

MICHAŁ JANICKI\*, AGATA BĄK, RADOSŁAW WRÓBEL\*\*

**REDUKCJA ILOŚCI UBOCZNYCH PRODUKTÓW  
SPALANIA BIOMASY W KOTLE MAŁEJ MOCY  
POPRAWIENIEM OKŁADZINY CERAMICZNEJ**

*Streszczenie*

*Artykuł przedstawia wyniki testu, mającego na celu redukcję masy popiołu powstającego w procesie spalania, poprzez zastosowanie okładziny ceramicznej wewnątrz komory spalania. Do badań wytypowano kocioł na biomasę, powszechnie stosowany na rynku krajowym. Jednostka jest zaopatrzona w palnik dostosowany do spalania pelletu drewnianego oraz ziarna owsa. Testy prowadzono na wspomnianych paliwach oraz ich mieszance w układzie ciągłej i cyklicznej pracy kotła.*

Słowa kluczowe: kocioł małej mocy, palnik na biomasę, biomasa, pellet drewniany, ziarno owsa, popiół, uboczne produkty spalania, ceramika glinokrzemianowa, gęstość nasypowa.

**WSTĘP**

W zakresie surowców energetycznych odnawialnych zasobów energetycznych największy udział w bilansie krajowym, bo 85,8%, stanowią biopaliwa pochodzenia rolniczego oraz leśnego [GUS 2011]. W zakresie upraw rolniczych na cele energetyczne wytwarzane są głównie zasoby wynikające z produkcji zbóż oraz rzepaku i rzepiku. W produkcji leśnej największe zasoby, ze względu na największą powierzchnię, bo 78%, posiada Gospodarstwo Leśne Lasy Państwowe [Janicki i Janicka 2010]. W zakresie plantacji energetycznych coraz większym zainteresowaniem cieszy się produkcja biomasy drzewnej. Gatunki, których uprawa stanowi zagajnik o krótkiej rotacji, tj.: wierzby, topole i brzozy, określone zostały w rozporządzeniu Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 11 marca 2010 r. [Dz. U. 39/2010].

Niezależnie od rodzaju upraw, krajowe zasoby biomasy wykorzystywanej na

\* Ove Arup & Partners International Ltd. Sp z o.o. Oddział w Polsce

\*\* Politechnika Wroclawska, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn (I-16)

cele energetyczne uzależnione są od wskaźnika plonowania, który z każdym rokiem przyjmuje inną wartość [Janicka i Janicki 2010]. Prócz zróżnicowania zasobów, biomasa charakteryzuje się niejednorodnością w składzie fizycznym jak i chemicznym, przez co jest uważana za paliwo uciążliwe, zarówno na etapie pozyskania jak i użytkowania.

W procesie szacowania rzeczywistego potencjału energetycznego biomasy, niezwykle istotne jest zróżnicowanie jej ze względu na charakterystykę plonowania [Janicka, Janicki 2010] oraz możliwości termicznego jej przekształcenia, uwzględniające ilość powstającego popiołu.

### METODYKA

W celu dokonania obserwacji tworzenia ubocznych produktów spalania, powstających w wyniku procesu spalania biomasy, przeprowadzono testy, spalając biomasę o różnej charakterystyce. Rodzaj biomasy miał spełniać warunek powszechnej dostępności i stosowalności. Jako jednostkę cieplną wytypowano kocioł seryjnie produkowany przez firmę Kostrzewa, przeznaczony dla gospodarstw domowych. Kocioł ten przystosowany jest do spalania pelletu o średnicy 6 i 8 mm (maksymalnej wilgotności do 12% i zapopieleniu 1,5%) oraz owsa (o wartości wilgotności do 15%). Jednostka składa się z: okrągłego stalowego wymiennika, palnika Platinum BIO o mocy 10 kW, zasobnika i sterownika pracy całego systemu grzewczego. Schemat kotła przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat badanego kotła  
Fig. 1. Scheme of tested boiler

