



The effect of applying aluminosilicate ceramics in combustion chamber on the amount of ash produced from the combustion of grains of oats and wooden pellets

Michał JANICKI¹, Agata BĄK², Radosław WRÓBEL²

¹ Ove Arup & Partners International Ltd. Sp z o.o. Oddział w Polsce, ul Królewska 16, 00-103 Warszawa, tel. 71/719-68-57, fax.71/719-68-55 e-mail: michal.janicki@arup.com

² Politechnika Wroclawska, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn (I-16), ul Braci Gierymskich 164, 51-640 Wrocław, e-mail: agata.bak@pwr.wroc.pl, radoslaw.wrobel@pwr.wroc.pl

Abstract

The domestic market for renewable energy is based on the use of biomass, which creates the need to develop low-emission and high-throughput technologies for its use of energy.

The article presents the effects of using ceramic linings inside the combustion chamber of low power boiler in order to reduce the weight of the ash produced in the combustion process. The boiler used on domestic market was chosen to research. It has a burner suitable to burn both wooden pellets and grains of oats. Tests carried out on these fuels and their mixture in the continuous and cyclic operation.

The article also addressed the issue of the impact of the use of combustible materials of different bulk density on the formation of combustion by-products.

Keywords: biomass combustion, low-power boiler, aluminosilicate ceramics, oats, wood pellets, bulk density, ash, combustion by-products

Streszczenie

Wpływ zastosowania ceramiki glinokrzemianowej w komorze spalania na ilość popiołów powstających ze spalania ziarna owsa i peletu drzewnego

Krajowy rynek energii odnawialnej oparty jest w głównej mierze na wykorzystaniu biomasy, co stwarza konieczność opracowania niskoemisyjnych i wysokosprawnych technologii jej energetycznego wykorzystania.

Artykuł prezentuje efekty zastosowania okładziny ceramicznej wewnątrz komory spalania kotła na biomasę, mającego na celu redukcję masy popiołu powstającego w procesie spalania. Do badań wykorzystano kocioł małej mocy na biomasę stosowany na krajowym rynku. Urządzenie posiada palnik dostosowany do spalania zarówno peletu drzewnego, jak i ziaren owsa. Badania prowadzono na wybranych paliwach oraz na ich mieszance, w układzie pracy ciągłej i cyklicznej.

W artykule poruszono również zagadnienie wpływu stosowania materiałów palnych o różnej gęstości nasypowej na powstawanie ubocznych produktów spalania.

Słowa kluczowe: spalanie biomasy, kocioł małej mocy, ceramika glinokrzemianowa, ziarno owsa, pelet drzewny, gęstość nasypowa, popiół, uboczne produkty spalania

1. Biomasa i jej energetyczne wykorzystanie

W minionym dziesięcioleciu, w krajach UE-27, obserwowano coroczny wzrost ilości energii pozyskiwanej ze źródeł odnawialnych w stosunku do roku poprzedniego. W 2010 roku odnotowano największy wzrost, który wynosił dla UE-27 – 12%, a dla Polski 13,7%. Krajowy udział nośników energii odnawialnej w 85,6% oparty jest na energii biomasy stałej, 5,5% biopaliw ciekłych, 3,5% energii wiatru, 2,6% energii wody (z oscylującą tendencją spadku), 1,8% biogazu i 1% stanowią źródła pozostałe [1].

W zakresie biomasy wykorzystywanej do celów energetycznych, największy udział stanowią uprawy rolnicze, z produkcji zbóż oraz rzepaku i rzepiku, jak również drewno pochodzące z produkcji leśnej [2].

