

Bibliid: 0350-2953 (2008) 34: 3-4, p. 220- 226
UDK: 697.442:[662.636+633.11(497.113 Kuzmin)]

Originalni naučni rad
Original scientific paper

**UTICAJ RECIRKULACIJE VAZDUHA NA ENERGETSKU EFIKASNOST
KOTLA ZA SAGOREVANJE BALIRANE BIOMASE 120 KW I PRIKAZ
MATEMATIČKIH MODELA**

**THE EFFECT OF AIR RECIRCULATION ON ENERGETIC EFFICIENCY
TEST RESULTS FOR A 120 KW BALED BIOMASS-BOILER WITH
REVIEW OF MATHEMATICAL MODELS**

Dedović N*, Igić S**, Janić T*, Brkić M.*

REZIME

U radu su prikazani rezultati ispitivanja toplovodnog kotla za sagorevanje balirane biomase, smeštenom na poljoprivrednom kombinatu "Mitrosrem" u Sremskoj Mitrovici, radna jedinica Kuzmin. Deklarisana snaga kotla je 120 kW. Obezbeđeno je kontinuirano praćenje uticaja količine vazduha koji se dovodi u ložište kotlovnog postrojenja na sagorevanje. Navedeni su parametri koji su mereni prilikom procesa sagorevanja. Srednja toplotna snaga kotla kreće se od 64,16 kW do 90,89 kW, ako nema recirkulacije vazduha u kotao. Srednja toplotna snaga kotla kreće se od 43,00 kW do 88,12 kW ako se 16,5% izduvnih gasova vrati u kotao. Stepenn korisnosti kotla je u intervalu od 36,57% do 60,01% ako nema recirkulacije, odnosno od 40,60% do 66,29% ako je recirkulacija 16,5%. Povećanjem protoka vazduha kroz ložište kotla povećava se srednja toplotna snaga kotla, dok se vreme sagorevanja bale smanjuje. Ukupno vreme sagorevanja kreće se od 592 s do 1176 s (698 s do 1485 s, sa recirkulacijom 16,5%). Prikazani su matematički modeli zavisnosti toplotne snage kotla i stepena iskorišćenja u funkciji od vremena ako je recirkulacija 0%.

Ključne reči: pšenična slama, energetska efikasnost, kotao, sagorevanje, recirkulacija

SUMMARY

The paper reviews test results for a biomass-fired hot water boiler, located at "Mitrosrem" agricultural company from Sremska Mitrovica, work unit Kuzmin. Nominal boiler power is 120 KW. The impact of the quantity of inlet air fed to the boiler firebox was continuously monitored. Parameters measured during burning are listed in the paper. Mean boiler thermal power rate ranges between 64,16 kW to 90,89 kW. Boiler efficiency rate ranges between 36,57% to 60,01%. If we use air recirculation, then we get mean boiler thermal power rate ranges between 43,00 kW to 88,12 kW and boiler efficiency rate ranges between 40,60% to 66,29%. Increasing the air throughput in the firebox, increases the thermal capacity of the boiler, while the bale incineration time is reduced. Total incineration time ranges between 592 s to 1176 s (698 s to 1485 s, with air recirculation 16,5%). Presented are mathematical models

* Mr Nebojša Dedović, asistent, dr Todor Janić, vanredni profesor, dr Miladin Brkić, redovni profesor, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad.

** Mr Saša IGIĆ, JP "Srbijagas", Novi Sad.

of correlation between boiler thermal power and boiler efficiency rate as the function of time.

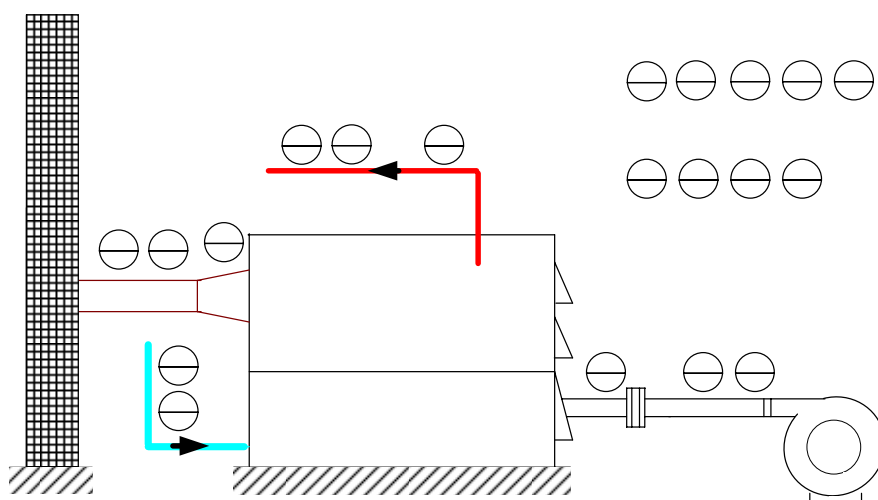
Key words: wheat straw, emission, mathematical model, boiler, incineration, recirculation