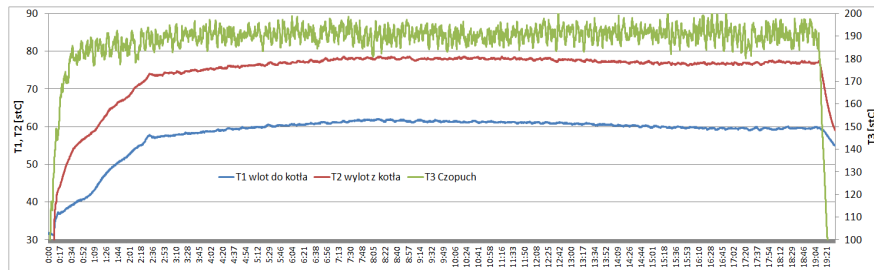
Ze względu na przeznaczenie kotła do spalania pelletu drewnianego i ziarna owsa, testy prowadzono przy użyciu dedykowanych paliw, a także mieszanki 1:1 (wagowo) obu paliw (rys. 2).



Rys. 2. Rodzaje spalanej paliwa: A – ziarno owsa, B – mieszanka pelletu i owsa, C – pellet drewniany.

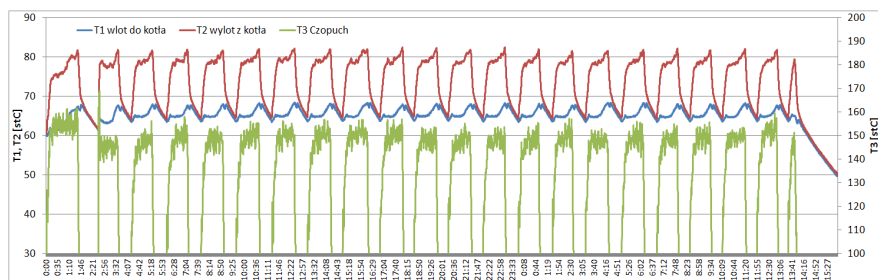
Fig. 2. Types of burned fuels: A - grains of oats, B – mixture of wooden pellets and oats, C – wooden pellets

Obserwacje prowadzono, spalając paliwa w układzie długookresowym i systemach: ciągłym i cyklicznym. System ciągły polegał na tym, że zapewniono na układzie odbioru ciepła takie warunki, dzięki którym nie doprowadzono do wygaszania kotła. Z kolei w systemie cyklicznym umożliwiono osiągnięcie wartości maksymalnej temperatury na wylocie kotła ( $80^{\circ}\text{C}$ ) w celu przechodzenia procesu spalania w stan wygaszania, a po wychłodzeniu wody w układzie odbioru ciepła, ponownego, automatycznego rozpalania. Zadaniem pomiaru w systemie cyklicznym było doprowadzenie do utrzymania systematycznych cykli godzinowego procesu spalania. Przykładowe szeregi czasowe poziomu temperatury dla obu systemów przedstawiają rysunki 3 i 4.



Rys. 3. Szereg czasowy poziomu temperatury, rejestrowany podczas spalania pelletu drewnianego w systemie ciągłym.

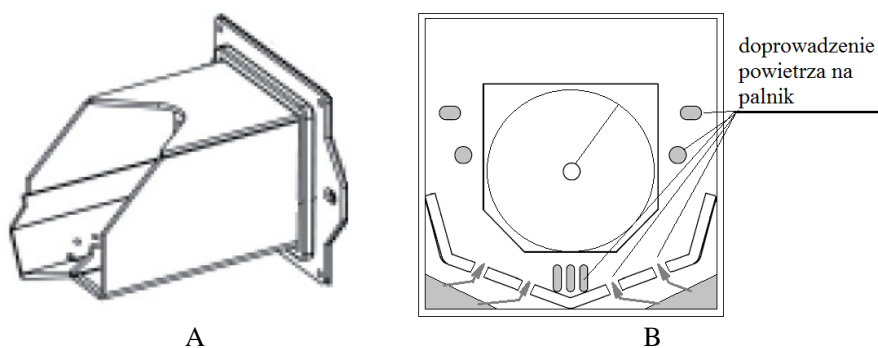
Fig. 3. Time series of temperature levels recorded during pellets burning in a continuous system



