

Marcin ZAKRZEWSKI¹

Anna ŚCIAŻKO^{2,3}

Yosuke KOMATSU³

Shinji KIMIJIMA⁴

Akira HASHIMOTO⁵

Shozo KANEKO⁵

Janusz S. SZMYD²

EKSPERYMENTALNA CHARAKTERYSTYKA SUSZENIA WĘGLA BRUNATNEGO ZA POMOCĄ PARY PRZEGRZANEJ

Artykuł przedstawia wybrane zagadnienia związane z wykorzystaniem oraz osuszaniem węgla brunatnego dla potrzeb przemysłu energetycznego. Badania eksperymentalne przeprowadzono dla próbek węgla ze złoża Bełchatów suszonych w przegrzanej parze wodnej w zakresie temperatur 110 – 170 [°C] pod ciśnieniem atmosferycznym. Pomiarów obejmowały zmiany wagi, rozkład profilu temperatur oraz zmiany struktury próbki. Kinetykę zjawiska opisano w formie krzywych suszenia oraz zależności szybkości suszenia i profilu temperatur od czasu, na podstawie których wyróżniono charakterystyczne fazy procesu. Charakterystyki suszenia wyznaczone w eksperymencie są niezbędne do zaprojektowania efektywnego przemysłowego systemu osuszania węgla umożliwiającego wykorzystanie ciepła utajonego zawartego w odparowanej z węgla wodzie.

Słowa kluczowe: krzywe suszenia, złożo „Bełchatów”, ciśnienie atmosferyczne, ciepło utajone, Okres Stałej/Malejącej Szybkości Suszenia

1. Wprowadzenie

Ze względu na niski koszt wydobycia, który korzystnie wpływa na cenę produkcji energii elektrycznej, węgiel brunatny jest ważnym surowcem energetycznym dla krajów dysponujących jego zasobami. Wśród państw europejskich odpowiadających za 53% globalnej produkcji tego paliwa, Polska ustępuje je-

¹ Autor do korespondencji: Marcin Zakrzewski, Akademia Górniczo-Hutnicza, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel. 12 617 26 85, e-mail: marcin_zakrzewski@poczta.onet.pl.

² Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków.

³ Shibaura Institute of Technology, 307 Fukasaku, Minuma-ku, 337-8570 Saitama, Japan.

⁴ Shibaura Institute of Technology, 307 Fukasaku, Minuma-ku, 337-8570 Saitama, Japan.

⁵ The University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, 153-8505 Tokyo, Japan.

dynie Niemcom oraz Rosji, zajmując tym samym siódme miejsce w świecie [2]. Wydobyte w wysokości 60-70 mln [Mg/rok] przekłada się na udział węgla brunatnego w krajowej generacji energii elektrycznej rzędu 30-35% [6].

W obliczu nieodnawialnego charakteru paliw kopalnych, racjonalne wydaje się dążenie do wykorzystania ich w sposób możliwie najefektywniejszy. Większość węgla niskouwęglonych, do których zalicza się węgiel brunatny, charakteryzuje się zawartością wilgoci na poziomie 50-70% [1]. Strata ciepła związana z koniecznością odparowania wilgoci w procesie spalania rzutuje na niższą niż w przypadku węgla kamiennego użyteczność energetyczną węgla brunatnego. Zmniejszenie tej straty może być realizowane na drodze osuszania węgla.

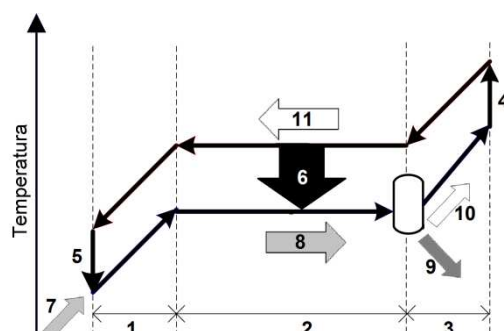
Niniejsza publikacja omawia wybrane parametry suszenia węgla brunatnego ze złoża „Bełchatów” w parze przegrzanej pod ciśnieniem atmosferycznym. Przeprowadzenie badań opisujących zachowanie węgla brunatnego z danego złoża w zróżnicowanych warunkach prowadzi do wyznaczenia kinetyki procesu suszenia, co jest niezbędnym etapem projektowania wysokosprawnej, a co za tym idzie opłacalnej instalacji przemysłowej.

