



Ocena skuteczności i energochłonności procesu suszenia w suszarni fluidyzacyjnej i taśmowej

Michał Czerep, Halina Pawlak-Kruczek

*Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny
Zakład Kotłów, Spalania i Procesów Energetycznych
E-mail: michal.czerep@pwr.edu.pl, halina.kruczek@pwr.edu.pl*

STRESZCZENIE

W pracy zawarto wyniki eksperymentalne badań nad efektywnością procesu suszenia węgla brunatnego w dwóch typach suszarek pilotowych, tj. suszarni fluidyzacyjnej i suszarni taśmowej. Opracowanie efektywnej metody suszenia węgla brunatnego, jak i biomasy, stanowi wyzwanie i konieczność ze względu na poprawę sprawności jednostek opalanych takim paliwem i redukcję emisji CO₂. W instalacjach suszących jako czynnika suszącego używano dla suszarni fluidyzacyjnej powietrza, dla suszarni taśmowej spalin. Badania eksperymentalne przeprowadzono dla węgla brunatnego z kopalni Turów. Testy suszenia wykonano dla różnych temperatur czynnika suszącego i dla różnych strumieni czynnika suszącego. Wydajność suszarek węgla mokrego wynosiła ok. 100 kg/h. Oceniano skuteczność suszenia i wydatek energetyczny na usunięcie kg wody z węgla.

SŁOWA KLUCZOWE: *suszarnia fluidyzacyjna, suszarnia taśmowa, suszenie węgla brunatnego, bilans ciepła, wydatek energetyczny*

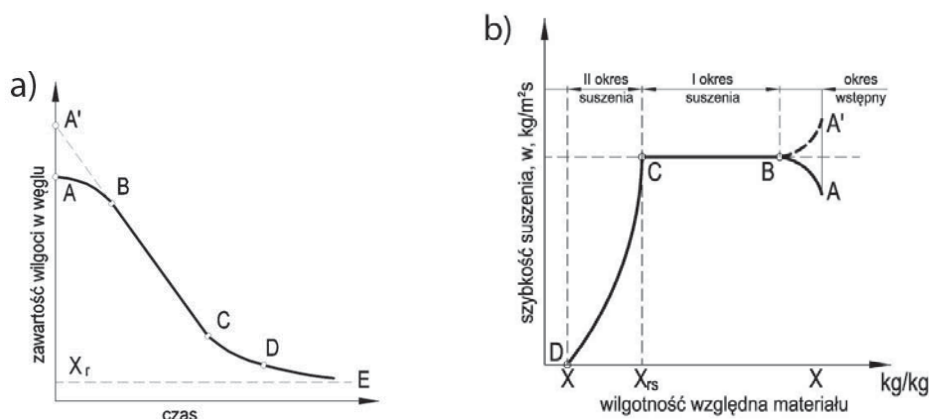
1. WPROWADZENIE

Węgiel brunatny jest obecnie najtańszym źródłem energii elektrycznej. Cztery z pięciu wielkich polskich elektrowni opalanych węglem brunatnym produkują energię tańszą niż najtańsza elektrownia pracująca na węglu kamiennym [1]. Dotychczas udokumentowano w Polsce łącznie 90 złóż geologicznych rozpoznanych szczegółowo oraz wstępnie o zasobach bilansowych wg stanu na 31.12.2014 r. wynoszących 23 510,59 mln ton z czego złoża z zakładów zagospodarowanych wynoszą 1 482,69 mln ton [2]. Wydobycie węgla brunatnego w 2014 r., ze złóż Bełchatów, Turów, Pątnów, Adamów, Konin,

Drzewce i Sieniawa wyniosło 64 002 tys. t [2], co stanowiło około 4,3% złóż eksploatowanych i ok 0,27% złóż zbilansowanych ogółem. Niezbędne jest zatem stosowanie technologii zmierzających do wzrostu sprawności produkcji energii w blokach opalanych węglem brunatnym, stąd konieczność jego wstępnego suszenia, a więc doboru technologii i parametrów procesu suszenia. Podstawowym celem doboru technologii do suszenia węgla brunatnego jest dobór parametrów suszarni do najefektywniejszego suszenia, tj. minimalnego zużycia energii na odparowanie 1 kg H₂O zawartego w węglu w jak najkrótszym czasie przy zachowaniu odpowiedniego stopnia wysuszenia węgla.

2. METODYKA OBLICZEŃ SZYBKOŚCI SUSZENIA I ZUŻYCIA ENERGII NA USUNIĘCIE WODY W SUSZARNIACH PILOTOWYCH

Typowy proces suszenia przebiega w kilku etapach, które pokazano na rys. 1, przy czym w zależności od parametrów instalacji suszących krzywe suszenia różnią się długością trwania poszczególnych etapów.



