

**MATEMATIČKO MODELOVANJE SUŠENJA PILJEVINE U  
TROPROLAZNOJ ROTACIONOJ SUŠARI  
MATHEMATICAL MODELLING FOR DRYING OF SAWDUST IN A TRIPLE  
PASS ROTARY DRYER**

S. Papuga<sup>1</sup>, P. Petrović<sup>2</sup>, M. Maksimović<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Univerzitet u Banja Luci, Tehnološki fakultet, RS, BiH

<sup>2</sup>Univerzitet u Banja Luci, Mašinski fakultet, RS, BiH

**Izvod**

Danas se rotacione sušare često koriste za sušenje piljevine, koja se potom tehnologijom peletiranja i briketiranja prevodi u tržišno vrijedan proizvod. U ovom radu je dat vlastiti matematički model sušenja čestica piljevine u troprolaznoj rotacionoj sušari. Kao osnova razvoja ovog modela poslužili su postojeći modeli sušenja piljevine i drugih bioloških materijala u jednoprolaznoj rotacionoj sušari, koji su modificirani i prošireni kako bi se matematički opisalo sušenje u uslovima kretanja piljevine kroz troprolaznu rotacionu sušaru. Razvijeni model je poslužio za izradu simulacionog modela koji predviđa temperature i vlažnosti sušenog materijala i agensa sušenja na izlazu iz sušare i njihovu raspodjelu unutar sušare, kroz sva tri bubnja. Validacija razvijenog matematičkog modela sprovedena je analizom rada industrijske sušare (poglavlje 8) i odgovarajućom simulacijom čiji su rezultati diskutovani. Stvarne vrijednosti izlaznih parametara i onih predviđenih modelom su pokazale veliko slaganje. Razvijeni matematički model troprolazne rotacione sušare, odnosno simulacioni program će omogućiti bolje vođenje i kontrolu procesa u navedenoj industrijskoj sušari, ali i u drugim sušarama za drveni otpad uz promjenu odgovarajućih parametara modela.

**Ključne riječi:** piljevina, rotaciona sušara, matematički model, simulacija.

**Abstract**

Today, rotary dryers are often use to dry sawdust prior to their further processing, palletizing and briquetting, into commercially voluble product. This paper present mathematical model for drying process of sawdust particles in a triple pass rotary dryer. As basis for this model, we used existing mathematical models for drying of sawdust and other biological materials in a single pass rotary dryer, which are modified and extended in order to satisfy mathematical description of motion of material in the triple pass rotary dryer. Developed mathematical model is used as basis for further developing of the simulation model that predict temperature and moisture profile sawdust and drying along the dryer. In order to solve and validate developed rotary dryer model, commercial triple pass rotary dryer, installed in enterprise Panensa near town of Srbac, have been analysed, and measured sawdust drying data have been used for comparison.

*Comparison between predicted and the measured results were good. Mathematical model i.e. rotary dryer simulation model developed in this paper is going to enable better management and controlling of process in the mentioned commercial rotary dryer as well as in other rotary dryers for wood waste with modification of appropriate model parameters.*

**Key words:** sawdust, rotary dryer, mathematical model, simulation.

## 1. UVOD

U sušarama se odvija istovremeni prenos toplote i mase, pri čemu je kod rotacionih sušara čitav proces dodatno usložen kaskadnim kretanjem materijala kroz sušaru. Ukupana količina prenesene toplote i mase tokom prolaska vlažnog materijala kroz sušaru veoma zavisi od površine i vremena kontakta između materijala i agensa sušenja [1], te je poznavanje vremena zadržavanja materijala u sušari od izuzetne važnosti. Prenos toplote i mase takođe zavisi od fizičkih osobina materijala, kao i od same konfiguracije rotacione sušare [1,2]. Matematički opis ovih procesa je složen, jer treba da sadrži ne samo osobine vlažnog materijala i agensa sušenja, nego i konstrukcione i operacione osobine rotacione sušare. Ipak, u literaturi su prisutni različiti modeli prenosa toplote i mase, specifični za određene konfiguracije sušare i materijala koji se suše [3,4,5,6]. Iako su sprovedeni mnogi istraživački radovi na modelovanju fenomena sušenja, relativno malo radova se odnosi direktno na rotacione sušare. Većina istraživača posvećuje se iznalaženju jednačina vremena zadržavanja čestica i zapreminskog koeficijenta prenosa toplote u rotacionoj sušari. Ovo omogućava određivanja vremena prolaska materijala kroz sušaru i potrebnog toplotnog toka, te njihovo povezivanje sa dimenzijama i režimom rada sušare. Rotaciona sušara može se matematički opisati modelima sa raspodijeljenim parametrima ili modelima sa koncentrisanim parametrima. Modeli sa raspodijeljenim parametrima su definisani parcijalnim diferencijalnim jednačinama, te su sistemske varijable zavisne i od vremena i od prostora. Ovi modeli, zbog svoje složenosti, zahtijevaju znatno vrijeme računanja. Nasuprot tome, modeli sa koncentrisanim parametrima mogu se opisati običnim diferencijalnim jednačinama, relativno lako se riješavaju uz kraće vrijeme računске obrade, te se često i koriste [3, 4,5,6]. U ovom radu je korišćen pristup sa koncentrisanim parametrima.

