

dr hab. inż. Halina Pawlak-Kruczek, prof. PWR., kierownik Zakładu Kocioł, Spalania i Procesów Energetycznych,
Michał Czerep, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Politechnika Wroclawska

Efektywność procesu suszenia węgla brunatnego w różnych technologiach

W pracy zawarto wyniki eksperymentalnych badań nad efektywnością procesu suszenia węgla brunatnych w szerokim zakresie temperaturowym w trzech laboratoryjnych instalacjach suszących: typu „Torbed”, tj. rodzaj wirowego złoża fluidalnego, w suszarce obrotowej oraz w suszarce fluidalnej „3D” fontanno-pęcherzykowej. Jako czynnika suszącego podczas testów używano powietrza. Badania eksperymentalne przeprowadzono dla węgla brunatnego z kopalni Turów. Badano wpływ temperatury powietrza na efektywność suszenia. Dokonano również porównania efektywności i energochłonności suszenia dla trzech rozpatrywanych instalacji, aby ocenić możliwość integracji w układ bloku gwarantujący podniesienie jego sprawności.

Jednym z ważniejszych wskaźników klasyfikujących skuteczność opracowywanych instalacji suszenia jest zapotrzebowanie energii w procesie suszenia, definiowanym jako ilość energii (np. w kJ) potrzebnej do odparowania 1 kg wody z węgla. W zależności od metody suszenia oraz specyfiki instalacji, parametr ten waha się zwykle od około 1300 kJ do około 4000 kJ [1].

Węgiel brunatny jest obecnie najtańszym źródłem energii elektrycznej (około 19 USD/MWh) [2], co stanowi około 65% kosztów energii uzyskiwanej z węgla kamiennego. Cztery z pięciu wielkich polskich elektrowni opalanych węglem brunatnym produkują energię

tańszą niż najtańsza elektrownia pracująca na węglu kamiennym [2]. Dotychczas udokumentowano w Polsce łącznie 190 złóż o zasobach bilansowych 40 224,3 mld ton, w tym w złożach zagospodarowanych zalega 2,136 mld ton, z czego 1,779 mld ton są to zasoby przemysłowe [3]. Ocenia się, że przy utrzymaniu wydobycia na aktualnym poziomie, zasobów w dokumentowanych złożach wystarczy na przeszło 400 lat, a uwzględniając zasoby złóż perspektywicznych zbadanych wstępnie - na około 950 lat [4]. Planowaną produkcję węgla brunatnego na kolejne 60 lat w aktywnych złożach i w zasobach z półlegnickich prezentuje [5].

Koniecznym jest zastosowanie technologii zmierzających do wzrostu sprawności produkcji energii w blokach opalanych węglem brunatnym, z powodu jego niskiej kaloryczności związanej przede wszystkim z dużą zawartością wilgoci rzędu 40-55% [6]. Stąd konieczność jego wstępnego suszenia, a więc doboru technologii i parametrów procesu suszenia.

Podstawowym celem badań na instalacjach do suszenia węgla brunatnego jest znalezienie parametrów suszarki do najefektywniejszego suszenia, tj. minimalnego zużycia energii na odparowanie 1 kg H₂O zawartego w porach cząstek węgla przy zach-

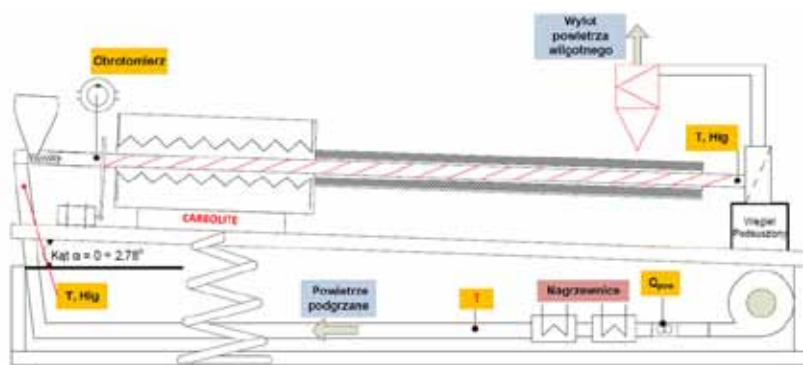
waniu odpowiedniego stopnia wysuszenia węgla.

■ Stanowiska badawcze

■ Suszarka obrotowa

Węgiel do suszarki obrotowej podawany i odbierany jest w sposób ciągły. Transport węgla w suszarce odbywa się poprzez rotacyjny obrót rury wewnętrznej. Czynnikiem suszącym jest podgrzane powietrze.

