

MODELOVANJE TOPLOTNE MOĆI MISCANTHUS × GIGANTEUS GREEF ET DEU. UZGAJANOG U SRBIJI U ZAVISNOSTI OD HEMIJSKOG SASTAVA

MODELING OF HEATING VALUE OF MISCANTHUS × GIGANTEUS GREEF ET DEU. CULTIVATED IN SERBIA DEPENDING ON CHEMICAL COMPOSITION

Slobodan CVETKOVIĆ^{*1}, Radmila PIVIĆ², Aleksandra STANOJKOVIĆ-SEBIĆ²,
Jelena MAKSIMOVIĆ², Olga CVETKOVIĆ³, Željko DŽELETOVIĆ⁴, Zoran DINIĆ²

¹Ministarstvo zaštite životne sredine Republike Srbije

²Institut za zemljište, Beograd

³Univerzitet u Beogradu, Institut za hemiju, tehnologiju i metalurgiju, Beograd

⁴Univerzitet u Beogradu, Institut za primenu nuklearne energije, Beograd

Goriva iz biomase ne utiču na ukupnu ravnotežu CO₂ u atmosferi. Imajući ovo na umu, korišćenje biomase kao obnovljivog izvora energije u energetske tranziciji se sve više povećava. Jedan od obećavajućih izvora biomase je i Miscanthus × giganteus Greef et Deu. Znanje o kaloričnoj vrednosti ovog goriva je ključno za projektovanje i rad energetskih sistema koje će koristiti ovu vrstu resursa. U ovom radu modelovanje gornje toplotne moći Miscanthusa × giganteus Greef et Deu. uzgajanog u Srbiji je sprovedeno u zavisnosti od hemijske strukture ovog izvora energije. Rezultati rada su upoređeni i diskutovani sa postojećim modelima za modelovanje toplotne moći biomase. Dobijeni rezultati mogu se koristiti za određivanje termodinamičkih parametara postrojenja koji bi koristili ovu biomasu u procesima sagorevanja, gasifikacije ili torefikacije.

Ključne reči: *miskantus; toplotna moć; modelovanje*

Fuels from biomass do not influence on overall balance of CO₂ in the atmosphere. Keeping this in mind, the use of biomass as a renewable energy source in energy transition is increasing. One of the promising sources of biomass is Miscanthus × giganteus Greef et Deu. Knowledge about heating values of this fuel is crucial for the design and operation of the power plant which will be using this type of fuel. In this work, the modeling of the heating values of Miscanthus × giganteus Greef et Deu. cultivated in Serbia was carried out depending on the chemical structure of this energy source. The results of this study are compared and discussed with existing models for modelling of heating values of biomass. The obtained results can be used to determine the thermodynamic parameters of the plant that would use this type of biomass in combustion, gasification or torrefaction processes.

Key words: *miscanthus; heating value; modeling*

1 UVOD

Suočena sa ograničenim rezervama fosilnih goriva, sve većim emisijama u životnu sredinu, kao i sa sve izraženijim efektima klimatskih promena svetska zajednica se u energetske tranziciji okreće korišćenju obnovljivim izvorima u koje spada i biomasa. Biomasa je od velikog značaja za projekte obnovljive energije širom sveta u cilju ublažavanja efekata klimatskih promena i za smanjenje udela fosilnih goriva u potrošnji energije. Jedan od obećavajućih izvora biomase za korišćenje u energetske svrhe je i miskantus (*Miscanthus × giganteus Greef et deu*), koji predstavlja sterilni hibrid nastao ukrštanjem vrsta *Miscanthus sinensis* i *Miscanthus saccharifloru*. Ovaj lingocelulozni usev odlikuje se jednostavnim uzgojem, niskim sadržajem vlage u vreme žetve i visokim sadržajem celuloze, što ga čini pogodnim za energetske namene. Miskantus se u Republici Srbiji ne gaji na komercijalnoj osnovi, ali se sprovode naučna istraživanja primene ove kulture u energetske i druge svrhe. Na slici 1. prikazana su ogledna polja u Republici Srbiji gde se vrši uzgoj ove kulture

* Corresponding author: slobodancvetkovic@yahoo.com

Jedna od osnovnih osobina biomase za korišćenje u energetske svrhe je i poznavanje njene toplotne moći. Ovo je i jedna od termodinamičkih veličina koja je od ključne važnosti za projektovanje bioenergetskih sistema.