Rys. 1: Przebiegi krzywych charakteryzujących proces suszenia [3]: a) – krzywa suszenia, b) – krzywa szybkości suszenia

W praktyce proces suszenia prowadzi się do usunięcia wody powierzchniowej, ponieważ usunięcie wody związanej wymaga dużych nakładów energii. Instalacje suszarni, w których prowadzono testy, są wyposażone w układ pomiarowy wilgotności gazu przed i za suszarką oraz rejestracji chwilowej wartości mocy P_W (W) wentylatora oraz innych urządzeń w zależności od typu suszarni Strumień ciepła pobierany przez nagrzewnicę wyznaczano ze wzoru:

$$P_N = \dot{m} \cdot c_p \cdot (t_1 - t_2) \quad (1)$$

gdzie: \dot{m} – strumień powietrza na wlocie do nagrzewnicy w kg/s, c_p – ciepło właściwe powietrza w J/kg K, t_1, t_2 – temperatura na wlocie i wylocie z suszarni w C°. W każdym analizowanym przedziale czasowym wyznaczano wartość zużytej energii elektrycznej z zależności:

$$E_{W,N} = (a_2 - a_1) \cdot P_{W,N} \quad (2)$$

gdzie: $E_{W,N}$ – energia całkowita w J, równa sumie energii wentylatora E_W i nagrzew-

nicy E_N , natomiast a_1, a_2 oznaczają kolejne chwile próbkowania (rejestracja danych co 10 s).

Ilość wody odparowanej z węgla w danym przedziale czasowym, odpowiada różnicy ilości wody zawartej w powietrzu na wlocie i wylocie z suszarni. Chwilową wartość ubytku wody w węglu \dot{W} , wyrażoną w gH₂O, wyznaczono ze wzoru:

$$\dot{W} = \frac{\Delta w \cdot V}{a_2 - a_1} \quad (3)$$

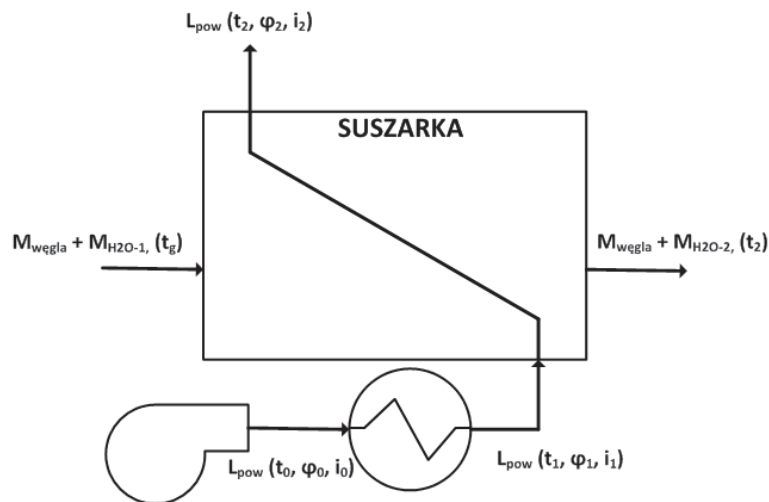
gdzie: Δw oznacza przyrost wilgoci w powietrzu odpowiadający względnemu ubytkowi wilgoci z węgla w g/kg, V jest strumieniem powietrza na wlocie do suszarni w kg/h. Zużycie energii na proces suszenia węgla odniesiono do masy odparowywanej wilgoci. Nakład jednostkowy energii E_j wyrażony w kJ/kg H₂O, wyznacza się z następującej zależności:

$$E_j = \frac{E_{W,N}}{\dot{W}} \quad (4)$$

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

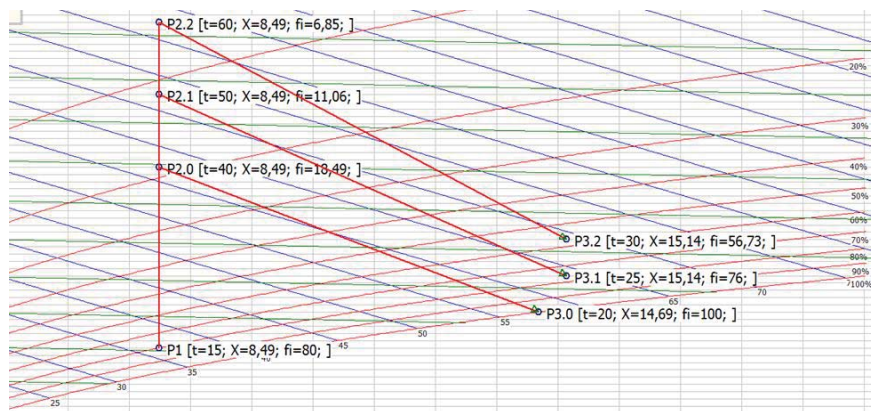
- odcinek (A–B) – następuje ogrzewanie materiału,
- odcinek (B–C) – liniowa zależność ubytku wilgoci od czasu,
- odcinek (C–D–E) – krzywa zbliża się do równowagowej zawartości wilgoci X_r

Na rysunku 2 zaprezentowano schemat suszarni jednostopniowej z zaznaczonymi strumieniami węgla, wody i czynnika suszącego wprowadzanymi do suszarni i z niej wyprowadzanymi.



Rys. 2: Schemat suszarni jednostopniowej z zewnętrznym podgrzewaczem czynnika suszącego

Na rysunku 3 na wykresie Moliera przedstawiono przebieg procesu suszenia dla testów suszenia przeprowadzonych w suszarni fluidyzacyjnej.



