	0,067549	0,975144	<b>0,0059</b>	<b>0,9989</b>

**Tablica 9** Procijenjeni parametri *Logaritamskog* matematičkog modela (17) te koeficijent korelacije (*R*) i ukupno kvadratno odstupanje (*F.L.*) za sušenje *klobuka* na temperaturama 50 °C, 60 °C i 70 °C

	<b>A</b>	<b>K</b>	<b>C</b>	<b>F.L.</b>	<b>R</b>
<b>50 °C</b>	0,932598	0,022768	-0,003476	0,0248	0,9975
<b>60 °C</b>	0,984050	0,033717	-0,013461	0,0400	0,9950
<b>70 °C</b>	0,991520	0,060344	-0,007462	<b>0,0052</b>	<b>0,9991</b>

**Tablica 10** Procijenjeni parametri *modificiranog Henderson-Pabis* matematičkog modela (18) te koeficijent korelacije (*R*) i ukupno kvadratno odstupanje (*F.L.*) za sušenje *klobuka* na temperaturama 50 °C, 60 °C i 70 °C

	<b>G</b>	<b>S</b>	<b>N</b>	<b>F.L.</b>	<b>R</b>
<b>50 °C</b>	0,974308	0,036172	0,898858	0,0161	0,9984
<b>60 °C</b>	0,978865	0,035502	0,998613	0,0424	0,9947
<b>70 °C</b>	0,991630	0,065210	0,984108	<b>0,0057</b>	<b>0,9990</b>

**Tablica 11** Procijenjeni parametri *Pagovog* matematičkog modela (16) te koeficijent korelacije (*R*) i ukupno kvadratno odstupanje (*F.L.*) za sušenje *stapki* na temperaturama 50 °C, 60 °C i 70 °C

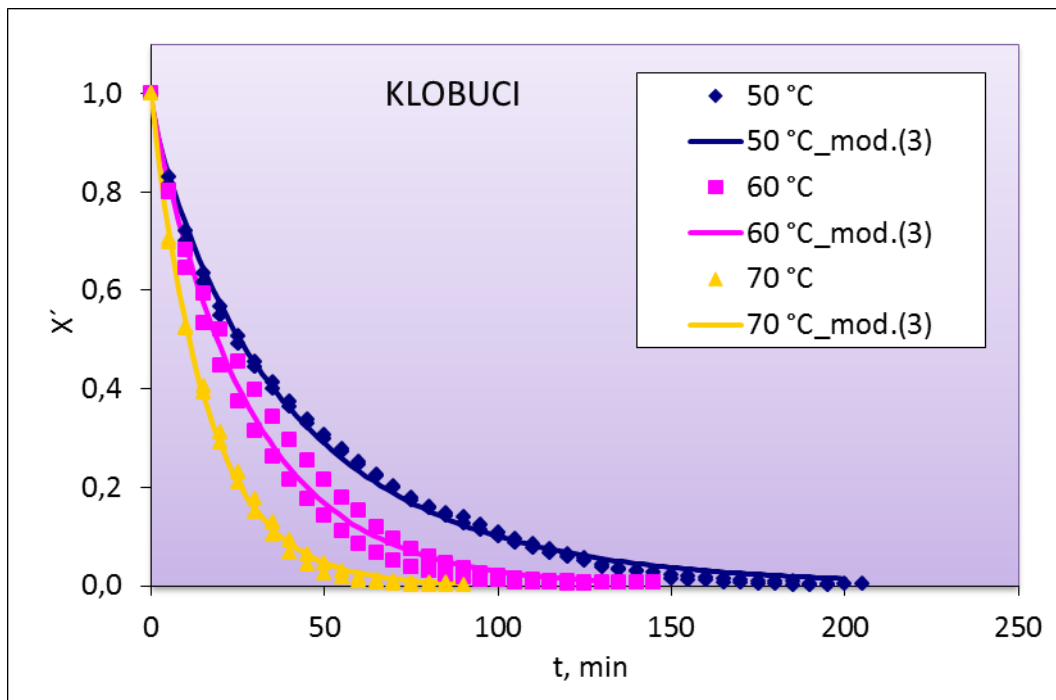
	<b>k</b>	<b>n</b>	<b>F.L.</b>	<b>R</b>
<b>50 °C</b>	0,036292	0,910493	0,0821	0,9919
<b>60 °C</b>	0,033973	1,030336	0,0292	0,9964
<b>70 °C</b>	0,046659	1,065647	<b>0,0062</b>	<b>0,9990</b>