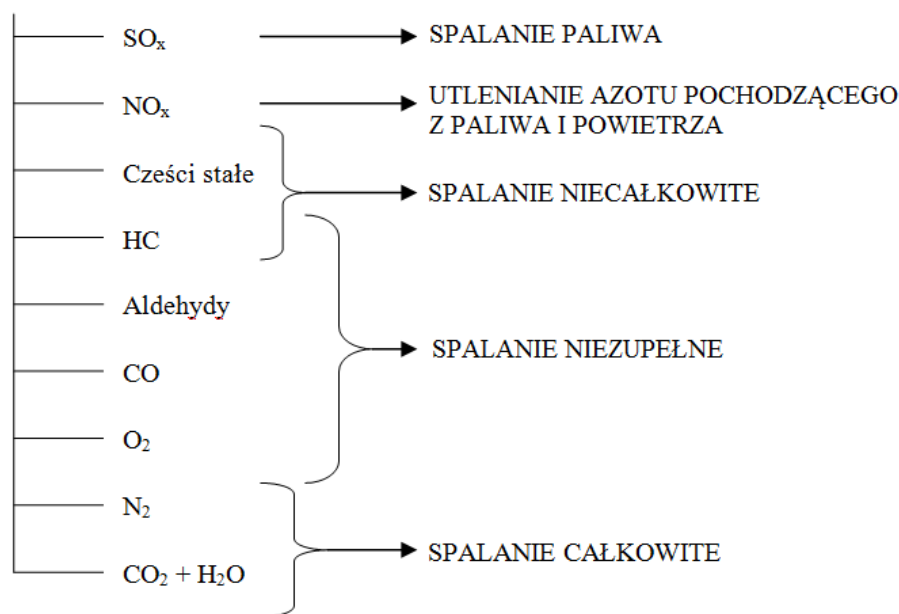
Niezależnie od rodzaju upraw, krajowe zasoby biomasy wykorzystywanej na cele energetyczne uzależnione są od wskaźnika plonowania, który z każdym rokiem przyjmuje inną wartość [3]. Prócz zróżnicowania zasobów, biomasa charakteryzuje się niejednorodnością w składzie fizycznym jak i chemicznym, przez co 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 [4] oraz możliwości termicznego jej przekształcenia, uwzględniające ilość powstających ubocznych produktów spalania.

Biomasę można wykorzystać w energetycznych procesach spalania, pirolizy, zgazowania oraz upłynniania (ze względu na wysokie koszty eksploatacyjne rzadziej stosowane) [5]. Najczęstszym z nich jest spalanie (termiczny rozkład biomasy do koksiku). Pozostałe po niej produkty ciekłe i gazowe są traktowane jako produkty uboczne, gdyż ich obróbka jest nieefektywna [5].

Proces spalania biomasy zależy od właściwości paliwa, a w szczególności od granulacji, wilgotności, zagęszczenia i zawartości azotu i siarki oraz konstrukcji, rodzaju i typu paleniska. Parametrem sterującym procesem spalania jest szybkość podawania paliwa i dostarczanie powietrza. Każdemu procesowi spalania towarzyszy emisja takich zanieczyszczeń jak: tlenek węgla i sadza, tlenki azotu, tlenki siarki, węglowodory oraz metale w różnych ilościach. Ogólnie można wyróżnić poszczególne grupy zanieczyszczeń: główną (CO_2 i pyły), pośrednią (NO_x , SO_2), śladową (węglowodory i metale). Na rys. 1.1. przedstawiono podstawowe składniki zanieczyszczeń w gazach odlotowych.

SKŁADNIKI SPALIN



Rys. 1.1. Podstawowe składniki zanieczyszczeń w gazach spalinowych w zależności od charakteru przeprowadzanego procesu [6, 7].

2. Metodyka

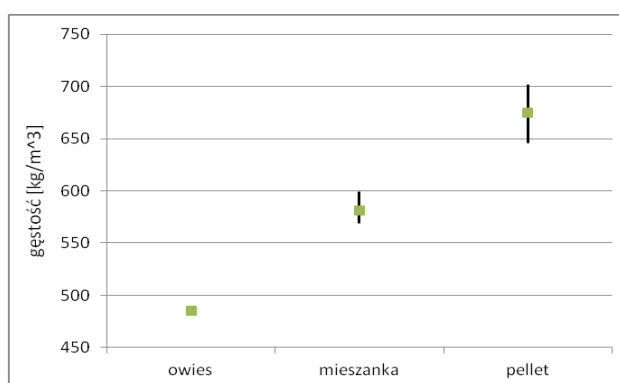
Poprzez spalanie różnorodnej biomasy, przeprowadzono obserwację tworzenia się ubocznych produktów spalania (UPS), powstających w wyniku tego procesu. Użyto biomasę powszechnie stosowaną i dostępną. Badania przeprowadzono na kotle przeznaczonym dla gospodarstw domowych, produkowanym seryjnie przez firmę Kostrzewa. Kocioł ten przystosowany jest do spalania peletu 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 czterech części: pierwsza – to okrągły stalowy wymiennik płomienicowy o bardzo małych gabarytach (objętości