2. Metodologia przeprowadzonych badań

2.1. Suszenie parą przegrzaną

U podstaw suszenia paliw parą przegrzaną leży koncepcja odzysku ciepła utajonego przemiany ciecz – gaz. Podczas procesu suszenia węgla brunatnego, wilgoć w nim zawarta zwiększa temperaturę, a następnie odparowuje. Ciepło parowania może być odzyskane poprzez użycie powstałej pary do osuszenia kolejnej partii węgla (rys.1). Zastosowanie pary przegrzanej w technologii suszenia węgla brunatnego redukuje zagrożenie samozapłonem, zapewnia wyższy współczynnik przejmowania ciepła oraz ochronę przed utlenianiem [7]. Ze względu na powyższe cechy, zastosowanie praktyczne znalazły suszarki fluidyzacyjne na parę przegrzaną [3,5].

Suszenie węgla na użytek komercyjny jest warunkowane czynnikami ekonomicznymi, a zatem pociąga za sobą konieczność optymalizacji procesu. Kluczowym aspektem są tutaj różnice w składzie węgla brunatnych pochodzących z rozmaitych złóż (mikrostruktura, zawartość i skład chemiczny popiołu, udział części lotnych, zawartość wilgoci itp.) wynikające z odmiennych konfiguracji geologicznych oraz wieku wydobywanego surowca. Z uwagi na nie, niemożliwe jest wyznaczenie uniwersalnej kinetyki suszenia dla węgla brunatnego.



Rys. 1. Proces suszenia z odzyskiem ciepła przemiany fazowej. Procesy fizyczne: 1 – podgrzewanie, 2 – odparowanie, 3 – przegrzewanie, 4 – sprężanie, 5 – rozprężanie, 6 – odzysk ciepła przemiany fazowej. Substancje: 7 – węgiel podawany do układu, 8 – wilgotny węgiel, 9 – węgiel osuszony, 10 – para wodna, 11 – para pod ciśnieniem o zwiększonej temperaturze nasycenia

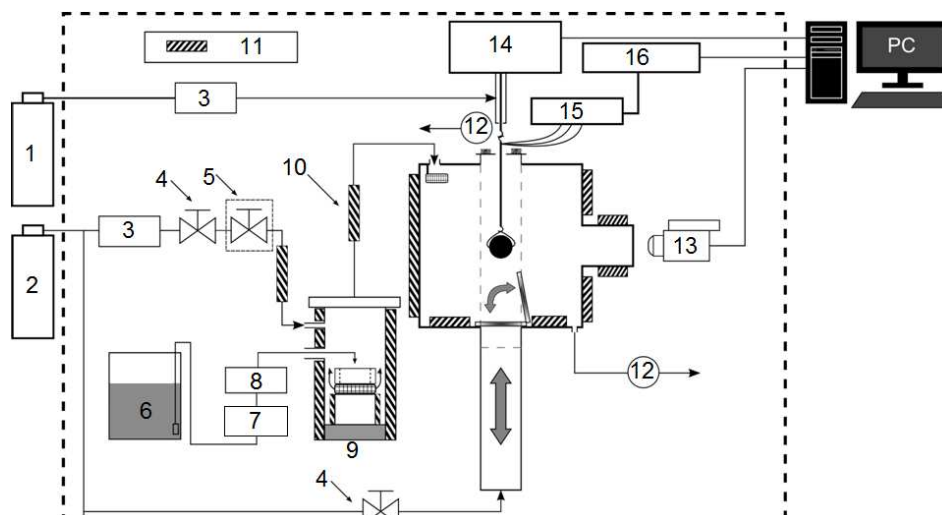
Fig. 1. Drying process with latent heat recovery. Physical processes: 1 – preheating, 2 – evaporation, 3 – superheating, 4 – compression, 5 – expansion, 6 – latent heat recovery. Substances: 7 – lignite fed to the system, 8 – lignite with moisture, 9 – dried lignite, 10 – steam, 11 – pressurized steam with increased saturation temperature

