

NISKOTEMPERATUROWE SUSZENIE WĘGLA BRUNATNEGO DLA ENERGETYKI ZAWODOWEJ - BADANIA WŁASNE

BROWN COAL LOW-TEMPERATURE DRYING FOR POWER PLANTS - OWN RESEARCH

Zbigniew Plutecki - Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Politechnika Opolska

Marcin Michalski - Wydział Mechaniczno - Energetyczny, Politechnika Wroclawska

Autorzy przeprowadzili serię eksperymentów używając innowacyjny system suszenia węgla brunatnego metodą fluidalną w niskich temperaturach czynnika suszącego (powietrza): 25-70°C. Badania prowadzono na węglu brunatnym ze złoża w Belchatowie i Turoszowie, zakres badań dotyczył wielkości ziaren: 0-0,4; 0,4-2; 2-4; 4-6,3 i ponad 6,3 mm. W artykule przedstawiono termo-kinetyczne właściwości badanych węgli, między innymi określono wpływ wielkości ziarna i struktury węgla oraz stopień wilgoci na intensywność procesu suszenia w funkcji temperatury czynnika grzewczego i czas trwania procesu. Ponadto, poprzez monitorowanie parametrów suszenia wyznaczono krzywe poboru energii do odparowania jednego kilograma wody z mokrego węgla brunatnego w ustalonych warunkach, a tym samym ustawiając optymalny obszar dla parametrów procesu suszenia ze względu na kinetykę procesu jak i nakład energetyczny.

The authors conducted series of experiments using an experimental brown coal drying system with fluid bed method in the low medium (air) temperature: 25-70°C. The study was conducted on brown coal from a deposit of Belchatów and Turoszów, range of tests concerned the grain size: 0-0,4; 0,4-2; 2-4; 4-6,3 and more than 6.3 mm. In the paper are presented the thermo-kinetic properties of studied coals, inter alia: is determined the effect of grain size and structure of coal and its degree of moisture on the intensity of the drying process as a function of changing temperature of the heating medium and the duration of the process. In addition by monitoring the drying process parameters, curves of the energy input for evaporation of 1 kg water from wet brown coal were determined, thus setting the optimum area for the parameters of the drying process (due to kinetics of the process and energy consume).

Słowa kluczowe: suszenie węgla brunatnego, badania eksperymentalne, termokinetyka suszenia fluidalnego

Key words: brown coal drying, experimental investigations, thermal-kinetics of fluid drying

Wstęp

Właściwości fizykochemiczne i kinetyczne węgla brunatnego mają istotny wpływ na wykorzystanie go jako paliwa w elektrowniach. Z dotychczasowych badań wynika między innymi, że w procesie spalania decydujący wpływ na mechanizm ma szybkość nagrzewu, która w dużej mierze zależy od wilgotności dostarczanego paliwa. Podczas spalania węgli energetycznych ich właściwości wpływają między innymi na: czas zapłonu, wydzielanie i spalanie części lotnych, sposób formowania się mikrofrontu spalania części lotnych i teksturę pozostałości koksowej ziaren, co w konsekwencji ma decydujący wpływ na osiąganą w kotłach sprawność [1].

Wstępne suszenie węgla może przynieść znaczny wzrost sprawności energetycznej kotła (3-5%) [2]. Ostateczny efekt pracy bloku będzie jednak zależał przede wszystkim od: przyjętej metody suszenia, sposobu pozyskania energii do procesu suszenia oraz właściwości termo-kinetycznych suszonych węgli brunatnych. Znajomość tych ostatnich jest niezbędna również ze względu na optymalizację procesu suszenia oraz późniejsze spalanie w kotłach energetycznych.

Właściwości fizykochemiczne węgli brunatnych.

Węgiel brunatny w porównaniu z kamiennym jest zdecydowanie młodszy i wyraźnie w nim widać roślinne pochodzenie

(makrostruktura). Węgiel brunatny nazywany jest materiałem kapilarno - porowatym. Zawiera wiele otwartych i zamkniętych porów oraz kapilar roślinnych (dawnych komórek), które wiążą wodę silniej niż gładkie, wolne powierzchnie. Powoduje to, że węgiel brunatny zachowuje się jak materiał higroskopijny [3,4,5].

W celu oceny zawartości wilgoci surowego węgla i kaloryczności węgla suchego, istotną jest wiedza o tym, jakie struktury porów posiada węgiel surowy i jak będą się one zmieniać w trakcie suszenia oraz jaką będzie miał strukturę węgiel suchy. Spadek ciśnienia pary w porach jest spowodowany oddziaływaniem sił kapilarnych, powstających w wyniku podwyższonej entalpii wiązań [6,7].

Istotny wpływ na zawartość wilgoci w węglu ma układ porów. Im są mniejsze, tym więcej energii musi zostać zużytej do odparowania wody. Przy jednakowej temperaturze wzrasta udział pozostającej wody w materiale w małych porach, tzw. wilgotność reszkowa, która wzrasta wraz ze wzrostem udziału małych porów. Układ porów ma również wpływ na przewodnictwo cieplne co decyduje o przebiegu procesu suszenia węgla – określa bowiem potrzebny czas przebywania węgla w suszarce. Im lepsze przewodnictwo cieplne w materiale, tym szybciej dojdzie do dostarczenia energii dla odparowania wody i tym szybciej przebiegnie proces schnięcia [6].