wodnej 48 dm³); druga – to palnik Platinum BIO o mocy 10 kW; trzecia – to zasobnik, który jest umieszczony na wymienniku kotła; czwarta – to sterownik pracy całego systemu grzewczego, przymocowany do obudowy kotła. Schemat kotła przedstawiono na rysunku 2.1.



Rys. 2.1. Schemat badanego kotła oraz rodzaje spalanej paliwa: A – pelet drzewny, B – mieszanka peletu i owsa, C – ziarno owsa.

Ze względu na przeznaczenie kotła do spalania peletu drzewnego i ziarna owsa, testy prowadzono przy użyciu dedykowanych paliw, a także mieszanki 1:1 (wagowo) obu paliw (Rys. 2.1.). Dla wspomnianych paliw wyznaczono gęstość nasypową (zgodnie z PN-EN 1097-3:2000), określoną jako stosunek masy luźno usypanego paliwa do objętości naczynia, w którym się znajduje. Wyniki przedstawiono na rysunku 2.2.



Rys. 2.2. Gęstość nasypowa paliw wykorzystanych w eksperymencie badawczym.

Proces spalania biomasy, prowadzony za pomocą palnika, sterowany jest prędkością posuwu paliwa oraz strumieniem doprowadzanego powietrza. W celu zapewnienia wymaganego strumienia cieplnego, materiał palny o mniejszej gęstości nasypowej podawany jest z większą prędkością liniową przy jednoczesnym zapewnieniu wymaganej ilości powietrza, utrzymującej stężenie tlenu w spalinach na zamierzonym poziomie. Zwiększenie prędkości liniowej podawanego na palnik paliwa powoduje skrócenie czasu przebywania materiału w strefie spalania. Palniki z dopasowanym sposobem doprowadzenia powietrza i jego wymieszania w strefie spalania do paliwa o wyższej gęstości nasypowej zazwyczaj nie umożliwiają prowadzenia procesu spalania w sposób efektywny przy zastosowaniu materiału o niskiej gęstości nasypowej. Niedopalone części paliwa transportowane są do komory osadczącej, wpływając na zwiększenie straty niepełnego spalania.

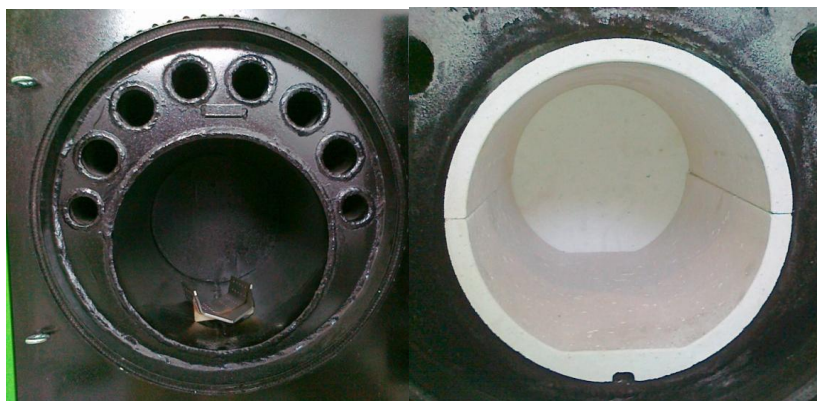
Obserwacje prowadzono, podczas testów spalania w układzie długookresowym i systemach: ciągłym i cyklicznym. System ciągły polegał na prowadzeniu procesu spalania bez wygaszania kotła, z kolei w systemie cyklicznym umożliwiono osiągnięcie wartości maksymalnej temperatury na wylocie kotła (80°C) i wygaszenie, a następnie po wychłodzeniu wody w układzie odbioru ciepła, ponownego, automatycznego rozpalania. Zadaniem pomiaru w systemie cyklicznym było utrzymanie systematycznych cykli godzinowego procesu spalania (licząc od rozpalania, przez samo palenie, do wygaszania).