Rys. 4. Szereg czasowy poziomu temperatury, rejestrowany podczas spalania pelletu drewnianego w systemie cyklicznym

Fig 4. Time series of temperature levels recorded during pellets burning in a cyclic system

Palnik przystosowany do spalania granulatu i ziarna, składa się z podajnika ślimakowego, transportującego paliwo oraz układu doprowadzenia powietrza bezpośrednio na ruszt. Sterowanie procesem spalania jest algorytmem prędkości podsuwu materiału palnego oraz obrotów wentylatora podmuchowego. Paliwo bezpośrednio z zasobnika, za pomocą układu transportu i podawania, jest kierowane poziomo na ruszt, gdzie następuje jego zapłon i płomieniowe spalanie. Natomiast strumień powietrza rozdzielany jest za pomocą otworów w przedniej ścianie palnika – strefie zapłonu (rys. 5 B), oraz otworów w stalowej kształtce rusztu, napowietrzającej paliwo w dolnej jego części (rys. 5 A i B). Schemat palnika przedstawiono na rys. 5, gdzie: A – rzut części palnika, widocznej od strony wewnętrznej kotła, B – rzut przedniej ściany z zaznaczonymi otworami napowietrzającymi strefę palnika.



Rys. 5. Schemat palnika badanego kotła  
Fig 5. Scheme of tested boiler burner

Proces spalania prowadzono na nastawach, utrzymujących możliwie taką samą wartość stężenia tlenu na wylocie z kotła. Dla wszystkich cykli pomiaro-

wych starano się utrzymać stężenie tlenu na czopuchu na poziomie najbardziej zbliżonym do 10%. Ustabilizowanie procesu spalania pelletu drewnianego osiągnięto w sposób łatwiejszy, najtrudniej optymalizowanie strumienia paliwa doprowadzanego na palnik do ilości doprowadzanego powietrza, osiągnano podczas spalania ziarna zboża. Tym samym średnia wartość stężenia tlenu na czopuchu podczas cykli spalania pelletu mieściło się w zakresie 10,1-10,9%, mieszanki 10,8-11,3%, ziarna owsa 11,0-11,7%.

Dane literaturowe wykazują znaczącą różnicę w spalaniu ziaren owsa i pelletu drewnianego. Maria Olsson [Olsson 2006] w swojej rozprawie wykazała, że jedynie 57% suchej masy ziarna owsa uległo spalaniu, tymczasem dla pelletu drewnianego udział ten wynosił 98%. W oparciu o powyższe, autorzy testu, spodziewając się wystąpienia znacznie większych ilości popiołów przy spalaniu ziarna owsa, do testów zróżnicowali ilość wsadu, w podziale na rodzaj paliwa. Masę wsadu w poszczególnych sesjach pomiarowych określono w tabeli 1.

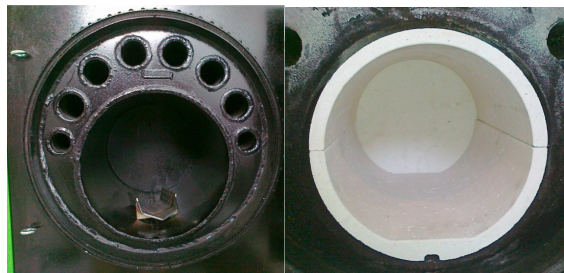
*Tabela 1. Masa wsadu wykorzystywana w jednym cyklu pomiarowym, w zróżnicowaniu na rodzaj spalanego paliwa*

*Table 1. The mass of the load in one measuring cycle, in the diversification of the type of fuel burned*

Opis cyklu pomiarowego	Pellet drewniany				Mieszanka pelletu i owsa				Ziarno owsa	
	z ceramiką		bez ceramiki		z ceramiką		bez ceramiki		z ceramiką	bez ceramiki
	System ciągły	System cykliczny	System ciągły	System cykliczny	System ciągły	System cykliczny	System ciągły	System cykliczny	System cykliczny	System ciągły
Masa paliwa	[kg]									
	100	100	100	100	80	80	80	80	40	40