UVOD

U Srbiji sve više postoji potreba za korišćenjem obnovljivih izvora energije, kao što su biomasa, biogas, energija vetra, Sunca, hidroenergija i geotermalna energija, jer cena fosilnih goriva raste istim tempom kojim se rezerve ovih goriva smanjuju, ako ne i brže od toga. Takođe, neophodno je usklađivanje naše zemlje sa smericama Evropske unije, radi ubrzanja korišćenja obnovljivih izvora energije, smanjenja zagađenja životne sredine i stvaranja efekta staklene bašte.

MATERIJAL I METOD RADA

U radu je opisano kotlovsko postrojenje za sagorevanje pšenične slame. Kotlovsko postrojenje je locirano u poljoprivrednom kombinatu "Mitrosrem" u Sremskoj Mitrovici, radna jedinica Kuzmin. Osnovu postrojenja čini toplovodni kotao novosadskog proizvođača "Eko produkt". Toplovodni kotao ima deklarisanu snagu od 120 kW. Loženje kotla je ručno. Posmatrano kotlovsko postrojenje služi za zagrevanje poslovne zgrade poljoprivrednog kombinata "Mitrosrem". Grejna tela su člankasti liveni aluminijumski radijatori. Kotlovsko postrojenje sastoji se od nekoliko zasebnih, ali nerazdvojenih funkcionalnih celina, koje sadrže neophodnu mernu i regulacionu opremu. Funkcionalne celine od kojih se sastoji ispitivano postrojenje su sledeće: dovod, merenje i regulisanje količine svežeg vazduha koji se dovodi u ložište kotlovskog postrojenja, sagorevanje biogoriva i odvođenje proizvedene količine toplote, odvođenje produkata sagorevanja, merno-regulaciona oprema.



Sl. 1 Šema mernih mesta

Fig. 1 Layout of measuring points

Za materijal u radu odabrane su prizmatične bale pšenične slame. Izbor pšenične slame, kao biogoriva, je odabran pošto se ona najčešće koristi u procesu sagorevanja balirane biomase. Osim toga, pšenica je zastupljena u setvenim strukturama ravničarskih regiona naše zemlje sa oko 25%.