Materiał porowaty oraz jego współczynnik przenikalności cieplnej zmienia się w trakcie suszenia. Na początku pory

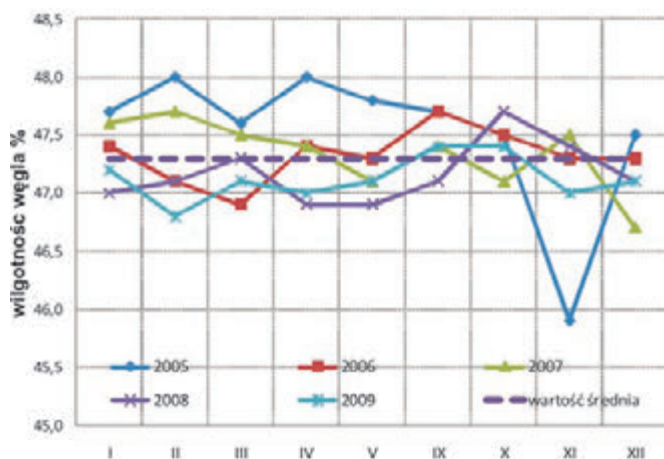
wypełnione są wodą, pod koniec wzrasta udział w nich pary wodnej. Udział wody spada, aż do wartości resztkowej. Na współczynnik przewodności wpływa również pojemność cieplna węgla, która zależy przede wszystkim od zawartości wody, gdyż pojemność cieplna wody wynosi 4,2 kJ/kgK, a węgla brunatnego ok. 1 kJ/kgK [6].

W wyniku licznych badań [3,8,9] określono, że ziarna węgla w trakcie suszenia kurczą się wraz z utratą wody. Przez oddawanie związanej kapilarnie wody powstają suche pory. Obszary te załamują się (węgiel się kurczy) lub pozostają jako otwarte i stabilne. Najpierw następuje odparowanie wody powierzchniowej, później z dużych i kolejno z coraz mniejszych porów, ostatecznie, w zależności od wybranych warunków suszenia, pozostają jeszcze pory wypełnione wodą, tj. została osiągnięta wilgotność końcowa. Ciśnienie pary w tych kapilarach jest niższe niż ciśnienie układu i więcej wody nie jest już w stanie odparować. Warto jeszcze zauważyć, że istnieją również zamknięte pory zawierające wodę [3]. Te prawdopodobnie nigdy nie wyschną, chyba, że zostaną mechanicznie rozbite lub rozerwane poprzez rosnące ciśnienie w czasie ogrzewania. Tą zawartość wilgoci nie da się określić przy użyciu standardowych metod.

W literaturze przedstawiane są obserwacje, według których cząsteczki węgla poniżej określonej wilgotności (< 5%) ponownie pęcznieją (objętość ziarna rośnie). Powodem takiego zjawiska są siły wiązań wody w mikroporach. Gdy siły te maleją w wyniku suszenia, pory mogą się ponownie rozprężyć, a odstępy pomiędzy nimi rosną. Ten efekt jest jednak do pominięcia, gdyż w skali przemysłowej nie osiąga się tak niskiej zawartości wilgoci podczas suszenia [3].

Wybrane wyniki badań własnych w zakresie wstępnego suszenia węgla brunatnych

Biorąc pod uwagę wymienione uwarunkowania oraz aktualny stan wiedzy z zakresu badań właściwości fizyko-chemicznych węgla brunatnych oraz kinetyki procesu ich suszenia, uznano za właściwe prowadzenie własnych badań w tym zakresie. Głównym celem badań jest zdefiniowanie optymalnych parametrów procesu suszenia metodą fluidalną przy jak najmniejszym zużyciu energii zewnętrznej z uwzględnieniem indywidualnych cech badanego węgla. Badania były prowa-



Rys. 1. Średnia zawartość wilgoci w węglu brunatnym w okresie 4 lat - Elektrownia Turów

Fig. 1. Average content of moisture in lignite at 4 years - Turów Power Plant

dzone z wykorzystaniem oryginalnie do tego celu, zaprojektowanej i wykonanej laboratoryjnej instalacji doświadczalnej [9]. Prezentowane poniżej wyniki badań zostały wykonane w ramach projektu badawczego pn.: „Wstępne suszenie węgla dla celów energetycznych” (POIG.01.03.01-00-040/08), której realizatorem jest zespół z Politechniki Opolskiej oraz badań doktoranta mgr inż. Marcina Michalskiego w ramach projektu Młoda Kadra. Projekt współfinansowany jest przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.

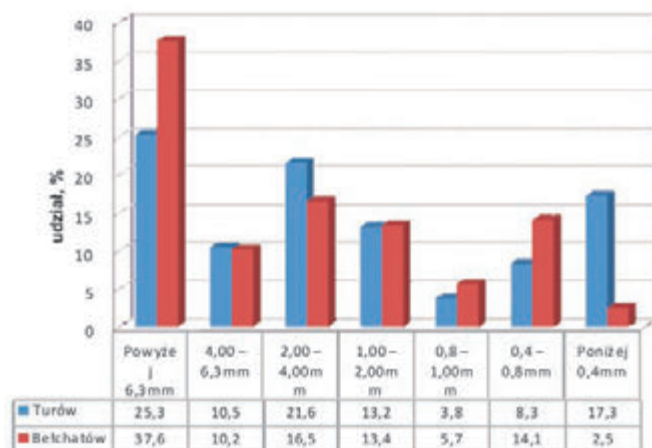
Wstępna charakterystyka badanego węgla

Do badań wybrano węgiel brunatny z kopalni Turów i Bełchatów, pobrany z kruszarki w postaci przygotowanej do wstępnego suszenia. Głównie skupiono się na zawartości wilgoci w badanych węglach. Wilgoć węgla brunatnego dostarczanego do elektrowni zależy głównie od kopalni i jedynie w małym stopniu zależy od pory roku (rys.1).

Średnia wilgotność węgla dostarczanego z kopalni Bełchatów to 50÷54%, a Turów 43÷48%. Znaczna różnica w zawartości wilgotności wynika przede wszystkim z geologicznych właściwości złoża (właściwości fizykochemicznych), technologii wydobywania oraz struktury wielkościowej ziaren z procesu wydobywczego. Strukturę wielkościową ziaren wraz z zawartością wilgoci badanych węgli przedstawiono na rys. 2. Z badań tych wynika między innymi, że bardziej jednorodną strukturę ziaren uzyskuje się w Turowie, gdzie udział frakcji większej niż 6,3mm stanowi jedynie 25%. W węglu tym obserwuje się natomiast znaczny wpływ wielkości ziaren na zawartość wilgoci. Obserwowana nierównomierność sięga prawie 20%, gdy w węglu z Bełchatowa to zaledwie 5%.