2.2. Przygotowanie próbki

Próbki używane do badań wykonywano z bloków węgla brunatnego ze złoża „Bełchatów”. Uzyskane obiekty badań miały kształt sfery o średnicy odpowiednio $5 \pm 0,05$ [mm] oraz $10 \pm 0,05$ [mm]. W wygładzonych próbkach wiercono otwory celem umieszczenia termopar. Próbkę o średnicy 5 [mm] nawiercano na głębokość 2,5 [mm], tak by koniec termopary znajdował się w środku próbki. W próbce o średnicy 10 [mm] wykonywano otwory o głębokości 5 [mm] oraz 2,5 [mm]. Następnie termopary chromel/alumel typu K umieszczano w otworach.

2.3. Układ eksperymentalny i procedura badawcza

Budowa aparatury eksperymentalnej została przedstawiona na rys.2. Badania prowadzono w temperaturach 110, 130, 150 i 170 [°C]. Wnętrze sekcji testowej o cylindrycznym kształcie doprowadzano do żądanej temperatury za pomocą elektrycznych grzejników. Po ustabilizowaniu temperatury wewnątrz sekcji testowej, uprzednio podawany azot był zastępowany przez parę przegrzaną. Produkcja tejże rozpoczynała się odgazowaniem wody demineralizowanej, która następnie kierowana była do odparowywacza. Tak powstała para ulegała przegrzaniu i za pomocą deflektora rozprowadzona wewnątrz sekcji testowej.



Rys. 2. Schemat układu eksperymentalnego: 1 – cylinder z powietrzem, 2 – cylinder z azotem, 3 – przepływomierz masowy, 4 – zawór, 5 – zawór izolowany, 6 – zbiornik wody demineralizowanej, 7 – odgazowywacz, 8 – pompa, 9 – odparowywacz, 10 – przegrzewacz, 11 – grzejnik elektryczny, 12 – kontrola przepływu, 13 – kamera termowizyjna, 14 – waga elektroniczna, 15 – terminal na termopary, 16 – rejestrator danych [4]

Fig. 2. Schematic of the experimental apparatus: 1 – air cylinder, 2 – nitrogen cylinder, 3 – mass flow controller, 4 – valve, 5 – insulated valve, 6 – pure water tank, 7 – degasifier, 8 – pump, 9 – evaporator, 10 – superheater, 11 – electric heater, 12 – flow control, 13 – thermovision camera, 14 – electronic balance, 15 – thermocouple terminal, 16 – data logger [4]

Każdy test obejmował jednocześnie pomiary zmian wagi próbki, temperatury w jej wnętrzu oraz temperatury powierzchni mierzonej za pomocą kamery termowizyjnej. Próbkowanie wszystkich pomiarów wynosiło 1 [s]. Dodatkowo, przebieg procesu rejestrowano za pomocą kamery wideo, celem obserwacji zachowania obiektu podczas testu.

Suszenie parą przegrzaną uznawano za zakończone gdy zmiana wagi próbki w ciągu minuty nie przekraczała 0,1 [mg]. Dla każdej temperatury testowej i obu wielkości próbek wykonano po trzy testy opisane niniejszą procedurą.