**Tablica 12** Procijenjeni parametri *Logaritamskog* matematičkog modela (17) te koeficijent korelacije (*R*) i ukupno kvadratno odstupanje (*F.L.*) za sušenje *stapki* na temperaturama 50 °C, 60 °C i 70 °C

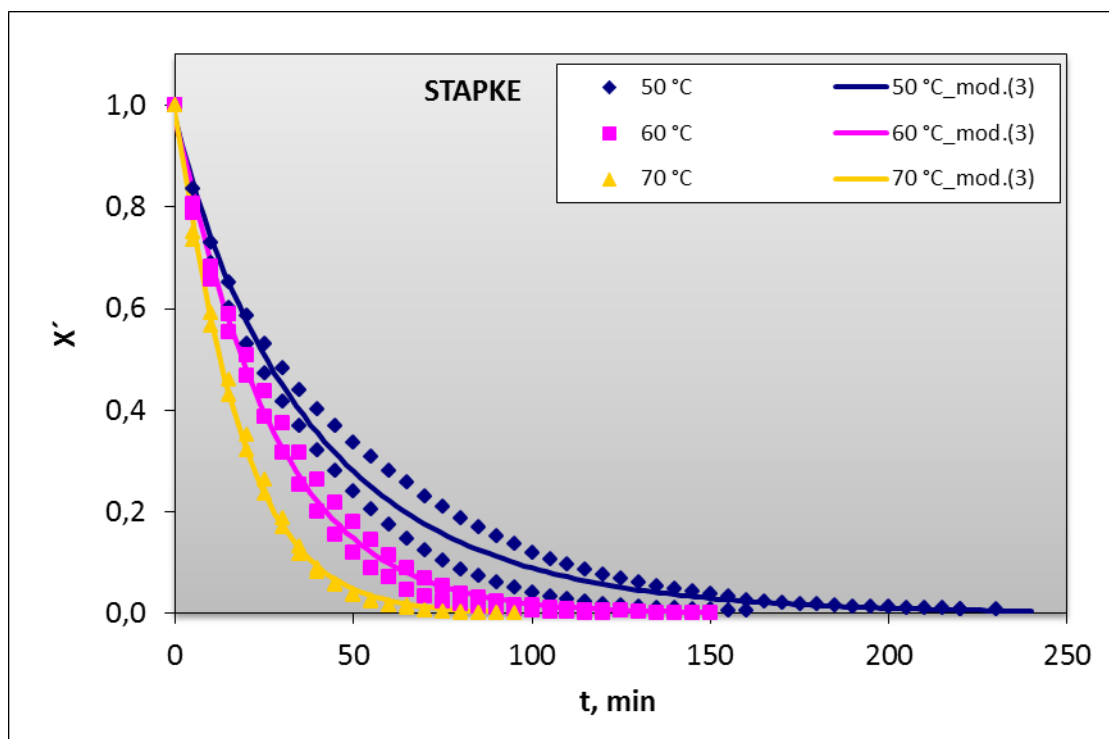
	<b>A</b>	<b>K</b>	<b>C</b>	<b>F.L.</b>	<b>R</b>
<b>50 °C</b>	0,952273	0,024597	0,002927	0,0843	0,9917
<b>60 °C</b>	1,003232	0,035346	-0,018943	0,0247	0,9969
<b>70 °C</b>	1,017230	0,054581	-0,017158	<b>0,0051</b>	<b>0,9992</b>

**Tablica 13** Procijenjeni parametri *modificiranog Henderson-Pabis* matematičkog modela (18) te koeficijent korelacije (*R*) i ukupno kvadratno odstupanje (*F.L.*) za sušenje *stapki* na temperaturama 50 °C, 60 °C i 70 °C

	<b>G</b>	<b>S</b>	<b>N</b>	<b>F.L.</b>	<b>R</b>
<b>50 °C</b>	0,979309	0,032419	0,934056	0,0811	0,9920
<b>60 °C</b>	0,973462	0,029076	1,066790	0,0276	0,9966
<b>70 °C</b>	0,988136	0,043953	1,081072	<b>0,0059</b>	<b>0,9990</b>



