

Badanie topliwości popiołu metoda rurową jako przybliżona metoda określania składu biopaliw stałych

Streszczenie. Zaprezentowana praca przedstawia badanie topliwości popiołu metoda rurową jako przybliżona metoda określania składu biopaliw stałych. Analiza wyników potwierdza założoną tezę, że na podstawie badań topliwości popiołu można wnioskować o jakości i rodzaju materiału z jakiego zostały wykonane biopaliwa stałe. Dokładność metody będzie wyższa w przypadku stworzenia odpowiednio dużej bazy czystych materiałów (wzorcowych) z jakich może być wykonywana biomasa.

Abstract. The presented paper presents the researching ash fusibility of the tubular method as an approximate method for determining the composition of solid biofuels. Analysis of the results confirms the hypothesis that, based on researching ash fusibility, it is possible to conclude on the quality and type of material from which solid biofuels were made. The accuracy of the method will be higher when creating a sufficiently large base of clean materials (benchmarks) from which biomass can be made. (Test the melting behaviour of ash, as approximate method for determining the composition of solid biofuels)

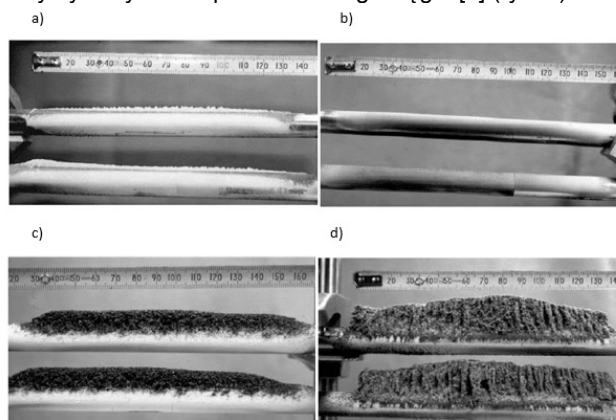
Słowa kluczowe: topliwość popiołu, metoda rurowa, skład biopaliw.
Keywords: ash fusibility, pipe method, composition of biofuels.

Wstęp

Popiół jest odpadem powstającym podczas spalania każdego paliwa stałego. Zawartość popiołu to istotny parametr jakości paliwa, nie można go spalać w celu uzyskania ciepła, a ciepło jest potrzebne do jego powstania. Powstający w procesie spalania popiół można podzielić na część lotną (popiół lotny) unoszoną przez gazy i część nielotną (popiół denny) gromadzony i odprowadzany z dolnej części komory paleniskowej pieca [1]. Paliwa stałe obok substancji organicznych zawierają substancje mineralne. Zawartość metali alkalicznych oraz obecność chloru i siarki w spalonym materiale może być przyczyną tworzenia się szkodliwych osadów i korozji wysokotemperaturowej na powierzchniach grzewczych wnętrza kotła. Dla materiałów stosowanych do celów energetycznych zostały opracowane i wdrożone procedury techniczne pozwalające na określenie właściwości fizycznych takich jak zawartość: wilgoci, popiołu, części lotnych, oznaczenie ciepła spalania i wartości opałowej oraz oznaczenie charakterystycznych temperatur topliwości popiołu i właściwości chemicznych takich jak zawartości siarki (popiołowej i palnej), węgla, wodoru i azotu. Obecnie w energetyce ciepłej coraz powszechniej jest stosowana biomasa lignocelulozowa, zwykle w obrocie handlowym pod postacią granulowanego pelletu lub brykietu. Biomasa ta jest produkowana przemysłowo z różnych rodzajów roślin energetycznych [2]. W krajach Unii Europejskiej oraz Stanach Zjednoczonych dużą wagę przykładana się do opracowania metod wszechstronnych badania paliw spalanych w piecach.