### Toplotni i materijalni bilansi

U cilju razvoja matematičkog modela, čitava sušara je podijeljena na 12 kontrolnih zapremina (KZ), kao što je prikazano na slici 1. Za svaku KZ postavljaju se jednačine toplotnih i materijalnih bilansi, uz sledeće pretpostavke:

- Prenos toplote između agensa sušenja i materijala obavlja se mehanizmom konvekcije.
- Sušenje materijala se obavlja isključivo u periodu opadajuće brzine sušenja.
- Maseni protok (apsolutno suvog) vazduha je konstantan kroz čitavu sušaru.
- Materijal ne mijenja svoje dimenzije i oblik tokom sušenja.
- Ulazni protok materijala u KZ jednak izlaznom protoku materijala iz prethodne KZ.

Materijalni bilans vlažnog materijala (piljevine) u KZ;

$$\frac{dm_p}{d\tau} = G_{Pul} - G_{Piz} \quad (1)$$

Materijalni bilans vlage u vlažnom materijala unutar KZ :

$$\frac{dX}{d\tau} = \frac{1}{m_p} \left( G_{Pul} X_{ul} - G_{Piz} X - R_w m_p - X \frac{dm_p}{d\tau} \right) \quad (2)$$

Materijalni bilans vlage u vazduhu (agensu sušenja) unutar KZ:

$$\frac{dY}{d\tau} = \frac{1}{m_A} (G_A (Y_{ul} - Y) + R_w m_p) \quad (3)$$

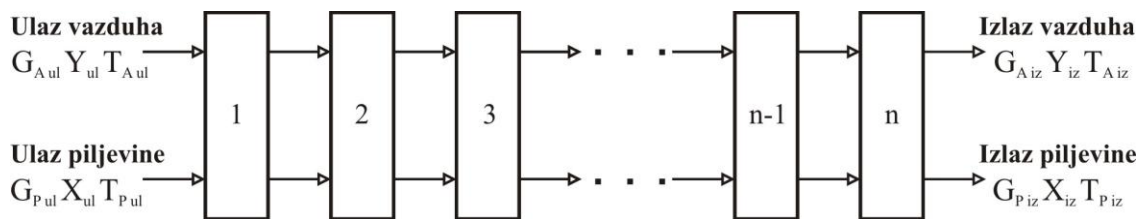
Toplotni bilans vlažnog materijala unutar KZ:

$$\begin{aligned} \frac{dT_P}{d\tau} = \frac{1}{m_p c_p} & \left( G_{Pul} c_{Pul} T_{Pul} - G_{Piz} c_p T_P + U_v a V (T_A - T_P) \right. \\ & \left. - R_w m_p \Delta h_w - R_w m_p c_{wy} (T_A - T_P) - Q_l - m_p T_P \frac{dc_p}{d\tau} - T_P c_p \frac{dm_p}{d\tau} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

Toplotni bilans vazduha (agensu sušenja) unutar KZ:

$$\frac{dT_A}{d\tau} = \frac{1}{m_A c_A} \left[ G_A (c_{Aul} T_{Aul} - c_A T_A) - U_v a V \Delta T_{ml} + R_w m_p c_{wy} T_A - m_A T_A \frac{dc_A}{d\tau} \right] \quad (5)$$

Postavljene jednačine dalje se proširuju na sve ostale KZ.



Slika 1. Shematski prikaz modela rotacione sušare

### Model vremena zadržavanja

Niz autora je dalo pregled i analizu postojećih modela vremena zadržavanja čestica čvrste faze u rotacionim sušaraama [1,3,4,5,7]. Za razvoj modela vremena zadržavanja čestica piljevine u bubnju rotacione sušare korišćen je pristup *Schofield* i *Glikin*-a. *Mani* je navedeni pristup uspješno primjenio na proračun vremena zadržavanja čestica piljevine u jednoprolaznoj rotacionoj sušari, kao i na proračun vremena zadržavanja stabljika i lišća biljke lucerke u troprolaznoj rotacionoj sušari [4]. Takođe, *Kamke* i *Wilson*, su u svom modelu rotacione sušare sa dosta uspjeha primjenili navedenu jednačinu [4,5]. Osnovna pretpostavka studije vremena zadržavanja od strane *Schofield*-a & *Glikin*-a bila je ta da je osnovni mehanizam kretanja čestica kroz rotacioni bubanj kaskadno kretanje koje se sastoji od perioda zadržavanja materijala u pregradama (ispunama) sušare i kaskadnog perioda. Oni su sproveli teorijsku analizu kaskadnog kretanja materijala te definisali model sa preciznijom teorijskom podlogom, u sledećem obliku [1,5]:

$$\bar{\tau} = \frac{L}{x_c} \tau_c = \frac{L}{Y_f (\sin \beta - K v_g^2 / g)} (\tau_r + \tau_f) \quad (6)$$

gdje je:  $L$ - dužina bubnja (m);  $x_c$ - kaskadna dužina tj. dužina bubnja koju pređe prosječna čestica po jednom obavljenom kaskadnom ciklusu (m);  $\tau_c$ - kaskadno vrijeme tj. vrijeme potrebno da prosječna čestica obavi jedan kaskadni ciklus (s);  $Y_f$  - prosječna visina pada čestica (m);  $\tau_r$ - prosječno vrijeme koje čestica provede u pregradi (s);  $\tau_f$ - prosječno vrijeme koje čestica provede u letu (s);  $g$ -gravitaciona konstanta (9,81 m/s<sup>2</sup>);  $v_g$ -brzina gasa (m/s);  $\beta$  - ugao horizontalnog nagiba bubnja (°). Koeficijent  $K$  je specifičan za datu sušaru i materijal koji se suši, te određuje kretanje čestica u struji gasa pod uticajem sile gravitacije i sile povlačenja čestica strujom gasa.  $K$  se definiše preko koeficijenta povlačenja -  $C_D$ , a koji se određuje primjenom teorije sličnosti [4]. Osnovne pretpostavke navedenog pristupa sušenja piljevine u jednoprolaznoj sušari su iskorišćene, te nadalje modifikovane i proširene u odnosu na mehanizam kretanja čestica piljevine kroz troprolaznu rotacionu sušaru. Za procjenu vremena zadržavanja čestica piljevine u unutrašnjem bubnju koristiti se jednačina (6), odnosno prethodno opisani pristup. Kod središnjeg i vanjskog bubnja za procjenu vremena zadržavanja potrebno je modifikovati jednačine kaskadne dužine i kaskadnog vremena u odnosu na dimenzije bubnja, brzinu gasa i način kretanja čestica. U jednačine kaskadne dužine za središnji i vanjski bubanj uvedeni su empirijski koeficijenti 0,5 dok je u jednačinama za  $K$  uveden koeficijent 1,5 za sva tri bubnja, a kako bi se zadovoljili eksperimentalni rezultati sa rezultatima simulacije rada sušare. Za prosječan ugao pada čestica piljevine ( $\theta$ ) uzeta je vrijednost 82,6°, na osnovu rezultata fotografske tehnike snimanja ovog ugla objavljene od strane Kamke-a [1]. Jednačine kaskadne dužine i kaskadnog vremena su sumirane u tabeli 1.

Tabela 1. Jednačine proračuna vremena zadržavanja u troprolaznoj rotacionoj sušari

	Unutrašnji bubanj	Središnji bubanj	Vanjski bubanj
Kaskadna dužina	$x_{ci} = \frac{K_i Y_i v_{Ai}^2}{g}$ $K_i = 1,5 C_{Di} \frac{\rho_A}{d_p \rho_P}$	$x_{cm} = \frac{1}{2} K_m \tau_{fm}^2 v_{Am}^2$ $K_m = 1,5 C_{Dm} \frac{\rho_A}{d_p \rho_P}$	$x_{co} = \frac{1}{2} K_o \tau_{fo}^2 v_{Ao}^2$ $K_o = 1,5 C_{Do} \frac{\rho_A}{d_p \rho_P}$
Kaskadano vrijeme $\tau_c = \tau_r + \tau_f$	$\tau_{ri} = 60 \frac{90 + \bar{\theta}}{360 \cdot n}$ $\tau_{fi} = \sqrt{\frac{2Y_{fi}}{g}}$	$\tau_{rm} = 60 \left( \frac{90 + \bar{\theta}}{360 \cdot n} + \frac{90 + \bar{\theta}}{360 \cdot n} \right)$ $\tau_{fm} = \sqrt{\frac{2y_{1m}}{g}} + \sqrt{\frac{2y_{2m}}{g}}$	$\tau_{ro} = 60 \left( \frac{90 + \bar{\theta}}{360 \cdot n} + \frac{90 + \bar{\theta}}{360 \cdot n} \right)$ $\tau_{fo} = \sqrt{\frac{2y_{1o}}{g}} + \sqrt{\frac{2y_{2o}}{g}}$
Dužina pada čestica $Y_f = y_1 + y_2$	$Y_{fi} = \frac{D_i}{2} + \left( \frac{D_i}{2} - FL_i \sin \bar{\theta} \right)$	$y_{1m} = \left( \frac{D_m}{2} - \frac{D_i}{2} - \frac{FL_m}{2} \right) \sin \bar{\theta}$ $y_{2m} = \left( \frac{D_m}{2} - \frac{FL_m}{2} \right)$	$y_{1o} = \left( \frac{D_o}{2} - \frac{D_m}{2} - \frac{FL_o}{2} \right) \sin \bar{\theta}$ $y_{2o} = \left( \frac{D_o}{2} - \frac{FL_o}{2} \right)$