U naučnoj literaturi predložene su različite empirijske i polu-empirijske korelacije za procenu gornje toplotne moći (HHV) na osnovu elementarne kompozicije (C, H, O, N, S, itd.), analize volatilnih materija, fiksnog ugljenika i pepela [2-8] ili fizičko-hemijske analize (celuloza, lignoceluloza i lignin) [9]. Za predikciju HHV biomase, prve jednačine razvio je Tillman 1978. godine [10]. Primetio je da je toplotna moć u tesnoj korelaciji sa sadržajem ugljenika. Njegov rad bio je ograničen na drvo kao izvor biomase. Tokom 1980. i 1985. godine, Jenkins [11,12] je razvio niz formula za predikciju gornje toplotne moći koje se mogu primeniti za biomasu uopšteno, kao i za i pojedine tipove biomase, kao što su šumski ostaci, energetske kulture i drvo.

Garcia et al. [13] je istraživao krajnji sastav 100 uzoraka biomase, uključujući čvrsta komercijalna goriva, ostatke iz prehrambene industrije, drvene ostatke, energetske useve i žitarice u cilju predviđanja HHV biomase. U novije vreme koriste se i modeli neuronskih mreža [14,15] za predikciju gornje toplotne moći biomase.

Imajući u vidu nedostatak ovakvih istraživanja u našoj naučnoj literaturi, cilj ovog rada bio je razvoj empirijskog modela za predviđanje gornje toplotne moći miskantusa uzgajanog u Srbiji u zavisnosti od hemijske strukture. U cilju verifikacije modela rezultati istraživanja upoređeni su sa postojećim modelima za predikciju gornje toplotne moći biomase u zavisnosti od hemijskog sastava. Dobijeni rezultati mogu se koristiti za određivanje termodinamičkih parametara postrojenja koji bi koristili ovu vrstu biomase u procesima sagorevanja, gasifikacije ili torefikacije ili proizvodnje drugih goriva.

2 MATERIJAL I METODE

2.1 Materijal

U ovom istraživanju korišćeni su uzorci (stabla) miskantusa sa oglednog polja Instituta za primenu nuklearne energije (INEP), Zemun, uzgajanog na zemljištu tipa černozem. Prikupljanje reprezentativnih uzoraka biljnog materijala za ovo istraživanje izvršeno je u dva žetvena roka: u jesen (početkom oktobra) i krajem zime (krajem februara). Stabla miskantusa su osušena na vazduhu, usitnjena i pripremljena za hemijsku analizu. Za hemijsku analizu pripremljeno je 10 uzoraka.

2.2 Metod

Svim uzorcima je određena vlaga sušenjem na 105 °C (SRPS EN 14774-1:2011) u sušnici sa azotom. Količina vodonika je određena na aparatu Vario EL III CHNS/O Elemental Analyzer systeme GmbH. Količine ugljenika i azota određene su pomoću uređaja Vario EL III CNS Elemental Analyzer systeme GmbH. Toplotna moć uzoraka determinisana je po modifikovanoj metodi, prema standardu SRPS EN 14918:2011, na IKA - calorimeter adiabatic C400. Udeo ispitivanih elemenata izražen je u odnosu na suhu materiju ispitivanog uzorka [16].

