

Prototypowe stanowisko laboratoryjne do badania topliwości popiołu metodą rurową

Streszczenie. W pracy przedstawiono prototypowe wysokoczęstotliwościowe stanowisko laboratoryjne do badania topliwości popiołu metodą rurową. Opisano celowość prowadzenia badań temperatury topliwości popiołów oraz zalety i wady dotychczas stosowanych urządzeń. Podano założenia dotyczące zbudowanego urządzenia oraz rozwiązania techniczne zastosowanego układu przekształtnikowego. Pokazano, że zbudowane stanowisko laboratoryjne pozwala na oznaczanie tego parametru popiołu metodą rurową zgodnie z PN-ISO-540:2001 jak również na szybkie oznaczenie wartości temperatury płynięcia popiołu w pobliżu stanowiska pracy pieca. Jako wskaźnik temperatury płynięcia popiołu zastosowano kamerę cyfrową i komputerową obróbkę zapisanej informacji wizualnej i temperatury. Parametry zbudowanego prototypowego stanowiska laboratoryjnego pozwalają na zastosowanie go, nie tylko do badania temperatury płynięcia popiołów dennych otrzymanych w procesie spalania biomasy lignocelulozowej ale również mieszanin biomasy z węglami kamiennym i brunatnym, torfem oraz innych paliw stałych.

Abstract. A high frequency electric heating set enabling determination of the characteristic ash fusibility temperatures using tube method was presented. The advisability of researching the fusibility temperature of ashes as well as advantages and disadvantages of so far used sets were described. The principles on the built set and technical solutions of the applied converting system were described. It was shown, that the built lab station makes it possible to determine this parameter of ash using tube method in compliance with norm PN-ISO-540:2001 as well as to determine ash flow temperature near the furnace work station in a fast way. A digital camera and computer processing of saved visual information and temperature were used to determine the temperature of ash flow. The parameters of the built prototype set enable to use it not only for researching the fusibility temperatures of bottom ashes gained in the process of lignocellulosic biomass combustion but also in combustion of mixtures of biomass and hard coal as well as brown coal, peat coal and other solid fuels. (**Prototype lab station for researching the fusibility of using tube method**)

Słowa kluczowe: wysokoczęstotliwościowe grzanie indukcyjne, określenie topliwości popiołów, metoda rurowa, chłodzenie wodą.

Keywords: high frequency induction heating, researching ash fusibility, tube method, water cooling.

Wstęp

Popiół jest odpadem powstającym podczas spalania każdego paliwa stałego. Zawartość popiołu to istotny parametr paliwa, on sam paliwa nie stanowi, 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. Paliwa stałe obok substancji organicznych zawierają substancje mineralne. W zależności od warunków prowadzenia procesu spalania skład popiołu ulega zmianie. 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 spalanych dla celów energetycznych opracowane zostały na świecie procedury techniczne pozwalające na określanie 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 cieplnej coraz powszechniej jest stosowana biomasa lignocelulozowa, zwykle sprzedawana pod postacią granulowanego peletu. Biomasa ta jest produkowana przemysłowo z różnych odpadów drzewnych, słomy oraz łodyg roślin [3]. W dużych ciepłowniach występuje również jako domieszka do spalanego węgla kamiennego i brunatnego, torfu i innych paliw stałych. W krajach Unii Europejskiej oraz Stanach Zjednoczonych dużą wagę przykładają się do opracowania metod wszechstronnych badania paliw spalanych w piecach. Wymagania przez wprowadzone normy i przepisy [N1,N2] badania własności fizycznych i chemicznych materiału spalanego, zaowocowały stworzeniem normatywnych procedur badawczych i opracowaniem urządzeń do określania tych własności. Jednym z ważniejszych parametrów, istotnych dla użytkowników pieców, jest