Testy prowadzono przy zastosowaniu standardowej konstrukcji komory spalania, jak również w komorze modyfikowanej. Standardowa konstrukcja komory spalania to komora cylindryczna, wykonana ze stali kotłowej, seryjnie oferowanej przez producenta kotła. Modyfikowana to komora wyłożona dwucentymetrową warstwą ceramiki glinokrzemianowej. Zastosowanie ceramiki miało na celu uzyskanie podwyższonej temperatury spalania w kotle w stosunku do

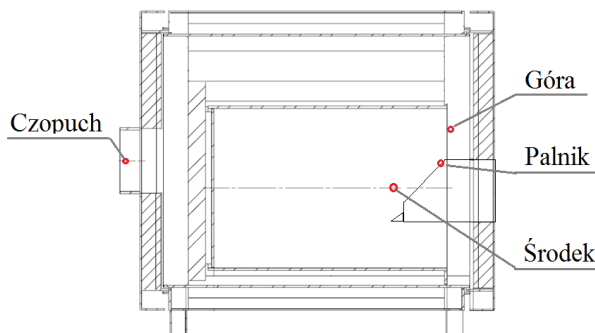
założeń projektowych. Widok komory spalania bez wypełniania i z wypełnieniem ceramicznym przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Komora spalania w podstawowym standardzie (widok po lewej) i z wkładem ceramicznym (widok po prawej)

Fig. 6. The combustion chamber in the basic standard (the view on the left) and with ceramic cartridge (the view on the right)

Rejestrację poziomu temperatury w trakcie testów prowadzono wewnątrz komory spalania (w górnej i środkowej części) oraz przy palniku, a także na wylocie gazów spalinowych z kotła (na czopuchu), co przedstawiono na rys. 3 i 4. Do pomiaru temperatury wykorzystano układ pomiarowy oparty na termoparach typu K w systemie gwiazdowym z miernikiem Tenmars, współpracującym z rejestratorem PC. Lokalizację termopar w bezpośredniej okolicy palnika (wewnątrz komory spalania) przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Rozmieszczenie termopar wewnątrz komory spalania

Fig. 7. Location of thermocouples inside of the combustion chamber

Analizę ilościową popiołu ze spalania biomasy wykonano metodą wagową. Pomiar masy popiołu i spieków prowadzono po każdym cyklu pomiarowym z nagromadzenia na palniku, z dna komory spalania (często określane jako popiół denny) oraz z płomienic.

### Wyniki testów pomiarowych i dyskusja

Na podstawie prowadzonej rejestracji poziomu temperatury otrzymano szeregi czasowe, które zestawiono i poddano analizie porównawczej. Ze względów organizacyjnych, porównaniu poddano szeregi czasowe testów spalania trzech wytypowanych paliw, w układzie ciągłym w komorze z wypełnieniem ceramicznym i bez wypełnienia. Średnie wartości temperatury zestawiono w tabeli 2.

*Tabela 2. Średnie wartości poziomu temperatury wewnątrz komory spalania i na czopuchu*

*Table 2. Mean values for the level of the temperature inside the combustion chamber and on the chimney flue*

Temperatura [°C]					
Opis		Góra	Środek	Palnik	Czopuch
Pellet	bez ceramiki	737,8	538,3	497,9	174,1
	z ceramiką	873,6	856,0	744,7	190,2
	$\Delta T$	<b>135,8</b>	<b>317,7</b>	<b>246,8</b>	<b>16,0</b>
Mieszanka	bez ceramiki	522,3	399,1	322,2	114,8
	z ceramiką	593,0	592,8	407,0	146,2
	$\Delta T$	<b>70,7</b>	<b>193,7</b>	<b>84,8</b>	<b>31,4</b>
Owies	bez ceramiki	344	229,3	283,5	82,3