Przeprowadzone testy spalania mieszanki węgla z wybranymi rodzajami biomasy (5 i 15% udziału biomasy) potwierdzają, że skład chemiczny popiołu nie ulega istotnej zmianie, ze względu na znacznie niższą zawartość popiołu z biomasy w stosunku do węgla. Jednak niewielka różnica w składzie popiołu istotnie wpływa na obniżenie temperatury topliwości popiołu, co prowadzi do problemów eksploatacyjnych pracy kotła. Popioły z biomasy charakteryzują się niższymi temperaturami mięknięcia (zazwyczaj w przedziale 750-1000°C) w porównaniu z większością węgla (powyżej 1000°C). Temperatura mięknięcia ulega zmianie nawet przy stosunkowo niewielkim udziale masowym współspalanej biomasy. Na szybkość tworzenia się osadów wpływa zarówno niższa

temperatura mięknięcia popiołu spalanej mieszanki węgla i biomasy jak i zwiększenie w składzie chemicznym udziału związków o większej predyspozycji do osadzania się na powierzchniach grzewczych kotła. Niższe temperatury mięknięcia i topnienia powodują, że warstwa popiołu (częściowo w postaci stopionego żużla) zalega na powierzchni grzewczej i prowadzi do szybszej akumulacji nowych cząstek, przez co osady przyrastają szybciej i tworzą większe powierzchnie w porównaniu do osadów otrzymywanych ze spalania samego węgla [3] (rys. 1).



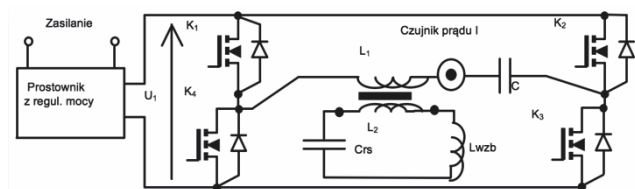
Rys. 1. Popiół na powierzchniach ogrzewalnych kotłów przy spalaniu różnego rodzaju paliw: a) zrębki dębowe, b) słoma pszeniczna, c) węgiel Pittsburgh d) mieszanka 15% słomy i 85% węgla kamiennego Pittsburgh

Wymagania dotyczące badania własności fizycznych i chemicznych materiału spalanego, zaowocowały stworzeniem normatywnych procedur badawczych [N1, N2] i opracowaniem urządzeń do określania tych własności. Jednym z ważniejszych parametrów dla użytkowników pieców, jest oznaczenie temperatury płynięcia popiołu. Przekroczenie tej temperatury w piecu powoduje zalanie rusztu płynnym popiołem (szlaką), co eliminuje piec z dalszej eksploatacji do czasu jej usunięcia. Temperatura ta, dla popiołów powstałych ze spalania pelletów lub materiałów palnych z domieszką pelletu o różnym składzie komponentów składowych jest różna [2]. Dlatego normy nakładają na producenta materiału obowiązek umieszczenia na opakowaniu każdej partii informacji o

temperaturze płynięcia popiołu. Obecnie stosowane urządzenia badawcze, ze względu na określoną normatywnie [N3] procedurę grzania popiołu wymagają długiego czasu badania a temperatura płynięcia szacowana jest orientacyjnie, co czasem prowadzi do zalania rusztów i unieruchomienie pieca. W dostępnej literaturze nie znaleziono kompleksowego określenia temperatur płynięcia popiołu dla różnego rodzaju drzew i roślin energetycznych. Nie znaleziono także analizy temperatur płynięcia popiołu na skład pelletu i brykietów.

Stanowisko pomiarowe, badania

Laboratoryjne urządzenie do badania topliwości popiołu metodą rurową zostało zaprojektowane i wykonane w ramach współpracy z Wydziałem Elektryczny Politechniki Częstochowskiej [4,5]. Oznaczanie topliwości popiołu w wysokiej temperaturze metodą rurową zgodne z normą PN-ISO 540 jest jednym z badań biomasy stałej oferowanej przez Laboratorium Eksperymentalnych Technik Badawczych Surowców i Produktów Biologicznych, Wydziału Inżynierii Produkcji i Energetyki Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie. Stanowisko zaopatrzone w przekształtnik o obciążeniu rezonansowym, którego wzбудnik przekazuje energię do przewodzącej rury grafitowej. Efekt przenoszenia energii można zwiększyć przez wzrost wartości prądu zasilającego wzbudnik oraz przez wzrost częstotliwości pracy. Aby uzyskać duże prądy i jak najmniejsze straty mocy w urządzeniu zastosowano transformator, którego strona wtórna, oprócz skupionej pojemności, rezystancji obwodu i indukcyjności wzbudnika i wprowadzanej do obwodu przez grzany element grafitowy, stanowią obwód rezonansowy szeregowy. Wszystkie wartości obwodu rezonansowego nie ulegają zmianie w czasie pracy, dlatego w zaproponowanym układzie nie zastosowano pętli fazowej PLL, umożliwiającej samoczynne dostrojenie częstotliwości wyzwalania par tranzystorów mocy w zależności od częstotliwości rezonansowej całego układu [4]. Zasilanie urządzenia zostało zaprojektowane i wykonane w układzie pełnego mostka H, w którego głównej gałęzi podłączony jest transformator oraz kondensator C blokujący składową stałą źródła zasilania (rys.2).



