

# Kinetika sušenja katalizatora u sušioniku s fluidiziranim slojem

---

Mitar, Anamarija

Master's thesis / Diplomski rad

2015

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:149:534398>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-26**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Anamarija Mitar

**DIPLOMSKI RAD**

Zagreb, srpanj 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Anamarija Mitar

KINETIKA SUŠENJA KATALIZATORA U  
SUŠIONIKU S FLUIDIZIRANIM SLOJEM

DIPLOMSKI RAD

Voditelj rada: prof. dr. sc. Aleksandra Sander

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

izv. prof. dr. sc. Jasna Prlić Kardum

prof. dr. sc. Ljubica Matijašević

Zagreb, srpanj 2015.

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 2014. / 2015.

*Zahvala*

*Zahvaljujem se svojoj mentorici prof. dr. sc. Aleksandri Sander na savjetima, prenesenom znanju i pomoći tijekom izrade ovog rada.*

*Zahvaljujem se i svima onima koji su mi uvijek bili podrška u školovanju.*

## Sažetak

Sušenje u fluidiziranom sloju čest je proces za sušenje čestičnih materijala u kemijskoj i prehrambenoj industriji. U ovom radu istraživana je kinetika sušenja katalizatora u sušioniku sa fluidiziranim slojem. Mjerenja su provedena u laboratorijskom sušioniku pri različitim brzinama strujanja zraka, temperaturama ulaznog zraka, te različitim visinama sloja čvrstih čestica. Kao materijal za sušenje odabrane su čvrste sferične čestice tj. kuglice katalizatora zbog svog savršenog oblika.

Kinetičke krivulje sušenja aproksimirane su odabranim matematičkim modelima, a njihovi su parametri dovedeni u vezu s uvjetima provedbe procesa. Rezultati su pokazali da temperatura i brzina strujanja zraka utječu na kinetiku sušenja, dok visina sloja čvrstih čestica nema značajan utjecaj na kinetiku sušenja. Veća brzina sušenja odgovara većim temperaturama i povoljnijim hidrodinamičkim uvjetima.

**Ključne riječi:** minimalna brzina fluidizacije, kinetika sušenja, sušenje u fluidiziranom sloju

## Summary

Fluidized bed drying is a common process for drying particulate material in chemical and food industry. In this work fluid bed drying kinetics of a catalyst has been investigated. Experiments were carried out in a laboratory fluid bed dryer at different drying air velocities, drying air temperatures and different catalyst bed heights. The examined material (catalyst) was selected for drying because of its particles spherical shape.

Drying kinetic curves have been approximated with the chosen mathematical models and the resulting model parameters have been correlated with process conditions. Obtained results show that drying air temperature and drying air velocity influence the drying kinetics, while catalyst bed height doesn't show any significant influence on drying kinetics. Higher drying rates are obtained at higher temperatures and for adequate hydrodynamic conditions.

**Key words:** minimum fluidization velocity, drying kinetics, fluid bed dryer

## Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Teorijski dio .....	2
2.1. Fluidizacija .....	2
2.1.1. Geldartova klasifikacija čestica .....	4
2.1.2. Režimi fluidizacije .....	6
2.2. Sušenje.....	7
2.3. Sušenje u fluidiziranom sloju .....	10
2.4. Kinetika sušenja.....	11
3. Eksperimentalni dio.....	14
3.1. Svrha.....	14
3.2. Opis aparature.....	14
3.4. Uvjeti provedbe procesa .....	15
3.5. Ravnotežni sadržaj vlage materijala .....	16
3.6. Metoda proračuna .....	16
4. Rezultati .....	19
5. Rasprava .....	31
6. Zaključci.....	36
7. Popis simbola .....	37
8. Literatura .....	40
9. Životopis.....	41



## 1. Uvod

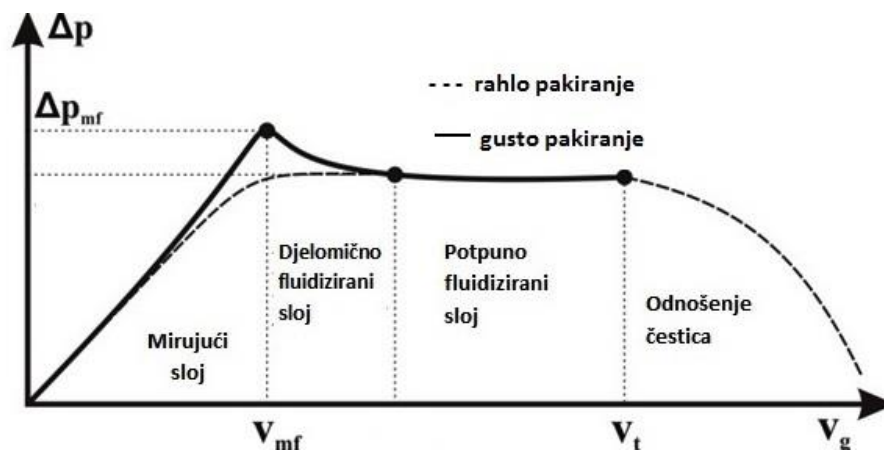
Izmjena topline i tvari u fluidiziranom sloju nalazi svoju primjenu u zadnjih tridesetak godina na veoma širokom području. Sušenje u fluidiziranom sloju primjenjuje se u mnogim industrijama kao što su farmaceutska, prehrambena, kemijska, naftna, keramička i ostale granane industrije. Tako se gotovo svi materijali, koji se mogu fluidizirati suše u fluidiziranom sloju, pa čak i različite emulzije, paste i suspenzije koje se fluidiziraju u sloju inertnih čestica. U takvom fluidiziranom sloju dolazi do intenzivnog miješanja čvrstih čestica te čestica i fluida zbog čega se ostvaruje velika brzina prijenosa topline i tvari te količine gibanja, kao i niz drugih prednosti. Zbog same složenosti procesa i malo literaturnih podataka, u posljednje vrijeme intenzivno se istražuje kinetika i hidrodinamika procesa sušenja. Da bi dobili saznanja od kinetici procesa sušenja potrebno je istražiti utjecaj brzine strujanja zraka, temperature sušenja i relativne vlažnosti zraka te visine sloja čestica na kinetiku i parametre matematičkog modela.<sup>1,2</sup>

U ovom radu istražen je utjecaj uvjeta procesa na kinetiku sušenja čvrstih čestica tj. katalizatora u sušioniku s fluidiziranim slojem. Eksperimentalni podaci su aproksimirani Pageovim i Lewisovim matematičkim modelima te je analiziran utjecaj uvjeta provedbe procesa na parametre matematičkih modela. Na taj je način omogućeno predviđanje minimalne brzine fluidizacije i kinetičke krivulje sušenja. Mjerenja su provedena na laboratorijskom sušioniku s fluidiziranim slojem pri različitim temperaturama i brzinama strujanja zraka te različitim visinama sloja čvrstih čestica, a metoda korištena za proračun je psihrometrijska metoda. Kao materijal za sušenje odabrane su čvrste sferične čestice tj. kuglice katalizatora zbog svog savršenog oblika.

## 2. Teorijski dio

### 2.1. Fluidizacija

Operacija kojom se sloj čvrstih čestica prevodi u pseudo homogeni sustav i takvim održava naziva se fluidizacija, odnosno fluidizacija je stanje dvofaznog sustava čvrsto/fluid koje je karakterizirano međusobnim miješanjem sa sredstvom za fluidizaciju tj. kapljevnom ili plinom. Fluidizacija se obično provodi u kolonama čije su površine presjeka jednake na svim mjestima pa tako i na raspodjelnoj rešetki. Funkcije raspodjelne rešetke su sprečavanje propadanja zrnatog materijala (nosač je sloja) te zbog različitih oblika i broja otvora omogućava željenu raspodjelu fluida, koja se u uređaj uvodi odozdo.



Slika 1. Dijagram pada tlaka fluidizacije (Kunii i Levenspiel 1991.)

Pri razmjerno malim brzinama fluidizacije sloj čestica krute tvari mirno leži na razdjelnoj rešetki pri čemu se ostvaruje njegovo najgušće stanje. Ovaj sloj se naziva mirujućim slojem budući da se čestice ne miču, tj. međusobni razmak ostaje stalan. U mirujućem sloju fluid samo prostrujava između čestica ne mijenjajući poroznost sloja, a karakteristike strujanja fluidizatora jednake su kao kod strujanja fluida kroz porozno tijelo, što je prikazano dijagramom koji prikazuje ovisnost pada tlaka fluidizacije o brzini fluida za mirujući i fluidizirani sloj čestica (slika 1.).<sup>1,2</sup>

Minimalna brzina kod koje počinje fluidizacija u velikoj mjeri ovisi o poroznosti sloja. U mirujućem sloju ostvaruju se dvije vrste pakovanja: gusto ( $\epsilon_s$ ), pri povećanju brzine i rahlo ( $\epsilon_l$ ), pri smanjenju brzine ( $\epsilon_s < \epsilon_l$ ). Pri laminarnom strujanju kroz sloj sitnih čestica ( $Re < 20$ ) uzima se u obzir samo prvi član tzv. Ergunove jednadžbe, pa je minimalna brzina kod koje počinje fluidizacija:

$$v_{mf} = \frac{1}{150} \frac{(\rho_d - \rho) x_{ST}^2 g}{\eta} \frac{\epsilon_{mf}^3}{x_{ST}} \quad (1)$$

Pri malim brzinama strujanja fluida,  $v_f$ , (laminarno strujanje) ovisnost pada tlaka o brzini kroz mirujući sloj je linearna. Povećanjem brzine strujanja fluida, pad tlaka u sloju raste samo do neke granice, a zatim zadržava približno konstantnu vrijednost. To je kritični trenutak u nastajanju fluidiziranog sloja, kada se sila zbog pada tlaka izjednačava s težinom čestica u sloju umanjenom za silu uzgona čestica uronjenih u fluid. Čestice se tada počinju gibati, što dovodi do povećanja volumena sloja (ekspanzija sloja), tj. do prijelaza sloja u stanje tzv. minimalne fluidizacije. Prijelaz mirnog sloja čestica u stanje minimalne fluidizacije karakterizira porast poroznosti s  $\varepsilon$  na  $\varepsilon_{mf}$ , a brzine fluidizacije  $v_f$  na  $v_{mf}$ . Minimalna brzina fluidizacije raste s veličinom i gustoćom čestica, ovisna je i o fizikalnim svojstvima fluida, a također ovisi i o sadržaju vlage čestica što je važno npr. kod sušenja. Daljnjim povećanjem brzine fluidizacije dolazi do sve veće ekspanzije sloja praćene intenzivnim kretanjem čestica. Poroznost sloja,  $\varepsilon_f$ , raste, a pad tlaka u sloju,  $\Delta p_{mf}$ , postignut u stanju minimalne fluidizacije ostaje približno konstantan. Granica fluidizacije bit će dostignuta kod brzine  $v_t$ , a to je tzv. kritična brzina odnošenja čestica kod koje nastupa odnošenje čestica i razaranje fluidiziranog sloja (brzina  $v_t$  se stoga naziva i brzina odnošenja čestica).<sup>1,3</sup>

Za procjenu minimalne brzine fluidizacije literatura nudi niz korelacijskih jednadžbi koje se zasnivaju na ovisnosti  $Re_{mf} = f(Ar)$ .<sup>2</sup>

$$Re_{mf} \sqrt{C_1^2 + C_2 + Ar - C_1} \quad (2)$$

Brzina odnošenja ovisi o uvjetima provedbe procesa, svojstvima čestica te geometrijskim karakteristikama čestica i sušionika i zbog toga se ne može procijeniti. Kao jedan od kriterija uzima se da je gornja granica brzine strujanja zraka brzina taloženja čestica, pa se sušenje u fluidiziranom sloju mora provoditi u intervalu brzina između minimalne brzine fluidizacije i brzine taloženja. Ovisno o vrijednosti Reynoldsove i Arhimedove značajke, primijenjuju se sljedeće jednadžbe:

Laminarni režim strujanja:  $Re_t < 0,3$ ,  $Ar < 32,9$

$$Re_t \frac{Ar}{18} \quad (3)$$

Prijelazno područje:  $0,3 < Re_t < 500$ ,  $32,9 < Ar < 106520$

$$Re_t = 0,153 * Ar^{0,71} \quad (4)$$

Turbulentni režim strujanja:  $500 < Re_t < 2 * 10^5$ ,  $Ar > 106520$

$$Re_t = 1,74 * Ar^{0,5} \quad (5)$$

Izrazito turbulentno strujanje<sup>10</sup>:  $Re_t > 2 * 10^5$

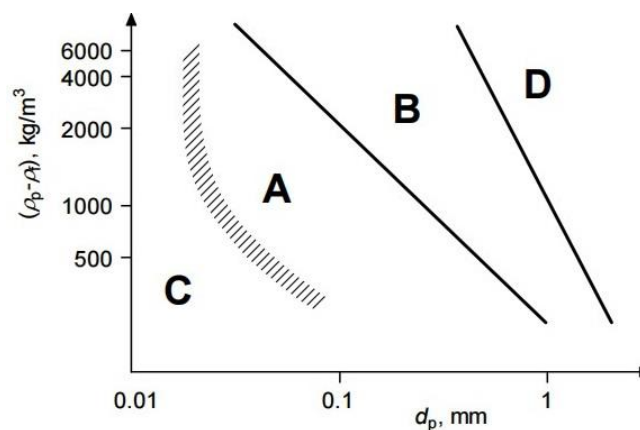
$$Re_t = 3,65 * Ar^{0,5} \quad (6)$$

Osim navedenih brzina, bitno je znati i brzine koje ograničavaju mjehurastu, turbulentnu i izrazito brzu fluidizaciju.

### 2.1.1. Geldartova klasifikacija čestica

Prema Geldartovoj klasifikaciji čestica koja je široko prihvaćena u različitim granama industrije koje se bave praškastim materijalima, postoje četiri grupe ovisno o njihovim fluidizacijskim svojstvima kada do fluidizacije dolazi u zraku pri okolišnim uvjetima (tlak i temperatura zraka su bliski okolišnom stanju). Svrha njegove klasifikacije je sistematizacija pojava u fluidiziranom sloju, koje općenito ovise o veličini i gustoći čestica te o svojstvima fluida.<sup>4</sup>

Za proces fluidizacije pogodne su grupe A i B, no važno je naglasiti da pri nekim drugačijim uvjetima fluidizacije, npr. tlaku i temperaturi većim nego pri okolišnom stanju, čestice mogu promijeniti skupinu.



Slika 2. Geldartova klasifikacija čestica

Grupi A pripadaju čestice veličine  $d=0,03$  do  $0,15$  mm i gustoće  $\rho < 1400$  kg/m<sup>3</sup>. U tu grupu spada većina komercijalnih katalizatora za reaktore s fluidiziranim slojem. Čestice ove grupe, prilikom fluidizacije zrakom u okolišnim uvjetima, prvo stvaraju homogeni fluidizirani sloj kod brzine  $v_{mf}$ , a kod neke veće brzine dolazi do stvaranja mjehura, te se fluidizacija nastavlja

kao heterogena. Prosječna veličina mjehurića je manja od 4 cm. Kretanje mjehura kroz sloj nalikuje vrenju, pri čemu se mjehuri neprestano cijepaju i međusobno stapaju dok ne postignu neku maksimalnu veličinu, koja onda ostaje nepromijenjena do površine fluidiziranog sloja. Primjenom čestica ove skupine dobiva se fluidizacija optimalne kvalitete.