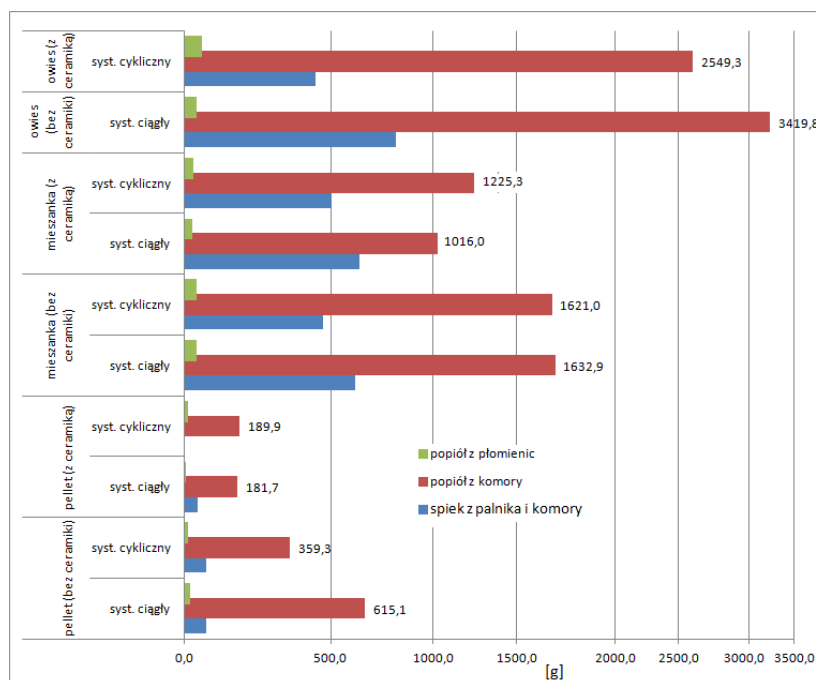
Z przedstawionych wyników rozkładu temperatury wynika, że zastosowanie okładziny ceramicznej w komorze spalania nie tylko podwyższyło temperaturę w komorze spalania, ale przede wszystkim zmniejszyło różnice średnich wartości temperatur pomiędzy punktami pomiarowymi. Wnioskuje się, że w wyniku zastosowania wkładu ceramicznego strefy termiczne komory spalania zostały ujednoczone. Dodatkowo okładzina ceramiczna spowodowała (w komorze spalania) podwyższenie temperatury w wyższym stopniu w stosunku do stanu podstawowego w testach prowadzących spalanie pelletu, niż w przypadku mieszanki paliw. Równocześnie odnotowano podwyższenie straty kominowej podczas spalania mieszanki paliw (w odróżnieniu do samego pelletu), wynikającej z podwyższenia różnicy temperatury spalin na czopuchu, w stosunku do parametrów podstawowych.

Najwyższe temperatury osiągnięto przy spalaniu pelletu, najniższe przy spalaniu owsa. Wynika to z różnicy wartości opałowej stosowanych paliw ( $Q_{\text{pelletu}}^a = 17319 \text{ kJ/kg}$   $Q_{\text{owsa}}^a = 15842 \text{ kJ/kg}$ ), przy założeniu jednakowego strumienia

doprowadzanego paliwa i odpowiadającej mu ilości powietrza, utrzymującej na wylocie z kotła wartość tlenu na poziomie zbliżonym do 10%.

Zaobserwowano również największą stabilność w przebiegach szeregów czasowych wartości temperatury przy spalaniu pelletu. Wiąże się to z najwyższą jednorodnością paliwa w stosunku do pozostałych paliw oraz dostosowania rusztu palnika do spalania pelletu.

Po zakończeniu cykli pomiarowych wykonano pomiar masy popiołu i żużla z palnika, dna komory spalania i płomienic. Aby umożliwić dokonanie oceny porównawczej, przeliczono ilości popiołu proporcjonalnie do ilości doprowadzonego paliwa (określonego w tabeli 1), ustanawiając masę wsadu na poziomie 100 kg dla każdego cyklu pomiarowego. Wyniki przeprowadzonych testów, w rozbiciu na cykle pomiarowe opisane wg. organizacji badań przytoczonej powyżej, przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Masa popiołu i żużla ze spalania 100 kg biomasy w różnych warunkach  
 Fig. 8. The weight of ash and slag from burning of 100 kg of biomass in different conditions

W oparciu o przeprowadzone testy badawcze stwierdza się, że największą masę popiołu i żużla, pochodzącą z cykli pomiarowych, uzyskano podczas spalania owsa, natomiast najmniejszą ze spalania pelletu. Ma to istotne znaczenie ze



względem na stratę niecałkowitego spalania i wpływ straty na sprawność termicznego wykorzystania biomasy, ale również jest istotnym parametrem w procesie organizacji systemu gromadzenia i odprowadzania popiołu w komorze.