Rys. 3: Przemiany procesu suszenia dla suszarni fluidyzacyjnej dla trzech temperatur czynnika suszącego na wykresie Moliera $i-x$

3. SCHEMAT SUSZARNI FLUIDYZACYJNEJ I PROCEDURA BADAWCZA

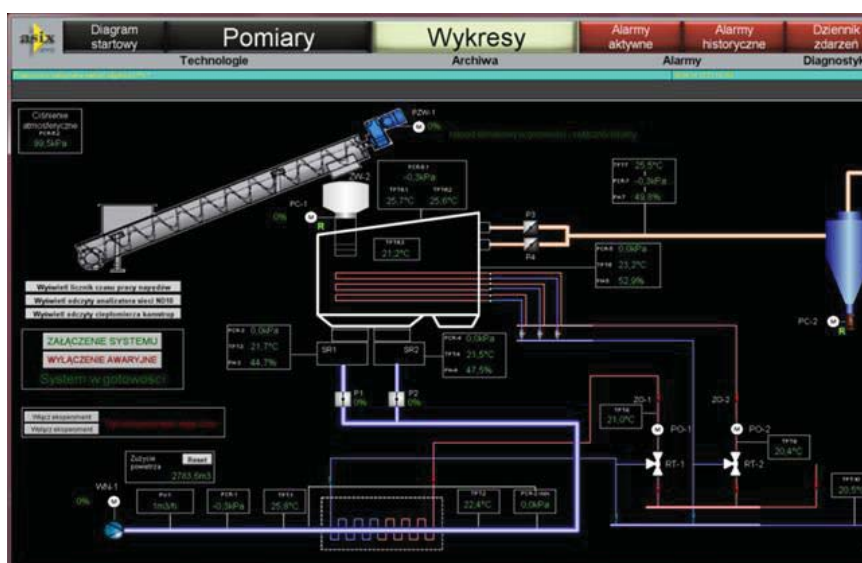
Na rysunku 4 zamieszczono schemat suszarni fluidyzacyjnej, na której prowadzono testy suszenia węgla brunatnego pochodzącego z kopalni Turów.



Rys. 4: Schemat suszarni fluidyzacyjnej

Mokry węgiel o rozmiarze ziarna poniżej 12 mm wsypywany był do podajnika ślimakowego. Strumień węgla mokrego podawanego do suszarni podczas testów eksperymentalnych wynosił ok. 100 kg/h. Węgiel transportowany był do podajnika celkowego i następnie wpadał do leja suszącego. Jako czynnika suszącego używano powietrza podgrzewanego w wymienniku ciepła, następnie poprzez system kierownic wprowadzanego do suszarni. Węgiel pod wpływem odpowiednio skierowanego strumienia powietrza

przesuwany był w pulsacyjnym złożu w kierunku tylnej ścianki suszarni przesypany się w sposób ciągły do lejki zbiorczego. Czas suszenia węgla w suszarni wynosił ok. 15 min i w nieznaczny sposób mógł być korygowany za pomocą strumienia powietrza suszącego i ustawieniem kierownic. System przygotowania i transportu powietrza z zespołem wodnych nagrzewnic, fluidyzacyjnej komory suszącej wraz z elementami wyposażenia, zasobnikiem węgla z układem podajnikowym i dozującym, wymiennik ciepła z układem do płynnej regulacji mocy cieplnej oraz dwustopniowy układ do podczyszczania powietrza usuwanego z instalacji zostały szczegółowo opisane w raporcie [4].

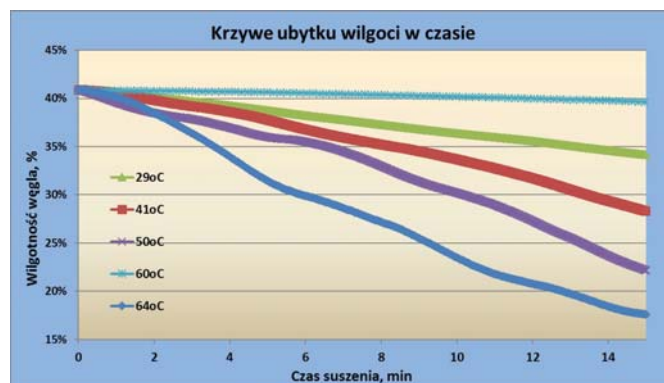


Rys. 5: Rzut ekranu sterowania procesem suszenia w suszarni fluidyzacyjnej

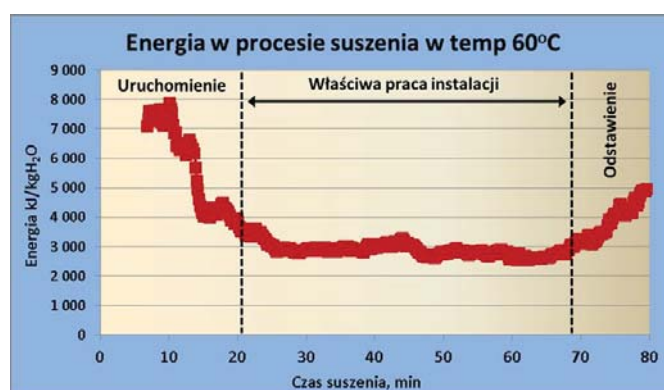
Na rysunku 5 zaprezentowano rzut ekranu sterowania wentylatorami, pompami i kłapami wraz z naniesionymi punktami pomiarowymi ciśnień, wilgotności i temperatury powietrza. Układ sterowania i AKPIA z detalami został opisany w raporcie [5]. Testy suszenia były wykonywane dla różnych wartości temperatury czynnika suszącego zmienianego w zakresie od 30 do 65°C przy strumieniu powietrza wynoszącym ok. 5500 m³/h. Dla każdego testu rejestrowano podstawowe parametry suszenia, tj. (ciśnienia, strumienie, temperatury i wilgotności powietrza). Następnie dla każdego testu wyznaczana była krzywa suszenia oraz krzywa wydatku energetycznego według procedury opisanej w rozdziale 2. Krzywe ubytku wilgoci w czasie i wydatku energetycznego przedstawiono na rys. 6 i 7. Więcej wyników badań nad efektywnością niskotemperaturowego suszenia węgla brunatnego w suszarni fluidalnej opisano w artykule [6].