Instalacja do suszenia współprądowego zamieszczona jest na rys. 1. Rozmieszczenie czujników temperatury i wilgotności powietrza w instalacji pomiarowej pokazano na rys. 1. Są one umieszczone w istotnych miejscach zmiany parametrów. Monitorowane są również wartości ciśnienia i strumienia powietrza za wentylatorem oraz zużycie energii instalacji, co w konsekwencji pozwala na wyznaczenie bilansu energetycznego całego procesu suszenia.



Rys. 1. Schemat stanowiska współprądowego do suszenia węgla brunatnego

■ Suszarka typu Torbed

Schemat instalacji „Torbed” do suszenia węgla brunatnego zamieszczony jest na rys. 2. Węgiel do instalacji „Torbed” podawany i odbierany jest w sposób cykliczny. Testy wykonywane były przy maksymalnym obciążeniu wentylatora podmuchowego. Strumień powietrza wynosił ok. 100 m³/godz., dla zadanego strumienia powietrza dobrano maksymalną gęstość złoża. Masa węgla podawana do suszenia wynosi-

ła 2,5 kg. Temperatura powietrza podawanego do suszenia była płynnie regulowana w zakresie od 30 do 80°C poprzez dwie trzy sekcyjne nagrzewnice elektryczne.

■ Suszarka Fluidalna - 3D

Na rys. 3 zamieszczony został schemat suszarki fluidalnej 3D, której konstrukcja stanowiła podstawę do budowy suszarki pilotowej. Dla zapewnienia zmian strumienia powietrza w szerokim zakresie instalacja została wyposażona w trzy zespoły wentylatorów o łącznej wydajności ponad 3000 m³/h przy sprężu rzędu 2000 Pa. Każdy z wentylatorów jest wyposażony w przetwornice częstotliwości celem zapewnienia płynnej regulacji obrotów. Układ kanałów wraz z armaturą odcinająco-regulacyjną pozwala na wariantową współpracę wentylatorów: równoległą lub równoległo-szeregową w dowolnej konfiguracji. Układ transportu

widłowej oceny porównawczej kinetyki suszenia i energochłonności procesu suszenia węgla na instalacjach badawczych był wstępnie podsuszany do ok. 20% zawartości wilgotności końcowej.

Układy pomiarowe rejestrowały chwilową wartość mocy wentylatora oraz innych urządzeń pomocniczych w zależności od rodzaju suszarki, P_w, [W]

Moc elektryczną pobieraną przez nagrzewnicę wyznaczano ze wzoru:

$$P_N = \dot{m} \cdot c_p \cdot (t_1 - t_2) \quad [W]$$

gdzie:

m - strumień powietrza na wlocie do nagrzewnicy [kg/s],
c_p - ciepło właściwe powietrza [J/kg•K],
t₁, t₂ - temperatura na wlocie i wylocie z suszarki [°C].

Dla każdego analizowanego przedziału czasowego wyznaczano wartość zużytej energii elektrycznej z zależności:

$$E_{W,N} = (a_2 - a_1) \cdot P_{W,N} \quad [J]$$

gdzie:

E_{w,n} - energia całkowita, równa sumie energii wentylatora E_w i nagrzewnicy E_n,
a_{1,2} - kolejne chwile próbkowania.

Ilość wody odparowanej z węgla w danym przedziale czasowym, odpowiada różnicy ilości wody zawartej w powietrzu na wlocie i wylocie z suszarki. Chwilową wartość ubytku wody z węgla wyznaczono ze wzoru:

$$W = \frac{\Delta w \cdot V}{a_2 - a_1} \quad [g H_2O]$$

gdzie:

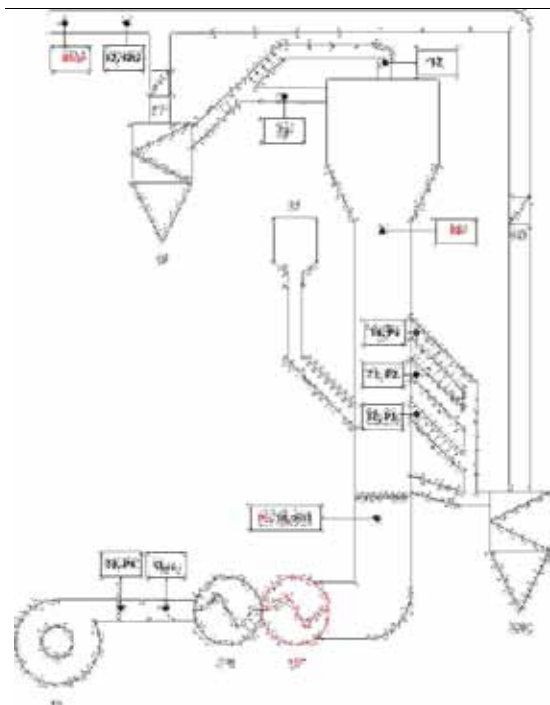
Δw - względny ubytek wilgotności w węglu/przyrost wilgotności w powietrzu [g/kg],
V - strumień powietrza na wlocie do suszarki [kg/h].