2.3 Razvoj modela

U cilju modelovanja zavisnosti toplotne moći od određenog hemijskog sastava miskantusa uzgajanog u Srbiji, korišćen je metod višestruke linearne regresije koji je prikazan jednačinom:

$$HHV = b_0 + b_1C + b_2H + b_3N \quad (1)$$

gde je *HHV* gornja toplotna moć dobijena modelom; b_0 , b_1 , b_2 , b_3 , su regresioni koeficijenti; C, H, N su udeli ugljenika, vodonika i azota u suvoj materiji uzorka (%), respektivno.

Dobijeni model upoređen je sa modelima datim u tabeli 1.

Tabela 1. Postojeći modeli za predikciju gornje toplotne moći biomase

Broj modela	Model	Referenca	Godina
Model 1.	$HHV = -3.393 + 0.507C - 0.341H + 0.067N$ (3)	Ferre et al. [17,18]	2011.
Model 2.	$HHV = 0.2037C + 0.9115H + 2.7329$ (4)	Boumancharat al.[19]	2019.
Model 3.	$HHV = 0.2949C + 0.8250H$ (5)	Yin, C. [20]	2011.

Kao parametar za poređenje modela u ovom istraživanju korišćena je aposlutna greška modela:

$$AG = |((HHV - HHV_m) / HHV) * 100| \quad (6)$$

gde je AG je aposlutna vrednost greške modela; HHV je gornja toplotna moć iz eksperimenta, dok je HHV_m gornja toplotna moć računata iz modela.

3 REZULTATI I DISKUSIJA

Rezultati hemijskog ispitivanja uzoraka miskantusa uzgajanog u Srbiji, prikazani su u tabeli 2.

Tabela 2. Rezultati hemijskog ispitivanja uzoraka *Miscanthus × giganteus* Greef et Deu. [ad.16]

Broj uzorka	Vlaga (%)	C (%)	H(%)	N(%)	HHV određena eksperimentom (MJ/kg)
1.	3.69	46.83	6.13	0.34	16.3
2.	4.14	47.47	6.18	0.07	16.7
3.	4.20	45.84	6.08	0.54	16.2
4.	4.10	47.78	5.86	0.34	16.2
5.	3.84	47.42	6.11	0.25	16.5
6.	5.42	47.77	6.13	0.47	16.2
7.	3.88	47.73	6.11	0.45	16.5
8.	5.16	49.36	6.54	0.11	17.1
9.	3.94	46.53	6.11	0.25	17.2
10.	5.55	48.6	5.94	0.11	16.6

Statistička analiza rezultata hemijskog ispitivanja uzoraka miskantusa metodom višestruke linearne regresije data je u tabeli 3.

Na osnovu tabele 3. i vrednosti regresionih koeficijenata b_0, b_1, b_2, b_3 , može se izvesti konačan model zavisnosti gornje toplotne moći od udela ugljenika, vodonika i azota u ovom radu, prikazan formulom:

$$HHV = 15.616 - 0.09168C + 0.9346H - 1.4421N \quad (7)$$

Dobijeni model u ovom istraživanju upoređen je sa modelima datim u tabeli 1. Vrednosti aposlutne greške modela kao parametra za poređenje modela u ovom istraživanju prikazane su u tabeli 4.

Tabela 3. Statistička analiza rezultata hemijskog ispitivanja uzoraka miskantusa metodom višestruke linearne regresije

Koeficijent determinacije	0.622219838		
Korigovani koeficijent determinacije	0.433329758		
Standardna greška	0.273151207		
	Koeficijenti	Standardna greška	<i>P</i> -vrednost
b_0	15.61600986	5.806752877	0.036087037
b_1	-0.09168319	0.115373287	0.45708063
b_2	0.934605904	0.555302833	0.143352772
b_3	-1.44218345	0.665338925	0.073305008