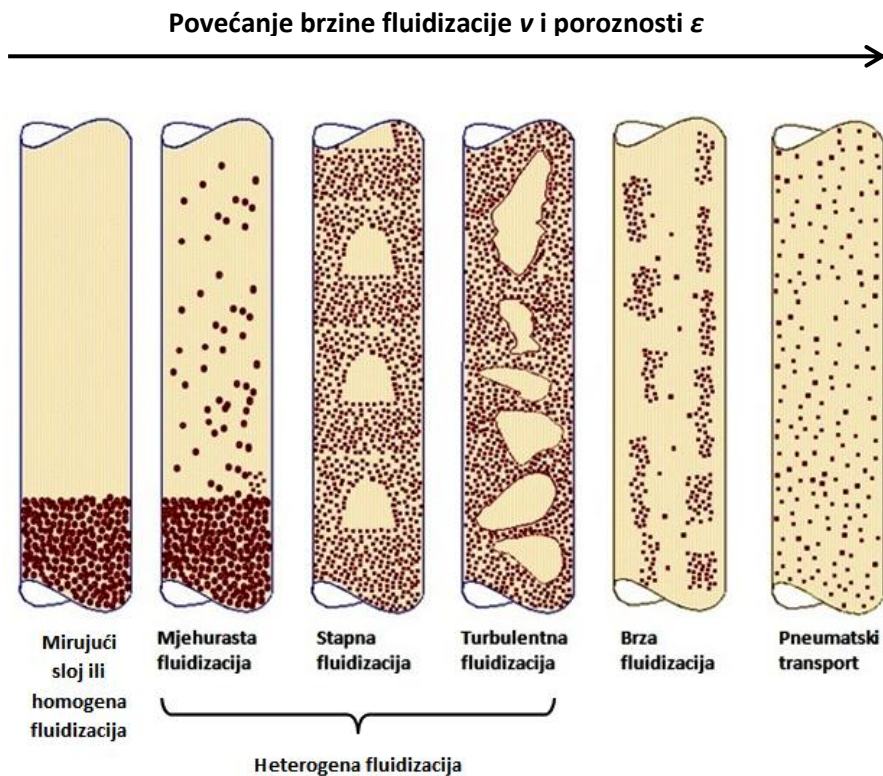
Grupa B obuhvaća čestice veličine  $d = 0,04$  do  $0,5$  mm i gustoće  $\rho = 1400$  do  $4000$  kg/m<sup>3</sup>. Za razliku od čestica grupe A, formiranje mjehurića počinje pri ili samo malo iznad minimalne brzine fluidizacije. Pri okolišnim uvjetima te čestice ostvaruju samo heterogenu fluidizaciju. Mjehuri koji nastaju pri brzini minimalne fluidizacije,  $v_{mf}$ , neprestano rastu unutar sloja, nikada ne dostižući svoju maksimalnu veličinu. Zbog toga je fluidizacija nestabilna s velikim promjenama tlaka u sloju što je loše za kvalitetu procesa. Veličina mjehura ograničena je samo veličinom posude i visinom sloja, a raste s porastom brzine plina. Ekspanzija sloja je malena i sloj se smanji veoma brzo nakon što je dobava plina prekinuta.

U grupu C spadaju vrlo fine, sitne čestice ( $d < 0,03$  mm), male gustoće i oblika koji znatno odstupaju od kugle. Prašak se podiže kao čep s kanalima malih promjera koji se protežu od dna sloja do površine sloja kroz koje plin struji. Zbog velikih privlačnih sila između čestica (zbog vrlo malih dimenzija, elektrostatskog naboja, te prisustva vrlo vlažnog ili ljepljivog materijala u sloju) nije moguće postići njihovo razdvajanje i stvaranje fluidiziranog sloja. Moguće je i nastajanje stapne fluidizacije što je praćeno velikim promjenama tlaka i vibracijama postrojenja. To se onda nastoji izbjeći pravilnim dimenzioniranjem visine posude čija visina mora biti što manja kad se radi s česticama ove grupe.

Čestice grupe D su čestice veličine  $d > 0,5$  mm i gustoće  $\rho > 1400$  kg/m<sup>3</sup> i one su neprikladne za dobivanje kvalitetne fluidizacije. Kao i kod čestica grupe B, mjehuri se javljaju već kod minimalne brzine fluidizacije, pri čemu njihova veličina kontinuirano raste kako se kreću kroz sloj prema površini. Kod čestica ove veličine karakteristično je stvaranje prostrujnih kanala kroz sloj, čak i za veće visine, tako da plin prostrujava kroz mjehure. Može se dogoditi da se plin propuhuje lokalno kroz sloj, pri čemu nastaje proboj sloja u obliku vertikalnog kanala. Zbog takvog prostrujavanja javljaju se promjene tlaka u sloju i vibracije postrojenja.<sup>3,4</sup>

### 2.1.2. Režimi fluidizacije

Ovisno o brzini strujanja plina i poroznosti sloja čestica razlikuju se sljedeći režimi plinske fluidizacije (slika 3.): mirujući sloj čestica, homogena fluidizacija, mjehurasta fluidizacija, stapna fluidizacija, turbulenta fluidizacija, brza fluidizacija i odnošenje čestica iz sloja, odnosno pneumatski transport.



Slika 3. Režimi fluidizacije (<http://www.potto.org>)

Kod mirujućeg sloja čestica brzina fluidizatora je u rasponu  $0 \leq v \leq v_{mf}$ . Čestice miruju, a plin struji između čestica ne mijenjajući poroznost sloja. Kod homogene fluidizacije brzina fluidizacije je veća od  $v_{mf}$ , dolazi do ekspanzije fluidiziranog sloja bez pojave mjehura uz lagano miješanje čestica, a površina sloja je jasno definirana. Do mjehuraste fluidizacije dolazi kada se mjehuri plina, koji se formiraju iznad razdjeljne ploče neprestano cijepaju i stapaju kako se dižu prema površini, zbog čega dolazi do boljeg i intenzivnijeg miješanja čestica, što povoljno djeluje na odvijanje procesa izmjene mase i topline. Kada mjehuri plina zauzimaju cijeli promjer kolone, površina sloja raste i pada u jednakim vremenskim intervalima uz velike promjene tlaka u sloju koje odgovaraju frekvenciji nastajanja mjehura. Takav režim naziva se režim „stapne fluidizacije“, a on se javlja kad je visina kolone dva ili više puta veća od promjera kolone pa manji mjehuri imaju dovoljno vremena da se stope u velike. Turbulentna fluidizacija se javlja kod većih brzina strujanja plina i kod takve

fluidizacije dolazi do cijepanja velikih mjehura u sitne. Prijelaz između stapne i turbulentne fluidizacije nije moguće precizno odrediti jer to ovisi o kojoj grupi čestica se radi, no prilikom nastajanja turbulentnog sloja primjetno je smanjenje fluktuacije tlaka u sloju, a smanjuju se i vibracije. Zbog toga se turbulentna fluidizacija znatno više primjenjuje nego mjehurasta. Brzu fluidizaciju karakterizira postojanje samo guste faze s česticama i plinom bez mjehura, te vrlo intenzivno miješanje čestica. U ovom režimu dolazi do značajnog odnošenja čestica iz sloja jer je kod čestica grupe A i B transportna brzina veća od brzine odnošenja čestica, a kod čestica grupe D transportna brzina je veća ili jednaka brzini odnošenja pojedinih čestica. Zbog toga se čestice moraju vraćati u kolonu pa se ovaj režim naziva i „cirkulirajućom fluidizacijom“. Karakteristika pneumatskog transporta je da je brzina fluidizacije puno veća od brzine odnošenja čestica svih čestica u sloju, dakle sve čestice su odnesene iz kolone, a poroznost sloja  $\varepsilon$  jednaka je 1.<sup>4,5</sup>

## **2.2. Sušenje**

Sušenje je tehnološki proces uklanjanja vlage iz vlažnog materijala u svrhu dobivanja suhog čvrstog proizvoda. Sušenje je veoma složeni proces koji se pojavljuje u mnogim industrijskim granama (kemijska, prehrambena, papirna, tekstilna, farmaceutska, drvna i dr.). Upotrebljava se radi očuvanja kvalitete proizvoda kod dužeg skladištenja (npr. konzerviranje hrane radi očuvanja prirodnih svojstava), smanjenja troškova transporta, postizanja određene kvalitete proizvoda, te lakše manipulacije proizvodima. Kod ovog procesa dolazi do prijenosa tvari i topline na način da iz sušionika izlazi suhi materijal i vlažni zrak. Suhi materijal je predao svoju vlagu zraku te na sebe preuzeo toplinu dok je vlažni zrak preuzeo vlagu s materijala. Materijali mogu sadržavati znatne količine vlage i zbog toga je bitno da se ta vlaga u što većoj količini ukloni prije samog procesa sušenja. To se može postići primjenom različitih mehaničkih metoda npr. filtracijom, taloženjem, centrifugiranjem. Iako se vlaga iz materijala može uklanjati mehaničkim i kemijskim metodama, kada se govori o sušenju govori se o toplinskom procesu, pri kojem se vlaga uklanja dovođenjem topline materijalu. Postoji nekoliko načina na koje se toplina može dovoditi materijalu: konvekcijom, kondukcijom i radijacijom, kao i primjenom mikrovalnog i infracrvenog zračenja. Kod prijenosa konvekcijom, toplina se dovodi pomoću zagrijanog zraka koji struji iznad površine vlažnog materijala. Toplina potrebna za isparavanje konveksijski se prenosi na izloženu površinu materijala, a isparena vlaga se odvodi pomoću sušnog medija.

Tablica 1. Vrste materijala koji se suše

<b>Krutine</b>	<b>Paste</b>	<b>Kapljevine</b>
Prašci krutine različitih oblika i veličina plohe	različitih viskoznosti koje mogu ili ne mogu cirkulirati kroz sušionik	otopine koloidne otopine suspenzije muljevi

Kondukcijski prijenos topline odvija se na način da se toplina potrebna za isparavanje dovodi preko grijanih površina koje mogu biti nepokretne ili pokretne, postavljenih u sušionik. Isparena vlaga odvodi se pomoću inertnog plina koji služi isključivo kao sredstvo za odvođenje isparene vlage. Za materijale koji su osjetljivi na povišene temperature koristi se vakuum sušenje.

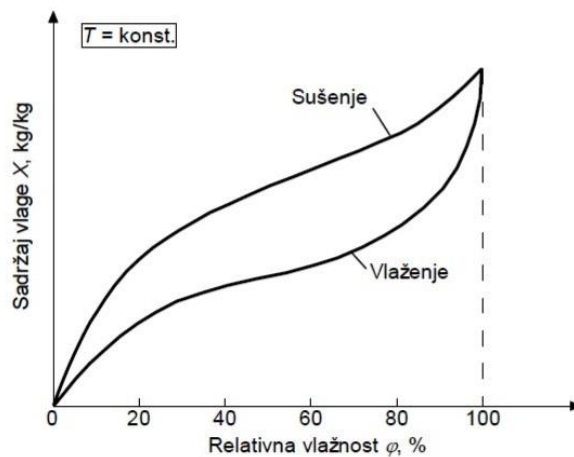
Kod radijacijskog sušenja, dio energije koju emitira izvor zračenja apsorbira se na površini materijala i na taj način zagrijava vlažni materijal i dolazi do isparavanja vlage. Isparena vlaga odvodi se kao i kod kondukcije pomoću inertnog plina. Ako se radi o mikrovalnom sušenju onda se toplina generira unutar materijala zbog interakcije elektromagnetskih valova i vode i dolazi do jednolikog zagrijavanja cijelog volumena materijala.

Na proces sušenja osim procesnih uvjeta utječe i sam sušionik. Procesni uvjeti obuhvaćaju svojstva materijala i zraka. Od svojstava materijala važni su: poroznost, oblik čestica, raspodjela veličina čestica, početni sadržaj vlage te stabilnost materijala, a od svojstava zraka važna je temperatura i tlak zraka, vlažnost i brzina strujanja zraka. Kada se govori o sušionicima, podrazumijevaju se geometrijske karakteristike sušionika, princip rada sušionika, način dovodenja topline te stanje materijala. Materijal kod sušenja može biti materijal u fluidiziranom sloju, na pokretnoj traci ili u mirujućem sloju.

Materijal sadrži vlagu koja može biti prisutna kao slobodna vlaga (kapljevina i para koja ispunjava pore u uzorku ili slobodni volumen međuprostora između čestica), mehanički vezana vlaga (polumjer pora manji od 0,1 mm), te kemijski vezana vlaga (kada je vlaga dio strukture krutine). Kao što je već rečeno, tijek i vrijeme trajanja procesa sušenja ovise o uvjetima sušenja, profilima temperature i vlage i mehanizmu kretanja vlage kroz materijal. Način prijenosa vlage kroz materijal kontroliran je svojstvima, oblikom i dimenzijama uzorka, te vrsti veze vlage i materijala. Obzirom na različite veze vlage i materijala, mehanizmi prijenosa vlage kroz unutrašnju strukturu poroznog materijala prilikom sušenja mogu također biti različiti. Zbog svega navedenog vidi se da je za potpuno opisivanje procesa sušenja



potrebno poznavanje mnogih parametara. Kako je sušenje u osnovi proces prijenosa tvari izazvan dovođenjem topline, potrebno je poznavati ravnotežne podatke istraživnog sustava. Naime, sušenjem se neće ukloniti sva vlaga prisutna u materijalu. Proces prijenosa tvari, u definiranim uvjetima tlaka i temperature, odvijat će se samo do postizanja ravnoteže. Ravnoteža se prikazuje sorpcijskim izotermom. Sorpcijske izoterme, kao što se vidi na slici 4., razlikuju se prilikom sušenja i prilikom vlaženja materijala. Krivulja pokazuje zatvorenu petlju koja se naziva „histereza“, pri čemu je kod sušenja ravnotežna vlažnost veća nego kod vlaženja.<sup>6,7,8,9</sup>



Slika 4. Sorpcijske izoterme (Mudrinić)

Tijekom procesa sušenja istovremeno se odvijaju dva procesa, prijenos topline (za isparavanje površinske vlage i zagrijavanje materijala) i prijenos tvari do površine materijala i isparavanje u okolinu). Proračun stvarnih količina potrebnog zraka za uklanjanje vlage oslobođene isparavanjem, osniva se na psihrometriji i dijagramima vlažnosti, stoga je za razumijevanje samog procesa sušenja bitno definirati značajne veličine. Temperatura suhog termometra,  $T_{sb}$ , je stvarna temperatura smjese zraka i vlage, dok je temperatura mokrog termometra,  $T_{mt}$ , temperatura koju bi imao zrak u danim uvjetima  $T$  i  $p$  kada bi bio zasićen vodenom parom. Temperatura adijabatskog zasićenja,  $T_{az}$  je ravnotežna temperatura koju je zrak postigao u kontaktu sa kapljevinom koja isparava/ishlapljuje u adijabatskim uvjetima,  $T_{az}$ . Za sustav voda-zrak linije adijabatskog zasićenja i temperature mokrog termometra se poklapaju. Temperatura rosišta,  $T_R$  je temperatura kod koje nezasićena smjesa zraka i vode postaje zasićena hlađenjem uz  $Y=\text{const}$ . Apsolutna vlažnost zraka je određena kao količina vodene pare prisutna u jediničnoj masi suhog zraka,  $Y$ ,  $\text{kg kg}^{-1}$ .