4. ANALIZA PARAMETROWA PROCESU SUSZENIA

Na podstawie opracowanych krzywych suszenia i wydatku energetycznego dla różnych parametrów suszenia utworzono funkcję wielomianową (trójparametryczną), w której zmiennymi są: czas suszenia, temperatura czynnika suszącego (bądź strumień) i ubytek wilgoci z węgla lub wydatek energetyczny. Funkcja pozwala na bezpośrednie



Rys. 6: Przykładowe krzywe ubytku wilgoci z węgla podczas suszenia



Rys. 7: Przykładowa krzywa energochłonności procesu suszenia

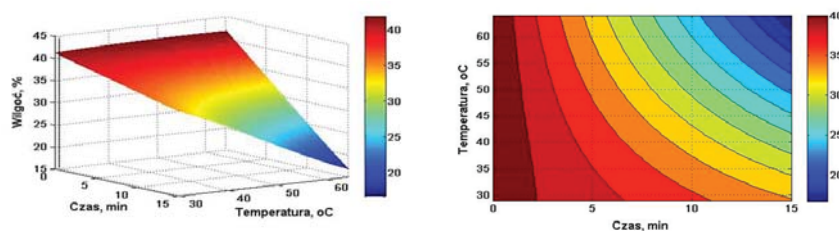
porównanie ze sobą efektywności suszenia w różnych typach suszarek dla wybranych parametrów procesu suszenia. Przykładowa funkcja przedstawiająca zapotrzebowanie na energię dla procesu suszenia węgla z kopalni Turów:

$$f(t, T) = a_{00} + a_{10} \cdot t + a_{01} \cdot T + a_{20} \cdot t^2 + a_{11} \cdot t \cdot T + a_{02} \cdot T^2 + a_{30} \cdot t^3 + a_{21} \cdot t^2 \cdot T + a_{12} \cdot t \cdot T^2 + a_{03} \cdot T^3 + a_{40} \cdot t^4 + a_{31} \cdot t^3 \cdot T + a_{22} \cdot t^2 \cdot T^2 + a_{12} \cdot t \cdot T^3 + a_{04} \cdot T^4 \quad (5)$$

Funkcję charakteryzują następujące wskaźniki dopasowania względem danych pomiarowych: SSE (3437) – resztowa suma kwadratów odchyleń, R^2 (0,9879) – współczynnik determinacji, adjusted R -squared – (0,9872), skorygowana wartość R^2 , RMSE (4,457) – pierwiastek kwadratowy błędów średniokwadratowych.

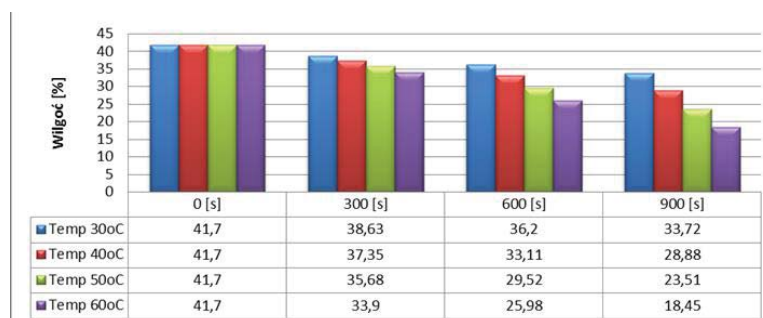
5. WPŁYW TEMPERATURY SUSZENIA W SUSZARNI FLUIDYZACYJNEJ

Testy suszenia w suszarni fluidyzacyjnej wykonane dla różnych temperatur czynnika suszącego i stałego strumienia powietrza doprowadzanego do suszarni pozwoliły na stworzenie funkcji suszenia zaprezentowanych na rys. 8.



Rys. 8: Funkcja ubytku wilgoci w czasie dla różnych temperatur suszenia dla suszarni fluidyzacyjnej

Dla lepszej oceny wizualnej dla każdej funkcji stworzono wykresy strukturalne. Tak wygenerowane funkcje pozwalają na łatwiejszą ocenę efektywności pracy suszarni oraz umożliwiają porównanie różnych typów suszarek pod kątem stopnia wysuszenia węgla dla wybranych temperatur i czasów suszenia. Na rysunku 9 pokazano wykres zbiorczy porównujący stopień wysuszenia węgla dla czterech różnych temperatur (30, 40, 50 i 60°C) dla różnych czasów suszenia.