Tabela 4. Apsolutna greška (AG) posmatranih modela

Redni broj uzorka	AG u modelu 1. (%)	AG u modelu 2. (%)	AG u modelu 3. (%)	AG u modelu iz ovog radu (%)
1.	12.16110429	9.568503067	15.75102454	1.603739877
2.	8.171257485	6.777898204	12.58983832	1.064579042
3.	9.94308642	8.718691358	14.40874074	0.326124691
4.	16.39493827	9.920222222	16.81988889	0.258558025
5.	12.61927273	8.85829697	15.30247273	0.535741818
6.	15.84907407	11.42681481	18.17668519	0.680618519
7.	13.6530303	9.241006061	15.85652727	1.090452121
8.	13.50730994	9.641766082	16.67698246	0.203981871
9.	5.4125	3.373988372	9.083994186	3.35299186
10.	15.83753012	8.717048193	15.85927711	0.157728313
<i>Srednja vrednost AG u modelu (%)</i>	12.35491036	8.624423534	15.05254314	0.9216048

Dobijeni podaci ukazuju da analizirani modeli imaju srednju apsolutnu grešku u dijapazonu od 0.92% do 15.05% u odnosu na eksperimentalno određene vrednosti HHV miskantusa. Predloženi model u ovom istraživanju pokazuje najmanju apsolutnu grešku u odnosu na analizirane modele objavljene u skorašnjoj naučnoj literaturi za predikciju gornje toplotne moći biomase.

Imajući u vidu predloženi model prikazan jednačinom (7), vrednost regresionog koeficijenta b_3 i udeo azota u hemijskoj strukturi miskantusa (tabela 2.), može se zaključiti da udeo azota ima najmanji uticaj na vrednost toplotne moći miskantusa, u odnosu na udeo ugljenika i vodonika. Predložena korelacija, $HHV = 15.616 - 0.09168C + 0.9346H - 1.4421N$, može se jednostavno primeniti u energetskej analizi bioenergetskih sistema koji bi koristili miskantus, jer zahteva samo poznavanje ugljenika, vodonika i azota u hemijskoj strukturi ispitivanih uzoraka.

4 ZAKLJUČAK

U ovom radu razvijena je empirijska korelacija za predikciju gornje toplotne moći miskantusa uzgajanog u Srbiji u zavisnosti od hemijskog sastava prikazana jednačinom (7). Ova korelacija je upoređena sa modelima objavljenim u skorašnjoj naučnoj literaturi i pokazano je da se ovom predikcijom gornje toplotne moći miskantusa uzgajanog u Srbiji, čini srednja apsolutna greška u odnosu na eksperimentalno određene vrednosti gornje toplotne moći od 0.92%. Rezultati dobijeni ovim istraživanjem mogu se koristiti za određivanje termodinamičkih parametara postrojenja koji bi koristili ovu vrstu biomase u energetske procesima (sagorevanja, gasifikacije ili torefikacije), kao i za proizvodnju drugih biogoriva ili hemikalija iz miskantusa.

4.1 Zahvalnica

Ovaj rad nastao je u okviru projekta Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja „Proučavanje uticaja kvaliteta zemljišta i voda na efikasniju proizvodnju poljoprivrednih kultura i očuvanje životne sredine" TP 37009.