$$Y = \frac{m_v}{m_{sz}} \tag{7}$$

Relativna vlažnost zraka je omjer parcijalnog tlaka vodene pare u smjesi sa zrakom i ravnotežnog tlaka para pri istoj temperaturi,  $\phi$ .

$$\phi = \frac{p_V}{p_V^*} \quad (8)$$

Postotna vlažnost zraka je definirana kao omjer stvarne apsolutne vlažnosti zraka i apsolutne vlažnosti u stanju zasićenja (ravnotežni).<sup>6,7,8</sup>

$$Y\% = \frac{Y}{Y^*} \quad (9)$$

### 2.3. Sušenje u fluidiziranom sloju

Postoje različite izvedbe sušionika s fluidiziranim slojem, ovisno o tvari koja se suši i o tome rade li u šaržnom ili kontinuiranom načinu, te o nizu drugih procesnih parametara (tlak, temperatura, način strujanja čestica i plina, vrsta fluidizatora itd). Novije izvedbe (sušionici s vibrirajućim elementima, mehaničkim miješanjem, itd.) omogućuju i sušenje muljeva, suspenzija i pasta. Šaržni sušionici s fluidiziranim slojem koriste se kod manjih proizvodnih kapaciteta (obično oko 50 do 100 kg/h), te za toplinski osjetljive materijale. Prednost im je u jednostavnoj kontroli uvjeta sušenja (brzina i temperatura zraka, visina sloja i sl.), a proizvod ima ujednačenu kakvoću. Nedostaci su viša cijena rada, a kvaliteta proizvoda se ipak može malo razlikovati po šaržama. Kod kontinuiranih sušionika proizvod kontinuirano prolazi kroz komoru za sušenje pa se oni primjenjuju kod velikih proizvodnih kapaciteta, no kakvoća proizvoda tu ipak nije posve ujednačena zbog miješanja vlažnih i već djelomično osušenih čestica te njihova različita vremena zadržavanja u procesu. Sušionici s fluidiziranim slojem mogu se koristiti kao zasebni sušionici, ali često se primjenjuju i kao pomoćni uređaji za dosušivanje, npr. sušionik s fluidiziranim slojem koji dodatno osuši tvar nakon njenog sušenja u sušioniku s raspršivanjem. Za proces sušenja u fluidiziranom sloju vrlo je bitno odrediti granične brzine strujanja zraka. Tijekom cijelog procesa sušenja sve čestice moraju biti u fluidiziranom stanju. Dakle, brzina strujanja mora biti dovoljno velika da fluidiziraju najveće mokre čestice, a da istovremeno ne dolazi do odnošenja najmanjih suhih čestica. Kad se toplina u nekom procesu s fluidiziranim slojem dovodi putem vrućeg zraka, vrlo brzo, gotovo odmah iznad razdjelne ploče, dolazi do izjednačavanja temperatura zraka i sloja pri čemu je, zbog vrlo intenzivnog miješanja čestica, raspodjela temperatura unutar sloja praktički izotermna.<sup>9</sup>

## 2.4. Kinetika sušenja

Kinetika sušenja opisuje promjenu sadržaja vlage i temperature materijala tijekom sušenja. Tijek sušenja definiran je vrstom i svojstvima materijala, vrsti prisutne vlage (slobodna, vezana), odabranim načinom i uvjetima sušenja. Tijekom toplinskog sušenja, kada se toplina dovodi vlažnom materijalu istovremeno se odvijaju dva procesa, jedan je prijenos energije (uglavnom topline) iz okoline kako bi se isparila (ishlapila) površinska vlaga, a drugi je prijenos unutarnje vlage do površine materijala i njeno isparavanje zbog procesa prijenosa topline. Brzina kojom će se materijal sušiti ovisi o brzinama kojima se ta dva procesa odvijaju, odnosno o onome koji kontrolira proces sušenja. Oba procesa se odvijaju istovremeno ali bilo koji od ova dva procesa može biti ograničavajući faktor i kao takav odgovoran je za brzinu sušenja odnosno trajanje samog procesa. Toplina se do površine vlažnog materijala može dovesti iz okoline konvekcijom, kondukcijom, radijacijom ili kombinacijom tih metoda. Kroz poroznu se strukturu materijal dalje zagrijava kondukcijski. S druge strane, kod dielektričnog, radiofrekventnog ili mikrovalnog sušenja dovedena energija se unutar materijala pretvara u toplinu te se onda iz unutrašnjosti prenosi prema površini uzorka. Kinetika sušenja može se pratiti dvjema metodama: gravimetrijskom ili psihometrijskom metodom. Gravimetrijskom metodom prati se promjena mase vlažnog materijala tijekom sušenja, dok se psihometrijskom metodom prati stanje zraka mjerenjem dvije veličine, npr. temperature i relativne vlažnosti zraka. Masa vlage koju materijal izgubi tijekom sušenja jednaka je masi vlage koju je zrak primio, pa se može pisati:

$$m_v = m_{vm1} - m_{vm2} = m_{sm} \cdot (X_1 - X_2) = m_{z1} - m_{z2} = m_{sz} \cdot (Y_2 - Y_1) \quad (10)$$

Ovdje su:

$m_v$  - masa vlage, kg ili kg/s

$m_{vm}$  - masa vlažnog materijala, kg ili kg/s

$m_z$  - masa vlažnog zraka, kg ili kg/s

$m_{sm}$  - masa suhog materijala, kg ili kg/s

$m_{sz}$  - masa suhog zraka, kg ili kg/s

$X$  - sadržaj vlage materijala, kg/kg

$Y$  - apsolutna vlažnost zraka, kg/kg

Toplina potrebna za isparavanje vlage računa se prema:

$$Q = m_v \cdot \lambda = \alpha \cdot A \cdot \Delta T \quad (11)$$

Ovdje su:

$Q$  - potrebna toplina, W

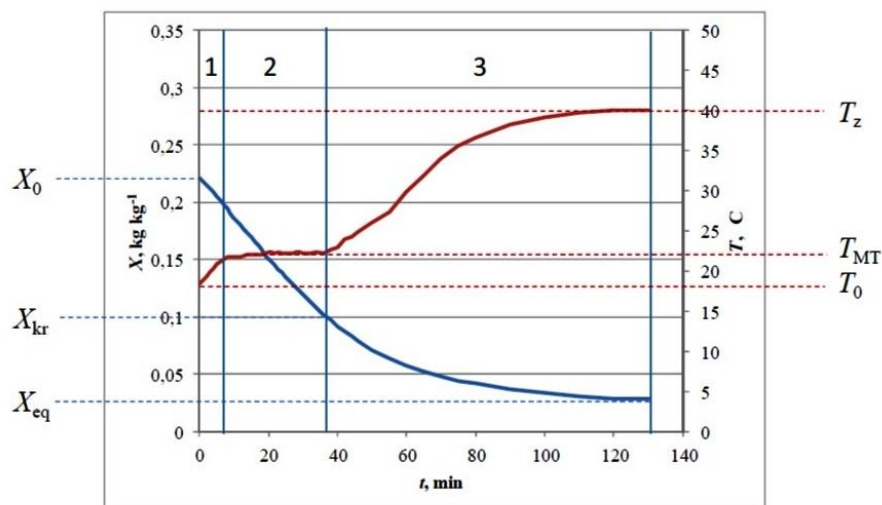
$\lambda$  - latentna toplina isparavanja, kJ/kg

$\alpha$  - koeficijent prijelaza topline, W/m<sup>2</sup>K

$A$  - površina isparavanja, m<sup>2</sup>

$\Delta T$  - pokretačka sila prijenosa topline, K

Sadržaj vlage i temperatura materijala mijenjaju se tijekom sušenja. Tri su osnovna perioda sušenja (slika 5.): period stabilizacije (1), period konstantne brzine sušenja (2) i period padajuće brzine sušenja (3).



Slika 5. Kinetičke krivulje sušenja

Tijekom perioda stabilizacije materijal izgubi malo vlage, a temperatura njegove površine dosegne temperaturu mokrog termometra. U tom trenutku počinje period konstantne brzine sušenja. U periodu konstantne brzine sušenja površina materijala je u potpunosti prekrivena vlagom a brzina sušenja ovisi o vanjskim uvjetima. Dokle god je brzina prijenosa vlage kroz unutrašnjost materijala dovoljno velika da se osigura neprekinut sloj vlage na površini materijala, brzina sušenja je konstantna. Pojavom prvih suhih mjesta na površini materijala započinje period padajuće brzine sušenja. Sadržaj vlage koji dijeli period konstantne od

perioda padajuće brzine sušenja naziva se kritični sadržaj vlage materijala,  $X_{kr}$ . Kritični sadržaj vlage to je veći što je veća brzina sušenja, manja debljina materijala te veći promjer pora. Sušenje traje do postizanja ravnotežnog sadržaja vlage materijala,  $X_{eq}$ , u danim uvjetima sušenja<sup>6,11,12</sup>.

### 3. Eksperimentalni dio

#### 3.1. Svrha

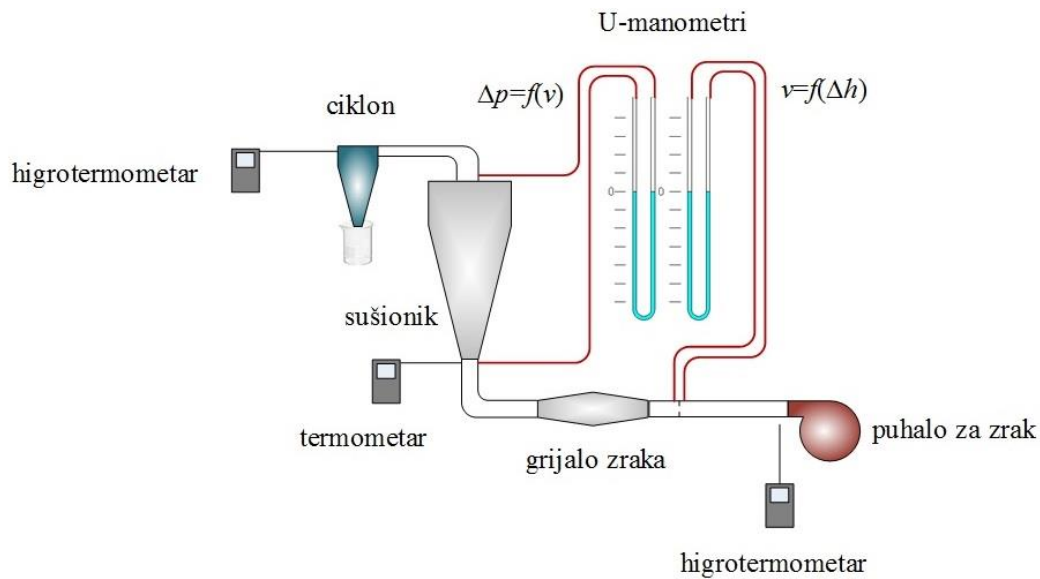
Svrha ovog diplomskog rada je istražiti utjecaj različitih uvjeta provedbe procesa na kinetiku sušenja čvrstih čestica u sušioniku s fluidiziranim slojem. Istražen je utjecaj visine sloja čestica, temperature sušenja te utjecaj brzine strujanja zraka na kinetiku sušenja u sušioniku konusne geometrije. Eksperimentalni podaci su aproksimirani pomoću Pageovog i Lewisovog matematičkog modela, a parametri modela dovedeni su u vezu s uvjetima provedbe sušenja.

#### 3.2. Opis aparature

Mjerenja su provedena na laboratorijskom sušioniku s fluidiziranim slojem slika 6. Sušionik se sastoji od cilindrične kolone, puhala za zrak, grijala zraka, mjerila protoka (prigušna pločica), dva manometra, te mjerila stanja zraka. Na vrhu kolone nalazi se ciklon za separaciju izlaznog zraka i eventualno odnesenih čvrstih čestica, sa posudom za prihvatanje čvrstih čestica (slika 7.).



Slika 6. Laboratorijski sušionik s fluidiziranim slojem



Slika 7. Eksperimentalna aparatura

Proces sušenja odvija se tako da zrak za sušenje ulazi u kolonu puhalom za zrak kojemu možemo regulirati brzinu strujanja zraka. Na samom ulazu zraka u puhalo smješten je higrotermometar, koji bilježi stanje vanjskog zraka, tj. relativnu vlažnost i temperaturu.

Grijač kojim se zagrijava zrak na ulazu u kolonu spojen je na zakretni transformator 220 V te se na taj način kontrolira količina topline predana zraku. Temperatura zraka na ulazu u sušionik mjerena je digitalnim termometrom. Na izlazu iz sušionika mjerena je temperatura i relativna vlažnost zraka pomoću higrotermometra, te se na taj način pratila kinetika sušenja primjenom psihrometrijske metode. Dio aparature su i dva U-manometra. Jednim manometrom mjeri se pad tlaka na principu prigušne pločice, dok se drugim mjeri pad tlaka kroz kolonu.

### 3.4. Uvjeti provedbe procesa

Mjerenja su provedena pri različitim temperaturama i brzinama strujanja zraka te različitim visinama sloja čvrstih čestica. U tablici 2. dani su svi istraživani uvjeti sušenja.

Tablica 2.

Temperatura, °C	Brzina strujanja zraka, m/s	Visina sloja čestica, m
50, 60, 70	6,61; 7,61; 8,61	0,04
	10,73; 11,73; 12,73	0,06
	16,02; 17,02; 18,02	0,08

Kao materijal za sušenje odabrane su čvrste sferične čestice tj. kuglice katalizatora  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-NiO-CaCO}_3$ , srednjeg promjera čestica od 4,375 mm. Kako su kroz cijeli volumen sferičnih čestica ujednačeni koncentracijski i temperaturni gradijenti, po volumenu se u svim smjerovima materijal jednoliko suši.

### 3.5. Ravnotežni sadržaj vlage materijala

Ravnotežni sadržaj vlage materijala određen je na uređaju za mjerenje vlage MLS 50-3C u kojem se toplina uzorku dovodi infracrvenim zračenjem, slika 8. Nakon što je sušenje u fluidiziranom sloju završilo, uzorak se stavlja u uređaj za mjerenje vlage na kojem smo prethodno odredili brzinu sušenja 2 g/min. Uzorak se suši dok nije uklonjena sva nevezana vlaga (potpuno suh materijal). Iz razlika masa i mase potpuno suhog materijala izračunat je ravnotežni sadržaj vlage materijala u danim uvjetima sušenja ( $T, \phi$ ).

$$X_{eq} = \frac{\Delta m}{m_{sm}} \quad (12)$$



Slika 8. Uređaj za mjerenje vlage MLS 50-3C ( <http://www.kern-sohn.com>)

### 3.6. Metoda proračuna

Kinetika sušenja čvrstih čestica u fluidiziranom sloju određena je psihrometrijskom metodom. Psihrometrijska metoda podrazumijeva praćenje stanja zraka na izlazu iz sušionika tijekom sušenja. Mjerenjem temperature i relativne vlažnosti zraka na izlazu iz sušionika može se izračunati koliko je vlage zrak primio od materijala tijekom sušenja što opet odgovara promjeni mase materijala u vremenskom intervalu.