Tab. 1 Pregled merenja

Tab. 1 Review of measurement

Broj merenja, No. of measurement	Oznaka merenja, Measurem ent designation	Merna veličina, Measurement value	Oznaka u radu, Paper designatio n	Dimenzija, Dimension	Naziv instrumenta, Type of instrument	Opseg merenja, Measurem ent range	Tačnost merenja, Measurement accuracy
1.	DB	Dimenzije bala slame, Straw bale dimension	axbxc	m	Merna traka, Strain gauge	-	-
2.	MB	Masa bale slame, Straw bale mass	m	kg	Vaga „Labela-preciz“, Scale „Labela-preciz“	0-50 kg	±20 g
3.	SV	Sadržaj vlage u slami, Straw humidity contents	w	%	Laboratorijska sušnica i vaga „Sartorius“, Laboratory dryer and scale „Sartorius“	0-120 g	±0,1 g
4.	TS	Vreme sagorevanja bale slame, Incineration time for straw bale	τ	min	Ručna štoperica, Manual stopwatch	-	-
5.	TO	Temperatura okoline, Environment temperature	T_o	°C	Republički hidrometeorološki zavod, Republic hydrometeorological service of Serbia	-	0,1 °C
6.	TOK	Temperatura okoline, Environment temperature	T_{ok}	°C	Temperaturna sonda tip Pt-100, Temperature probe type Pt-100	0-400° C	0,1 °C
7.	VV	Vlažnost okolnog vazduha, Environment humidity	v_i	%	Republički hidrometeorološki zavod, Republic hydrometeorological service of Serbia	-	-
8.	PO	Pritisak okolnog vazduha, Environment air-pressure	P_o	mbar	Republički hidrometeorološki zavod, Republic hydrometeorological service of Serbia	-	0,1 mbar
9.	BV	Brzina vetra, Wind speed	v_v	m/s	Republički hidrometeorološki zavod, Republic hydrometeorological service of Serbia	-	-
10.	PUV	Pritisak ulazne vode u kotao, Boiler inlet water pressure	P_{uv}	mbar	Transmitter pritiska tip SITRANS DSIII, Pressure transmitter type SITRANS DSIII	0-10 bar	0,1 mbar
11.	TUV	Temperatura ulazne vode u kotao, Boiler inlet water temperature	T_{uv}	°C	Temperaturna sonda tip Pt-100, Temperature probe type Pt-100	0-400° C	0,1 °C
12.	TIV	Temperatura izlazne vode iz kotla, Boiler outlet water pressure	T_{iv}	°C	Temperaturna sonda tip Pt-100, Temperature probe type Pt-100	0-4000C	0,1 0C
13.	PIV	Pritisak izlazne vode iz kotla, Boiler outlet water temperature	P_{iv}	mbar	Transmitter pritiska tip SITRANS DSIII, Pressure transmitter type SITRANS DSIII	0-10 bar	0,1 mbar
14.	PV	Protok vode kroz kotao, Boiler water throughput	V_{vo}	m ³ /h	Ultrazvučni merač protoka Yokogawa tip US300PM, Ultrasound throughput probe Yokogawa type US300PM		
15.	PRV	Protok vazduha na ulasku u ložište kotla, Firebox inlet air throughput	V_v	m ³ /h	Standardna prigušnica i transmitter diferencijalnog pritiska tip SITRANS DSIII, Standard muffler and transmitter of differential pressure type SITRANS DSIII	0-1600 mbar	0,1 mbar
16.	PVL	Pritisak vazduha na ulasku u ložište kotla, Firebox inlet air pressure	P_{vl}	mbar	Transmitter diferencijalnog pritiska tip SITRANS DSIII, Transmitter of differential pressure type SITRANS DSIII	0-1600 mbar	0,1 mbar
17.	TVL	Temperatura vazduha na ulazu u ložište kotla, Firebox inlet air temperature	t_{vl}	°C	Temperaturna sonda tip Pt-100, Temperature probe type Pt-100	0-4000C	0,1 0C
18.	TDG	Temperatura dimnih gasova u dimnjači, Flue gas temperature	T_{dg}	°C	Temperaturna sonda tip K (Ni-CrNi), Temperature probe type K (Ni-CrNi)	0-1200° C	0,1 °C
19.	KVV	Koeficijent viška vazduha, Air excess rate	λ		Univerzalna lambda sonda sa grejačem Bosch LS 01, Universal lambd probe with heater Bosch LS 01	0-1,1V	0,01V
20.	ADG	Analiza produkata sagorevanja, Flue gases analysis			Analizator dimnih gasova TESTO tip 350 XL, Flue gas analyzer TESTO type 350 XL	-	-