### Model prenosa toplote

Toplotni tok koji se razmijenjuje između čestica piljevine i vrelih gasova (agensa sušenja) u posmatranoj KZ rotacione sušare definisan je sledećom jednačinom:

$$Q = U_v a V \Delta T_{lm} \quad (7)$$

pri čemu je zapreminski koeficijent prenosa toplote dat izrazom *Myklestad-a* [1,2,4,5]:

$$U_v a = 0,52 G_A^{0,8} \quad (8)$$

Navedena jednačina uspješno je primjenjena u različitim matematičkim modelima odnosno simulacijama sušenja niza proizvoda biološkog porijekla [3], kao i same piljevine [4]. Toplotni tok između vanjskog bubnja sušare i okoline, dat je izrazom

$$Q_l = U_h A (T_p - T_0) \quad (9)$$

dok su toplotni tokovi između pojedinih bubnjeva zanemareni. Uzeta je vrijednost ukupnog koeficijenta toplotnih gubitaka od  $U_h=0,055$  (kW/(m<sup>2</sup>°C)), kao najbolje prilagođena mjerenim vrijednostima izlazne temperature gasova.

### Kinetika sušenja

Brzina sušenja -  $R_w$ , u periodu opadajuće brzine, može se opisati jednačinom tankog sloja sloja tj. *Lewis*-ovim modelom [1,8], koji se često primjenjuje kod sušenja bioloških materijala u periodu opadajuće brzine sušenja [9,10,11],

$$R_w = k_D (X - X^*) \quad (10)$$

Konstanta sušenja  $k_D$ , i ravnotežni sadržaj vlage  $X^*$ , su funkcije temperature agensa sušenja, te je neophodno poznavati i tu funkcionalnu zavisnost s obzirom da se tokom sušenja mijenja temperatura agensa sušenja. Na osnovu podataka objavljenih od strane *Plumba* i saradnika [4], a koji se odnose na sušenje sitnih drvnih čestica, usvojen je sledeći izraz za definisanje konstante sušenja piljevine,

$$k_D = 0,19 \exp\left(-\frac{248}{t_L}\right) \quad (11)$$

Ravnotežna vlažnost čestica piljevine je računata iz jednačine *Day* i *Nelson-a* [12].

$$X^* = \left[ \frac{\ln(1-\varphi)}{(b_1 T^{b_2})} \right]^{\frac{1}{(b_3 T^{b_4})}} \quad (12)$$

pri čemu parametri  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  i  $b_4$  imaju vrijednosti:  $3,4 \cdot 10^{-17}$ ; 5,98;  $3 \cdot 10^2$  i -0,93 (respektivno),  $X^*$  je ravnotežna vlažnost u postocima (%). Pored gornje jednačine, ispitivana je primjenljivost i drugih sorpcionih modela: *Hailwood-Horrbina*-ov sorpcioni model, *Malmquist*-ov sorpcioni model, kao i često primjenjivana jednačina *Simpsona-a* [12,13]. Takođe, ispitivana je i primjenljivost jednačine

*Nelson*-a (jednačina 13), originalno izvedena iz jednačine *Kelsey*-a, a koja se preporučuje za proračune ravnotežne vlažnosti drveta [14], te istu koristi *Mani* pri modelovanju jednoprolazne rotacione sušare za piljevinu [4].

$$\exp \left[ A \left( 1 - \frac{X}{(X^*)_{\max}} \right) \right] = - \frac{RT}{M} \ln \varphi \quad (13)$$

Pokazalo se da su navedeni sorpcioni modeli nepodesni u ovom slučaju. Naime, za područja relativno visokih temperatura i niskih relativnih vlažnosti vazduha (ulazna temperatura vrelih gasova u sušaru se kreće oko 300°C, a relativna vlažnosti i do 0,0002), gdje je inače ravnotežna vlažnost drveta bliska nuli, analizirane jednačine daju negativne vrijednosti ravnotežnog sadržaja vlage. Stoga je iskorišćena jednačina (12), kao najbolja aproksimacija za područja relativno visokih temperatura i niskih relativnih vlažnosti vazduha (agensa sušenja).

