

Na prawach rękopisu

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA
WYDZIAŁ MECHANICZNO-ENERGETYCZNY

„Suszenie węgla brunatnego w złożu fluidalnym
z wykorzystaniem niskotemperaturowego źródła ciepła”

mgr inż. Marcin Michalski

Słowa kluczowe:
węgiel brunatny, suszenie fluidalne, złożo
pęcherzykowe, złożo fontannowe

Praca doktorska

Promotor: dr hab. inż. Halina Pawlak-Kruczek, prof. PWr.

Wrocław 2015

Spis treści

1. WSTĘP.....	3
1.1 Uzasadnienie podjętego tematu	3
1.2 Teza pracy.....	4
1.3 Cel pracy.....	5
1.4 Przedmiot i zakres pracy.....	5
2. SUSZENIE WĘGLA BRUNATNEGO W ZŁOŻU FLUIDALNYM.....	6
2.1 Rodzaje złóż fluidalnych	6
2.2 Ciepło niskotemperaturowe do suszenia fluidalnego	7
2.3 Przegląd technologii fluidalnego suszenia węgla brunatnego	12
2.4 Suszarki fluidalne w blokach energetycznych.....	15
2.5 Wady i zalety suszarek fluidalnych węgla brunatnego	18
3. BADANIA WŁAŚCIWOŚCI WĘGLI PRZED I PO SUSZENIU ORAZ STRUKTURY PODCZAS PROCESU SUSZENIA	21
3.1 Wpływ formy występowania wody w węglu brunatnym na proces suszenia	23
3.2 Aparatura pomiarowa do określenia właściwości węgla brunatnych	26
3.3 Właściwości węgla brunatnych użytych w badaniach	31
4. SUSZENIE FLUIDALNE NISKOTEMPERATUROWE.....	55
4.1 Opis stanowiska eksperymentalnego - suszarka fluidalna pęcherzykowa	55
4.2 Opis stanowiska eksperymentalnego - suszarka fluidalna fontanna.....	60
4.3 Metodyka badawcza	65
4.4 Wyniki badań eksperymentalnych.....	68
4.4.1 Wpływ wielkości ziarna węgla na proces suszenia	69
4.4.2 Wpływ prędkości czynnika suszącego na proces suszenia.....	77
4.4.3 Wpływ początkowej temperatury węgla na proces suszenia.....	82
4.4.4 Wpływ temperatury czynnika suszącego na proces suszenia	90
4.4.5 Wpływ rodzaju złoża fluidalnego na proces suszenia	108
4.5 Analiza błędów pomiarowych	114
5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI	118
6. BIBLIOGRAFIA.....	123

Spis oznaczeń:

$W_{początkowe}$	- zawartość wilgoci w węglu przed suszeniem, %
$W_{koncowe}$	- zawartość wilgoci w węglu po suszeniu, %
$t_{początkowa}$	- temperatura otoczenia, °C
t_{proces}	- temperatura czynnika suszącego, °C
p_{proces}	- ciśnienie procesu, Pa
$m_{węgla}$	- strumień węgla mokrego, kg/s
C_{par}	- ciepło parowania wody, kJ/kg
C_{p_wody}	- ciepło właściwe wody, kJ/kg·K
$C_{p_węgla}$	- ciepło właściwe suchego węgla, kJ/kg·K
$Q_{węgla}$	- minimalne ciepło podgrzania węgla, kW
Q_{wody}	- minimalne ciepło odparowania wody, kW
$Q_{całkowite}$	- minimalne ciepło usunięcia wody z węgla, kW
C_{daf}	- zawartość pierwiastka węgla (stan suchy i bezpopiołowy), %
H_{daf}	- zawartość pierwiastka wodoru (stan suchy i bezpopiołowy), %
N_{daf}	- zawartość pierwiastka azotu (stan suchy i bezpopiołowy), %
S_{daf}	- zawartość pierwiastka siarki (stan suchy i bezpopiołowy), %
O_{daf}	- zawartość pierwiastka tlenu (stan suchy i bezpopiołowy), %
Q_{VDI}	- wartość opałowa - formuła VDI, kJ/kg
Q_{MEND}	- wartość opałowa - formuła Mendelejewa, kJ/kg
C_r	- zawartość pierwiastka węgla (stan roboczy), %
H_r	- zawartość pierwiastka wodoru (stan roboczy), %
N_r	- zawartość pierwiastka azotu (stan roboczy), %
S_r	- zawartość pierwiastka siarki (stan roboczy), %
O_r	- zawartość pierwiastka tlenu (stan roboczy), %
W_r	- zawartość wilgoci (stan roboczy), %
A_r	- zawartość części mineralnych (stan roboczy), %
X_{daf}	- współczynnik - przeliczenie składu paliwa na stan roboczy, -
X	- wilgotność bezwzględna powietrza, kg/m ³
φ	- wilgotność względna powietrza, %
p	- ciśnienie powietrza wilgotnego (w przybliżeniu atmosferyczne), Pa
p_{sat}	- ciśnienie nasycenia pary wodnej, Pa
ΔX	- przyrost wilgoci w powietrzu, %
V_{pow}	- strumień objętościowy powietrza, m ³ n/s
A	- przekrój poprzeczny kanału suszarki, m ²
v_{sr}	- prędkość średnia w kanale suszarki, m/s
V_{mas}	- strumień masowy, kg/s
$\rho(t)$	- gęstość powietrza w danej temperaturze, kg/m ³ n
w	- ilość usuniętej wilgoci z węgla, kg
Δt	- przyrost czasu w komorze suszenia, s
$m_{węgla_m}$	- masa węgla mokrego, kg
$E_{H_2O_ciep}$	- energia cieplna do odparowania 1 kg H ₂ O, kJ/ kgH ₂ O
C_{p_pow}	- ciepło właściwe powietrza, kJ/kg·K
$E_{H_2O_kinet}$	- energia elektryczna napędu wentylatora do odparowania 1 kg H ₂ O, kJ/ kgH ₂ O
Δ	- graniczny błąd bezwzględny pomiaru, -
a	- składnik addytywny błędu, -
m	- składnik multiplikatywny błędu, -
δ	- błąd względny pomiaru, %

1. WSTĘP

1.1 Uzasadnienie podjętego tematu

Zakłada się, że węgiel będzie odgrywać kluczową rolę w europejskim i światowym bilansie energetycznym, ponieważ jest tanim paliwem kopalnym o dużych zasobach. Zwłaszcza węgiel brunatny, który w wielu krajach europejskich, gwarantuje efektywne i ekonomiczne wytwarzanie energii w perspektywie najbliższych kilkudziesięciu lat [1]. Decyzja polityczna w kierunku dalszego zwiększania udziału energii odnawialnej w Unii Europejskiej, prowadzi do istotnych zmian w strukturze systemu energii elektrycznej w Europie. Potrzebne będą nowe inwestycje w infrastrukturę zdolną do zapewnienia stabilności sieci energetycznej. Elektrownie węglowe będą zmuszone do większej ich elastyczności, w tym obniżenia minimum technicznego, w wyniku zmian strukturalnych produkcji energii [2]. Jednocześnie elektrownie na węgiel brunatny muszą podjąć działania w kierunku minimalizacji ich oddziaływania na środowisko, poprzez wzrost wydajności netto (sprawności) i zmniejszenie emisji gazów spalinowych, w tym obniżenie emisji dwutlenku węgla.

Wstępne suszenie węgla brunatnego do spalania lub współspalania w kotłach istniejących i nowych elektrowniach jest uważane za kluczową technikę, do osiągnięcia wyżej wymienionych celów. Stąd też, w zależności od rodzaju węgla, konieczne jest opracowanie nowych technicznych koncepcji suszenia węgla brunatnego, w zastosowaniu do istniejących bloków jak i do nowych, w celu uzyskania większej ich elastyczności oraz sprawności [2]. Istotnym zagadnieniem dla istniejących bloków jest integracja układu suszenia w układ bloku energetycznego. W Polsce około 30% energii pochodzi z elektrowni opalanych węglem brunatnym [3]. Skala problemu poprawy sprawności bloków elektrowni opalanych węglem brunatnym jest ogromna, po pierwsze z powodu ilości produkowanej energii w Polsce i świecie. Po drugie z powodu ekonomii oraz dostępności źródeł węgla brunatnego tj. zasobów. Dodatkowym efektem opracowania skutecznych efektywnych technologii suszenia węgla brunatnego, może być zastosowanie wysuszonego węgla w innych sektorach przemysłu, w tym również w różnego rodzaju piecach [1].

Chociaż dotychczas opracowano kilka technologii suszenia węgla brunatnego, to tylko kilka z nich testowano w skali pół-przemysłowej, a nieliczne udało się zrealizować w skali przemysłowej. Jednakże, niemal wszystkie proponowane technologie wymagają skomplikowanych układów i części ciśnieniowych oraz zastosowania specjalnych stali na wymienniki ciepła. W rezultacie większość opracowanych technologii suszenia można

zastosować tylko w nowych blokach, w których oczekuje się dużego wzrostu sprawności, aby skompensować wysokie koszty inwestycyjne. Natomiast polska energetyka węglowa posiada większość starych bloków w wieku przekraczającym 10 lat [4].

Problem spalania wstępnie suszonego węgla w układzie bloku wpisuje się w działania w skali świata redukujące emisję dwutlenku węgla. Zastosowanie suszenia węgla w układzie bloku poprawia jego sprawność. Obecnie przed podaniem do młyna węgiel jest suszony wstępnie za pomocą spalin w rurosuszarce. Skuteczność suszenia w rurosuszarce jest niska. Według różnych badaczy i badań własnych wstępne zintegrowane suszenie węgla brunatnego umożliwia wzrost sprawności bloku i kotła o 3-5%, spadek emisji NO_x , CO_2 , SO_2 i Hg, oraz zmniejszenie: strumienia wody w chłodni kominowej, potrzeb własnych elektrowni, erozji przewodów spalin. Ponadto temperatura spalin za kotłem jest niższa, mniejszy jest strumień spalin i moc wentylatorów spalin, zwiększa się sprawność odpylania ze względu na mniejszą prędkość spalin, przez co nowobudowane bloki mogą być mniejsze. Zastosowanie wyników badań nad suszeniem węgla brunatnego może zmniejszyć negatywny wpływ na środowisko poprzez zmniejszenie emisji zanieczyszczeń w wyniku zmniejszenia zużycia węgla o około 500 - 950 tys. ton rocznie. Suszony węgiel może być dodatkowo użyty do rozpalania kotła w miejsce mazutu. Technologie przeróbki ropy naftowej zmierzają do coraz lepszego jej wykorzystania, stąd będzie się zmniejszała ilość dostępnego mazutu do rozpalania kotła [1, 5].

Tanie, niezawodne i konkurencyjne koncepcje wstępnego suszenia, które mogą być instalowane w istniejących elektrowniach węgla brunatnego i mogą być używane jako opcja wyposażenia bloku w kierunku zwiększenia jego elastyczności i zmniejszenia emisji, nie są dostępne na rynku międzynarodowym. Nowa innowacyjna metoda suszenia węgla w złożu fluidalnym wykorzystująca ciepło odpadowe jest niezbędna elektrowniom opalanym węglem brunatnym.

1.2 Teza pracy

Wysoką efektywność suszenia węgla brunatnych można uzyskać stosując niskotemperaturowe źródło ciepła w suszarce ze złożem fluidalnym przy względnie niskim zużyciu energii, co poprawia sprawność produkcji energii i zmniejszenie emisji gazowej w tym dwutlenku węgla.

1.3 Cel pracy

Celem pracy jest przeprowadzenie badań nad wyznaczeniem kinetyki suszenia węgla brunatnego bełchatowskiego i turoszowskiego w złożu fluidalnym niskotemperaturowym oraz zużycia energii cieplnej i elektrycznej na pracę złoża fluidalnego w zależności od rodzaju złoża (pęcherzykowe i fontannowe), temperatury czynnika suszącego, czasu przebywania w komorze suszenia, rozmiaru ziaren suszonego węgla, temperatury początkowej węgla i prędkości czynnika suszącego. Analiza wyników pod względem doboru optymalnych parametrów suszenia ze względu na zużycie energii dla określonej wilgoci końcowej węgla.

1.4 Przedmiot i zakres pracy

Przedmiotem pracy są zagadnienia techniczne i procesowe związane z suszeniem fluidalnym węgla brunatnego pod kątem zastosowania w blokach energetycznych. Przegląd reaktorów ze złożem fluidalnym - analiza i porównanie ich właściwości pod kątem zastosowania do suszenia węgla brunatnego. Ponadto przegląd istniejących instalacji suszenia fluidalnego węgla brunatnych.

W pracy wykonano analizę właściwości węgla brunatnych użytych do badań oraz badania suszenia dla różnych konfiguracji suszarek ze względu na rodzaj złoża fluidalnego (pęcherzykowe i fontannowe). W rezultacie badań określono wpływ czasu suszenia, rozmiaru i temperatury początkowej ziaren suszonego węgla, temperatury i prędkości czynnika suszącego oraz zawartości wilgoci w węglu na proces suszenia fluidalnego w laboratoryjnych stanowiskach suszenia fluidalnego. W oparciu o badania eksperymentalne przeprowadzono analizę parametrów suszenia pod kątem oceny ich wpływu na kinetykę suszenia i zużycie energii potrzebnej na odparowanie jednego kilograma wody z węgla.

2. SUSZENIE WĘGLA BRUNATNEGO W ZŁOŻU FLUIDALNYM

Fluidyzacja jest procesem dwufazowym polegającym na powstawaniu dynamicznej zawiesiny (tzw. złoża fluidalnego) drobnych cząsteczek ciała stałego w strumieniu gazu lub cieczy. Cząstki w fazie fluidalnej są w stałym ruchu, przemieszczając się po całej objętości komory powodując zachowanie się warstwy porównywalne do wrzącej cieczy. Warstwa fluidalna zachowuje się jak ciecz ze względu na brak sztywności postaciowej oraz ze względu na obecność ciśnienia hydrostatycznego i lepkości [6, 7]. Zaletami złoża fluidalnego w porównaniu ze złożem stałym są:

- szybkie wyrównywanie temperatury w złożu,
- intensywne wymiana ciepła i masy między czynnikiem gazowym, a cząstkami stałymi, a złożem fluidalnym,
- duże współczynniki wymiany ciepła i masy,
- duża powierzchnia czynna złoża,
- duża powierzchnia kontaktu między cząstkami stałymi, a czynnikiem gazowym,
- dobre wymieszanie materiału sypkiego z czynnikiem gazowym.

Do wad procesu fluidyzacji zalicza się:

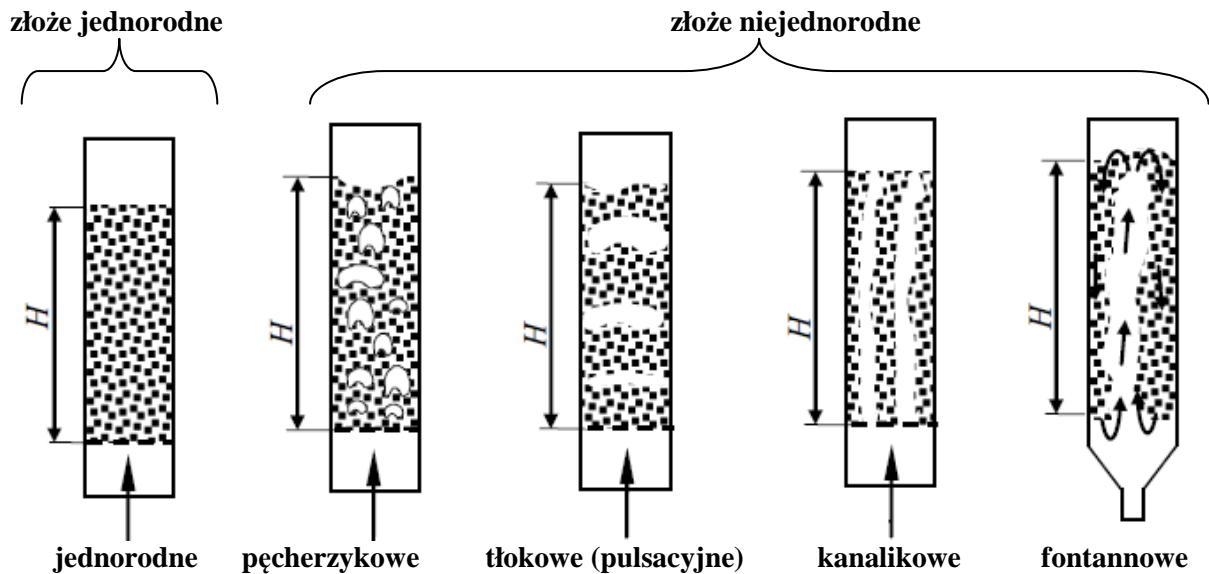
- mniejsze niż w przypadku złoża nieruchomego stężenie ciała stałego,
- niejednorodność fluidalnego złoża gazowego wskutek powstawania i ruchu pęcherzy,
- ścieranie powierzchni cząstek,
- erozyjne działanie na powierzchnie ścian i ciał zanurzonych w złożu,
- aglomeracja cząstek w wysokich temperaturach,
- powstawanie pyłu [8, 9].

Zjawisko fluidyzacji ma wiele zastosowań, jednym z nich jest suszenie materiałów o małej ziarnistości ze względu na dużą prędkość czynnika suszącego, dobre mieszanie ziaren, a przez to intensywną wymianę ciepła i odparowanie wilgoci zawartej w surowcu [6].

2.1 Rodzaje złoż fluidalnych

Złoża fluidalne dzieli się na jednorodne i niejednorodne. Złoże jednorodne charakteryzuje się jednakową gęstością we wszystkich punktach. Takim warunkom odpowiadają wszystkie złoża cieczowe, a ze złoż gazowych tylko złoża o małej prędkości przepływu gazu. Złoża niejednorodne charakteryzują się zmienną gęstością w różnych

miejskach. Do złóż niejednorodnych należą złoża pęcherzykowe, tłokowe, kanalikowe i fontannowe [10, 11].



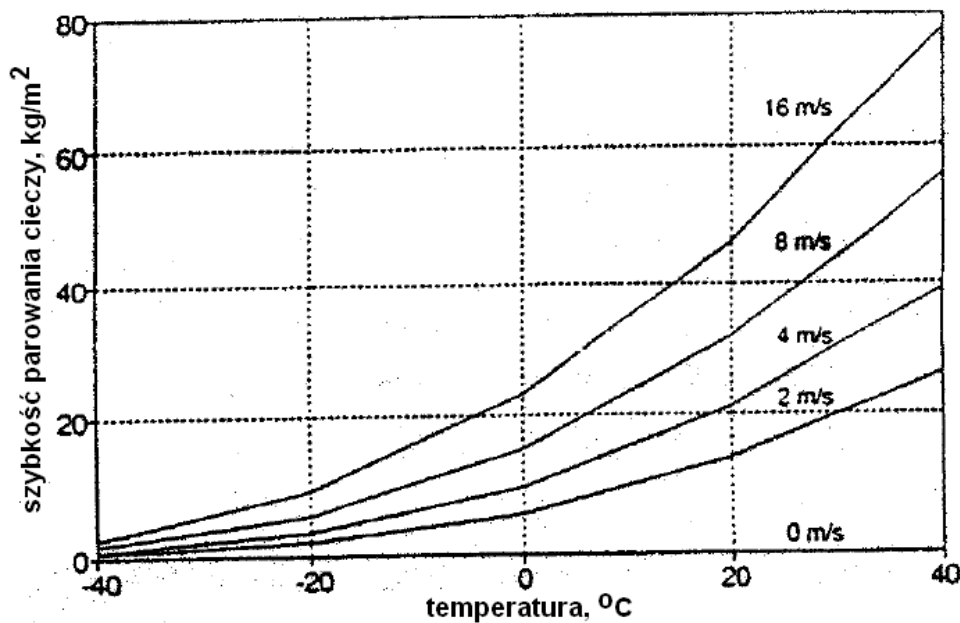
Rysunek 1. Rodzaje złóż fluidalnych (H - wysokość złoża) [7, 10]

Złoże pęcherzykowe charakteryzuje się przepływem gazu w postaci pęcherzy, co powoduje znaczne zróżnicowanie struktury złoża. Złoże tłokowe (nazywane również złożem pulsującym) charakteryzuje się wzrostem pęcherzy do rozmiarów równych średnicy kolumny, wskutek czego tworzą się warstwy gazu. Warstwy cząstek znajdujące się między nimi poruszają się ku górze podobnie jak tłoki. Pulsowanie występuje w kolumnach wysokich, o małej średnicy oraz w przypadku dużych cząstek [12]. Złoże kanalikowe charakteryzuje się obecnością pionowych kanałów, przez które przepływa znaczna część gazu, nie wprawiając w ruch wszystkich cząstek. Kanalikowanie występuje podczas fluidyzacji cząstek o bardzo małych rozmiarach. Złoże fontannowe charakteryzuje się wynoszonymi do góry cząstkami w obszarze dużej prędkości w rdzeniu kolumny, a opadającymi w obszarze małej prędkości w pobliżu ścian. W ten sposób złoże podlega tzw. cyrkulacji całkowitej. Profil prędkości w poprzecznym przekroju kolumny jest bardzo nierównomierny. Złoża fontannowe znajdują zastosowanie głównie przy fluidyzacji grubych frakcji fazy stałej [6, 13].

2.2 Ciepło niskotemperaturowe do suszenia fluidalnego

Czynniki wpływające na proces suszenia fluidalnego to: temperatura, prędkość czynnika suszącego, zawartość wilgoci w czynniku suszącym oraz ciśnienie w komorze suszenia. Wzrost temperatury i prędkości czynnika suszącego wzmacnia odparowanie wilgoci,

natomiast zawartość wilgoci w powietrzu i wysokie ciśnienie osłabiają je. Wpływ prędkości powietrza na ubytek wilgoci powierzchniowej przedstawiono na rysunku 2 [14].



Rysunek 2. Zależność szybkości parowania cieczy (wody) od temperatury i prędkości czynnika suszącego (powietrza) [14]

Stosując do suszenia powietrze wprowadzone w ruch znacznie poprawia się skuteczność odparowania wody i to nawet przy niskich temperaturach. Zależność tą wykorzystuje się przy suszeniu węgla brunatnych, gdzie zapotrzebowanie na energię cieplną zostaje obniżone na skutek dostarczenia energii kinetycznej w złożu fluidalnym [14].