oznaczenie temperatury płynięcia popiołu. Przekroczenie tej temperatury w piecu powoduje zalanie rusztu płynnym popiołem (szlaką) co eliminuje piec z dalszej pracy do czasu jej usunięcia. Temperatura ta, dla popiołów powstałych ze spalania peletów lub materiałów palnych z domieszką peletu, wykonanych z materiałów o odmiennych składach jest różna [3]. Dlatego normy nakładają na producenta materiału umieszczenie na opakowaniu każdej partii informacji o temperaturze płynięcia popiołu. Jeżeli materiał do spalania produkowany jest bezpośrednio w pobliżu miejsca jego spalania, wówczas powstaje problem z określeniem temperatury płynięcia tego paliwa. Obecnie stosowane urządzenia, ze względu na określony przez normę [N3] procedurę grzania, popiołu wymagają długiego czasu badania, i z tego względu są niechętnie stosowane przez palaczy a temperatura płynięcia szacowana jest orientacyjnie, co czasem prowadzi do zalania rusztów i unieruchomienie pieca. Dlatego istotne stał się opracowanie urządzenia, które w sposób wystarczająco szybki (nawet ze skróceniem procesu grzania wskazanego przez normę [N3]) umożliwi określenie tej temperatury, z możliwością natychmiastowego powtórzenia pomiarów.

Stosowane obecnie elektryczne urządzenia grzejne do badania topliwości popiołów metodą rurową

W produkowanych obecnie urządzeniach do badania topliwości popiołu metodą rurową stosowane są zwykle dwa typy wysokotemperaturowych elementów grzejnych: element sylitowe wykonane z rekrytalizowanego węgla krzemu o temperaturze pracy do około 1500 [°C] oraz wykonane z dwukrzemka molibdenu o temperaturze pracy do 1850 [°C]. Te elementy grzewcze charakteryzują się dużą trwałością przy wysokich temperaturach pracy, wzrostem rezystancji (spadkiem mocy) wraz ze wzrostem temperatury, wyjątkową kruchością oraz koniecznością zastosowania specjalnego rodzaju sterowania wzrostem temperatury. Należy również dodać, że w niektórych starszych rozwiązaniach grzejnych urządzeń do badania topliwości popiołów, jako elementy grzejne stosowane są również druty i taśmy oporowe umieszczone w materiałach

ceramicznych. Dodatkowo, zgodnie z normami [N3, N4] badania popiołu muszą odbywać się w neutralnym środowisku gazowym.

Urządzenia do badania topliwości popiołu metodą rurową z wykorzystaniem procesu grzania oporowego, charakteryzują się dużą stałą czasową procesu nagrzewania (oraz procesu ochładzania) i stosowane normy zostały opracowane właśnie dla takich urządzeń. Uniemożliwia to przeprowadzanie szybkich, szacunkowych badań topliwości popiołu metodą rurową, które często są niezbędne do wykonania dla paliw stałych na stanowiskach pomiarowych przy piecach.

Dodatkowo, urządzenia te są drogie (cena rynkowa wynosi kilkadziesiąt tysięcy złotych), na przeprowadzenie jednego cyklu badań zużywa się dużo energii elektrycznej.

Propozycja nowego podejścia do badania topliwości popiołów metodą rurową

Wystąpiła konieczność opracowania urządzenia do badania topliwości popiołu metodą rurową nie posiadającego wymienionych wad. Autorzy mający doświadczenie zdobyte w trakcie realizacji prac przedstawionych w artykułach [1, 2] postanowili zbudować nowe prototypowe urządzenie do badania topliwości popiołu metodą rurową:

- działające na zasadzie wykorzystania zjawiska rezonansu elektrycznego i wysokoczęstotliwościowego grzania indukcyjnego,
- prowadzące proces nagrzewania próbek popiołu szybko, aż do zaobserwowania i określenia temperatury płynięcia popiołu,
- posiadające wymienną rurę wykonaną z materiału przewodzącego (grafitu), który w czasie procesu nagrzewania wydzielający tlenek węgla i dwutlenek węgla w odpowiednich proporcjach, gwarantując atmosferę neutralną w jej wnętrzu,
- kilkuzwojowy wzbudnik wykonany z przewodzącej prąd elektryczny rurki chłodzonej wodą w obiegu zamkniętym, kumulujący energię pola elektromagnetycznego w przewodzącej rurze grafitowej,
- stosunkowo lekkie i łatwe do przenoszenia, zasilane energia elektryczna prądu przemiennego 230 [V] o poborze mocy nie przekraczającej mocy, pobieranej przez domowy odkurzacz.

Budowa i działanie układ przekształtnika

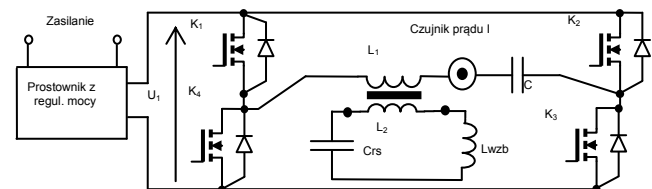
Laboratoryjne urządzenie do badania topliwości popiołu metodą rurową zaopatrzone w przekształtnik o obciążeniu rezonansowym, którego wzbudnik przekazuje energię do przewodzącej rury grafitowej. Efekt przenoszenia energii można zwiększyć przez wzrost wartości prądu zasilającego wzbudnik oraz przez wzrost częstotliwości pracy [6].

