

# Wysokoczęstotliwościowy indukcyjny piec rurowy do wyznaczania temperatury topliwości popiołu

Igor Piotr Kurytnik

Małopolska Uczelnia Państwowa im. rot. W. Pileckiego, Instytut Zarządzania i Inżynierii Produkcji, ul. M. Kolbego 8, 32-600 Oświęcim

Stanisław Lis, Marcin Tomasiak, Piotr Nawara

Uniwersytet Rolniczy, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, Katedra Energetyki i Automatykacji Procesów Rolniczych, ul. Balicka 116, 30-149 Kraków

**Streszczenie:** Praca opisuje problematykę wyznaczania temperatury topliwości popiołu za pomocą indukcyjnego pieca rurowego wykonanego wg autorskiego projektu, realizującego proces spalania (stapiania) próbek popiołu zgodnie z normą z PN-ISO-540:2001. Proces ten jest kontrolowany przez sterownik PLC z zaprogramowanym algorytmem regulacji i stabilizacji temperatury PID, urządzenie wyposażone jest w termoparę typu S oraz system cyfrowej rejestracji i analizy obrazu. Rejestracja obrazu jest niezbędna do wyznaczenia temperatury płynięcia popiołu, wartość ta jest identyfikowana przy zmianie stanu skupienia z stałego w ciekły, próbka popiołu przechodzi z walcowatego kształtu w płynną postać. Prowadzone badania są niezwykle ważne w kontekście spalania biomasy w kotłach, dobór optymalnej temperatury spalania pozwoli przeciwdziałać powstawaniu ceramicznej warstwy na ściankach kotła, która pogarsza jego właściwości eksploatacyjne i w szerszej perspektywie czasu doprowadzi do jego wyłączenia z eksploatacji. Wybrane elektrociepłownie są zobligowane do spalania biomasy w ramach realizacji polityki wzrostu udziału energii odnawialnej w ogólnym bilansie energetycznym, m.in. przez wykorzystanie biomasy. Ponieważ pochodzenie biomasy jest zróżnicowane, stąd również jej skład fizyko-chemiczny jako paliwo jest niejednorodny, dlatego elektrociepłownie muszą określać temperaturę płynięcia popiołu dla poszczególnych partii tego paliwa.

**Słowa kluczowe:** topliwość popiołu, pomiar temperatury, wysokotemperaturowy piec indukcyjny, cyfrowa analiza obrazu

## 1. Wprowadzenie

Spalanie każdego paliwa stałego związane jest z uzyskaniem określonej ilości popiołu stanowiącego produkt uboczny tego procesu (ilość ta jest ściśle związana z rodzajem paliwa [1], jego składem chemicznym [2] i stanowi jego cechę charakterystyczną). Ponadto zawartość określonych pierwiastków ściśle determinuje topliwość popiołu danej biomasy. Ca i Mg podnoszą temperaturę topnienia, natomiast K ją obniża [1, 2]. Chlorki i niskotopliwe glinokrzemiany mogą również znacząco obniżyć temperaturę topnienia, co w efekcie powoduje tworzenie się spieków i zużłta w komorze spalania. Pojawiające się

w popiele lotnym stopione cząstki osadzają się na chłodzonych ściankach pieca i wymienników ciepła. Ze względu na powyższe, popiół ze słomy, traw i ziarna zawierających niewielki ilości Ca i dużą ilość Si i K charakteryzują się niską, w porównaniu do drewna, temperaturą topnienia popiołu. 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. Zawartość metali alkalicznych oraz obecność chloru i siarki w spalonym materiale może być przyczyną tworzenia się korozji wysokotemperaturowej na powierzchniach grzewczych wnętrza kotła. Dla materiałów stosowanych do celów energetycznych opracowane zostały 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.