**Slika 8** Ovisnost bezdimenzionalne vlažnosti *klobuka* o vremenu sušenja na temperaturama od 50°C 60°C i 70°C prema Henderson-Pabisovom modelu



**Slika 9** Ovisnost bezdimenzionalne vlažnosti *stapki* o vremenu sušenja na temperaturama od 50°C, 60°C i 70°C prema modificiranom Henderson-Pabisovom modelu

## **5.RASPRAVA**



U ovom radu je provedeno istraživanje utjecaja parametara na kinetiku sušenja šampinjona (posebno klobuka, a posebno stapki) u sušioniku s fluidiziranim slojem „Fluid Bed Dryer“, kao i izbor matematičkog modela za predviđanje kinetike sušenja, koji daje najbolje slaganje s dobivenim eksperimentalnim podacima.

Rasprava započinje osvrtnom na kinetiku sušenja i primjenjivost matematičkih modela za opisivanje kinetike sušenja.

### 5.1. SUŠENJE

Sušenje je provedeno u uvjetima koji su prikazani u **Tablicama 2 - 7** pri konstantnoj brzini strujanja zraka od 4,10 m/s. Tijekom sušenja kontinuirano je mjerena masa materijala koja je preračunata u vlažnost materijala ( $X$ ,  $\text{kg}_v/\text{kg}_{st}$ ) i izražena kao bezdimenzionalna vlažnost ( $X'$ ) koja je poslužila za izradu kinetičkih krivulja sušenja. Na ovaj način bilo je omogućeno jednostavnije i preciznije uspoređivanje svih dobivenih rezultata, kao i matematičko modeliranje kinetike sušenja.

Iz dobivenih podataka vidljivo je da je masa uzoraka kontinuirano opadala s vremenom sušenja. U početku je promjena mase uzoraka bila veća dok se tijekom daljnjeg sušenja smanjivala. Sušenje je bilo brže kod viših temperatura, pri čemu se smanjivalo vrijeme samog sušenja.

### 5.2. MATEMATIČKO MODELIRANJE KINETIKE SUŠENJA

Za matematičko modeliranje kinetike odabrani su jednočlani modeli, koji su u literaturi već korišteni za opisivanje kinetike sušenja vrlo različitih materijala uz primjenu različitih načina i režima sušenja. Ovi modeli sadrže parametre koji predstavljaju određene konstante sušenja karakteristične za taj model. Prema dobivenim eksperimentalnim rezultatima i primjenom metode matematičke regresije procijenjeni su parametri odabranih modela kako slijedi:

- Pageov model (eksponencijalni dvoparametarski -  $k, n$ )
- logaritamski model (eksponencijalni troparametarski –  $A, K, C$ )

- modificirani Henderson-Pabisov model (eksponencijalni troparametarski –  $G, S, N$ ),

Prikladnost matematičkog modela za opisivanje svakog pokusa sušenja potvrđivala se korištenjem statističkih pokazatelja uspješnosti aproksimacije, a primijenjeni su: koeficijent korelacije ( $R$ ), ukupno kvadratno odstupanje ( $F.L.$ ). Potpuno slaganje između eksperimentalnih i modelom predviđenih vrijednosti bilo bi potvrđeno s vrijednostima 1 za parametar ( $R$ ), odnosno s vrijednostima 0 za ( $F.L.$ ). Za praktične slučajeve poželjne su vrijednosti  $\sim 1$ , odnosno  $\sim 0$ .

Za numeričke aproksimacije eksperimentalnih podataka u ovom radu dobivene su vrlo visoke vrijednosti koeficijenta korelacije ( $R$ ) u rasponu od 0,9917 do 0,9992, a vrijednosti ukupnog kvadratnog odstupanja ( $F.L.$ ) su bile zadovoljavajuće male u rasponu od 0,0051 do 0,0843, za sve pokuse (**Tablice 8- 13**).

Na temelju vrijednosti statističkih parametara, može se uočiti da je modificirani Henderson-Pabisov model najbolje aproksimirao eksperimentalne podatke sušenja uzoraka klobuka i stapki šampinjona. Naime, navedeni je model, za sve uzorke imao najveći koeficijent korelacije ( $R$ ) čije su se vrijednosti kretale u rasponu od 0,9917 do 0,9992 kao i najmanje vrijednosti za ukupno kvadratno odstupanje ( $F.L.$ ) čije su se vrijednosti kretale u rasponu od 0,0051 do 0,0811.

