

Mariusz FILIPOWICZ\*, Magdalena DUDEK\*\*, Agnieszka KRÓLICKA\*\*\*,  
Andrzej RAŹNIAK\*\*\*\*, Alicja RAPACZ-KMITA\*\*\*\*\*

## Wstępne badania nad optymalizacją procesu spalania paliw pochodzenia biomasowego w kotłach o małej mocy

**Streszczenie.** W Polsce istnieje znaczny, niewykorzystany potencjał energetyczny biomasy. Istotnym jego składnikiem jest słoma. Z kolei Polska jest zobowiązana do redukcji emisji CO<sub>2</sub> oraz zwiększenia udziału energii odnawialnej w całkowitej produkcji energii. Z zobowiązań tych można po części wywiązać się przez stosowanie na szerszą skalę biomasy w indywidualnych czy lokalnych systemach ciepłowniczych. Można to osiągnąć przez opracowanie konstrukcji i wprowadzenie na rynek jednostek efektywnie spalających biomasę. Możliwe to jest także przez opracowanie efektywniejszych sposobów spalania dla istniejących i pracujących u użytkowników jednostek.

W artykule zostaną przedstawione wyniki wstępnych badań nad optymalizacją procesu spalania słomy pod kątem wykorzystania jej jako paliwa w kotłach energetycznych. Metodami analizy termicznej (DTA, TG) zbadano efekty cieplne zachodzące podczas spalania próbek słomy. W trakcie tych badań dokonano również analizy składu wydzielających się produktów gazowych. Zmiany składu fazowego otrzymanych popiołów ze spalania paliwa biomasowego określono metodą rentgenowskiej analizy dyfrakcyjnej XRD. Obserwacji budowy morfologicznej popiołów dokonano metodą mikroskopii skaningowej. Na podstawie tych badań stwierdzono, że jednym z czynników determinujących zmiany składu fazowego,

---

\* Dr hab. inż., \*\* Dr inż., \*\*\*\* Mgr inż. – Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, Katedra Zrównoważonego Rozwoju Energetycznego, Kraków.

\*\*\* Dr – Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki, Katedra Technologii Materiałów Budowlanych, Kraków.

\*\*\*\*\* Dr inż. – Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki, Katedra Technologii Ceramiki, Kraków.

czy budowy morfologicznej popiołów są warunki spalania (np. temperatura powietrza dostarczanego do spalania) oraz właściwości paliwa (np. wilgotność). Wstępne wyniki przeprowadzonych badań jednoznacznie wskazują na znaczny wpływ wymienionych czynników na przebieg procesu spalania, potwierdzając konieczność opracowania założeń algorytmu sterowania procesem spalania. Algorytm taki zostałby zaimplementowany w sterownikach dla efektywnych energetycznie i ekologicznie kotłów na biomasę.

SŁOWA KLUCZOWE: biomasa, słoma, kocioł, popiół, skład chemiczny

## Wprowadzenie

Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii niesie ze sobą wiele korzyści, jednak ich zastosowanie napotyka na szereg barier. W celu ich eliminacji wiele krajów wdraża odpowiednie instrumenty prawno-administracyjne i rozwiązania systemowe, które można określić pod wspólnym terminem „mechanizmy wsparcia” lub „systemy wsparcia”. Rozwiązania te skupiają się na trzech głównych aspektach związanych z finansowym wsparciem rozwoju sektora energetyki odnawialnej (tzw. system płatności), redukcją barier administracyjnych oraz sieciowych, a głównym ich celem jest zwiększenie udziału energii odnawialnej w bilansie energetycznym (Soliński 2008).

Biomasa jest jedną z form energii odnawialnej, którą można w sposób stosunkowo łatwy wykorzystać w energetyce opartej na surowcach kopalnych. W energetyce zawodowej (a więc w elektrowniach i elektrociepłowniach), aby sprostać wymogom stawianym w regulacjach prawnych w zakresie wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych, jak i limitów na emisję CO<sub>2</sub>, zaczęto stosować biomasę stałą pochodzenia roślinnego jako dodatek do spalanego węgla (Mirowski, Surma 2008). Jednakże ta metoda pozyskiwania „czystej energii budzi poważne zastrzeżenia techniczne (np. Siwek, Panaś 2011), ekologiczne (np. Guła, Mirowski, Wajss 2011; Guła, Mirowski, Wolszczak 2010; Guła, Wajss, Goryl 2011) i ekonomiczne (Figórski, Guła, Wajss 2011). W tej sytuacji powstaje pytanie, jak można optymalnie wykorzystać dostępne zasoby biomasy dla celów energetycznych. W pracy (Guła, Mirowski, Polak 2012) wskazano na olbrzymi potencjał redukcji emisji CO<sub>2</sub>, zawarty w wykorzystaniu lokalnych zasobów biomasy dla celów grzewczych na terenach wiejskich, jaki może być zrealizowany przy zaangażowaniu niewielkiej części środków publicznych przeznaczanych obecnie na wsparcie współspalania biomasy w elektrowniach. Takie rozwiązanie może być konkurencyjne dla spalania węgla na terenach wiejskich, co ma szczególne znaczenie dla naszego kraju (Szlachta 2005; Gradziuk 2006). Modelowe obliczenia wykonane pakietem *Invert* (Kranzl i in. 2006) pokazały, że około 400 tys. gospodarstw rolnych w kraju mogłoby przejść z używania niskojakościowego węgla na produkowaną lokalnie biomasę.

Powszechne zastosowanie tego podejścia wymaga jednak dopracowania się takiej technologii spalania biomasy w kotłach biomasowych niewielkiej mocy (do ok. 300 kW), która zapewniłaby sprawność powyżej 90% i niską emisyjność, zwłaszcza pyłów, co wymaga

odpowiednich badań. Ostatnio polski zespół z udziałem AGH opracował poświęcony temu zagadnieniu projekt badawczo-wdrożeniowy (Cieślak, Guła, Skrzypczak, Wajss 2011), na który uzyskał grant EIT (*European Institute of Technology*). Projekt będzie realizowany w ramach europejskiego *Knowledge and Innovation Community* (KIC) w latach 2012–2014. Badania przedstawione w niniejszej pracy związane są tematycznie z w/w problematyką.