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 [6]. Ponieważ praktycznie 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. Zasilanie urządzenia zostało zaprojektowane i wykonane w układzie pełnego mostka H, w którego głównej gałęzi podłączony jest uzwojenie pierwotne transformatora oraz kondensator C blokujący składową stałą źródła zasilania (rys.1).

Wielkością wyjściową w stosowanym układzie przekształtnikowym o obciążeniu rezonansowym jest

napięcie stałe o wartości U_1 , które przekazywane jest do obciążenia za pomocą kluczkowania. W czasie od 0 do T_1 (rys. 1) 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 w postaci napięcia przemiennego o przebiegu zbliżonym do sinusoidy. Szeregowo do obwodu strony pierwotnej transformatora włączono czujnik 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 tej wartości. Zaproponowane rozwiązanie jest efektem poszukiwania kompromisu a zbudowane prototypowe stanowisko laboratoryjne w istniejących warunkach na dziś, autorom pracy, wydaje się być rozwiązaniem zbliżonym do optymalnego.



Rys. 1. Uproszczony schemat elektryczny przekształtnika wykorzystywanego w stanowisku laboratoryjnym do badania topliwości popiołu metodą rurową.

Na rysunku 1 przyjęto następujące oznaczenia : U_1 - napięcie stałe obwodu zasilania, L_1 - indukcyjność strony pierwotnej transformatora, R_1 - rezystancja strony wtórnej transformatora (pominięta na rysunku 1), C - kondensator blokujący składową stałą, K_1, K_2, K_3, K_4 - tranzystory mocy typu MOSFET z integralnie podłączonymi diodami zwrotnymi, L_2 - indukcyjność strony wtórnej transformatora, L_{wzb} - indukcyjność pozostałych elementów szeregowo obwodu rezonansowego (wzbudnika wraz z rurą grafitową), C_{rs} - pojemność kondensatora rezonansowego i pojemność strony wtórnej transformatora, R_2 - niewielka rezystancja strony wtórnej transformatora (na rysunku 1 pominięta).

Praktycznie obciążeniem roboczym urządzenia jest wzbudnik indukcyjny wykonany z rurki miedzianej, połączony szeregowo z baterią kondensatorów. Wewnątrz wzbudnika znajduje się odizolowana termicznie od niego rura grafitowa stanowiąca komorę roboczą

Nagrzewanie rury grafitowej odbywa się w procesie dwustanowym, włącz - wyłącz, sterowanym przez regulator temperatury z funkcją „rampingu”.

Praktyczna realizacja stanowiska laboratoryjnego

Badane stanowisko laboratoryjne wykonał mgr inż. Roman Czyż z Politechniki Częstochowskiej a na rysunkach 2,3 pokazano jego wygląd.

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 złożonej z kondensatorów typu HC-03 [5] o

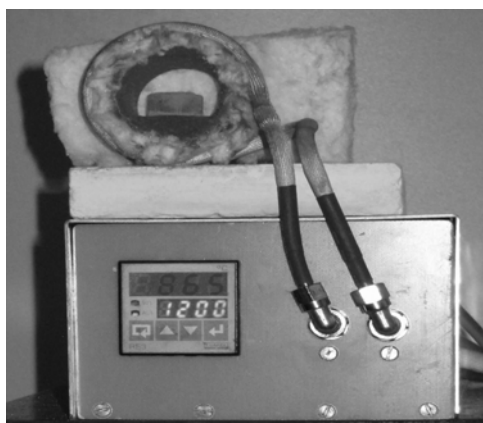
pojemności całkowitej $C_{rs} 1,6$ [μF]. Wymiary falownika: długość 450 [mm], szerokość 250 [mm], wysokość 150 [mm]. Wymiary układu wyjściowego ze wzбудnikiem: długość 250 [mm], szerokość 150 [mm], wysokość 100 [mm], wymiary wzбудnika: średnica zewnętrzna 70 [mm], długość 45 [mm], wzбудnik wykonano z rurki miedzianej o średnicy $\phi 6$ [mm] o 6 zwojach. Wzбудnik chłodzony jest skutecznie wodą w obiegu zamkniętym. Urządzenie może pracować do temperatury 1500 [$^{\circ}C$].