Właściwości złoża fluidalnego

Wykorzystanie fluidyzacji do wstępnego suszenia węgla brunatnego wynika z wielu zalet tej metody. Do najważniejszych należy zaliczyć: intensywną wymianę ciepła i masy między ciepłym powietrzem, a cząstkami wilgotnego węgla oraz izotermiczność złoża, czyli zdolność zachowania stałej, zadanej przez użytkownika, temperatury procesu [3]. Na ten ostatni parametr wpływa między innymi: turbulentny przepływ cząstek węgla w złożu, duża pojemność cieplna złoża w stosunku do pojemności cieplnej powietrza oraz ciągłość realizacji procesu fluidyzacji. Do wad tej metody należy zaliczyć: niejednorodność fluidalnego złoża gazowego wskutek powstawania

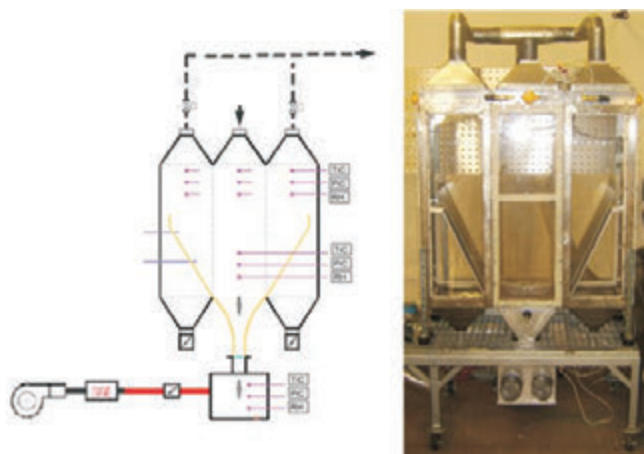


Rys. 2. Średnia struktura wielkości ziaren węgla brunatnego dostarczanego do elektrowni Turów i Bełchatów

Fig. 2. Average structure of the particle size of Turów and Bełchatów brown coal

i ruchu pęcherzy; ścieranie powierzchniowe cząstek oraz erozyjne działanie na powierzchni ścian i przegród komory. Ponadto przy zbyt dużym zróżnicowaniu wielkości cząstek węgla w złożu następuje ich samosegregacja (przy małych prędkościach fluidyzacji) lub nadmierne wywiewanie cząstek o małych rozmiarach bez udziału ich w procesie suszenia (przy zbyt dużej prędkości fluidyzacji). Biorąc pod uwagę wymienione wyżej cechy, istotnym jest dobór parametrów pracy suszarki w taki sposób, aby zapewnić możliwie największą skuteczność suszenia przy jak najmniejszym zużyciu energii. W tym celu niezbędna jest wiedza w zakresie projektowania wymaganych parametrów pracy złoża.

Na Politechnice Opolskiej zbudowano innowacyjną suszarkę fluidalną w skali laboratoryjnej. Co zaowocowało powstaniem badań związanych z procesem suszenia. Na rysunku 3, przedstawiono schemat oraz zdjęcie urządzenia.



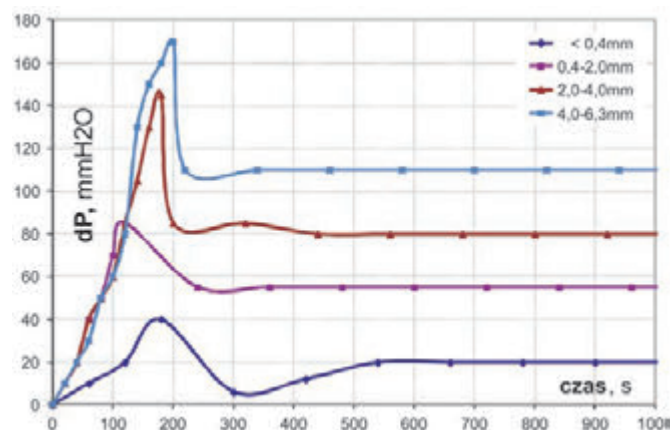
Rys. 3. Schemat oraz zdjęcie suszarki fluidalnej użytej do testów – Politechnika Opolska

Fig. 3. Scheme and view of experimental installation for brown coal dry – Opole University of Technology

Powietrze do suszenia podawane jest przez wentylator, za którym znajduje się grzałka umożliwiająca zmianę temperatury czynnika suszącego. Struga powietrza kierowana jest na piramidowy wlot do komory suszenia. Na górze urządzenia znajduje się zasobnik, którym dostarczany jest węgiel do komory fluidyzacji. Na wejściu, w komorze oraz na wyjściu z suszarki znajdują się urządzenia pomiarowe (wilgotność powietrza, temperatura oraz ciśnienie), dodatkowo mierzona jest prędkość strugi oraz zużycie energii. Dokonane testy skupiały się na zmianie parametrów, takich jak: rodzaj węgla brunatnego, temperatura oraz prędkość czynnika suszącego.

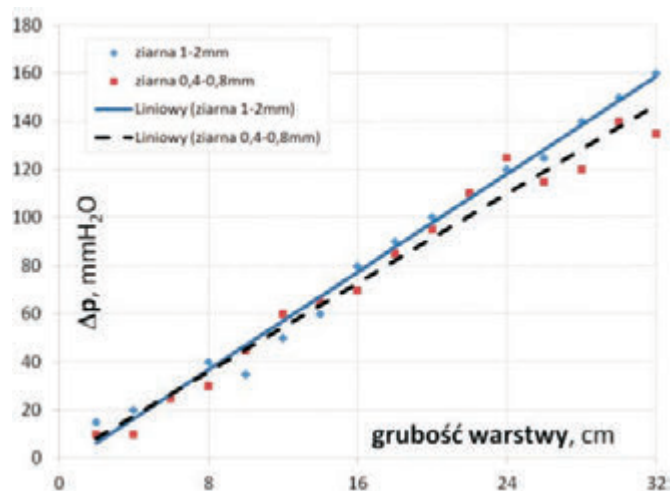
Podczas rozruchu złoża fluidalnego następuje znaczny opór hydrauliczny, związany z koniecznością pokonania sił grawitacyjnych do uniesienia złoża. Jednakże w stanie fluidyzacji spadek ciśnienia jest prawie niezmienny, mimo wzrostu prędkości. Spadek ciśnienia ma mniejszą wartość niż na początku fluidyzacji o 200 do 500 Pa w zależności od wielkości ziaren i jest spowodowany zmianą gęstości złoża fluidalnego oraz siłami wiążącymi, które występują między cząstkami węgla. Po osiągnięciu stanu fluidyzacji parametry złoża są prawie stałe (rys. 4).