Słoma jest pozostałością po produkcji roślinnej. Słomę wykorzystuje się jako ściółkę i pokarm w hodowli zwierząt oraz do nawożenia pól. Produkcja słomy w Polsce to około 30 milionów ton. W większości przypadków niewykorzystana słoma spalana jest na polach, co jest szkodliwe dla środowiska przyrodniczego: wyjaławia glebę, niszczy owady, gady i małe ssaki, a także jest przyczyną powstania wielu pożarów (Grzybek, Gradziuk 2001). Słoma jest paliwem ekologicznym. Emisja szkodliwych dla środowiska gazów powstających przy spalaniu tego materiału jest (w porównaniu do tradycyjnych paliw kopalnych) bardzo niska. Pyły powstające podczas spalania słomy, ze względu na swój skład chemiczny, nie stanowią zagrożenia dla środowiska (Juroszek 2011; Jesionek, Soliński 2004)

Słoma stosowana jako paliwo jest w postaci sprasowanej o stopniu zgęszczenia  $130 \text{ kg/m}^3$  (małe bele, kostki),  $150 \text{ kg/m}^3$  (bele cylindryczne),  $180 \text{ kg/m}^3$  (wielkoformatowe bele prostopadłościowe). Najczęściej spotyka się kostki o wymiarach  $42 \times 42 \times (80-120)$  cm i masie 8–15 kg. Taką słomę składa się na polach w stertach przykrywanych u góry strzechą z luźnej słomy lub plandeką, albo w tradycyjnych stodołach czy wiatkach. Sposób składowania ma wpływ na jakość energetyczną paliwa. Złe składowanie może spowodować pogorszenie energetycznych parametrów słomy (zwiększenie zawartości wilgoci). W niektórych przypadkach (podręczny magazyn w kotłowni) możliwe jest częściowe podsuszenie słomy, jednakże praktycznie niemożliwe jest usunięcie zawilgocenia wewnątrz bel. Słoma w warunkach polskich różni się swoimi podstawowymi parametrami, przeciętnie wartość opałowa wynosi od około 16,1 do 17,3 MJ/kg, zawartość części lotnych około 70–73%, zawartość wilgoci (słoma sucha) około 10–20%, zawartość popiołu około 4,3–6,5% (i mniej).

Skład chemiczny słomy jest następujący: C (42–46%), H (5,0–5,2%), O<sub>2</sub> (37–45%), Cl (0,2–0,75), N<sub>2</sub> (0,2–0,5%), S (0,10–0,16%), popiół (3,0–6,5%). Głównymi składnikami gazów wylotowych powstających podczas spalania są (kg/GJ): CO<sub>2</sub> (~100), NO<sub>x</sub> (0,16), SO<sub>2</sub> (0,07), pyły (0,2). Można wyróżnić dwie odmiany słomy: żółtą i szarą. Ich właściwości fizykochemiczne są zbliżone, lecz słoma szara, charakteryzuje się mniejszą zawartością chloru (Basu 2010).

Sytuacja opisana we wstępie wskazuje, że ze względów ekonomicznych, logistycznych i energetycznych najbardziej efektywne jest lokalne wykorzystanie biomasy. Dlatego należy opracować ekonomicznie dostępne modele kotłów o mocy do około 300 kW, uniwersalne ze względu na paliwo biomasowe (rodzaj i wilgotność), o wysokiej sprawności (ponad 90%) oraz o niskiej emisji zanieczyszczeń, w tym pyłów, spełniające normy UE (Mirowski, Szurlej, Wielgosz 2005). Prace aplikacyjne dążące do wdrożenia słomy jako paliwa powinny obejmować również badania dotyczące optymalizacji procesów spalania w kotłach niskoenergetycznych (Szmidt 2010; Szyszlak-Bargłowicz 2009).

Znajomość podstawowych zależności jakościowych i ilościowych zachodzących podczas spalania słomy ma zasadnicze znaczenie przy projektowaniu instalacji przemysłowych

wykorzystujących energetycznie biomasę. Jedną z dość często przytaczanych technik badania procesu spalania biomasy są metody termiczne z wykorzystaniem termogravimetrii i spektrometrii masowej (Stolarek, Ledakowicz 2006; Kumar i in. 2008; Zhaosheng i in. 2008; Reina i in. 1998).

Drugim istotnym aspektem opracowywanej technologii wykorzystania biomasy, powinna być możliwość wykorzystania pozostałości po spalaniu (popiołów) jako surowców wtórnych w zastosowaniach przemysłowych. Obecnie w przemyśle materiałów budowlanych prowadzone są liczne prace badawczo-rozwojowe zmierzające do wykorzystania popiołów lotnych ze współspalnia węgla kamiennego i biomasy w elektrowniach jako jednego ze składników stosowanych do produkcji betonu komórkowego (Łaskawiec i in. 2008). Znajomość właściwości fizykochemicznych popiołów powstających w kotłach energetycznych jest bardzo istotna dla ich zastosowania w różnych gałęziach przemysłu ceramicznego.

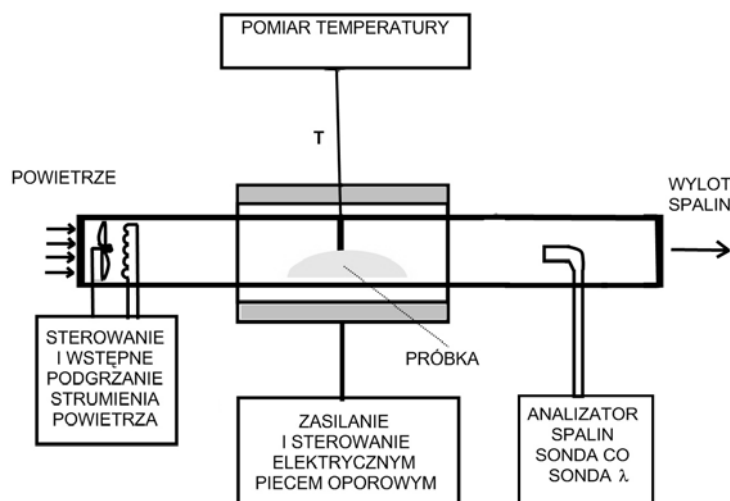
Celem tej pracy było przedstawienie wyników wstępnych badań dotyczących optymalizacji przebiegu procesu spalania słomy jako paliwa zmierzających do opracowania algorytmu sterowania procesem spalania w kotłach, a także określenie właściwości fizykochemicznych popiołów powstałych podczas jej spalania pod kątem ich dalszego wykorzystania.

## Część eksperymentalna

W badaniach użyto próbki słomy suchej i mokrej. Badane próbki słomy poddano wstępnej analizie technicznej określając wilgotność i zawartość popiołu oraz wyznaczono ciepło spalania i wartość opałową zgodnie z obowiązującymi normami (PN/G-04513 i PN-ISO 1928) przy użyciu kalorymetru firmy Leco. Zmiany zachodzące podczas ogrzewania próbek słomy w powietrzu w temperaturach od 25 do 800°C określono metodami analizy termicznej (termogravimetrii TG, termicznej analizy różnicowej DTA). Pomiary wykonywano przy użyciu aparatury SDT 2960 firmy TA Instruments. W trakcie tych badań dokonano analizy wydzielających się gazów za pomocą kwadрупolowego spektrometru masowego (typ Thermostat firmy Balzers Instruments). Skład fazowy próbek słomy ogrzewanych w powietrzu w temperaturach od 25 do 800°C zbadano metodą rentgenowskiej analizy dyfrakcyjnej XRD (FPM Seifert XRD7). Budowę morfologiczną proszków będących pozostałością po spalaniu słomy obserwowano pod skaningowym mikroskopem elektronowym SEM (Nano Nova SEM). W trakcie tych obserwacji analizowano też skład chemiczny próbek za pomocą metody EDX.