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 [$^{\circ}C$]. Czujnik temperatury umieszczony został w dolnej części rury grafitowej.

Obraz podczas badań zarejestrowano przy wykorzystaniu aparatu fotograficznego Fujifilm X20 wyposażonego w matrycę X-Trans CMOS I. Zastosowano filtr podczerwieni Hoya Infrared R72 pochłaniający światło widzialne, do długości fal 720 [nm] (promieniowanie podczerwone). Matryca X-Trans CMOS I pozwala na wykonanie zdjęć w podczerwieni bez konieczności wprowadzenia modyfikacji aparatu fotograficznego.



Rys. 2. Zrealizowane praktycznie prototypowe stanowisko laboratoryjne. U dołu układ przekształtnika, powyżej układ wyjściowy, u góry wzбудnik z rurą grafitową.



Rys. 3. Zrealizowane praktycznie prototypowe stanowisko laboratoryjne. U dołu układ wyjściowy, u góry wzбудnik z rurą grafitową. W rurze widoczna badana próbka sprasowanego popiołu.

Proces spalania peletu i powstanie popiołu

Pelety należy spalać tylko w piecach przystosowanych do ich spalania. Pelet drzewny zawiera około 80% substancji lotnych (w procentach suchej masy), co oznacza, że w czasie spalania 80% masy przekształca się w gazy, a pozostała część zamieni się w węgiel drzewny. W procesie

spalania peletu wyróżnia się trzy fazy: suszenie (odparowanie wody), gazyfikację (pirolizę) i spalanie oraz dopalanie się węgla drzewnego. W czasie tego procesu 4/5 energii jest uwalniana w postaci gazu, a pozostałe 1/5 w postaci węgla drzewnego.

Po trafieniu peletu do komory spalania pieca, ciepło towarzyszące procesowi odparowuje wodę zawartą w pelecie. Jeżeli zawartość wody w spalonym pelecie jest niska, proces zachodzi bardzo szybko, jeżeli jest duża, wówczas proces zachodzi wolno z dużą stratą energii cieplnej na suszenie mokrego peletu. Pod wpływem dalszego ogrzewania peletu następuje proces gazyfikacji czyli wydzielania gazu. Temperatura konieczna do zajścia tego procesu to około 260 – 280 [$^{\circ}C$]. Powstają wtedy: gazy, takie jak tlenek węgla (CO), wodór (H_2) i metan (CH_4) oraz inne węglowodory a zostaje węgiel drzewny. Jeżeli w piecu jest wystarczająca ilość powietrza wtedy gazy spalają się, rośnie temperatura i zaczyna wypalać się powstały węgiel drzewny. Po wypaleniu węgla drzewnego pozostaje popiół, zawierający przeważnie niepalne związki mineralne. Popiół jest niepożądany, gdyż oznacza konieczność oczyszczania gazów odlotowych, oraz usuwania popiołu i szlaku. Popiół powstały z materiału lignocelulozowego składa się głównie ze związków niepalnych: ziemi, piasku i brudu znajdującego się na korze drzew lub w runie leśnym oraz z soli wchłanianych w procesie wzrostu roślin.

Pelety drzewne charakteryzują się niską zawartością popiołu, zazwyczaj w granicach od 1/2 % do 3 %. W popiele znajdują się również śladowe ilości metali ciężkich, soli potasu i sodu, stanowiące niepożądane źródło zanieczyszczenia, w pelecie jest ich jednak mniej niż w innych paliwach stałych. Kiedy popiół zostaje podgrzany do pewnej temperatury, staje się miękki i lepki i zalewa ruszta paleniska. Temperatura ta zwana temperaturą płynięcia popiołów, jest różna dla różnych rodzajów peletu i zwykle wynosi około od 1100 [$^{\circ}C$] do 1200 [$^{\circ}C$] lub wyżej. Przekroczenie temperatury płynięcia popiołów w gazach odlotowych, może spowodować powstanie na ściankach rur odprowadzających te gazy, grubej warstwy szlaku trudnej do usunięcia. Należy również dodać, że pomimo niewielkiej zawartości soli potasu i soli sodu w spalonym pelecie, mogą one tworzyć lepki popiół, pokrywający powierzchnie zewnętrzną kotła.

