

# Eksperimentalno modeliranje parametrov pri sušenju biomase

Tom BAJCAR, Lovrenc NOVAK, Brane ŠIROK, Aleš MALNERŠIČ

**Izveček:** Za uporabo biomase kot obnovljivega vira energije je bil izveden niz meritev sušenja biomase. Biomasa je predstavljala blato živalskega izvora, ki bi lahko bilo v dovolj suhi obliki namenjeno sežigu. Blatu, ki ima v osnovni obliki prevladujoč masni delež vode, je treba s sušenjem odstraniti večji del vode oz. vlage, da je mogoč sežig z dovolj velikim izkoristkom. Namen izvedenih meritev je bil ugotoviti vpliv parametrov sušilnega zraka na masni tok odvedene vlage oz. na čas sušenja. Opravljene so bile v posebni modelni peči, ki je simulirala pogoje v dejanski sušilnici blata. Dobljeni rezultati so preko multiregresijske analize omogočili določitev fenomenološkega zakona oz. razmerja, ki popisuje relacije med posameznimi spremenljivkami oz. veličinami v procesu sušenja. Končni model omogoča napoved časa sušenja ali določitev količine izločene vode iz blata.

**Ključne besede:** biomasa, sušenje, eksperimentalno modeliranje

## 1 Uvod

Izkušnje zadnjih let kažejo, da sta razvoj uporabe obnovljivih virov in izboljšanje učinkovitosti uporabe toplotne energije za družbo izjemno pomembna. Okoljski vplivi in stalno upadanje zalog fosilnih goriv sta le dva od številnih razlogov za uporabo biomase [1]. Izraz biomasa se lahko nanaša na različne rastlinske in živalske produkte oz. odpadke. Zaradi velikega števila živalskih farm predstavljajo gojene živali s svojimi odpadki (blato) pomemben vir biomase.

Biomasa v obliki živalskega blata se lahko uporablja kot vir obnovljive energije za pridobivanje toplote preko termičnih in kemičnih pretvorb. Eden osnovnih načinov pridobivanja energije iz biomase je zgorevanje kot pri fosilnih gorivih (npr. premogu). Za zgorevanje samo in za zagotovitev visokega energetskega izkoristka pri tem mora biti biomasa primerno suha. Blato se

Dr. Tom Bajcar, univ. dipl. inž.,  
dr. Lovrenc Novak, univ. dipl.  
inž., prof. dr. Brane Širok, univ.  
dipl. inž., Aleš Malneršič, univ.  
dipl. inž. Univerza v Ljubljani,  
Fakulteta za strojništvo

običajno suši v sušilnih pečeh, kjer vlaga prehaja iz blata v sušilni zrak. Pri prenosu toplote in snovi med sušilnim zrakom in biomaso (blatom) imajo pomembno vlogo ne le temperatura sušilnega zraka, pač pa tudi njegova vstopna vlažnost in hitrost preprihovanja plasti biomase v sušilniku [2]. Za optimiranje procesa sušenja biomase ali fosilnih goriv (premoga) so bile izdelane številne študije [3, 4], vendar te navadno dajejo presplošne rezultate za učinkovito uporabo v konkretnih sušilnikih.

Namen študije je bil eksperimentalno poiskati zvezo med poglavitnimi parametri, ki se pojavijo pri procesu sušenja živalskega blata. Pri tem je bila upoštevana konstantna debelina plasti blata na vstopu v sušilnik, vsi ostali parametri pa so se spreminjali glede na obratovne razmere sušilnika.

## 2 Eksperimentalni del

V postopku sušenja prehaja voda iz blata v sušilni zrak, ki preprihuje plast blata v sušilni peči. Vodo iz plasti blata tako prevzema sušilni zrak na osnovi zakonov prenosa toplote in snovi. Pri tem mora voda iz blata preiti iz tekoče v plinasto stanje, za kar je potrebna energija, ki jo dovaja zrak preko prenosa toplote.