W energetyce przemysłowej coraz powszechniej jest stosowana biomasa lignocelulozowa, zwykle dostarczana w postaci granulowanej (pelet, brykiet). Biopaliwa te są produkowane z różnych surowców, m.in. roślin energetycznych [3], których

### Autor korespondujący:

Igor Piotr Kurytnik, ikurytnik@uczelniaoswiecim.edu.pl

### Artykuł recenzowany

nadesłany 11.02.2020 r., przyjęty do druku 21.06.2020 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

gama gatunkowa jest stale rozszerzana w wyniku postępujących prac badawczych [5, 7, 8]. W dużych jednostkach (elektrownie, elektrociepłownie) biomasa występuje również jako domieszka do spalane go węgla kamiennego i brunatnego, torfu i innych paliw stałych. Przepisy wielu krajów warunkują wprowadzenie paliw ze źródeł odnawialnych (tj. biomasa), zachodzi więc konieczność opracowania metodyki badania paliw spalanych w kotłach. Wymagania wprowadzone przez normy i przepisy [N1, N2] badania właściwości fizycznych i chemicznych materiału spalane go zaowocowały stworzeniem normatywnych procedur badawczych i opracowaniem urządzeń do określenia tych właściwości. Jednym z ważniejszych parametrów, istotnych dla użytkowników pieców, jest oznaczenie temperatury topnienia oraz płynięcia popiołu. Przekroczenie w piecu tych temperatur powoduje zalanie rusztu płynnym popiołem (szlaką), co eliminuje piec z dalszej pracy. Temperatury te, dla popiołów powstałych ze spalania peletów lub innych paliw z domieszką peletu, są różne [3, 13]. Dlatego normy nakładają na producenta materiału umieszczenie na opakowaniu każdej partii informacji o temperaturze topnienia i płynięcia popiołu. Stosowane obecnie urządzenia do określenia topliwości popiołu, ze względu na określoną przez normę [N3] procedurę grzania, wymagają długotrwałego procesu badawczego. Dlatego konieczne było opracowanie urządzenia, które w sposób wystarczająco szybki (nawet ze skróceniem procesu grzania wskazanego przez normę [N3]) umożliwi określenie topliwości popiołu, z możliwością natychmiastowego powtórzenia pomiarów.

## 2. Założenia konstrukcyjne dla prototypu urządzenia do badania topliwości popiołów metodą rurową

W urządzeniach do badania topliwości popiołu metodą rurową stosowane są zwykle dwa typy wysokotemperaturowych elementów grzejnych: elementy sylicytowe wykonane z rekrystalizowanego 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 w wysokiej temperaturze pracy, wzrostem rezystancji (spadkiem mocy) wraz ze wzrostem temperatury, wyjątkową kruchością oraz koniecznością zastosowania specjalnego rodzaju sterowania wzrostem temperatury. W niektórych starszych rozwiązaniach grzejnych urządzeń do badania topliwości popiołów, jako elementy grzejne stosowane są również druty i taśmy oporowe umieszczone w materiałach ceramicznych. Zgodnie z normami [N3, N4] urządzenia te muszą pracować w neutralnym środowisku gazowym.

Realizacja prac przedstawionych w artykułach [10, 11] i zdobyte doświadczenia pozwoliły na zaproponowanie nowego rozwiązania pieca do badania topliwości popiołu. Przedstawione rozwiązanie jest przystosowane do elastycznego ustawiania programu badań. Charakterystyka urządzenia:

- działa na zasadzie wykorzystania zjawiska rezonansu elektrycznego i wysokoczęstotliwościowego grzania indukcyjnego,
- ma funkcję szybkiego procesu nagrzewania próbek popiołu, aż do zaobserwowania i określenia temperatury płynięcia popiołu,
- umożliwia stosowanie wymiennej rury wykonanej z materiału przewodzącego (grafitu), który w czasie procesu nagrzewania wydzielalby tlenek węgla i dwutlenek węgla w odpowiednich proporcjach, co gwarantuje atmosferę neutralną w jej wnętrzu,
- wyposażone jest w kilkunastokrotny wzбудnik wykonany z przewodzącej prąd elektryczny rurki, przez którą przepływa ciecz chłodząca w obiegu zamkniętym, wzbudnik kumuluje energię pola elektromagnetycznego w przewodzącej rurze grafitowej,

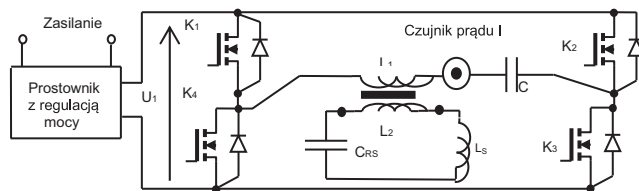
- stanowi lekką i zwartą konstrukcję ułatwiającą transport, zasilane jest energią elektryczną prądu przemiennego 230 V AC,
- układ sterowania oparty jest na sterowniku PLC, w którym umieszczono kilka wariantów charakterystyk wzrostu temperatury topionej próbki, co czyni go urządzeniem uniwersalnym, ponadto wprowadzono stabilizację temperatury wewnątrz komory pieca z zastosowaniem programowego bloku regulatora PID.

