

## Urządzenie do badania topliwości popiołu węgla kamiennego metodą rurową

**Streszczenie.** Zaproponowane urządzenie do badania topliwości popiołu węgla kamiennego pracuje w układzie z mostkiem typu „H” wraz z transformatorem dopasowującym, po stronie wtórnej dostrojonym do częstotliwości rezonansu szeregowego obciążenia wykonanego z rurki miedzianej stanowiącej wzbudnik indukcyjny połączony szeregowo z baterią kondensatorów. Wewnątrz wzbudnika znajduje się umieszczona poziomo odizolowana termicznie rura grafitowa stanowiąca komorę roboczą. Temperaturę płynięcia popiołu określa się na podstawie wizualnej oceny zmian konturów badanej próbki obserwowanych na siatce pomiarowej.

**Abstract.** The proposed device for testing the hard coal ash fusibility works in a system with the "H" bridge together with the matching transformer, on the secondary side tuned to the resonance frequency of the series load made of a copper tube constituting an induction coil connected in series with the capacitor bank. There is a horizontally thermally insulated graphite tube inside the work coil, which is a working chamber. The ash flow temperature is determined on the basis of a visual evaluation of changes in the contours of the test sample observed on the measuring grid. (**Equipment for testing the fusibility of coal ash pipe method.**)

**Słowa kluczowe:** popioły denne węgla kamiennego, grzanie indukcyjne, badanie topliwości popiołów, temperatura płynięcia.

**Keywords:** bottom ash bottoms, induction heating, ash melting test, pour point.

### Wstęp

W Polsce uzasadnione jest pozyskanie nośników energii pierwotnej, pochodzącej z zasobów krajowych. Do nośników, które pozyskuje się bezpośrednio z natury, należą: węgiel kamienny (energetyczny i koksowy), węgiel brunatny, ropa naftowa, gaz ziemny (wysokometanowy i naazotowany), torf (przede wszystkim dla celów opałowych), drewno opałowe, paliwa odpadowe stałe roślinne i zwierzęce, odpady przemysłowe (stałe i ciekłe), odpady komunalne, inne surowce wykorzystywane do celów energetycznych (np. metanol, etanol), energia wody i wiatru (wykorzystywane do produkcji energii elektrycznej), energia słoneczna i geotermalna (wykorzystywane do produkcji energii cieplej lub elektrycznej).

Polska jest największym producentem węgla kamiennego w Unii Europejskiej, choć wydobycie jego z roku na rok maleje. Jest on w Polsce uważany za surowiec strategiczny, bo w pierwszych latach XXI wieku zaspokajał aż 60% zapotrzebowania energetycznego kraju. Polskie zasoby węgla kamiennego należą do największych w Europie a większość z nich zlokalizowana jest w województwie lubelskim (pokłady ciągną się od Łukowa i Radzyna Podlaskiego do Hrubieszowa) oraz na Górnym Śląsku. Zasoby lubelskie, słabiej udokumentowane niż Śląskie, są wysokiej jakości, leżą na mniejszej głębokości i są większe. Należy również dodać, że węgiel brunatny jest drugim co do znaczenia nośnikiem energii pierwotnej pozyskiwanym w kraju, z którego wytwarza się prawie 1/3 energii elektrycznej produkowanej w Polsce

Paliwa stałe wydobywane metodą górnictwem lub odkrywkową albo pozyskiwane z różnego rodzaju surowców biologicznych różnią się od siebie składem chemicznym, wilgotnością, kalorycznością oraz w przypadku ich spalania składem otrzymanego popiołu. W procesach spalania paliw stałych, do istotnych kryteriów oceny paliwa, należą wskaźniki opisujące zachowanie się popiołu przy dużych temperaturach, co zależy przede wszystkim od składu chemicznego popiołu.