Pšenična slama koja je korišćena u eksperimentalnom delu ovog rada prikupljena je na zemljištu poljoprivrednog kombinata "Mitrosrem" u Sremskoj Mitrovici, radnoj jedinici Kuzmin. Prikupljanje bala slame obavilo se neposredno posle žetve. Slama je balirana presom za baliranje dok je skladištenje balirane slame obavljeno u kamare u okviru ekonomskih dvorišta navedene radne jedinice. U laboratorijskim uslovima određena je srednja vrednost donje toplotne moći pšenične slame u vrednosti od 13,479 MJ/kg, pri sadržaju vlage od 8,2%. Donja toplotna moć pšenične slame svedena na suhu masu iznosila je 14,901 MJ/kg. U laboratorijskim uslovima određena je i srednja vrednost količine pepela pšenične slame od 6,52% (Igić i sar, 2006). Obavljen je izbor bala ujednačenih dimenzija i masa. Nakon njihovog odabira sprovedeno je i njihovo skladištenje u prostorijama radne jedinice Kuzmin. Odabrano je ukupno 350 bala pšenične slame. Bale su bile smeštene u skladišnoj prostoriji koja se nalazi u sastavu kotlarnice tako da nisu bile izložene novim klimatskim uticajima, što im je očuvalo kvalitet i sprečilo veće narušavanje njihovog sastava, izgleda i sabijenosti. Poprečni presek bala pšenične slame bio je u proseku 0,35 m x 0,5 m, dok je njihova dužina iznosila oko 0,75 m. Sabijenost bala pšenične slame bila je ujednačena. U radu su prikazani različiti režimi rada kotla (varirana je količina vazduha koji je dovoden u kotao). Ukupno je posmatran uticaj pet režima (150, 220, 290, 360 i 430 m³/h) rada kotla na sam proces sagorevanja. Količina vazduha koja se dovodi u ložište kotla u procesu sagorevanja utiče na efikasnost rada kotlovskih postrojenja, koja kao gorivo koriste biomasu. Neposredni cilj ovog istraživanja je definisanje korelacionih jednačina koje će predstavljati matematički model zavisnosti toplotne snage i stepena korisnosti kotla od vremena sagorevanja bale kao i ispitati uticaj recirkulacije vazduha u kotao. Metode merenja su u skladu sa standardom JUS M.E2.203 i DIN 4702 kod definisanja termičke snage kotla. Toplotna snaga kotla određena je direktnom metodom (Brkić, Živanović, 2006), to jest, merenjem zapreminskog protoka vode i merenjem temperature vode na ulazu i izlazu iz kotla. Stepem korisnosti kotla određen je odnosom između dobijene i uložene toplotne snage kotla.

REZULTATI ISTRAŽIVANJA I DISKUSIJA

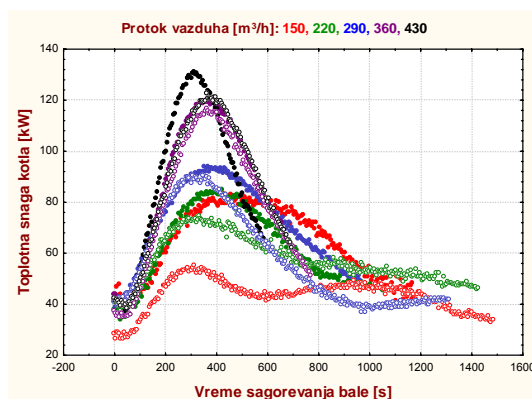
Ispitivanja su obavljena tokom marta i aprila 2006. godine. Merene veličine automatski su beležene u kontroleru svakih 5 sekundi, tako da je obezbeđeno kontinuirano praćenje procesa sagorevanja. U svakom režimu obavljeno je po pet merenja. U radu su prikazane srednje vrednosti izmerenih parametara sagorevanja (toplotna snaga i stepen korisnosti kotla), pri svakom režimu rada sa recirkulacijom od 0% (prva kolona u režimu) i 16,5% (druga kolona u režimu).

U tabeli 2 vidimo da se recirkulacijom vazduha u kotao znatno povećalo vreme sagorevanja bale i to u svim režimima. To znači da će se za isto vreme potrošiti manje pšeničnih bala. Međutim, ako se pogleda srednja toplotna snaga kotla pri recirkulaciji vazduha, ona jeste manja, ali je u režimima 360 i 430 m³/h približno ista kao pri režimu kada nema recirkulacije. Važna činjenica je da je stepen korisnosti kotla veći u svim režimima (osim u 150 režimu), pri recirkulaciji 16,5%.

Tab. 2 Srednje vrednosti

Tab. 2 Mean values

Režim rada kotla, Boiler operating regime	150 m ³ /h		220 m ³ /h		290 m ³ /h		360 m ³ /h		430 m ³ /h	
Ukupno vreme sagorevanja bale [s], Total bale incineration time [s]	1176	1485	1056	1427	966	1312	657	772	592	698
Srednja toplotna snaga kotla [kW], Mean boiler thermal power [kW]	64,16	43,00	63,47	57,86	71,75	57,88	88,21	81,44	90,89	88,12
Maksimalna toplotna snaga kotla [kW], Maximum boiler thermal power [kW]	83,90	55,21	85,86	74,61	94,07	90,61	119,95	116,56	130,94	122,44
Srednji stepen korisnosti kotla [%], Mean boiler efficiency rate [%]	60,01	57,29	57,94	66,08	56,43	52,83	39,45	45,50	36,57	40,60
Maksimalni stepen korisnosti kotla [%], Maximum boiler efficiency rate [%]	75,81	71,81	75,70	78,53	70,64	71,78	57,79	64,62	54,90	59,20