Relativna vlažnost zraka može se izračunati iz omjera parcijalnog tlaka vodene pare u smjesi sa zrakom i ravnotežnog tlaka para pri istoj temperaturi i dana je izrazom:

$$\varphi = \left( \frac{p_w}{p_w^*} \right)_{T_{st}} \quad (13)$$

Kako bi se izračunala apsolutna vlažnost zraka potrebno je prvo izračunati ravnotežni tlak para pri danoj temperaturi pomoću jednadžbe (14)

$$\ln(p_w^*) = \frac{-7511,52}{T} + 89,63121 + 0,02399897 \cdot T - 1,1654551 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 1,2810336 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 + 2,0998405 \cdot 10^{-11} \cdot T^4 - 12,150799 \cdot \ln(T) \quad (14)$$

Zatim se iz jednadžbe (14) izračuna parcijalni tlak vodene pare u smjesi sa zrakom,  $p_w$ , te se računa apsolutna vlažnost  $Y$ , odnosno masa vlage u jediničnoj masi suhog zraka prema izrazu:

$$Y = 0,62198 \cdot \frac{p_w}{P - p_w} \quad (15)$$

Nadalje se računa gustoća zraka pri danom tlaku i temperaturi uz  $R_a = 0,28705 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$  prema izrazu:

$$\rho_{ma} = \frac{P}{R_a \cdot T \cdot (1 + 1,6078 \cdot Y)} \quad (16)$$

Iz apsolutne vlažnosti izračuna se  $y$ , udio vlage u zraku:

$$y(t) = \frac{Y(t)}{1 + Y(t)} \quad (17)$$

Volumni protok računa se iz brzine i površine presjeka sušionika na izlazu:

$$\dot{V}_{ma} = v \cdot A \quad (18)$$

Maseni protok vlažnog zraka računa se iz gustoće zraka i volumnog protoka, a maseni protok suhog zraka iz protoka vlažnog zraka i udjela vlage u zraku:

$$\dot{m}_{vz}(t) = \dot{V} \cdot \rho(t) \quad (19)$$

$$\dot{m}_{sz}(t) = (1 - y(t)) \cdot \dot{m}_{vz}(t) \quad (20)$$

Masa vode koju je zrak primio u danom vremenskom intervalu izračunala se koristeći izraze:

$$\Delta \dot{m}_v(t) = \dot{m}_{sz} \cdot \Delta Y(t) \quad (21)$$

$$\Delta Y(t) = Y(t) - Y_0 \quad (22)$$

Za svaki vremenski interval  $t_i$  može se izračunati masa vode koju zrak primi odnosno materijal otpusti i tada je preostala masa vode u materijalu:

$$\Delta m_v(t_{i+1}) = m_v(t_1) - \Delta m_v(t_{i+1}) \quad (23)$$

Konačni (ravnotežni) sadržaj vlage,  $X_{eq}$ , određuje se gravimetrijski iz mase vlažnog materijala na kraju sušenja i mase suhe tvari, mjereno u infracrvenom sušioniku.

$$X_{eq} = \frac{m_{sm,kon}}{m_{sm}} \quad (24)$$

Sadržaja vlage materijala računa se kao omjera mase vlage i mase suhog materijala:

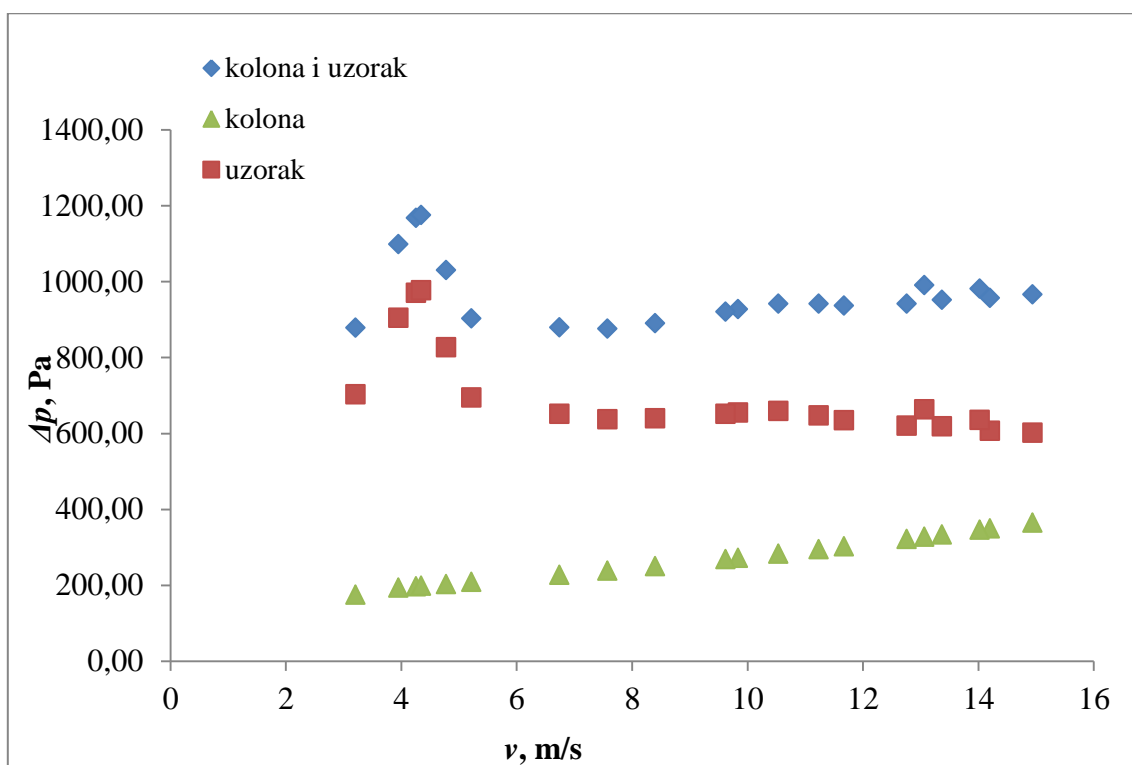
$$X_i = \frac{m_{v,i}}{m_{sm}} \quad (25)$$

Na kraju su eksperimentalno dobiveni podaci aproksimirani Pageovim (26) i Lewisovim (27) modelima koristeći navedene jednadžbe

$$\Psi(t) = \frac{X(t) - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = e^{(-k \cdot t^n)} \quad (26)$$

$$\Psi(t) = \frac{X(t) - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = e^{(-K \cdot t)} \quad (27)$$

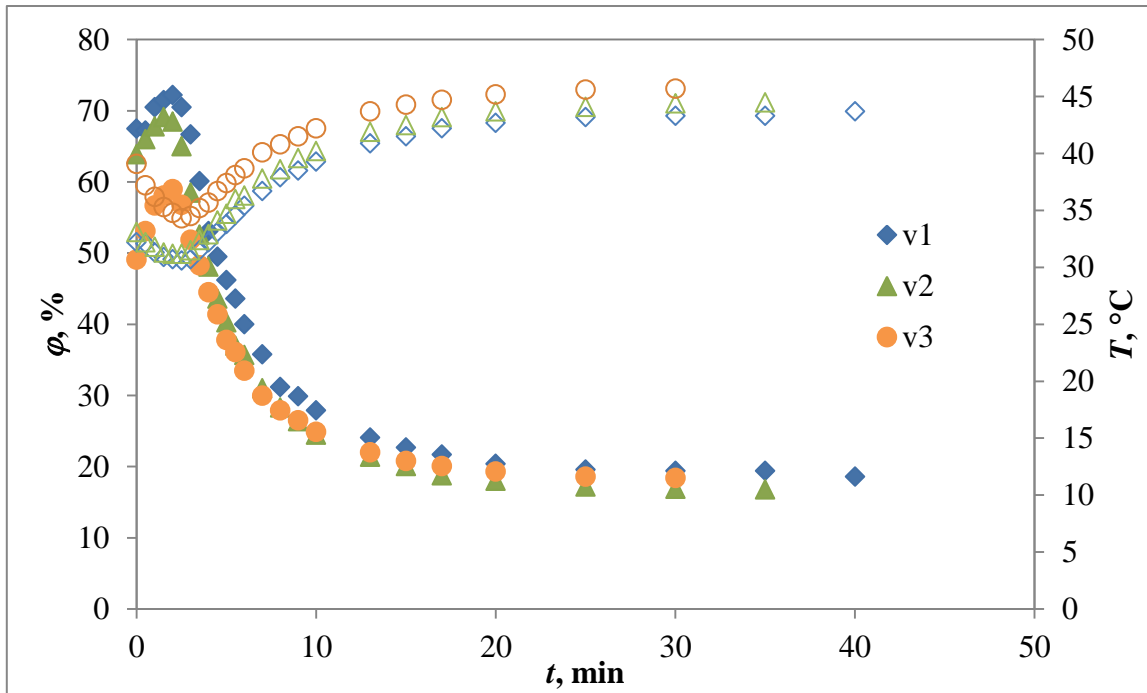
## 4. Rezultati



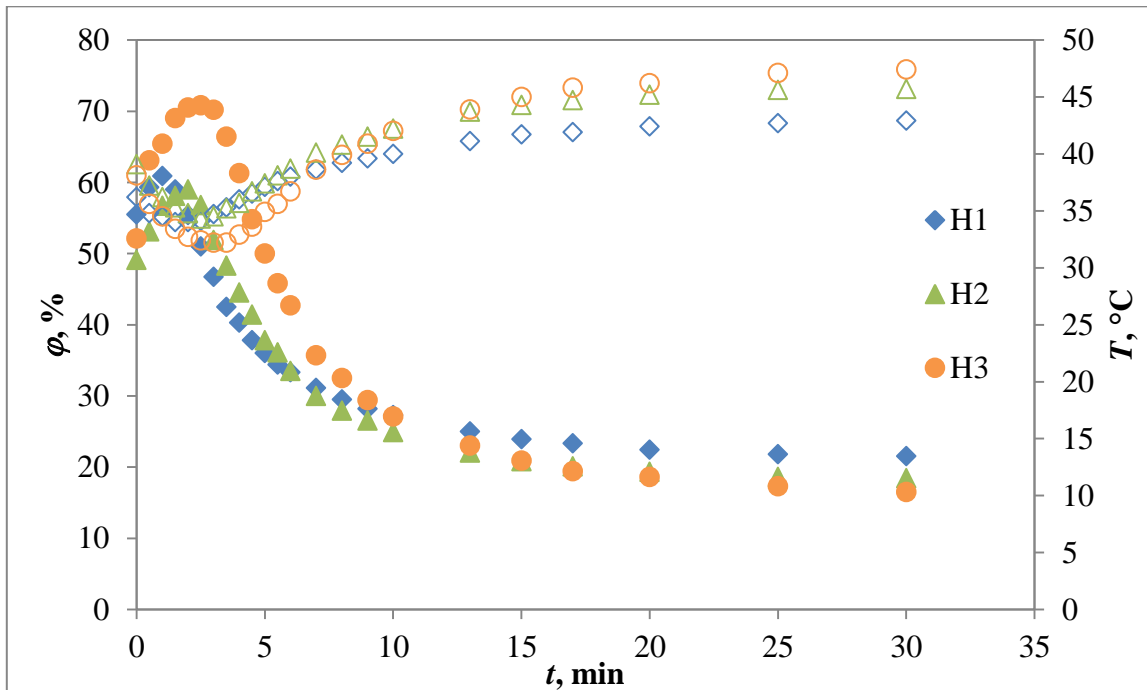
Slika 9. Eksperimentalno određivanje minimalne brzine fluidizacije ( $H=0,04\text{m}$ )

Tablica 3. Utjecaj visine sloja čestica na minimalnu brzinu fluidizacije suhih i mokrih čestica

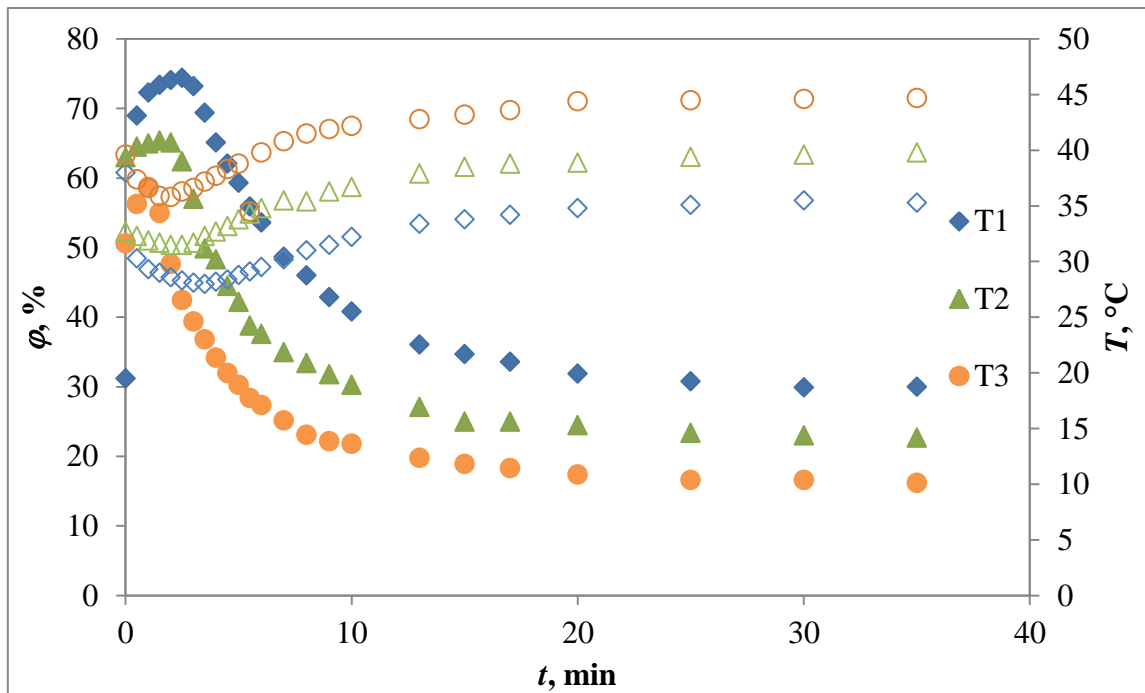
$H$ , m	$v_{mf}$ , m/s suhe čestice	$v_{mf}$ , m/s mokre čestice
0,04	3,20	6,61
0,06	3,50	10,73
0,08	4,00	16,02