Spalanie węgla kamiennego powoduje emisję między innymi: dwutlenku węgla (SO<sub>2</sub>), tlenków azotu (NO<sub>x</sub>), tlenków węgla (CO), pyłów, metali ciężkich (rtęć, kadm, ołów). Udziały składników analitycznych w węglach kamiennych wynoszą: wilgoć: 1 - 18%, substancja mineralna: 2 - 30%, substancja organiczna: 50 - 98%. Substancja organiczna ma największą wartość użytkową,

jako źródło energii i surowca do przeróbki chemicznej. Wilgoć (czyli woda zawarta w paliwie) i substancja mineralna lub produkt jej rozkładu termicznego w procesie spalania, czyli popiół, stanowi balast nieorganiczny mało użyteczny do przemysłowego wykorzystania paliw stałych. Popiół jest odpadem, który powstaje podczas spalania każdego rodzaju paliwa stałego, stanowiąc balast ciepły, obniżający wartość opałową paliwa, co w prosty sposób prowadzi do zmniejszenia skuteczności pracy urządzeń cieplnych. W procesach przeróbki mechanicznej (płukanie, wzbogacanie grawitacyjne, flotacja i inne), można pozbawiać węgiel kamienny balastu nieorganicznego, zwiększając w ten sposób jego wartość technologiczną oraz handlową.

Zasadniczo popiół dzieli się na część lotną, który jest unoszony przez gazy spalinowe oraz denną, gromadzoną w dolnej części komory paleniskowej. Skład oraz charakter chemiczny popiołu różni się znacznie od pierwotnej substancji mineralnej. Zróżnicowany skład chemiczny wpływa na zakres temperatur topliwości popiołu co prowadzi do powstawania zmiennych warunków pracy palenisk. Na temperaturę topnienia popiołu i skłonność węgla do zanieczyszczania powierzchni grzewczych istotny wpływ ma skład chemiczny substancji mineralnej, przedstawiany jako procentowa zawartość tlenków: SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, SO<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> [2].

### Tworzenie się szlaki w komorach paleniskowych pieców węglowych

Mechanizm tworzenia się trwałych osadów (szlaki) na ścianach komory paleniskowej pieca bywa najczęściej następujący: znajdujące się w strumieniu spalin cząsteczki popiołu, napotykając na swej drodze przeszkodę w postaci metalowego elementu komory paleniskowej pieca, oddają miejscowo swoje ciepło. Cząstka początkowo nie przylega do czystych jeszcze elementów metalowych komory paleniskowej pieca poza najdrobniejszymi cząsteczkami tworzącymi stopniowo warstwę osadu, która izolując te powierzchnie, utrudnia przejmowanie ciepła przez wnętrze pieca. Warstwa mając temperaturę wyższą niż pokrytego nią metalu powoduje, że w niektórych miejscach wnętrza pieca zaczynają się osadzać cząsteczki pyłu o temperaturze wyższej od temperatury płynięcia popiołu. Warunki przepływu spalin w komorze paleniskowej mogą sprzyjać osadzaniu się drobnoziarnistych nalotów na

ściankach wnętrza pieca tworząc warstwę o stopniowo coraz wyższej temperaturze. lub mogą być na bieżąco usuwane je przez wdmuchiwanie co rozwiązuje problem.

Po przekroczeniu pewnej grubości warstwy szlaki zwanej „krytyczną”, narastanie jej może przyjąć charakter lawinowy. Występuje zjawisko pogłębiania się w postaci intensywnego szlakowania miejsc, wokół których proces szlakowania został zainicjowany. Intensywności szlakowania pieców różnych typów spalających węgiel są bardzo zróżnicowane. Często jest to przyczyną spalania innego rodzaju węgla niż tego na który piec był przewidziany. Skutki szlakowania pieca przebiegają się w różnoraki sposób. Wytworzenie nawet stosunkowo niezbyt rozległej warstwy osadów na powierzchniach wnętrza pieca może spowodować zakłócenie równowagi wymiany ciepła w piecu. Niektóre elementy pieca grzeją się mocniej, czasem przekraczając temperaturę płynięcia popiołu a rozkład temperatur jest rozbieżny w stosunku do założeń projektowych pieca. Szlakowanie pogłębia odchylenia parametrów od wartości nominalnych wnętrza pieca. W większości przypadków, ma miejsce wzrost temperatur spalin a tym samym strata sprawności urządzenia. Tego typu osady w komorze paleniskowej pieca, wymagają jego odstawienia i są szczególnie trudne do mechanicznego usunięcia

### **Badanie popiołu powstałego po spaleniu węgla kamiennego**

Obecnie dużą wagę na świecie przykładają się do opracowania metod wszechstronnych badań paliw stałych, a badania własności fizycznych i chemicznych materiału spalanego są wymagane przez normy [N1,N2,N3,N4] oraz normy [N5] jako wytycznych i zaleceń World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) Committee (Komitetu ds. Barier Technicznych w Handlu Światowej Organizacji Handlu), pozwalające na wprowadzenie do sprzedaży węgla kamiennych różnego pochodzenia, dlatego stworzono normatywne procedury i opracowano urządzenia do określania tych własności.