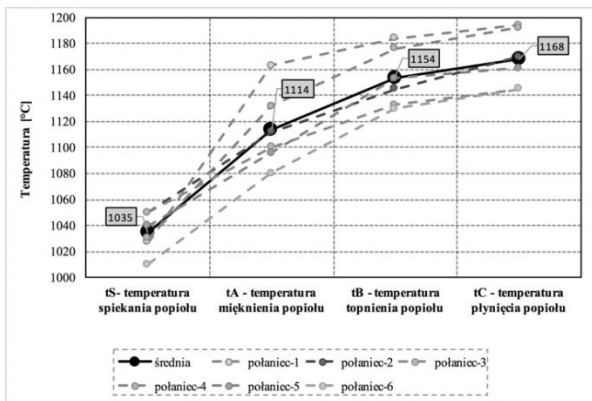
Rys. 2. Uproszczony schemat działania układu przekształtnikowego: U_1 - napięcie zasilania obwodu, K - tranzystory mocy typu MOSFET, D - diody zwrotne, L_1 - indukcyjność strony pierwotnej transformatora, L_2 - indukcyjność strony wtórnej transformatora, L_s - indukcyjność pozostałych elementów obwodu rezonansowego (wzбудnika wraz z rurą grafitową), C_{rs} - pojemność kondensatora rezonansowego i pojemność strony wtórnej transformatora, R_2 - niewielka rezystancja strony wtórnej transformatora (tu pominięta)

Wielkością wyjściową w stosowanym układzie przekształtnikowym o obciążeniu rezonansowym jest napięcie stałe o wartości U_s , które przekazywane jest do obciążenia za pomocą kluczkowania. W czasie od 0 do T_1 (rys. 2) załączane są klucze K_1 i K_3 a w czasie od T_1 do T_2 załączane są klucze K_2 i K_4 . Procesowi załączania i wyłączania odpowiednich par kluczy towarzyszy pojawienie się wymuszenia napięciowego na gałęzi rezonansowej R, L, C w postaci napięcia przemiennego o przebiegu zbliżonym do sinusoidy [6,7]. W gałęzi strony pierwotnej transformatora znajduje się czujnik prądu, umożliwiający