Tabela 2.1. Masa wsadu wykorzystywana w jednym cyklu pomiarowym, w zróżnicowaniu na rodzaj spalane go paliwa.

Opis cyklu pomiarowego	Pelet drzewny				Mieszanka peletu 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

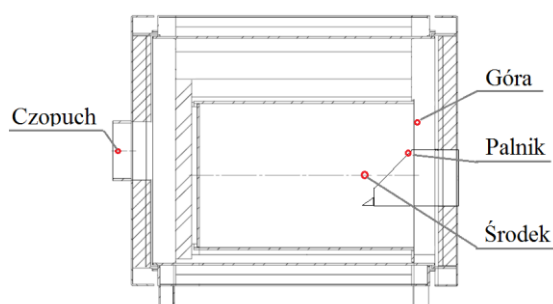
Dane literaturowe prezentują sporą różnicę pomiędzy spalaniem ziaren owsa i peletu drzewnego, co pokazała w swoich badaniach Maria Olsson [8]. Wykazała ona, że w przypadku peletu drzewnego spalaniu uległo 98% suchej masy, podczas gdy ziaren owsa zaledwie 57%. Dlatego też ze względu na możliwość pojawienia się znacznych ilości popiołów przy spalaniu ziaren owsa, autorzy testu zróżnicowali ilość wsadu, w podziale na rodzaj paliwa. Masę wsadu w kolejnych sesjach pomiarowych przedstawiono w tabeli 2.1.

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 z okładziną z ceramiki glinokrzemianowej. Widok komory spalania bez wypełnienia i z wypełnieniem ceramicznym przedstawiono na rysunku 2.3.



Rys. 2.3. Komora spalania w podstawowym standardzie (widok po lewej) i z wkładem ceramicznym (widok po prawej).

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). 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 2.4.



Rys 2.4. Rozmieszczenie termopar wewnątrz komory spalania.

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 określany jako popiół denny) oraz z płomienic. W ramach analizy technicznej paliwa, oznaczono zawartość popiołu (metodą powolnego spopielenia, polegającą na całkowitym spalaniu i wyprażeniu próbki w piecu ogrzewanym do temperatury 815°C), która wynosiła: $A_{\text{peletu}}^a = 0,29\%$, a $A_{\text{owasa}}^a = 2,66\%$.

3. Wyniki testów pomiarowych oraz 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 3.1.

Tabela 3.1. Średnie wartości poziomu temperatury wewnątrz komory spalania i na czopuchu.

Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]					
Opis		Góra	Środek	Palnik	Czopuch
Pelet	bez ceramiki	737,8	538,3	497,9	174,1
	z ceramiką	873,6	856,0	744,7	190,2
	ΔT	135,8	317,7	246,8	16,0
Mieszanka	bez ceramiki	522,3	399,1	322,2	114,8
	z ceramiką	593,0	592,8	407,0	146,2
	ΔT	70,7	193,7	84,8	31,4
Owies	bez ceramiki	344	229,3	283,5	82,3