Należy dodać, że motywacje ekonomiczne i ekologiczne spowodowały, że popioły węgla kamiennego coraz częściej nie wyrzuca się na hałdy ale często po podjęciu działań chemicznych nad ich uszlachetnieniem nabierają nowej wartości rynkowej. Stosuje się je jako składniki do produkcji nawozów, wkład do betonów i materiałów do budowy dróg, do stabilizacji gruntów oraz jako wypełniacz w ziemnych robotach rekultywacyjnych.

### **Przygotowanie próbki do wyznaczenia temperatury płynięcia popiołu węgla kamiennego**

Ze względów technicznych, jednym z ważniejszych parametrów dla użytkowników pieców jest oznaczenie temperatury płynięcia popiołu, gdyż przekroczenie tej temperatury w piecu powoduje zalanie rusztu płynnym popiołem (zwanym „szlaką” lub „klinkierem”) co eliminuje pieca z dalszej pracy, na czas niezbędny, do ostudzenia pieca i uciążliwego, mechanicznego oczyszczania rusztu. Temperatura ta, dla popiołów powstałych ze spalania węgla z różnych źródeł jest różna [2]. Dlatego przepisy nakładają na producenta i sprzedawcę węgla udostępnienie użytkownikom informacji o temperaturze płynięcia popiołu.

Obecnie najczęściej stosowane są wizualne oceny topliwości popiołu. Popiół węgla kamiennego do badań przygotowuje się według metody podanej w [N3]. Masa próbki do badań powinna być taka, aby umożliwić wyrównanie temperatury wewnątrz tej próbki, stąd wniosek, że należy unikać próbek o zbyt dużych rozmiarach. Dla ułatwienia obserwacji, próbka do badań powinna mieć ostre krawędzie. Przed przygotowaniem próbki należy sprawdzić

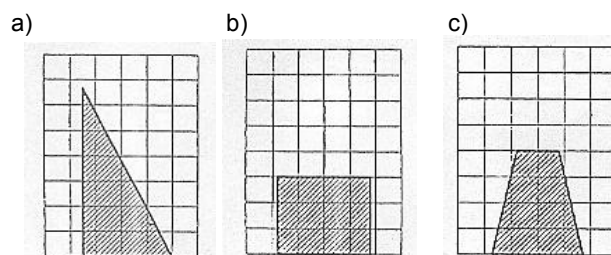
czy spalanie węgla było całkowite. Następnie uciera się otrzymany popiół z węgla w moździerzu agatowym, tak aby największe ziarna były mniejsze niż 0,075 [mm]. Odpowiednią ilość przygotowanego popiołu następnie zwilża się wodą destylowaną lub, jeżeli wystąpi taka konieczność, lepkiem roztworem dekstryny i miesza się na jednolitą masę, której część następnie umieszcza się w formie ugniatającej. Dla ułatwienia wyjmowania próbki do badań z formy ugniatającej można wcześniej powlec ścianki formy cienką warstwą wazeliny. Po wysuszeniu uformowanej sprasowanej próbki do badań ustawia się ją na specjalnie ukształtowanej podstawie grafitowej, którą umieszcza się wewnątrz wypoziomowanej rury grafitowej pieca. W pierwszej kolejności należy usunąć z niej substancje organiczne poprzez wolne ogrzewanie w atmosferze powietrza do temperatury około 815 [°C]). To wstępne ogrzewanie najczęściej przeprowadza się w piecu stosowanym do badania popiołu. Do badania popiołu, w unormowany sposób dopuszcza się jeden z kształtów próbki w postaci [N1]:

a) piramidy której podstawą jest trójkąt równoboczny o wysokości nie powinna być większa od 19 [mm] i powinna być od dwóch do trzech razy większej od długości boku podstawy (rys.1a),

b) sześciangu (kostki) o boku od 3 [mm] do 7 [mm] (rys.1b),

c) pionowego walca o wysokości od 3 [mm] do 9 [mm] którego średnica jest równa wysokości (rys. 1b),

d) ściętego stożka o wysokości 4 [mm], średnicy okręgu 3 [mm] przy podstawie i 1,4 [mm] w górnej części (rys 1c).