## 2. EKSPERIMENTALNI DIO

Da bi se simulirao rad rotacione sušare za piljevinu tj. da bi se riješile postavljene jednačine za konkretne uslove rada sušare, te sproveda validacija postavljenog matematičkog modela, analiziran je rada industrijske troprolazne rotacione sušare instalisane u pogonu preduzeća *Panensa*, kod Srpcu. Postrojenje suši piljevinu i drugi drveni otpad različite ulazne vlažnosti, koja se generalno kreće oko 0,4 kg/kg<sub>SO</sub>, dok je zahtijevana izlazna vlažnost sušenog materijala oko 0,12 kg/kg<sub>SO</sub>. Dimenzije sušare i karakteristike ulaznih tokova, tj. parametri simulacionog modela, navedeni su u tabeli 2 i 3, respektivno, dok su osnovne termofizičke osobine piljevine i vazduha, korišćene u simulacionom modelu rotacione sušare sumirane u tabeli 4. Vlažnost piljevine je mjerena uređajem za određivanje vlažnosti čestica drvene biomase *Kern ML B 50-3*, u 6 uzoraka piljevine (3 uzorka prije i 3 nakon procesa sušenja). Temperatura gasa na ulazu i izlazu iz sušare je direktno očitavana sa displeja instalisane opreme za automatsku kontrolu procesa. Izlazne vlažnosti piljevine i temperature gasa iskorišćene su za validaciju dobijenog modela te su uporedo prikazani sa rezultatima simulacionog modela u tabeli 5. Srednji dijametar čestica ( $d_p=0,7$  mm) je određen na osnovu rezultata granulometrijske analize vršene u laboratorijima Tehnološkog fakulteta u Banja Luci. Korišćena su sita otvora 1,6; 1,25; 1,00; 0,80; 0,63 i 0,50 mm. Protok piljevine je određen hvatanjem toka piljevine na izlazu iz ciklona u trajanju od 60 s, koji je potom vagan, dok je protok vrelih gasova uzet iz tehničke dokumentacije. Uzeto je da agens sušenja ima osobine vrelog (vlažnog) vazduha.

Tabela 2. Parametri simulacionog modela - geometrijske karakteristike rotacione sušare

$D_i$	-Dijametar unutrašnjeg bubnja, ( m )	0,92
$D_m$	-Dijametar središnjeg bubnja, ( m )	1,64
$D_o$	-Dijametar vanjskog bubnja, ( m )	2,30
$FL_i$	-Dužina pregrada unutrašnjeg bubnja, ( m )	0,23
$FL_i$	-Dužina pregrada središnjeg bubnja, ( m )	0,23
$FL_i$	-Dužina pregrada vanjskog bubnja, ( m )	0,20
$L$	-Dužina prolaza materijala kroz sva tri bubnja, ( m )	4,75
$n$	-Brzina rotacije bubnja, ( $\text{min}^{-1}$ )	2,8
$\alpha$	-Nagib bubnja, ( $^\circ$ )	0

Tabela 3. Parametri simulacionog modela - karakteristike ulaznih tokova

$G_{pul}$	-Maseni protok piljevine, ( $\text{kg}_{so}/\text{s}$ )	0,45
$G_{Aul}$	-Maseni protok gasova, ( $\text{kg}_{so}/\text{s}$ )	1,4
$T_{Pul}$	-Ulazna temperatura piljevine, ( $^\circ\text{C}$ )	20,0
$T_{Aul}$	-Ulazna temperatura gasova, ( $^\circ\text{C}$ )	317,3
$X_{Pul}$	-Ulazni sadržaj vlage piljevine, ( $\text{kg}/\text{kg}_{so}$ )	41,90
$Y_{Aul}$	-Ulazni sadržaj vlage gasova, ( $\text{kg}/\text{kg}_{so}$ )	0,0075

Tabela 4. Parametri simulacionog modela- Termofizičke osobine piljevine i vrelog vazduha korišćene u simulaciji rada analizirane rotacione sušare, Panensa Srbac

Osobine	Vrijednosti i jednačine	Izvor
Gustina čestice piljevine, ( $\text{kg}/\text{m}^3_{so}$ )	387	Moreno i dr. [15]
Srednji dijametar čestica, ( m )	0,0007	Mjereno
Specifična toplota piljevine, ( $\text{kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$ )	$c_p = c_{p0} + 2,822 \cdot X$ $c_{p0} = 0,1031 + 0,003867 T$	Pakowski i Mujumdar [8], Simpson [13]
Specifična toplota vazduha, ( $\text{kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$ )	$c_A = 1,01 + c_{wy} Y$ $^1 c_{wy} = c_{w0} + c_{w1} t + c_{w2} t^2 + c_{w3} t^3$	Pakowski i Mujumdar (2006)
Latentna toplota isparavanja vlage, ( $\text{kJ}/\text{kg}_{so}$ )	$\Delta h_w = 2260 + \frac{1,6018 \cdot X * 0,8540}{0,0068 \cdot X * 2,5758}$	Mani [4], Simpson [13], Pakowski i Mujumdar [8]
Relativna vlažnost vazduha	$\varphi = \frac{Y \cdot P_0}{(0,622 + Y) p_z(t)}$ $\ln p_z = a - b(c + t)^{-1}; P_0 = 10^2 \text{ kPa}$	Pakowski i Mujumdar [8]
Ravnotežni sadržaj vlage piljevine, ( $\text{kg}/\text{kg}$ )	$^2 X^* = \left[ \frac{\ln(1 - \varphi)}{(b_3 T^{b_4})} \right]^{1/(b_1 T^{b_2})}$	Bastias i dr. [12]
Konstanta sušenja (1/s)	$k_D = 0,19 \exp\left(-\frac{248}{t_L}\right)$	Mani [4]