Próbki popiołów o niewielkiej masie około 10 g do badań przygotowywano na zbudowanym stanowisku laboratoryjnym w Katedrze Zrównoważonego Rozwoju Energetycznego Wydziału Energetyki i Paliw Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

W skład tego stanowiska (rys. 1) wchodzi: oporowy piec elektryczny wraz z regulatorem temperatury, wentylator z regulowanym nadmuchem powietrza, reaktor badawczy ze szkła



Rys. 1. Schemat stanowiska laboratoryjnego do badania procesów spalania paliw pochodzenia biomasowego

Fig. 1. A diagram of a test bench for examining biomass fuel combustion processes

kwarcowego, termopary oraz analizatory do pomiaru zawartości tlenu lub CO w gazach wylotowych.

W tak przygotowanym reaktorze ze szkła kwarcowego umieszczano próbkę słomy o masie około 8 g. Temperaturę przy próbce słomy mierzono za pomocą termopary typu K. Próbkę suchej i wilgotnej słomy umieszczano w środkowej strefie gazoszczelnej rury kwarcowej i następnie wkładano ją do rurowego pieca elektrycznego. Badania spalania próbek przeprowadzono w strumieniu nawiewanego powietrza. Próbkę podgrzewano do temperatury 650°C. Temperaturę tę ustalono na podstawie wcześniejszych badań wykonanych metodami analizy termicznej DTA, TG.

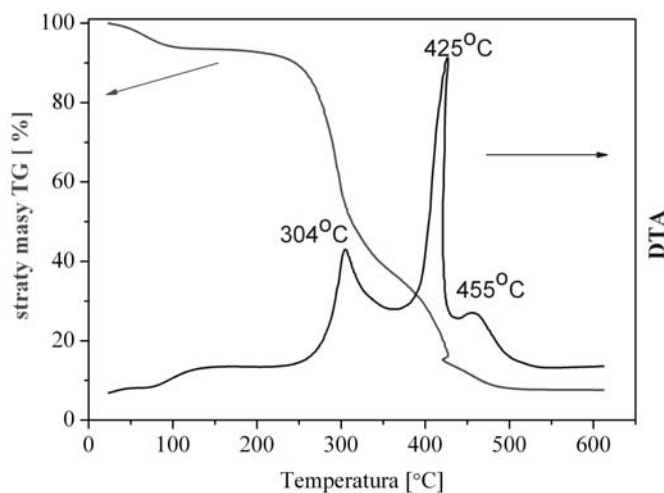
W dalszym etapie prac doświadczalnych przeprowadzono analizę pozostałości otrzymanych ze spalania paliw biomasowych zawierających słomę we wsadowym kotle energetycznym na biomasę EKOPAL RM40 o mocy 180 kW firmy Metalerg, będącej znanym producentem takich kotłów dla firm i odbiorców indywidualnych.

## Wyniki badań

Próbki słomy powietrzno suchej poddano badaniom analizy technicznej określając następujące parametry: wilgotność w stanie powietrzno-suchym  $W^a = 8,83\%$ , zawartość popiołu  $A^a = 2,92\%$ . Oznaczenie ciepła spalania i obliczenie wartości opałowej dokonano zgodnie z obowiązującymi normami (PN/G-04513 i PN-ISO 1928) korzystając z analizatora Leco 350, otrzymując odpowiednio następujące wartości  $Q_s^a = 16\,749$  kJ/kg i  $Q_i^a = 15\,400$  kJ/kg.

Zastosowanie metod analizy termicznej (termograwimetrii TG, termicznej analizy różnicowej DTA) pozwoliło na zbadanie zmian zachodzących podczas spalania słomy żółtej w powietrzu.

Na rysunku 2 przedstawiono krzywą TG, DTA zarejestrowaną dla próbki słomy ogrzewanej w temperaturach od 25 do 600°C.



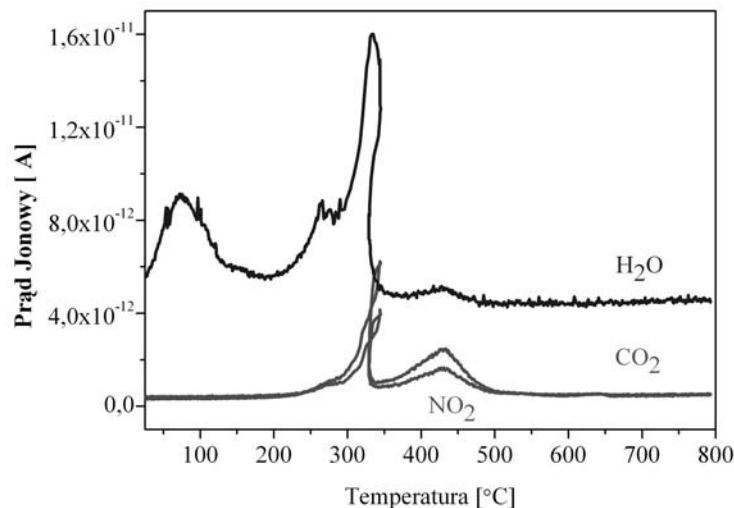
Rys. 2. Krzywa TG/DTA zarejestrowana podczas spalania próbki słomy w powietrzu

Fig. 2. A TG/DTA curve recorded during the combustion of a straw sample in air

Na podstawie krzywej DTA można stwierdzić, że pierwszym efektem termicznym widocznym na krzywej jest oddawanie wody przez próbkę (bardzo mały endotermiczny pik w temperaturze około 100°C). Kolejny efekt egzotermiczny w temperaturze około 300°C związany jest z początkiem spalania się słomy. Dalszy przyrost temperatury powoduje pojawienie się kolejnych znaczących efektów egzotermicznych (ok. 425°C) oraz (455°C) związanych ze spalaniem się tej próbki. Na podstawie analizy krzywej strat masy (TG) w temperaturach powyżej 500°C nie obserwuje się już znaczących zmian masy, co może wskazywać na zakończenie procesu spalania. Na kolejnym rysunku 3 przedstawiono wyniki analizy chemicznej składu jakościowego gazów wydzielających się podczas spalania badanej próbki.

Na podstawie analizowanych produktów gazowych metodą spektrometrii masowej można stwierdzić, że w początkowym etapie ogrzewania próbki (od temp pokojowej ok. 25°C do ok. 100°C) wydzielają się znaczne ilości H<sub>2</sub>O, będące wynikiem suszenia się próbki.

W temperaturze około 300°C zaczynają być już wykrywalne znaczne ubytki CO<sub>2</sub> (związane ze spalaniem) oraz tlenków azotu NO<sub>2</sub> i NO związane z rozkładem termicznym próbki oraz jej początkowym spalaniem. Z kolei w temperaturze około 400°C intensywność wydzielania się tych gazów (CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>) znacznie się zmniejsza, co może wskazywać na zakończenie procesu spalania się próbki.