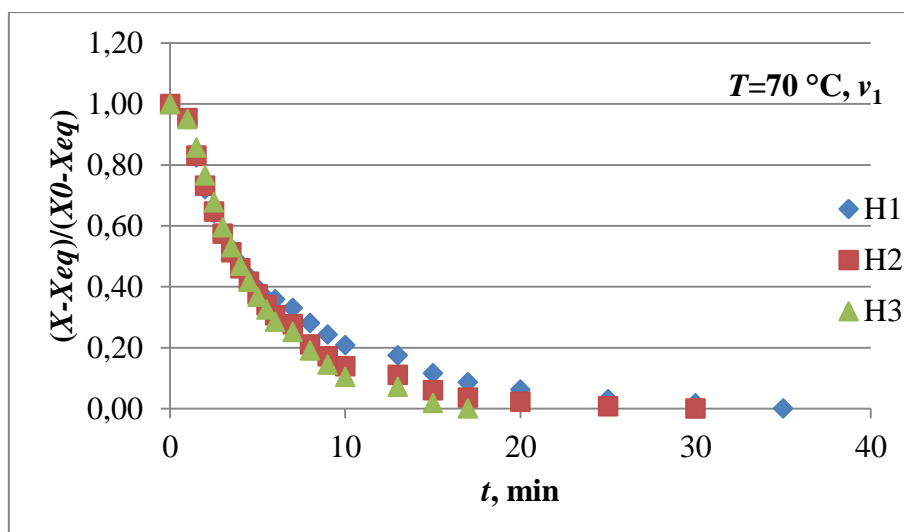
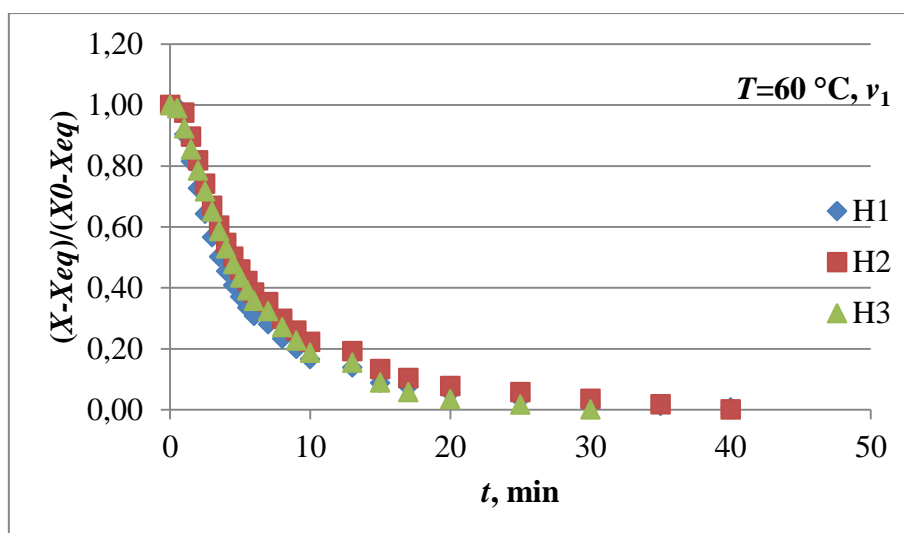
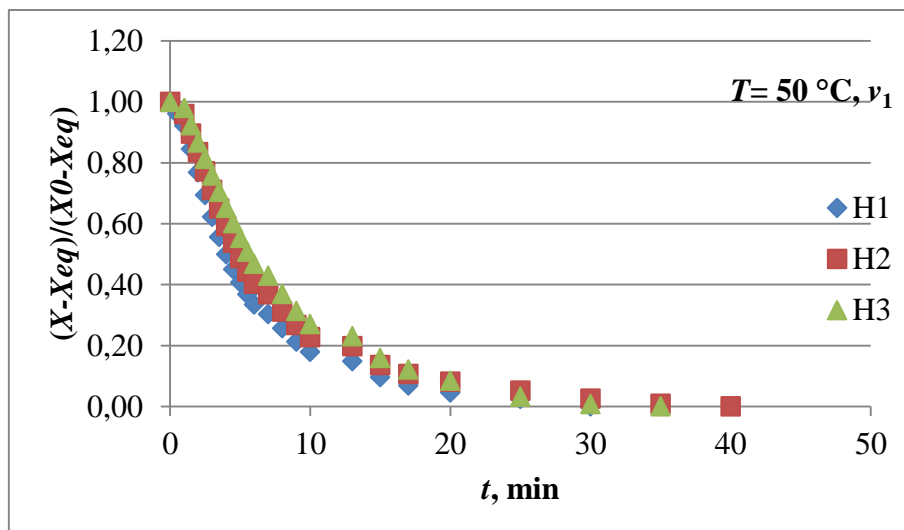
Slika 10. Eksperimentalni podaci na izlazu iz sušionika: temperatura i relativna vlažnost pri tri različite brzine strujanja zraka ( $T_2=60\text{ °C}$ ,  $H=0,06\text{m}$ )



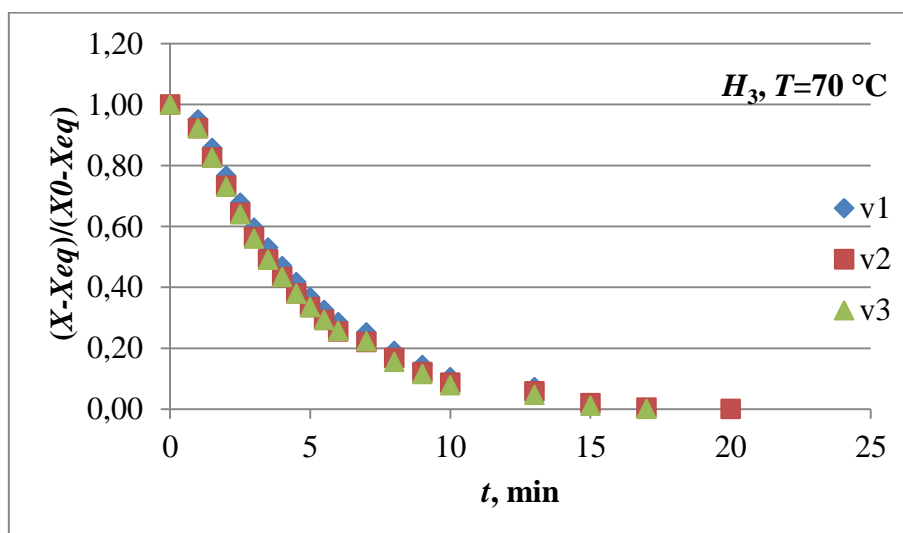
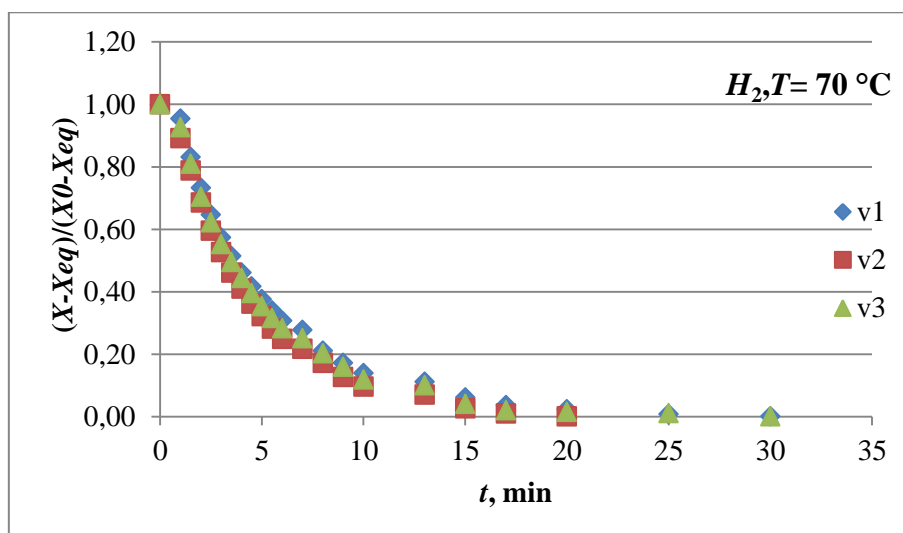
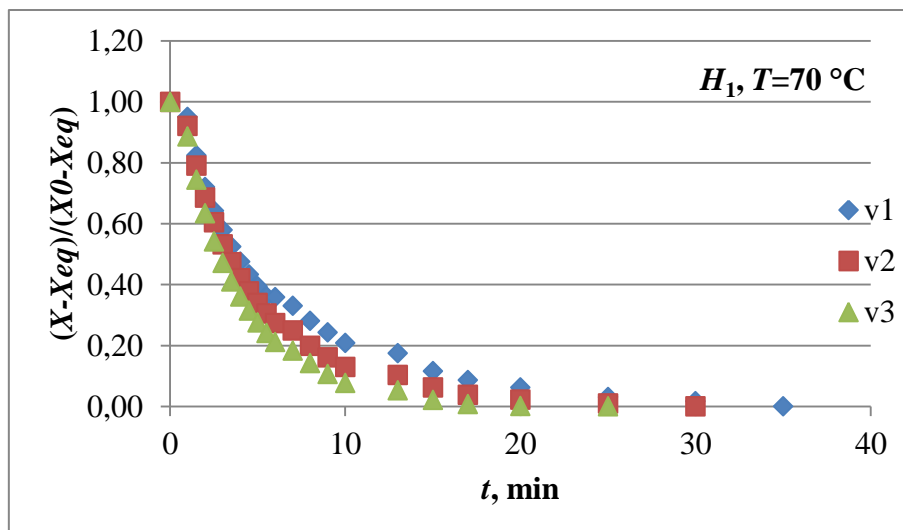
Slika 11. Eksperimentalni podaci na izlazu iz sušionika: temperatura i relativna vlažnost za tri različite visine sloja čestica ( $T=60\text{ °C}$  i  $v = v_2\text{ m/s}$ )



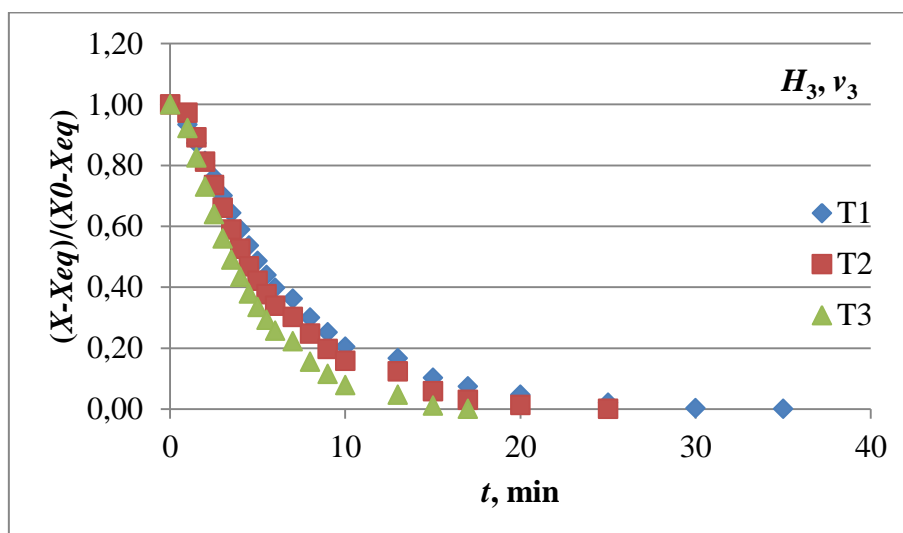
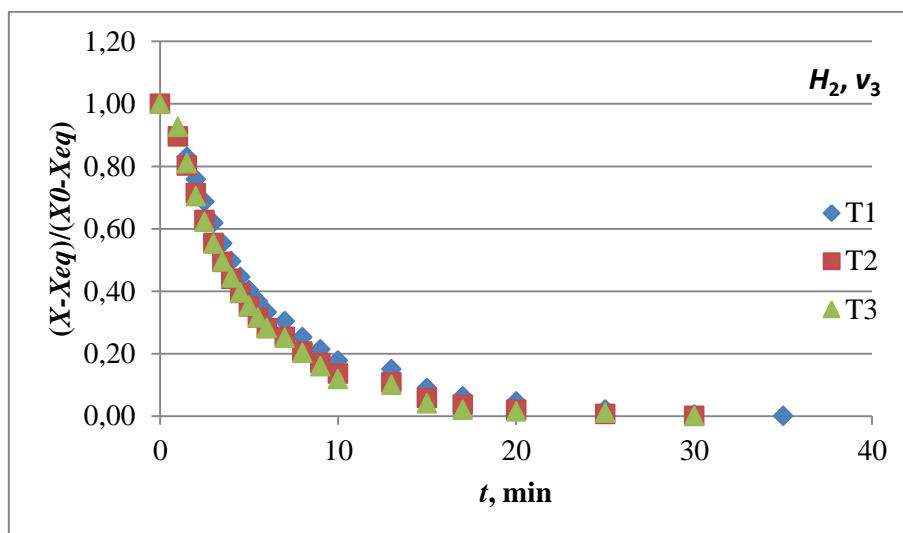
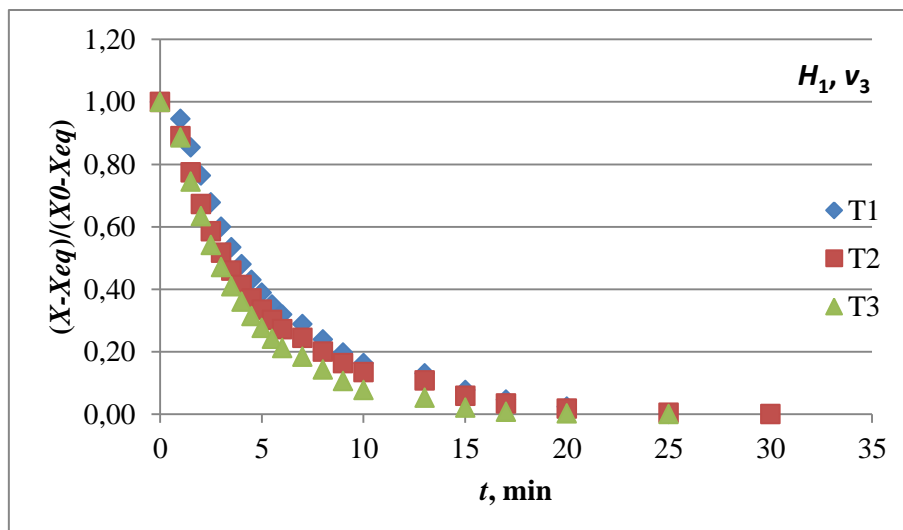
Slika 12. Eksperimentalni podaci na izlazu iz sušionika: temperatura i relativna vlažnost pri različitim temperaturama ulaznog zraka ( $v=v_1$  m/s i  $H=0,04$ m)



Slika 13. Utjecaj visine sloja čestica na kinetiku sušenja u sušioniku s fluidiziranim slojem ( $H_1=0,04\text{ m}$ ;  $H_2=0,06\text{ m}$ ;  $H_3=0,08\text{ m}$ )