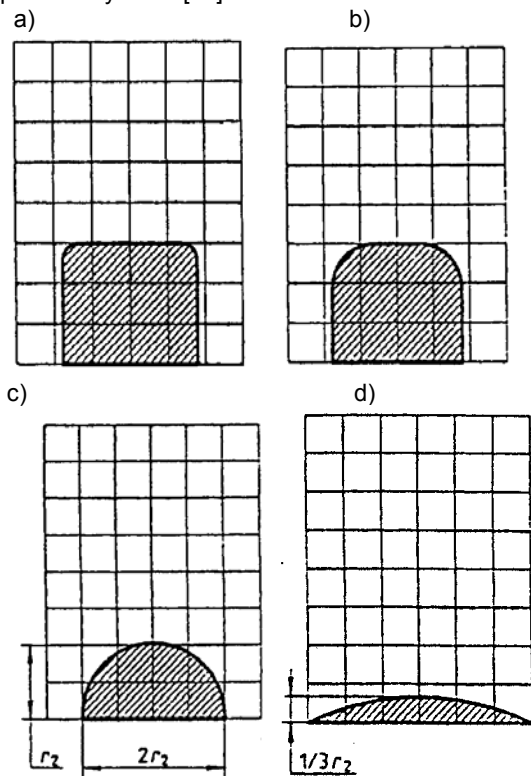
Rys.1. Charakterystyczne początkowy kontury kształtki w formie: a) piramidalnej, b) walca lub sześciangu, c) ściętego stożka.

W czasie prowadzonych badań, odpowiednio ukształtowaną próbkę metodą prasowania w postaci walca o ostrych brzegach i średnicy równej wysokości, niewielką próbkę popiołu ogrzewa się w rurze i na podstawie zmian jej kształtu wyznacza się charakterystyczne temperatury topliwości popiołu. W temperaturze odkształcenia występują pierwsze oznaki zaokrąglenia brzegów w wyniku topienia (rys 2a), końcówki lub krawędzi próbki testowej, w temperaturze sferyczne krawędzie badanej próbki stają się całkowicie okrągłe a walec nie zmienia wysokości (rys.2b), w temperaturze półkuli badana próbka tworzy w przybliżeniu półkulę (to znaczy jej wysokość staje się równa połowie średnicy podstawy) (rys.2c) oraz w temperaturze płynięcia stopiony popiół rozkłada się na płycie nośnej w warstwie, której wysokość stanowi jedną trzecią wysokości badanego elementu w temperaturze półkuli (rys.2d).

### **Założenia dotyczące elektrycznego urządzenia do wyznaczenia temperatury płynięcia popiołu węgla kamiennego**

Elektryczne urządzenie do badania topliwości popiołu węgla kamiennego metodą rurową musi spełniać określone warunki techniczne. Musi posiadać podgrzewaną rurę wykonaną z odpowiedniego materiału, w której odbywa się cały proces badawczy. Musi umożliwić w rurze

zastosowanie wymaganej atmosfery [N1] redukującej o określonej normą mieszaninie gazów przy jej określonej minimalnej prędkości przepływu lub panowania atmosfery utleniającej. Jednocześnie musi posiadać optyczny element wizyjny umożliwiający zmianę konturu próbki podczas ogrzewania oraz ciągły pomiar temperatury. Zaopatrzone musi być w zespół pozwalający na nastawianie minimalnej temperatury pieca (o temperaturze niższej co najmniej o 150 [°C] od przewidywalnej temperaturze deformacji) a następnie na równomierne podnoszenie temperatury ze stałą określoną w normie [N1] prędkością. Przyjęto, że maksymalna temperatura pracy urządzenia do wyznaczania płynięcia popiołu węgla kamiennego nieznacznie przekroczy 1600 [°C].



Rys. 2. Charakterystyczne kontury kształtki w formie walca: a) deformacja, b) kula, c) półkula, d) płynięcie.