Rys. 3. Analiza składu chemicznego wydzielających się gazów w trakcie spalania słomy, dokonana podczas badań TG/DTA, za pomocą spektrometru masowego

Fig. 3. An analysis of gasses produced during TG/DTA done with a mass spectrometer

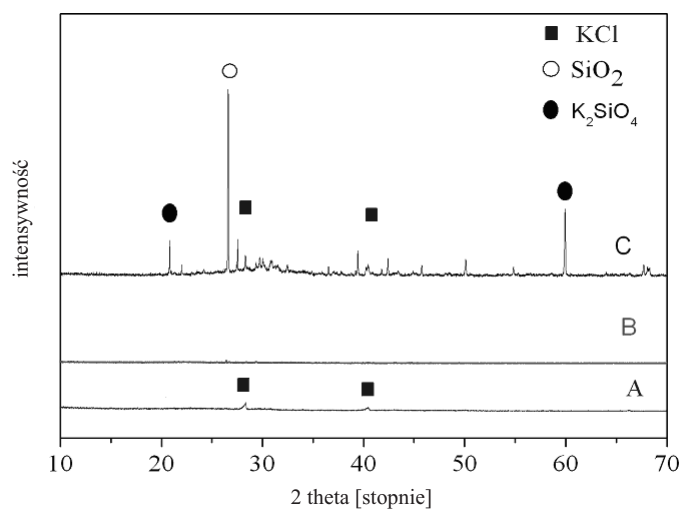
Metodę dyfrakcyjnej analizy fazowej XRD zastosowano do badania zmian składu fazowego sproszkowanej pozostałości po ogrzewaniu słomy w temperaturach od 300 do 650°C. Na rysunku 4a zestawiono dyfraktogramy XRD zarejestrowanych dla proszkowych pozostałości po ogrzewaniu słomy w temperaturach około 320°C (A), 420°C (B) oraz 650°C (C).

Na podstawie rysunku 4b można stwierdzić, że dyfraktogram pochodzący z temperatury 320°C (A) charakteryzuje się dużą obecnością tła (charakterystycznego dla substancji amorficznych, co może wskazywać na znaczną ilość powstałego węgla). Wraz z przyrostem temperatury do 420°C (B) w zakresie kątów ( $2\theta$ ) 30° oraz 40° na dyfraktogramie pojawiają się słabo wykształcone refleksy, odpowiadające krystalizacji chlorku potasu (KCl). Z kolei na dyfraktogramie XRD, zarejestrowanym dla próbki słomy spalanej w temperaturze 650°C (C), widoczne są refleksy SiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> oraz KCl.

W badanej próbce pozostałości po spalaniu biomasy (słomy) w kotle energetycznym stwierdzono występowanie następujących faz krystalicznych: kwarcu (SiO<sub>2</sub>), tlenku żelaza (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), chlorku potasu (KCl) oraz siarczanu potasu (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

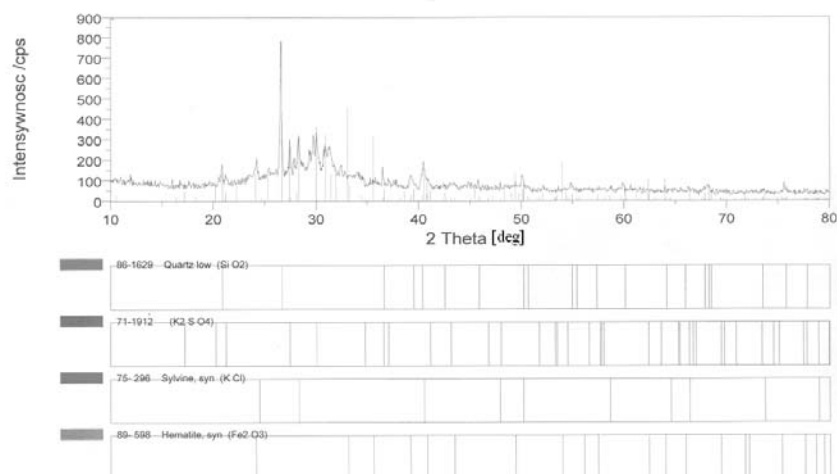
Jak wynika z porównania dyfraktogramów XRD z rysunku 4a i b wynika, że skład fazowy pozostałości po spalaniu biomasy w warunkach laboratoryjnych jest bardzo zbliżony w odniesieniu do popiołu pochodzącego z kotła energetycznego.

W celu zbadania wpływu parametrów prowadzenia procesu spalania, czyli temperatury powietrza dostarczanego do spalania oraz wilgotności słomy, powietrze wstępnie podgrzewano na stanowisku laboratoryjnym, a spalanie prowadzono dla próbek słomy o różnej wilgotności. Podwyższenie temperatury powietrza dostarczanego do spalania powoduje obniżenie temperatury zapłonu słomy w stosunku do temperatury zapłonu tej samej słomy



Rys. 4a. Dyfraktogram XRD zarejestrowany dla sproszkowanego popiołu otrzymanego ze spalania próbek słomy w warunkach laboratoryjnych A – 320°C, B – 420°C, C – 650°C

Fig. 4a. An X-ray diffraction pattern recorded for powdered cinders retrieved from the combustion of straw samples in a laboratory A – 320°C, B – 420°C, C – 650°C



Rys. 4b. Dyfraktogram XRD zarejestrowany dla sproszkowanego popiołu otrzymanego ze spalania próbek słomy w kotle energetycznym

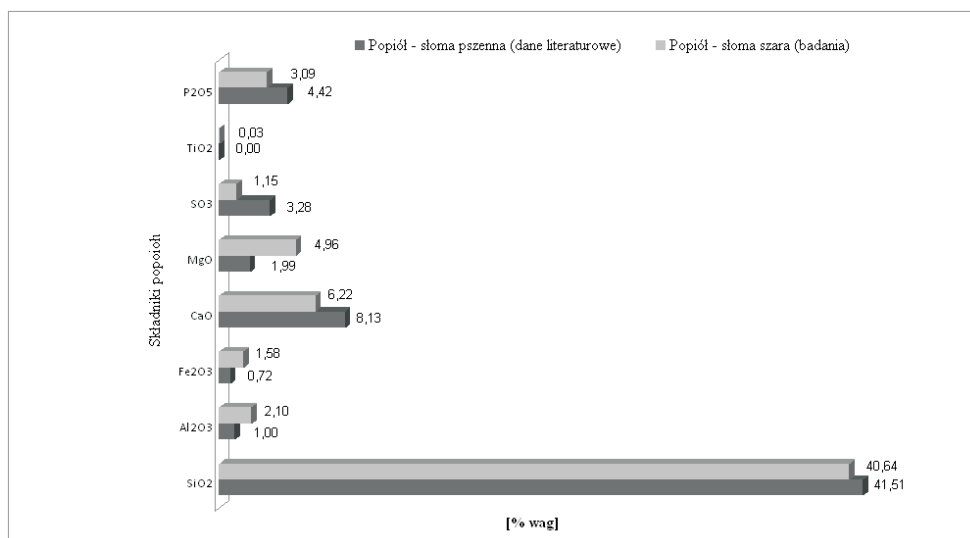
Fig. 4b. An X-ray diffraction pattern recorded for powdered cinders retrieved from the combustion of straw samples in a power boiler

spalanej w powietrzu niepodgrzanym. Najwyższą temperaturę zapłonu zaobserwowano dla słomy mokrej spalanej w powietrzu o temperaturze otoczenia. Powyższe obserwacje potwierdzają wpływ zawilgocenia paliwa na proces spalania oraz konieczność takiego przy-



gotowania słomy do spalania (magazynowanie), aby była ona o jak najniższej możliwej wilgotności.