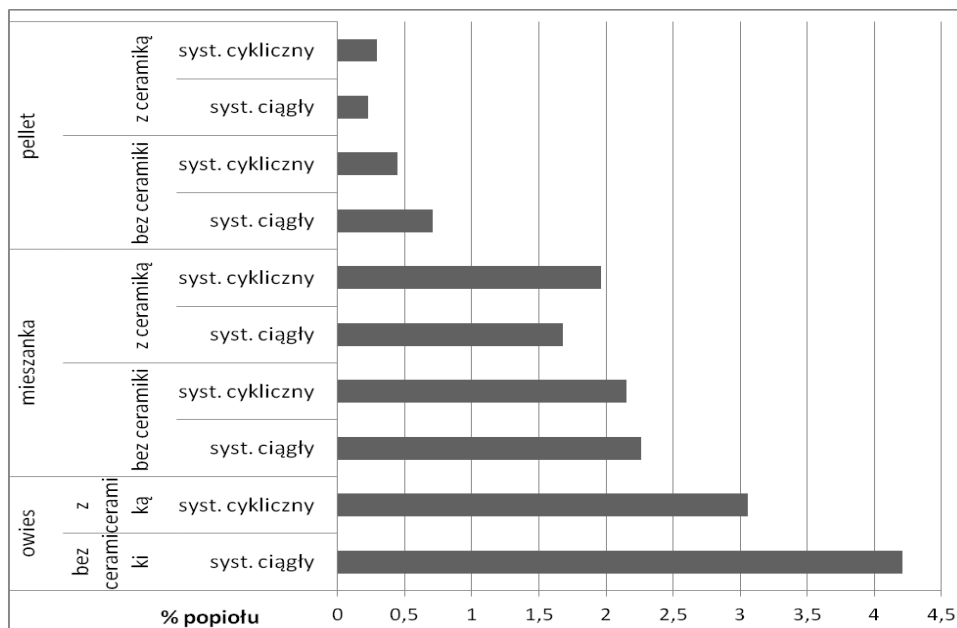
Z przedstawionych wyników rozkładu temperatury wynika, że zastosowanie okładziny ceramicznej w komorze spalania nie tylko podwyższyło temperaturę w komorze spalania, ale przede wszystkim zmniejszyło różnice średnich wartości temperatur pomiędzy punktami pomiarowymi. Wnioskuje się, że w wyniku zastosowania 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 spalania peletu, niż w przypadku mieszanki paliw. Równocześnie odnotowano podwyższenie straty kominowej podczas spalania mieszanki paliw (w odróżnieniu od samego peletu), wynikającej z podwyższenia różnicy temperatury spalin na czopuchu, w stosunku do parametrów podstawowych.

Najwyższe temperatury osiągnięto przy spalaniu peletu, najniższe przy spalaniu owsa. Wynika to z różnicy wartości opałowej stosowanych paliw ($Q_{\text{peletu}}^a = 17319 \text{ kJ/kg}$, $Q_{\text{owasa}}^a = 15842 \text{ kJ/kg}$ przy $W_{\text{peletu}}^a = 6,15\%$ i $W_{\text{owasa}}^a = 8,01\%$), 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 peletu. Wiąże się to z najwyższą jednorodnością paliwa w stosunku do pozostałych paliw oraz dostosowania rusztu palnika do spalania peletu.

Po zakończeniu cyklu pomiarowych wykonano pomiar masy popiołu i żuźla z palnika, dna komory spalania i płomienic. Aby umożliwić dokonanie oceny porównawczej, przeliczono ilości popiołu proporcjonalnie do ilości doprowadzonego paliwa (określonego w tabeli 2.1.), 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. 3.1.