Zużycie energii na proces suszenia

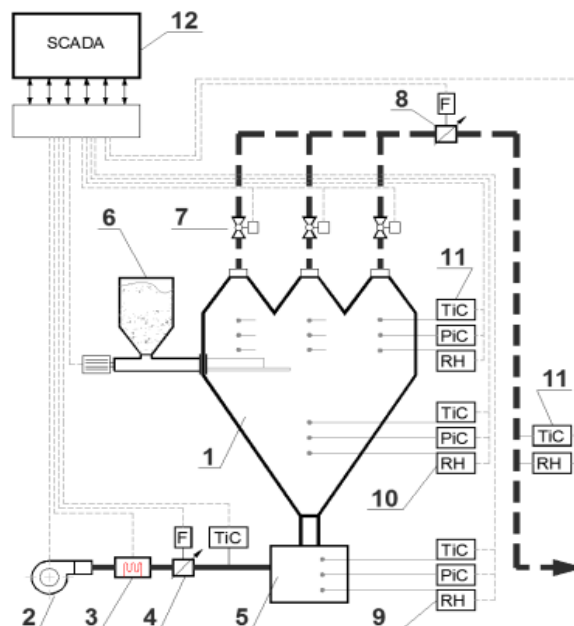
powietrza jest wyposażony ponadto w trzy nagrzewnice elektryczne o łącznej mocy cieplnej 20 kW.

■ Metodyka badań

Węgiel turoszowski wykorzystywany do testów suszenia pozyskany był z kruszarki, następnie do badań wyselekcjonowano ziarna poniżej 6,3 mm. Początkowa zawartość wilgotności w węglu wynosiła ok. 43%. Dla pra-



Rys. 2. Schemat stanowiska typu „Torbed”



Rys. 3. Schemat suszarni Fluidalnej 3D

węgla odniesiona do masy odparowanej wilgoci.

Nakład jednostkowy energii wyznacza się według następującej zależności:

$$E_j = \frac{E_{w,N}}{W} \quad [\text{kJ/kg H}_2\text{O}]$$

Uzyskane w ten sposób wartości jednostkowego zużycia energii służą do porównywania wyników procesu suszenia zrealizowanych przy różnych parametrach oraz dla różnych typów instalacji suszącej.

■ Badania eksperymentalne - analiza porównawcza

Na podstawie opracowanych krzywych kinetyki suszenia i wydatku energetycznego dla różnych parametrów suszenia tworzono funkcję trzy parametryczną, w której zmiennymi są: czas suszenia, temperatura czynnika suszącego i ubytek wilgoci z węgla lub wyda-

tek energetyczny. Funkcja ta pozwala na bezpośrednie porównanie ze sobą efektywności suszenia w różnych typach suszarek dla wybranych parametrów procesu suszenia. Funkcja przedstawiająca zapotrzebowanie na energię dla procesu suszenia węgla z kopalni Turów przedstawia się następująco:

$$f(t, T) = a_{00} + a_{10} \cdot t + a_{01} \cdot T + a_{20} \cdot t^2 + a_{11} \cdot t \cdot T + a_{02} \cdot T^2 + a_{30} \cdot t^3 + a_{21} \cdot t^2 \cdot T + a_{12} \cdot t \cdot T^2 + a_{03} \cdot T^3 + a_{40} \cdot t^4 + a_{31} \cdot t^3 \cdot T + a_{22} \cdot t^2 \cdot T^2 + a_{12} \cdot t \cdot T^3 + a_{04} \cdot T^4$$