W suszarni fluidalnej węgla brunatnego jako źródło ciepła niskotemperaturowego może być wykorzystana energia słoneczna przetwarzana w kolektorach słonecznych. Wówczas suszenie odbywa się w sezonie letnim, kiedy uzyskiwana jest największa moc cieplna kolektorów słonecznych. W ten sposób węgiel przygotowuje się do spalania w kotłach grzewczych w ciepłowniach lub dla odbiorców indywidualnych w sezonie zimowym. Natomiast stosując suszenie fluidalne niskotemperaturowe w elektrowniach, ciepłowniach lub elektrociepłowniach jako źródło ciepła niskotemperaturowego można wykorzystać ciepło odpadowe, które jest tracone podczas procesu powstawania energii elektrycznej lub/i cieplnej. W tabeli 28 przedstawiono źródła ciepła odpadowego wraz z temperaturami i mocami dla bloku w Turowie o mocy 235 MWe na węgiel brunatny spalany w kotle fluidalnym typu CFB-672 [15].

Tabela 1. Źródła ciepła odpadowego [16]:

źródło ciepła odpadowego	moc cieplna dla jednego bloku	maksymalna temperatura	minimalna temperatura
jednostka	MW	°C	°C
chłodnia kominowa	175,50	29	22
gazy odlotowe	7,00	120	55
woda odparowana	2,60	90	55
popioły lotne (za elektrofiltrem)	0,52	80	55
popioły denne	0,70	550	55
popioły denne	0,21	200	55

W celu porównania mocy cieplnej odpadowej do wykorzystania w suszarce dokonano obliczenia minimalnego zapotrzebowania na moc cieplną dla suszarki przygotowującej paliwo dla kotła CFB-672. Przyjęto strumień węgla o wartości 57 kg/s i zawartości wilgoci początkowej na poziomie 43%. Celem suszarki jest obniżenie zawartości wilgoci w paliwie do poziomu 20%. Założenia do obliczeń przedstawiono w tabeli 2 [17].

Tabela 2. Przyjęte dane do obliczeń zapotrzebowania na moc cieplną [17]:

parametr	symbol	jednostka	wartość
zawartość wilgoci przed suszeniem	$W_{poczatkowe}$	%	43
zawartość wilgoci po suszeniu	$W_{koncowe}$	%	20
temperatura otoczenia	$t_{poczatkowa}$	°C	10
temperatura czynnika suszącego	t_{proces}	°C	70
ciśnienie procesu	p_{proces}	MPa	0,1
strumień mokrego węgla	m_{wegla}	kg/s	57
ciepło parowania wody	C_{par}	kJ/kg	tablice*
ciepło właściwe wody	C_{p_wody}	kJ/kg·K	4,19
ciepło właściwe suchego węgla	C_{p_wegla}	kJ/kg·K	1,20

* wartość ciepła parowania wody należy odczytać z tablic ponieważ zależy od temperatury i ciśnienia

Potrzebna moc cieplna do wysuszenia węgla brunatnego składa się z dwóch elementów. Pierwszym jest podniesienie temperatury węgla do temperatury panującej w złożu natomiast drugim energia potrzebna na zmianę fazy ciekłej na gazową - z wody na parę wodną. Część mocy cieplnej traconej na podniesienie temperatury mokrego węgla do temperatury czynnika suszącego, przedstawia poniższy wzór [17]:

$$Q_{wegla} = m_{wegla} \cdot C_{wegla_mokrego} \cdot (t_{proces} - t_{poczatkowa}), \text{ kW} \quad (1)$$

Ciepło właściwe węgla mokrego określa się jako stosunek ciepła właściwego suchego węgla brunatnego oraz ciepła właściwego wody w zależności od procentowego udziału wody w węglu [18]:

$$C_{wegla_mokrego} = C_{p_wody} \cdot W_{poczatkowe} + C_{p_wegla} \cdot (1 - W_{poczatkowe}), \text{ kJ/kg}\cdot\text{K} \quad (2)$$

Moc cieplna potrzebna do zmiany fazy można wyliczyć używając wartości ciepła parowania wody dla danych parametrów temperatury i ciśnienia (równanie 3) lub różnicy między entalpią nasycenia pary wodnej, a entalpią wody dla parametrów suszenia (równanie 4) [18]:

$$Q_{wody} = m_{wegla} \cdot C_{par} \cdot (W_{poczatkowe} - W_{koncowe}), \text{ kW} \quad (3)$$

lub

$$Q_{wody} = m_{wegla} \cdot (W_{poczatkowe} - W_{koncowe}) \cdot (h_{2Sat}(t_{Sat}(p_{proces})) - h_{tp}(t_{proces}, p_{proces})), \text{ kW} \quad (4)$$

Całkowita ilość ciepła niezbędnego do wysuszenia węgla brunatnego o 23% jest sumą powyższych mocy [18]:

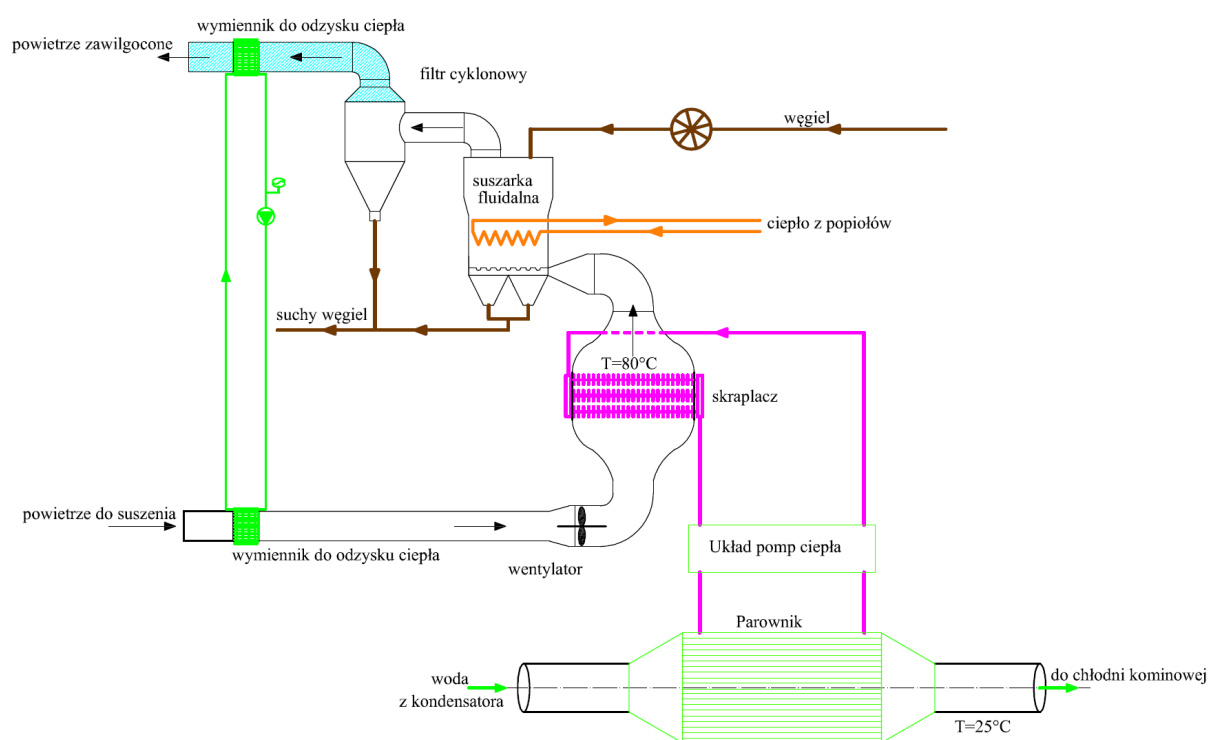
$$Q_{calkowite} = Q_{wody} + Q_{wegla}, \text{ kW} \quad (5)$$

Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli nr 3.

Tabela 3. Wyniki zapotrzebowania na moc cieplną:

parametr	symbol	wartość, MW
minimalne ciepło podgrzania węgla	Q_{wegla}	8,5
minimalne ciepło odparowania wody	Q_{wody}	34,5
minimalne ciepło całkowite	$Q_{calkowite}$	43,0

Przy założeniu wysuszenia węgla do wartości 20% zawartości wilgoci minimalne zapotrzebowanie na moc cieplną wynosi 43,0 MW. Porównując tę wartość ze źródłami ciepła odpadowego z tabeli nr 1, najlepszym rozwiązaniem jest użycie ciepła z chłodni kominowej, jednakże charakteryzuje się ono niską temperaturą nie przekraczającą 30°C. W celu uzyskania wyższej temperatury można zastosować układ pomocniczy z pompą ciepła (sprężarką lub absorpcyjną). Poniżej przedstawiono propozycję wykorzystania ciepła odpadowego w bloku energetycznym. Głównym źródłem ciepła jest woda chłodząca (np. w elektrowni Turów o średniej rocznej temperaturze 25°C), która za pośrednictwem pompy ciepła podnosi temperaturę czynnika roboczego, własnego obiegu do ok. 100÷120°C przez co możliwe jest następnie podgrzanie powietrza suszącego do temperatury ok. 70°C. Schemat proponowanego rozwiązania pokazano na rysunku 3 [19].



Rysunek 3. Schemat suszenia fluidalnego węgla brunatnego z pompą ciepła [19]

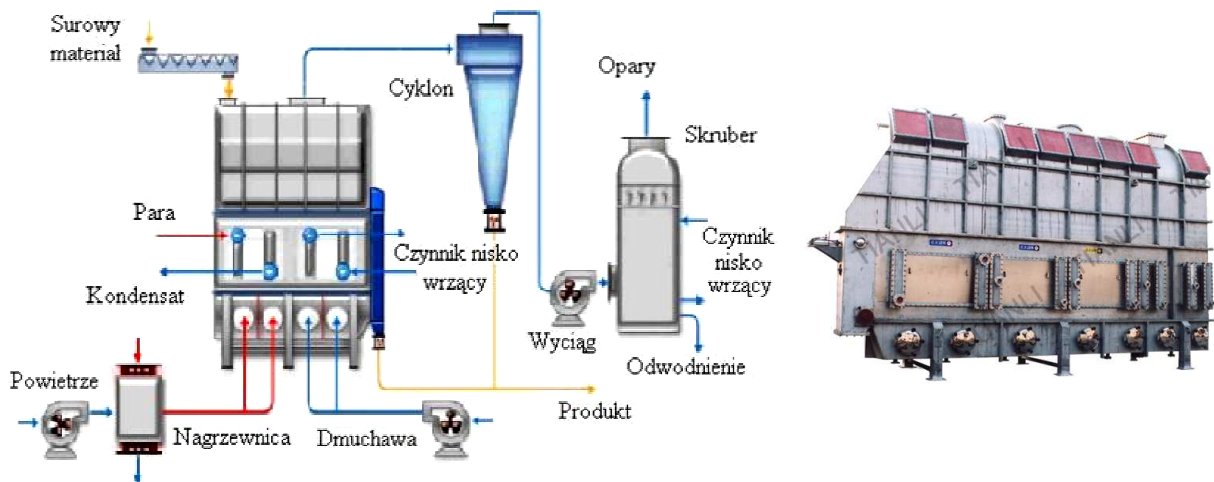
Układ składa się z obiegu pompy ciepła, instalacji węgla suszonego, instalacji powietrza do suszenia węgla, instalacji do odzysku ciepła z cieczą pośredniczącą oraz instalacji wody chłodzącej w obiegu siłowni (fragment na drodze od kondensatora do chłodni kominowej). Wymiennik przeponowy stanowiący parownik pompy ciepła omywany jest strumieniem wody z obiegu chłodzącego siłowni, natomiast skraplacz (wymiennik z rur ożebrowanych) umieszczono bezpośrednio w strumieniu podgrzewanego powietrza kierowanego do suszarki. Węgiel brunatny po rozdrobnieniu kierowany jest do suszarki

fluidalnej, gdzie poprzez kontakt z gorącym powietrzem, osusza się. Dodatkowo można wykorzystać do suszenia ciepło odpadowe pochodzące z popiołów usuwanych z kotła. Wówczas powietrze do suszenia pobierane jest z otoczenia i w wymienniku z cieczą pośredniczącą wstępnie ogrzewane ciepłem z powietrza zawilgoconego usuwanego z suszarki. Następnie powietrze suszące omywa skraplacz pompy ciepła i ogrzewa się do wymaganej temperatury suszenia. Potem kierowane jest do suszarki fluidalnej, gdzie pobiera wilgoć zawartą w węglu. Następnie poprzez filtr cyklonowy i wymiennik do odzysku ciepła, zawilgocone powietrze usuwane jest na zewnątrz [19].

2.3 Przegląd technologii fluidalnego suszenia węgla brunatnego

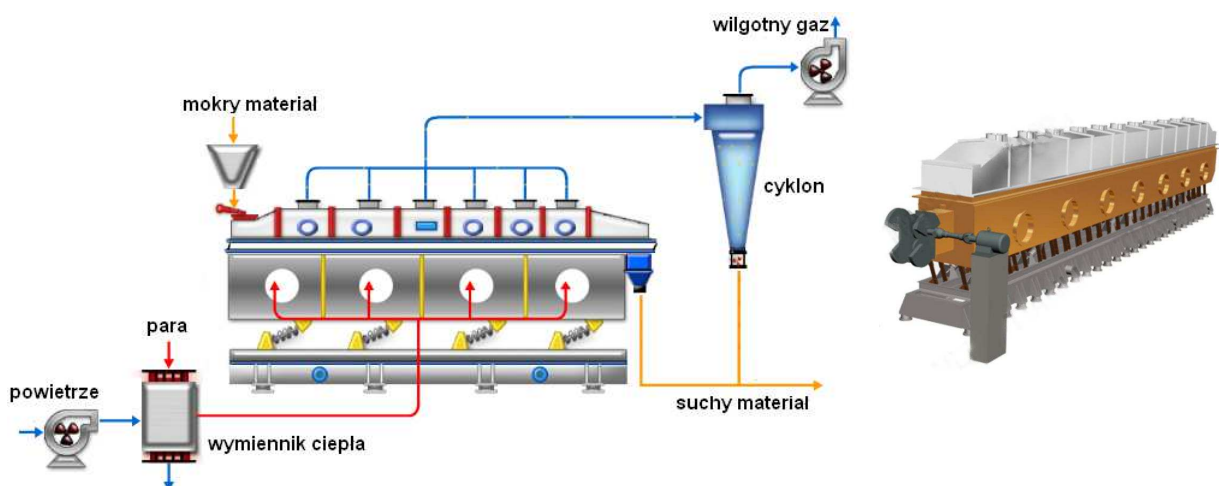
Suszenie fluidyzacyjne jest szeroko rozpowszechnione głównie w przemyśle spożywczym i chemicznym ze względu na intensywną wymianę ciepła oraz możliwość stosowania gazów inercyjnych. Urządzenia oprócz procesu fluidyzacji często wykorzystują dodatkowe metody suszenia w celu podniesienia skuteczności suszenia np. dodatkowe wymienniki ciepła umieszczone w złożu lub układy wibracyjne. Porównania suszarek dokonuje się ze względu na parametry pracy: czas przebywania materiału w komorze suszenia, stopień wysuszenia oraz wskaźnik zużycia energii na odparowanie jednego kilograma wody. Poniżej przedstawiono rozwiązania komercyjne suszarek fluidalnych, które mogą służyć do suszenia węgla brunatnego [4, 20].

Suszarka fluidalna z wymiennikiem ciepła w złożu przedstawiona na rysunku 4, zbudowana jest z komory fluidyzacyjnej, przenośnika śrubowego, cyklonu separacyjnego, nagrzewnicy powietrza i wykraplacza. Podgrzany gaz przechodzi do warstwy materiału z odpowiednio kontrolowanym profilem prędkości, aby wywołać zjawisko fluidyzacji. Gorące medium jest użyte głównie do zapewnienia fluidyzacji, dodatkowo wymiennik ciepła zwielokrotnia wymianę ciepła, co poprawia sprawność i wydajność suszenia. Stosując wiele wymienników z różnymi płynami można kontrolować wszystkie parametry produktu końcowego. Ze względu na wybuchowość pyłów w ostatnim stopniu suszarki zainstalowany jest układ chłodzący, obniżający temperaturę wysuszonego surowca. Na rynku dostępne są urządzenia o wydajności odparowania wody na poziomie od 200 do 4000 kg/h przy zastosowaniu powietrza suszącego o temperaturze 100-350°C i minimalnym zużyciu energii potrzebnej na utrzymanie złoża fluidalnego 700-1200 kJ/kgH₂O oraz zużyciu minimalnej energii cieplnej na poziomie 3300-4500 kJ/kgH₂O. Całkowite minimalne zużycie energii wynosi 4000 kJ/kgH₂O [20, 21].



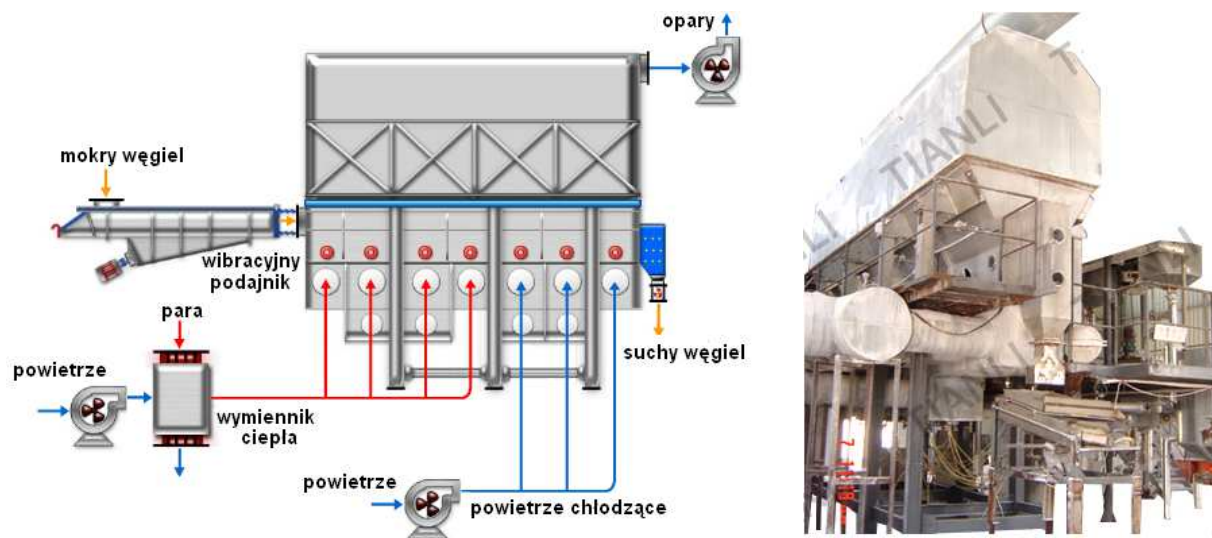
Rysunek 4. Schemat i zdjęcie suszarki fluidalnej z wymiennikiem ciepła w złożu [21]

Innym przykładem jest suszarka wibracyjno-fluidyzująca przedstawiona na rysunku 5. Urządzenie to jest połączeniem suszarki fluidalnej z instalacją wibrującą. Silnik elektryczny napędza przekładnie, które synchronicznie wzbudzają dno komory. Cząstki suszone są wyrzucane pod działaniem siły wzbudzenia. Jednocześnie, gorące powietrze podawane przez dno, przenika przez warstwę suszonego materiału mając pełny kontakt z powietrzem. Na rynku dostępne są urządzenia o wydajności odparowania wody na poziomie od 300 do 1000 kg/h przy zastosowaniu powietrza suszącego o temperaturze 100-300°C i minimalnym zużyciu energii potrzebnej na utrzymanie wibracji 80-90 kJ/kgH₂O oraz na utrzymanie złoża fluidalnego 520-800 kJ/kgH₂O oraz zużyciu minimalnej energii cieplnej na poziomie 2900-3100 kJ/kgH₂O. Całkowite minimalne zużycie energii wynosi 3500 kJ/kgH₂O [5, 22].



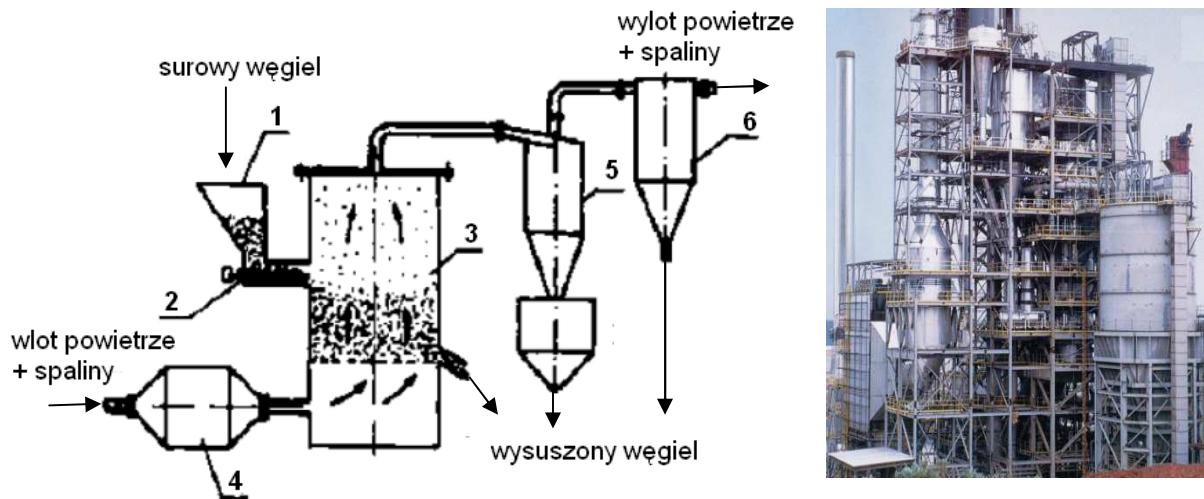
Rysunek 5. Schemat i model suszarki wibracyjno fluidyzującej [22]

Kolejny rodzaj suszarki to suszarka fluidalna rozpylająca (rysunek 6), w której zamiast bezpośrednio podawania węgla do komory, stosowane są specjalne młyny i rozdrabniacze, a zmielony węgiel doprowadzany jest do komory za pomocą dysz rozpylających. Materiał opada na złożo fluidalne jednocześnie chłodząc opary z suszarki. Na rynku dostępne są urządzenia o wydajności odparowania wody na poziomie od 30 do 1200 kg/h przy zastosowaniu powietrza suszącego o temperaturze 100-350°C i minimalnym zużyciu energii elektrycznej 700-900 kJ/kgH₂O oraz zużyciu minimalnej energii cieplnej na poziomie 6000-6100 kJ/kgH₂O. Całkowite minimalne zużycie energii wynosi 6700 kJ/kgH₂O. Ze względu na duże zużycie energetyczne oraz rozdrobnienie węgla do wielkości ziaren nie przekraczających 1mm technologia ta ma jedynie praktyczne zastosowanie przy spalaniu gotowego produktu w kotłach pyłowych [5, 22].