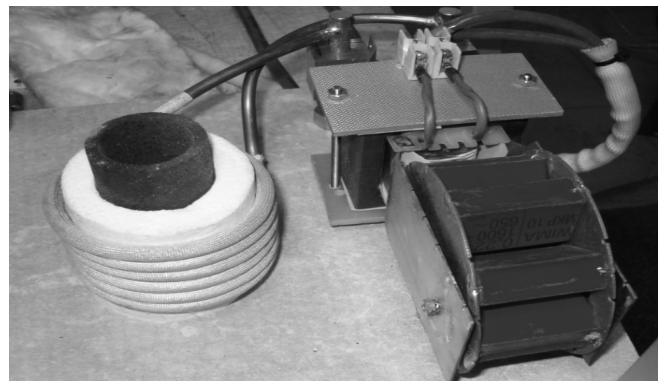
W czasie badań prowadzi się protokół, który musi zawierać informacje:

- identyfikujący badany materiał,
- opisujące zastosowanej metody,
- podające temperaturę deformacji (zaokrąglonej z dokładnością do 10 [°C]),
- podające temperaturę kuli (zaokrąglonej z dokładnością do 10 [°C]),
- podające temperaturę płynięcia (zaokrąglonej z dokładnością do 10 [°C]),
- o rodzaju atmosfery (redukującej lub utleniającej),
- o wszystkich nietypowych zjawiskach odnotowanych podczas oznaczania,
- o innych wykonanych czynnościach nie podanych w normie [N2].

Zwykle badania topliwości popiołu węgla kamiennego przeprowadza się w wyspecjalizowanym laboratorium, w którym próbki sprawdzane są czasem wielokrotnie. Wyniki dwóch równoległych oznaczeń topliwości popiołu z węgla, przeprowadzonych w krótkich odstępach czasu na próbce z tego samego materiału i tak samo wykonanej, przez tego samego analityka, za pomocą tej samej aparatury nie powinny się różnić o więcej niż podano w tablicy na końcu normy [2]. Szczegółowy protokół przeprowadzonych badań dostarczany jest zlecającemu.

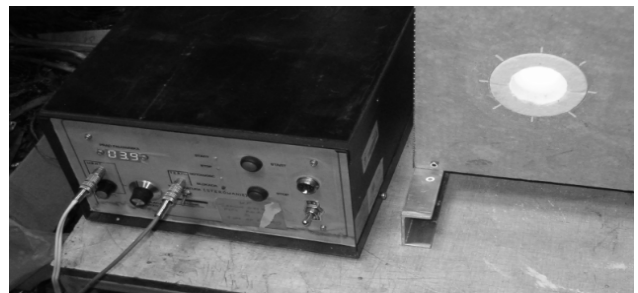
### Prototyp piecyka wysokoczęstotliwościowego

Piec indukcyjny jest jednym z rodzajów pieców stosowanych do badania topliwości popiołu węgla kamiennego metodą rurową. Z punktu widzenia elektrycznego wysokoczęstotliwościowy piec indukcyjny jest specjalnym typem dopasowanego transformatora pracującego w stanie rezonansowym. Uzwojeniem pierwotnym transformatora jest cewka indukcyjna wykonana z rurki miedzianej zwiniętej w spiralną cewkę chłodzoną wodą. Cewka nawinięta jest wokół rury grafitowej (wewnątrz której umieszczana jest badana próbka). Grzana rura grafitowa stanowi wtórne uzwojenie transformatora traktowana i z jednej strony jest czasem traktowana jako uzwojenie wtórne transformatora (zwoj zwarty) a z drugiej strony spełnia rolę rdzenia takiego transformatora. Rura grafitowa stanowi obwód dla przepływu strumienia magnetycznego.



Rys.3. Widok wzbudnika z rura grafitową.