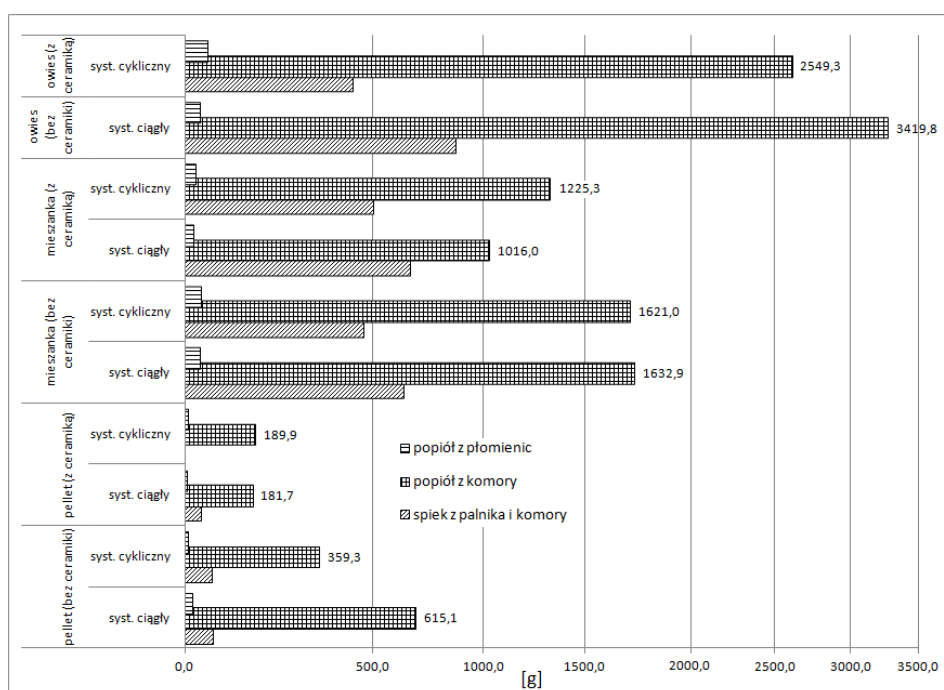
W oparciu o otrzymane wyniki, dokonano podziału ilości ubocznych produktów spalania na miejsce ich występowania, co przedstawiono na rys. 3.2.



Rys. 3.1. Udział procentowy sumy popiołu i spieku (UPS), powstałych z procesu spalania w poszczególnych cyklach pomiarowych.

Przeprowadzone testy pokazały, że zastosowanie ceramiki w komorze spalania zredukowało masę produktów niecałkowitego spalania podczas spalania peletu drzewnego, ziaren owsa oraz mieszanki obu paliw. Okładzina ceramiczna wewnątrz komory spalania utrzymuje podwyższoną temperaturę, a to sprzyja dopalaniu paliwa. Niedopalone produkty spalania, które nie zdążyły się spalić na ruszcie palnika, zsypywane są do komory spalania. Po usypaniu ich na chłodnej powierzchni wymiennika ciepła nie ulegają termicznemu rozkładowi, w przeciwieństwie do tych na okładzinie ceramicznej. Powłoka glinokrzemianowa promieniuje, przez co materiał palny ulega szybszemu utlenieniu.

Podczas spalania w systemie cyklicznym, w stosunku do systemu ciągłego, we wszystkich testach zredukowano ilość spieku i popiołu pochodzącego z palnika, co przyczyniło się do utrzymania poprawnego i stabilnego procesu spalania, z uwzględnieniem założeń projektowych



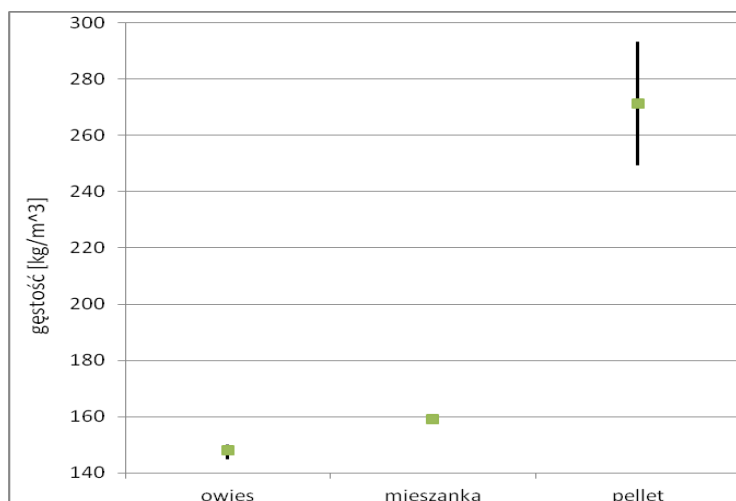
Rys. 3.2. Masa popiołu i żużla ze spalania 100 kg biomasy w różnych warunkach.