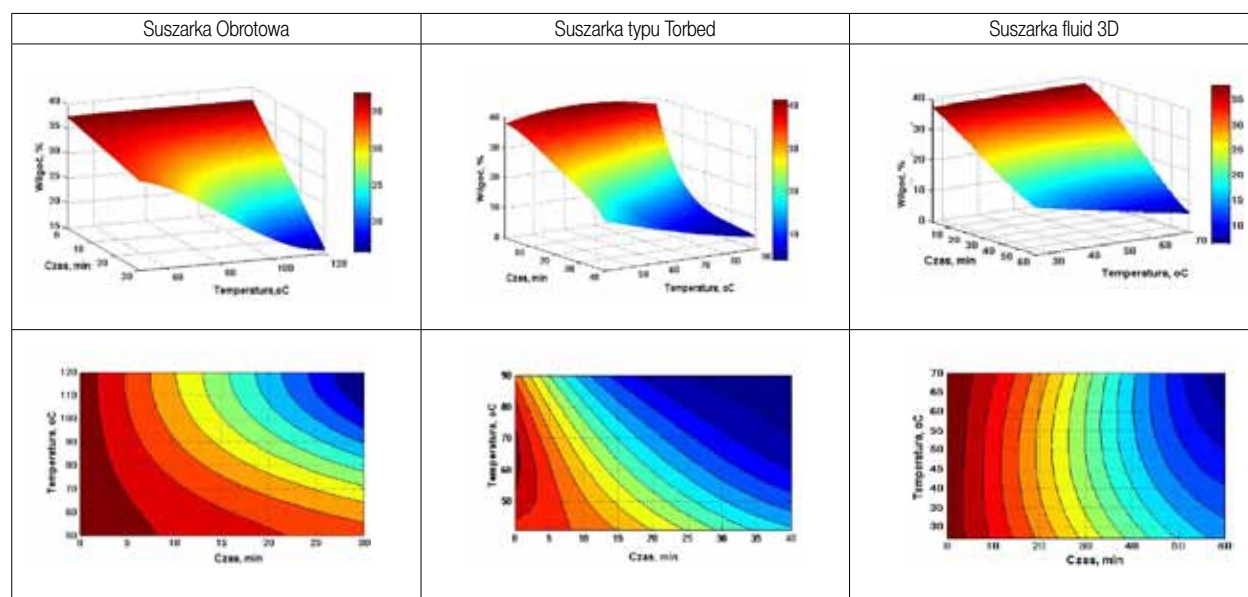
Funkcja taka jest charakteryzowana przedstawionymi poniżej wskaźnikami dopasowania względem danych pomiarowych:

SSE - resztkowa suma kwadratów odchyleń,
R2 - współczynnik determinacji,
Adjusted R - square - skorygowana wartość R2,
RMSE - pierwiastek kwadratowy błędów średniokwadratowych MSE.

■ Porównanie efektywności suszenia

Testy suszenia wykonane na poszczególnych instalacjach suszących wykonano dla różnych temperatur czynnika suszącego i dla stałego strumienia powietrza dla danego typu suszarki. Uzyskane wyniki badań pozwoliły na

stworzenie funkcji zaprezentowanych na rys. 4. Dla lepszej oceny wizualnej dodatkowo dla każdej funkcji stworzono wykresy strukturalne. Na podstawie tak wygenerowanych funkcji dokonano porównania różnych typów suszarek pod kątem stopnia wysuszenia węgla dla wybranych temperatur i czasów suszenia oraz oceny wydatku energetycznego na kilogram usuniętej wilgoci. Na rys. 5 zaprezentowany jest wykres zbiorczy



Rys. 4. Funkcję przedstawiające wpływ temperatury na stopień wysuszenia węgla w suszarkach

porównujący stopień wysuszenia węgla dla temperatury (60°C) dla różnych czasów suszenia.

Z wykresu przedstawionego na rys. 5 zaobserwować można jednoznacznie, że oceniając suszarki pod kątem stopnia wysuszenia węgla, suszarka typu "Torbed" jest znacznie skuteczniejsza. Suszarka Obrótowa dopiero przy testach wykonywanych w wyższych temperaturach rzędu 120°C osiągała dostateczny stopień wysuszenia węgla. Na wykresie poniżej zaobserwować można również, że czym dłuższy czas suszenia - tym

różnice w stopniu wysuszenia węgla dla badanych suszarek są większe. Suszarka obrotowa wymaga znacznie dłuższych czasów i wyższych temperatur suszenia dla osiągnięcia niskich wartości wilgotności końcowej węgla.