Rysunek 6. Schemat i zdjęcie suszarki fluidalnej rozpylającej[22]

Inny przykład to suszarki fluidalne typu Fluo-Solids (rysunek 7), gdzie surowy węgiel brunatny podawany jest z zasobnika przez podajnik ślimakowy do komory suszącej. Czynnikiem suszącym są gorące spaliny mieszane z powietrzem w komorze czynnika suszącego w celu sterowania temperaturą na wlocie do komory fluidyzacyjnej. Medium gorące przepływa przez dystrybutor prędkości i dysze znajdujące się na dnie i komorę fluidyzacyjną. Aby oczyścić strumień powietrza z porwanych cząstek węgla przepływa on przez cyklon i filtr. Suchy węgiel jest zbierany z trzech otworów wylotowych, co pozwala na otrzymanie zróżnicowanych średnic ziaren. Zużycie energii w tym procesie wynosi od 3100 do 4000 kJ/kgH₂O [23].



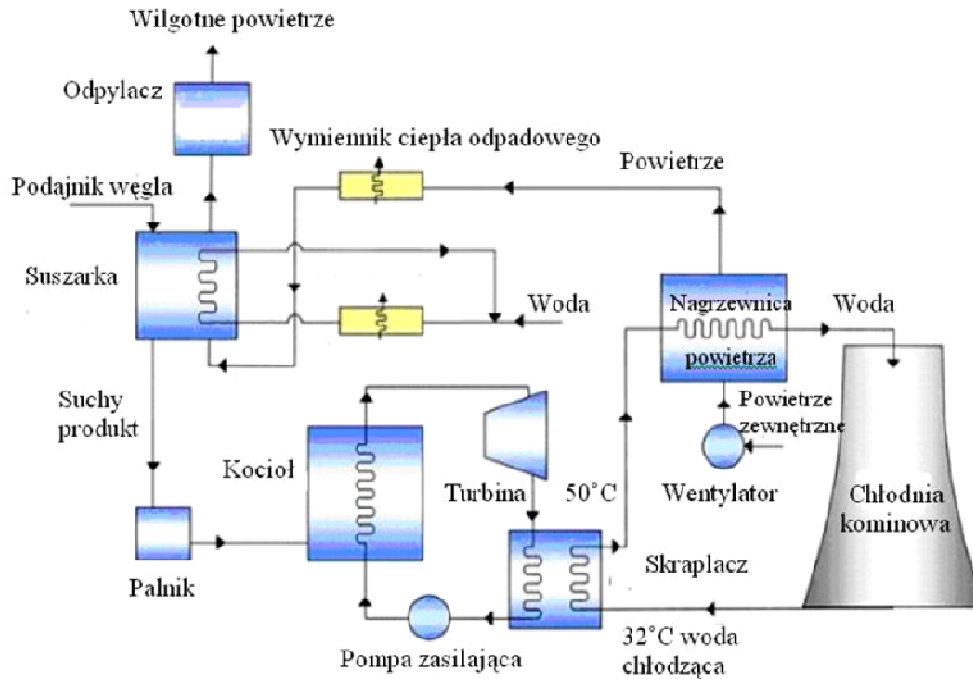
Rysunek 7. Schemat i zdjęcie suszarki fluidalnej typu Fluo-Solids [23]

(1-zasobnik węgla, 2-podajnik ślimakowy, 3-komora fluidyzacyjna, 4-komora czynnika suszącego, 5-cyklon, 6-filtr)

2.4 Suszarki fluidalne w blokach energetycznych

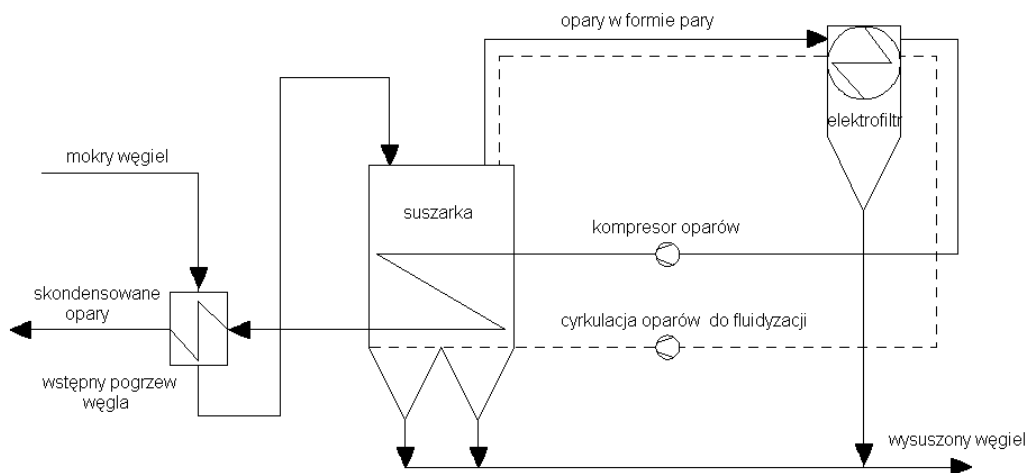
Węgiel brunatny głównie stosowany jest w elektrowniach i elektrociepłowniach budowanych obok kopalni odkrywkowych. Duża zawartość wilgoci nie pozwala na efektywne spalanie tego surowca, a obecne technologie suszenia pochłaniają duże ilości energii. Dlatego trwają badania nad zastosowaniem suszarek fluidalnych w blokach energetycznych. Na świecie liderami w stosowaniu tego typu rozwiązań są Niemcy i Stany Zjednoczone, które od kilku lat wykorzystują instalacje pilotażowe w swoich elektrowniach. Poniżej zostały opisane wykorzystywane technologie [20].

Suszarka fluidalna z powietrzem jako czynnikiem suszącym pracuje w elektrowni Coal Creek Station (USA- Północna Dakota). Instalacja próbna została uruchomiona w 2003 roku o przepustowości 2 Mg/h i o redukcji wilgoci o 6%, z 37,5% na 31,5%. Ponieważ przeprowadzone testy przebiegły pomyślnie, w 2006 roku firma Great River Energy uruchomiła kolejną pilotażową instalację, tym razem o przepustowości 112 Mg/h i redukcji wilgoci o 8,5%, z 38,0% do 29,5%. Technologia działa na zasadzie złoża fluidalnego wykorzystując niskotemperaturowe ciepło odpadowe zgromadzone w wodzie chłodzącej podgrzanej przez dodatkowe wymienniki ciepła do temperatury ok. 40-50°C. Natomiast w komorze suszącej znajduje się dodatkowy wymiennik ciepła bezpośrednio dogrzewający warstwę fluidalną. Schemat instalacji przedstawiono na rysunku 8 [24].



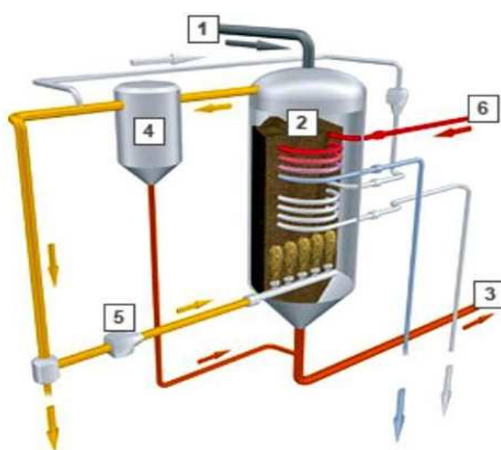
Rysunek 8. Schemat ideowy bloku energetycznego z instalacją suszenia węgla w Coal Creek Station [24]

W Niemczech koncern RWE Power AG zastosował technologię suszenia fluidalnego w elektrowni Niederaussem z wykorzystaniem oparów pary wodnej o nazwie WTA (Wirbelschicht Trocknung Anlage). Metoda charakteryzuje się odparowaniem wody z węgla brunatnego przy temperaturze 110°C pod niewielkim nadciśnieniem. Do suszenia stosuje się złożo fluidyzujące z zanurzonym w warstwie węgla rurowym wymiennikiem ciepła wypełnionym oparami z suszarki. Jako dodatkowe źródło ciepła stosuje się również parę przegrzaną. Czas przebywania węgla brunatnego w komorze fluidalnej wynosi od 60 do 90 minut. Schemat instalacji przedstawia rysunek 9. Wychodzące opary porywają suszony pył węglowy, który jest zatrzymywany przez filtr. Pył ten jest podawany do kotła. Natomiast większa część oparów po sprężeniu przez układ wentylatorów podawana jest z powrotem do komory suszenia, w celu odzysku ciepła. Ustawione dysze w suszarce nadają ruch wirowy suszonej warstwie węgla brunatnego. Instalacja WTA o przepustowości 210 Mg/h surowego węgla brunatnego pracuje przy bloku 1000 MW. Produktem końcowym jest podsuszony węgiel w ilości 110 Mg/h przy redukcji wilgoci o 47% z 55% do 8% [24, 25].



Rysunek 9. Schemat instalacji WTA (Wirbelschicht Trocknung Anlage) [20]

W Niemczech stosowana jest również technologia suszenia fluidalnego przegrzaną parą wodną pod wysokim ciśnieniem jako czynnikiem suszącym o nazwie DDWT (Druckaufgeladenen Dampf Wirbelschicht Trocknung) opatentowana przez ośrodek naukowy BTU (Brandenburgische Technische Universität). Obiekt w skali pilotażowej pracuje w Cottbus w obrębie parku technologicznego Schwarze Pumpe. Na rysunku 10 przedstawiono koncepcję pracy suszarki. Urządzenie przygotowuje paliwo do instalacji spalania tlenowego, dlatego wymagana jest niska zawartość wilgoci w paliwie. Do podtrzymywania złoża fluidalnego w suszarce wykorzystywane są powstałe opary z procesu suszenia. W metodzie DDWT następuje redukcja wilgoci o 38% z wilgoci początkowej węgla na poziomie 57%, produktem końcowym jest węgiel brunatny o zawartości wilgoci równej 19% [26].



Rysunek 10. Schemat suszarki DDWT

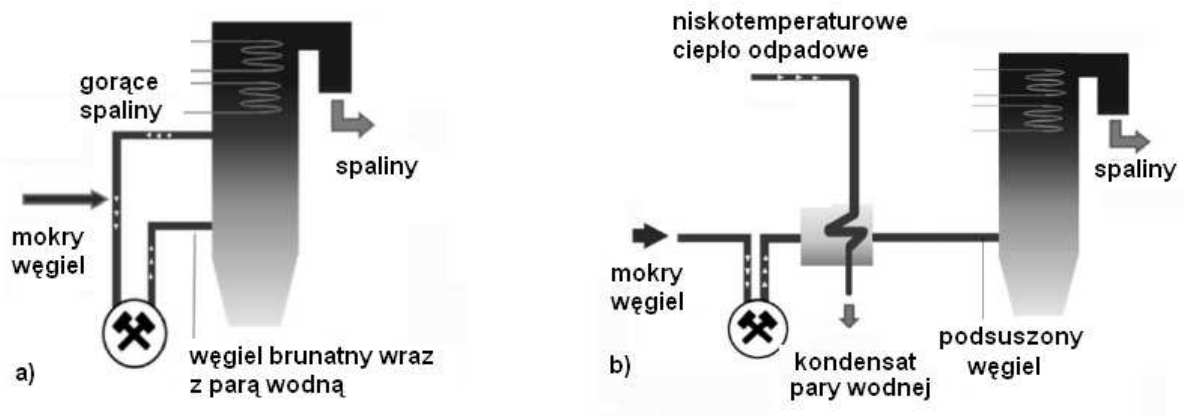
(1-zasyp węgla, 2-suszarka, 3-odbiór węgla suchego, 4- filtr oparów, 5-wentylator, 6-zasilanie parą przegrzaną) [26]

2.5 Wady i zalety suszarek fluidalnych węgla brunatnego

Suszenie fluidalne charakteryzuje się wymianą wilgoci na drodze konwekcji i wymiany masy. Czynniki suszące pod wpływem dużych prędkości omywa wszystkie ziarna węgla przez co dochodzi do odparowania wilgoci z całej powierzchni ziarna. Niektóre rozwiązania suszarek posiadają segregację ziaren w zależności od ich rozmiaru. Kolejną zaletą jest możliwość skutecznego suszenia już przy niskich temperaturach nie przekraczających 100°C. Przy obecnych na rynku rozwiązaniach zużycie energetyczne suszarek fluidalnych jest rzędu 3500-4000 kJ/kgH₂O, gdzie ok. 80% stanowi energia cieplna. Przy zastosowaniu odpadowych źródeł energii lub energii z kolektorów słonecznych, których temperatura nie jest wysoka, suszenie fluidalne staje się jedną z najbardziej opłacalnych metod [27, 28].

Do wad suszarek fluidalnych należy zaliczyć duże gabaryty, możliwość suszenia węgla tylko o małej ziarnistości oraz generowanie pyłu. Dlatego na wylocie z suszarki należy użyć dodatkowych urządzeń typu cyklony i filtry, a w przypadku stosowania temperatur powyżej 100°C należy stosować chłodzenie suszonego węgla przed odbiorem z suszarki ze względu na wybuchowość pyłu. W trakcie eksploatacji dochodzi do ścierania powierzchni wewnętrznych komory fluidyzującej, przez co muszą być zastosowane specjalne, a więc kosztowne materiały [28].

Zastosowanie suszarki fluidalnej zintegrowanej z blokiem energetycznym daje w wiele dodatkowych zalet związanych ze spalaniem podsuszonego surowca. W klasycznych układach suszenie węgla brunatnego odbywa się za pomocą rurosuszarki, spalinami z górnej części komory paleniskowej, o temperaturze ok. 900-1200°C, które pochłania nawet do 20% energii cieplnej generowanej w komorze paleniskowej (rysunek 11a). W przypadku zastosowania energii cieplnej z odpadowych źródeł do suszenia w suszarkach fluidalnych możliwe jest podniesienie sprawności bloku od 3% do 4%, a w obiecujących technologiach nawet do 5-6% (rysunek 11b) [2, 27].



Rysunek 11. Schematy układu kotła ze spalaniem węgla brunatnego a) klasyczne, b) ze wstępnym suszeniem [29]

W oparciu o pilotażową instalację suszarki fluidalnej w Coal Creek Station zostały przedstawione korzyści z przeprowadzonych modernizacji. W tabelach 4 i 5 zawarto podstawowe korzystne zmiany parametrów kotła w porównaniu do przypadku spalania węgla brunatnego przed modernizacją. Zmniejszeniu uległ strumień węgla, co wpłynęło na zmniejszenie nakładów energetycznych pracy młynów. Doszło też do zmniejszenia emisji szkodliwych gazów i rtęci oraz wzrosła sprawność kotła [30, 31].

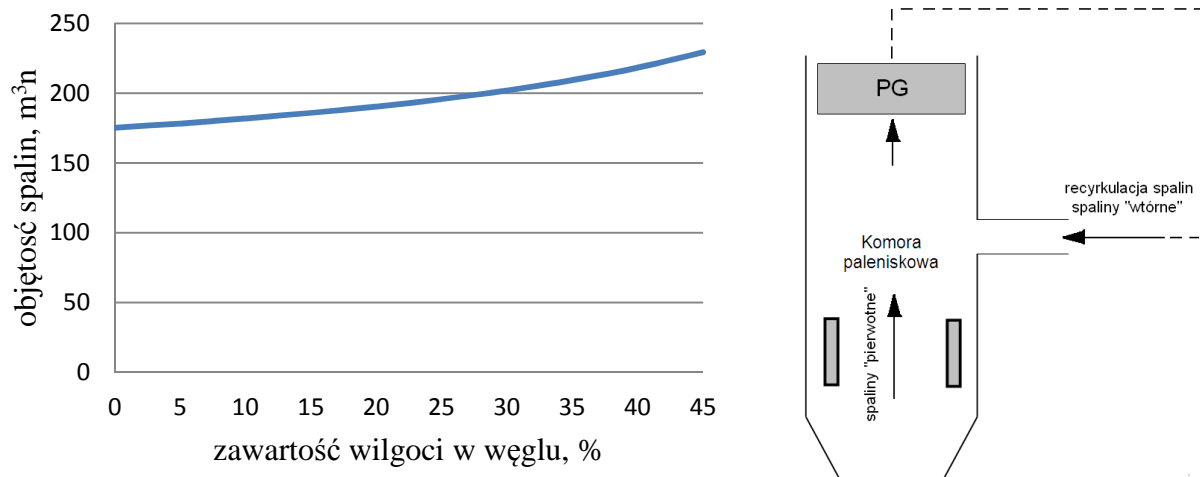
Tabela 4. Wyniki zastosowania instalacji suszenia na pracę bloku – redukcje [30]

nazwa	procentowa redukcja, %
strumień doprowadzonego węgla do kotła	2,0
moc młyna	3,3
emisja NOx	7,5
emisja SOx	1,9
emisja Hg	0,4

Tabela 5. Wzrost sprawności ze względu na zastosowanie fluidalnego suszenia węgla brunatnego [30]:

nazwa	procentowy wzrost sprawności, %
sprawność kotła	0,37
sprawność cieplna obiegu netto	0,37

Zastosowanie wstępnego suszenia węgla w istniejącym bloku wymaga modernizacji kotła, ze względu na mniejszą ilość powstałych spalin na skutek wyeliminowania znacznej ilości pary wodnej, która była obecna w spalinach w przypadku klasycznych metod suszenia węgla brunatnego (rurosuszarce). Rysunek 12 przedstawia wykres zmiany objętości spalin w komorze paleniskowej kotła typu CFB-672 w zależności od zawartości wilgoci w węglu oraz jedną z metod utrzymania stałego strumienia spalin w modernizowanym kotle za pomocą recyrkulacji spalin [31, 32].



Rysunek 12. Zmiana objętości spalin w kotle typu CFB-672 oraz schemat metody zawracania spalin w celu modernizacji kotła [32]

W przypadku budowy nowych bloków energetycznych z zastosowaniem suszenia fluidalnego niskotemperaturowego, kotły jak i urządzenia pomocnicze (młyny, wentylatory, wymienniki ciepła itp.) projektowane na podsuszone paliwo mają mniejsze gabaryty. Zmniejszenie gabarytów prowadzi do oszczędności na materiałach oraz powierzchni bloku energetycznego [32].

Powyższe analizy wskazują na wymierny skutek stosowania wstępnego suszenia węgla brunatnego ze względu na poprawę sprawności bloku energetycznego i ograniczenia emisji szkodliwych gazów. Jednakże dotychczas brakuje dojrzałych technologicznie instalacji wstępnego suszenia węgla brunatnego wykorzystujących niskotemperaturowe źródła ciepła. Co wiąże się z koniecznością prowadzenia dalszych badań i poszukiwania odpowiednich rozwiązań [33].

3. BADANIA WŁAŚCIWOŚCI WĘGLI PRZED I PO SUSZENIU ORAZ STRUKTURY PODCZAS PROCESU SUSZENIA

Węgiel brunatny jest podstawowym surowcem energetycznym zaliczanym do nieodnawialnych źródeł energii. Obok węgla kamiennego, torfu, biomasy, ropy naftowej i gazu stanowi główną bazę światowych surowców energetycznych. Uzyskana energia poprzez spalanie węgla brunatnego należy do jednych z najtańszych ze względu na płytkie obszary występowania zasobów tego surowca [34, 35]. Złóża węgla brunatnego występują na każdym kontynencie. W 1994 roku światowe zasoby szacowano na ok 500 mld ton. Co sprawia, że pomimo nieodnawialnego charakteru tego surowca jego energetyczne wykorzystanie będzie możliwe przez kolejne 200-300 lat zarówno z istniejących kopalni jak i złóż perspektywistycznych [36]. Główną wadą węgla brunatnego jako nośnika energii jest duża zawartość wilgoci, która stanowi znaczny balast powodujący niską wartość opałową oraz drogie koszty transportu, które wymuszają budowanie elektrowni w pobliżu kopalń [37].

Węgiel brunatny zaliczany jest do skał organicznych (pochodzenia roślinnego) występujących w złożach egzogenicznych osadowych [38]. Wszystkie formy stałych kaustobiolitów charakteryzuje zawartość organicznej substancji węglowej, części mineralnych oraz wilgoci. Wartość użytkową ze względów energetycznych stanowi część organiczna kaustobiolitów, pozostałe składniki są balastem obniżającym wartość opałową danego paliwa. W tabeli 6 przedstawiono poszczególne udziały wyżej wymienionych składników w węglu brunatnym [39, 40].

Tabela 6. Składniki węgla brunatnych [40]:

składniki węgla brunatnego	udział składników	średni udział składników w polskich węglach
substancja organiczna	25-89%	40%
wilgoć	10-70%	50%
substancja mineralna	1-25%	10%

Węgłe brunatne mogą przybierać zróżnicowany i odmienny skład chemiczny. Spowodowane jest to miejscem oraz czasem formowania się złóż surowca. Również w jednym złożu na różnych powierzchniach może występować odmienny skład chemiczny.

Dlatego niezbędna jest klasyfikacja węgla brunatnych [41]. Węgiel brunatny może być klasyfikowany na podstawie wielu kryteriów. W związku z ogromnym zróżnicowaniem właściwości węgla do chwili obecnej brak jest znormalizowanych klasyfikacji węgla w skali międzynarodowej. Charakterystyczny brak jednolitych międzynarodowych podziałów wynikał z tego, że węgiel brunatny ze względu na dużą zawartość wilgoci nie jest surowcem ekonomicznie opłacalnym podczas długiego transportu i jest uważany za krajowy surowiec energetyczny [42].