Charakterystyka spalania owsa, zaczerpnięta z literatury [Kruczek 2001], dostarcza informacji o rozpoczęciu się procesu spalania płomieniowego (po etapie odparowania i odparowaniu lotnych związków) w temperaturze 400-450°C (mierząc w złożu paliwa) z widocznymi fragmentami nienaruszonej struktury ziaren; następnym etapem jest zwęglenie ziarna paliwa, przy nieznamym wzroście temperatury w złożu do 450-500°C. Oba etapy trwały po 1-2 minuty. Następnie występuje etap płomienia tłącego i znaczący spadek temperatury, czego nie zaobserwowano podczas spalania pelletu. Kolejnym etapem, po płomieniu tłącym, jest etap żarzenia (wyświecania), który w przypadku pelletu trwał ok. 20 minut, natomiast w przypadku owsa zdecydowanie krócej. Początkowemu etapowi spalania obu rodzajów biomas towarzyszyły największe poziomy stężenie związków organicznych w odniesieniu do pozostałych etapów. Te same źródła literaturowe określają największą efektywność i najmniejszą emisję lotnych związków organicznych podczas spalania pelletu drewnianego.

W wyniku przeprowadzonego testu, odnotowano redukcję masy ubocznych produktów spalania z procesu spalania pelletu drewnianego, ziarna owsa, jak i mieszanki obu paliw, poprzez zastosowanie ceramiki w komorze spalania. Charakterystycznym elementem okładziny ceramicznej wewnątrz komory spalania jest utrzymanie podwyższonej temperatury, co sprzyja dopalaniu materiału palnego. Niedopalone produkty spalania, które nie zdążyły się spalić na ruszcie palnika, zsypywane są do komory spalania. Usypane na chłodnej powierzchni wymiennika ciepła nie ulegają termicznemu rozkładowi, czego przeciwieństwem jest okładzina ceramiczna. Powłoka glinokrzemianowa promieniuje, przez co materiał palny ulega szybszemu utlenieniu.

Odnotowano redukcję masy popiołu z testów prowadzonych bez wkładki ceramicznej w cylindrze komory spalania w systemie cyklicznym w odniesieniu do systemu ciągłego. Należy zwrócić uwagę, że prowadząc proces spalania w systemie cyklicznym, we wszystkich testach zredukowano ilość spieku i popiołu pochodzącego z palnika. W przypadku kotłów małej mocy, opartych na automatycznym doprowadzeniu paliwa i spalaniu za pomocą układów wypiętrzających (retortowych), rynnowych czy też poziomych (stokerów), centralnym elementem jest sam palnik. Poprawność prowadzonego procesu spalania jest determinowana stanem palnika oraz niezakłóconym przepływem w jego okolicy. Zakłócenie doprowadzenia strumienia powietrza i paliwa, np. poprzez zanieczyszczenie wynikające z zapopielenia, czy też spowodowane z termicznego scalenia ubocznych produktów spalania, powoduje niedotrzymanie założeń projektowych, a tym samym pogorszenie parametrów spalania.

Projektowanie kształtu oraz geometrycznej wielkości komory paleniskowej polega na zapewnieniu dostatecznej długości płomienia, uzyskaniu prawidłowego wypełnienia komory płomieniem oraz zapewnienie równomiernego jej obciążenia. Przewymiarowanie komory powoduje nierównomierny rozkład temperatur, tworzący niedogrzone przestrzenie, często zwane „martwymi punktami”. Najczęściej są to przestrzenie bezpośrednio przy ściankach komory i w narożach [Greinert 2000; Greinert, Drab 1984]. W kotłach małej mocy istotnym problemem jest sposób odprowadzania żużla i popiołu z komory. Ze względu na wielkość jednostek oraz konieczność ich wykonania w sposób prosty i ekonomicznie uzasadniony [Janicki, Lech-Brzyk 2006], opróżnianie popiołu odbywa się ręcznie, w ramach prowadzonych podstawowych czynności eksploatacyjnych. Nadmiar popiołu powoduje zmniejszenie geometrycznej wielkości komory, co może doprowadzić do zachwiania procesu spalania i wpłynąć na zwiększenie emisji, a także spadek sprawności kotła.