■ **Zestawienie zapotrzebowania na energię suszenia w różnych typach suszarek**

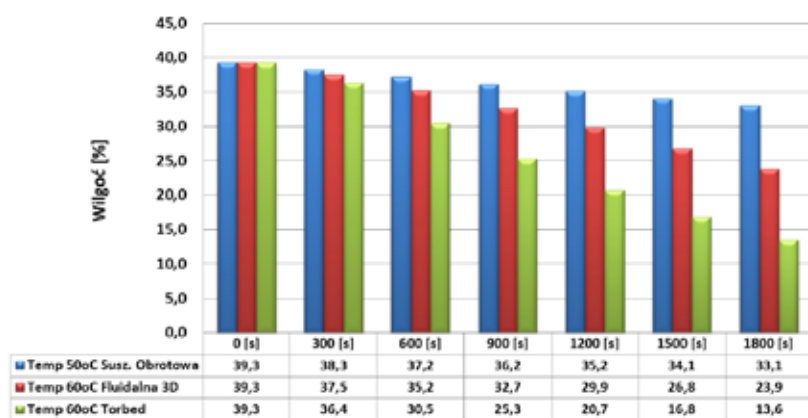
Analogiczne funkcje trójparametryczne stworzono dla oceny wydatku energetycznego suszarek na 1 kg odprowadzonej wilgoci. Przy czym dokona-

no dodatkowego podziału osobno na energię cieplną i energię elektryczną. Przykładowe wykresy z energią całkowitą (łącznie) dla trzech typów suszarek zaprezentowane są na rys. 6. Suszarka Obrótowa charakteryzowała się znacznie mniejszymi kosztami suszenia, ale i dużo gorszą skutecznością. Na rys. 7 i 8 zaprezentowano porównawcze zestawienie zapotrzebowania na energię elektryczną i cieplną dla suszarki obrotowej.

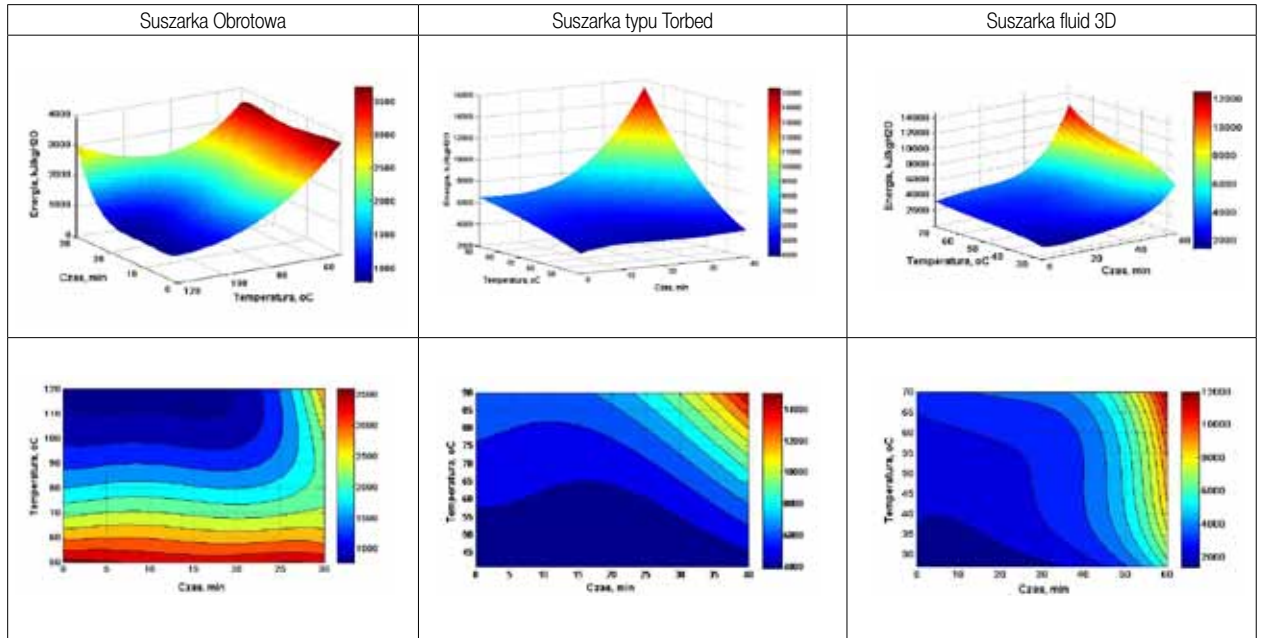
Z wykresów przedstawionych na rys. 7 i 8 widać, że udział energii elektrycznej w suszarce obrotowej jest mniejszy niż cieplnej i maleje wraz ze wzrostem temperatury czynnika suszącego. Ze względu na niską skuteczność suszenia w suszarce obrotowej dla niskich temperatur powietrza udział energii cieplnej jest najwyższy. W suszarkach fluidalnych udział energii cieplnej wzrasta wraz ze wzrostem temperatury czynnika suszącego. Trend ten został zaprezentowany na przykładzie suszarki typu Torbed na rys. 9.