Sl. 2 Zavisnost srednje vrednosti snage kotla i vremena sagorevanja bale za različite režime rada

Fig. 2 Layout of measuring points

Na slici 2 s osenčenim krugom označeni su rezultati dobijeni ako nema recirkulacije vazduha, dok su sa praznim krugom označeni rezultati dobijeni ako je recirkulacija vazduha 16,5%. Na osnovu slike 2, može se zaključiti da grafik snage kotla ima oblik sinusne funkcije. Koristeći metod višestruke nelinearne regresije i metod najmanjih kvadrata za određivanje regresionih koeficijenata dolazi se do modela zavisnosti srednje vrednosti toplotne snage kotla i vremena sagorevanja bale za različite režime rada, ako nema recirkulacije vazduha u kotao. Provera prilagođenosti matematičkog modela izmerenim podacima obavlja se na osnovu sledećih testova: t - testom se ispituje značajnost regresionih koeficijenata, F - testom se utvrđuje značajnost uticaja posmatranih faktora na zavisnu promenljivu, odnosno, da li je postavljeni model značajan, stepen determinisanosti zavisne promenljive je iskazan koeficijentom determinacije R² odabranih nezavisnih promenljivih i on opisuje prilagođenost krive izmerenim podacima.

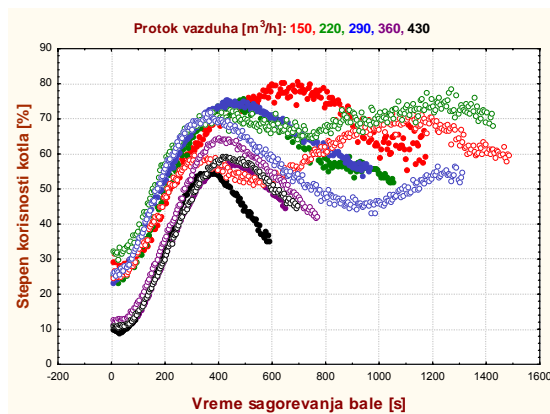
Matematički model zavisnosti srednje vrednosti toplotne snage kotla od vremena sagorevanja bale za različite režime rada [4] (recirkulacija = 0%) dat je jednačinom (1):

$$v_2 = 56,5549 + 0,1614 \cdot v_3 \cdot \sin(3,7985 \cdot (v_1 - 110,4727) / v_4) \quad (1)$$

gde je: v_1 - vreme sagoravanja bale, v_2 - toplotna snaga kotla, v_3 - protok vazduha, v_4 - ukupno vreme sagorevanja bale.

Za model (1) dobijen je koeficijent determinacije $R^2 = 83,11\%$ za nivo poverenja 95% ($\alpha=0,05$), dok je $F=1.149.750$, čime je pokazana visoka značajnost matematičkog modela. Takođe, dobijena je i visoka značajnost regresionih koeficijenta korišćenjem t-testa.

Važan parametar pri ispitivanju kotla je i stepen efikasnosti (korisnosti) kotla. Slika 3 predstavlja zavisnost stepena korisnosti kotla od vremena sagorevanja bale za različite režime rada [4].



Sl. 3 Zavisnost stepena korisnosti kotla i vremena sagorevanja bale za različite režime rada

Fig. 3 Correlation between boiler effic. rate and bale incineration time for various operating regimes

Na slici 3 s osenčenim krugom označeni su rezultati dobijeni ako nema recirkulacije vazduha, dok su praznim krugom označeni rezultati dobijeni ako je recirkulacija vazduha 16,5%. Dobijeni matematički model zavisnosti stepena korisnosti kotla od vremena sagorevanja bale za različite režime rada (recirkulacija = 0%) dat je jednačinom (2):

$$v_2 = 121,0110 \cdot v_4 \cdot (49,6581 + 0,1614 \cdot v_3 \cdot \sin(3,7985 \cdot (v_1 - 110,4727) / v_4)) / v_5 \quad (2)$$

gde je: v_1 - vreme sagoravanja bale, v_2 - stepen korisnosti kotla, v_3 - protok vazduha, v_4 - ukupno vreme sagorevanja bale, v_5 - srednja vrednost mase bala za svaki režim rada kotla. Za model (2) dobijen je koeficijent determinacije $R^2 = 82,36\%$ za nivo poverenja 95% ($\alpha=0,05$), dok je $F=24231,75$, čime je pokazana visoka značajnost matematičkog modela. Takođe, dobijena je i visoka značajnost regresionih koeficijenta korišćenjem t-testa.