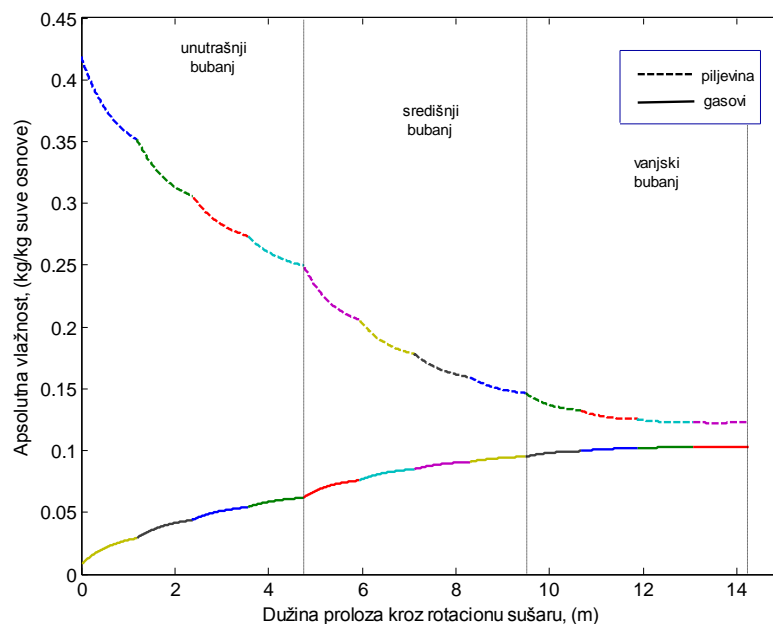


### Postupak rješavanja jednačina

Sistem diferencijalni jednačina, (1), (2), (3), (4) i (5), postavljen za jednu KZ proširuje se na svih 12 KZ. Date jednačine se kombinuju sa jednačinama kinetike sušenja (10) i (11), prenosa toplote (8) i (9) i modela vremena zadržavanja u analiziranoj rotacionoj sušari (tabela 1), a koje se dalje kombinuju sa jednačinama termofizičkih osobina piljevine i vrelog vazduha (tabela 4). Simulacija sušenja je urađena u Matlab-u, pri čemu se sistem diferencijalnih jednačina riješava simultano koristeći *Dormand-Prince* numeričku metodu, zasnovanu na kombinaciji *Runge-Kuta* metoda *IV* i *V* reda, a primjenom paketa *ode45* (Matlab solver). Tolerancija relativne greške integracije 'RelTol' je podešena na  $10^{-4}$ , a apsolutne greške integracije 'AbsTol' na  $10^{-6}$ , maksimalni red jednačine za izračunavanje rješenja 'MaxOrder' iznosi 5. Početnu uslovi za integraciju diferencijalnih jednačina su temperature ( $T_{Aub}, T_{Pul}$ ) i apsolutne vlažnosti ( $X_{Aub}, X_{Pul}$ ) ulaznih tokova gasa i piljevine (tabela 3).

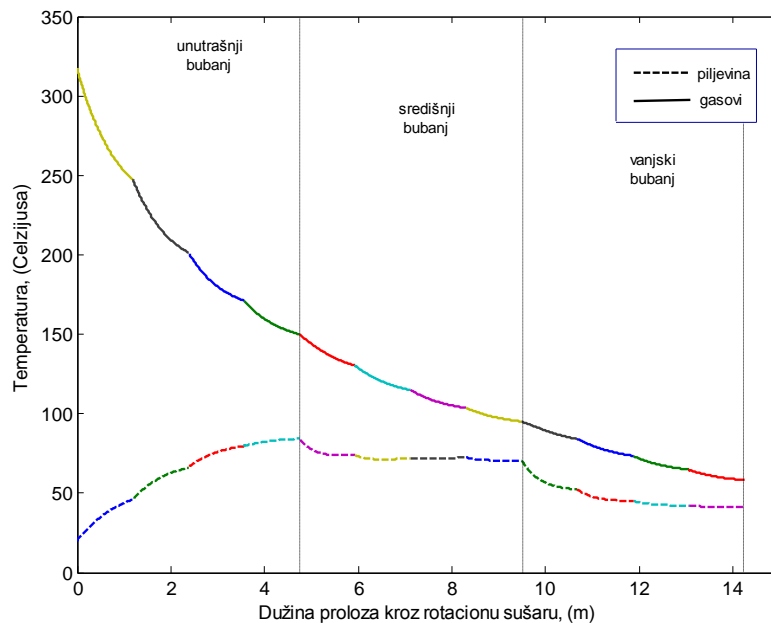
### 3. REZULTATI I DISKUSIJA

Na slikama 1 i 2 dati su rezultati simulacije rada sušare za navedene ulazne varijable. Na ulazu u sušaru brzina sušenja je relativno visoka s obzirom na visoku ulaznu temperaturu i nisku relativnu vlažnost vreljih gasova, kao i na veliku brzinu prenosa toplote. S jedne strane visoka temperatura vreljih gasova direktno utiče na konstantu sušenja koja eksponencijalno raste sa temperaturom (jednačina 11), dok istovremeno niska relativna vlažnost vreljih gasova smanjuje