■ **Zapotrzebowanie na energię elektryczną oraz cieplną dla instalacji laboratoryjnych**

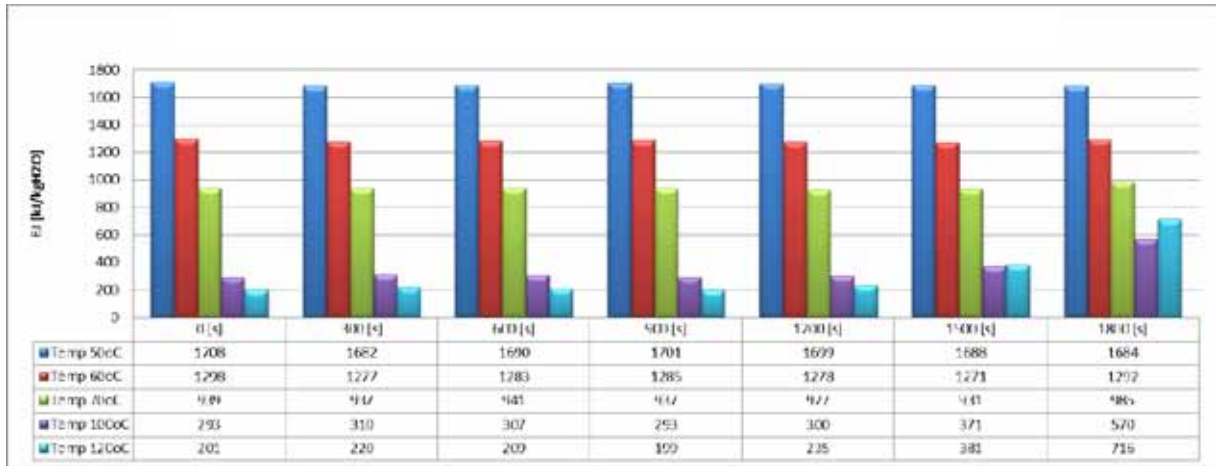
Na rys. 10 zestawione zostały udziały energii cieplnej i elektrycznej dla ba-



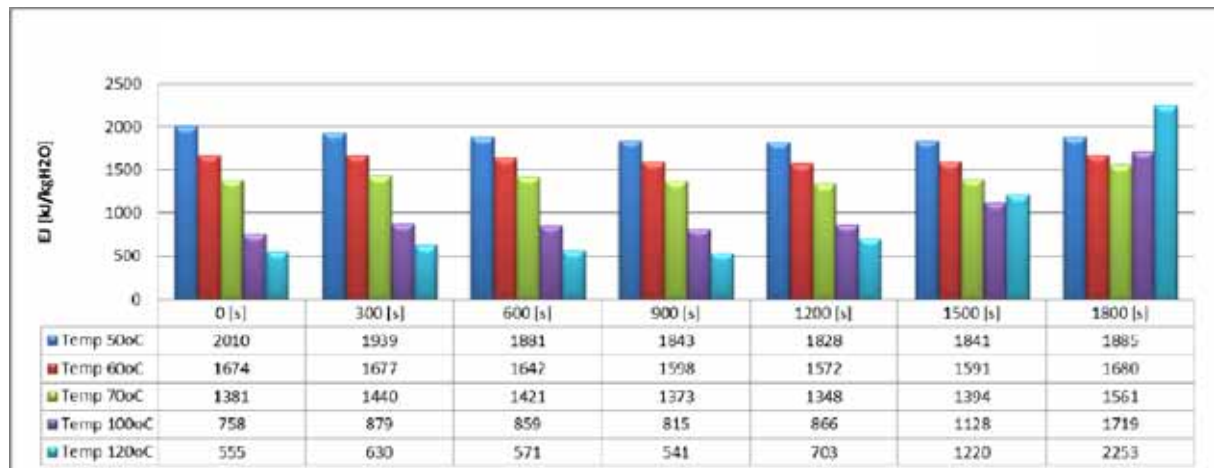
Rys. 5. Porównanie skuteczności suszenia w temperaturze 60°C