## 3. Budowa i działanie układ przekształtnika

Laboratoryjne urządzenie do badania topliwości popiołu metodą rurową 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 [12].

Aby uzyskać duże prądy i jak najmniejsze straty mocy w urządzeniu zastosowano transformator, którego strona wtórna, oprócz skupionej pojemności, rezystancji obwodu i indukcyjność wzbudnika oraz wprowadzanej do obwodu przez grzany element grafitowy, stanowią obwód rezonansowy szeregowy [9, 13, 12]. 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 transformator oraz kondensator  $C$  blokujący składową stałą źródła zasilania (rys. 1).

Wielkością wyjściową w stosowanym układzie przekształtnikowym o obciążeniu rezonansowym jest napięcie stałe o wartości  $U_s$ , które przekazywane jest do obciążenia za pomocą kluczowania. 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 wyłączenia odpowiednich par kluczy towarzyszy pojawienie się wymuszenia napięciowego na gałęzi rezonansowej  $R, L, C$  w postaci napięcia przemiennego o przebiegu zbliżonym do sinusoidy. 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 (kluczy sterujących) z zapewnieniem przerwy



Rys. 1. Uproszczony schemat działania układu przekształtnikowego:  $U_1$  – napięcie zasilania obwodu,  $K$  – tranzystory mocy typu MOSFET,  $L_1$  – indukcyjność strony pierwotnej transformatora,  $L_2$  – indukcyjność strony wtórnej transformatora,  $L_S$  – indukcyjność pozostałych elementów obwodu rezonansowego (wzbudnika wraz z rurą grafitową),  $CR_S$  – pojemność kondensatora rezonansowego i pojemność strony wtórnej transformatora

Fig. 1. Simplified diagram of the operation of the converter:  $U_1$  – circuit supply voltage,  $K$  – MOSFET power transistors,  $L_1$  – transformer primary inductance,  $L_2$  – transformer secondary inductance,  $L_S$  – inductance of other elements of the resonant circuit (exciter with graphite pipe),  $CR_S$  – capacity resonant capacitor and transformer secondary capacity

czasowej, tzw. *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 połowe (efekt zbliżenia przewodów, efekt wypierania prądu, czyli zjawisko naskórkowości oraz inne), niewyjawiające 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 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 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*. Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono widok prototypowego urządzenia wraz systemem analizy obrazu.

Parametry techniczne urządzenia grzejnego (RZ-1) są następujące: sieciowe napięcie zasilania  $U = 230\text{ V AC}$ , moc czynna  $P = 2,0\text{ kW}$ , częstotliwość pracy wzbudnika  $f = 117\text{ kHz}$ , indukcyjność  $L_s = 1,4\text{ }\mu\text{H}$ , pojemność w postaci baterii kondensatorów złożona z kondensatorów typu HC-03 [13] o pojemności całkowitej  $C_{RS} = 1,6\text{ }\mu\text{F}$ . 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  $\varnothing 6\text{ mm}$  o 6 zwojach. Wzbudnik chłodzony jest skutecznie wodą w obiegu zamkniętym. Urządzenie może pracować do temperatury  $1500\text{ }^\circ\text{C}$  (maksymalnie  $1600\text{ }^\circ\text{C}$ ).

Do zmiany nastaw temperatury zastosowano sterownik PLC, w którym zaprogramowano algorytm wzrostu temperatury zgodnie z normą [N3, N4], w programie zastosowano blok regulatora PID odpowiedzialnego za stabilizację temperatury. Sterownik PLC współpracuje z termoelementem typu S-PtRh-Pt (platyna-rod/platyna) o temperaturze pracy do  $1600\text{ }^\circ\text{C}$ . Doświadczenie uzyskane w rozlicznych pracach naukowych pozwoliły na odpowiednie przygotowanie systemu pomiaru temperatury [4]. Czujnik temperatury umieszczony został w środku rury grafitowej. Obraz podczas badań zarejestrowano przy wykorzystaniu kamery Logitech HD 720p i zastosowaniu filtra szklanego 50 mm o zaciemnieniu DIN6.