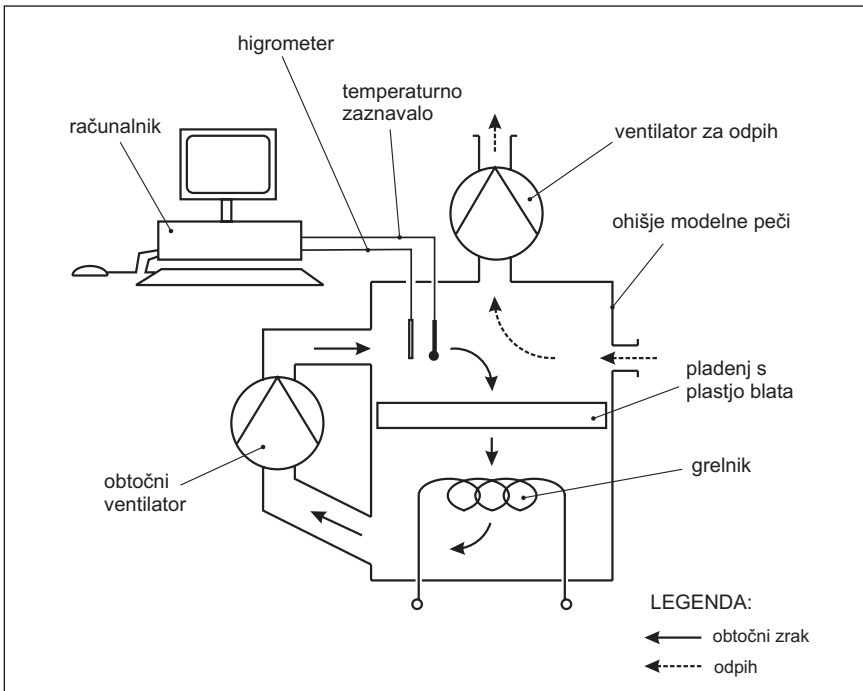
Izločeno vodo pa mora nato prevzeti sušilni zrak, in sicer le do stanja nasičenosti. Bistveni parametri sušilnega zraka pri procesu sušenja so zato njegova temperatura, vlažnost in hitrost preprihovanja [5, 6].

Vsi trije parametri so bili med procesom merjeni v modelni peči, katere shema je prikazana na *sliki 1*.

Blato za sušenje je bilo v obliki granulata z nasipno gostoto pribl. 590 kg/m<sup>3</sup> in je na začetku vseh eksperimentov vsebovalo 70 % vode in 30 % suhe snovi. Pri eni meritvi je bilo blato v obliki valjastih briketov premera 5 mm in dolžine 20 mm.

Blato je bilo med posameznim eksperimentom naloženo v obliki plasti na pladnju s površino 0,25 m<sup>2</sup>, ki je imel perforirano dno in je s tem simuliral sušilno rešetko v sušilnici. Debelina plasti blata na začetku posameznega eksperimenta je znašala 40 mm, kar pomeni, da je bilo pri vsakem eksperimentu na pladnju 10 (nasipnih) litrov blata. Stalna debelina plasti je bila izbrana v skladu z zahtevami dejanske prototipne sušilnice, ki naj bi se razvila na osnovi eksperimentalnih rezultatov.

Obtočni ventilator je ustvarjal pretok zraka preko plasti blata in grelca,



Slika 1. Shema modelne peči za sušenje blata

ki je bil pod pladnjem in je segreval obtočni zrak. Z obtočnim ventilatorjem se je uravnavala hitrost ob-