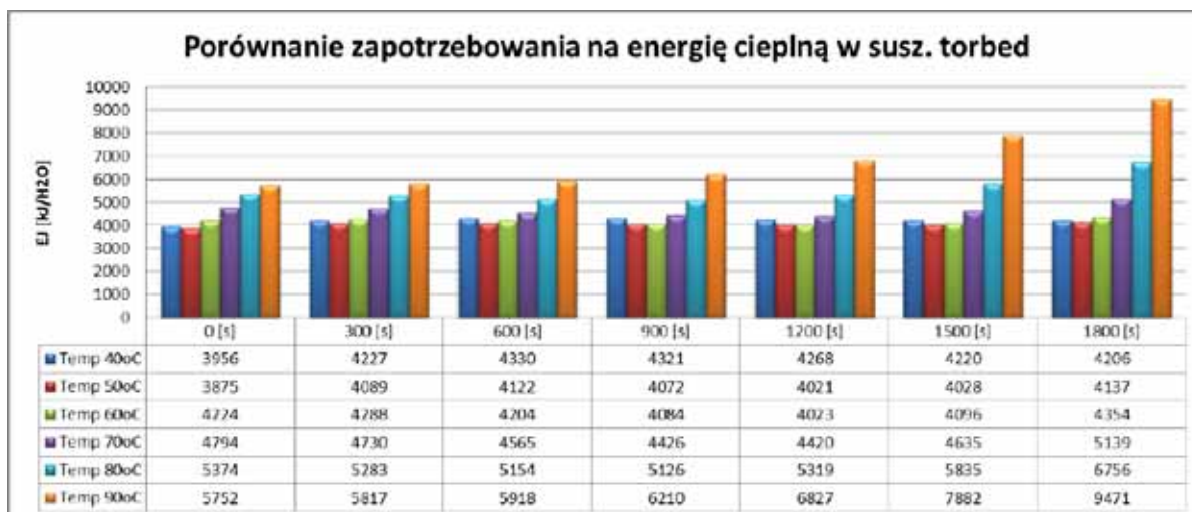
Rys. 6. Funkcje przedstawiające zapotrzebowanie na energię do wysuszenia 1 kg wody



Rys. 7. Porównanie zapotrzebowania na energię elektryczną w suszarni obrotowej



Rys. 8. Porównanie zapotrzebowania na energię cieplną w suszarni obrotowej

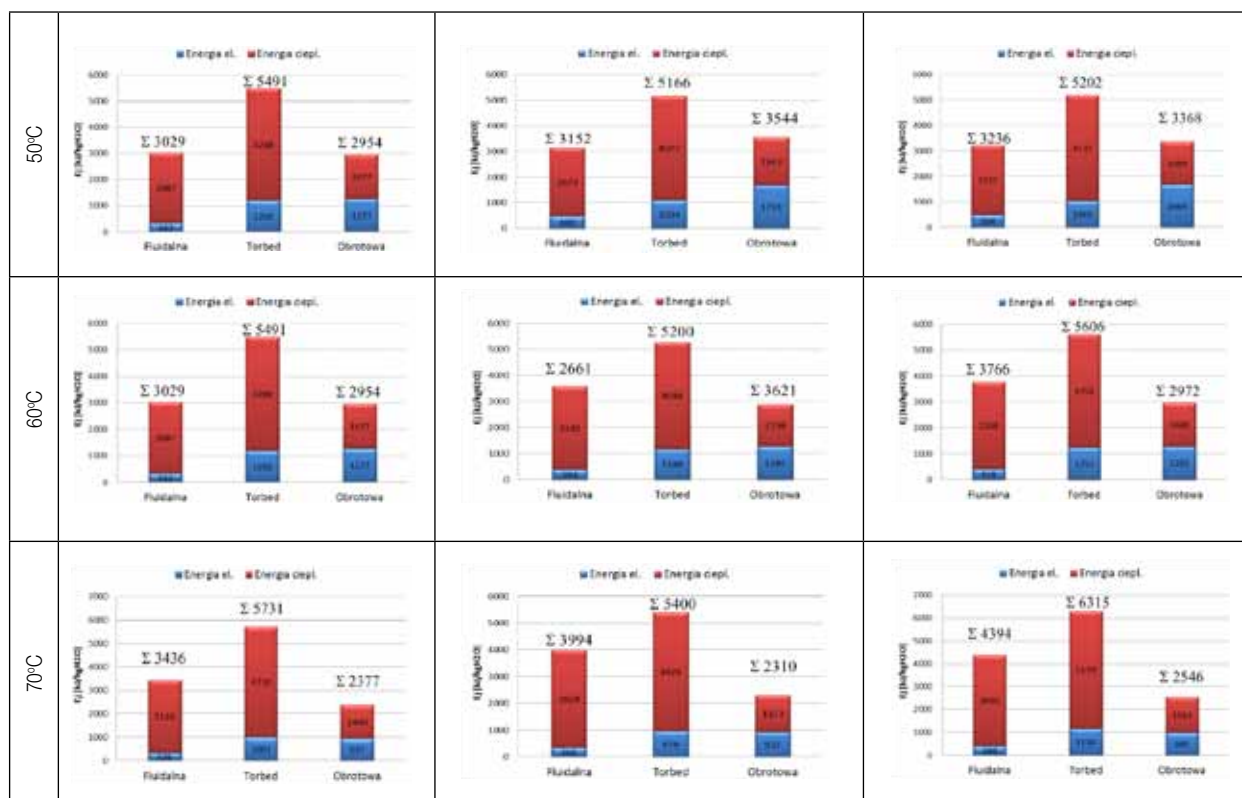


Rys. 9. Porównanie zapotrzebowania na ciepłą w suszarni typu "Torbed"