Ovi podaci ukazuju na najbolje slaganje između eksperimentalnih i pretpostavljenih podataka. Ostala dva modela su pokazala manje slaganje eksperimentalnih i predviđenih podataka, ali su rezultati još uvijek zadovoljavajući. Dobro slaganje eksperimentalnih i predviđenih podataka je prikazano **Slikama 8 i 9**, koje pokazuju ovisnost bezdimenzionalne vlažnosti uzoraka klobuka i stapki o vremenu sušenja i konstantnoj brzini strujanja zraka od 4,10 m/s za modificirani Henderson-Pabisov model. Na njima se vidi najbolje slaganje podataka.

## **6.ZAKLJUČAK**

Sušenje klobuka i stapki šampinjona je provedeno u sušioniku s fluidiziranim slojem pri brzini strujanja zraka od 4,10 m/s. Dobiveni su osušeni uzorci koji su tijekom sušenja promijenili svoju veličinu uslijed skupljanja materijala. Na temelju dobivenih eksperimentalnih rezultata, te njihovom numeričkom i statističkom obradom analizirana je primjenjivost matematičkih modela za opisivanje kinetike sušenja.

Mogu se donijeti sljedeći zaključci:

- Povećanjem temperature sušenja pri konstantnoj brzini strujanja zraka 4,1 m/s smanjuje se vrijeme sušenja šampinjona.
- Usporedba matematičkih modela (Page, Henderson-Pabis i modificirani Henderson-Pabis) za opisivanje kinetike sušenja pokazala je da najbolje slaganje eksperimentalnih podataka i predviđenih podataka pokazuje da modificirani Henderson-Pabisov model. Visoko zadovoljavajućim su se pokazala i ostala dva korištena modela.
- Kod najveće temperature sušenja (70 °C) dolazi do znatnije promjene boje osušenih uzoraka nego kod temperature od 50 °C.

## **7.LITERATURA**

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

<http://www.cscscientific.com/html/fbd.html>

<http://www.endecotts.com./otherproducts/fbd.htm>

<https://www.themajka.com/viewtopic.php?f=21&t=430> (22.6.2014.)

Ježek D.: *Prijelaz topline uronjenog orebrenog grijača i sloja čestica prehrambenih proizvoda različitih dimenzija*, Prehrambeno – biotehnološki fakultet Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, str. 1, 1999.

Kaymak-Ertekin F.: *Drying and rehydrating kinetics of green and red peppers*. *Journal of Food Science* 67, 168-175, 2002.

Lovrić T.: *Procesi u prehrambenoj industriji s osnovama prehrambenog inženjerstva*, Hinus, Zagreb str.55, 179-227, 2003.

Mujumdar A. S., *Handbook of Industrial Drying*, Marcel Dekker, Inc., New York, 1995.

Othmer D. F.: *Fluidization*, New York 1956 ; M. Leva : *Fluidization, Fluidized particles*, New York, 1959 ; J.F. Davidson, D. Haraisson : *Fluidized particles*, New York, 1963 ; H. Reuter : *Chemiker Ztg.* 89/1965/8, 276/282, cit. Prema L. Reh: *Fliessbett – Technik, Fortschr. Verfahrenstech.* 7/ 1964/65,770 ; D. Kurir, O. Levenspiel : *Fluidization engineering*, New York, 1969 ; R. H. Perry, C. H. Chilton : *Chemical engineers handbook*, New York, 1973.

Othmer D. F., Zens F. A.: *Fluidization and fluid particle systems*, Reinhold public. Co., New York, 1960.

Planovski N., et. al.: *Suška dispergnyh materialov v himičeskoj promišlenodti*, Himija, Moskva, 1979.

Tomas S.: *Prijenos topline*. Prehrambeno – tehnološki fakultet Osijek str. 1-50, 2000.

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

Tripalo B. i Viličić Ž.: *Fluidizacija*, Tehnička enciklopedija br.5, LZMK, Zagreb, str. 487 - 493, 1976.

Tripalo B. i Viličić Ž.: *Sušenje*, Tehnička enciklopedija br.12, LZMK, Zagreb, str. 451-461, 1992.

Velić D., M. Planinić, S. Tomas, M. Bilić: *Influence of Airflow Velocity on Kinetics of Convection apple drying*. *Journal of Food Engineering*, 64(2004)97-102.