Slika 1 Promjena vlažnosti piljevine i gasova sa prolaskom kroz rotacionu sušaru





*Slika 2 Promjena temperature vrelih gasova i piljevine sa prolaskom kroz rotacionu sušaru*

ravnotežnu vlažnost piljevine (shodno jednačini 12) što direktno povećava ukupnu brzinu prema primjenjenoj jednačini tankog sloja (10). Već nakon 4,75 m dužine prolaza čestica piljevine kroz sušaru (slika 1), dakle već u unutrašnjem bubnju, ispari više od 50% vlage iz sušenog materijala, što se dalje nastavlja i kroz središnji i vanjski bubanj ali nešto manjom brzinom. U posljednja dvije KZ promjena vlažnosti i piljevine i vazduha je jako mala. Slika 2 pokazuje temperaturne profile vrelih gasova i piljevine u funkciji dužine prolaza piljevine kroz sva tri bubnja. Brzina prenosa toplote je maksimalna na ulazu u sušaru s obzirom na veliku razliku temperatura između vrelom gasa i piljevine. Kao rezultat ovog dolazi do porasta temperature piljevine, te istovremenog smanjenja temperature vrelih gasova. Sa daljim napredovanjem piljevine kroz sušaru smanjuje se intenzitet prenosa toplote te se materijal sve sporije zagrijava. Temperatura vrelih gasova konstantno opada zbog predaje toplote piljevini. Po ulasku u unutrašnji bubanj sušare temperatura piljevine raste relativno brzo da bi na kraju unutrašnjeg bubnja dostigla maksimalno vrijednost, koja je za 48 °C veća od temperature piljevine na izlazu iz sušare. Kako je količina vlage koja ispari iz piljevine na ulazu u sušaru velika, potrebna je i znatno veća količina toplote za njeno isparavanje nego sa daljim napredovanjem piljevine kroz sušaru. Zaključuje se da je maksimalna brzina razmjene toplote posljedica maksimalne temperaturske razlike gasa i piljevine. Sa daljim napredovanjem piljevine (kroz središnji bubanj) brzina razmjene toplote se smanjuje, tako da materijal prestaje da se zagrijava. Po ulasku u vanjski bubanj temperatura piljevine počinje da pada jer tada dolaze do izražaja i toplotni gubici kroz zidove vanjskog bubnja koji su u dodiru sa okolinom. Takođe, treba naglasiti da su i različita vremena zadržavanja piljevine i brzine gasa kroz različite bubnjeve sušare što dodatno utiču na brzinu i ukupnu razmijenu toplote između gasova i piljevine. S jedne strane duže vrijeme zadržavanja piljevine povećava ukupnu razmijenu toplote (radi dužeg vremena kontakta vrelih gasova i piljevine), dok istovremeno sporije kretanje vrelih gasova smanjuje vrijednost zapreminskog koeficijenta prenosa toplote, a samim time i brzinu razmijene toplote. Kao rezultat gore navedenih uticaja dobiju se krive na slici 2. Validacija dobijenih rezultata sprovedena je

poređenjem sa odgovarajućim podacima dobijenih analizom rada industrijske sušare. S obzirom na nemogućnost mjerenja temperatura i vlažnosti unutar same sušare, za poređenje su korišćeni odgovarajući parametri na izlazu iz sušare, što su činili i drugi istraživači [3, 4,16]. Tabela 5 pokazuje predviđene i mjerene vrijednosti parametara na izlazu iz sušare. Previđena izlazna vlažnost piljevine je nešto manja od mjerene vrijednosti, dok je previđena temperatura na izlazu iz sušare nešto veća od mjerene vrijednosti. Ovi rezultati potvrđuju ispravnost postavljenih jednačina. Temperatura piljevine na izlazu iz analizirane sušare se ne mjeri ali se može pretpostaviti da je ta temperatura manja za 10-20°C od izlazne temperature agensa sušenja [3,4] što odgovara previđenoj vrijednosti 41,1 °C.