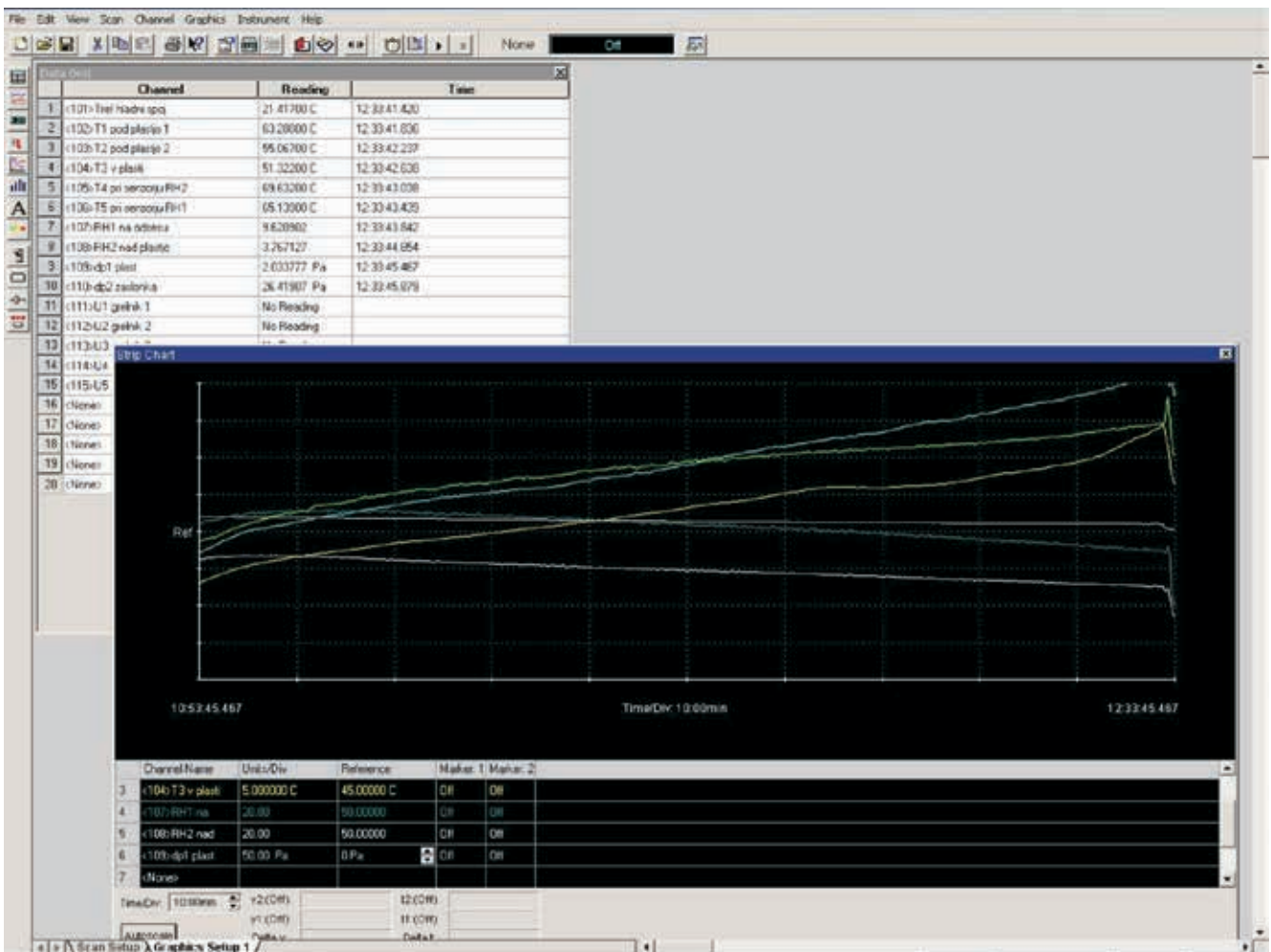
točnega toka oz. sušilnega zraka pri prepihanju plasti blata. Ventilator za odpih je dovajal svež zrak v ob-

točni tok in s tem vplival na njegovo vlažnost in temperaturo. Meritve temperature in relativne vlažnosti sušilnega zraka so bile izvedene pred vstopom v plast blata. Hitrosti sušilnega zraka so bile pomerjene nad plastjo blata tik pred vstopom sušilnega zraka vanjo.

Za meritve osnovnih parametrov sušilnega zraka so bili uporabljeni naslednji merilni instrumenti:

- termoelementi tip K, merilni pogrešek  $\pm 0,5$  K;
- higrometri Honeywell HIH-4000, merilni pogrešek  $\pm 3,5$  % relativne vlažnosti (RH);
- lopatični anemometer ALMEMO 2290-2, merilni pogrešek  $\pm 0,2$  % merjene vrednosti.