W Polsce używa się podziału węgla brunatnych na typy (zgodnie z Polską Normą PN-75/G-97051/00). Podział odbywa się w oparciu o ocenę zawartości wilgoci całkowitej oraz wydajności smoły wytłowej (prasmoły) w węglu, przeliczonej na stan suchy i bezpopiołowy [8]. Ze względu na parametry wykorzystania technologicznego węgla brunatnego podzielono go na 4 typy (tabela 7) [40, 43].

Tabela 7. Typy węgla brunatnych ze względu technologicznego wykorzystania [40, 44]:

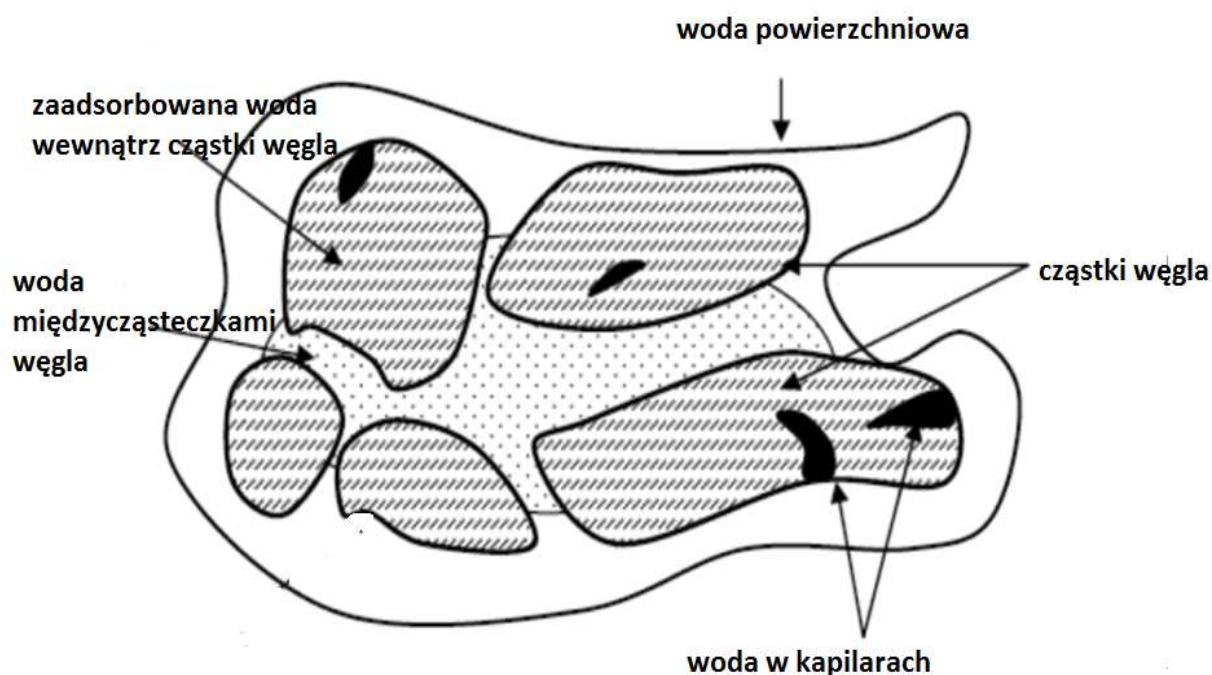
typ węgla brunatnego	charakterystyczne cechy
węgiel energetyczny	poniżej 40% popiołu, wartość opałowa powyżej 1600 kcal/kg
węgiel brykietowy	poniżej 15% popiołu, wartość opałowa powyżej 2000 kcal/kg
węgiel wytłewny	poniżej 12% popiołu, powyżej 12% prasmoły na stan suchy węgla
węgiel ekstrakcyjny	powyżej 12% bituminów w przeliczeniu na stan suchy węgla, (ekstrahowanych benzenem w temperaturze wrzenia benzenu)

Do celów bezpośredniego spalania w stanie surowym przeznaczony jest węgiel energetyczny. Do celów energetycznych nadaje się węgiel o wartości opałowej w stanie roboczym co najmniej 6,7 MJ/kg (1600 kcal/kg) i popielności w stanie suchym mniejszej lub równej 40%. Jako parametry uzupełniające należy potraktować zawartość siarki w stanie suchym (poniżej 2% wagowych węgiel traktowany jest jako niezasiarczony, a powyżej jako zasiarczony) oraz zawartość alkaliów w przeliczeniu na sumę $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (gdy suma ta jest większa od 0,5% węgiel uważa się zasolony) [45, 46]. Jeżeli węgiel brunatny zawiera mało ksyliatów (gałęzie, korzenie, pnie), a głównie masę ziemistą niezapiaszczoną o zawartości popiołów mniejszej niż 15% oraz wartości opałowej nie mniejszej niż 8,4 MJ/kg – nosi nazwę węgla brykietowego. Węgiel ten w procesach technologicznych ulega rozdrabnianiu i bezlepiszczowemu prasowaniu przy współudziale tzw. filmu wodnego, po czym może być

transportowany na większe odległości. Węgiel brunatny zawierający w stanie bezwodnym nie więcej niż 12% popiołu i więcej niż 12% prasmoły, nosi nazwę węgla wylewnego. Węgiel ekstrakcyjny zawiera w stanie bezwodnym powyżej 12% bituminów, stąd nazywany jest też często węglem bitumicznym. Nie występuje w ilościach przemysłowych. W złożach występuje najczęściej w postaci jasnobrązowożółtych wkładek, przewarstwień i soczew [47, 48].

3.1 Wpływ formy występowania wody w węglu brunatnym na proces suszenia

Węgiel brunatny jest materiałem kapilarno-porowatym ze względu na zawartość wielu otwartych i zamkniętych porów i kapilar z dawnych komórek roślinnych. Powodują one silne wiązania wody w porównaniu z powierzchniami gładkimi, co sprawia, że węgiel brunatny zachowuje się jak materiał higroskopowy. Oznacza to, że po odparowaniu wody z powierzchni i dużych porów, woda pozostająca w drobnych porach ma ciśnienie niższe niż ciśnienie równowagi przypadające określonej temperaturze węgla. Przez co dochodzi do kondensacji w kapilarach i wiązania wilgoci. W wyniku tego, co określa zachowanie higroskopowe węgla, pojawia się adsorpcja wody węglowej, przez którą woda w nielicznych warstwach na powierzchni węgla jest związana fizycznie i chemicznie. Różne postaci i stany występowania wody w węglach brunatnych schematycznie przedstawia rysunek 13, a w tabeli 8 zaprezentowano procentowy udział rodzajów związanej wody w węglu na przykładzie węgla australijskich o zawartości wilgoci na poziomie 67% [49, 50].

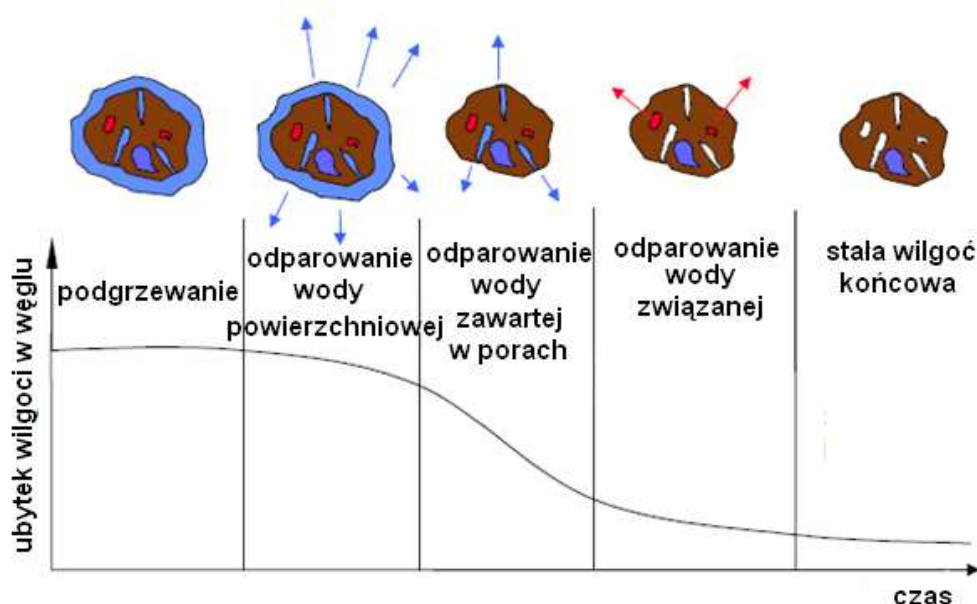


Rysunek 13. Różne formy wody występujące w węglu [49]

Tabela 8. Procentowy udział wody zawartej w węglu brunatnym (badania profesora D.J. Allardice i profesora D.G. Evans)[51, 52]:

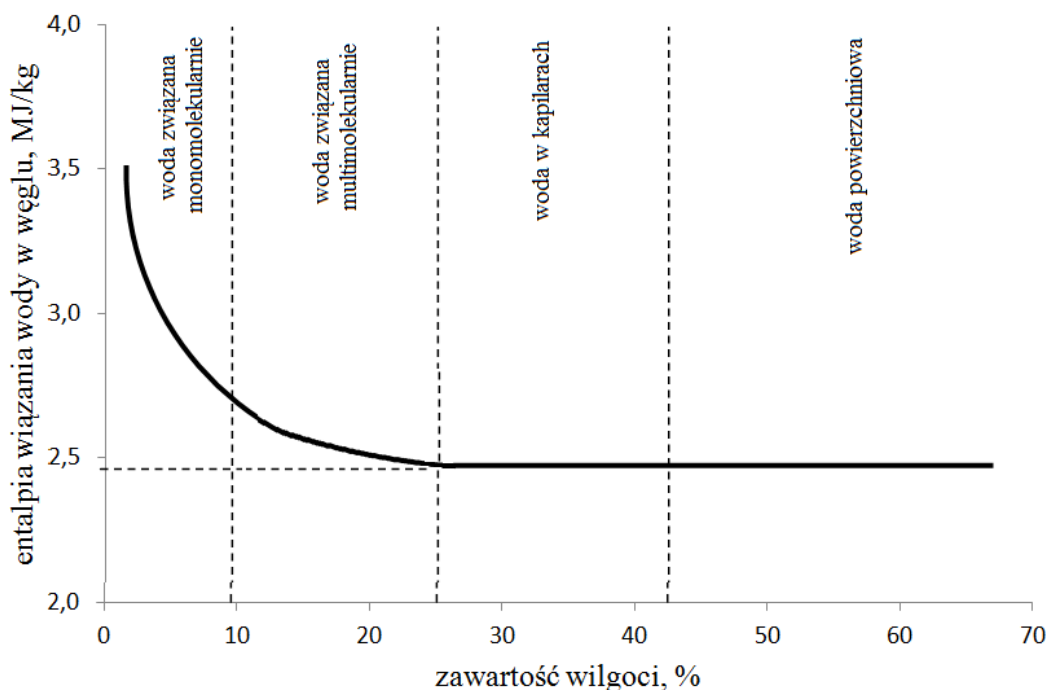
rodzaj wody w węglu	D.J. Allardice	D.G. Evans
woda powierzchniowa	64%	60%
woda w kapilarach	28%	30%
woda związana multimolekularnie	5%	6%
woda związana monomolekularnie	3%	4%

Na rysunku 14 przedstawiono zachowanie się ziarna węgla podczas procesu suszenia. Różne formy wody zawartej w węglu sprawiają, że proces suszenia nie jest liniowy. 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 już nie jest w stanie odparować. Dodatkowo istnieją również zamknięte pory zawierające wodę. Te prawdopodobnie nigdy nie wyschną, chyba, że przy okazji mechanicznego zniszczenia cząsteczek węgla lub przez rosnące ciśnienie w czasie ogrzewania porów prowadzące do ich rozerwania [51, 52].



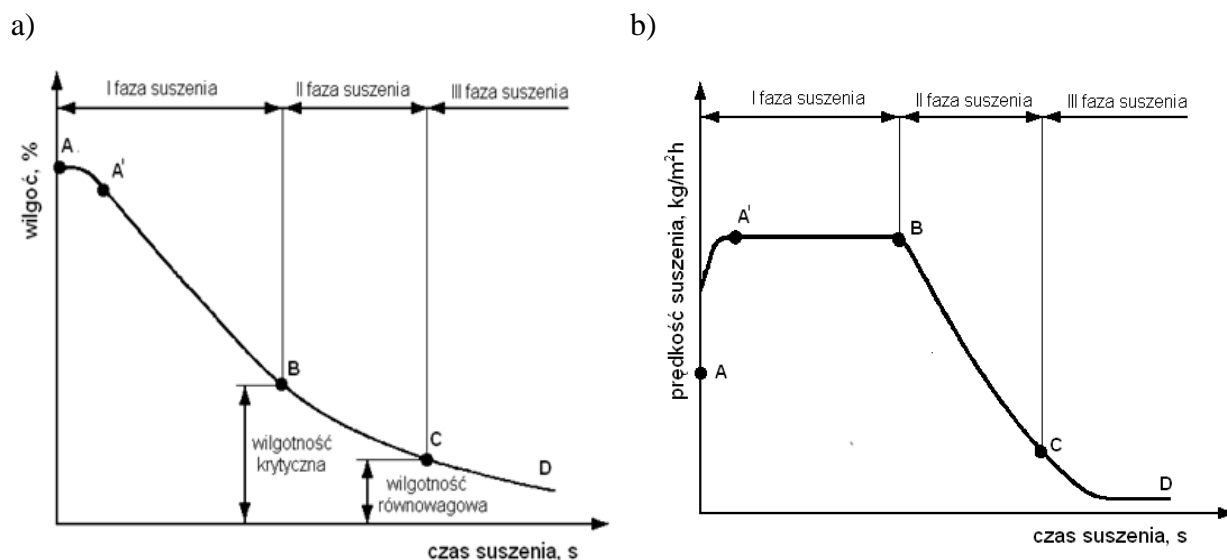
Rysunek 14. Kurczenie się, powstawanie porów i zawartość wody podczas suszenia węgla brunatnego[49]

Ze względów energetycznych najłatwiejsza do odparowania jest woda powierzchniowa. Następnie woda zawarta w kapilarach. Natomiast ze względu na bardzo silne wiązania wody związanej multimolekularnie i monomolekularnie jej usunięcie dla celów przemysłowych jest nie opłacalne. Entalpie wiązania wody w węglu w zależności od zawartości wilgoci w węglu przedstawiono na rysunku 15 [49, 52].



Rysunek 15. Entalpia wiązania wody w funkcji zawartości wilgoci [54]

Proces suszenia charakteryzowany jest przez dwie krzywe - wilgoć materiału suszonego w czasie oraz szybkość procesu suszenia w czasie. Wilgoć materiału suszonego wyraża się w procentach masowych lub jako zawartość wody, czyli ilość kilogramów wody przypadającą na 1 kg suchego materiału. Przebieg procesu suszenia ze względu na zawartość wilgoci materiału suszonego obrazuje rysunek 16a. Szybkość procesu suszenia definiuje się jako ilość wody odparowanej w jednostce czasu z ciała suszonego. Przebieg procesu ze względu na szybkość suszenia obrazuje rysunek 16b [55, 56].



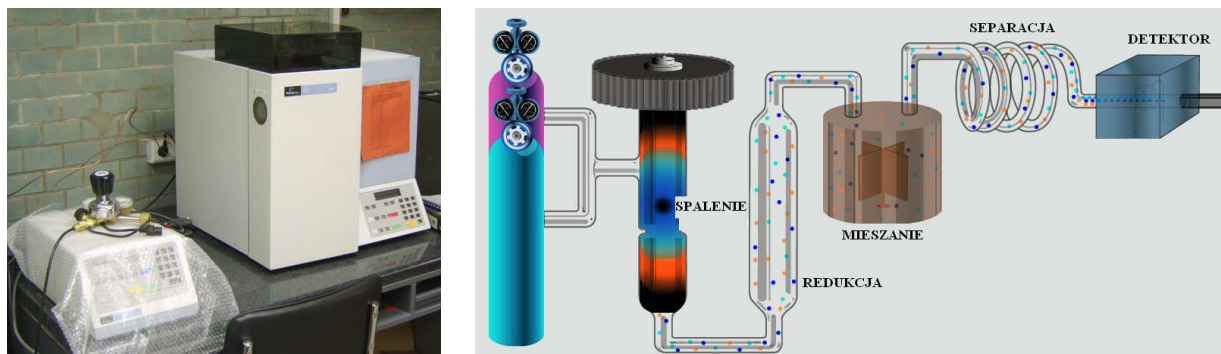
Rysunek 16. Proces suszenia a) zależność wilgotności suszonego materiału od czasu suszenia b) zależność prędkości suszenia materiału od czasu suszenia [55]

Na rysunku 16 zaznaczono charakterystyczne punkty, oznaczone dużymi literami. Przedstawiają one fazy procesu suszenia. Na odcinku AA' suszony materiał pobiera ciepło od czynnika suszącego i zużywa go na podgrzanie, aż do ustalenia temperatury. Wówczas wilgotność zmienia się nieznacznie. Odcinek A'B 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 nazywa się „wilgotnością krytyczną” ze względu na energochłonność procesu. Następnie występuje trzecia faza suszenia (odcinek CD), w której wilgotność materiału dalej spada ze względu na usuwanie wody związanej molekularnie. Ze względu na energochłonność procesu, nie stosuje się zwykle suszenia dłużej niż do punktu C [55, 57, 58].

3.2 Aparatura pomiarowa do określenia właściwości węgla brunatnych

Przeprowadzone badania skupiały się na procesie suszenia polskich węgla brunatnych o różnych właściwościach fizycznych i chemicznych. Do określenia właściwości badanych węgla brunatnych pod względem procesu suszenia została użyta aparatura opisana poniżej.

Analizator PerkinElmer 2400 Series II CHNS/O Elemental Analyzer, który służył do określenia składu elementarnego węgla brunatnych. Analizator pozwala na szybką analizę o bardzo dużej dokładności, zarówno dla organicznych i nieorganicznych materiałów [59].



Rysunek 17. Analizator 2400 Seria II CHNS/O oraz Schemat metody Pregl-Dumas analizy próbki [59]

Analizator bazuje na klasycznej metodzie Pregl-Dumas, polegającej na spalaniu wzorców w czystym tlenie, powstałe w ten sposób gazy są separowane i detektowane. W urządzeniu analiza odbywa się przez wykorzystanie czterech głównych stref:

- strefę spalania,
- strefę redukcji (kontroli gazu),
- strefę separacji,
- strefę detekcji.

W strefie spalania analizator dobiera wzorce z pośród 60-ciu pozycji, Próbka jest całkowicie spalana co sprawia, że powstają następujące gazy: dwutlenek węgla, para wodna, azot i dwutlenek siarki. Powstałe gazy są kierowane do kolejnej strefy – kontroli gazu, gdzie następuje gwałtowne wymieszanie i utrzymanie precyzyjnego ciśnienia, temperatury i objętości. Wynikiem czego jest homogenizacja gazów czyli wytworzenie jednolitej mieszaniny gazów. Po homogenizacji gazu następuje kolejna strefa – separacji, gdzie gaz jest rozprężany co pozwala na rozdzielenie gazów. W strefie detekcji poszczególne składniki gazu są porównywalne z wzorcami zapisanymi w analizatorze. Wyniki są przesyłane na komputer, gdzie można dokonać dodatkowych przeliczeń. [59].

Do określenia zawartości części mineralnych i lotnych oraz zawartości wilgoci w węglu brunatnym użyto Termograwimetru Pyris Diamond.



Rysunek 18. Termograwimetr Pyris Diamond [60]

Termograwimetr jest urządzeniem rejestrującym zmiany temperatury oraz szybkość ubytku masy. Pozwala to na określenie wielu parametrów takich jak np.:

- kinematyka procesu (w tym w szczególności szybkość reakcji i energia aktywacji),
- określenie czy w danym momencie próbka oddaje czy pobiera ciepło,
- zarejestrować zmiany fazy próbki,
- określenie zawartości wilgoci lub ilości części lotnych w próbce.

Urządzenie to pozwala na precyzyjne określenie szybkości nagrzewania (od 5 °C do 250°C na minutę) [60].

Do określenia masy węgla brunatnego oraz jego gęstości nasypowej użyto wagi pomiarowej Radwag PS 6000/Y. Urządzenie charakteryzuje się dokładnością odczytu do 10mg oraz błędem pomiarowym $\pm 0,03$ g [61]. Natomiast piec „Classic” został zastosowany do określenia wilgoci w węglu brunatnym [62].



Rysunek 19. Piec „Classic” do określenia wilgoci próbki węgla

Sita o rozmiarach: 8,0 mm, 6,3 mm, 4,0 mm, 2,0 mm, 0,4 mm, wstrząsarka oraz waga analityczna posłużyły do analizy sitowej w celu określenia składu ziarnowego (frakcyjnego) węgla brunatnych. Metoda badawcza polegała na rozdzieleniu materiału na frakcje zawierające ziarna o różnej wielkości, poprzez przesiewanie przez zestaw sit, w wyniku czego ziarna o odpowiednich średnicach pozostały na kolejnych sitach (o coraz mniejszych oczkach). Po zważeniu poszczególnych klas ziarnowych określono procentowy udział węgla pozostałego na każdym sicie w stosunku do całości [63].