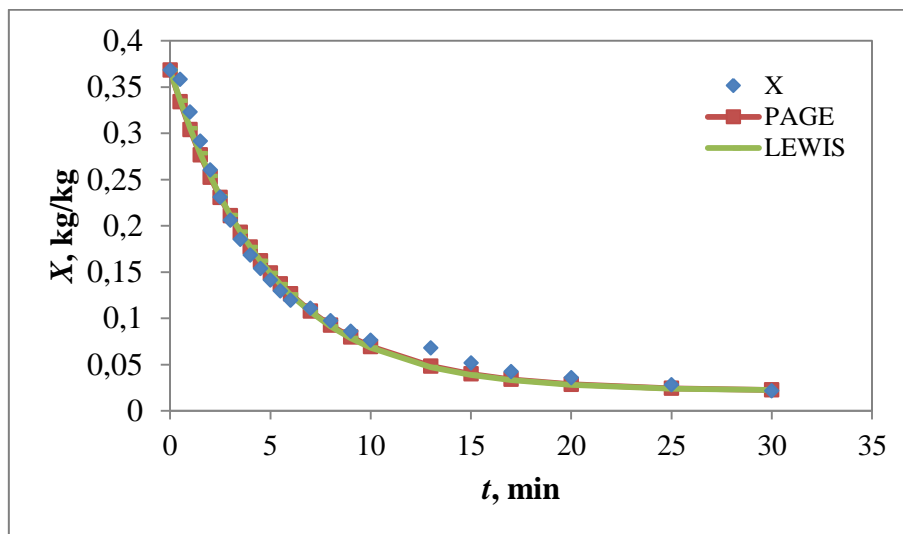


Slika 14. Utjecaj brzine strujanja zraka na kinetiku sušenja u sušioniku s fluidiziranim slojem ( $H_1=0,04\text{ m}$ ;  $H_2=0,06\text{ m}$ ;  $H_3=0,08\text{ m}$ )

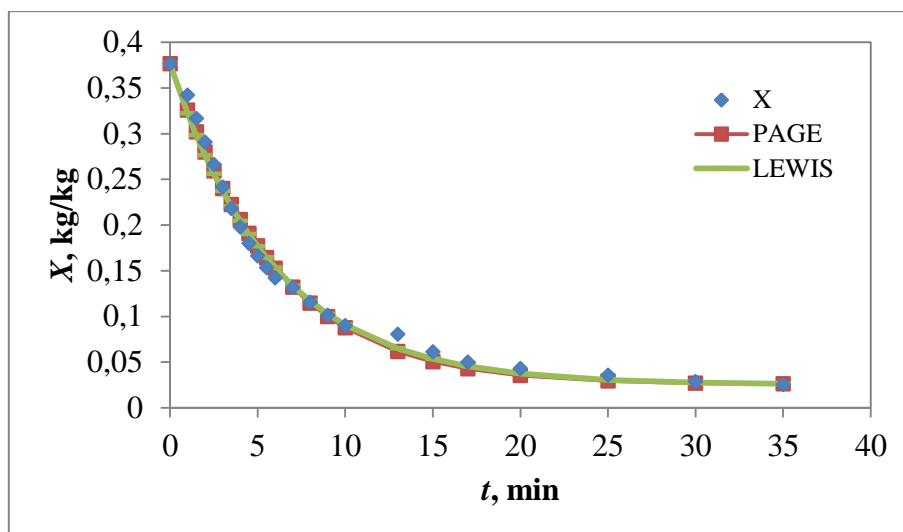


Slika 15. Utjecaj temperature zraka na kinetiku sušenja u sušioniku s fluidiziranim slojem  
 $(T_1=50\text{ }^\circ\text{C}; T_2=60\text{ }^\circ\text{C}; T_3=70\text{ }^\circ\text{C})$

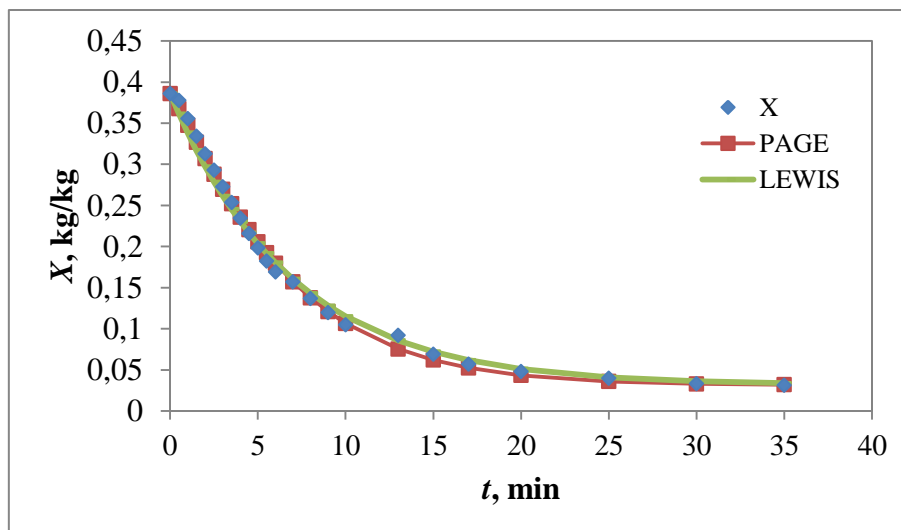




Slika 16. Primjenjivost odabranih matematičkih modela za opis kinetike sušenja  
 ( $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $H = 0,04\text{ m}$ ;  $v = 7,61\text{ m/s}$ )



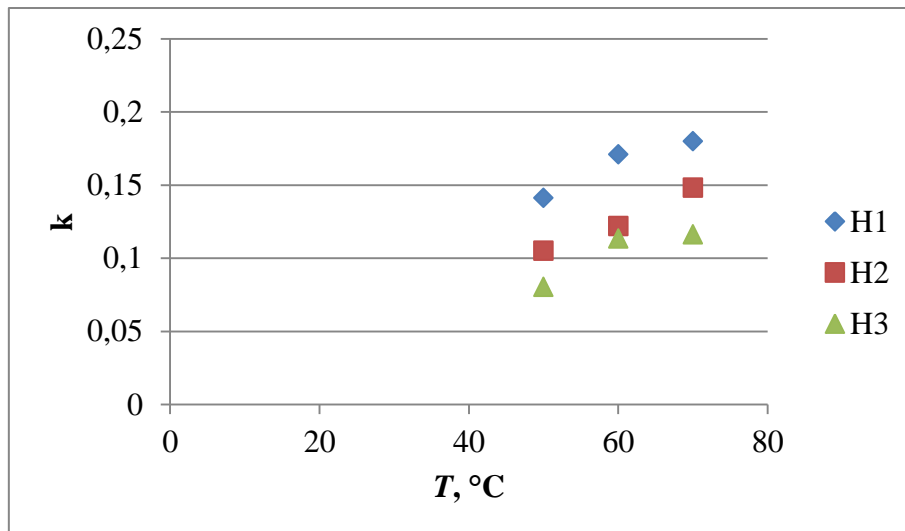
Slika 17. Primjenjivost odabranih matematičkih modela za opis kinetike sušenja  
 ( $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $H = 0,06\text{ m}$ ;  $v = 11,73\text{ m/s}$ )



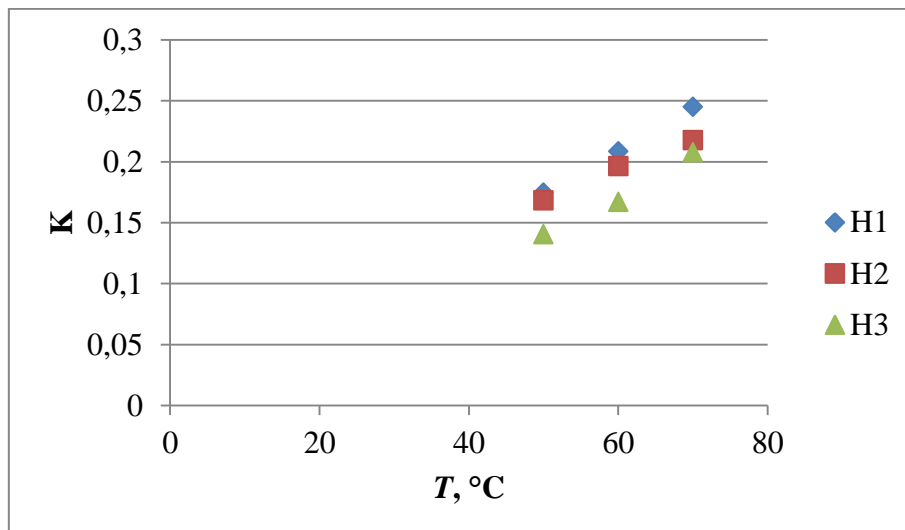
Slika 18. Primjenjivost odabranih matematičkih modela za opis kinetike sušenja  
 ( $T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $H = 0,08 \text{ m}$ ;  $v = 17,02 \text{ m/s}$ )

Tablica 4. Parametri Pageovog i Lewisovog modela

$H$ , m	$v$ , m/s	$T$ , °C	$X_0$ , kg/kg	$Y_0$ , kg/kg	$X_{eq}$ , kg/kg	Page		Lewis
						k	n	K
0,04	6,61	50	0,379187	0,01275	0,0227	0,141246	1,097576	0,16570
	7,61		0,368239	0,01621	0,0217	0,205506	0,983555	0,20047
	8,61		0,371684	0,02147	0,0265	0,101531	1,182764	0,14037
0,06	10,73	50	0,37589	0,01061	0,0227	0,105102	1,136428	0,13397
	11,73		0,376404	0,01719	0,0254	0,156229	1,044796	0,16815
	12,73		0,376227	0,01891	0,0242	0,14821	1,068938	0,16825
0,08	16,02	50	0,367285	0,02063	0,0234	0,080435	1,192535	0,11601
	17,02		0,386078	0,01822	0,0315	0,115289	1,128853	0,14445
	18,02		0,371684	0,02147	0,0265	0,101531	1,182764	0,14037
0,04	6,61	60	0,37007	0,01971	0,0188	0,171001	1,042161	0,182605
	7,61		0,368966	0,02237	0,0204	0,181832	1,066857	0,20126
	8,61		0,370124	0,02099	0,0192	0,201164	1,023222	0,20835
0,06	10,73	60	0,36892	0,02056	0,0160	0,121946	1,08905	0,14227
	11,73		0,37405	0,02041	0,0203	0,1486	1,133901	0,181815
	12,73		0,37331	0,02176	0,0198	0,171577	1,086917	0,196268
0,08	16,02	60	0,36926	0,02148	0,0165	0,113552	1,142193	0,161788
	17,02		0,36828	0,02004	0,0185	0,095448	1,199971	0,140803
	18,02		0,36826	0,02176	0,0197	0,100278	1,28875	0,161988
0,04	6,61	70	0,36472	0,02305	0,013	0,17996	0,95393	0,16679
	7,61		0,36905	0,02209	0,0156	0,182766	1,070434	0,203392
	8,61		0,36782	0,02292	0,016	0,20596	1,123506	0,245091
0,06	10,73	70	0,36949	0,03024	0,0171	0,14825	1,14133	0,17681
	11,73		0,37501	0,01715	0,0167	0,173814	1,149024	0,217046
	12,73		0,36720	0,02423	0,0158	0,161798	1,129787	0,197719
0,08	16,02	70	0,37037	0,02482	0,0149	0,11633	1,130898	0,18887
	17,02		0,36923	0,02423	0,0152	0,134848	1,27905	0,20598
	18,02		0,37008	0,02846	0,0171	0,133798	1,29013	0,207721

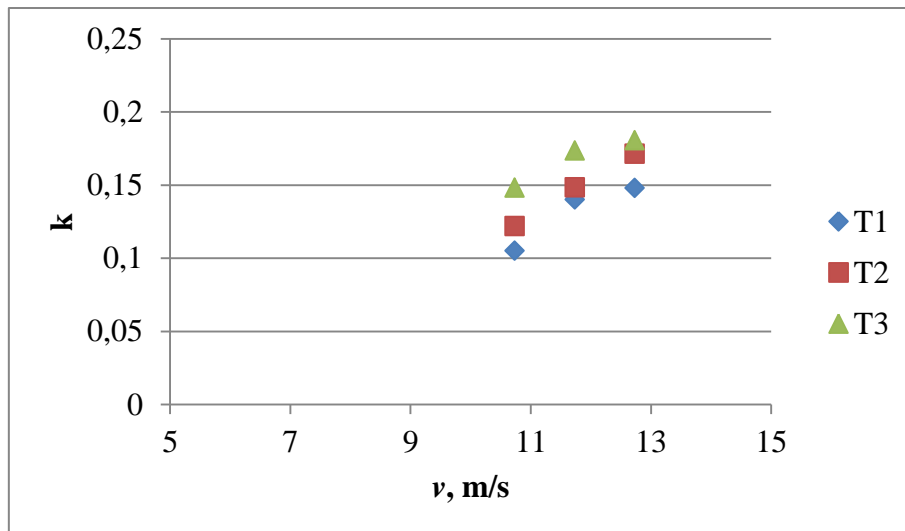


a) Pageov model,  $v_1$

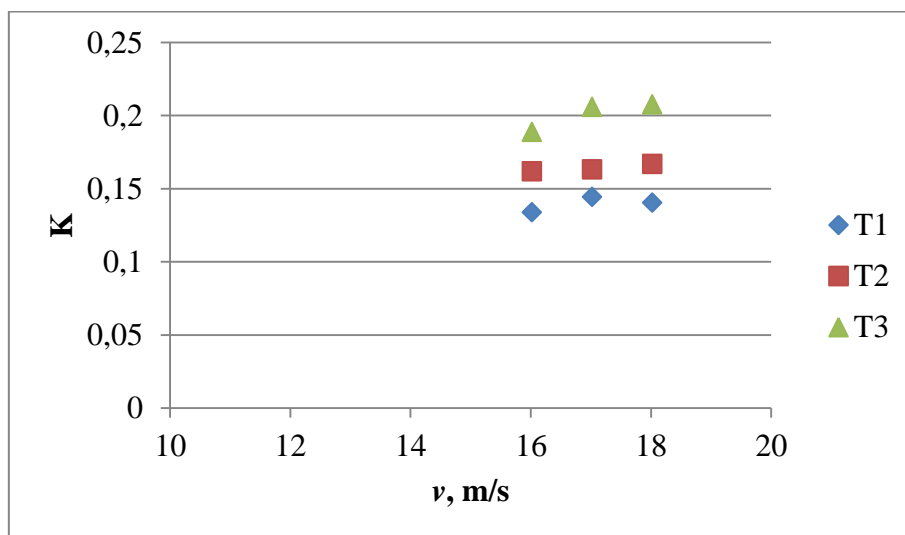


b) Lewisov model,  $v_3$

Slika 19. Ovisnost parametra  $k$  Pageovog modela i parametra  $K$  Lewisovog modela o promjeni temperature sušenja ( $H_1=0,04$  m;  $H_2=0,06$  m;  $H_3=0,08$ m)