Za kontrolo so dodatno potekale tudi meritve relativne vlažnosti zraka pred odpihovnim ventilatorjem ter temperature zraka na odpihu, v sami plasti blata ter med pladnjem in grelnikom. Poleg tega se je me-



Slika 2. Komunikacijsko okno programa za zajemanje podatkov pri procesu sušenja blata

ril tudi padec tlaka pri prepihanju plasti blata in na odpihu za potrebe natančnejšega določanja hitrosti sušilnega zraka skozi plast blata.

Elektromotorja obeh ventilatorjev sta bila krmiljena preko frekvenčnih regulatorjev, s čimer se je na obtočnem ventilatorju preko frekvence oz. vrtilne hitrosti nastavljal želen hitrost sušilnega zraka skozi plast blata, na obtočnem ventilatorju pa temperatura in vlažnost sušilnega zraka pred vstopom v plast blata.

Vrednosti posameznih parametrov so se med eksperimentom zajemale na vsakih 10 sekund s pomočjo sistema za zajemanje podatkov Agilent. Trenutne vrednosti parametrov in njihov časovni potek je bilo mogoče spremljati na osebni računalniku preko komunikacijskega okna v programskem okolju Agilent Benchlink Data Logger, ki je omogočal tudi njihovo shranjevanje za nadaljnjo obdelavo.

Na *sliki 2* je prikazano komunikacijsko okno pri zajemanju vrednosti parametrov za popis sušilnega procesa v modelni peči.

Pred eksperimentom in po njem je bila masa blata določena s pomočjo tehtanja, razlika v masah je predstavljala odvedeno količino vode med sušenjem. Zaradi odvedene vode se med sušenjem manjša tudi prostornina blata. Pri ostanku 10 % vode v končnem produktu sušenja se je nasipna prostornina blata tako pri granulatu kot pri valjastih briketih zmanjšala za približno 60 %.

### ■ 3 Določitev modela sušenja

Na osnovi rezultatov meritev je bil izdelan fenomenološki model sušenja blata, ki povezuje odvisne parametre (čas sušenja za izločitev zelene količine vode iz blata) in neodvisne parametre v procesu (temperaturo sušilnega zraka, njegovo relativno vlažnost in hitrost).

Razpon območij merjenih neodvisnih parametrov in s tem tudi razpon veljavnosti modela je bil med eksperimentom naslednji:

- temperatura sušilnega zraka: 50...80 °C;

- relativna vlažnost sušilnega zraka: 10...40 %;
- hitrost sušilnega zraka: 0,2...1,0 m/s.

Model je bil izdelan z metodami multiregresijske analize [7], in sicer na osnovi potenčnega zakona v brezdimenzijski obliki:

$$\tau = k \cdot \theta^a \cdot RH^b \cdot v^c \cdot \mu^d \quad (1)$$

kjer so:

$$\tau = \frac{t}{t_o} \quad \dots \text{brezdimenzijski čas (} t \text{ je čas sušenja v sekundah, } t_o = 1 \text{ s),}$$

$$\theta = \frac{T}{T_o} \quad \dots \text{brezdimenzijska temperatura sušilnega zraka (} T \text{ je temperatura sušilnega zraka v } ^\circ\text{C, } T_o = 1 ^\circ\text{C),}$$

$$RH \quad \dots \text{relativna vlažnost zraka (} \% \text{),}$$

$$v = \frac{v}{v_o} \quad \dots \text{brezdimenzijska hitrost sušilnega zraka skozi plast blata (} v \text{ je povprečna hitrost zraka skozi površino pladnja v m/s, } v_o = 1 \text{ m/s),}$$

$$\mu = \frac{m_v}{m_b} \quad \dots \text{brezdimenzijska masa vode oz. delež izločene vode (} m_v \text{ je masa izločene vode po času sušenja } t \text{ v kg, } m_b \text{ je masa blata pred sušenjem v kg).}$$

Izraz  $\mu$  ima lahko vrednosti od 0 do največ 0,7; v slednjem primeru bi se izločila vsa voda, ki je v blatu (tj. 70 %  $m_b$ ). Če je zeleno, da je po sušenju v blatu še 10 % vode, je delež izločene vode enak  $\mu = 0,67$ .