Minimalna prędkość fluidyzacji oraz opór hydrauliczny złoża w stanie fluidyzacji zależy liniowo od grubości warstwy zasypowej węgla. Wpływ wielkości ziarna oraz grubości warstwy zasypowej na wymagane ciśnienie fluidyzacji przedstawiono na rysunku 5 (węgiel z Bełchatowa). Wynika z niego,



Rys. 4. Wpływ wielkości ziaren węgla na opór hydrauliczny złoża podczas rozruchu i normalnej pracy

Fig. 4. Influence of coal particle size on the bed pressure drop during startup and normal operation



Rys. 5. Wpływ wielkości ziaren oraz grubości warstwy na opór hydrauliczny złoża

Fig. 5. Influence of coal particle size and thickness on the bed pressure drop

że węgiel w stanie mokrym (54%) dla warstwy 32 cm wymaga pokonania oporów rzędu 1300÷1600 Pa odpowiednio dla sortymentu 0,4÷0,8 mm i 1÷2 mm.

Termokinetyka suszenia

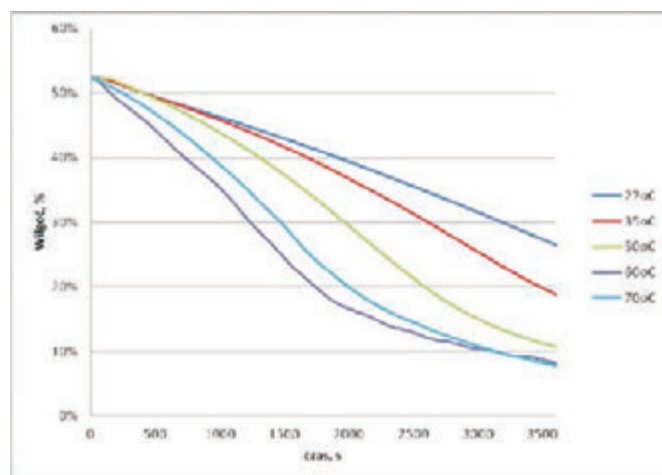
Zrealizowane badania kinetyki suszenia w złożu fluidalnym miały na celu określenie: wpływu czasu i temperatury suszenia na efekt suszenia z uwzględnieniem struktury wielkościowej ziaren węgla i przy znajomości wszystkich parametrów procesowych niezbędnych do określenia nakładu zużycia energii elektrycznej na ten cel. Kolejny wykres (rys. 6) przedstawia zbiorcze wyniki z pomiaru ubytku wilgoci podczas suszenia. Powyższe doświadczenie opisuje kinetykę węgla podczas suszenia fluidalnego w zależności od temperatury. Charakterystyka jest zbliżona do liniowej w przypadku niskich temperatur procesu (20÷40°C), natomiast wraz ze wzrostem temperatury powietrza podmuchowego obserwuje się zróżnicowane fazy procesu suszenia.

Powyżej temperatury 35°C czynnika suszącego kinetyka procesu suszenia zmienia swój liniowy charakter i można wyodrębnić kilka faz procesu. Na rysunku 7 oznaczono je literami od A do D. Wybrany przebieg odpowiada następującym warunkom testu: węgiel z Turowa, temperatura powietrza 50°C, wielkość ziaren 2÷4 mm. Opisane punkty są charakterystyczne

Tab.1. Stopień wysuszenia węgla dla różnych temperatur i czasów, węgiel z Belchatowa

Tab 1. Effect of brown coal drying for different temperatures and times, brown coal from Belchatow

Belchatów					
	zawartość wilgoci, %				
czas, min	27°C	35°C	50°C	60°C	70°C
0	52,35%	52,35%	52,35%	52,35%	52,35%
10	48,79%	48,66%	48,17%	42,31%	45,37%
20	44,94%	44,20%	41,40%	30,75%	35,31%
30	40,80%	38,75%	32,69%	18,91%	23,10%
40	36,30%	32,37%	22,84%	13,43%	15,27%
50	31,50%	25,32%	15,02%	10,36%	10,79%
60	26,47%	18,79%	10,71%	8,14%	7,75%



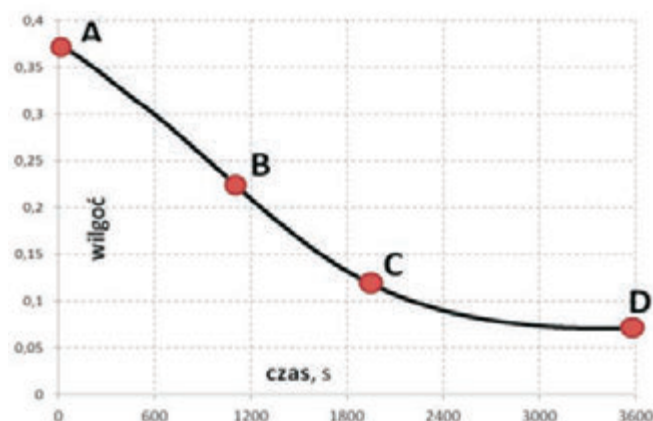
Rys. 6. Kinetyka suszenia uwzględniająca różne temperatury procesu – węgiel z Belchatowa

Fig. 6. Kinetics of drying process taking into the different temperatures – brown coal from Belchatow

dla procesu suszenia. Odcinek AB przedstawia tzw. pierwszą fazę suszenia, w której następuje odparowanie wilgoci powierzchniowej. Prędkość i temperatura suszonego materiału są stałe w czasie. Podczas drugiej fazy suszenia (odcinek BC) temperatura materiału zaczyna rosnąć, a prędkość suszenia maleje. Wilgotność materiału, przy której rozpoczyna się okres malejącej prędkości suszenia nazwano „wilgotnością krytyczną”. Zależy ona od własności materiału suszonego. Następnie występuje trzecia faza suszenia (odcinek CD), w której wilgotność materiału dalej spada, ale już znacznie wolniej.