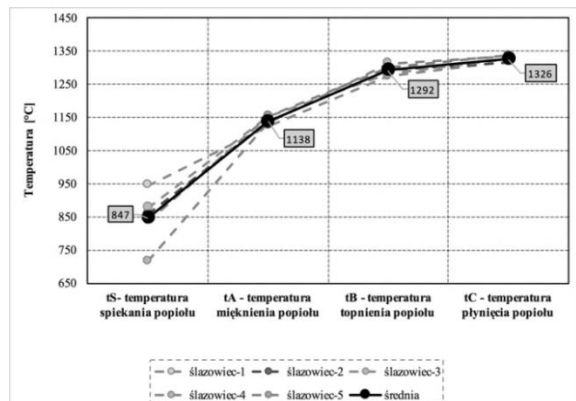
detekcję przejścia prądu przez zero. Znajomość chwili przejścia prądu przez zero jest niezbędna dla wysterowania odpowiednich par tranzystorów mocy typu MOSFET (klucze sterujących) z zapewnieniem przerwy czasowej tak zwanego „death-time” służącej do wyeliminowania przypadków równoczesnego włączenia obu par kluczy. Dla częstotliwości powyżej 150 [kHz] mogą pojawić się problemy z działaniem układów sterowania ponieważ zaczynają odgrywać rolę efekty polowe (efekt zbliżenia przewodów, efekt wypierania prądu czyli zjawisko naskórkowości oraz inne), nie ujawniające się tak ostro przy pracy układów elektronicznych na częstotliwościach niższych. Dlatego powszechnie przyjmuje się, że układy sterowania pracują dobrze o ile ich częstotliwość pracy nie przekracza wartości 150 kHz. Zaproponowane rozwiązanie jest efektem poszukiwania kompromisu a zbudowane prototypowe stanowisko laboratoryjne w istniejących warunkach, wydaje się być rozwiązaniem zbliżonym do optymalnego. Praktycznie obciążeniem roboczym urządzenia jest wzбудnik indukcyjny wykonany z rurki miedzianej, połączony szeregowo z baterią kondensatorów. Wewnątrz wzbudnika znajduje się odizolowana termicznie od niego rura grafitowa stanowiąca komorę roboczą. Parametry techniczne urządzenia grzejnego (RZ-1) są następujące: sieciowe napięcie zasilania $U=230$ [V], moc czynna $P=2,0$ [kW], częstotliwość pracy wzbudnika $f=117$ [kHz], indukcyjność $L_{wzb}=1,4$ [μ H], pojemność w postaci baterii kondensatorów złożona z kondensatorów typu HC-03 o pojemności całkowitej $C_{rs}=1,6$ [μ F]. Wymiary falownika: długość 450 [mm], szerokość 250 [mm], wysokość 150 [mm]. Wymiary układu wyjściowego ze wzbudnikiem: długość 250 [mm], szerokość 150 [mm] wysokość 100 [mm], wymiary wzbudnika: średnica zewnętrzna 70 [mm], długość 45 [mm], wzbudnik wykonano z rurki miedzianej o średnicy $\phi 6$ [mm] o 6 zwojach. Wzбудnik chłodzony jest skutecznie wodą w obiegu zamkniętym [6]. Urządzenie może pracować do temperatury 1500°C (maksymalnie 1600°C). Do nastaw temperatury zastosowano regulator temperatury RE-3 z funkcją „rampingu” firmy Lumel S.A., Zielona Góra, pracujący w układzie regulatora typu PID z czujnikiem typu S PtRh-Pt (platyna-rod/platyna) o temperaturze pracy do 1600°C. Czujnik temperatury umieszczony został w środku rury grafitowej.

Wyniki badań

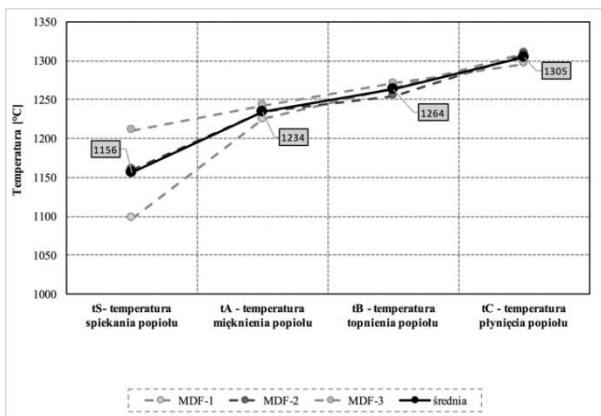
Wyniki badań uzyskane na w/w stanowisku w przypadku popiołu, który powstał w czasie spalania różnego rodzaju biomasy przedstawiono na rysunkach 3-9. Zaobserwowano dużą zmienność wyników poszczególnych temperatur dla badanych rodzajów biomasy. Średnia temperatura spiekania popiołu w obrębie analizowanej biomasy t_s wynosiła 1011°C, temperatura mięknięcia popiołu t_A wynosiła 1145°C, temperatura topnienia popiołu t_b wynosiła 1230°C, płynięcia popiołu t_c wynosiła 1276°C. Należy zaznaczyć niewielką zmienność w obrębie mierzonego parametru dotyczącego danego rodzaju biomasy, która wyrażona odchyleniem standardowym wynosiła ok. 117°C. Najwyższą wartość temperatury płynięcia popiołu t_c osiągnięto dla robinii akacjowej wynoszącej 1414°C (rys. 8), najniższą wynoszącą 1152°C dla próbek pelletu (rys.1) z topoli. Analiza wyników wstępnie potwierdza założoną tezę, że na podstawie temperatur z badań temperatur topliwości popiołu można wnioskować o rodzaju materiału z jakich został wykonany Pellet lub brykiet bez konieczności przeprowadzania analizy składu chemicznego materiału, a analizowane gatunki krzewów i drzew szybkorosnących uzyskały znacznie wyższe wartości niż byliny i trawy wieloletnie.