$k$  je konstanta modela,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  in  $d$  pa so eksponenti neodvisnih parametrov; ti predstavljajo neznanke modela in jih je treba določiti.

S primerjavo odvisnosti časa sušenja  $t$  od zelene mase izločene vode  $m_v$  se je pokazalo, da je čas  $t$  bližje eksponentni odvisnosti od  $m_v$  kot pa potenčni odvisnosti, kar je deloma nakazano tudi v relevantni literaturi [2, 4]. Zakon po enačbi 1 je bil zato preoblikovan v:

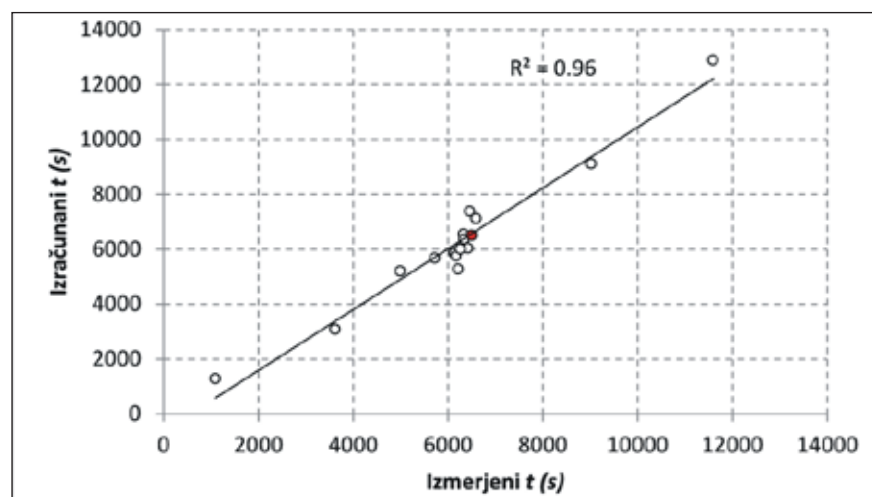
$$\tau = k \cdot \theta^a \cdot RH^b \cdot v^c \cdot e^{d \cdot \mu} \quad (2)$$

Pri oblikovanju zakona so bili upoštevani rezultati vseh meritev, razen tiste, pri kateri so bili namesto granulata uporabljeni briketi. S pomočjo linearizacije zakona po enačbi 2 (logaritmiranje) je bilo potrebno rešiti predoločeni sistem enačb, ki so bile linearne glede na iskane eksponente  $a$ ,  $b$ ,  $c$  in  $d$ . Sistem enačb se je reševal numerično, kar je dalo naslednji model sušenja blata:

$$\tau = 1369 \cdot \theta^{-0,7405} \cdot RH^{0,734} \cdot v^{-1,4366} \cdot e^{4,57 \cdot \mu} \quad (3)$$

Če nas zanima delež izločene vode  $\mu$  pri znanem času sušenja, hitrosti, temperaturi in relativni vlažnosti sušilnega zraka, ima model sušenja obliko:

$$\mu = \frac{\ln\left(\frac{\tau}{1369 \cdot \theta^{-0,7405} \cdot RH^{0,734} \cdot v^{-1,4366}}\right)}{4,57} \quad (4)$$



Slika 3. Primerjava izmerjenih in izračunanih vrednosti časa sušenja  $t$

S pomočjo predstavljenega modela izračunane vrednosti  $t$  oz.  $\tau$  so bile primerjane z izmerjenimi vrednostmi, kot je prikazano na *sliki 3*.

Regresijski koeficient med izmerjenimi in izračunanimi vrednostmi znaša  $r^2 = 0,96$ , kar pomeni zelo dobro ujemanje, ki hkrati potrjuje visoko stopnjo zaupanja za pravilnost predstavljenega modela.