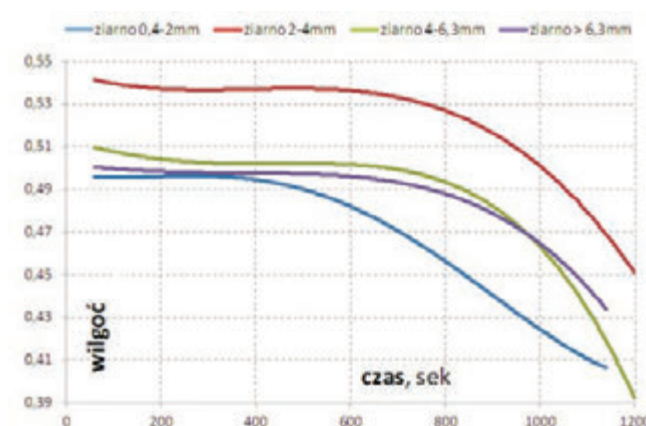
Następne testy również dotyczyły kinetyki procesu, ale nie ze względu na temperaturę procesu, lecz wielkość cząstek węgla. Wyniki przedstawiono na rysunku 8. W przypadku węgla z Belchatowa, w pierwszej fazie, obserwuje się ustalone warunki suszenia. Potem, po przekroczeniu mniej więcej 10-15 minut, obserwuje się wyraźny wzrost odparowania wilgoci. Proces ten przebiega znacznie szybciej w drobniejszym sortymencie węgla.

O skuteczności procesu suszenia węgla decydują właściwości powietrza, które w metodzie suszenia fluidalnego pełni podwójną rolę. Z jednej strony ma zapewnić właściwe warunki



Rys. 7. Kinetyka procesu suszenia; węgiel z Turowa, ziarna 2-4 mm, temp. suszenia 50°C

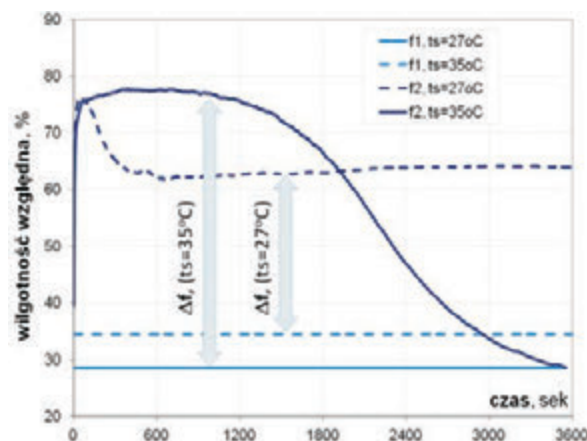
Fig. 7. Kinetics of drying process: brown coal from Turow, coal particle size 2-4 mm, drying at 50°C



Rys. 8. Wpływ wielkości ziaren na proces suszenia - węgiel z elektrowni Belchatów, temp. suszenia 35°C

Fig. 8. Influence of coal particle size on drying proces - brown coal from Belchatow, drying at 35°C

kształtowania złoża, a z drugiej strony dynamiczny odbiór wilgoci. Wpływ temperatury na proces pochłaniania pary wodnej przez powietrze podczas suszenia węgla przedstawiono na rysunku 9. Wynika z niego, że wzrost temperatury nawet o kilka stopni powoduje bardzo wyraźny wzrost efektywności procesu oraz jego znaczne przyspieszenie. Niska temperatura powietrza pozwala na odparowanie jedynie wilgoci powierzchniowej. Dalszy proces przebiega w sposób ustabilizowany, ale bardzo wolno.



Rys. 9. Wpływ temperatury i warunków złoża na proces asymilacji wilgoci, węgiel Belchatów

Fig. 9. Influence of air temperature and conditions of the fluid bed on the drying process, brown coal from Belchatow

Energochłonność procesu

Nieodzownym parametrem oceny efektywności procesu suszenia węgla w suszarkach fluidalnych jest zużycie energii elektrycznej potrzebnej do napędu wentylatora oraz energii cieplnej do podgrzania powietrza procesowego. Biorąc po uwagę możliwość wykorzystania w elektrowniach konwencjonalnych ciepło odpadowe z niskotemperaturowych źródeł ciepła, oszacowanie energochłonności procesu ograniczono jedynie do zużycia energii elektrycznej. Skuteczność procesu suszenia opisano poprzez pomiar zużycia energii elektrycznej oraz wyznaczenie strumienia odparowanej wilgoci, mierząc wilgotność względną powietrza na wlocie i na wylocie z instalacji oraz ciśnienie atmosferyczne powietrza wilgotnego. W tym celu wyznaczano prężność pary nasyconej w funkcji temperatury z zależności [EN ISO 13788:2001]:

$$p_{sat} = 610 \cdot e^{\frac{17.269T}{273.5+T}} \quad \text{dla } T \geq 0^\circ\text{C} \quad (1)$$

Na tej podstawie określano zawartość wilgoci w powietrzu z uwzględnieniem mierzonej wilgotności względnej:

$$w = 0.622 \frac{\varphi \cdot p_{sat}}{p - \varphi \cdot p_{sat}} \quad (2)$$

gdzie:

φ – wilgotność względna powietrza,

p – ciśnienie powietrza wilgotnego w przybliżeniu atmosferyczne,

p_{sat} – ciśnienie nasycenia pary wodnej.