ZAKLJUČAK

Toplovodni kotao na biomasu zadovoljava deklarisanu snagu kotla u režimima protoka svežeg vazduha od 360 m³/h i 430 m³/h. Srednja toplotna snaga kotla kreće se od 64,16 kW do 90,89 kW ako nema recirkulacije vazduha u kotao. Srednja toplotna snaga kotla kreće se od

43,00 kW do 88,12 kW, ako se 16,5% izduvnih gasova vrati u kotao . Stepen korisnosti kotla kreće se u intervalu od 36,57% do 60,01% ako nema recirkulacije, odnosno od 40,60 do 66,29% ako je recirkulacija 16,5%. Povećanjem protoka vazduha kroz ložište kotla povećava se srednja toplotna snaga kotla, dok se vreme sagorevanja bale smanjuje. Ukupno vreme sagorevanja kreće se u intervalu od 592 s do 1.176 s (698 s do 1.485 s, sa recirkulacijom 16,5%). Dobijeni rezultati ukazuju na to da je optimalni režim rada kotla pri protoku vazduha kroz ložište u intervalu od 290 m³/h do 360 m³/h i da recirkulacija vazduha poboljšava fizičke osobine kotla. Prikazani matematički modeli mogu da se smatraju verodostojnim za dato postrojenje i uslove pod kojima su sprovedeni eksperimenti. Primena matematičkih modela u praksi može biti višestruka. Osim pružanja osnovnih informacija u svrhu povećanja energetske efikasnosti kotlovskeg postrojenja, ovi matematički modeli mogu da se primene pri projektovanju novih postrojenja kao i kod rekonstrukcije i automatizacije postojećeg postrojenja.

LITERATURA

1. Brkić M, Janić T. 1998. Mogućnosti korišćenja biomase u poljoprivredi. In proc. Briketiranje i peletiranje biomase iz poljoprivrede i šumarstva. Zbornik radova. Izvršno veće Autonomne Pokrajine Vojvodine, Sombor: 5-9.
2. Hellwig M. 1985. Basic of the combustion of wood and straw, Proceedings of the 3rd E. C. Conference on Biomass "Energy from Biomass", Venice, Italy, 25-29 March: 793-798.
3. Igić S, Pekez Z, Brkić M, Janić T. 2006. Određivanje toplotne moći, sadržaja vlage i pepela pšenične i sojine slame. Revija agronomska saznanja. Vojvodansko društvo za poljoprivrednu tehniku, Novi Sad, XV (5): 38-43.
4. Igić S, Dedović N, Janić T. 2007. Modelovanje energetske efikasnosti kotla za sagorevanje biomase. Revija agronomska saznanja, XVII(5)15-21.
5. Janić T. 2000. Kinetika sagorevanja balirane pšenične slame, disertacija, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad: 57-65.
6. Oka S, Jovanović Lj. 1997. Biomasa u energetici: In Biomasa – obnovljivi izvor energije, ed. Monografija, Jugoslovensko društvo termičara – Institut za nuklearne nauke "Vinča", Beograd: 9-18.
7. Oka S, Jovanović Lj. 1997. Gorivni ciklus i gorivne linije biomase, In Biomasa – obnovljivi izvor energije ed. Monografija, Jugoslovensko društvo termičara – Institut za nuklearne nauke "Vinča", Beograd, s. 25-28.
8. Pantelić I. 1976. Uvod u teoriju inženjerskog eksperimenta, Radnički univerzitet "Radivoj Ćirpanov", Novi Sad: 218.
9. JUS M.E2 203 / 1980.

NAPOMENA: Rad je deo istraživanja na projektu energetske efikasnosti zaveden pod brojem NP EE 273021 „Unapređenje materijalno-energetskog bilansa i razvoj preduslova za primenu ekološki korektnih energetskeg sistema zasnovanih na sopstvenim energetskeg resursima (biomasi) u AD „Mitrosrem“ u Sremskoj Mitrovici“, koje finansira Ministarstvo nauke Republike Srbije.

Primljeno: 17.01.2008.

Prihvaćeno: 19.01.2008.