Meritev z briketi ni bila uporabljena pri oblikovanju modela, pač pa je bil čas sušenja pri eksperimentu z briketi izračunan z modelom, dobljenim iz eksperimentov z blatnim granulatom. Rezultat je prikazan z rdečo točko v diagramu na *sliki 3* in je povsem primerljiv s tistimi pri blatnem granulatu, kar pomeni, da predstavljeni model z visoko stopnjo zaupanja velja tudi za uporabljene valjaste brikete.

## ■ 4 Zaključki

Na osnovi eksperimentalnih rezultatov sušenja blata, ki so bili dobljeni na modelni sušilni peči, je bil izdelan fenomenološki model sušenja, ki povezuje oz. napoveduje čas sušenja in količino iz blata izločene vode glede na osnovne parametre sušil-

nega zraka, ki nastopajo v procesu sušenja. Ti parametri so temperatura sušilnega zraka, njegova hitrost in relativna vlažnost. Model omogoča napoved časa sušenja do želene stopnje suhosti blata ali pa napoved izločene količine vode pri izbranem času sušenja. Testna meritev z blatom v obliki valjastih briketov je pokazala, da je zakon oz. potek sušenja pri briketih praktično identičen tistemu pri blatu v obliki granulata. Z eksperimentom dobljene vrednosti časa sušenja so bile s pomočjo statističnih cenilk oz. korelacije primerjane z izračunanimi vrednostmi, dobljenimi preko postavljenega fenomenološkega modela. Visoka vrednost korelacijskega koeficienta potrjuje ustreznost predlaganega modela sušenja.

## ■ 5 Literatura

- [1] Li, H., Chen, Q., Zhang, X., Finney, K. N., Sharifi, V. N., Swithenbank, J., 2012. Evaluation of a biomass drying process using waste heat from process industries: A case study. *Applied Thermal Engineering* 35, str. 71–80.
- [2] Velić, D., Planinić, M., Tomas, S., Bilić, M., 2004. Influence of

- airflow velocity on kinetics of convection apple drying. *Journal of Food Engineering* 64, str. 97–102.
- [3] Zhang, K., You, C., 2013. Numerical simulation of lignite drying in a packed moving bed dryer. *Fuel Processing Technology* 110, str. 122–132.
- [4] Yu, W., Hu, N., Li, P., Hu, Y., Xu, Q., Wang, Q., Yang, J., Yang, G., Yue, Y., 2009. Mathematical Modeling of Drying Characteristics of Sewage Sludge. *Power and Energy Engineering Conference, APPEEC 2009*.
- [5] Lerman, P., Wennberg, O., 2011. Experimental method for designing a biomass bed dryer. *Biomass and bioenergy* 35, str. 31–39.
- [6] Léonard, A., Blacher, S., Marchot, P., Pirard, J.-P., Crine, M., 2005. Convective Drying of Wastewater Sludges: Influence of Air Temperature, Superficial Velocity, and Humidity on the Kinetics. *Drying Technology: An International Journal* 23, str. 1667–1679.
- [7] Seber, G. A. F., Lee, A. J., 2003. *Linear Regression Analysis*, John Wiley & Sons, Hoboken.

## Experimental modelling of parameters in the process of biomass drying

**Abstract:** A study of biomass drying process was carried out as a part of biomass preparation for its further application as a renewable source of energy. Adequately dried biomass in the form of animal excrements (manure) could be used as fuel. Usually, fresh biomass has too high content of moisture to be efficiently burnt, so a major part of the water should be removed by the process of drying. The purpose of conducted measurements was to determine the influence of drying airflow on the mass flow rate of removed water and thus on drying time. Measurements were carried out in a specially constructed model oven, where the conditions of a real drying device were experimentally simulated. Gained results served for the determination of a phenomenological relationship that describes relations between influential parameters during the biomass drying process. The final model enables the prediction of duration of drying process or the percentage of removed water from biomass undergoing drying process.

**Keywords:** biomass; drying; experimental modelling