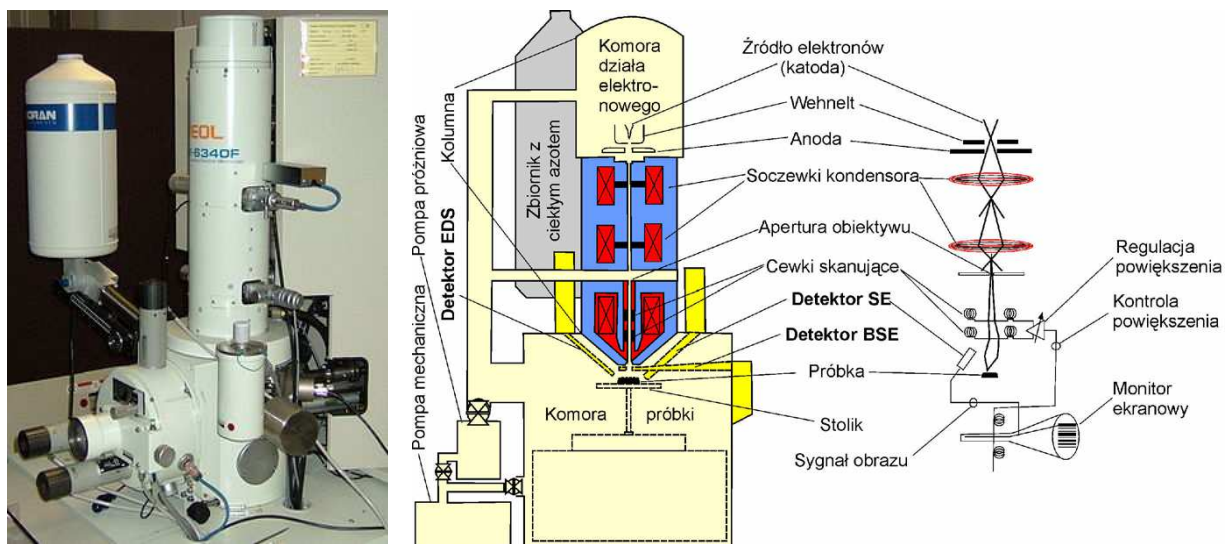


Rysunek 20. Sita oraz wstrząsarka do analizy sitowej węgla brunatnego

Do obserwacji struktury węgla brunatnych ze względu na rodzaj i zawartość wilgoci wykorzystano elektronowy mikroskop skaningowy. Mikroskop skaningowy składa się z:

- działa elektronowego, gdzie wytwarzana jest wiązka elektronów,
- kolumny, w której następuje przyspieszenie i ogniskowanie wiązki elektronów,
- komory próbki, gdzie ma miejsce interakcja elektronów wiązki z próbką,
- zestawu detektorów odbierających różne sygnały emitowane przez próbkę,
- systemu przetwarzania sygnałów na obraz [64].

W mikroskopach skaningowych wiązka elektronów bombarduje próbkę, skanując jej powierzchnię linia po linii. Pod wpływem wiązki elektronów próbka emituje różne sygnały (m. in. elektrony wtórne, elektrony wstecznie rozproszone, charakterystyczne promieniowanie rentgenowskie), które są rejestrowane za pomocą odpowiednich detektorów, a następnie przetwarzane na obraz próbki lub widmo promieniowania rentgenowskiego [64].



Rysunek 21 Skaningowy mikroskop elektronowy [65]

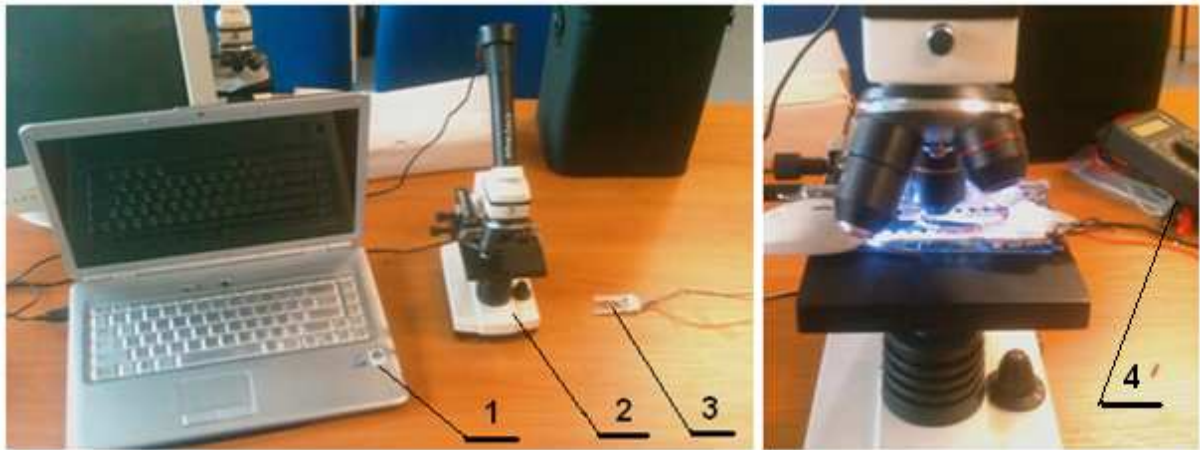
W celu obserwacji struktury i objętości węgla brunatnych podczas procesu suszenia użyto mikroskopu Biolux AL firmy Bresser wyposażonego w kamerę VGA (640x480) połączonego z grzałką oporową oraz termoparą (miernik cyfrowy DT-838). Mikroskop był wyposażony w okular z kamerą umożliwiającą ciągłą rejestrację obrazu na komputerze [66].

Tabela 9. Dane techniczne mikroskopu Biolux AL [66]:



Rysunek 22. Mikroskop Biolux AL [66]

dane techniczne	
Powiększenie	20x - 1280x
Okulary	5x, 16x
Średnica okularu	19,5 mm
Obiektywy	achromatyczne, 4x 10x, 40x
Powiększenie tubusu	1,0x - 2,0x
Oświetlenie	LED, 6V



Rysunek 23. Stanowisko badawcze z mikroskopem (1 – laptop rejestrujący obraz, 2 – mikroskop, 3 – grzałka, 4 –multimetr z termoparą)

3.3 Właściwości węgla brunatnych użytych w badaniach

W Polsce węgiel brunatny w kopalniach odkrywkowych wydobywany jest w trzech zagłębiach. Dwa zagłębia znajdują się w centralnej Polsce: bełchatowskie i konińsko-adamowskie. Trzecie zagłębie turowskie znajduje się na południowo-zachodnich terenach kraju. W sumie cztery wielkie kopalnie odkrywkowe dostarczają węgiel do pięciu elektrowni (Bełchatów, Turów, Pątnów, Adamów, Konin). W Polsce rozpoznano 150 złóż i obszarów węglonośnych, a zasoby oszacowano na około 24,5 mld ton. Całkowite zasoby geologiczne w Polsce to 224 496 mln ton w tym złoża udokumentowane 24 575 mln ton, złoża perspektywiczne 58 231 mln ton oraz obszary węglonośne 141 690 mln ton [15, 67, 68]. Stan zasobów operowanych węgla brunatnego w czynnych kopalniach w roku 2010 wyglądał następująco:

- Kopalnia Bełchatów 880 mln ton, planowane wydobycie do 2038 roku,
- Kopalnia Turów 341 mln ton, planowane wydobycie do 2045 roku,
- Kopalnia Konin 110 mln ton, planowane wydobycie do 2022 roku,
- Kopalnia Adamów 55 mln ton, planowane wydobycie do 2023 roku,
- Kopalnia Sieniawa 1,5 mln ton, planowane wydobycie do 2030 roku [69, 70, 71].

Do badań nad procesem suszenia zostały wybrane dwa rodzaje węgla. Wyboru dokonano ze względu na największe złoża obecnie eksploatowane w Polsce – bełchatowskie i turowskie oraz na zróżnicowane właściwości poszczególnych paliw. Zawartość siarki, węgla, wodoru i azotu (S, C, H, N) w paliwie określono w analizatorze 2400 Serii II CHNS/O zgodnie z normami PN-G-04571:1998, PN-G-04584:2001 i ISO-19579:2006 [72, 73, 74].

Zawartość tlenu (O) za pomocą obliczeń. W ten sposób uzyskano skład suchy i bezpopiołowy węgla. Do pełnej analizy określono części mineralne (A_r) oraz lotne metodą termograwimetryczną zgodnie z normą PN-G-04560 oraz wilgoć (W_r) za pomocą wagi analitycznej oraz pieca "Classic", według normy PN-80G-04511 [75, 76]. W ten sposób uzyskano analizę składu węgla brunatnych.

Do oceny jakościowej badanych węgla wykorzystano obliczenia pomocnicze. Przeliczono stan suchy i bezpopiołowy paliwa na stan roboczy, czyli rzeczywisty (uwzględniający części mineralne i wilgoć). W obliczeniach użyto następujących zależności:

- współczynnik - przeliczenie stanu suchego, bezpopiołowego na stan roboczy paliwa [5]:

$$X = \frac{100 - A_r - W_r}{100}, - \quad (6)$$

- wartość opałowa - formuła Mendelejewa (zgodnie z normą PN-81/G-04513) [77]:

$$Q_{MEND} = 339,15 \cdot C_r + 1030 \cdot H_r - 108,9 \cdot (O_r - S_r) - 25,1 \cdot W_r, \text{ kJ/kg} \quad (7)$$

- wartość opałowa - formuła VDI (zgodnie z normą PN-81/G-04513) [77]:

$$Q_{VDI} = 339,15 \cdot C_r + 1214,2 \cdot (H_r - \frac{O_r}{8}) + 104,7 \cdot S_r - 25,1 \cdot W_r, \text{ kJ/kg} \quad (8)$$

Wyniki obliczeń pomocniczych dla węgla bełchatowskich i turoszowskich przedstawiono w tabelach 10 i 11.

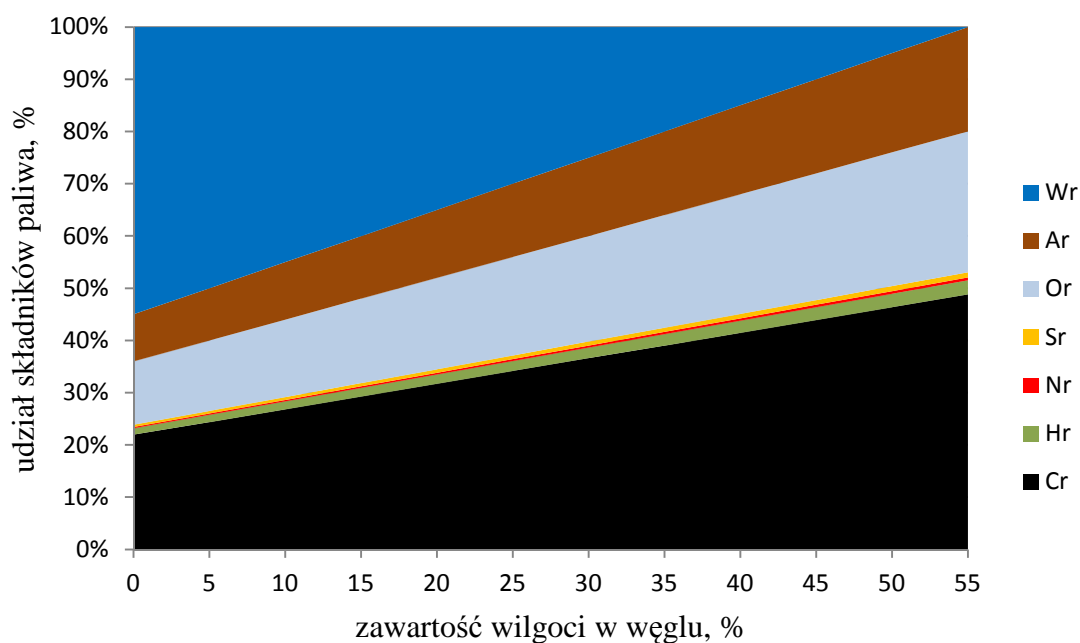
Tabela 10. Wyniki analiz i obliczeń składu węgla brunatnego ze złoża w Bełchatowie:

Węgiel Bełchatów						
stan suchy, bezpopiołowy					wartość opałowa, kJ/kg	
$C_{daf}, \%$	$H_{daf}, \%$	$N_{daf}, \%$	$S_{daf}, \%$	$O_{daf}, \%$	Q_{VDI}	5939
61,00	3,39	0,68	1,24	33,69	Q_{MEND}	6242
stan roboczy						
$C_r, \%$	$H_r, \%$	$N_r, \%$	$S_r, \%$	$O_r, \%$	$W_r, \%$	$A_r, \%$
22,45	1,25	0,25	0,46	12,40	54,00	9,2

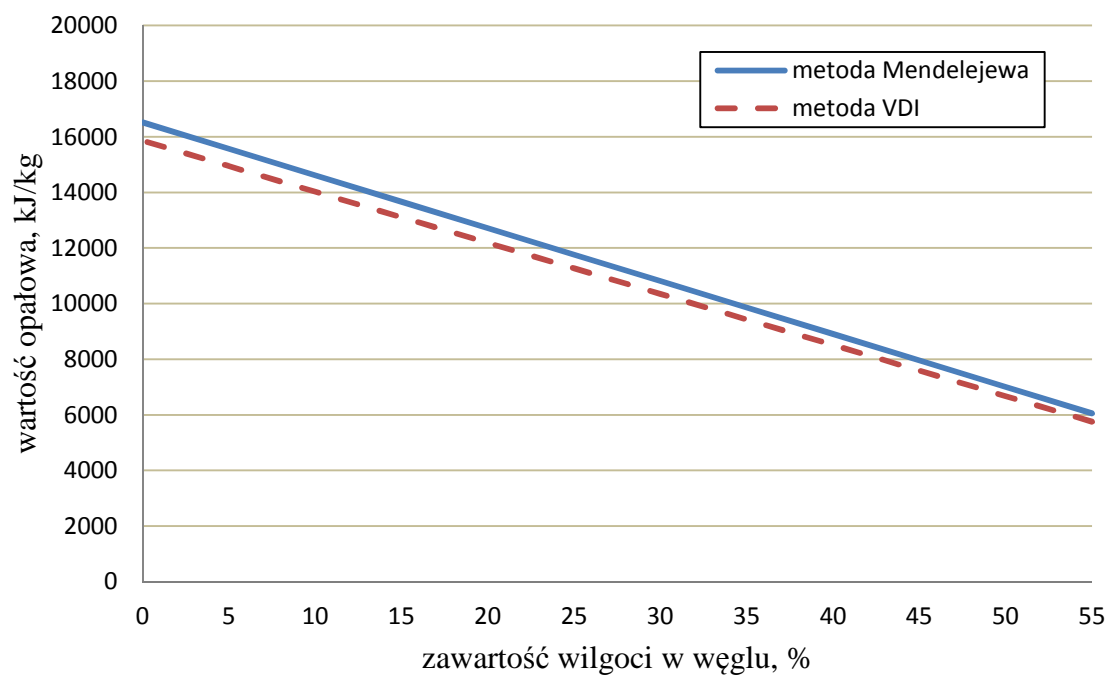
Tabela 11. Wyniki analiz i obliczeń składu węgla brunatnego ze złoża w Turowie:

Węgiel Turow						
stan suchy, bezpopiołowy					wartość opałowa, kJ/kg	
$C_{daf}, \%$	$H_{daf}, \%$	$N_{daf}, \%$	$S_{daf}, \%$	$O_{daf}, \%$	Q_{VDI}	8799
58,09	4,41	0,45	1,19	35,86	Q_{MEND}	9164
stan roboczy						
$C_r, \%$	$H_r, \%$	$N_r, \%$	$S_r, \%$	$O_r, \%$	$W_r, \%$	$A_r, \%$
29,07	2,21	0,23	0,60	17,95	43,00	6,54

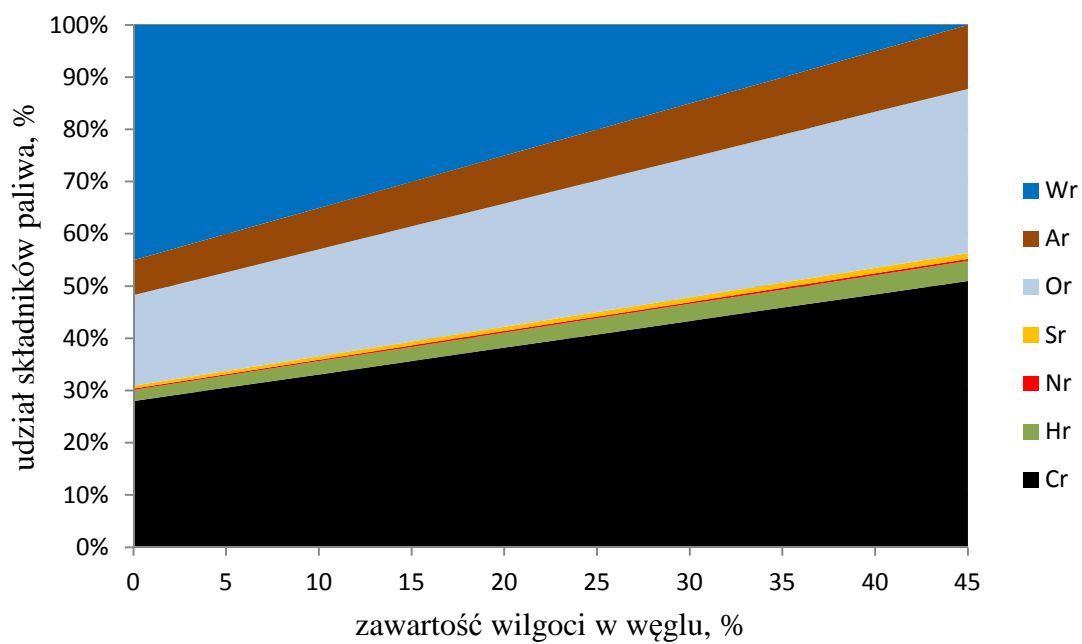
Ze względu na udział wody w węglu przedstawiono jak zmienia się procentowy skład oraz wartość opałowa paliwa. Wyniki przedstawiono na poniższych rysunkach. Skład pierwiastkowy dla węgla bełchatowskiego na rysunku 24, a węgla turowskiego na rysunku 26, natomiast zmianę wartości opałowej na rysunkach 25 i 27 [32].



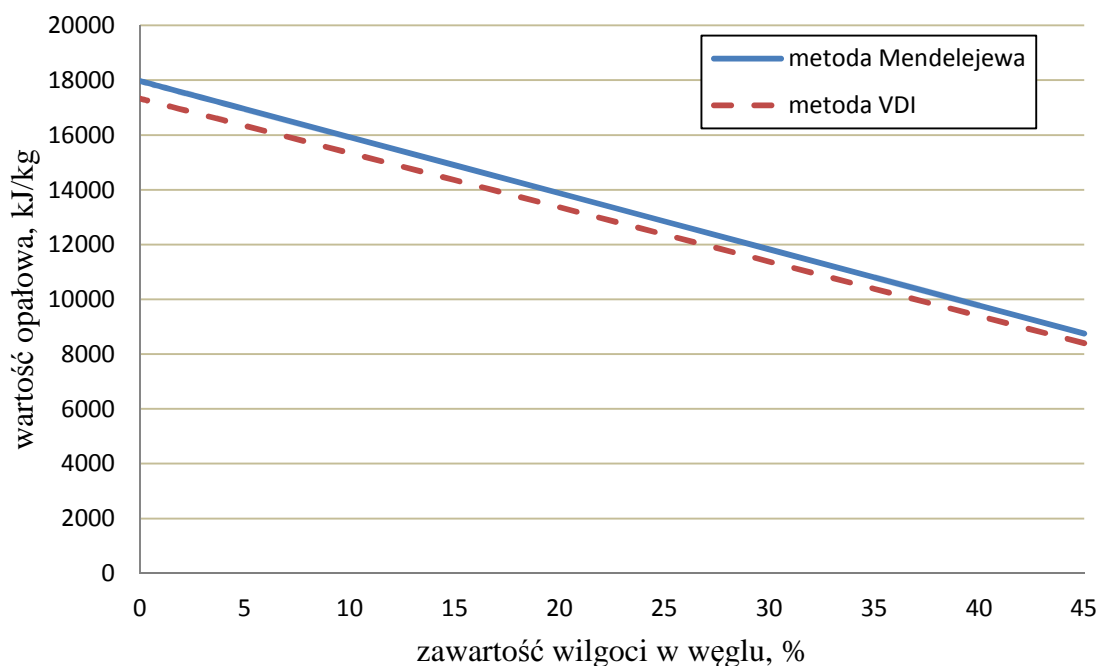
Rysunek 24. Udział procentowy zawartości składu paliwa w zależności od zawartości wilgoci w węglu – węgiel z Bełchatowa [32]



Rysunek 25. Zmiana wartości opałowej w zależności od zawartości wilgoci w węglu – węgiel z Bełchatowa [32]



Rysunek 26. Udział procentowy zawartości składu paliwa w zależności od zawartości wilgoci w węglu – węgiel z Turowa [32]



Rysunek 27. Zmiana wartości opałowej w zależności od zawartości wilgoci w węglu – węgiel z Turowa [32]

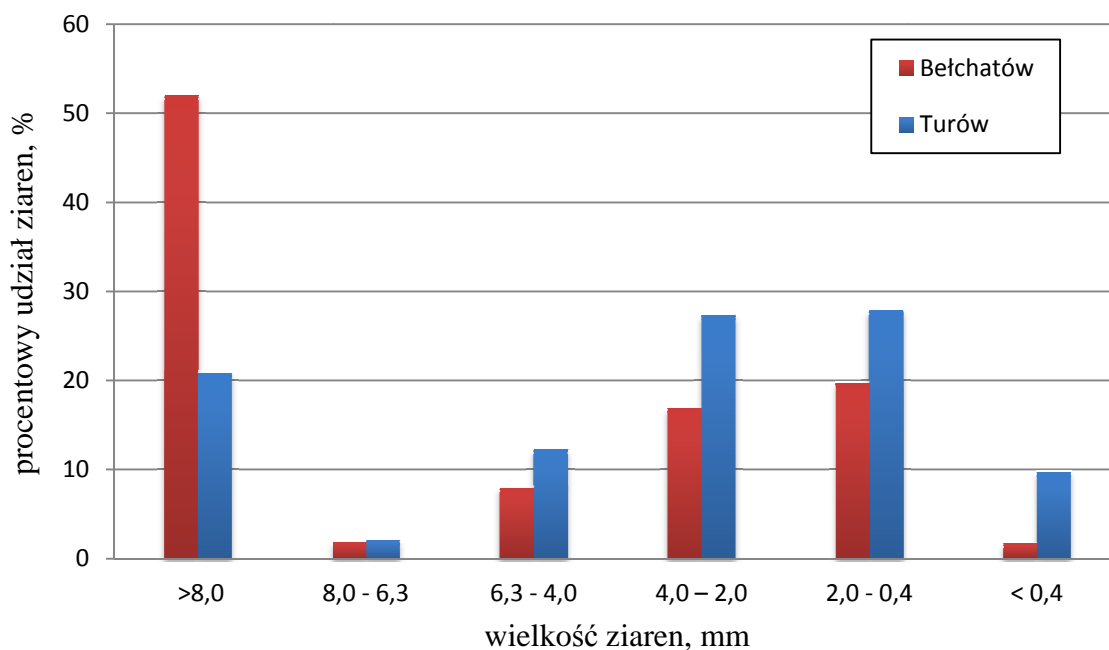
Z analiz wykresów (rysunki 24-27) jednoznacznie wynika, że zmniejszenie wilgoci wpływa na poprawę jakościową węgla brunatnych. Zmiana wartości opałowej przyjmuje postać liniową i wzrasta ponad dwukrotnie poprzez całkowite odparowanie wilgoci. Dla węgla bełchatowskiego od ok. 6 MJ/kg do 16 MJ/kg, a węgla turowskiego od 8 MJ/kg do 18 MJ/kg przez co osiąga wartość zbliżoną do węgla kamiennego [5, 32].