Przygotowanie próbki popiołu do badań

Próbkę do badań wykonuje się z popiołu uzyskanego ze spopielenia materiału badawczego bądź też z popiołu pobranego np. z instalacji spalania paliw stałych. Warunkiem użycia popiołu do oznaczenia topliwości jest całkowite spalanie paliwa z którego popiół pochodzi (próbka popiołu nie może zawierać nie dopalonych cząstek paliwa). Pobraną próbkę popiołu umieszcza się w specjalnym moździerzku i uciera tłuczkiem, nie dopuszczając do jakiegokolwiek zanieczyszczenia próbki. Po rozcieraniu popiołu przesiewa się przez sito kontrolne o wielkości otworów 0,075 [mm] a materiał pozostały na sicie ponownie się uciera. Tak przygotowany popiół zwilża się wodą destylowaną, miesza a następnie ugniata w formie wykonanej z mosiądzu lub stali nierdzewnej w postaci: piramidy o podstawie równobocznego trójkąta (wysokość próbki nie powinna być większa niż 19 [mm] i od dwóch do trzech razy większa od długości boku podstawy), sześcianu (o długości boku z przedziału od 3 [mm] do 7 [mm]), walca (o wysokości z przedziału od 3 [mm] do 9 [mm] i średnicy równej wysokości) lub stożka ściętego (o wysokości 4 [mm] i średnicy 3 [mm] przy podstawie i 1,5 [mm] w części ściętej). Krawędzie uzyskanych próbek powinny być bezwzględnie ostre by ułatwić obserwację próbki podczas stapiania. Uzyskana próbkę należy wysuszyć a następnie umieścić na płytce wykonanej z materiału nie ulegającego

deformacji, nie reagującego i nie absorbującego popiołu podczas oznaczania. Zaleca się wykonanie płytek ze spieku tlenku glinu lub mullitu. Kolejnym krokiem jest usunięcie z próbki substancji organicznych poprzez wolne ogrzewanie w atmosferze powietrza do temperatury około 815 [°C]. Etap ten może być realizowany w piecu stosowanym do oznaczania topliwości popiołu. Tak przygotowana próbka popiołu służy do dalszych badań

Określenie charakterystycznych temperatur topliwości popiołów

Do wyznaczenia temperatur topliwości popiołów wykorzystano kamerę cyfrową, regulator temperatury RE3 (sygnał z termopary) oraz odpowiadający mu zachowanie się (obraz) próbki popiołu podgrzewanego w rurze. Możliwe jest również zastosowanie kamery termowizyjnej do tych badań.

Wielkość przestrzeni grzewczej znajdująca się wewnątrz rury grafitowych umożliwia badanie próbek walcowych lub sześciennych i w postaci sześcianu o wymiarach o średnicy 25 [mm] i wysokości 25 [mm], mimo, że zwykle zgodnie z normą [N3], bada się próbki o znacznie mniejszych wymiarach. Jak przedstawiono to wcześniej pomiar temperatury odbywał się przy pomocy termoelementu (PtRh-Pt) z dodatkowo przyłączonymi przewodami kompensacyjnymi. Napięcie otrzymane z termoelementu jest napięciem odniesienia dla regulatora temperatury, z wbudowaną funkcją „ramping” umożliwiającą nastawianie stałej prędkości narastania temperatury w przestrzeni z nagrzewaną próbką w określonych zakresach temperatur.

W czasie badania wykonana próbka popiołu jest umieszczana na specjalnie ukształtowanej podstawie grafitowej znajdującej się wewnątrz rury grafitowej wypoziomowanej i jednostronnie zamkniętej materiałem izolującym.

Metodę rurą oznaczania topliwości popiołów w wysokiej temperaturze określa norma [N3]. Polega ona na ogrzewaniu odpowiednio ukształtowanej próbki popiołu (o ostrych brzegach), z szybkością 30 [°C/min] do temperatury 900 [°C] oraz 10 [°C/min] powyżej temperatury 900 [°C] w odpowiednim neutralnym środowisku gazowym wytwarzanym tu przez nagrzana rurę grafitową. Obserwacja bezpośrednia zachowania się próbki lub zapis jej obrazu, pozwala na ustalenie charakterystycznych temperatur topliwości popiołu na podstawie wizualnej oceny zmian konturów badanej kształtki, obserwowanych na siatce pomiarowej.



Rys 4. Próbkę popiołu, po lewej przed podgrzaniem, po prawej po osiągnięciu temperatury płynięcia popiołu i po ostudzeniu.