Rys. 9: Porównanie skuteczności suszenia w suszarni fluidyzacyjnej w temperaturach 30°C, 40°C, 50°C i 60°C

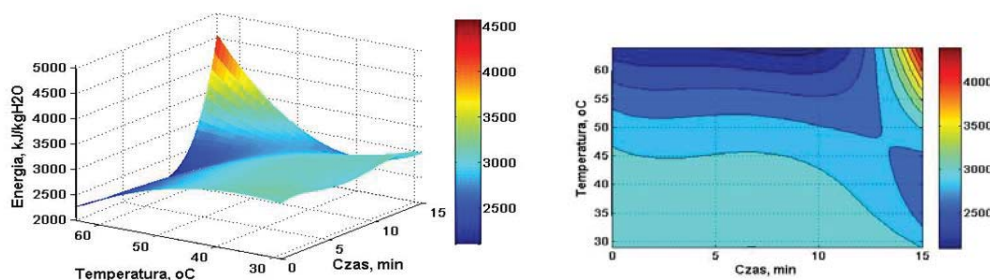
Na rysunku 9 zaobserwować można, że im wyższa temperatura czynnika suszącego i dłuższy czas suszenia, tym stopień wysuszenia węgla jest większy.

6. ZAPOTRZEBOWANIA NA ENERGIĘ SUSZENIA W SUSZARNI FLUIDYZACYJNEJ

Funkcje trójparametryczne opracowano również dla oceny wydatku energetycznego suszarek przypadającego na 1 kg odparowanej wilgoci rys. 10. Przy czym dokonano dodatkowego podziału osobno na ciepło i energię elektryczną.

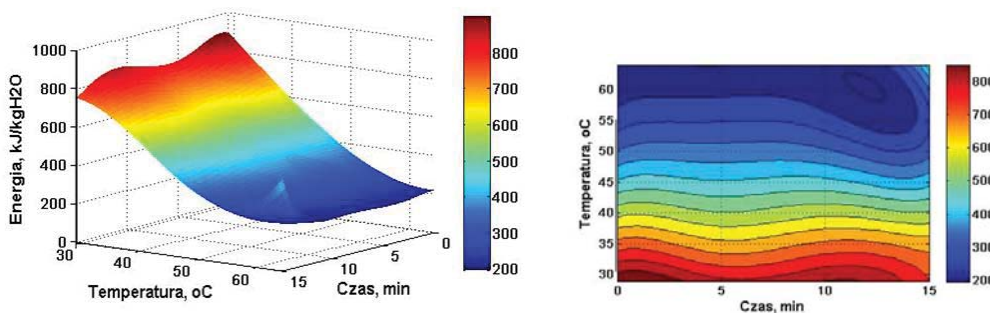
Przykładowe wykresy z wydatkiem energetycznym dla suszarni fluidyzacyjnej zaprezentowane są na rys. 11.

Najniższy wydatek energetyczny (wyłączając końcowe minuty suszenia, gdzie następuje gwałtowny jej przyrost spowodowany odstawianiem suszarni i zaprzestaniem podawania świeżego, mokrego węgla) otrzymano dla suszenia w wyższych temperaturach, tj. ok 60°C i wynosi ona ok. 2500 kJ/kg H₂O. Na rysunku 12 przedstawiono porównawcze zestawienie zapotrzebowania na energię elektryczną dla suszarni fluidyzacyjnej. Ponieważ ilość doprowadzanej energii elektrycznej do wentylatorów i napędów podczas testów suszenia jest mniej więcej na tym samym poziomie, czym wyższa temperatura czynnika suszącego, tym udział energii elektrycznej w bilansie maleje

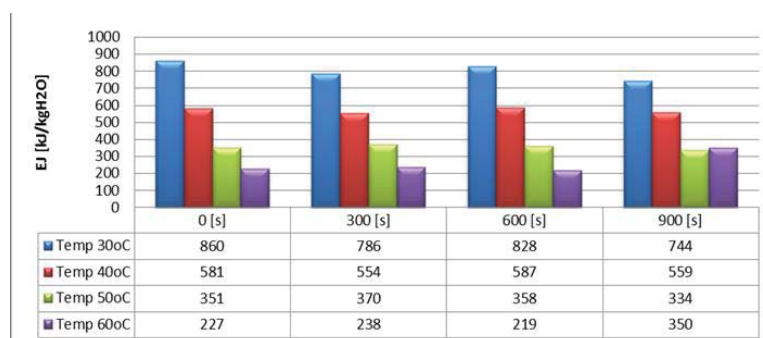


Rys. 10: Funkcja przedstawiająca zapotrzebowanie na energię do wysuszenia 1 kg wody dla suszarni fluidyzacyjnej

(patrz rys. 11 i 12). Na rysunku 10 widać wyraźnie, że podczas suszenia w temperaturze powyżej 55°C, sumaryczny wydatek energetyczny wynosi poniżej 3000 kJ/kg H₂O.