W procesie suszenia węgla brunatnych w złożu fluidalnym bardzo ważnym parametrem jest wielkość ziaren węgla. Wielkość ziarna wpływa na zachowanie się złoża fluidalnego jak i szybkość suszenia. Im większy rozmiar ziarna węgla tym potrzebna jest większa prędkość fluidyzacji do utrzymania złoża fluidalnego. Ponadto w przypadku złoża pęcherzykowych ziarna nie powinny być znacznie zróżnicowane pod względem wielkości [6].

W pracy wykonano badania zmiany wielkości rozmiarów cząsteczek węgla po procesie suszenia fluidalnego dla różnych temperatur i początkowych wielkości ziaren. Do analiz jako stan wyjściowy przyjęto węgiel z kruszarki, a rozkład ziarnowy zawarto w tabeli 12 oraz na rysunku 28. Do analiz zastosowano sita o średnicach: 8,0 mm, 6,3 mm, 4,0 mm, 2,0 mm, 0,4 mm. [78].

Tabela 12. Analiza sitowa węgla brunatnych z za kruszarki [78]:

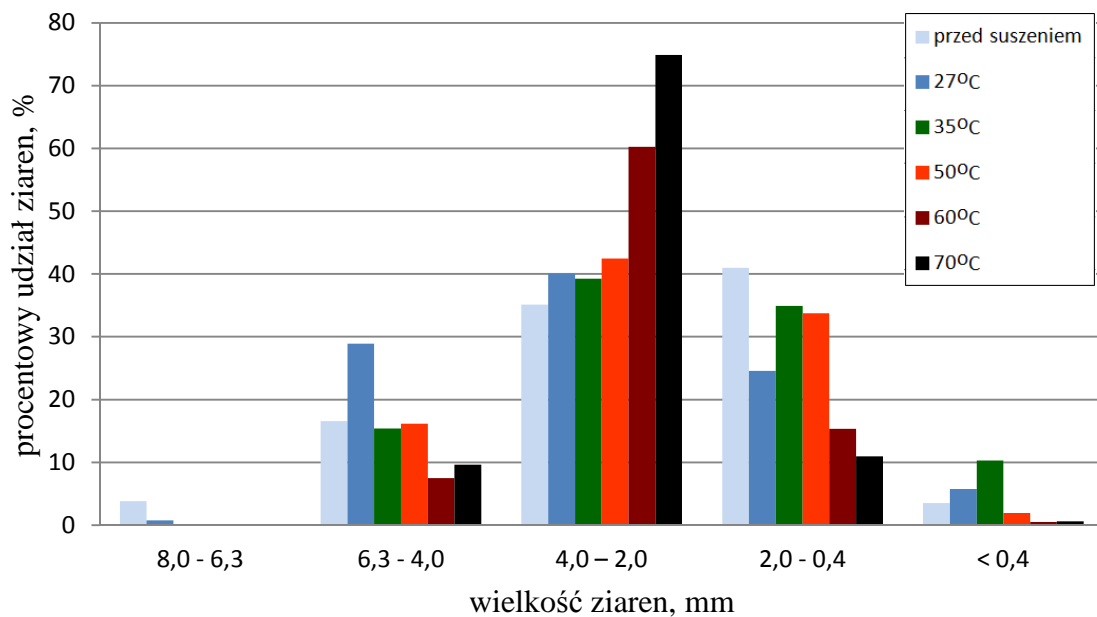
rozmiar ziarna	Bełchatów	Turów
mm	%	%
>8,0	51,96	20,82
8,0 - 6,3	1,84	2,06
6,3 - 4,0	7,95	12,26
4,0 – 2,0	16,88	27,33
2,0 - 0,4	19,69	27,87
< 0,4	1,68	9,66



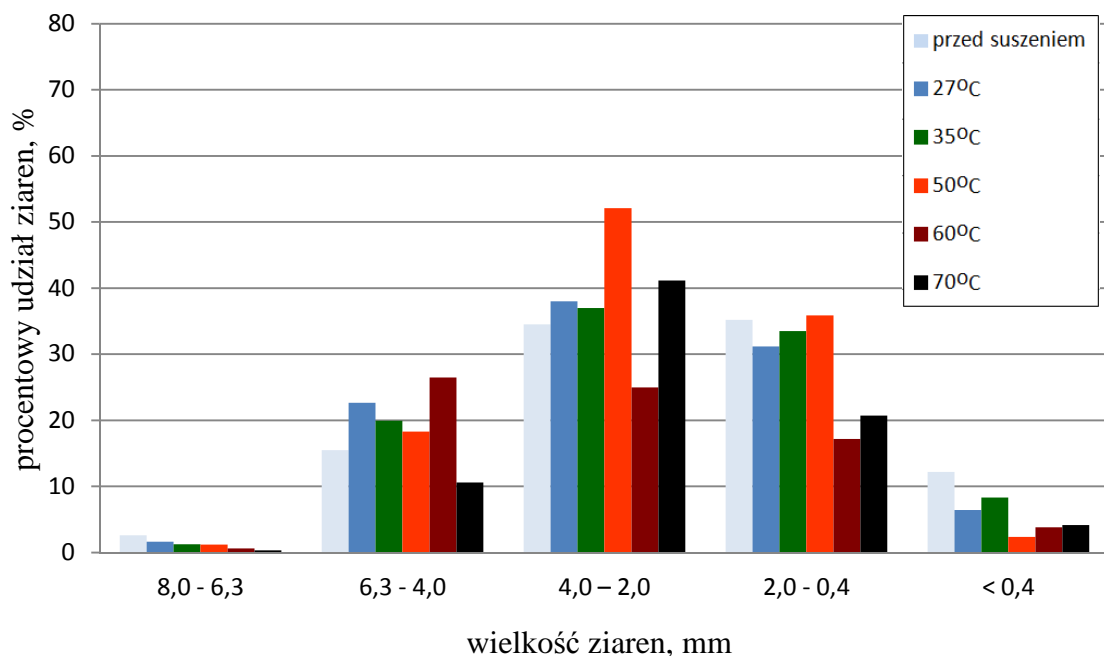
Rysunek 28. Rozkład ziarnowy węgla z za kruszarki ze złoża w Bełchatowie i Turowszowie

Rozkład ziarnowy po procesie suszenia przedstawiono na rysunkach 29 i 30 oraz w tabelach 13 i 14 dla czasu suszenia 75min i temperatur: 27°C, 35°C, 50°C, 60°C i 70°C w suszarce fluidalnej fontannowej. Wpływ suszenia na zmianę rozmiarów cząstek węgla rośnie wraz z temperaturą. Pod wpływem suszenia można zaobserwować największe zmiany w frakcji 2,0-4,0 mm, gdzie widać znaczący przyrost udziału ziaren po procesie suszenia. Natomiast w pozostałych frakcjach widoczne jest zmniejszenie procentowe udziału ziaren szczególnie dla najwyższej temperatury suszenia (70°C). Przy czym opisane efekty są

bardziej znaczące dla węgla z Bełchatowa. Dodatkowo podczas testów wykonano bilans masy, który świadczy o poprawności przeprowadzonych testów [79].



Rysunek 29. Procentowy udział wielkości ziaren przed i po suszeniu w różnych temperaturach - węgiel z Bełchatowa



Rysunek 30. Procentowy udział wielkości ziaren przed i po suszeniu w różnych temperaturach - węgiel z Turowa

Tabela 13. Rozkład sitowy w zależności od zawartości wilgoci w węglu bełchatowskim:

Węgiel bełchatowski						
temp. suszenia, °C	mokry	27	35	50	60	70
zawartość wilgoci, %	55,00	22,90	14,23	7,76	5,25	3,68
rozkład ziarnowy, mm	%	%	%	%	%	%
8,0 - 6,3	3,83	0,75	0,13	0,13	0,10	0,10
6,3 - 4,0	16,55	28,89	15,40	16,15	7,50	9,63
4,0 - 2,0	35,13	40,04	39,26	42,46	60,26	74,89
2,0 - 0,4	40,99	24,56	34,92	33,76	15,35	10,94
< 0,4	3,50	5,76	10,30	1,93	0,49	0,62

Tabela 14. Rozkład sitowy w zależności od zawartości wilgoci w węglu turoszowskim:

Węgiel turoszowski						
temp. suszenia, °C	mokry	27	35	50	60	70
zawartość wilgoci, %	43,00	16,90	12,28	7,20	4,95	3,04
rozkład ziarnowy, mm	%	%	%	%	%	%
8,0 - 6,3	2,60	1,67	1,24	1,22	0,61	0,36
6,3 - 4,0	15,49	22,68	19,95	18,29	26,50	10,61
4,0 - 2,0	34,51	37,99	37,00	52,09	24,98	41,14
2,0 - 0,4	35,20	31,20	33,49	35,89	17,17	20,72
< 0,4	12,20	6,46	8,32	2,35	3,84	4,14

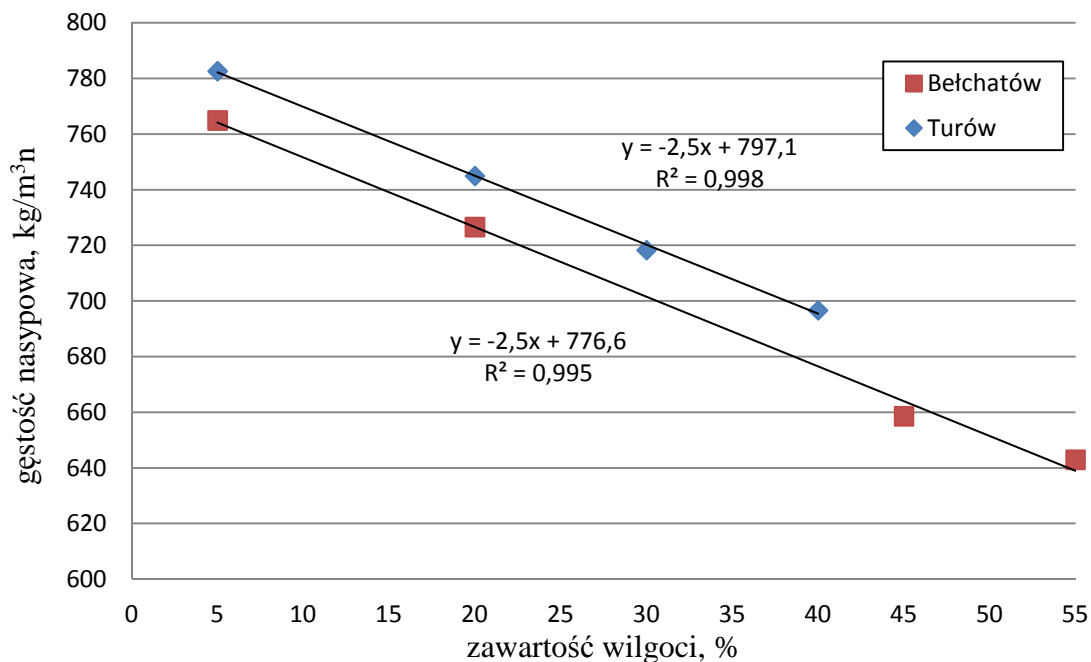
Podczas suszenia zmieniają się nie tylko rozmiary cząstek węgla brunatnego, ale także zachodzi zmiana gęstości nasypowej (pozornej). Spowodowane jest to odparowaniem wilgoci i pozostawieniem pustych porów, które mogą się załamywać i kruszyć albo pozostawać jako otwarte i stabilne pory. Duża zawartość wody w węglach brunatnych oraz różnice w gęstościach wody i suchego węgla przedstawiono w tabeli 15. Niestety dane literaturowe są zbyt ogólne i dlatego zostały przeprowadzone badania wpływu zawartości wilgoci na gęstość nasypową badanych węgli ze złóż bełchatowskich i turoszowskich [5].

Tabela 15. Gęstości wybranych materiałów [5]:

materiał	gęstość nasypowa, kg/m³n
węgiel brunatny wilgotny	750
węgiel brunatny suchy	600-800
materiał	gęstość, kg/dm³n
węgiel brunatny wilgotny	1,20
węgiel brunatny suchy	1,05-1,25
woda	0,998 (dla 20°C)

Tabela 16. Wpływ zawartości wilgoci i wielkości ziarna na gęstość nasypową:

Węgiel bełchatowski				
zawartość wilgoci	55%	45%	20%	5%
ziarno	gęstość nasypowa, kg/m³n			
0,4-2,0 mm	669	683	740	780
2,0-4,0 mm	642	661	720	760
4,0-6,3 mm	618	632	720	755
średnia	643	659	727	765
Węgiel turowski				
zawartość wilgoci	40%	30%	20%	5%
ziarno	gęstość nasypowa, kg/m³n			
0,4-2,0 mm	710	728	752	786
2,0-4,0 mm	702	725	743	782
4,0-6,3 mm	678	702	740	780
średnia	697	718	745	783



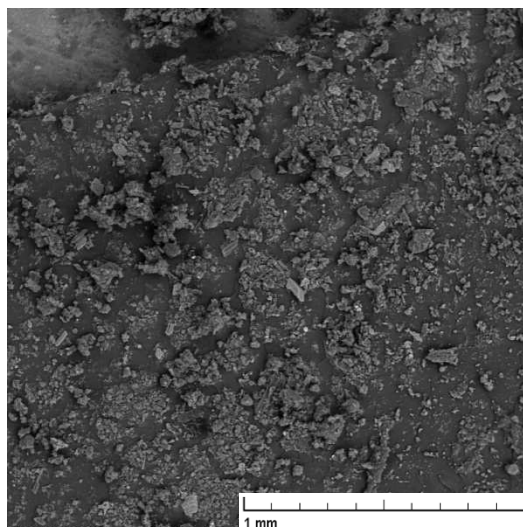
Rysunek 31. Wpływ rodzaju oraz zawartości wilgoci w węglu na jego gęstość nasypową

Przeprowadzone badania wykazały wartości zbliżone do literaturowych, ale w dokładniejszy sposób przedstawiły wpływ zawartości wilgoci. Widoczna jest zależność liniowa między ubytkiem wilgoci, a wzrostem gęstości nasypowej. Średnia wartość gęstości nasypowej dla mokrego węgla z Turowszowa wynosi 697 kg/m³n przy zawartości wilgoci na poziomie 40%, a dla Bełchatowa 643 kg/m³n przy wilgoci na poziomie 55%. W przypadku wilgoci na poziomie 5% wartość dla Turowa wyniosła 783 kg/m³n, a Bełchatowa 765 kg/m³n. Widoczny jest również wpływ wielkości ziarna na zmianę wartości gęstości nasypowej. Wraz ze zwiększeniem wielkości ziarna gęstość nasypowa jest mniejsza, jest tak ze względu na większe przestrzenie między ziarnami węgla, które wypełnione są powietrzem [80].

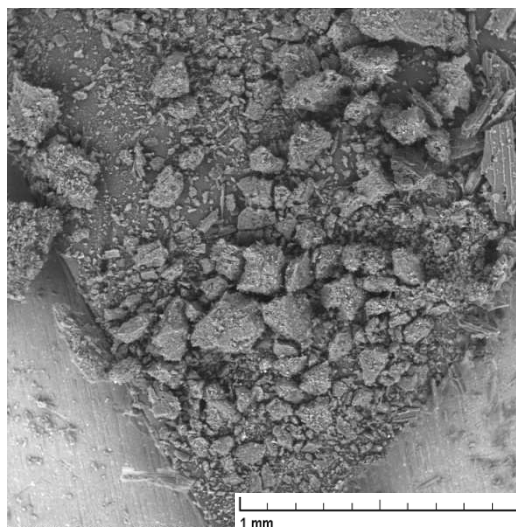
Następnie obserwowano strukturę węgli brunatnych bełchatowskich i turowskich za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego (zdjęcia SEM), ze względu na różną zawartość wilgoci (54% - węgiel bełchatowski, 38% węgiel turowski, oraz po całkowitym wysuszeniu obydwóch węgli – 0%) dla powiększeń x100, x500, x1000 i x5000.

Węgiel bełchatowski

zawartość wody 54%



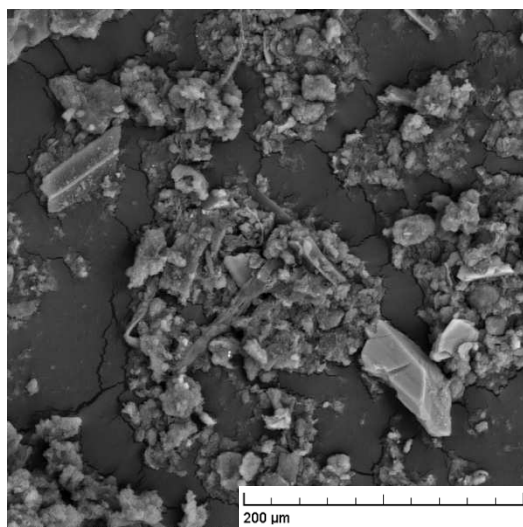
zawartość wody 0%



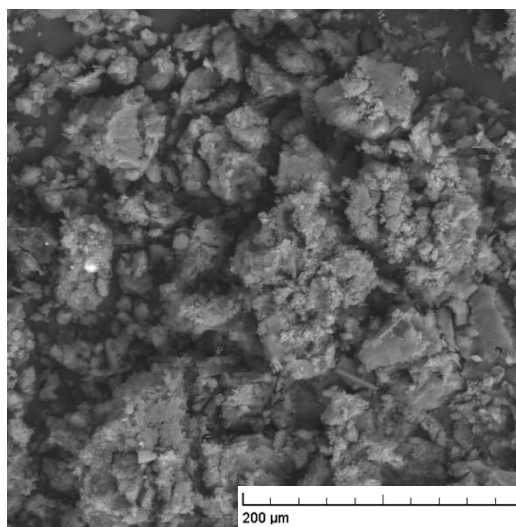
Rysunek 32. Zdjęcia mikrostruktury węgla Bełchatowskiego o różnej zawartości wilgoci, powiększenie $\times 100$

Węgiel bełchatowski

zawartość wody 54%



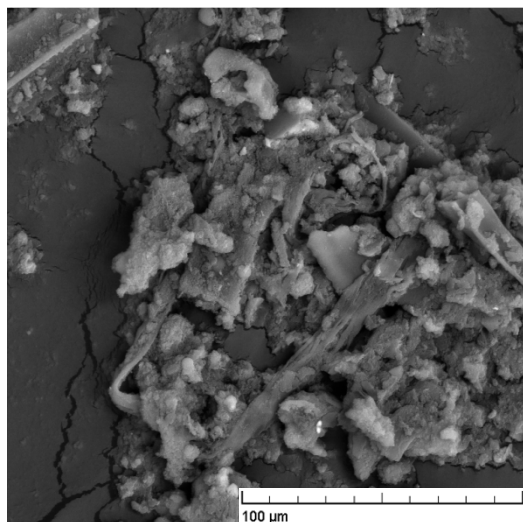
zawartość wody 0%



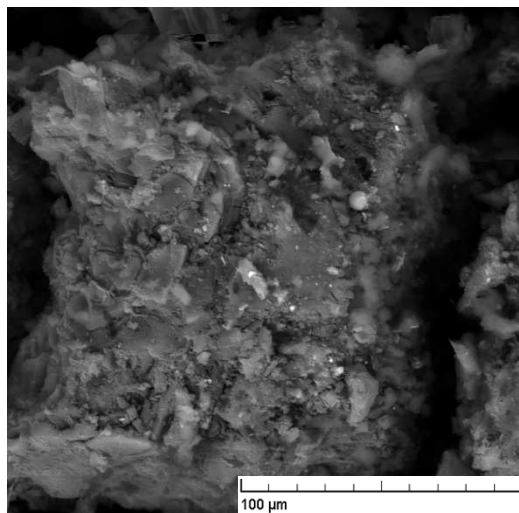
Rysunek 33. Zdjęcia mikrostruktury węgla Bełchatowskiego o różnej zawartości wilgoci, powiększenie $\times 500$

Węgiel bełchatowski

zawartość wody 54%



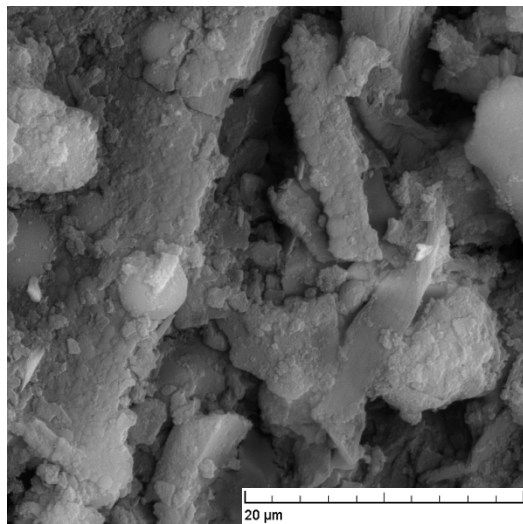
zawartość wody 0%



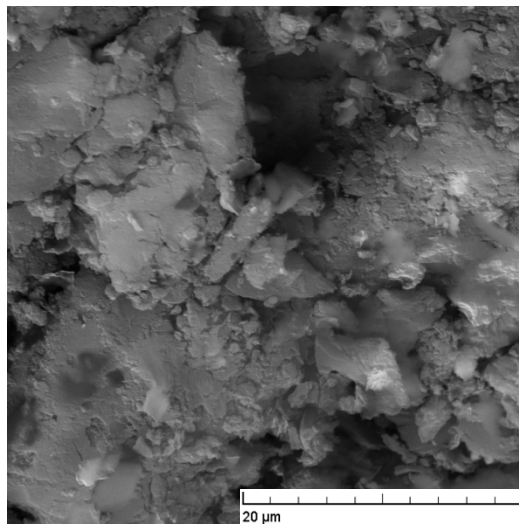
Rysunek 34. Zdjęcia mikrostruktury węgla Bełchatowskiego o różnej zawartości wilgoci, powiększenie $\times 1000$