danych suszarni dla trzech różnych temperatur czynnika suszącego (50, 60 i 70°C). Na załączonych wykresach widać, że w każdym przypadku suma energii dla suszarni obrotowej jest mniej-

sza i różnica ta jest tym większa im wyższa jest temperatura czynnika suszącego. Natomiast udział energii elektrycznej w porównywanych temperaturach dla suszarni obrotowej wynosi aż ok. 50%,

dla instalacji typu torbed udział energii elektrycznej wynosi tylko ok. 10%. Suszarnia typu torbed choć charakteryzuje się większym wydatkiem energetycznym okazuje się być znacznie efektywniej-



Rys. 10. Zapotrzebowanie na energię cieplą i elektryczną dla suszarek

sza pod kątem skuteczności suszenia węgla. Skuteczność ta jest prawie dwa razy większa co ilustruje rys. 5. Więcej wyników badań przedstawionych zostało w monografii [7]

■ Wnioski

- Na podstawie badań można wnioskować, w oparciu o lokalne uwarunkowania (koszty) pozyskania energii, która technologia suszenia jest najkorzystniejsza.
- Wraz ze wzrostem temperatury rośnie udział energii cieplnej, maleje natomiast elektrycznej.
- Energetycznie najniższe zużycie energii podczas suszenia uzyskiwano dla suszarki obrotowej, niestety suszarka ta odbiegała poziomem skuteczności suszenia w niskich temperaturach i odznaczała się najwyższym udziałem energii elektrycznej.
- Ektywniejsza pod kątem skuteczności suszenia jest suszarka z zawieszonym złożem fluidalnym w szczególności podczas suszenia w temperaturach tj. 60 i 70°C, niestety kosztem wyższego zużycia energii do suszenia o ok. 2000-2500 kJ/kgH₂O w porównaniu do suszarki obrotowej.
- W suszarni typu Torbed uzyskiwano wysoką kinetykę suszenia kosztem najwyższego zużycia energii, jednak pracowała ona w sposób cykliczny. Zasadne jest zatem oczekiwanie obniżenia wydatku energetycznego przy zwiększeniu skali suszarki i opracowaniu technologii suszenia w sposób ciągły.
- Suszarka fluidalna „3D” pod względem energetycznym mieści się pomiędzy dwoma pozostałymi rozwiązaniami, ale technicznie jest najdojrzalsza i przeszła wielogodzinne testy suszenia.

[3] M. Gientko, A. Małoń i S. Tymiński., *Bilans zasobów kopalin i wód podziemnych w Polsce, stan na 31.XII.2007r.*, Warszawa: Państwowy Instytut Geologiczny, 2008.

[4] H. P.-Kruczek, J. Lichota, A. Jędrusyna, K. Tomczuk i M. Ostrycharczyk, „Zapotrzebowanie na energię do układu suszenia węgla brunatnego”. *Rynek Energii*. 2011.

[5] Z. Kozłowski, „Present situation and prospects for lignite in the Polish power-generation industry,” *Applied Energy* 74 (2003) 323-329.

[6] J. Kasiński, „Zasoby węgla brunatnego w Polsce”, Państwowy Instytut Geologiczny, Wrzesień, 2008.

[7] H. Pawlak-Kruczek i Z. Plutecki, *Suszenie węgla niskogatunkowego*, Wrocław: Nowa Energia, 2014.

Bibliografia

[1] Z. Kasztelewicz, „Strategia rozwoju węgla brunatnego w pierwszej połowie XXI wieku w Polsce” 2008.

[2] W. Pietryszczew, „Górnictwo węgla brunatnego w Polsce w 2005 roku”.

Przedstawione w artykule wyniki zostały uzyskane w ramach prowadzenia badań w projekcie:
Wstępne suszenie węgla brunatnego dla celów energetycznych Nr Projektu: POIG.01.03.01-00-040/08
Projekt jest współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego i budżetu Państwa.



**INNOWACYJNA
GOSPODARKA**
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



Politechnika Wroclawska

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO