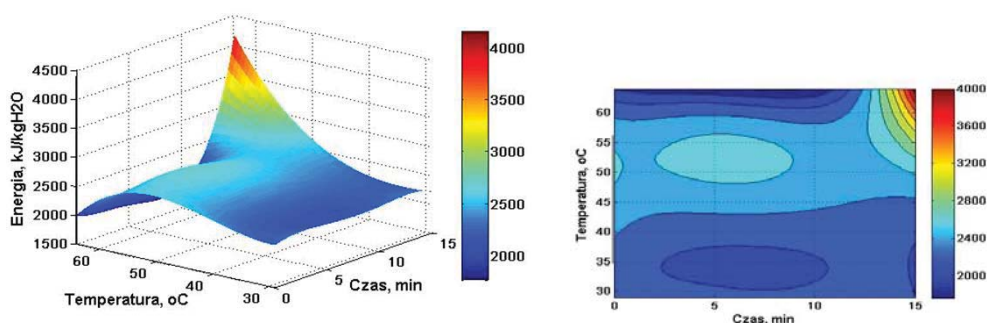


Rys. 11: Funkcja przedstawiająca zapotrzebowanie na energię elektryczną do wysuszenia 1 kg wody dla suszarni fluidyzacyjnej

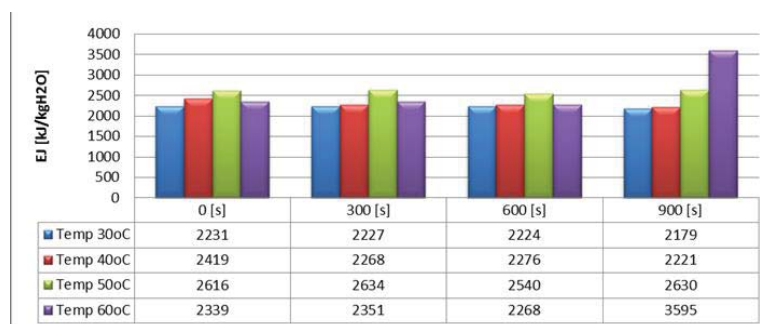


Rys. 12: Porównanie zapotrzebowania na energię elektryczną w suszarni fluidyzacyjnej

Analizując wykresy przedstawione na rysunkach 13 i 14, zaobserwować można, iż pomimo podnoszenia temperatury czynnika suszącego, a tym samym zwiększania się ciepła doprowadzanego do suszarni, nie zwiększa się ilość ciepła przypadająca na 1 kg odparowanej wilgoci. Oznacza to, że podniesienie temperatury czynnika suszącego pro-



Rys. 13: Funkcja przedstawiająca zapotrzebowanie na ciepło do wysuszenia 1 kg wody dla suszarni fluidyzacyjnej



Rys. 14: Porównanie zapotrzebowania na ciepło w suszarni fluidyzacyjnej

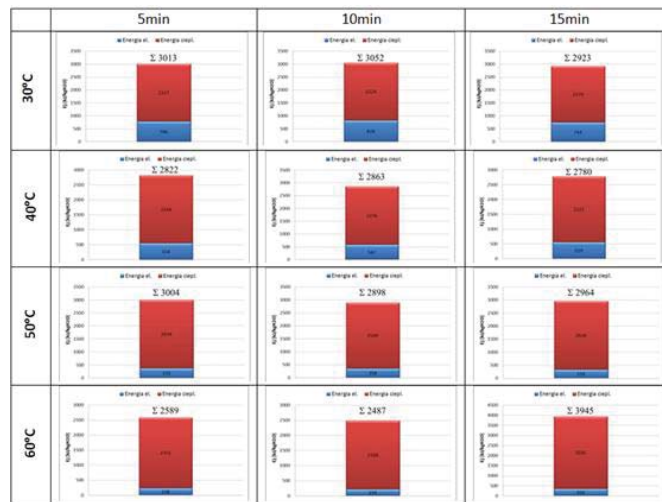
porcjonalnie spowodowało zwiększenie szybkości i efektywności suszenia. Zapotrzebowanie na ciepło w analizowanych przypadkach wynosiło ok. 2200–2500 kJ/kg H₂O.

7. ZAPOTRZEBOWANIE NA ENERGIĘ ELEKTRYCZNĄ ORAZ CIEPŁO W SUSZARNI FLUIDYZACYJNEJ

Na rysunku 15 zestawione zostały udziały ciepła i energii elektrycznej dla suszarni fluidyzacyjnej dla czterech różnych temperatur czynnika suszącego (30°C, 40°C, 50°C i 60°C). Na załączonych wykresach widać, że w każdym przypadku udział energii elektrycznej maleje wraz ze wzrostem temperatury czynnika suszącego. Najniższe poziomy zapotrzebowania na energię uzyskano w temperaturze suszenia 60°C. Jednakże wydatek energetyczny w 15 minucie suszenia jest nieco wyższy ze względu na odstawienie suszarni i zaprzestanie podawania mokrego węgla. Układ pomiarowy dalej rejestrował moc, w związku z czym na rys. 13 widoczny jest gwałtowny wzrost zapotrzebowania na ciepło.

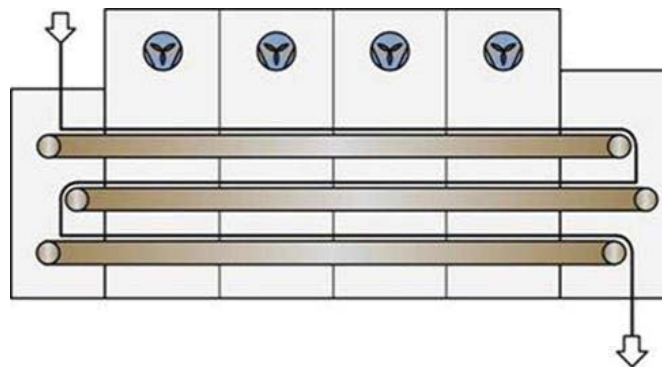
8. SCHEMAT SUSZARNI TAŚMOWEJ I PROCEDURA BADAWCZA

Suszarnia taśmowa składa się z trzech taśm umieszczonych jedna pod drugą. Transport węgla na kolejnych warstwach taśmy odbywa się w sposób mechaniczny. Gdy węgiel spada z jednej taśmy na drugą, następuje mieszanie cząstek, co w rezultacie po-