Węgiel bełchatowski

zawartość wody 54%



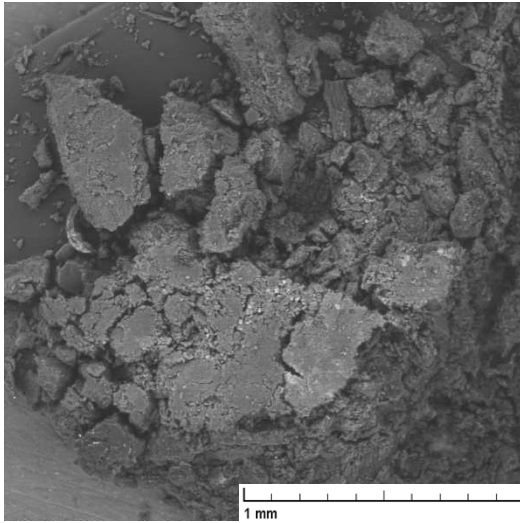
zawartość wody 0%



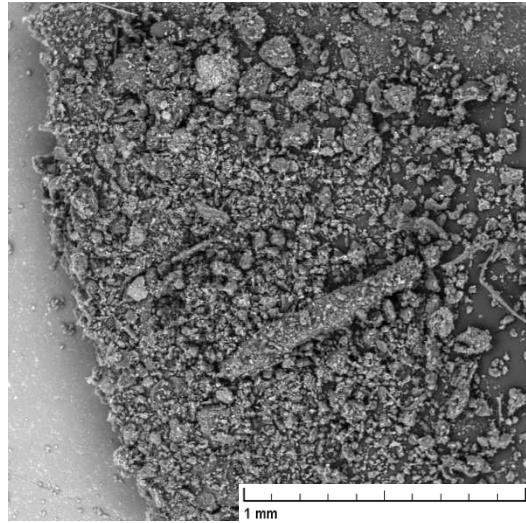
Rysunek 35. Zdjęcia mikrostruktury węgla Bełchatowskiego o różnej zawartości wilgoci, powiększenie $\times 5000$

Węgiel turoszowski

zawartość wody 38%



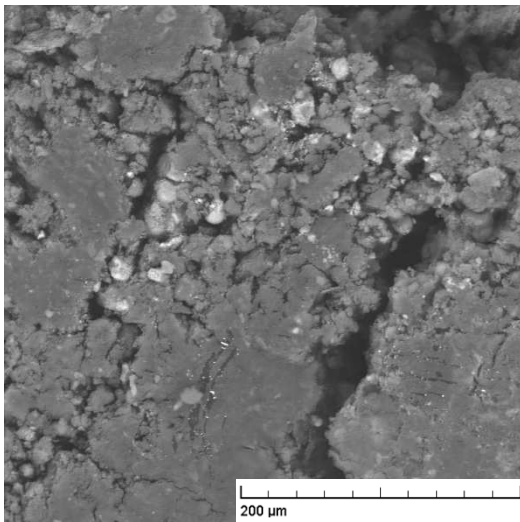
zawartość wody 0%



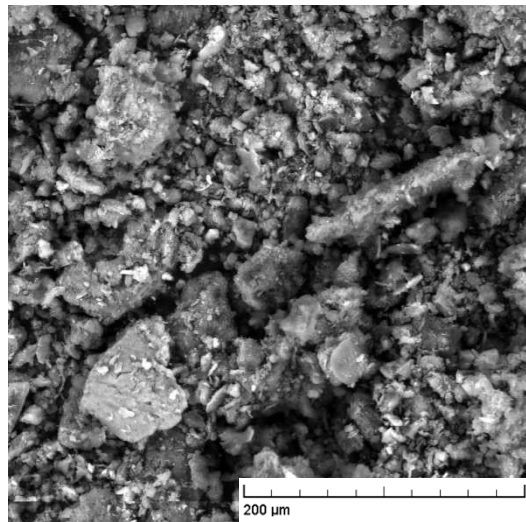
Rysunek 36. Zdjęcia mikrostruktury węgla Turosszowskiego o różnej zawartości wilgoci, powiększenie $\times 100$

Węgiel turoszowski

zawartość wody 38%



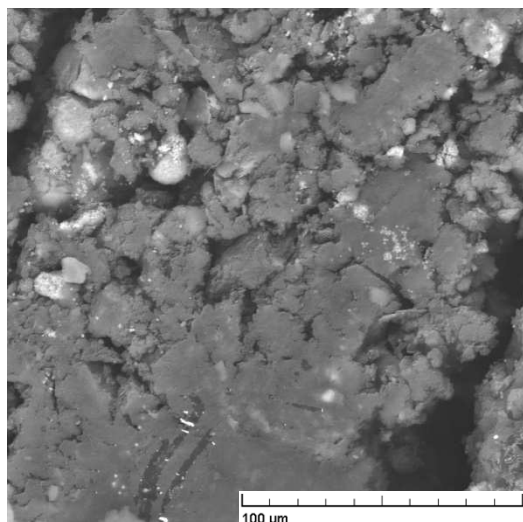
zawartość wody 0%



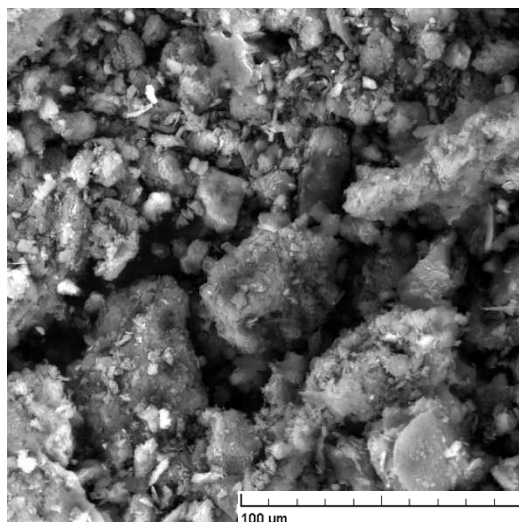
Rysunek 37. Zdjęcia mikrostruktury węgla Turosszowskiego o różnej zawartości wilgoci, powiększenie $\times 500$

Węgiel turoszowski

zawartość wody 38%



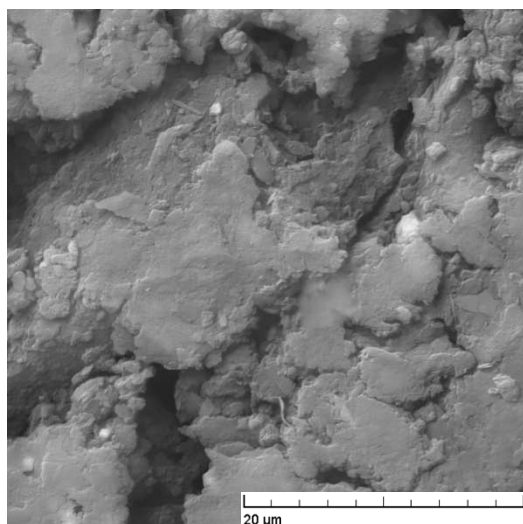
zawartość wody 0%



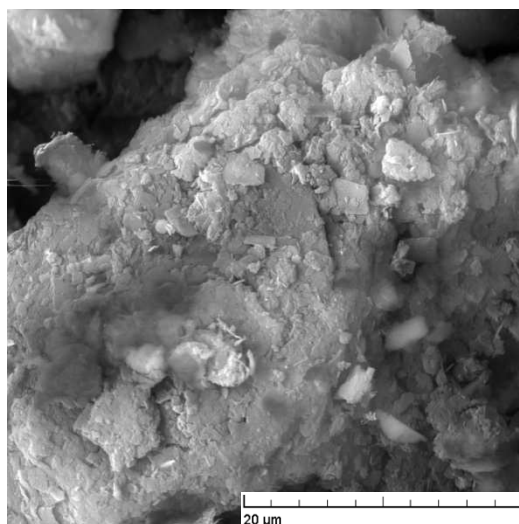
Rysunek 38. Zdjęcia mikrostruktury węgla Turossowskiego o różnej zawartości wilgoci, powiększenie x1000

Węgiel turoszowski

zawartość wody 38%



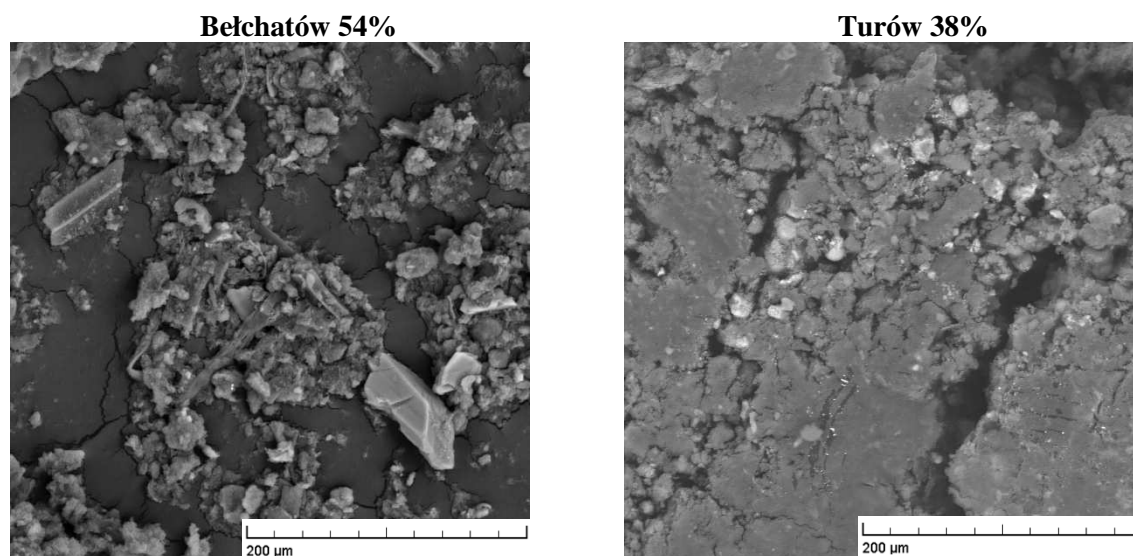
zawartość wody 0%



Rysunek 39. Zdjęcia mikrostruktury węgla Turossowskiego o różnej zawartości wilgoci, powiększenie x5000

Na zdjęciach SEM (rysunki 32-40) można zaobserwować zmiany struktury pod wpływem ubytku wilgoci, zarówno dla węgla bełchatowskich jak i turossowskich. Widoczny jest rozpad struktury na skutek licznych pęknięć powstałych podczas procesu suszenia i odprowadzania wilgoci. Powierzchnia staje się bardziej „chropowata” i zniszczona, lekkie

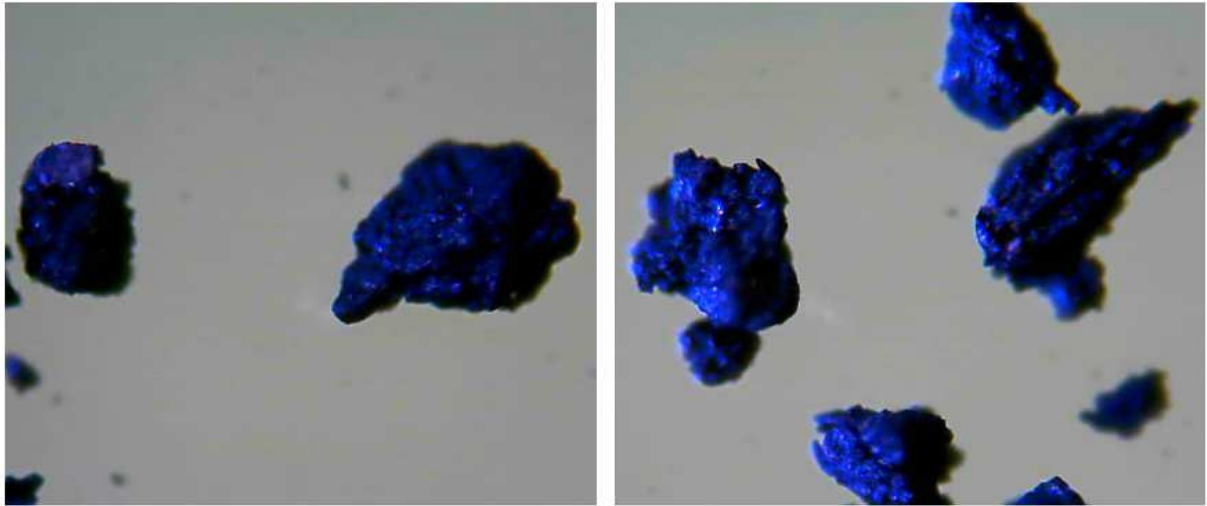
rysy na powierzchni węgla wilgotnego zmieniają się w pęknięcia, a często nawet w rozerwanie ziarna węgla na dwa osobne. Suszenie powoduje rozdrobnienie ziaren węgla oraz powstanie bardziej złożonych kształtów powierzchni posiadających wiele załamania i wypustków.



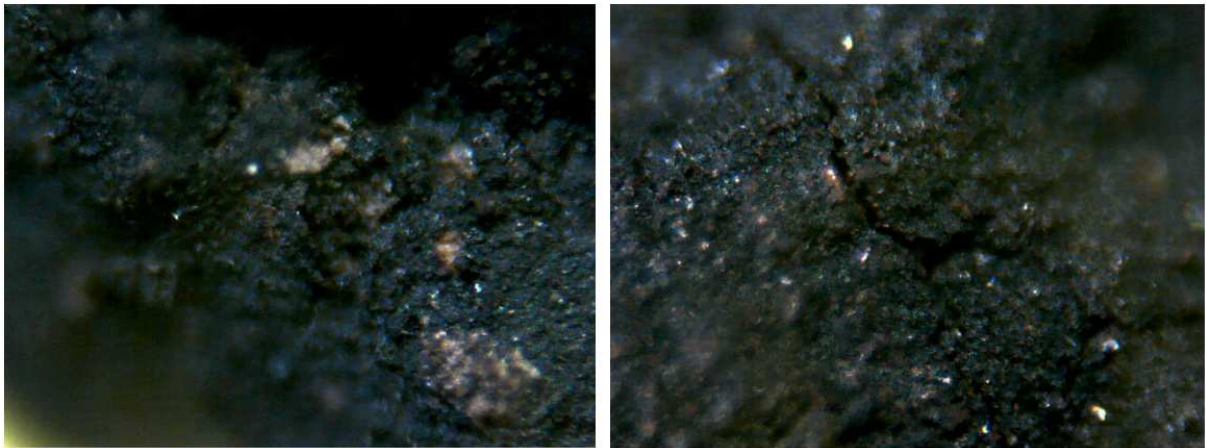
Rysunek 40. Zdjęcia mikrostruktury węgla bełchatowskiego i turoszowskiego mokrego, powiększenie x500

Porównując mokry węgiel bełchatowski z turoszowskim można zaobserwować różnice w strukturze. Węgiel bełchatowski jest bardziej rozdrobniony i ma zróżnicowane kształty, natomiast węgiel turoszowski posiada jednorodną powierzchnię z widocznymi szczelinami.

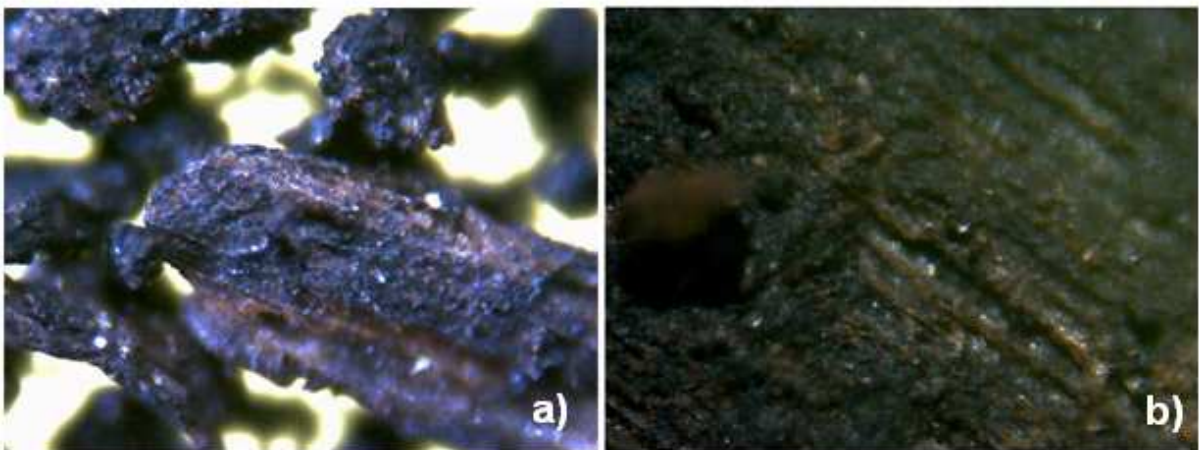
Strukturę węgla obserwowano również pod mikroskopem optycznym z okulem podłączonym do kamery VGA. Dokonano szeregu badań dla różnych węgla przy zmiennych nastawach powiększenia (x20 i x50) oraz zawartości wilgoci [81, 82].



Rysunek 41. Ziarno z Bełchatowa o wielkości 0,4 mm i zawartości wilgoci 54%, powiększenie x20



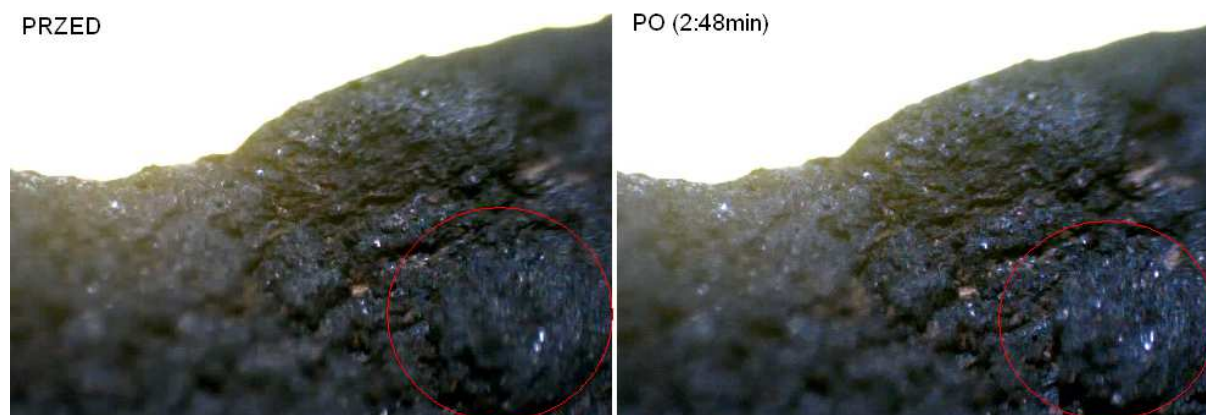
Rysunek 42. Ziarno z Bełchatowa o wielkości 2-4 mm i zawartości wilgoci 54%, powiększenie x50



Rysunek 43. Ziarno z Turowa o zawartości wilgoci 41%, a) 0,4 mm, powiększenie x20, b) 2-4 mm, powiększenie x50

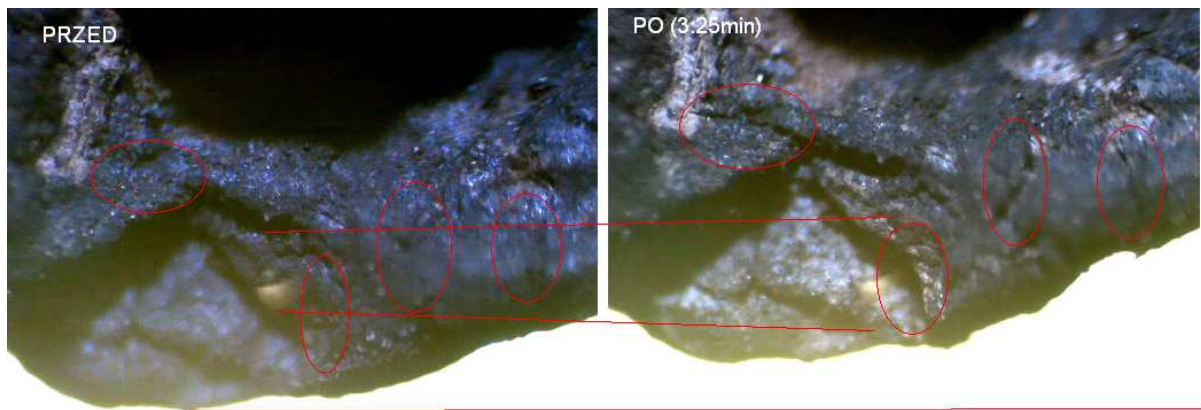
Na rysunkach 41-43 widoczna jest struktura węgla brunatnych, można zaobserwować, że składa się ona z różnych składników. Występujące części mineralne są bledsze (od koloru białego przez żółty, aż do jasno brązowego) od czystego węgla, który ma kolor od ciemno szarego do czarnego (barwa koloru pierwiastkowego węgla zależała od światła służącego do oświetlenia badanej cząstki). Widać też zasadniczą różnicę w strukturze węgla ze złóż bełchatowskich, a turowskich te ostatnie mają kształt bardziej podłużny i tworzą zwartą, jednorodną powierzchnię. Natomiast węgiel bełchatowski posiada bardziej okrągłą strukturę ziaren, na której można zaobserwować liczne pęknięcia [83].

Ze względu na zastosowanie w okularze mikroskopu kamery VGA, możliwa była ciągła obserwacja powierzchni węgla, co w połączeniu z grzałką oporową dało możliwość obserwacji zmiany cząstki węgla podczas procesu suszenia. Do badań wykorzystano węgiel o średnicy 2-4mm i temperaturę gorącego powietrza 90-100°C oraz powiększenie optyczne x20 i x50. Ziarno węgla było podgrzewane za pomocą grzałki oporowej przez ok. 3-5 minuty. Zdjęcia ziaren dla różnych wybranych charakterystycznych czasów suszenia przedstawiono kolejno na rysunkach 44-49. Do pierwszych trzech testów wykorzystano węgiel z Bełchatowa, a w czwartym węgiel z Turowa.