## 4. Spalanie peletu z biomasy

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 zamienia 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 pozostała 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 (proces zachodzi w temperaturze około  $260\text{--}280\text{ }^\circ\text{C}$ ). Powstają wtedy gazy, takie jak tlenek węgla (CO), wodór ( $\text{H}_2$ ) i metan ( $\text{CH}_4$ ) oraz inne węglowodory oraz węgiel drzewny. Jeżeli w piecu jest wystarczająca ilość powietrza, wtedy gazy palą 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. Zawartość popiołu jest ściśle powiązana z brudem i piaskiem w korze drzewnej oraz z solami wchłanianymi w procesie wzrostu drzewa.

Pelety drzewne charakteryzują się niską zawartością popiołu, zazwyczaj w granicach od 0,5% do 15%. Głównymi składnikami biomasy są węgiel (C), wodór (H), tlen (O), azot (N), siarka (S) oraz chlor (Cl). Skład biomasy charakteryzuje się dużą różnorodnością wynikającą z faktu, iż zależy on np. od miejsca, w którym rosła, sposobu jej uprawy oraz nawożenia. Głównymi składnikami formującymi popiół są: Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, P, Si, Ti, natomiast dodatkowymi składnikami są: As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Tl, V, Zn. Składniki popiołu takie jak Ca i Mg zwykle przyczyniają się do wzrostu temperatury topnienia popiołu, natomiast K znacząco obniża temperaturę topnienia popiołu. Punkt topnienia popiołu może również znacząco spadać, jeżeli biomasa zawiera takie substancje jak chlorki oraz niskotopliwe alkalia i glinokrzemiany [14]. Z powodu zawartości popiołu wynoszącej nawet kilkanaście procent, a także alkalicznych składników, w instalacjach kotłowych należy zastosować specjalne urządzenia do usuwania popiołu. Arsen, kadm, chrom, ołów i rtęć to metale śladowe występujące w małych ilościach w popiołach z biomas. Skład chemiczny



Rys. 2. Prototypowe stanowisko laboratoryjne  
Fig. 2. Prototype laboratory stand



Rys. 3. Sterownik pieca  
Fig. 3. Furnace controller



biomasy charakteryzuje się dużą niejednorodnością, a zawartość takich składników jak tlen, chlor i azot powoduje emisję dioksyn, furanów i chlorowodoru. W biomasach z dużą zawartością azotu jest duże stężenie protein, w których azot występuje w formie grup aminowych ( $-NH_2$ ). Mała gęstość biomasy powoduje konieczność zapewnienia dużej powierzchni na jej składowanie, utrudnia jej efektywny transport oraz dozowanie do paleniska. Dużą część biomasy stanowią materiały lotne, które utrudniają kontrolowanie procesu spalania.

Temperatura zwana temperaturą płynięcia popiołów, jest różna dla różnych rodzajów peletu i zwykle wynosi od około 760 °C do 1500 °C (róża bezkolcowa) [13, 15]. Przekroczenie temperatury płynięcia popiołów w gazach odlotowych może spowodować powstanie na ściankach rur odprowadzających te gazy, grubej warstwy szlaku trudnej do usunięcia. Należy dodać, że mimo niewielkiej zawartości soli potasu i soli sodu w spalonym pelecie, mogą one tworzyć lepki popiół, pokrywający powierzchnię zewnętrzną kotła i ruszt.

## 5. Przygotowanie próbki popiołu do badań

Próbkę do badań stanowi popiół uzyskany ze spopielenia materiału badawczego bądź też popiół pobrany np. z instalacji spalania paliw stałych. Warunkiem użycia próbki popiołu do oznaczenia topliwości jest całkowite spalanie paliwa, z którego popiół pochodzi (próbka nie może zawierać niedopalonych cząstek paliwa). Pobraną próbkę umieszcza się w specjalnym moździerzku i uciera tłuczkiem, nie dopuszczając do jakiegokolwiek zanieczyszczenia próbki. Po rozruci popiół przesiewa się przez sito kontrolne o otworach wielkości 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 3–7 mm), walca (o wysokości 3–9 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) [N3, N4].