Rys. 15: Zapotrzebowanie na ciepło i energię elektryczną dla suszarni fluidyzacyjnej

prawia jednorodność suszenia węgla. Ciepło do suszarni taśmowej jest doprowadzane zarówno bezpośrednio, za pomocą gorących spalin, jak i w sposób pośredni za pomocą kanałów spalinowych umieszczonych pod kolejnymi warstwami taśm. Czas przebywania węgla w suszarni taśmowej kontrolowany jest poprzez zmianę prędkości taśm, ale zazwyczaj wynosił pomiędzy 30–60 minut. Ze względu na dużą ilość części mechanicznych, suszarnia taśmowa wymaga większych nakładów energii elektrycznej. Na rysunku 16 przedstawiono schemat ideowy suszarni taśmowej, która powstała w oparciu o badania laboratoryjne w ramach współpracy Zakładu Kotłów, Spalania i Procesów Energetycznych Politechniki Wrocławskiej z SBB Energy S.A. Dobór i wpływ temperatury suszenia oraz innych parametrów, takich jak strumień powietrza, właściwości węgla czy poprawa efektywności mieszania węgla w suszarni, na skuteczność suszenia opisano w raporcie [7].



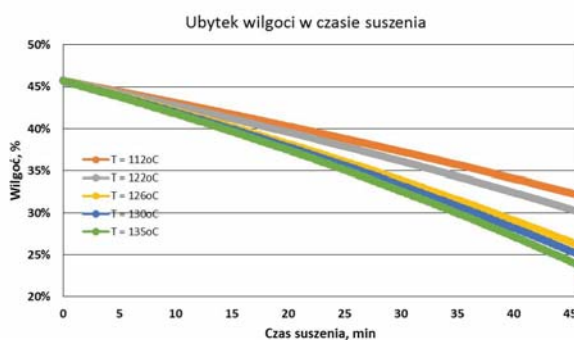
Rys. 16: Schemat suszarni taśmowej

Testy suszenia w suszarni taśmowej przeprowadzono dla węgla brunatnego o początkowej wilgotności wynoszącej 45,7% dla różnych temperatur czynnika suszącego

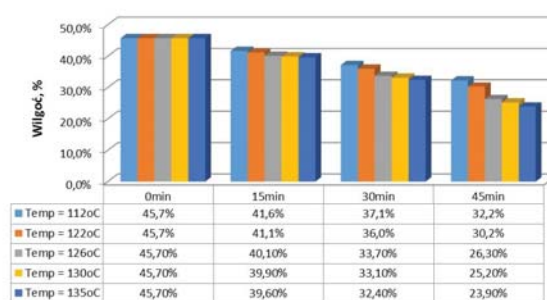
zmienianego w zakresie od 112°C do 135°C, przy minimalnym strumieniu spalin zapewniającym wymianę nawilżonego czynnika suszącego wynoszącym ok. 30 m³/h Dla każdego testu wyznaczono krzywą kinetyki suszenia oraz obliczono wydatek energetyczny na podstawie ilości ciepła doprowadzonego do suszarni i zarejestrowanych mocy urządzeń pomocniczych. Wszystkie napędy i wentylatory wraz z odnotowanymi mocami zamieszczono w tabeli 1. Zestawienie krzywych ubytku wilgoci w czasie zaprezentowano na rys. 17.

Tabela 1: Zestawienie elektrycznych urządzeń wchodzących w skład budowy suszarni taśmowej z zarejestrowanymi mocami

Urządzenia elektryczne	Sztuki	Moc jednost., kW	Moc łączna, kW
Podajniki (podawanie i odbiór węgla)	2	0,17	0,34
Napędy taśm	3	0,12	0,36
Celki	3	0,16	0,48
Wentylator mieszający	1	0,80	0,80
Wentylator zasilający	1	0,29	0,29
Wentylator wyciągowy	1	2,50	2,50



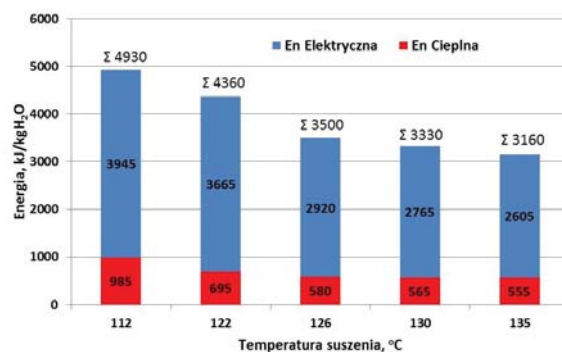
Rys. 17: Krzywe suszenia tj. ubytki wilgoci z węgla podczas suszenia



Rys. 18: Skuteczności suszenia w suszarni taśmowej w temperaturach 112°C, 122°C, 126°C, 130°C i 135°C