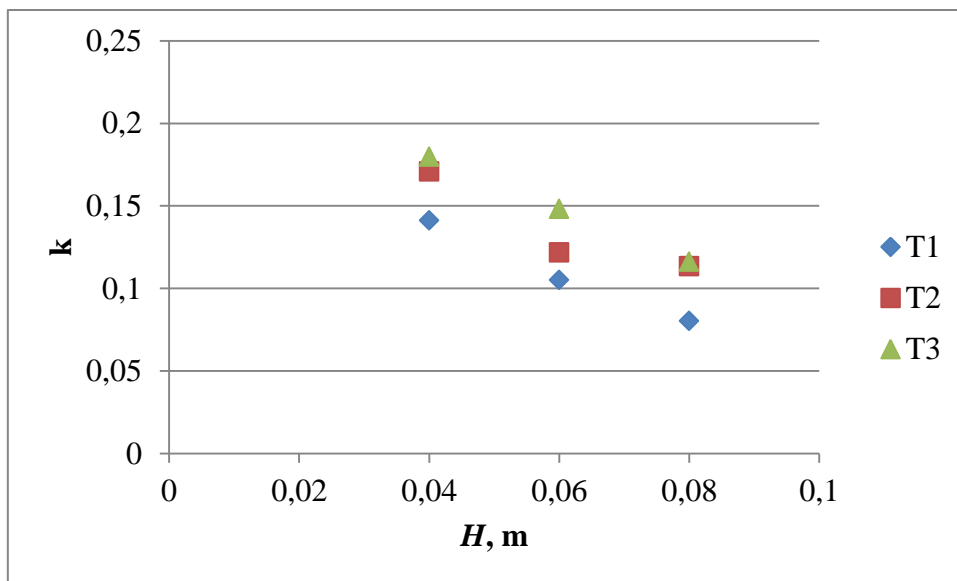


a) Pageov model,  $H=0,06\text{m}$

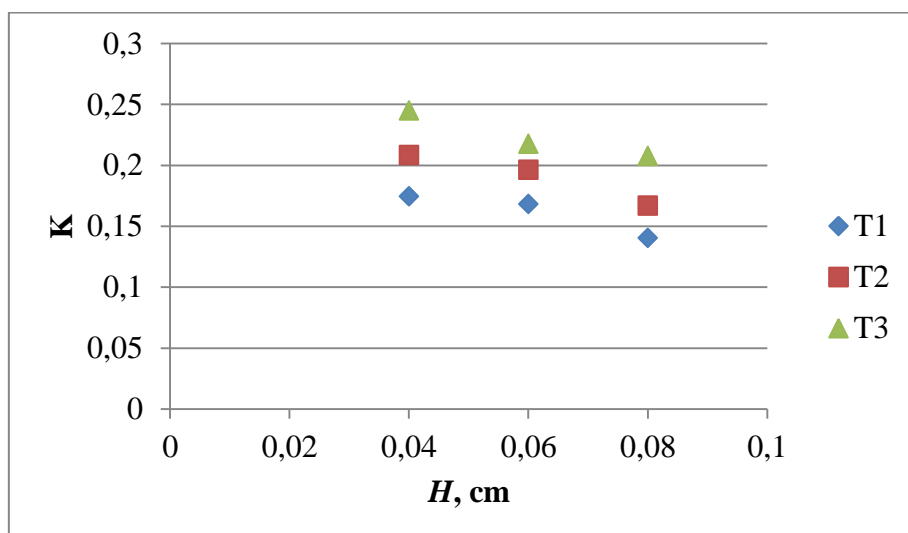


b) Lewisov model,  $H=0,08\text{m}$

Slika 20. Ovisnost parametra  $k$  Pageovog modela i parametra  $K$  Lewisovog modela o promjeni brzine strujanja zraka ( $T_1=50\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $T_2=60\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $T_3=70\text{ }^\circ\text{C}$ )



a) Pageov model,  $v_1$



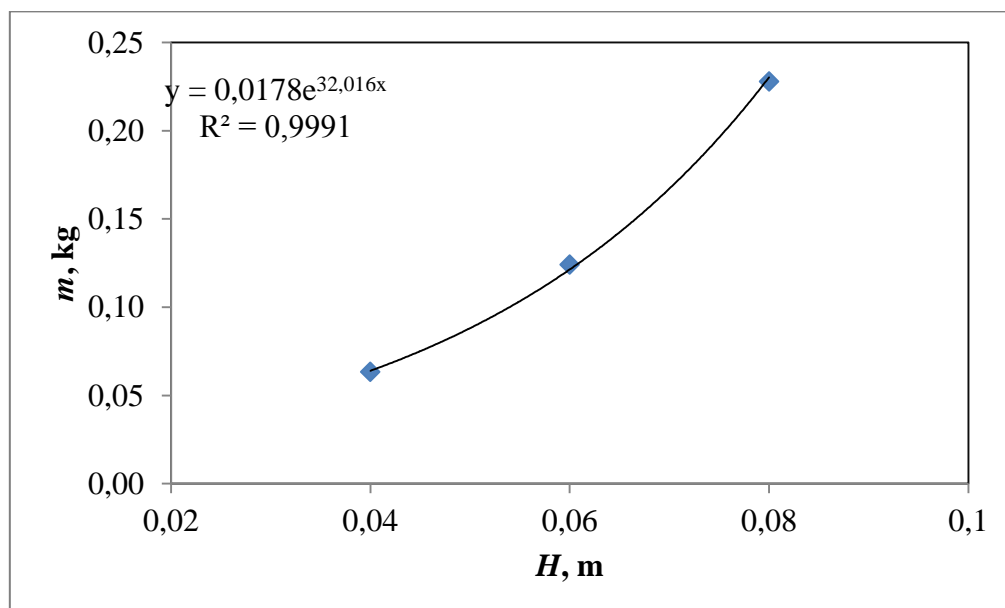
b) Lewisov model,  $v_3$

Slika 21. Ovisnost parametra  $k$  Pageovog modela i parametra  $K$  Lewisovog modela o promjeni visine sloja čestica ( $T_1=50$  °C;  $T_2=60$  °C;  $T_3=70$  °C)

## 5. Rasprava

U ovom radu istražen je utjecaj uvjeta procesa na kinetiku sušenja čvrstih čestica tj. katalizatora u sušioniku s fluidiziranim slojem. Istražen je utjecaj visine sloja čestica, temperature sušenja te utjecaj brzine strujanja zraka na kinetiku sušenja.

S obzirom da se sušenje provodilo u fluidiziranom sloju, bilo je potrebno eksperimentalno odrediti minimalnu brzinu fluidizacije. Na slici 9. prikazana je krivulja fluidizacije, a u tablici 3. dane su eksperimentalno određene minimalne brzine fluidizacije. S porastom visine sloja čestica u sušioniku raste i minimalna brzina fluidizacije. Razlog tome leži u utjecaju stjenke sušionika na hidrodinamičke uvjete u sušioniku. Naime, u sušionicima malog promjera nepovoljni su hidrodinamički uvjeti, veliki je otpor stjenke pa je potrebna veća brzina strujanja da se osiguraju uvjeti za postizanje minimalne brzine fluidizacije. Kako se radi o sušioniku konusne geometrije, porast mase sloja nije linearno vezan uz porast visine sloja već je ta ovisnost eksponencijalna, slika 22. Što je veća visina sloja, utjecaj stjenke se osjeća na većoj masi čestica pa je i značajan utjecaj na minimalnu brzinu fluidizacije. Zbog velikog utjecaja visine sloja čestica na minimalnu brzinu fluidizacije, sušenje je provedeno, ovisno o visini sloja čestica pri brzinama jednakim minimalnoj brzini fluidizacije, te uvećanim za 1 odnosno 2 m/s.

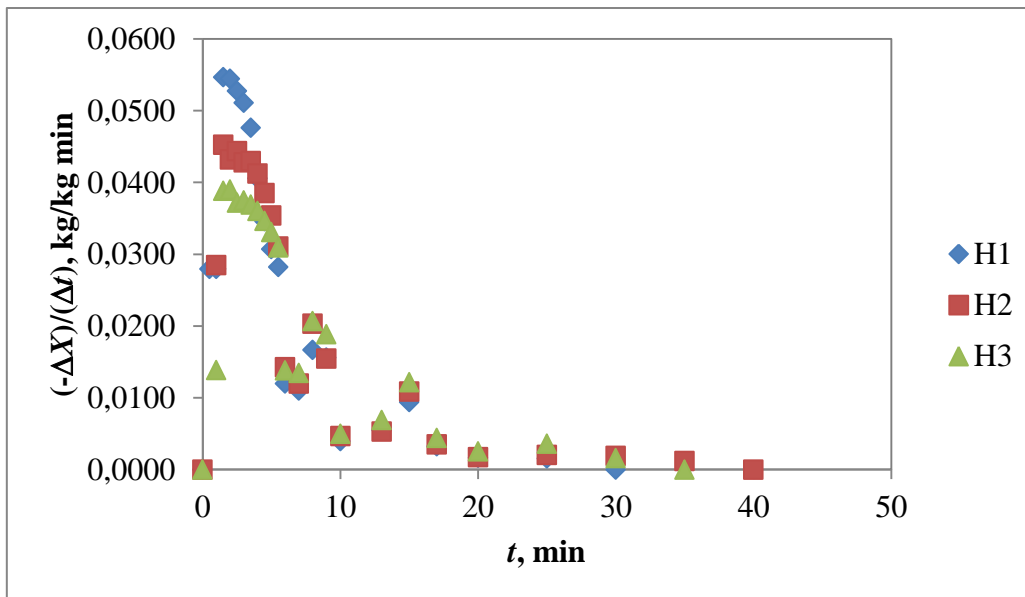


Slika 22. Utjecaj visine sloja čestica na masu mokrih čestica na početku sušenja

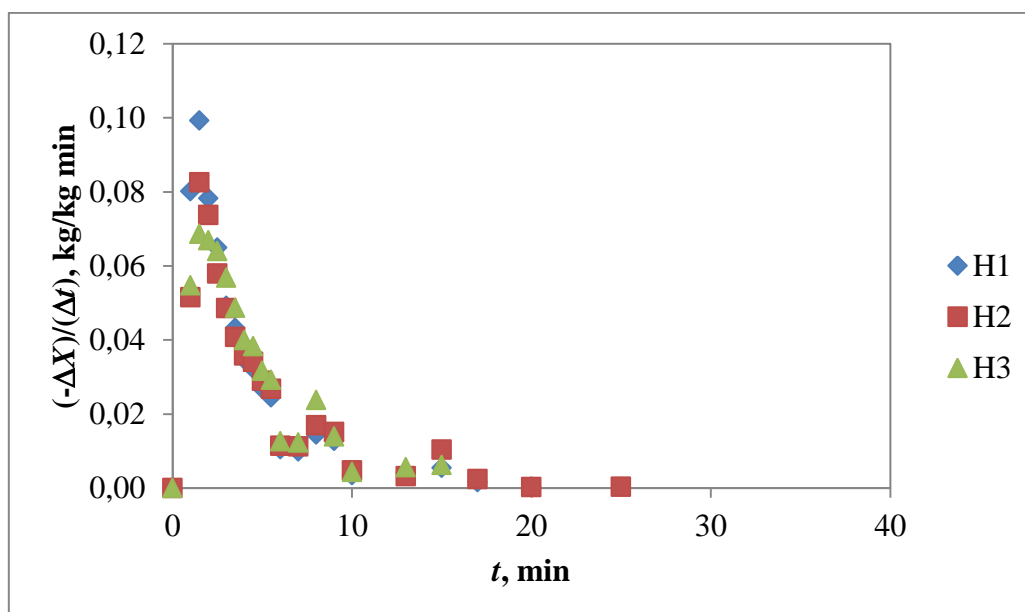
Na slikama 10 do 12 prikazani su utjecaji uvjete provedbe procesa na stanje izlaznog zraka. U svrhu usporedbe rezultata odabrani su primjeri kod kojih je stanje zraka na ulazu u sušionik bilo približno jednako. Naime, zrak nije bilo moguće kondicionirati pa je na kinetiku sušenja utjecalo i stanje okolišnog zraka koje se mijenjalo ovisno o vremenskim prilikama. Utjecaj brzine strujanja zraka na promjenu stanja izlaznog zraka prikazan je na slici 10. Pri manjoj brzini strujanja zraka, zrak je dulje vrijeme u kontaktu s mokrim česticama pa na sebe može primiti više vlage. Istovremeno zrak može predati vlažnom materijalu veću količinu topline, pa će zrak na izlazu iz sušionika imati veći udio vlage i nižu temperaturu. Iako bi izlazna temperatura zraka na kraju sušenja, s obzirom da se sušenje provodilo pri istoj temperaturi morala biti jednaka, ona opada sa smanjenjem brzine strujanja zraka. Nedovoljno dobra izolacija sušionika razlog je toplinskih gubitaka, koji su tim veći što je dulje vrijeme zadržavanja zraka u sušioniku. Utjecaj visine sloja, odnosno mase čestica na izlazno stanje zraka prikazano je na slici 11. Tijekom perioda konstantne brzine sušenja, što je veća masa mokrih čestica u sušioniku veća je i relativna vlažnost izlaznog zraka a niža je njegova temperatura. Manja visina sloja čestica znači da se manja masa vode mora ukloniti iz materijala, ali i da će zrak veću količinu topline moći predati materijalu, što rezultira smanjenjem izlazne temperature zraka sa smanjenjem visine sloja čestica. Ovdje treba imati u vidu, da sušenje nije provedeno pri istoj brzini strujanja zraka već brzini koja je za 1 m/s veća od minimalne brzine fluidizacije ovisno o visini sloja čestica. Dakle, najveća masa čestica sušena je pri najvećoj brzini strujanja zraka. Prikazani rezultati upućuju na to da na kinetiku sušenja sferičnih čestica u konusnom sušioniku s fluidiziranim slojem, u najvećoj mjeri utječe temperatura zraka, što se vidi na slici 12. Veća temperatura zraka znači manju relativnu vlažnost zraka, kako ulaznog tako i izlaznog.

Na slikama 13 do 15, prikazan je utjecaj istraživanih uvjeta provedbe procesa na kinetiku sušenja sferičnih čestica u konusnom sušioniku s fluidiziranim slojem. Na slici 13 može se uočiti da visina sloja čestica ne utječe u velikoj mjeri na kinetiku sušenja. Međutim, ako se pogledaju krivulje brzine sušenja, slika 23, može se vidjeti da brzina sušenja opada s porastom visine sloja odnosno mase čestica u sušioniku iako se sušenje provodi pri većoj brzini strujanja zraka. Utjecaj je najveći pri najnižoj temperaturi zraka za sušenje, pri kojoj je i najmanja pokretačka sila za procese prijenosa tvari i topline. Utjecaj visine sloja čestica, znatno je manje izražen kada se sušenje provodi pri višoj temperaturi i povoljnijim hidrodinamičkim uvjetima, što se može uočiti na slici 24.