Na rysunku 5 zamieszczono wyniki analizy chemicznej tlenków, będących podstawowymi składnikami analizowanego popiołu. Dla porównania zamieszczono także dane z literatury dla słomy pszennej (Kordylewski 2008).



Rys. 5. Analiza składu chemicznego pozostałości po spalaniu biomasy w kotle Metalerg [% wag.]

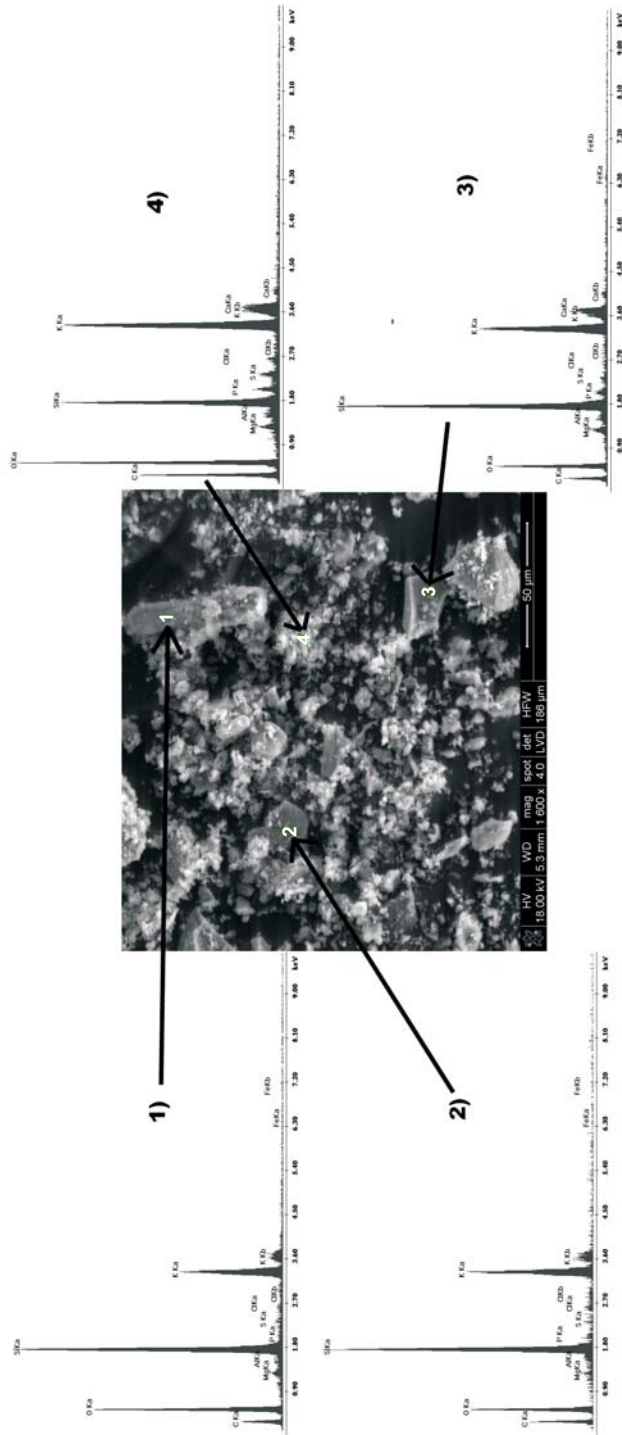
Fig. 5. A chemical analysis of biomass combustion residues produced in a Metalerg boiler [wt. %]

Prezentowane wyniki analizy chemicznej wykonanej dla pozostałości po spalaniu próbki słomy w kotle Metalerg wskazują, że głównymi składnikami są tlenki alkaliczne (MgO, CaO), tlenki metali (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>) oraz tlenek fosforu (V) (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Zastosowanie tego popiołu jako surowca w przemyśle materiałów budowlanych wymaga opracowania metody usuwania P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (np. poprzez wymywanie), którego zbyt duża zawartość może pogarszać właściwości użytkowe materiałów budowlanych.

Na rysunkach 6a i 6b przedstawiono obrazy budowy morfologicznej sproszkowanych pozostałości pochodzących ze spalania próbek słomy w warunkach laboratoryjnych (a) oraz kotle energetycznym Metalerg (b).

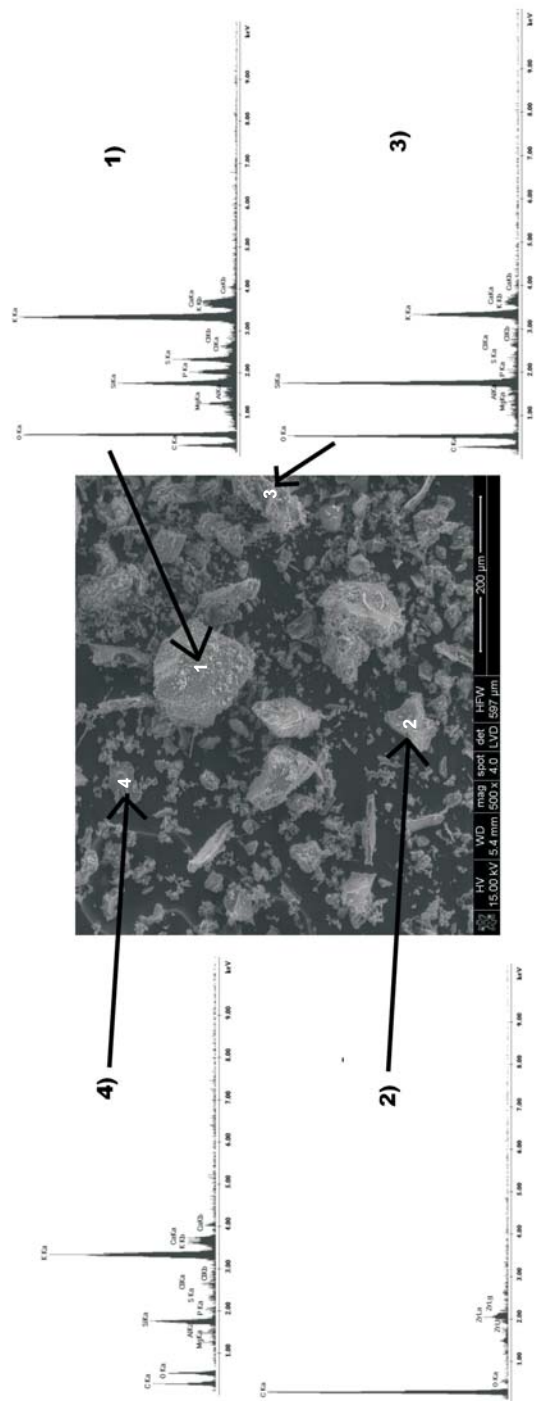
Na podstawie porównania budowy morfologicznej sproszkowanych pozostałości po spalaniu słomy w warunkach laboratoryjnych oraz docelowym kotle Ekopal RM40 firmy Metalerg można stwierdzić, że w obu przypadkach cząstki są pokroju izometrycznego, o stosunkowo zbliżonym składzie chemicznym; ich rozmiary wynoszą od około 0,5 μm do 50 μm.