A następnie wyznaczono przyrost wilgoci w powietrzu odpowiadający ubytkowi zawartości wilgoci w węglu z zależności:

$$\Delta w = 0.622 \cdot \left[\frac{\varphi_1 p_{sat1}}{p - \varphi_1 p_{sat1}} - \frac{\varphi_2 p_{sat2}}{p - \varphi_2 p_{sat2}} \right] \quad (3)$$

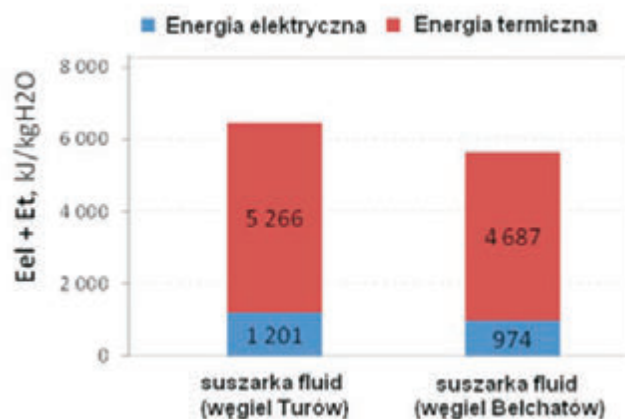
gdzie:

1, 2 – indeksy parametrów powietrza mierzone odpowiednio przed i za suszarką.

Istotną sprawą jest porównanie nakładów zużycia energii na proces suszenia fluidalnego w zależności od zastosowanego węgla. Dzięki badaniom własnym określono zużycie energii elektrycznej i cieplnej dla identycznych parametrów suszenia (rodzaj węgla, ziarnistość, temperatura i czas przebywania) dla węgla z Bełchatowa i Turowa. Wyniki przedstawiono na rysunku 10. Z porównania wynika, że zużycie energii elektrycznej w przypadku suszenia fluidalnego węgla o większej zawartości wilgoci pochłania mniej energii.

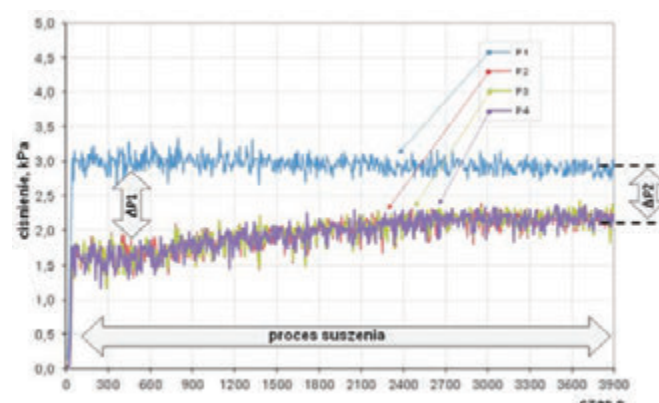
Opisując zjawiska zachodzące w komorze fluidyzacyjnej warto zwrócić uwagę na panujące w niej ciśnienia oraz jego zmiany wraz z zawartością wilgoci w węglu. Kolejny wykres (rys. 11) przedstawia pomiary nadciśnienia w komorze fluidalnej. Parametr ten charakteryzuje zmianę wysuszenia węgla podczas procesu oraz jego wpływ na warunki pracy układu podmuchowego. Powstałe nadciśnienie wraz z trwaniem suszenia maleje – jest to związane z odprowadzeniem wilgoci, a przez to zmniejszenie gęstości złoża. Wówczas można zmniejszyć strumień podawanego powietrza, a przez to ograniczyć zużycie energii elektrycznej.

Proces suszenia fluidalnego nie należy do prostych i do jego opisania niezbędne jest wiele parametrów. Kolejnym zbadanym elementem jest dobór prędkości czynnika suszącego,



Rys. 10. Zużycie energii elektrycznej i cieplnej na proces suszenia w złożu fluidalnym dla różnych rodzajów węgla brunatnych

Fig. 10. Consumption of electricity and heat energy for the drying process in a fluidized bed for different types of brown coals



Rys. 11. Ciśnienia panujące w suszarce fluidalnej podczas testu (Turow, $t=50^\circ\text{C}$), P1 – ciśnienie w kanale dolotowym, P2÷P4 – ciśnienie w komorze fluidyzacyjnej

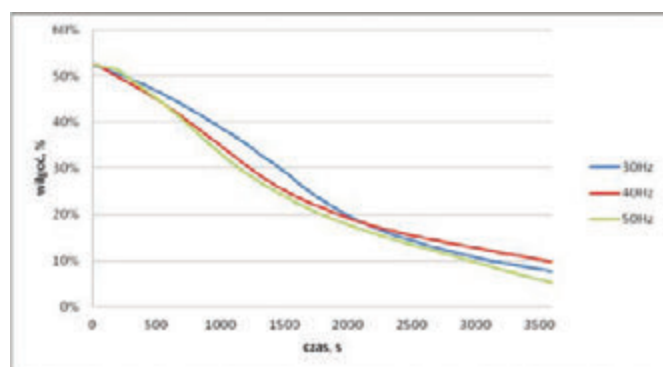
Fig. 11. Pressure changes in the fluidized bed dryer during the test (coal from Turow, $t=50^\circ\text{C}$), P1 – pressure in the inlet duct, P2÷P4 – pressure in the fluid bed dryer

a przez to strumienia objętości powietrza. Zbadano jak zmiana strumienia powietrza wpływa na odprowadzenie odparowanej wilgoci z węgla brunatnego. Zaobserwowany wpływ zmiany prędkości na efektywność procesu suszenia jest zmienny wraz z czasem (rys.12). Jeśli węgiel ma przebywać w komorze fluidyzacyjnej przez okres nie dłuższy niż 30 minut wówczas warto użyć większych prędkości. Po upływie tego czasu wpływ prędkości powietrza suszącego nie odgrywa już tak istotnej roli. Dlatego warto w takim przypadku zachować jedynie prędkość umożliwiającą podniesienie złoża, aby nie zanikł proces fluidyzacji. Dzieje się tak ze względu zdolności pochłaniania wilgoci przez powietrze. Wilgoć względna powietrza utrzymuje się na poziomie 100% przez pierwszą część procesu (ok. 30 min) i dlatego zwiększenie prędkości ma przełożenie na efektywność czyli na możliwość większego pochłaniania przez czynnik suszący wody odparowanej z węgla. Jednakże po upływie 30 minut wilgoć bezwzględna powietrza zaczyna maleć. Wówczas większy strumień powietrza pomaga jedynie w lepszym mieszanii się ziaren węgla brunatnego w złożu. Co nie przekłada się już tak znacząco na efektywność procesu, a pochłaniania o ok. 15% (w zależności od charakterystyki użytego wentylatora) więcej energii elektrycznej, niż w przypadku minimalnego strumienia powietrza.