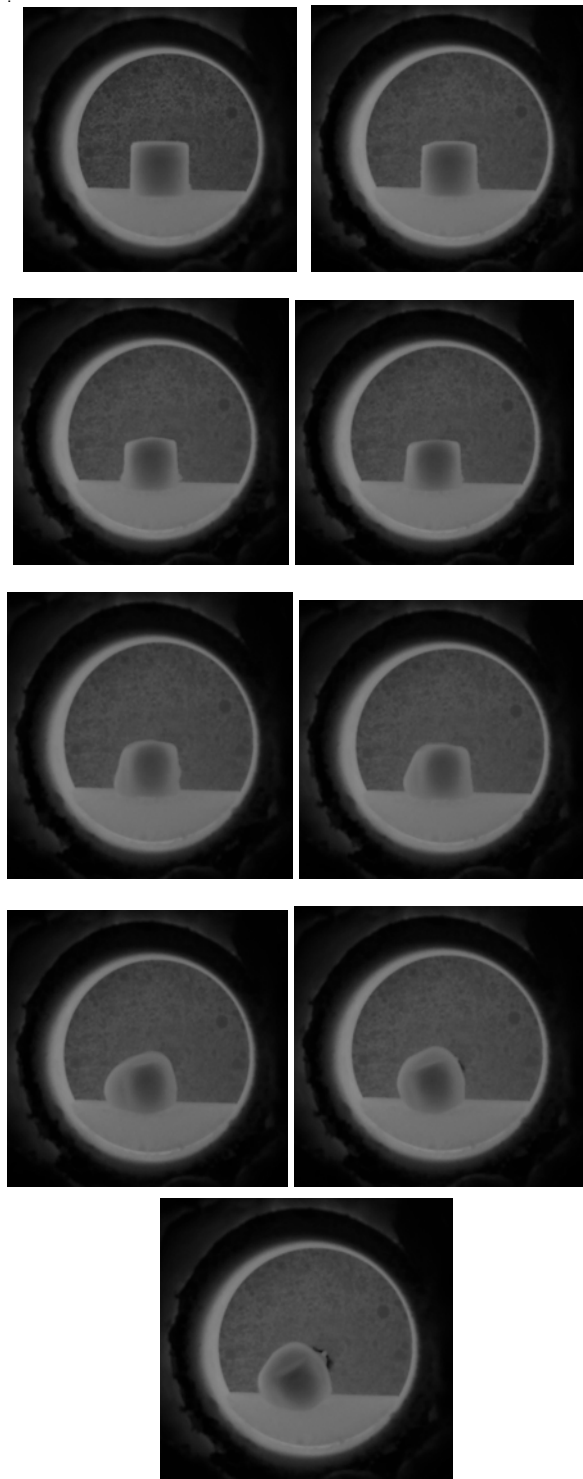
Doświadczenia w budowie urządzenia podobnego typu [1] pozwoliły na konstrukcję prototypu dostosowanego do badania parametrów popiołów dennych otrzymywanych z węgla kamiennego. Prototyp takiego piecyka o mocy  $P=2,5$  [kW], zasilanego z sieci jednofazowej  $U=230$  [V],  $f=50$  [Hz] o temperaturze pracy do 1600 [°C] został zaprojektowany i praktycznie wykonany w Politechnice Częstochowskiej przez mgr inż. Romana Czyżę.



Rys.4. Widok urządzenia, po prawej stronie komora (rura) robocza

W urządzeniu zastosowany został układ typu „H”, wraz z transformatorem dopasującym, dostrojonym do częstotliwości rezonansu szeregowego wynoszącego 120 [kHz] [1]. W skład tego układu wchodzi między innymi wzbudnik wykonany z rurki miedzianej o średnicy  $\phi 6$  [mm] (chłodzony wodą) o liczbie zwojów  $z=5$  oraz bateria 8 kondensatorów o pojemności całkowitej około 2 [μF]. Wewnątrz wzbudnika znajduje się ceramiczna rura firmy *Schupp Ultrabond* o odporności termicznej do ponad 1700 [°C]) do której wsunięta jest rura grafitowa stanowiąca obustronnie otwartą komorę pracy z atmosferą redukującą wewnątrz. Przestrzeń grzewcza została zaprojektowana w ten sposób, aby możliwe było badanie próbek walcowych

lub sześciennych i w postaci sześcianu o wymiarach o średnicy 25 [mm] i wysokości 25 [mm], mimo, że zwykle zgodnie z norma [N1], bada się próbki o wymiarach: sześcian o długości boku od 3 [mm] do 7 [mm], pionowy walec o wysokości równej średnicy wynoszącej od 3 [mm] do 9 [mm].