3. Rezultaty badań

3.1. Stosowane wielkości

Podczas testów mierzono bezpośrednio profil temperatur próbki T oraz jej wagę W . Końcową wagę próbki uznawano za wagę suchego węgla W_c . Wagę wody W_w oznaczano jako różnicę między wagą początkową próbki W_{ini} a wagą suchego węgla W_c . Aby umożliwić porównanie wyników dla próbek różnej

wielkości, wykorzystano pojęcie zawartości wilgoci X . Definiuje się ją jako stosunek:

$$X = \frac{W_w}{W_c} \quad (1)$$

gdzie: X – zawartość wilgoci [kg/kg], W_w – waga wody [kg], W_c – waga suchego węgla [kg].

Zależność opisująca tę wielkość w funkcji czasu nosi nazwę krzywej suszenia.

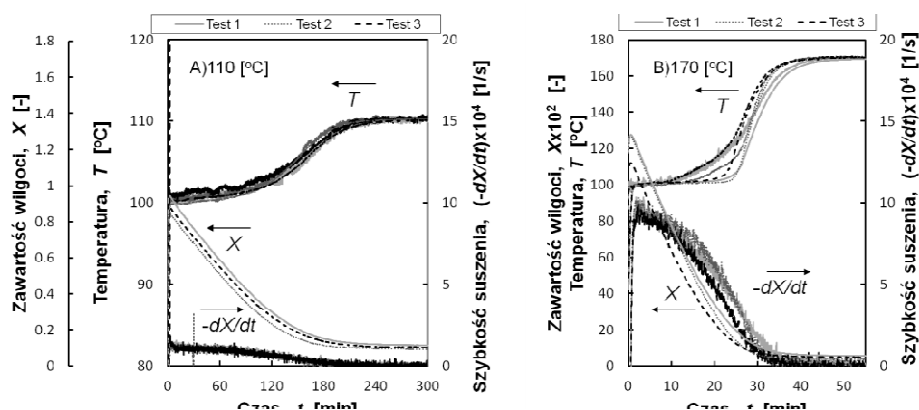
Pochodna po czasie wielkości opisanej formułą (1) zwana jest szybkością suszenia:

$$DR = - \frac{dX}{dt} \quad (2)$$

gdzie: DR – szybkość suszenia [1/s], X – zaw. wilgoci [kg/kg], t – czas [s].

3.2. Wpływ temperatury pary na otrzymane wyniki

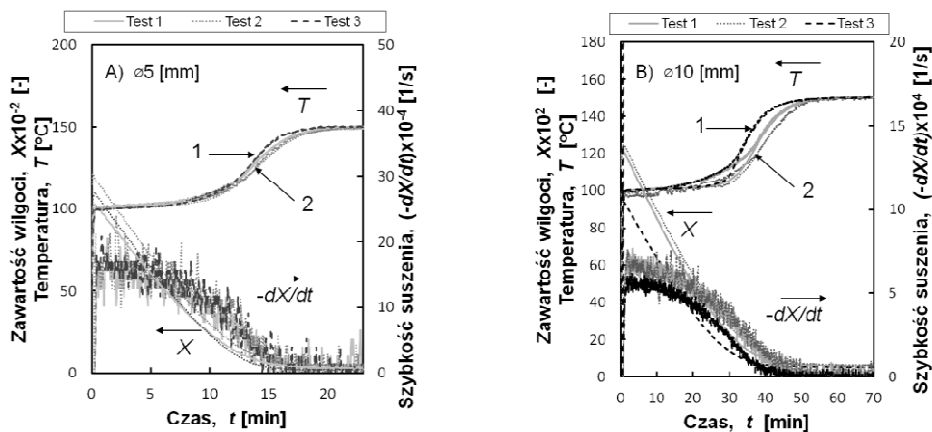
Rysunek 3 prezentuje zestawienie wyników testów dla próbek o tej samej średnicy (10 [mm]) poddanych parze przegrzanej o temperaturze 110 i 170 [°C]. Badania potwierdziły, iż wyższej temperaturze pary przegrzanej towarzyszy większa szybkość suszenia, a co za tym idzie, krótszy czas jest niezbędny do osuszenia próbki. W pierwszym etapie suszenia temperatura próbki gwałtownie rośnie do 100 [°C]. Widoczny na wykresach kolejny etap nazywany jest Okresem Stałej Szybkości Suszenia (Constant Drying Rate Period – CDRP). Zgodnie z nazwą, w tym etapie ubytek wilgoci utrzymywany jest na stałym poziomie, natomiast temperatura próbki wynosi 100 [°C]. Przyczyną jest fakt, iż strumień ciepła przepływający od pary do próbki jest w całości konsumowany na odparowanie tzw. wody wolnej zawartej w węglu. Krzywa szybkości suszenia w przypadku (A) pozwala wyraźnie dostrzec granice tego etapu, podczas gdy w przypadku (B) kończy się on znacznie szybciej. Po usunięciu łatwej do odparowania, zalegającej płytko pod powierzchnią wody wolnej, następuje Okres Malejącej Szybkości Suszenia (Decreasing Drying Rate Period – DDRP). Tak zwana woda związana, zalegająca w strukturze wewnętrznej węgla jest trudniejsza do odparowania, przez co część strumienia ciepła pochłaniana jest przez węgiel powodując stopniowy wzrost temperatury próbki. Ze względu na trudności jakie przysparza usunięcie wody związanej, DDRP ten jest najdłuższą, dominującą częścią procesu suszenia.