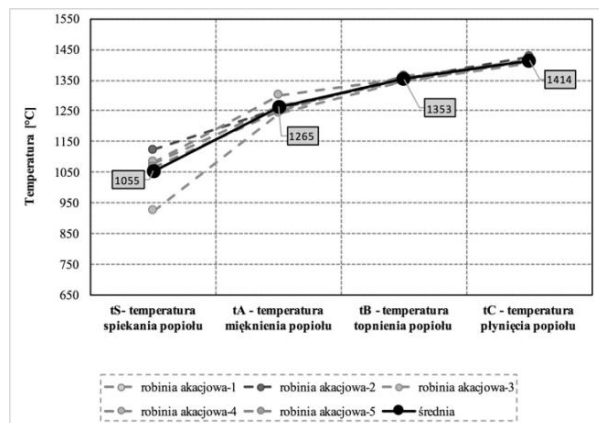
Rys. 3. Wyniki badań temperatur płynięcia pelletu z Enea Elektrociepłownia Połaniec



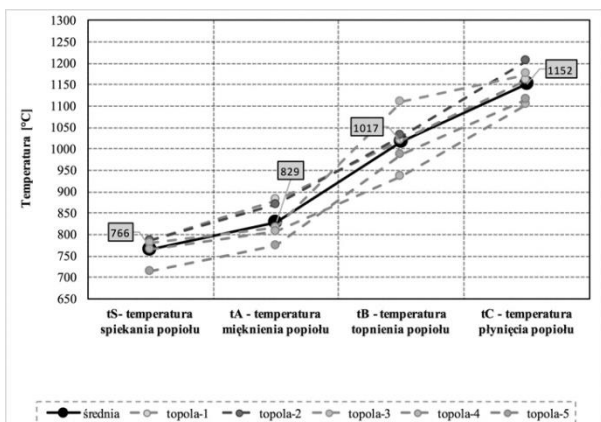
Rys. 7. Wyniki badań temperatur płynięcia dla pelletu ze ślązowca



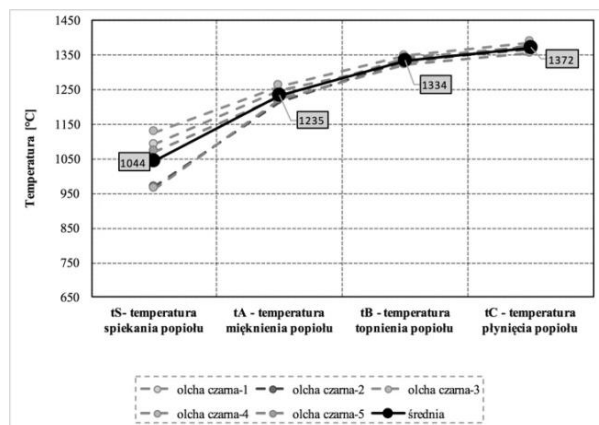
Rys. 4. Wyniki badań temperatur płynięcia popiołu dla pelletu z MDF-u



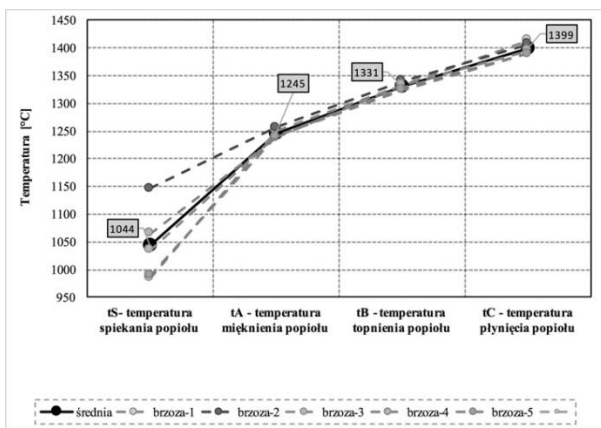
Rys. 8. Wyniki badań temperatur płynięcia dla pelletu z robinii akacjowej