Przedstawione badania wskazują na przydatność zastosowanej metodyki badań do analizy produktów spalania paliw pochodzenia biomasowego, a także możliwości wykorzystania ich do zbadania właściwości popiołów jako surowców dla przemysłu ceramicznego.



Rys. 6a. Obraz SEM sproszkowanego popiołu powstałego ze spalania biomasy w warunkach laboratoryjnych wraz z analizą składu chemicznego próbek za pomocą metody EDX. 1,2,3,4 – wyniki analizy w poszczególnych punktach

Fig. 6a. An SEM image of powdered cinders retrieved from biomass combustion in a laboratory, together with an EDX technique of chemical analysis of samples



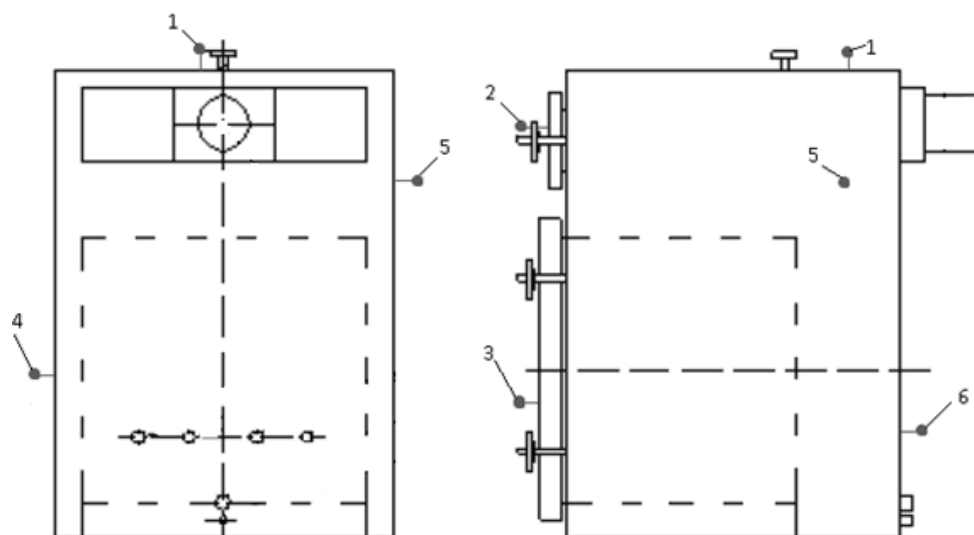
Rys. 6b. Obraz SEM sproszkowanego popiołu powstałego ze spalania biomasy w kotle energetycznym Ekopal RM40 Metalerg wraz z analizą składu chemicznego próbek za pomocą metody EDX; 1, 2, 3, 4 – wyniki analizy w poszczególnych punktach

Fig. 6b. An SEM image of powdered cinders retrieved from biomass combustion in an Ekopal RM40 Metalerg boiler with an EDX technique of chemical analysis of samples

Sterowanie przebiegiem procesu spalania w docelowym kotle energetycznym jest zadaniem bardzo trudnym, ze względu na skomplikowany rozkład temperatur w różnych częściach kotła. Badana słoma spalana była we wsadowym, przeciwpądowym kotle na biomasę EKOPAL RM 40 firmy Metalerg (Cieślak 2011). Kocioł ten jest wyposażony w komercyjny sterownik sterujący procesem spalania na podstawie pomiaru temperatury medium grzewczego w płaszczu kotła oraz temperatury spalin. Sterowanie polega na regulacji ilości nawiewanego powietrza do komory spalania. Więcej informacji o układzie badawczym i procesie sterowania znaleźć można w pracy (Filipowicz i in. 2011).

Wstępne dane sugerują, że nie wszystkie komercyjne sterowniki przeprowadzają proces spalania efektywnie, doprowadzając do całkowitego spalania załadowanego paliwa.

W badanej instalacji przeprowadzono dokładniejsze pomiary temperatury w komorze spalania kotła. Użyto pięciu termopar, które wsuwane były do komory spalania przygotowanymi przez producenta otworami przechodzącymi przez płaszcz wodny. Temperatura spalin mierzona była w czopuchu za pomocą czujnika typu PT100, przedstawionego na rysunku 7 jako element 1.



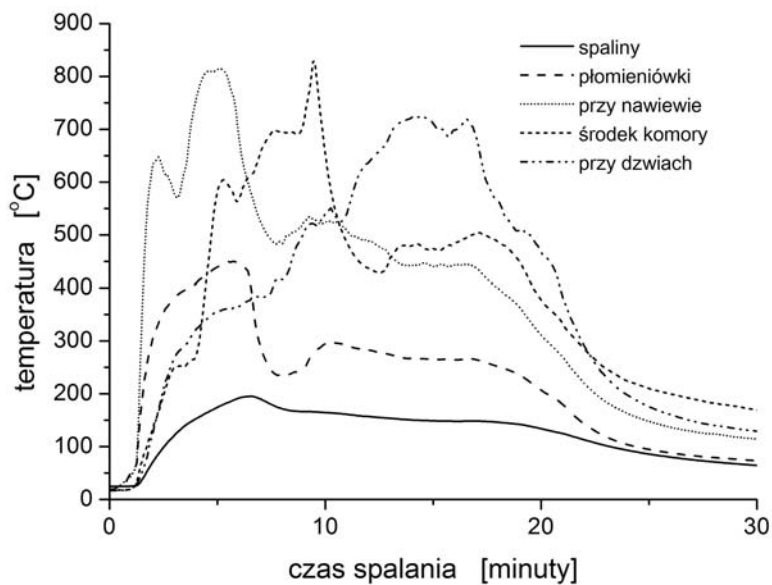
Rys. 7. Rozmieszczenie czujników pomiarowych temperatury

1 – spalin, 2 – w płomieniówkach, 3 – przy drzwiach, 4 – od strony sterownika, 5 – od strony podajnika, 6 – przy wentylatorze nawiewowym