5 LITERATURA

- [1] Dželetović, Ž., N Mihailović, I., Živanović, Prospects of using bioenergy crop *Miscanthus x giganteus* in Serbia, *Materials and processes for energy: communicating current research and technological developments*, 2013, 360-370.
- [2] Cordero T., F.Marquez, J.,Rodriguez-Mirasol,J. Rodriguez, Predicting heating values of lignocellulosics and carbonaceous materials from proximate analysis, 2001, *Fuel*, 80,1567–1571.
- [3] Hosokai S., K.Matsuoka, K.Kuramoto, Y.Suzuki, Modification of Dulong's formula to estimate heating value of gas, liquid and solid fuels, 2016, *Fuel Process Techno*, 1 152,399–405.
- [4] Kathiravale S., M.Noor, M.Yunus, K.Sopian, A.H Samsuddin, R.A.Rahman, Modeling the heating value of municipal solid waste, 2003, *Fuel*, 82,1119–1125.
- [5] Kricka T., N., Voca, T.B.Savic,N. Bilandzija, S.Sito, Higher heating values estimation of horticultural biomass from their proximate and ultimate analyses data, 2010, *J Food Agric Environ* 8,767–771.
- [6] Setyawati W., E. Damanhuri, P.Lestari, K.Dewi, Correlation equation to predict HHVof tropical peat based on its ultimate analyses,2016, *Procedia Eng*, 125,298–303.
- [7] Sheng C, T.Ā.,Azevedo, Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data, *Biomass Bioenergy*, 2005,28,499–507.
- [8] Thipkhunthod P, V., Meeyoo, P., Rangsunvigitt, B., Kitiyanan, K., Siemanond,T. Rirksoomboon, Predicting the heating value of sewage sludges in Thailand from proximate and ultimate analyses, *Fuel*, 2005, 84:849–857.
- [9] Álvarez A., C.Pizarro, R.García,J.L Bueno, Spanish biofuels heating value estimation based on structural analysis, 2015, *Ind Crop Prod*,77,983–991.
- [10] Tillman D.A.,Wood as an energy resource, Academic press.Inc, Cambridge,1978.
- [11] Jenkins B., Dwindraft gasification characteristics of mayor California residue derived fuels, PhD Thesis, Univ California, Davis, 1980.
- [12] Jenkins B., J. Ebeling, Correlation of physical and chemical properties of terrestrial biomass with conversion: symposium energy from biomass and waste, IX IGT,371,1985.
- [13] García R,C. Pizarro, A.G. Lavín, J.L.Bueno, Spanish biofuels heating value estimation. Part I: ultimate analysis dat., *Fuel*, 2014, 117, 1130–1138.
- [14] Estiati I., F.B.,Freire, J.T. Freire, R.,Aguado, M.Olazar, Fitting performance of artificial neural networks and empirical correlations to estimate higher heating values of biomass, 2016, *Fuel* 180,377–383.
- [15] Uzun H, Z.Yıldız, J.L.Goldfarb, S.Ceylan, Improved prediction of higher heatingv alue of biomass using an artificial neural network model based on proximate analysis. *Bioresour Technol.*, 2017,234,122–130.

- [16] Cvetković O., R., Pivić, Z., Dinić, J., Maksimović, S., Trifunović, Ž., Dželetović, Hemijska ispitivanja miskantusa gajenog u Srbiji- Potencijalni obnovljiv izvor energije, Zaštita materijala, 2016,57, 3,412-417.
- [17] Callejon-Ferre, A. J; B.Vela´ zquez-Martí, J.A. Lo´pez-Martínez, F.Manzano-Agügliaro, Greenhouse crop residues: energy potential and models for the prediction of their higher heating value, Renewable Sustainable Energy Rev, 2011, 15, 948–955.
- [18] Callejon-Ferre, A. J; B.,Vela´ zquez-Martí, J.A. Lo´pez-Martínez, F.,Manzano-Agügliaro, Erratum to: Greenhouse crop residues: energy potential and models for the prediction of their higher heating value.[Renew Sust. Energy Rev, 2011,15,948–955.], Renewable Sustainable Energy Rev., 2011, 15, 5224.
- [19] Boumanchar I., K. Charafeddine, Y. Chhiti, Biomass higher heating value prediction from ultimate analysis using multiple regression and genetic programming, Biomass Conversion Bio-refinery, 2019, 9,499–509
- [20] Yin C.Y., Prediction of higher heating values of biomass from proximate and ultimate analyses, Fuel, 2011, 90,1128–1132.

Slike



Slika1. Ogljedna polja za uzgoj *Miscanthus × giganteus* Greef et Deu. u Republici Srbiji [1]