Patrząc ze strony ekonomicznej na proces suszenia określono parametr oceny pracy suszarki poprzez zużycie energii elek-

Tab.2. Zawartość wilgoci oraz średnie zużycie energii elektrycznej pracy wentylatora dla różnych prędkości czynnika suszącego
 Tab 2. Content of coal moisture and the average electrical energy consumption for fan in different speeds

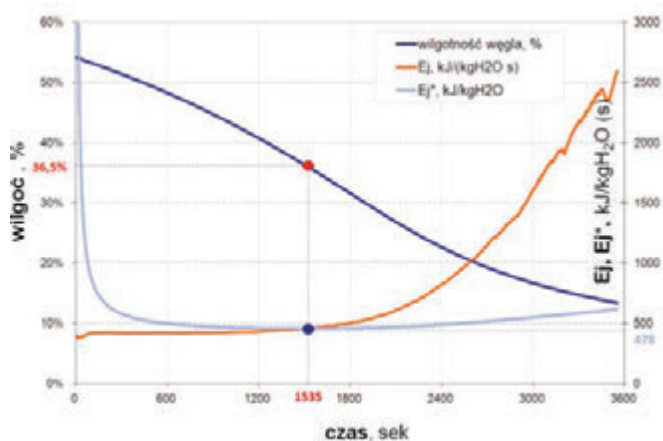
Belchatów						
czas, min	zawartość wilgoci przy 30 Hz	średnie zużycie energii przy 30 Hz	zawartość wilgoci przy 40 Hz	średnie zużycie energii przy 40 Hz	zawartość wilgoci przy 50 Hz	średnie zużycie energii przy 50 Hz
0	52,35%	4 772 W	52,35%	5 252 W	52,35%	5 706 W
10	45,37%		43,0%		42,97%	
20	35,31%		30,6%		28,97%	
30	23,10%		21,4%		20,01%	
40	15,27%		16,1%		14,32%	
50	10,79%		12,7%		9,69%	
60	7,75%		9,7%		5,19%	



Rys.12. Wpływ prędkości czynnika suszącego na kinetykę procesu. Węgiel z Belchatowa, temp 70°C, 1 godz.

Fig.12. Influence of drying medium velocity on the kinetics of the process. The brown coal from Belchatow, $t=70^{\circ}\text{C}$, drying time 1h

trycznej. W celu porównywania wyników z innymi instalacjami przyjęło się odnosić energię potrzebną do odparowania jednego kilograma wody. Wydajność energetyczną oraz średnie zużycie energii w przeliczeniu na odparowany kilogram wody przedstawiono na rysunku 13. Na wykresie zaznaczono czerwoną kropką optymalny punkt procesu suszenia, tzn. punkt, w którym



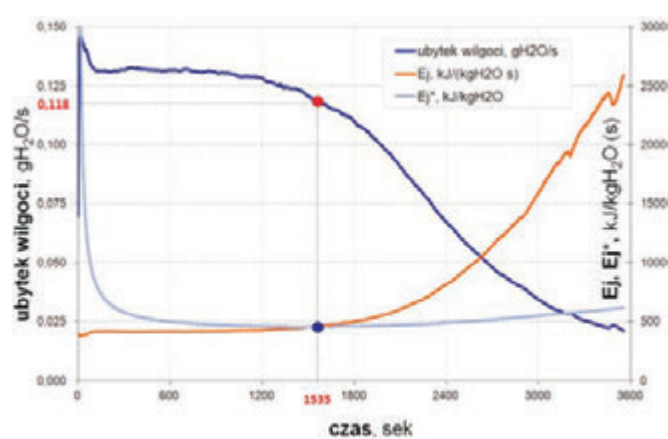
Rys. 13. Wpływ parametrów suszenia na zużycie energii; węgiel z Belchatowa, temp. suszenia 35°C, wielkość ziaren 2-4mm

Fig. 13. Influence of drying parameters on energy consumption at the drying process, coal from Belchatow, temperature of the air 35°C, particle diameter 2-4 mm

zużywa się najmniejszą ilość energii. Dla podanego przykładu (węgiel 2-4 mm) jest to 478 kJ/kgH₂O. Punkt ten osiągnięto po 25 minutach procesu, osiągając wilgotność na poziomie 36,5% (redukcja o 17,5% od wartości początkowej). Dalsze prowadzenie procesu suszenia powoduje zmniejszenie wilgoci w węglu ale już przy użyciu coraz większej energii. Intensywność omawianego procesu przedstawiono na rysunku 14, na którym również zaznaczono punkt optymalny procesu. Odpowiada on przełomowi krzywej, ilustrującej poziom pochłaniania wilgoci przez powietrze w komorze fluidalnej.