Fig. 7. Temperature sensors location

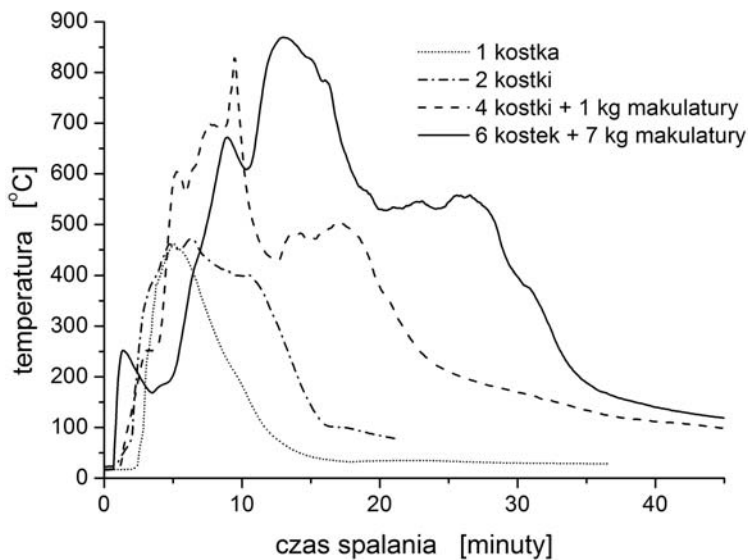
1 – emission, 2 – in combustion tubes, 3 – by the door, 4 – on the side of the controller, 5 – on the side of the feeder, 6 – by the ventilation fan

Możliwa jest regulacja głębokości wsunięcia termopary do komory spalania do około 40 cm. W omawianym pomiarze głębokość ta wynosiła około 25 cm. Dane pomiarowe były odczytywane i rejestrowane za pomocą modułów pomiarowych firmy WAGO. Wybrane wyniki pomiarowe przedstawione są na rysunkach 8 i 9.



Rys. 8. Przebieg temperatur spalania biomasy w różnych punktach komory spalania. Opisy krzywych określają miejsce, w którym umieszczona była termopara

Fig. 8. Temperature during biomass combustion in different areas of the combustion chamber (legend specifies, location of thermocouples)



Rys. 9. Przebieg temperatur spalania w środkowej części komory (od strony sterownika, czujnik nr 4) dla czterech wielkości wsadu (kostka to około 12,2 kg sprasowanej szarej słomy)

Fig. 9. Temperature in the central part of the chamber (the controller side, 4<sup>th</sup> sensor) during combustion of four batch sizes (a block is ca. 12,2 kg of pressed grey straw)

Na rysunku 8 widoczny jest przebieg temperatur spalania biomasy w wybranych miejscach kotła. Jako wsadu użyto sprasowanej szarej słomy o masie około 50 kg z dodatkiem jednego kilograma makulatury (papier z niszczarki). Badania były prowadzone dla słomy o wilgotności około 12%. Widoczne jest, że w pewnych miejscach komory spalania temperatura może przekroczyć 800°C, chociaż najczęściej wynosi około 400–600°C, a najwyższa temperatura występuje w obszarze pomiędzy wlotem powietrza do komory spalania a środkiem komory. W dalszej części komory (przy drzwiach) temperatura jest niższa. Porównując przebieg czasowych krzywych wlot powietrza–środek komory spalania–drzwi, widzimy przesuwanie się frontu spalania biomasy od miejsca zapalenia do drzwi. Produkty zgazowania dopalane są w płomieniówkach, gdzie temperatura jest niższa niż w komorze spalania i dochodzi do około 450°C. Po oddaniu ciepła spaliny z płomieniówek wychodzą przez czopuch do komina. Przebieg temperatury spalin w czopuchu odzwierciedla przebieg temperatury w płomieniówkach, jednak niższe są wartości temperatur, osiągając wartość maksymalną około 200°C.

Zaobserwowano także silną zależność temperatury spalania biomasy w zależności od wielkości wsadu. Jest to widoczne na rysunku 9, gdzie przedstawione są wyniki dla czterech wsadów: 1 – 12 kg (1 kostka), 2 – 25 kg biomasy, 3 – 50 kg biomasy z dodatkiem 1 kg makulatury i 4 – 75 kg biomasy i 7 kg makulatury.

Przeprowadzone badania mogą służyć jako dane wejściowe do opracowania nowych koncepcji sterowania procesem spalania. Pomiary rozkładu temperatur w wybranych punktach komory spalania dostarczają znacznie więcej informacji w porównaniu ze śledzeniem jedynie temperatury spalin. Kontrola procesu spalania oparta na rozkładzie temperatury w kotle pozwoli efektywnie spalać odrębne partie słomy, różniące się następującymi parametrami: gęstością (tj. stopniem sprasowania), wilgotnością, wielkością kostek czy bel, charakterystyką energetyczną czy ewentualnymi zanieczyszczeniami. Jest to o tyle istotne, że parametry słomy znacznie różnią się między sobą i są mocno zależne od sposobu uprawy danego zboża, gleby, warunków klimatycznych czy też warunkami składowania i prasowania. Zróżnicowanie właściwości słomy utrudnia opracowanie uniwersalnego, jednako efektywnego sterownika dla kotła zasilanego biomasą.

## Podsumowanie

Biomasa stanowi oczywistą szansę na rozwój w Polsce energetyki opartej na odnawialnych źródłach energii. Jednak przed wykorzystaniem biomasy na tak dużą skalę stoi szereg wyzwań, można tu wymienić bariery prawno-administracyjne czy systemowe. Aby je pokonać wymagane jest przede wszystkim uporanie się z problemami technicznymi związanymi ze spalaniem biomasy, tj. opracowaniem efektywnych i niskoemisyjnych jednostek o mocy odpowiedniej w zastosowaniach małej skali (indywidualne gospodarstwa, lokalne sieci ciepłownicze). Pokonanie barier technicznych może dać sygnał do podjęcia działań mocniej promujących to źródło energii.

Niniejszy artykuł może być traktowany jako wkład w to zagadnienie. Poświęcony jest wyznaczaniu podstawowych charakterystyk słomy jako paliwa poprzez zastosowanie szeregu metod analitycznych chemii i materiałoznawstwa. Opisuje także wyniki badań testowych na jednostce kotła o mocy 180 kW. Wymienione prace pokazują, że problem stosowania słomy jako paliwa wiąże się z dużą niestabilnością tego paliwa i wskazują na potrzebę uwzględnienia tego faktu w przyszłych konstrukcjach kotłów oraz opracowania uniwersalnych i zaawansowanych algorytmów sterowania spalaniem słomy.