Obraz całego procesu nagrzewania próbki w rurze, od chwili osiągnięcia temperatury startowej wynoszącej standardowo 750 [°C], jest rejestrowany (około 25-35 obrazów na minutę) w celu późniejszego określenia parametrów topliwości popiołów. Następnie zapisany obraz poddawany jest opracowaniu numerycznemu [4].

Wnioski

Zbudowane prototypowe stanowisko laboratoryjne spełnia wymagania norm [N1,N4]. Przeprowadzone badania próbne różnych popiołów na prototypowym stanowisku laboratoryjnym do badania topliwości popiołu metodą rurą wykazały, że zaproponowane rozwiązanie może być stosowane do:

- określania topliwości popiołów metodą rurą, dla popiołów dennych otrzymywanych w procesie spalania biomasy lignocelulozowej, oraz mieszaniny biomasy z węglem kamiennym, brunatnym, torfem oraz tych kopalni bez biomasy. Nie wyklucza to znacznie szerszych możliwości badawczych dla nie wymienionych tu paliw stałych,
 - przybliżonego określenia temperatury topliwości popiołu, przy szybszym, odbiegającym od przyjętej normy, nagraniu próbki sprasowanego popiołu,
 - prawie natychmiastowego ponownego przeprowadzenia badania kolejnej próbki popiołów, w nowej rurze grafitowej umieszczonej we wzbudniku, po wyjęciu rury wcześniej stosowanej.
- Koszty pracy urządzenia są niewielkie a samo urządzenie, w porównaniu do innych, nie jest drogie.

LITERATURA

- [1] Gąsiorowski A., Posyłek Z.; Nietypowe rozwiązanie indukcyjnego wysokoczęstotliwościowego pieca tyglowego, *Przegląd Elektrotechniczny* (ISSN 0033-2097), 2013, R. 89, Nr 12, s. 230- 233.
- [2] Gąsiorowski A., Posyłek Z.; Praktyczna realizacja rezonansowego falownika szeregowego pracującego z potrójną częstotliwością względem częstotliwości przełączania elementów, *Przegląd Elektrotechniczny* (ISSN 0033-2097), 2013, R. 89, Nr 12, s. 370- 373.
- [3] Kalembasa D.; Ilość i skład chemiczny popiołu z biomasy roślin energetycznych. *Acta Agrophysica* (ISSN 1243-4125), 2006, Nr 7(4), s. 909-914.
- [4] Małkiński W. Zając, J.; Wybrane problemy wizyjnej analizy właściwości termicznych materiałów przy wykorzystaniu analizatora do wyznaczenia punktów charakterystycznych przemian fazowych, *Elektronika* (ISSN 0033-2089) 2013, vol. 54, Nr 4, s. 51-55.
- [5] Mitra-Kutno, Filtry i Kondensatory, Katalog Mitra Sp. z o. o., Kutno, wydanie 2014 r.
- [6] Mućko J.; Tranzystorowe falowniki napięcia z szeregowymi obwodami rezonansowymi, *Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy Rozprawy Nr 148, Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego Bydgoszcz 2011, stron 206 (ISSN 0209-0597).*

NORMY

- [N1] DIN 51730 Testing of solid fuels - Determination of fusibility of fuel ash (Badanie paliw stałych-Określenie topliwości popiołów).
- [N2] ISO 1171:2010 Solid mineral fuels - Determination of ash (Stale paliwa mineralne – Określenie popiołu).
- [N3] PN-ISO 540:2001 Paliwa stałe, Oznaczenie topliwości popiołu w wysokiej temperaturze metodą rurą.
- [N4] PN-82/G-04535 Paliwa stałe. Oznaczenie charakterystycznych temperatur topliwości popiołu.

Autorzy: dr inż. Aleksander Gąsiorowski, Politechnika Częstochowska, Instytut Elektrotechniki Przemysłowej, Zakład Podstaw Elektrotechniki, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: alekq@el.pcz.czest.pl; dr inż. Zdzisław Posyłek, Instytut Telekomunikacji i Kompatybilności Elektromagnetycznej, Zakład Energoelektroniki i Podstaw Telekomunikacji, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: zdzychu@el.pcz.czest.pl
Dr inż. Tomasz Drózdź, Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, 30-149 Kraków, ul. Balicka 116 D, E-mail: tomasz.drozd@ur.krakow.pl