#### PODSUMOWANIE

Ze względu na największy udział zasobów biomasy w krajowym rynku energii odnawialnej, ważne jest nie tylko określenie plonowania, możliwości zbioru, transportu i magazynowania oraz wartości energetycznej, ale również określenie zawartości popiołu, który powstaje w procesie spalania paliw stałych. Należy zwrócić szczególną uwagę na opracowanie niskoemisyjnych technologii jej energetycznego wykorzystania, uwzględniając ilość i jakość powstających ubocznych produktów spalania oraz możliwości ich sprawnego usuwania z komory spalania. Na podstawie przeprowadzonego eksperymentu odnotowano, iż umieszczenie wewnątrz komory spalania ceramiki glinokrzemianowej spowodowało redukcję ilości popiołu, a tym samym masę produktów niepełnego spalania. Ze względu na ilość niespalonej masy ziarna owsa oraz znaczną objętość jego popiołu, ziarno owsa klasyfikować można jako paliwo uciążliwe. Jednostki energetyczne, spalające ziarno owsa, winny być dostosowane do usuwania popiołu z komory spalania, bądź uwzględnić ich magazynowanie poprzez dostosowanie przestrzeni sedymentacyjnej.

#### LITERATURA

1. GREINERT A.; 2000. Ochrona i rekultywacja terenów zurbanizowanych. Wyd. Politechniki Zielonogórskiej; ss. 216.
2. GREINERT H.; DRAB M.; 1984. Możliwość wykorzystania kory sosnowej w uprawie pomidorów szklarniowych. Zeszyty Naukowe WSI w Zielonej Górze, Nr 74, 117-130.

3. GUS; 2011. Energia ze źródeł odnawialnych w 2010 r., Informacje i opracowania statystyczne., Warszawa.
4. JANICKA A., JANICKI M.; 2010. Zmienność potencjału energetycznego słomy w latach 1998-2009. Ekopartner, 5 (223).
5. JANICKI M., JANICKA A.; 2010. Potencjał energetyczny drewna pochodzącego z lasów i terenów leśnych. Problemy Inżynierii Rolniczej nr 4, 49.
6. JANICKI M., LECH-BRZYK K.; 2006. Biomass combustion In low-power boilers on example of KD type boiler. Alternative Plants For Sustainable Agriculture, Institute of Plant Genetics, Polish Academy of Sciences, Poznań.
7. KRUCZEK S.; 2001. Kotły. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
8. OLSSON M.; 2006. Residential biomass combustion – emissions of organic compounds to air from wood pellets and other new alternatives. Thesis for degree of doctor of philosophy, Department of Chemical and Biological Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
9. ROZPORZĄDZENIE Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 11 marca 2010 r. w sprawie gatunków drzew, których uprawa stanowi zagajnik o krótkiej rotacji, oraz maksymalnego cyklu zbioru dla każdego z tych gatunków drzew (Dz. U. z 2010 r. Nr 39, poz. 214)

## **REDUCTION OF QUANTITIES OF BIOMASS COMBUSTION BY-PRODUCTS IN A LOW POWER BOILER THROUGH THE USE OF CERAMIC LININGS**

### *S u m m a r y*

*The article presents the results of the test, aimed at reducing the weight of the ash, produced in the combustion process, through the use of ceramic linings inside the combustion chamber. To research was chosen the boiler for biomass, commonly used on the domestic market. The unit is provided with a burner suitable to burn wooden pellets and grains of oats. Tests carried out on these fuels and their mixture in the continuous and cyclic operation of the boiler.*

Key words: Low power boiler, biomass burner, biomass, wooden pellets, grains of oats, ash, combustion by-products, aluminosilicate ceramics, bulk density.