## Literatura

- BASU P., 2010 – Biomass gasification and pyrolysis. Practical Design and Theory. Academic Press Elsevier.
- CIEŚLAK J., 2011 – MetalERG J.M.J. Cieślak Sp.J. KOTŁY NA BIOMASĘ; www.metalerg.pl.
- CIEŚLAK J., GUŁA A., SKRZYPCZAK G., WAJSS P., 2011 – Bio-Eco-Matic Proposal, Kraków, grudzień 2011.
- FIGÓRSKI A., GUŁA A., WAJSS P., 2011 – Wykorzystanie biomasy – wyniki unijnego projektu 4Biomass. Czysta Energia nr 7/8, str. 7.
- FILIPOWICZ i in. 2011 – FILIPOWICZ M., DUDEK M., RAŹNIAK A., GREGA W., KREFT W., ROSÓŁ M., 2011 – Monitoring temperatury komory kotła na biomasę oraz instalacji grzewczej. Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja t. 42, nr 7–8, s. 310–316.
- GRADZIUK P., 2006 – Ekonomiczne i ekologiczne aspekty wykorzystania słomy na cele energetyczne w lokalnych systemach grzewczych. Acta Agrophysica nr 8, s. 591–601.
- GRZYBEK A., GRADZIUK P., KOWALCZYK K., 2001 – Słoma–energetyczne paliwo. Warszawa.
- GUŁA A., MIROWSKI T., WOLSZCZAK J., 2010 – Biomass as a limited resource – Polish perspective. Proc. of 1st Polish-Icelandic Conference on Renewable Energies, Warszawa 21–21.05.2010, str. 113–121.
- GUŁA A., MIROWSKI T., WAJSS P., 2011 – Heat production from biomass in Poland — Rozvoj výroby energie-tepla na báze biomasy v Pol'sku. Proceedings of 19th Int. Conf VYKUROVANIE, str. 255–263.
- GUŁA A., MIROWKI T., POLAK A., 2012 – Energetyczne wykorzystanie Biomasy, rozdział w „Zarys i Perspektywy Energetyki Polskiej”. Wyd. AGH.
- GUŁA A., WAJSS P., GORYL W., 2012 – referat na Seminarium Smart Grids, AGH, 2.06.2011 (ukazuje się w Przeglądzie Elektrotechnicznym 2012).
- JESIONEK J., SOLIŃSKI I., 2004 – Biomasa–ekologiczne i odnawialne paliwo XXI wieku. Polityka Energetyczna t. 7, z.1, s. 37–119.
- JUROSZEK Z., 2011 – Wpływ lokalnych uwarunkowań na koszty jednostkowe pozyskania paliw odnawialnych. Polityka Energetyczna t.14, z.1, s.179–196.
- KORDYLEWSKI W., 2008 – Spalanie i Paliwa. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- KRANZL L., ..., GUŁA A., FIGÓRSKI A., 2006 – Deriving efficient policy portfolios promoting sustainable energy systems – Case studies applying Invert simulation tool. Renewable Energy 31, 2393–2410.
- KUMAR i in. 2008 – KUMAR A., WANG L., DZENIS Y., JONES D., HANNA M.A., 2008 – Thermogravimetric characterization of corn stover and pyrolysis feedstock. Biomass and Bioenergy vol. 32, p. 460–467.

- ŁASKAWIEC i in. 2008 – ŁASKAWIEC K., ZAPOTOCZNA-SYTEK G., GÓRSKA B., 2008 – Zastosowanie popiołów lotnych ze współspalania węgla kamiennego i biomasy do wytwarzania betonu komórkowego. *Ceramika* nr 103, s. 1081–1088.
- MIROWSKI T., SZURLEJ A., WIELGOSZ G., 2005 – Kierunki energetycznego wykorzystania biomasy w Polsce. *Polityka Energetyczna* t. 8, z. 2, s. 55–75.
- MIROWSKI T., SURMA T., 2008 – Paliwa biomasowe w sektorze wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w Polsce. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* t. 24, s. 211–221.
- REINA i in. 1998 – REINA J., VELO E., PUIGJANER L., 1998 – Thermogravimetric study of the pyrolysis of waste wood. *Thermochimica Acta* vol. 320, p. 161–167.
- SIWEK T., PANAS K., 2011 – Negative impact of co-firing biomass on heating surfaces of steam boilers. *Polish Journal of Environmental Studies* vol. 20, no. 4A, s. 267–270.
- SOLIŃSKI B., 2008 – Rynkowe systemy wsparcia odnawialnych źródeł energii – porównanie systemu taryf gwarantowanych z systemem zielonych certyfikatów. *Polityka Energetyczna* t.11, z. 2, s. 107–117.
- STOLAREK P., LEDAKOWICZ S., 2006 – Badanie pirolizy biomasy z wykorzystaniem termogravimetrii i spektrometrii masowej. *Przemysł Chemiczny* t. 85, nr 8–9, s. 1154–1156.
- SZLACHTA J., 2005 – Analiza opłacalności ekonomicznej budowy kotłowni opalanych słomą oraz redukcji emisji gazów przy ich użytkowaniu. *Inżynieria Rolnicza* 7, s. 331–339.
- SZMIDT K., 2007 – Possibilities of utilization of straw for energetic purposes in the opinion of farmers from Lublin region. *Acta Sci. Pol., Oeconomia* t. 6, s. 105–113.
- SZYSZLAK-BARGŁOWICZ J., PIEKARSKI W., 2009 – Wykorzystanie biomasy jako element bezpieczeństwa energetycznego. *Wiadomości Elektrotechniczne* t. 3, s. 22–23.
- ZHAOSHENG i in. 2008 – ZHAOSHENG Y., XIAOQIAN M., AO L., 2008 – Kinetic studies on catalytic combustion of rice and wheat straw under air- and oxygen-enriched atmospheres, by using thermogravimetric analysis. *Biomass and Bioenergy* vol. 32, p. 1046–1055.

Mariusz FILIPOWICZ, Magdalena DUDEK, Agnieszka KRÓLICKA,  
Andrzej RAŻNIAK, Alicja RAPACZ-KMITA

## Initial research on optimizing the biomass fuel combustion process in low-power boilers

### Abstract

There exists a significant potential of unused biomass in Poland – consisting mostly of post-harvest straw. According to EU regulations, Poland has to reduce its CO<sub>2</sub> emission and increase the share of renewable energy in the energy mix. These obligations can be partly met by a widespread use of biomass in individual and small, local grid heating systems. This can be achieved through the introduction to the market of new, highly efficient biomass boilers, or by upgrading the existing ones



to achieve higher combustions standards. This is a very important issue for the environmental policy in Poland.

The article presents the results of an initial research on optimising the straw combustion process with respect to its use as fuel in dedicated biomass boilers. Heat effects that occur during combustion were investigated using the thermal analysis methods (DTA, TG). Composition of the emitted gaseous combustion products was examined. Changes in the phase composition of ashes obtained from burning of biomass fuel were determined with the use of XRD analysis. Observation of the morphological structure of the ashes was conducted with the use of the scanning microscopy technique. The influence of inlet air temperature and fuel humidity was assessed. Initial results of the conducted studies show the need for an algorithm controlling the biomass combustion processes for a wide range of biomass fuels. Such an algorithm should be applied in combustion control systems to increase the energy efficiency and environmental performance of biomass heating systems.

**KEY WORDS:** biomass, straw, boiler, ashes, chemical composition