Krawędzie uzyskanych próbek powinny być bezwzględnie ostre, by ułatwić obserwację próbki podczas stapiania. Użytkując próbkę należy wysuszyć a następnie umieścić na płycie wykonanej z materiału nieulegającego deformacji, niereagującego i nieabsorbującego popiołu podczas oznaczania. Zaleca się wykonanie płytek ze spieku tlenku glinu lub mulitu. Kolejnym krokiem jest usunięcie z próbki substancji organicznych przez 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.

## 6. Określenie charakterystycznych temperatur topliwości popiołów

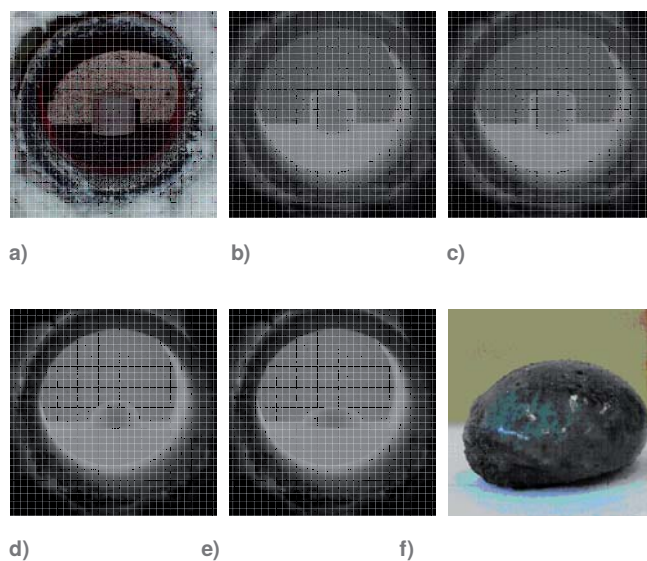
Do wyznaczania temperatur topliwości popiołów wykorzystano sygnał z termoelementu oraz kamerę cyfrową rejestrującą zachowanie się próbki popiołu podgrzewanego w komorze rurowej pieca. Pomiar temperatury odbywał się przy pomocy termoelementu (PtRh-Pt) z dodatkowo przyłączonymi przewodami kompensacyjnymi. Napięcie otrzymane z termoelementu jest napięciem odniesienia dla sterownika PLC, który porównuje je z wartością zadaną (rosnącą zgodnie z procedurą opisaną w normach [N3, N4]).

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

Metodę rurową oznaczania topliwości popiołów w wysokiej temperaturze określa norma [N3]. Określa ona metodę ogrzewania odpowiednio ukształtowanej próbki sprasowanego popiołu (o ostrych brzegach), z szybkością 30 °C · min<sup>-1</sup> do temperatury 900 °C oraz 10 °C · min<sup>-1</sup> powyżej temperatury 900 °C w neutralnym środowisku gazowym wytwarzanym tu przez nagrzaną rurę grafitową. Obserwacja bezpośrednia zachowania się próbki lub zapis jej obrazu pozwala na ustaleniu charakterystycznej temperatury topliwości popiołu na podstawie wizualnej oceny zmian konturów badanej kształtki, obserwowanych na siatce pomiarowej (rys. 4).

Obraz z całego procesu nagrzewania próbki w rurze, od chwili osiągnięcia temperatury startowej wynoszącej 750 °C, rejestrowany jest klatkowo (20 obrazów na minutę) w celu późniejszego określenia parametrów topliwości popiołów. Następnie obraz poddawany jest opracowaniu numerycznemu [16].