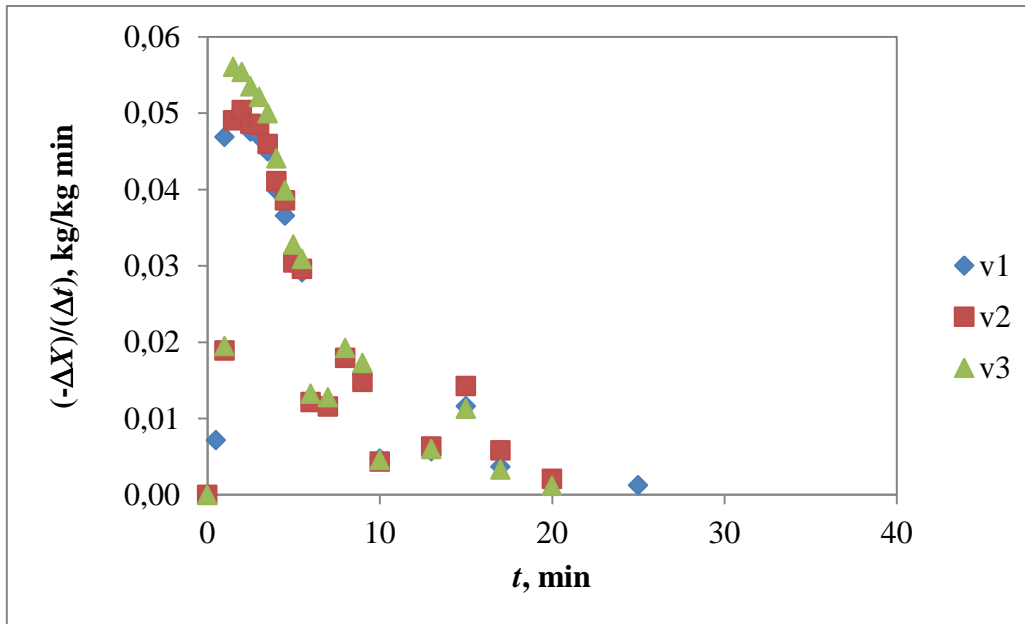


Slika 23. Utjecaj visine sloja čestica na brzinu sušenja ( $T=50\text{ °C}$ ;  $v=v_1$ )



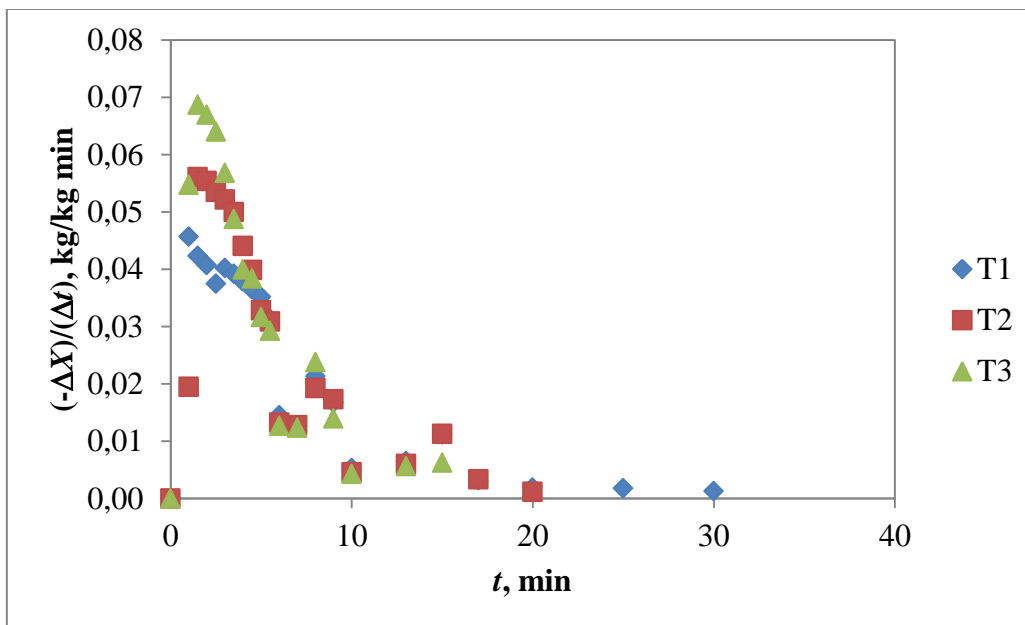
Slika 24. Utjecaj visine sloja čestica na brzinu sušenja ( $T=70\text{ °C}$ ;  $v=v_3$ )

Utjecaj brzine strujanja zraka za tri visine sloja čestica i pri najvišoj temperaturi sušenja, na kinetiku sušenja prikazan je na slici 14. Brzina strujanja zraka ne utječe u velikoj mjeri na kinetiku sušenja. Ako se pogledaju krivulje brzine sušenja, slika 25, može se uočiti veća brzina sušenja na početku sušenja, pri većim brzinama strujanja zraka. Da li će hidrodinamički uvjeti u sušioniku utjecati na kinetiku sušenja čestica u fluidiziranom sloju ovisi o odnosu vanjskog i unutarnjeg otpora. Što je veći vanjski otpor u odnosu na unutrašnji to će brzina strujanja zraka u većoj mjeri utjecati na kinetiku sušenja.



Slika 25. Utjecaj brzine strujanja zraka na brzinu sušenja ( $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $H=0,06\text{ m}$ )

Na slici 15. prikazan je utjecaj temperature zraka na kinetiku sušenja. Porast temperature zraka rezultira većom pokretačkom silom procesa prijenosa topline što za posljedicu ima i veću brzinu prijenosa tvari, odnosno veću brzinu sušenja, slika 26.

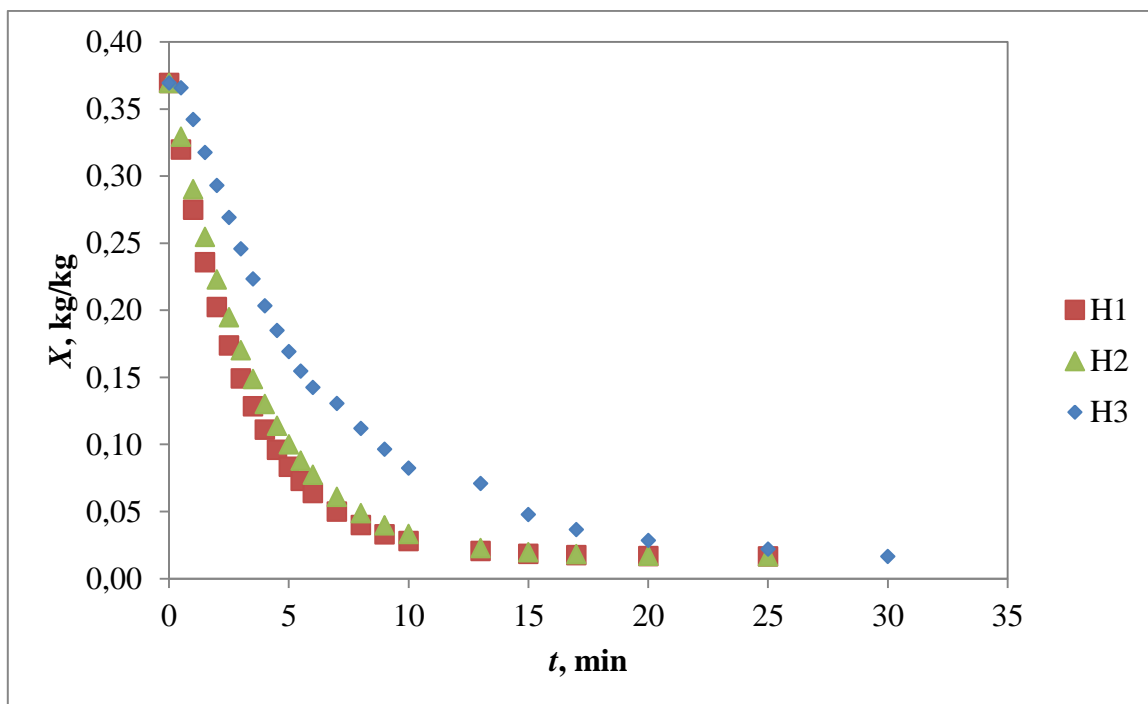


Slika 26. Utjecaj temperature zraka na brzinu sušenja ( $v=v_3$ ;  $H=0,08\text{ m}$ )

Kako je svrha rada bila opisati kinetiku sušenja odgovarajućim matematičkim modelom, eksperimentalni su podaci aproksimirani Pageovim i Lewisovim empirijskim modelima. Na slikama 16.-18. prikazani su dobiveni rezultati pri 50 °C, za sve tri visine mirujućeg sloja čestica. Podaci aproksimirani sa ovim matematičkim modelima slažu se sa eksperimentalnim podacima za sve izvedene eksperimente pa se eksperimentalni podaci mogu opisati navedenim matematičkim modelima.

Iz grafova (slika 19.-21.) i tablice 4. koji prikazuju utjecaj uvjeta provedbe procesa na procijenjene parametre modela vidljivo je da s porastom brzine strujanja i temperature ulaznog zraka, te sa smanjenjem visine sloja čestica vrijednosti parametara Pageovog i Lewisovog modela ( $k$  i  $K$ ) rastu.

Nakon što su utvrđene ovisnosti parametara o uvjetima provedbe procesa sušenja, mogu se u svrhu usporedbe procijeniti krivulje sušenja za odabrane radne uvjete. To na primjer omogućava uvid u stvarni utjecaj visine sloja čestica na kinetiku sušenja. Na slici 27. prikazani su eksperimentalno dobiveni podaci za sušenje najveće visine sloja čestica pri 60 °C i brzini strujanja zraka koja odgovara minimalnoj brzini fluidizacije. Iz ovisnosti  $k=f(v)$  za dvije manje visine sloja čestica procijenjene su vrijednosti parametra  $k$  pri istoj brzini strujanja zraka, te su izračunate krivulje sušenja. Sada je jasno uočljiv utjecaj visine sloja čestica na kinetiku sušenja.



Slika 27. Procijenjene krivulje sušenja

## 6. Zaključci

U ovom radu istražen je utjecaj visine mirujućeg sloja čestica, temperature ulaznog zraka i brzine strujanja zraka na kinetiku sušenja u sušioniku sa fluidiziranim slojem. Na temelju dobivenih rezultata mogu se izvesti sljedeći zaključci:

- Minimalna brzina fluidizacija raste sa povećanjem visine mirujućeg sloja čestica
- Porastom visine mirujućeg sloja čestica opada brzina sušenja
- Pri većim brzinama strujanja zraka ostvaruje se veća brzina sušenja
- Brzina sušenja veća je pri višim temperaturama
- Pageov i Lewisov model mogu se koristiti za aproksimaciju eksperimentalnih podataka
- Procijenjene vrijednosti parametara Pageovog i Lewisovog modela rastu s porastom temperature i brzine strujanja zraka, a opadaju s porastom visine mirujućeg sloja čestica.

## 7. Popis simbola

Simboli:

$A$  – površina, m<sup>2</sup>

$a$  – koeficijent temperaturne vodljivosti, m<sup>2</sup>/s

$C1, C2$  – konstante za procjenu minimalne brzine fluidizacije, -

$D$  – promjer kolone, m

$d$  – promjer, m

$g$  – gravitacijsko ubrzanje, m/s<sup>2</sup>

$H$  – visina sloja čestica, m

$k, K$  – parametar Page i Lewis modela, -

$m$  – masa, kg

$\dot{m}_{sz}$  - protok suhog zraka kroz sušionik, kg/s

$\dot{m}_{vz}$  - protok vlažnog zraka kroz sušionik, kg/s

$n$  – parametar Page modela, -

$p$  – tlak, Pa

$p_{uk}$  – ukupni parcijalni tlak, Pa

$p_w$  – parcijalni tlak vodene pare u smjesi sa zrakom, Pa

$p_w^*$  – ravnotežni tlak para, Pa

$\Delta p_{mf}$  – pad tlaka kroz sloj čestica pri minimalnoj brzini fluidizacije, Pa

$Q$  - toplina, W

$Ra$  – plinska konstanta za zrak

$r$  – polumjer, m

$T$  – temperatura, °C

$T_{MT}$  – temperatura mokrog termometra, °C

$T_{ST}$  – temperatura suhog termometra, °C

$t$  – vrijeme, s

$v$  – brzina strujanja zraka, m/s

$V$  – volumen, m<sup>3</sup>

$V_s$  – volumen sloja čestica, m<sup>3</sup>

$\dot{V}$  - volumni protok, m<sup>3</sup>/s

$X$  – sadržaj vlage materijala, kgv/kgsm

$Y$  – apsolutna vlažnost, kgv/kgsz

$y$  – udio vlage u zraku, -

Grčka slova:

$\alpha$  – koeficijent prijenosa topline, W/m<sup>2</sup> K

$\varepsilon$  – poroznost, -

$\eta$  – dinamička viskoznost, Pa s

$\lambda$  – koeficijent toplinske vodljivosti, W/m K

$\rho$  – gustoća, kg/m<sup>3</sup>

$\varphi$  – relativna vlažnost zraka, -

$\psi$  – neostvarena promjena sadržaja vlage, -

Indeksi:

0 - početno

az – adijabatsko zasićenje

cr – kritično

č – čestica

eq – ravnotežno

f – fluid

i – interval

kf – pri uvjetima kritične fluidizacije

l- gusto

mf – pri uvjetima minimalne fluidizacije

r - rosište

s – rahlo

sm – suhi material

sr – srednje

sz – suhi zrak

v – voda

vm – vlažni material

z – zrak

## 8. Literatura

1. Kunii, D., Levenspiel, O.: Fluidization Engineering, 2nd ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 1991.
2. Hraste, M., Mehaničko procesno inženjerstvo, HINUS, Zagreb 2003.
3. Wilhelm, R. H., Kwauk, M.: Fluidization of solid particles, Chem. Eng. Prog. **44** (1948) 201.
4. Molerus, O., Interpretation of Geldart's type A, B, C and D powders by taking into account interparticle cohesion forces, Powder Technology **33**, Issue 1, September-October (1982), 81-87.
5. González Silva, G., Prieto Jiménez, N., Salazar, O. F., Fluid Dynamics of Gas - Solid Fluidized Beds, Advanced Fluid Dynamics, State University of Campinas, Brazil, (2012), 39-54.
6. Sander, A., Toplinski separacijski procesi (interna skripta); Jedinične operacije u ekoinženjerstvu; I dio , Zagreb, 2011.
7. Sander, A., Sušenje, Nastavni materijali, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb 2015.
8. Hovmand, S., Fluidized bed drying, Handbook of Industrial Drying (Ed. A.S. Mujumdar), Marcel Dekker, Inc., New York 1995.
9. Mudrinić, S., Ekspreimentalno istraživanje sušenja zrnatih materijala u fluidiziranom sloju, Doktorski rad, Zagreb, 2012.
10. Dekker, M., Handbook of fluidisation and fluid-particle systems (Ed. Wen –Ching Yang), , Inc, New York, 2003.
11. Turkera,M., Kanaryaa,A., Yuzgec,U., Kapucua,H., Senalp,Z., Drying of baker's yeast in batch fluidized bed, Chem. Eng. and Proc., **45**, (2006) 1019–1028.
12. Togrul, I.T.,Pehlivan, D., Modelling of drying kinetics of single apricot,Journal of Food Engeneering, **58**, (2003) 23-32.



## **9. Životopis**

Rođena sam 4. veljače 1992. godine. Osnovnu školu i Opću gimnaziju završila sam u Posušju 2010. godine. Iste godine upisujem prediplomski studij Ekoinženjerstvo na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije u Zagrebu te ga završavam 2013. godine. Studiranje nastavljam na diplomskom studiju Kemijskog inženjerstva na istom fakultetu. Kroz cijelo svoje studiranje bila sam aktivna u van nastavnim aktivnostima, kako u sportu tako i u raznim studentskim udrugama i zborovima. U akademskoj godini 2014./2015. uz nekoliko drugih kolega sa različitih fakulteta dobila sam Posebnu Rektorovu nagradu za inicijativu „147 sekundi za Keniju“.