W oparciu o zbiorcze wyniki (patrz: rys. 3.1.), odnotowano redukcję masy popiołu dennego z testów prowadzonych bez okładziny ceramicznej w stosunku do zastosowanej okładziny wewnątrz cylindra komory podczas spalania:

- peletu w systemie cyklicznym o 47,2%, a w systemie ciągłym o 70,5%.
- mieszanki paliw w systemie cyklicznym o 37,8%, a w systemie ciągłym o 24,4%.

Redukcję masy powstałego popiołu i spieku na palniku przy spalaniu peletu z zastosowaniem okładziny ceramicznej w stosunku do komory standardowej, uzyskano na poziomie 38,8% w systemie ciągłym i 98,4% w systemie cyklicznym. Jednak w tym samym układzie, przy pomiarach prowadzonych na mieszance paliw, otrzymano nieznaczny przyrost masy popiołu i spieku o 2,9% dla systemu ciągłego i 5,6% dla systemu cyklicznego. Przyrost temperatury wynikający z zastosowania okładziny ceramicznej, przy spalaniu mieszanki paliw był zdecydowanie mniejszy niż w przypadku samego peletu (patrz tab. 3.1.). Jest to jednak informacja o poziomie temperatury w komorze spalania, w bezpośrednim sąsiedztwie palnika, ale nie przedstawia stanu z rusztu palnika. Biomasa w stosunku do węgla, charakteryzuje się podwyższoną zawartością metali ziem alkalicznych a także części lotnych, jak również zdecydowanie niższą temperaturą mięknięcia popiołów. Podwyższenie temperatury i obecność wspomnianych metali, prowadzi do procesu spiekania popiołu, powodującego zarastanie paleniska co negatywnie wpływa zarówno na proces spalania, jego efektywność, ale również komplikuje zakres czynności eksploatacyjno-serwisowych.

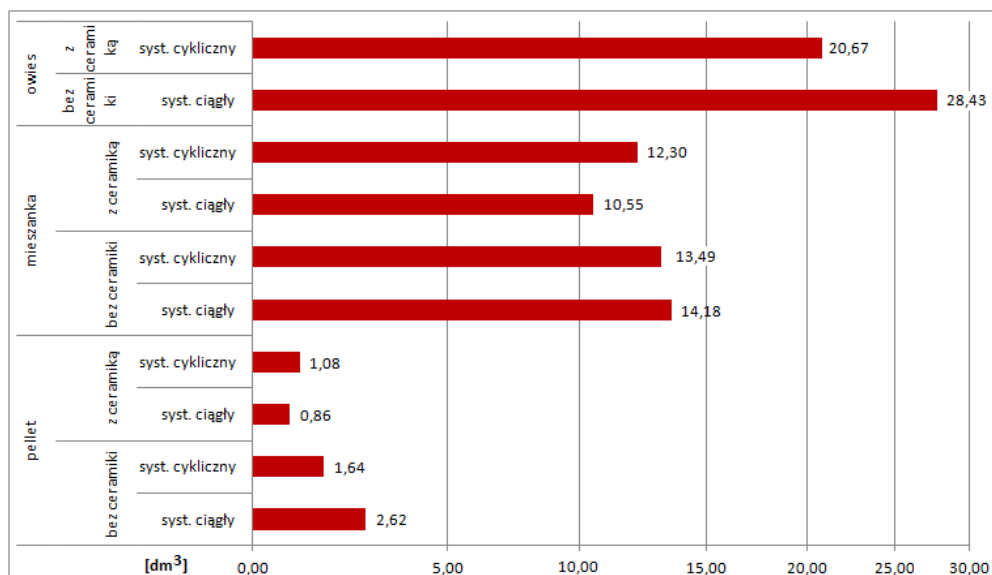
W kotłach małej mocy istotnym problemem jest sposób odprowadzania żużla i popiołu z komory. Ze względu na wielkość jednostek oraz konieczność ich wykonania w sposób prosty i ekonomicznie uzasadniony [9], opróżnianie popiołu odbywa się ręcznie, w ramach prowadzonych podstawowych czynności eksploatacyjnych. Nadmiar popiołu powoduje zmniejszenie geometrycznej wielkości komory, co może doprowadzić do zachwiania procesu spalania i wpłynąć na zwiększenie emisji, a także spadek sprawności kotła. Charakterystyką właściwości fizycznych popiołu jest m.in. gęstość nasypowa, której oznaczenie wykonano dla popiołu dennego, stanowiącego największy udział popiołu w poszczególnych cyklach. Wyniki przedstawiono na rysunku 3.3.