Do wyznaczenia charakterystycznych konturów kształtu wykorzystano metody i techniki analizy obrazu. Analiza obrazu to proces przetwarzania informacji (danymi wejściowymi jest obraz a danymi wyjściowymi zapisane w postaci np. liczb, tablicy liczb). Do realizacji tych zadań korzysta się z systemów komputerowych. Aphelion jest zaawansowaną aplikacją, która służy do przetwarzania obrazu i ilościowej analizy służącym do szybkiego prototypowania aplikacji, rozwoju nowych technik obrazowania, uczenia „patrzenia” komputera i wdrażania aplikacji [6]. Aphelion od większości oprogramowań służących analizie obrazu pozwala nakładać obiekty na różne obrazy (wzorce, np. wg PN) i dokonywać porównań, przesuwac, wygładzac, łączyc ze sobą obiekty z różnych zbiorów. Mimo tego, że na siebie nachodzą, stanowią dwie różne warstwy. Obrazy analizowane w Aphelionie mogą być binarne, szare lub kolorowe, o dowolnej wielkości [17]. W wyniku zastosowania filtru uzyskuje się pewne działania algebraiczne na liczbach, które opisują kolor lub stopień szarości w sąsiedztwie analizowanego punktu i uzyskując charakterystyczne kontury kształtu podczas oznaczania topliwo-



Rys. 4. Próbkę popiołu: a) przed rozpoczęciem pomiarów, b)  $T_s$  – temperatura spieknięcia popiołu, c)  $T_a$  – temperatura mienienia popiołu, d)  $T_d$  – temperatura topnienia popiołu, e)  $T_c$  – temperatura płynięcia popiołu, f) widok próbki po badaniu  
Fig. 4. Ash sample: a) before starting measurements, b)  $T_s$  – ash sintering temperature, c)  $T_a$  – ash flux temperature, d)  $T_d$  – ash melting temperature, e)  $T_c$  – ash flow temperature, f) sample view after the test

ści popiołu. Kolejnym etapem analizy obrazu jest analiza obrazu z zarejestrowaną temperaturą, przy której powstają charakterystyczne kontury kształtu. Zbudowane stanowisko laboratoryjne wraz z platformą Aphelion pozwala na automatyczne analizowanie charakterystycznych konturów i temperatur topliwości popiołu metodą rurową.

## 7. Wnioski

Zbudowane prototypowe stanowisko laboratoryjne spełnia wymagania norm [N1, N4]. Przeprowadzone badania próbne różnych popiołów wykazały, że zaproponowane rozwiązanie może być stosowane do:

- określania topliwości popiołów metodą rurową dla popiołów dennych otrzymywanych w procesie spalania biomasy ligno-celulozowej, oraz mieszaniny biomasy z węglem kamiennym, brunatnym, torfem oraz tych kopalni bez biomasy. Nie wyklucza to znacznie szerszych możliwości badawczych dla innych paliw stałych,
- przybliżonego określenia temperatury topliwości popiołu przy szybszym, odbiegającym od przyjętej normy, nagrzaniu próbki sprasowanego popiołu,
- prawie natychmiastowego ponownego badania kolejnej próbki popiołów, w nowej rurze grafitowej umieszczonej we wzbudniku, po wyjęciu rury wcześniej stosowanej.

Na stanowisku prowadzono badania nad określeniem zależności temperatury płynięcia popiołu od składu i zanieczyszczenia biomasy. Ponadto urządzenie może służyć do określania temperatury zapłonu peletu. Temperatura zapłonu jest ważnym parametrem każdego paliwa charakteryzującym jego właściwości użytkowe i każda specyfikacja jakościowa paliwa wymaga oznaczenia tego parametru. Analiza obrazu pozwala na szybkie zaimplementowanie platformy Aphelion do określenia charakterystycznych konturów kształtu oraz charakterystycznej temperatury topliwości popiołu.