Z rysunków 17 i 18 wnioskować można, że czym wyższa temperatura suszenia, tym stopień wysuszenia węgla jest większy, różnice te jednak nie są tak znaczące, jak

w przypadku suszenia w suszarni fluidyzacyjnej. Większe znaczenie dla skuteczności suszenia ma natomiast czas suszenia. Czym dłuższy czas suszenia, tym osiągnięta końcowa wilgotność węgla jest niższa rys. 18. Na rysunku 19 zestawione zostały udziały



Rys. 19: Zapotrzebowanie na ciepło i energię elektryczną dla suszarni taśmowej

ciepła i energii elektrycznej dla suszarni taśmowej dla wszystkich temperatur, w jakich przeprowadzono testy suszenia. Na załączonym wykresie zauważyć można, że analogicznie do suszenia w suszarni fluidalnej, w każdym przypadku wydatek energetyczny maleje wraz ze wzrostem temperatury czynnika suszącego. Najniższy poziom zapotrzebowania na energię do suszenia uzyskano w temperaturze suszenia w 135°C. Odwrotnie natomiast niż w przypadku suszenia w suszarni fluidyzacyjnej, dla suszarni taśmowej znacznie większy udział energii potrzebnej do usunięcia wilgoci z węgla stanowi energia elektryczna. W każdym analizowanym przypadku udział energii elektrycznej do całkowitej wynosił powyżej 80%.

9. PODSUMOWANIE

Badania procesu suszenia w analizowanych zakresach temperatur na dwóch typach suszarni fluidyzacyjnej i taśmowej wykazały, że wraz ze wzrostem temperatury suszenia, maleje wydatek energetyczny potrzebny do wysuszenia węgla brunatnego. Różnicę jednak stanowi udział energii elektrycznej i ciepła potrzebnych do suszenia. Badania wykazały, że w przypadku suszarni fluidyzacyjnej główne zapotrzebowanie na energię do suszenia stanowi ciepło co wynika ze znaczących ilości ciepła niezbędnego do podgrzania dużej ilości czynnika fluidyzacyjnego. Udział energii elektrycznej kształtował się na poziomie 10–15%. Natomiast suszarnia taśmowa odznaczała się większym zapotrzebowaniem na energię elektryczną, której udział wynosił powyżej 80%. Różnice te wynikają z wymaganej ilości czynnika suszącego 1 kg węgla. Suszarnia fluidyzacyjna potrzebowała 55 m³ powietrza na kilogram węgla, suszarnia taśmowa tylko 0,3 m³ spalin na kilogram węgla. Suszarnia taśmowa w swojej konstrukcji ma również więcej części mechanicznych zestawionych w tabeli 1, co wpływa na wielkość energii elektrycznej. Energie potrzebne do wysuszenia węgla w suszarni fluidyzacyjnej w analizowanych temperaturach wynosiły pomiędzy 2500–3500 kJ/kg H₂O, a w suszarni taśmowej pomiędzy 3100–4900 kJ/kg H₂O. W najwyższych temperaturach suszenia dla obu suszarni uzyskano podobny ubytek wilgoci z węgla, tj. dla suszarni fluidyzacyjnej (60°C) uzyskano ubytek wynoszący 23,2%, dla suszarni taśmowej (135°C) ubytek

wilgoci wynoszący 21,8%, jednakże suszarnia fluidyzacyjna ze względu na technologie suszenia suszyła węgiel w czasie trzykrotnie krótszym.

PODZIĘKOWANIA

Przedstawione w artykule wyniki zostały uzyskane w ramach przeprowadzonych badań w projekcie: „Wstępne suszenie węgla brunatnego dla celów energetycznych”, nr projektu: POIG.01.03.01-00-040/0.8. Projekt jest współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego i budżetu Państwa.

LITERATURA

- [1] Pietryszczew W., *Górnictwo węgla brunatnego w Polsce w 2005 roku*, Węgiel Brunatny, nr 1(54), 7–12, 2006
- [2] Praca zbiorowa pod redakcją: Szufficki M., Małoń A., Tymiński M., *Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce wg stanu na 31 XII 20014 r.*, Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa 2015.
- [3] Strumiłło C., *Podstawy teorii i techniki suszenia*, WNT, Warszawa, 1983.
- [4] Plutecki Z., Ryszczyk K., Sattler P., Rosik R., Alenowicz J., Mrugała E., Zator S., Giesa K., Czerep M., Pawlak-Kruczek H., *Przygotowanie dokumentacji konstrukcyjnej prototypowej instalacji pilotowej*, Raport Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej, Ser. SPR, nr 43, 2015.
- [5] Czajka T., Piasecki A., Plutecki Z., Czerep M., Pawlak-Kruczek H., *Budowa instalacji pilotowej - opracowanie i wykonanie nadzoru konsultacji z wyłonionym w przetargu wykonawcą*, Raport Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej, Ser. SPR nr 44, 2015.
- [6] Pawlak-Kruczek H., Plutecki Z., Michalski M., *Brown coal drying in fluidized bed applying low-temperature gaseous medium*, *Drying Technology*, **32**(11), 1334–1342, 2014.
- [7] Czerep M., *Badania procesu suszenia w dwóch instalacjach suszących laboratoryjnych wraz z ich kolejnymi modyfikacjami, określenie efektywności suszenia i kinetyki dla danego sposobu w zależności od parametrów procesu i właściwości węgla*, Raport Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej, 2013, Ser. SPR nr 17.