*Tabela 5. Vrijednosti procesnih parametara na ulazu i izlazu iz sušare*

Parametar	Ulazna vrijednost	Izlazna vrijednost	
		Predviđena	Stvarana (mijerena)
Temperatura vrelih gasova (°C)	<b>317,30</b>	58,3	52,41
Apsolutna vlažnost piljevine (kg/kg <sub>so</sub> )	<b>0.4141</b>	0,1229	0,1151

Može se zaključiti da modelom predviđene vrijednosti pokazuju značajno slaganje sa mjerenim podacima, te se dobijeni model može koristiti za predviđanje profila temperatura i vlažnosti, piljevine i gasovitog medijuma, unutar sušare i na izlazu iz sušare.

#### 4. ZAKLJUČAK

Na osnovu razmatranja razvijenog matematičkog modela rotacione sušare i dobijenih rezultata mogu se izvući sledeći zaključci:

- Razvijeni matematički model poslužio je u svrhu simulacije sušenja piljevine u troprolaznoj rotacionoj sušari
- Poređenjem vrijednosti mjerenih temperatura vrelih gasova i vlažnosti piljevine na ulazu i izlazu iz sušare, u industrijskim uslovima rada, sa odgovarajućim vrijednostima koje se dobiju simulacionim modelom, može se zaključiti da nema značajnih odstupanja, te da se dobijeni model može koristiti za predviđanje temperatura i vlažnosti, piljevine i vrelih gasova na izlazu iz date troprolazne rotacione sušare za piljevinu
- Razvijeni simulacioni model troprolazne rotacione sušare omogućava brzu identifikaciju posljedica promjene uslova sušenja te omogućava brže iznalaženje konkretnih rješenja za dati problem;
- Razvijeni matematički model može poslužiti kao za bolje vođenje i kontrolu procesa sušenja piljevine u troprolaznoj rotacionoj sušari, ali određenim prilagođavanjima i za procese sušenja drugih materijala u rotacionim sušarama.

**Osnovne korišćene oznake**

$A$	Površina vanjskog bubnja sušare, $m^2$	$X^*$	ravnotežna vlažnost sušenog materijala,
$c$	specifični toplotni kapacitet, $\text{kJ/kgK}$ ;		$\text{kg}_W/\text{kg}_{so}$ ,
$FL$	dužina pregrada sušare, $m$	$Y$	apsolutna vlažnost agensa sušenja,
$G$	maseni protok, $\text{kg}_{so}/s$		$\text{kg}_W/\text{kg}_L$ ,
$\Delta h_W$	latentna toplota isparavanja vlage,	$\rho$	gustina, $\text{kg}/m^3$
	$\text{kJ}/\text{kg}_W$	$\tau$	vrijeme, $s$
$k_D$	konstanta sušenja, $s^{-1}$	$\varphi$	relativna vlažnost agensa sušenja
$L$	dužina bubnja, $m$		
$m$	masa, $kg$		
$n$	brzina rotacije bubnja, $\text{min}^{-1}$		
$Q$	toplotni tok, $kW$		
$Q_I$	toplotni gubici kroz zidove sušare,		
$kW$			
$R_W$	brzina sušenja piljevine, $\text{kg}_W/(\text{kg}_{so}\cdot s)$		
$T$	termodinamčka temperatura, $K$		
$t$	temperatura u stepenima Celzijusa,		
$^{\circ}C$			
$U_{va}$	zapreminski koeficijent prelaza		
toplote,			
	$\text{kW}/(m^3\cdot^{\circ}C)$		
$V$	zapremina sušare, $m^3$		
$X$	apsolutna vlažnost sušenog materijala,		
	$\text{kg}_W/\text{kg}_{so}$ ,		

**Indeksi**

$A$	agens sušenja (dimni gasovi + vazduh);
$L$	apsolutno suv gas;
$O$	okolina;
$P$	piljevina;
$S$	apsolutno suv materijal;
$W$	vlaga;
$i$	unutrašnji bubanj rotacione sušare;
$m$	središnji bubanj rotacione sušare;
$o$	vanjski bubanj rotacione sušare;
$so$	suva osnova;
$ul$	ulaz;
$iz$	izlaz;

**LITERATURA**

- [1] M. Krokida, D. Marinos-Kouris i A.S. Mujumdar, Rotary Drying u Handbook of Industrial Drying ( editor A.S. Mujumdar ), CRS Press, New York, 2006, pp.151-171.
- [2] C.G. Moyers, i G.W. Baldwin, Section 12: Psychrometry, Evaporative Cooling, and Solids Drying u „Perry's Chemical Engineer's Handbook on CD“, The McGraw-Hill, 1999, pp.31-64.
- [3] A. Iguaz, A.Esnoz, G.Martínez, A. López, i P. Vírveda, Mathematical modelling and simulation for the drying process of vegetable wholesale by-products in a rotary dryer, *Journal of Food Engineering*, 59 (2003), pp.151-161.
- [4] S. Mani, A System Analysis of Biomass Densification Process, PhD Thesis, University of British Columbia, Canada, 2005, pp.12-35.
- [5] L. Yliniemi, Advanced control of a rotary dryer, PhD thesis, University of Oulu, Finland, 1999, pp.23-29.