## Bibliografia

1. Obernberger I., *Nutzung fester Biomasse in Verbrennungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Verhaltens aschebildender, Elemente*, Schriftenreihe „Thermische Biomassenutzung“, Band 1, dbv-Verlag der Technischen Universität Graz, Graz, Österreich, 1997.
2. Van Loo S., Koppejan J., (eds.) *Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*, IEA Bioenergy Task 32, London, 2002.
3. Kalembsa D., *Ilość i skład chemiczny popiołu z biomasy roślin energetycznych*. „Acta Agrophysica”, Vol. 7, Nr 4, 2006, 909–914.
4. Kurytnik I.P., Juskiewicz Z., *Metodyczne błędy pomiaru temperatury termometrem przemysłowym*, „Pomiary Automatyka Robotyka”, R. 22, Nr 1, 2018, 57–58, DOI: 10.14313/PAR\_227/57.
5. Lis S., Tomasik M., Nęcka K., Drózd T., Nawara P., Wrona P., Oziembłowski M., *Konstrukcja i analiza modelu symulacyjnego układu sterowania piecem indukcyjnym*, „Przegląd elektrotechniczny”, Nr 12, 2015, 147–151, DOI: 10.15199/48.2015.12.37.
6. Wojnar L., Kurzydłowski K.J., Szala J., *Praktyka analizy obrazu*. Wyd. Polskie Towarzystwo Stereologiczne, Kraków 2002.
7. Nęcka K., Lis S., Drózd T., Nawara P., Wrona P., Oziembłowski M., *Charakterystyka prototypowego stanowiska laboratoryjnego do badania topliwości popiołu metodą rurową*. „Przegląd Elektrotechniczny”, Nr 1, 2016, 109–112, DOI: 10.15199/48.2016.01.26.

8. Tomasik M., Lis S., Nęcka K., Oziembłowski M., Kielbasa P., Drózd T., Nawara P., Ostafin M., *Sterowanie piecem indukcyjnym do laboratoryjnego spalania biomasy*, „Przegląd elektrotechniczny”, Nr 12, 2016, 173–177, DOI: 10.15199/48.2016.12.44.
9. Gąsiorski A., Posyłek Z., *Nietypowe rozwiązanie indukcyjnego wysokoczęstotliwościowego pieca tyglowego*, „Przegląd Elektrotechniczny”, R. 89, Nr 12, 2013, 230–233.
10. Gąsiorski A., Posyłek Z., *Praktyczna realizacja rezonansowego falownika szeregowego pracującego z potrójną częstotliwością względem częstotliwości przełączania elementów*, „Przegląd Elektrotechniczny”, R. 89, Nr 12, 2013, 370–373.
11. Mućko J., *Tranzystorowe falowniki napięcia z szeregowymi obwodami rezonansowymi*, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy Rozprawy Nr 148, Wyd. Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz 2011.
12. Gąsiorski A., Posyłek Z., Kielbasa P., *Oszczędny jednofazowy falownik do grzania indukcyjnego z odzyskiem energii pracujący z trzecią harmoniczną*, „Przegląd Elektrotechniczny”, Nr 12, 2017, 95–98, DOI: 10.15199/48.2017.12.24.
13. Chungen Yin, Lasse A. Rosendahl, Siren K. Kaer, *Grate-firing of biomass for heat and power production*, Institute of Energy Technology, Aalborg University, Denmark, Progress in Energy and Combustion Science, Nr 34, 2008, 725–754.
14. Kowalczyk-Juško A., *Źródła biomasy na cele energetyczne*, „Bioenergetyka podkarpacka”. B. Kościk (red.). PWSZ w Jarosławiu, 2007.
15. Małkiński W., Zajac J., *Wybrane problemy wizyjnej analizy właściwości termicznych materiałów przy wykorzystaniu analizatora do wyznaczania punktów charakterystycznych przemian fazowych*, „Elektronika – konstrukcje, technologie, zastosowania”, Vol. 54, Nr 4, 2013, 51–55.
16. Gawlik J., Magdziarczyk W., Wojnar L., *Analiza fraktalna struktury geometrycznej powierzchni*, Mat. Konf. pt. Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji, Zakopane, 382-396, 2011.
17. Rybak W., *Spalanie i współspalanie biopaliw stałych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2006.

## Normy

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

# High Frequency Induction Tube Furnace for Determining Ash Melting Temperature

**Abstract:** The work describes the problem of determining the fusibility of ash using an induction tube furnace made according to the author's project, carrying out the process of burning (melting) ash samples in accordance with the PN-ISO-540: 2001 standard. This process is controlled by a PLC with a programmed PID temperature regulation and stabilization algorithm, the device is equipped with a S-type thermocouple and a digital image recording and analysis system. Image registration is necessary to determine the ash flow temperature, this value is identified when the state of aggregation changes from solid to liquid, the ash sample passes from a cylindrical shape to a liquid form. The conducted research is extremely important in the context of biomass combustion in boilers, the selection of the optimal combustion temperature will prevent the formation of a ceramic layer on the boiler walls, which deteriorates its operational properties and in the longer term will lead to its decommissioning. Selected combined heat and power plants are obliged to burn biomass as part of the policy of increasing the share of renewable energy in the overall energy balance, including by using biomass. Because the origin of biomass is varied, hence its physico-chemical composition as a fuel is heterogeneous, therefore CHP plants must determine the ash flow temperature for individual batches of this fuel.