Rys.5. Rzeczywisty obraz zmiany konturu walcowej próbki pomiarowej popiołu węgla kamiennego wraz ze wzrostem temperatury osiągniętej w rurze prototypowego urządzenia do wyznaczenia temperatury płynięcia popiołu węgla kamiennego. Obraz podczas badań zarejestrowano przy wykorzystaniu aparatu fotograficznego Fujifilm X20 wyposażonego w matrycę Matryca X-Trans CMOS I. Zastosowano filtr B+W ND 3,0-10BL 1000x redukujący światło wpadające do obiektywu o 10 wartości przysłony.

Napięcie otrzymane z termoelementu jest napięciem odniesienia dla regulatora temperatury RE-3 firmy Lumel pracującego w układzie regulatora typu PID. Regulator ten posiada wbudowaną funkcję „ramping” umożliwiającą nastawianie stałej prędkości narastania temperatury w przestrzeni rury z nagrzewaną próbką w określonych zakresach temperatur.

#### Wyniki pracy urządzenia oraz wnioski

W wyniku nabytych wcześniej doświadczeń w budowie podobnego prototypowego urządzenia do wyznaczenia temperatury płynięcia popiołu peletu (znacznie niższa temperatura płynięcia popiołu) udało się zbudować stosunkowo tanie i niewielkie wymiarowo urządzenie do wyznaczenia temperatury płynięcia popiołu węgla kamiennego.

Przeprowadzona została próba pomiarowa na przykładowej walcowej próbce popiołu z węgla kamiennego. Zmiana konturu w rurze prototypowego urządzenia do wyznaczenia temperatury płynięcia popiołu węgla kamiennego podczas podnoszenia temperatury w rurze prototypowego urządzenia do wyznaczenia temperatury płynięcia popiołu węgla kamiennego dla różnych temperatur pokazano na rysunkach 5.

Zaprojektowane i wykonane prototypowe urządzenie spełniło oczekiwane wymagania związane z niskimi kosztami konstrukcji oraz niezawodną jego pracą. Zdaniem autorów, nadaje się ono również do badania topliwości popiołu węgla brunatnego metodą rurową.

**Autorzy:** dr inż. Aleksander Gąsior, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Katedra Elektrotechniki, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: [alekg@el.pcz.czest.pl](mailto:alekg@el.pcz.czest.pl); dr inż. Piotr Nawara, Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, Instytut Eksploatacji Maszyn, Ergonomii i Procesów Produkcyjnych, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, E-mail: [rnawara@cyf-kr.edu.pl](mailto:rnawara@cyf-kr.edu.pl), dr inż. Zdzisław Posyłek, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Katedra Elektrotechniki, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: [zdzychu@el.pcz.czest.pl](mailto:zdzychu@el.pcz.czest.pl).

#### NORMY

- [N1]. PN-82/G-04535: Paliwa stałe. Oznaczenie charakterystycznych temperatur topliwości popiołu.
- [N2]. PN-ISO 540:2001: Paliwa stałe - Oznaczenie topliwości popiołu w wysokiej temperaturze metodą rurową,
- [N3]. PN-ISO 1171:2002: Paliwa stałe - Oznaczenie popiołu.
- [N4]. IN 51730:2007-09: Prüfung fester Brennstoffe - Bestimmung des Asche-Schmelzverhaltens (*Badanie paliw stałych - Określanie topliwości popiołów*).
- [N5]. ASTM D1857, D1857-17A: Standard test method for fusibility of coal and coke ash (*Standardowa metoda testowania topliwości popiołu węgla i koksu*)

#### LITERATURA

- [1] Gąsior A., Posyłek Z., Drożdż T., Prototypowe stanowisko laboratoryjne do badania topliwości popiołu metodą rurową, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91(2015), nr 1,144-147, ISSN 0033-2097.
- [2] Hamala K., Róg L.; Wpływ składu chemicznego i właściwości fizykochemicznych węgli oraz ich popiołów na wskaźnik zużycia i zanieczyszczenia powierzchni grzewczych kotłów energetycznych, *Prace Naukowe GIG, Górnictwo i Środowisko (kwartalnik)*, (2004), nr 3, 81-109, ISSN 1643-7608.