Rys. 3.3. Gęstość nasypowa popiołu otrzymanego w wyniku prowadzonych pomiarów.

W oparciu o średnie wartości gęstości nasypowej popiołów badanych paliw, obliczono objętości, jakie zajmowały UPS podczas spalania materiałów w poszczególnych cyklach pomiarowych. Wyniki obliczeń zestawiono na rys. 3.4.

W trakcie prowadzonych badań, niespalona masa ziaren owsa, znacząco wpływająca na masę oraz objętość popiołu powstającego w procesie spalania, wypełniła komorę spalania, ograniczając wielkość komory paleniskowej. Struktury delikatnego spieku niedopalonego paliwa spowodowały zaburzenia w strumieniu płomienia wewnątrz komory. Konsekwencją braku systematycznego sposobu odprowadzania popiołu jest negatywny wpływ na parametry pracy kotła. W celu ich ograniczenia konieczne jest zapewnienie intensywniejszych czynności eksploatacyjnych, polegających na częstszym usuwaniu popiołu z komory paleniskowej, jak w przypadku spalania peletu drzewnego.



Rys. 3.4. Objętość popiołu (UPS), pochodzącego ze spalania 100 kg paliwa w określonych cyklach.

4. Podsumowanie

Fundamentalnym zadaniem Strategii Rozwoju Energetyki Odnawialnej w Polsce jest rzetelne zbilansowanie i określenie technicznych możliwości pozyskania energii z dostępnych nośników odnawialnych oraz sposobów jego wykorzystania. 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 przestrzeni paleniska.

Przeprowadzony eksperyment wykazał minimalizację ilości popiołu poprzez zastosowanie wewnątrz komory spalania okładziny ceramiki glino-krzemianowej. Redukcję ilości wykazano zarówno w jednostce masy powstałych popiołów i spieków, jak również ich objętości. Jedynie w przypadku spalania mieszanki owsa i peletu drzewnego, odnotowano nieznaczny przyrost popiołu i spieku powstałego na palniku.

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 systematycznego usuwania popiołu z komory spalania, bądź uwzględniać ich magazynowanie poprzez dostosowanie geometryczne przestrzeni sedymentacyjnej.

Wykonano w ramach realizacji projektu NR14-0016-10 finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Literatura

1. Energia ze źródeł odnawialnych w 2011r. Informacje i opracowania statystyczne GUS, Warszawa 2012r.
2. Janicki M., Janicka A.: Potencjał energetyczny drewna pochodzącego z lasów i terenów leśnych. Problemy Inżynierii Rolniczej nr 4/2010, str. 49.
3. Janicka A., Janicki M.: Zmienność potencjału energetycznego słomy w latach 1998-2009. Ekopartner, 5 (223) maj 2010r.
4. Janicki M.: Potencjał energetyczny biomasy na tle innych nośników energii w Polsce. Materiały z II Międzynarodowej Konferencji „Nauka i Technika w Ochronie Środowiska”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Jelenia Góra 2005r.
5. Ściążko M., Zieliński H.: Termochemiczne przetwórstwo węgla i biomasy. Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Zabrze-Kraków 2003.
6. Kordylewski W.: Niskoemisyjne techniki spalania w energetyce. Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.
7. Kucowski J., Laudyn D., Przekwas M.: Energetyka a ochrona środowiska. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1997.
8. Olsson M: 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 2006.
9. Janicki M., Lech-Brzyk K.: 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 2006.