Rys. 5. Wstępne wyniki badań temperatur płynięcia pelletu z topoli



Rys. 9. Wyniki badań temperatur płynięcia dla pelletu z olchy czarnej



Rys. 6. Wyniki badań temperatur płynięcia dla pelletu z brzozy

Najwyższe wartości temperatury mięknięcia i topnienia otrzymano dla popiołu z biomasy robinii akacjowej, brzozy oraz olchy czarnej. Średnia wartość wyniosła odpowiednio 1265 i 1353; 1245 i 1331; 1235 i 1334 °C. Są to surowce najbardziej korzystne do wykorzystania energetycznego w procesach spalania i współspalania z węglem. Popiół otrzymany z ich spalania posiada najmniejszą skłonnością do osadzania się na powierzchniach grzewczych i ogranicza procesy żużlowania i szlakowania.

Na podstawie otrzymanych wyników temperatury topliwości popiołu dla roślin energetycznych można stwierdzić, że krzewy i drzewa szybko rosnące (robinia akacjowa, olcha) posiadają znacznie wyższe temperatury topliwości popiołu niż byliny i trawy wieloletnie (topinambur, ślązowiec pensylwański, miskant olbrzymi). Średnie wartości poszczególnych temperatur dla krzewów i drzew szybko rosnących wyniosły: tS = 1050 °C, tA = 1250 °C, tB = 1344 °C, tC = 1393 °C. Dla bylin i traw wieloletnich

temperatury te liczyły odpowiednio: 802 °C, 957 °C, 1090 °C, 1175 °C. Niższe wartości temperatur popiołu tych roślin są prawdopodobnie spowodowane tym, że znaczny udział w popiele stanowią tlenki alkaliczne, które w dużym stopniu wpływają na obniżenie temperatur palności popiołu.

Stosunkowo wysoka temperatura topnienia popiołu z płyt MDF może wynikać z obecności klejów, żywic organicznych stosowanych przy produkcji płyt. Związki organiczne zawarte w nich mogą wpływać na wzrost temperatur palności popiołu.

Przy współspalaniu biomasy z węglem w kotłach fluidalnych ważne jest precyzyjne określenie wartości temperatury spiekania, przy której popiół zaczyna przejawiać zdolność do aglomeracji złoża fluidalnego. Temperatura panująca w komorze spalania kotłów fluidalnych dochodzi do 950 °C, a zatem należy unikać popiołów o temperaturze spiekania poniżej tej wartości. Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że biomasa topinamburu, topoli, miskanta olbrzymiego i słazowca pensylwańskiego nie powinna być wykorzystywana w tego rodzaju kotłach ze względu na niskie wartości temperatur spiekania, które wyniosły odpowiednio 729 °C, 766 °C, 830 °C, 847 °C.

W przypadku współspalania biomasy z węglem w kotłach rusztowych stosowanie surowców, których temperatura topnienia i płynięcia popiołu jest mniejsza niż 1200 °C może stwarzać problemy związane z zalewaniem szczelin nadmuchowych płynną szlaką. W oparciu o uzyskane wyniki biomasa słazowca pensylwańskiego, olchy czarnej, robinii akacjowej, sosny, brzozy może być wykorzystywana w tego typu kotłach, gdyż temperatury topnienia i płynięcia popiołu wyniosły ponad 1200 °C.

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że biopaliwa stałe spalane w Elektrowni Połaniec nie były jednorodne pod względem surowcowym, pellety lub brykiety mogły pochodzić z różnego rodzaju biomasy.

Biopaliwa stałe spalane w Enea Elektrownia Połaniec nie były wykonane z biomasy topinamburu, miskanta, robinii akacjowej, olchy czarnej i brzozy, o czym świadczą zupełnie inne charakterystyki palności popiołu. Biopaliwa stałe mogły zostać wyprodukowane z odpadów przemysłu meblarskiego lub sosny, gdyż wartości temperatur palności popiołu są najbardziej do nich zbliżone.