Rys. 3. Wykres zawartości wilgoci, szybkości suszenia, temperatur powierzchni i wnętrza próbki 10 [mm] dla temperatury testowej: A) 110 [°C], B) 170 [°C]

Fig. 3. Chart of moisture content, drying rate, surface and inside temperature of the sample of 10 [mm] for test temperature: A) 110 [°C], B) 170 [°C]

3.3. Wpływ średnicy próbki na otrzymane wyniki



Rys. 4. Porównanie rezultatów dla temperatury testowej 150 [°C] i próbek o średnicy: A) 5 [mm], B) 10 [mm]. 1 – temperatura powierzchni, 2 – temperatura środka

Fig. 4. Comparison of results for test temperature of 150 [°C] and samples diameters of A) 5 [mm] and B) 10 [mm]. 1 – surface temperature, 2 – interior temperature

Porównano również rezultaty pomiarów próbek o różnej średnicy w tej samej temperaturze testowej (rys.4). Odparowanie wody z próbki o mniejszej średnicy jest relatywnie łatwiejsze na co wskazuje wyższa wartość szybkości

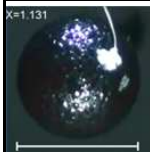
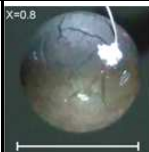
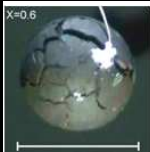
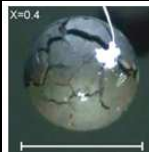
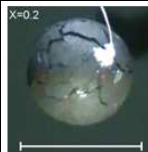
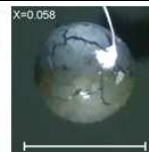
suszenia w przypadku (A) aniżeli w (B). Konsekwencją jest krótszy czas trwania procesu. Ze względu na większą odległość między powierzchnią a środkiem próbki, krzywe temperaturowe próbki B wyraźniej wskazują różnicę między tempem nagrzewania rzeczonych punktów pomiarowych.

3.4. Zmiany powierzchni próbki w trakcie procesu

Wszystkie testy przeprowadzone w ramach eksperymentu rejestrowano za pomocą kamery wideo w celu obserwacji zachowania próbki. Seria zdjęć z tab.1 ilustruje przebieg wybranego testu.