**Keywords:** ash melting, temperature measurement, high temperature induction furnace, digital image analysis

## prof. dr hab. inż. Igor Piotr Kurytnik

ikurytnik@uczelniaoswiecim.edu.pl  
ORCID: 0000-0001-6898-8527

Profesor zwyczajny Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Oświęcimiu (kierownik Zakładu Inżynierii Procesów i Jakości). Z wyróżnieniem ukończył Wydział Automatyki i Elektroniki Politechniki Lwowskiej (1968 r.). Obrona doktoratu – 1973 r., habilitacja – 1987 r., prof. tytularny – 1990 r. Jest autorem ponad 250 patentów i publikacji naukowo-technicznych z zakresu technik informacyjno-pomiarowych. Członek Akademii Inżynierskich w Polsce i na Ukrainie. Reprezentant Polskiego Komitetu Normalizacyjnego, konsultant do spraw rozwoju firmy Limatherm Sensor.



## dr inż. Marcin Tomasik

marcin.tomasik@urk.edu.pl  
ORCID: 0000-0002-3152-4654

Absolwent Wydziału Techniki i Energetyki Rolnictwa Akademii Rolniczej im. H. Kołłątaja w Krakowie. W 2005 r. uzyskał stopień doktora nauk rolniczych w zakresie inżynierii rolniczej. Od 2005 r. pracuje na stanowisku adiunkta w Katedrze Energetyki i Automatykacji Procesów Rolniczych na Wydziale Inżynierii Produkcji i Energetyki Uniwersytetu Rolniczego im. H. Kołłątaja w Krakowie. Jest autorem i/lub współautorem dwóch monografii, 90 publikacji w krajowych czasopismach naukowych, sześciu publikacji w zagranicznych czasopismach naukowych, w tematyce modelowania, automatyzacji (z zastosowaniem PLC oraz systemów informatycznych SCADA) procesów produkcyjnych.



## dr inż. Stanisław Lis

stanislaw.lis@urk.edu.pl  
ORCID: 0000-0002-7813-5322

Absolwent Wydziału Techniki i Energetyki Rolnictwa Akademii Rolniczej im. H. Kołłątaja w Krakowie. W tejże Uczelni w 2009 r. uzyskał stopień doktora nauk rolniczych w zakresie inżynierii rolniczej. Od 2011 r. pracuje na stanowisku adiunkta w Katedrze Energetyki i Automatykacji Procesów Rolniczych na Wydziale Inżynierii Produkcji i Energetyki Uniwersytetu Rolniczego im. H. Kołłątaja w Krakowie. Jego zainteresowania badawcze obejmują automatyzację i robotyzację procesów rolnospożywczych.



## dr inż. Piotr Nawara

piotr.nawara@urk.edu.pl  
ORCID: 0000-0002-4497-8858

Absolwent Wydziału Techniki i Energetyki Rolnictwa Akademii Rolniczej im. H. Kołłątaja w Krakowie. W 2006 r. uzyskał stopień doktora nauk rolniczych w zakresie inżynierii rolniczej. Obecnie pracuje na stanowisku adiunkta w Katedrze Eksploatacji Maszyn, Ergonomii i Procesów Produkcyjnych na Wydziale Inżynierii Produkcji i Energetyki Uniwersytetu Rolniczego im. H. Kołłątaja w Krakowie. Jest współautorem ponad 32 publikacji, książki pt. Metody zabezpieczania i utrwalania surowców oraz produktów żywnościowych – studium przypadku. Ponadto posiada współautorstwo zgłoszenia patentowego o numerze W128367, szkolenie z zakresu „Szacowania niepewności”, obsługi Xenometrix XRF i LabVIEW.