Podsumowanie

Biomasa wybranych gatunków roślin energetycznych, drzew oraz odpadów przemysłu meblarskiego znacząco różni się wartościami charakterystycznych temperatur palności popiołu, może być jednym z parametrów określających rodzaj biomasy do wykonania pelletu.

Popiół z biomasy robinii akacjowej, brzozy oraz olchy uzyskała najwyższe wartości temperatur palności popiołu, w związku z tym jest najbardziej korzystnym surowcem do energetycznego wykorzystania w procesach spalania i współspalania biomasy z węglem.

Najwyższą skłonność do tworzenia osadów na powierzchniach grzewczych, żużlowania i szlakowania posiada pellet z biomasy topinamburu, której popiół charakteryzował się najniższą palnością.

Popiół z analizowanych gatunków krzewów i drzew szybkoosuszących uzyskały znacznie wyższe wartości niż byliny i trawy wieloletnie.

Zaprezentowana metoda pozwala na wstępne określenie pochodzenia a zarazem składu biomasy na podstawie charakterystyki topnienia popiołu. Dokładność metody będzie wyższa w przypadku stworzenia odpowiednio dużej bazy czystych materiałów (wzorcowych) z jakich może być wykonywana biomasa.

Autorzy: dr inż. Piotr Nawara, Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, rtnawara@cyf-kr.edu.pl; Paweł Kielbasa, Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, pawel.kielbasa@ur.krakow.pl; Sylwester Tabor, Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, sylwester.tabor@ur.krakow.pl; Stanisław Mrozek, Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, mgr Magdalena Drózdź, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wydział Nauk o Żywności, magdalena.drozd@upwr.edu.pl; Maciej Oziębłowski, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wydział Nauk o Żywności, Maciej.Oziembowski@up.wroc.pl; Joanna Czechowska, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki, Katedra Ceramiki i Materiałów Ogniotrwałych, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, jczech@agh.edu.pl. Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, E-mail: rtkurpas@cyf-kr.edu.pl, dr inż. Marek OSTAFAIN, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Mikrobiologii, E-mail: mostafin@ar.krakow.pl

NORMY

- [N1] ISO 1171:2010 Solid mineral fuels - Determination of ash (Stałe paliwa mineralne – Określenie popiołu).□
- [N2] PN-ISO 540:2001 Paliwa stałe, Oznaczenie palności popiołu w wysokiej temperaturze metodą rurową.□
- [N3] PN-82/G-04535 Paliwa stałe. Oznaczenie charakterystycznych temperatur palności popiołu.

LITERATURA

- [1] Rybak W.; Spalanie i współspalanie biopaliw stałych, Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2006.
- [2] Kalembasa D.; Ilość i skład chemiczny popiołu z biomasy roślin energetycznych. Acta Agrophysica (ISSN 1243-4125), 2006, Nr 7(4), s. 909-914.
- [3] Ściążko M., Zuwała J., Pronobis M. 2007. Współspalanie biomasy i paliw alternatywnych w energetyce. Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, Politechnika Śląska. Zabrze.
- [4] Gąsiorski A., Posytek Z., Drózdź T.; „Prototypowe stanowisko laboratoryjne do badania palności popiołu metodą rurową”, Przegląd elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, NR 1/2015, STRONA 144-148.
- [5] Gąsiorski A., Posytek Z.; Nietypowe rozwiązanie indukcyjnego wysokoczęstotliwościowego pieca tyglowego, Przegląd Elektrotechniczny (ISSN 0033-2097), 2013, R. 89, Nr 12, s. 230-233.
- [6] Nęcka K., Lis S., Drózdź T., Nawara P., Wrona P. Oziębłowski M.: „Charakterystyka prototypowego stanowiska laboratoryjnego do badania palności popiołu metodą rurową” PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, NR 01/2016, STRONA 109-113.
- [7] Tomasiak M., LIS S., Nęcka K., Oziębłowski M., Kielbasa P., Drózdź T., Nawara P., OSTAFAIN M.: „Sterowanie piecem indukcyjnym do laboratoryjnego spalania biomasy” Przegląd elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, NR 12/2016, STRONA 173-177.