Podsumowanie i wnioski

Artykuł miał na celu pokazanie złożoności procesu suszenia oraz przedstawienia parametrów opisujących to zjawisko. Badania potwierdzają dużą skuteczność metody fluidalnej suszenia węgla brunatnego przy użyciu czynnika grzewczego o niskich temperaturach (do 70°C). Wskazano niezbędne parametry technologiczne, dzięki którym proces suszenia może przebiegać w sposób intensywny i przy zużyciu niewielkiej ilości energii. Biorąc pod uwagę złożoność przedstawianej tematyki oraz ograniczenie dotychczasowych badań jedynie



Rys. 14. Przebieg intensywności suszenia, węgiel z Belchatowa, temp. suszenia 35°C, wielkość ziaren 2-4mm

Fig. 14. Intensity of drying (moisture loss), brown coal from Belchatow, temperature of the air 35°C, particle diameter 2-4 mm

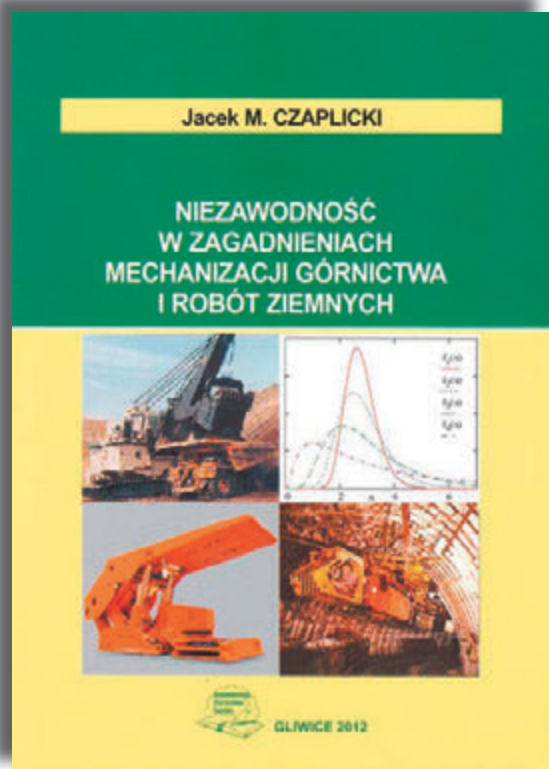
do badań w skali laboratoryjnej, celem jest prowadzenie dalszych badań, ale już w skali półtechnicznej i technicznej. Dlatego obecnie przygotowywana jest instalacja pilotażowa w skali półtechnicznej w ramach realizowanego projektu pn.:

„Wstępne suszenie węgla dla celów energetycznych”. W projektowaniu nowej suszarki uwzględniono wszystkie powyższe spostrzeżenia, co pozwoli na uniknięcie szeregu błędów oraz na zmaksymalizowanie efektywności pracy suszarki fluidalnej.

Literatura

- [1] Karcz H.: *Fizykochemiczne i kinetyczne własności polskich węgla energetycznych*, IX Konferencja Kotłowa 2002, prace IMiUE Politechniki Śląskiej
- [2] Lichota J., Plutecki Z.: *Suszenie węgla w elektrowniach*, Rynek Energii, nr 6/ 2007, str. 36-40
- [3] Buschsieweke F., *Dampfwirbelschichttrocknung von Braunkohle*, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen der Universität Stuttgart, 2005, rozprawa doktorska
- [4] Karcz H.: *Fizykochemiczne i kinetyczne własności polskich węgla energetycznych*, IX Konferencja Kotłowa 2002, prace IMiUE Politechniki Śląskiej
- [5] Paszcza H.: *Górnictwo węgla kamiennego w Polsce w 2003 roku oraz strategia funkcjonowania sektora w latach 2004-2010*, Ukraińsko-Polskie Forum Górnicze w Jałcie na Krymie
- [6] Buschsieweke F., *Dampfwirbelschichttrocknung von Braunkohle*, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen der Universität Stuttgart, 2005, rozprawa doktorska
- [7] B.K. Parekh, J.G. Groppo, D.P. Tao, *Poc-scale testing of an advanced fine coal dewatering equipment/technique*. Final Report, U.S. Contract No. DE-AC22-94PC94155, U.S. Department of Energy, Federal Energy Technology Center, 1999
- [8] Bullinger C., Ness M., Sarunac N., *Coal Creek Prototype Fluidized Bed Coal Dryer: Performance Improvement, Emissions Reduction, and Operating Experience*, 31st International Technical Conference on Coal Utilization and Fuel Systems, Clearwater FL, May 21-25, 2006
- [9] Plutecki Z., Zator S. Nowosielski G. i inni: *Raport roczny z realizacji zadań projektu POIG.01.03.01-00-040/8*, Opole, styczeń 2010, praca niepublikowana

NOWOŚCI WYDAWNICZE - Z GÓRNICZEJ PÓŁKI



Podręcznik jest pierwszą w Polsce publikacją zwartą traktującą o zagadnieniach niezawodności w mechanizacji górnictwa i inżynierii robót ziemnych. Jest on adresowany przede wszystkim do studentów, którzy obrali ten kierunek studiów. Adresatami są także inżynierowie praktycy związani z górnictwem i inżynierią robót ziemnych, którzy zainteresowani są problemami niezawodności. Również nauczyciele akademicy i pracownicy naukowcy, którzy parają się zagadnieniami niezawodności od strony teoretycznej jak i praktycznej, mogą skorzystać z niektórych modeli i rozwiązań tu przedstawianych. Z tej racji, że prezentowane modele i metody mają duży walor uniwersalności, interesujące wiadomości może znaleźć w tej pracy także inżynier zajmujący się niezawodnością innych urządzeń technicznych; innych aniżeli urządzenia górnicze czy wykorzystywane w robotach inżynierii lądowej. Są tu bowiem rozważane obiekty pracujące do pierwszego uszkodzenia jak i obiekty odnawialne. Obiekty pojedyncze i systemy o różnorodnej strukturze. Obszernie traktowane są systemy ciągłe i systemy cykliczne.

Na końcu książki zamieszczona jest bibliografia obejmująca dobrze ponad czterysta pozycji polsko i angielskojęzycznych za lata 1964-2010; literatura przedmiotu traktująca o niezawodności i trwałości w górnictwie. Jest to pierwsze tego typu opracowanie na świecie.

Podręcznik liczy 340 stron.

Słowa kluczowe:

*prawdopodobieństwo, zmienna losowa, proces stochastyczny
niezawodność, trwałość, gotowość
element, system, struktura niezawodnościowa systemu
uszkodzenie, odnowa, repertuar eksploatacyjny
proces Markowa, proces semi-Markowa
system obsługi masowej*