Tablica 1. Zmiany powierzchni próbki. Średnica próbki 10 [mm], temperatura testowa 150 [°C]

Table 1. The variation of sample surface. Sample diameter of 10 [mm], test temperature 150 [°C]

X=1.131 (start)	X=0.8	X=0.6	X=0.4	X=0.2	X=0.058 (koniec)
					

Spadkowi zawartości wilgoci towarzyszy proces kurczenia się badanego obiektu. Stwierdzono, że próbki tracą podczas testu 35-40% swojej objętości. Tablica 1 prezentuje przypadek próbki, której powierzchnia uległa znacznemu spękanii, co było charakterystyczne dla testów w temperaturach: 150 [°C] i 170 [°C]. Oba zjawiska, tj. kurczenie i pękanie zmieniają geometrię testowanego obiektu, co wpływa na proces wymiany ciepła między nim a otoczeniem. Dalsze badania są potrzebne do wyznaczenia szczegółów zależności między zmianą struktury próbki a przebiegiem procesu suszenia.

4. Wnioski

W pracy przedstawiono wybrane aspekty eksperymentalnej analizy suszenia węgla brunatnego ze złoża „Bełchatów” za pomocą pary przegrzanej. Wyznaczono krzywe suszenia, krzywe szybkości suszenia oraz krzywe temperaturowe dla próbek węgla o różnej wielkości, badanych w czterech temperaturach testowych. Charakterystyki te stanowią podstawę do skonstruowania modelu symulacyjnego, niezbędnego do zaprojektowania przemysłowej instalacji suszącej węgiel brunatny.

Podziękowania

Prace były finansowane przez Ministerstwo Nauki (Grant AGH No. 11.11.210.198) oraz Japan Coal Energy Center (JCOAL).

Literatura

- [1] Allardice D.J., Young B.C.: Utilisation of Low Rank Coals, 18th Int.Pittsburgh Coal Con., 2001.
- [2] Andruleit H., Babies H.G., Bahr A., Kus J., Meßner J., Schauer M.: Reserves, Resources and Availability of Energy Resources, DERA, Hanover 2012.
- [3] Hoehne O., Lechner S., Schreiber M., Krautz H.J.: Drying of Lignite in a pressurized steam fluidized bed - theory and experiments, Dry. Technol., 28 (2009) 5-19.
- [4] Kiriya T., Sasaki H., Hashimoto A., Kaneko S., Maeda M.: Experimental observations and numerical modeling of a single coarse lignite particle dried in superheated steam, Mater. Trans., 54 (2013) 1725-1734.
- [5] Klutz H., Moser C., von Bargen N.: The RWE power WTA process (Fluidized bed drying) as a key for higher efficiency, Górnictwo Geoinżynieria, 35 (2011) 147-153.
- [6] Kozłowski Z.: Present situation and prospects for lignite in the Polish power-generation industry, Appl. Energy, 74 (2003) 323-329.
- [7] Law C.L., Mujumdar A.S.: Fluidized Bed Dryer, Handbook of Industrial Drying, CRC Press, Florida 2006, pp. 174-201.

EXPERIMENTAL CHARACTERISTICS OF SUPERHEATED STEAM DRYING OF LIGNITE

Summary

This paper presents selected issues related to the use and drying of the lignite for the energy industry. Experimental investigations were conducted for the lignite samples from Belchatow lignite mine, which were dried in a superheated steam in the temperature range 110 - 170 [°C] and atmospheric pressure. Each experiment included measurements of the changes of weight, the temperature profile distribution and changes in the structure of the sample. The kinetics of the process was described in the form of the functions of weight, drying speed and temperatures in correlation with time, which were used to distinguish the characteristic stages of the drying process. Drying characteristics derived in the experiment are essential for designing an effective industrial coal drying system, which allows for using of the latent heat contained in the water evaporated from the coal.

Keywords: drying curves, "Belchatow" lignite deposit, atmospheric pressure, latent heat, Constant/Decreasing Drying Rate Period

DOI: 10.7862/rm.2014.15

Otrzymano/received: 15.05.2014

Zaakceptowano/accepted: 27.05.2014