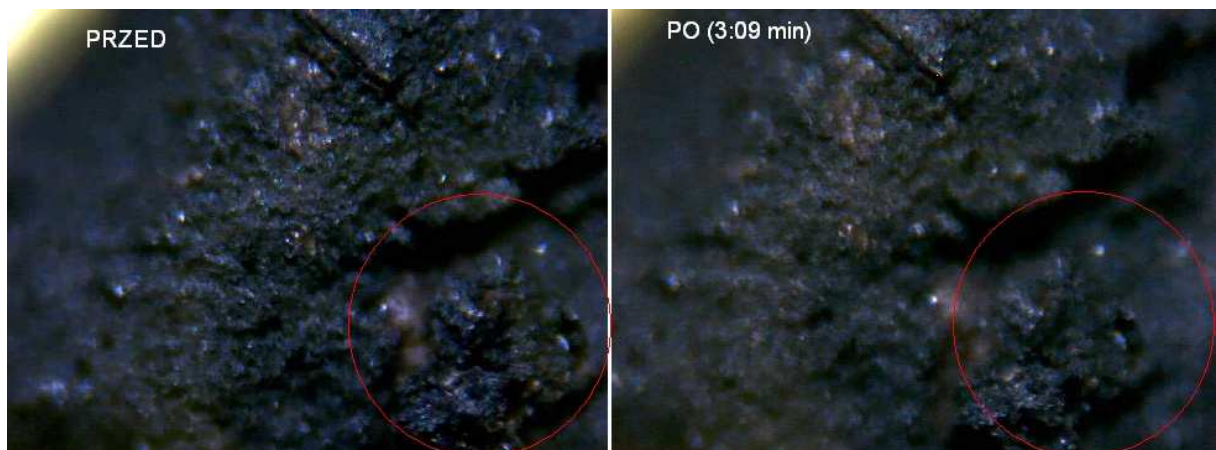
Rysunek 44. Węgiel z Bełchatowa, temperatura suszenia 90-100°C, czas suszenia 2:48 min, powiększenie x20

Dla 1-go badanego ziarna zauważalne zmiany były widoczne po około 2 minutach. Przede wszystkim zaobserwowano zmniejszanie się wystającej części węgla widoczne w lewym dolnym rogu oraz poszerzające się pęknięcie po środku badanej cząstki. Nieznacznie doszło do kurczenia się cząstki.



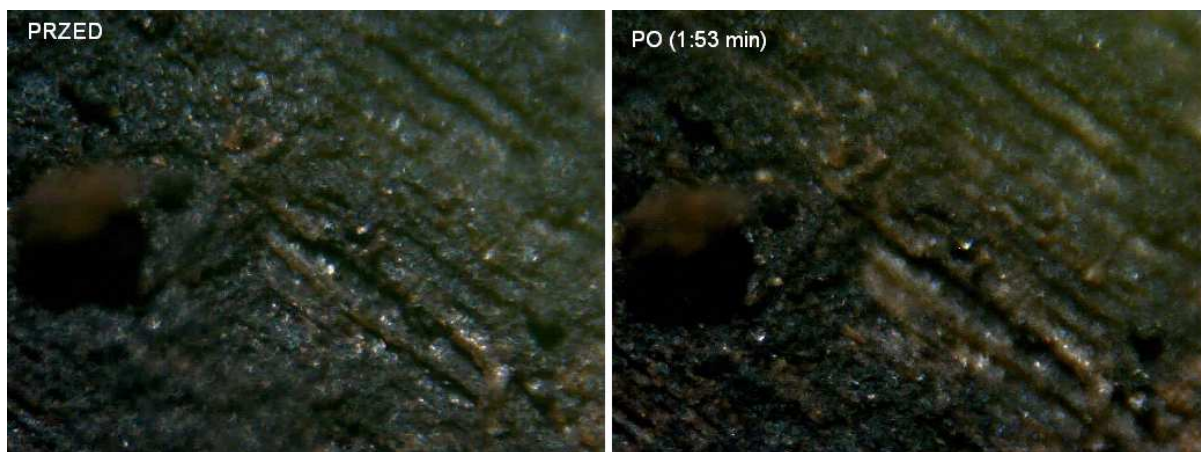
Rysunek 45. Węgiel z Bełchatowa, temperatura suszenia 90-100°C, czas suszenia 3:25 min, powiększenie x20

Dla 2-go badanego ziarna zauważalne zmiany były widoczne również po około 2 minutach. Widać powstałe liczne pęknięcia (zaznaczone czerwonymi kółkami), można także zaobserwować kurczenie się cząstki na skutek odparowania wody, widoczna jest także zmiana kolorów spowodowana odparowaniem wilgoci (kolor powierzchni węgla jaśniej).



Rysunek 46. Węgiel z Bełchatowa, temperatura suszenia 90-100°C, czas suszenia 3:09 min, powiększenie x50

Dla 3-go ziarna podobnie jak w dwóch poprzednich testach zmiany następowały po około 2 minutach. Podczas testu można było zaobserwować kurczenie się cząstki węgla zaznaczone czerwonym kółkiem. Nie zaobserwowano natomiast pęknięć powierzchni ziarna – najprawdopodobniej było to spowodowane zbyt krótkim czasem suszenia.



Rysunek 47. Węgiel z Turowa, temperatura suszenia 90-100°C, czas suszenia 1:53 min, powiększenie x50

Do 4-go testu wykorzystano ziarno z Turowa. Od samego początku było widać zmiany w kolorze cząstki, co może świadczyć o odparowywaniu wilgoci, niestety nie zauważono żadnych zmian w strukturze – najprawdopodobniej jest to związane z rodzajem struktury węgla turowskiego, która jest bardziej zbita.

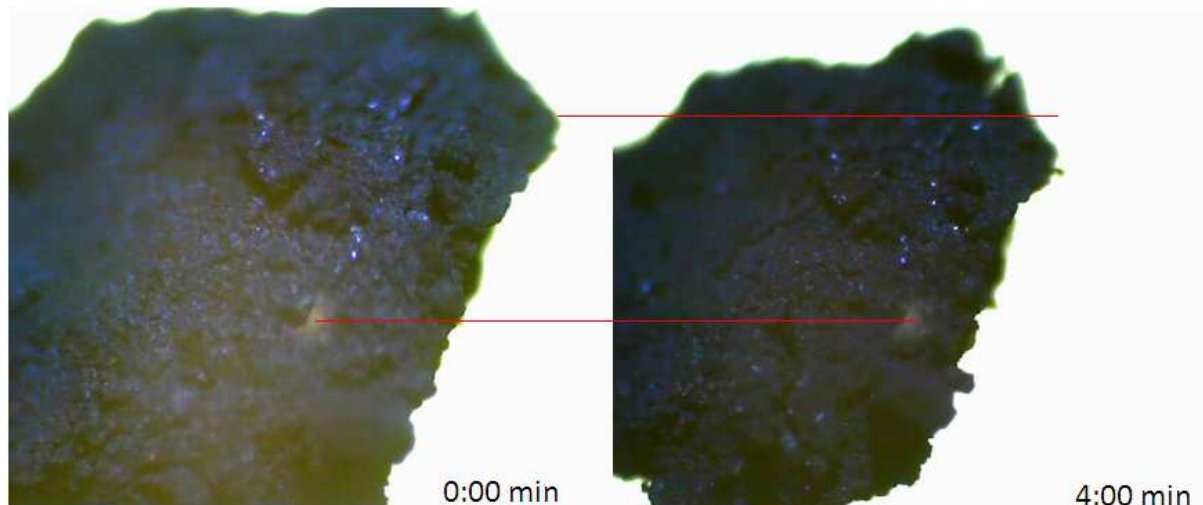
Do wykonania kolejnych testów zmniejszono temperaturę powietrza suszącego do 70°C. Przez co proces zachodził znacznie wolniej i można było zaobserwować więcej zmian. Przeprowadzone badania przedstawiono na rysunkach 48 i 49.



Rysunek 48. Węgiel z Bełchatowa, ziarno 2,0mm, temperatura suszenia 70°C, czas suszenia 15:00 min, powiększenie x20

Widoczne zmiany zaczęły zachodzić po około 1 minucie. Na początku można zaobserwować liczne pęknięcia oraz delikatne zmniejszanie się ziarna węgla. Po upływie około 4 minut doszło do gwałtownych pęknięć struktury. Natomiast po 6 minutach nastąpiło znaczne kurczenie się ziarna węgla i zasysanie do środka pęknięć. Proces trwał do około 12

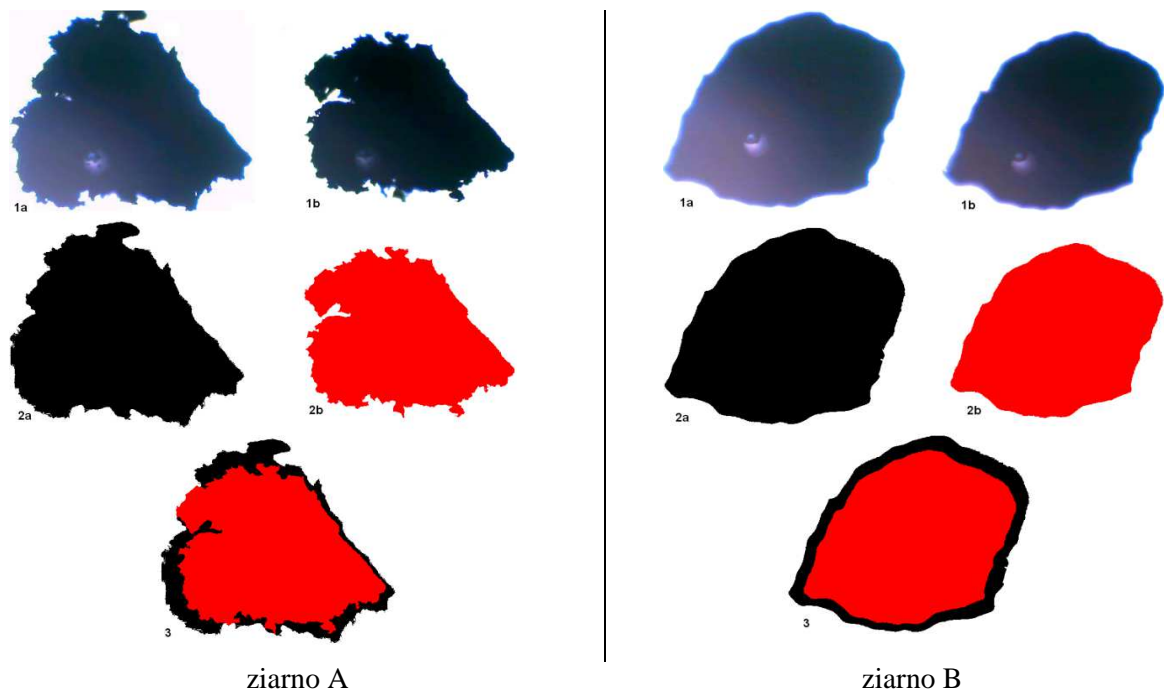
minut. Od 12 do 15 minuty nie były praktycznie zauważalne żadne zmiany – co może świadczyć o całkowitym wysuszeniu badanego materiału.



Rysunek 49. Węgiel z Bełchatowa, ziarno 0,4 mm, temperatura suszenia 70°C, czas suszenia 4:00 min, powiększenie x20

Test przebiegał bardzo podobnie jak poprzedni. Tym razem została użyta mniejsza cząstka o średnicy 0,4 mm (w poprzednich testach średnice były rzędu 2,0-4,0 mm), co przyczyniło się do praktycznie natychmiastowych zmian w badanym ziarnie węgla oraz szybszego zakończenia procesu. Widoczne było kurczenie się cząstki oraz zapadanie się powierzchni w miejscach pęknięć.

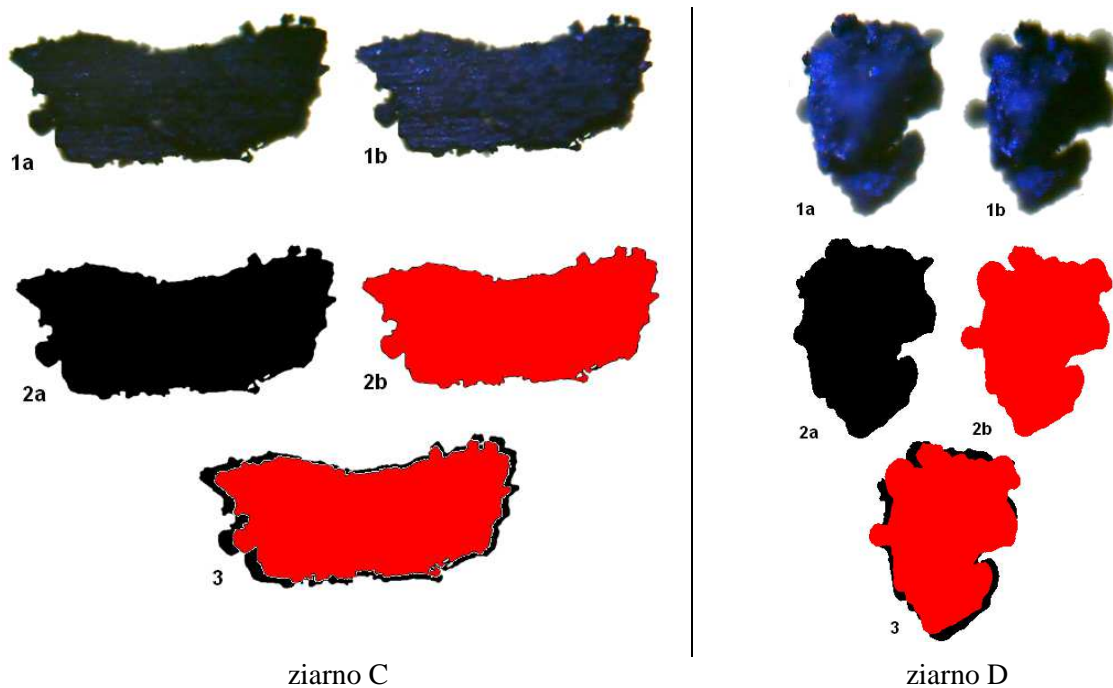
Następnie przeprowadzono analizę zdjęć z mikroskopu za pomocą specjalistycznych programów inżynierskich i graficznych (AutoCad, Micrografx Picture Publisher oraz GIMP) w celu określenia procentowego ubytku objętości podczas całkowitego wysuszenia węgla w temperaturze 60-70°C. Zostały wygenerowane szkice pól powierzchni węgla, a następnie określone ich pola powierzchni. Pole powierzchni było określone na podstawie wykonywanych zdjęć. Zmienną powierzchnię pokazano na rysunkach 50 i 51 dla węgla bełchatowskiego i turoszowskiego. Zostało także zrobione zdjęcie kwadratu o wymiarach 0,2x0,2mm, a następnie za pomocą programu GIMP zliczono ilość pikseli poszczególnych cząstek węgla i odniesiono do ilości pikseli kwadratu. Do obliczeń założono, że cząstka zmniejsza się w każdym kierunku tak samo, dzięki czemu możliwe było wykonanie analizy przestrzennej badanych węgli [81, 83].



Rysunek 50. Węgiel z Bełchatowa, ziarno ok. 0,2 mm, całkowite wysuszenie z wilgoci 54%, powiększenie x50

Tabela 17. Pola powierzchni i procentowy ubytek pola dla ziarna z Bełchatowa:

ziarno	zawartość wilgoci początkowej, %	pole przed suszeniem, mm ²	pole po suszeniu, mm ²	ubytek pola powierzchni, %
A	54	0,01770	0,013652	22,9
B	54	0,01911	0,014704	23,1



Rysunek 51. Węgiel z Turowa, ziarno ok. 0,2 mm, całkowite wysuszenie z wilgoci 41%, powiększenie x50

Tabela 18. Pola powierzchni i procentowy ubytek pola dla ziarna z Turowa:

ziarno	zawartość wilgoci początkowej, %	pole przed suszeniem, mm ²	pole po suszeniu, mm ²	ubytek pola powierzchni, %
C	41	0,0420	0,0359	14,5
D	41	0,0372	0,0347	6,5

Tabela 19. Podsumowanie ubytku pola powierzchni dla danych węgli:

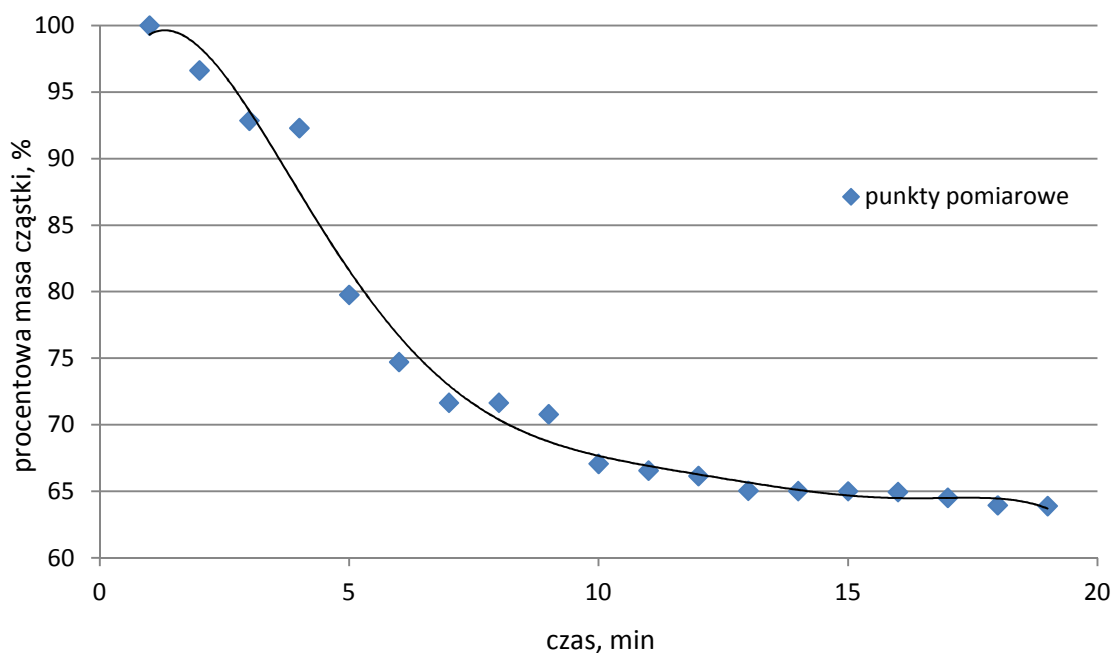
węgiel	zawartość wilgoci początkowej, %	średni ubytek wielkości ziarna, %	średni ubytek pola powierzchni na odparowanie 1% wody, %
Bełchatów	54	23,0	0,43
Turów	41	10,5	0,26

Procentowy ubytek pola powierzchni węgla bełchatowskich o zawartości wilgoci na poziomie 54% wyniósł średnio 23%. Natomiast w przypadku węgla turoszowskich o zawartości wilgoci równej 41% procentowy ubytek pola powierzchni wyniósł 10,5%. W przeliczeniu na usunięcie 1% wilgoci, procentowe pole powierzchni w przypadku węgla bełchatowskiego zmniejsza się o 0,43%, a turoszowskiego o 0,26%. Świadczy to o innej strukturze węgla, węgiel bełchatowski kurczy się w większym stopniu niż turoszowski. Przeprowadzone badania mają istotny wpływ na magazynowanie suszonego węgla oraz jego wykorzystywanie do spalania ze względu na zajmowaną objętość.

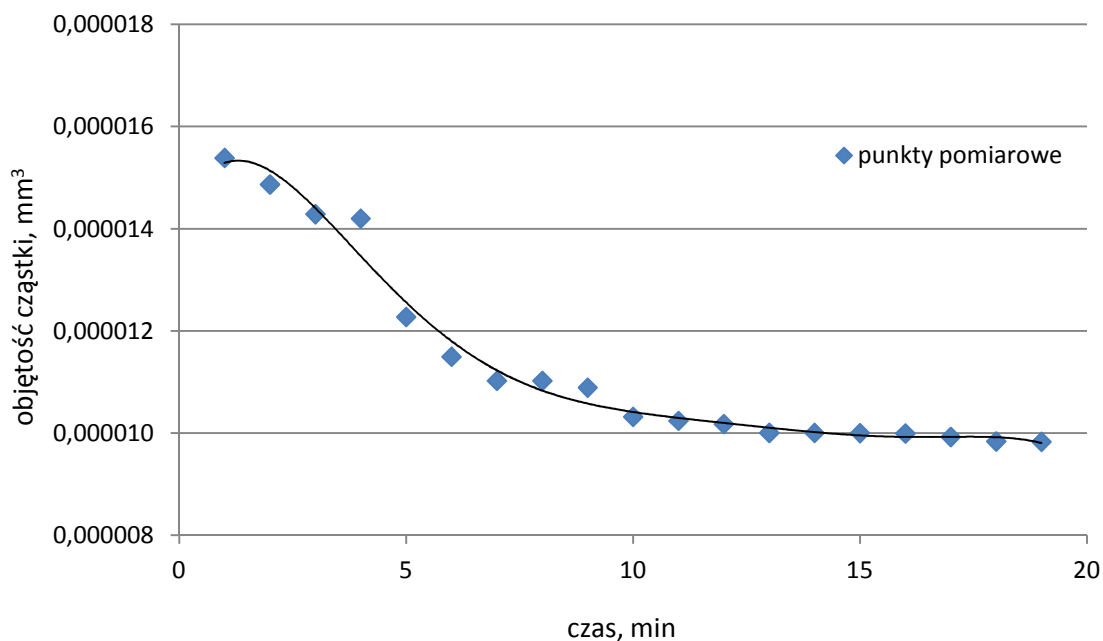
W celu oszacowania szybkości suszenia przeanalizowano zdjęcia próbek węgla, zrobione co 1 minutę. Wykorzystano węgiel z Bełchatowa o wielkości ziarna 0,2 mm i temperaturze procesu suszenia 70°C. Następnie wyniki przedstawiono na wykresach określających procentowy ubytek masy oraz objętości węgla.



Rysunek 52. Zdjęcie zmiany wielkości ziarna do całkowitego wysuszenia – zdjęcie robione co 1 min. Węgiel Bełchatowski, wielkość ziarna 0,2 mm



Rysunek 53. Wpływ czasu suszenia na procentową zmianę masy ziarna węgla. Węgiel Bełchatów, 0,2 mm, temperatura procesu 70°C



Rysunek 54. Wpływ czasu suszenia na objętościowy ubytek ziarna węgla. Węgiel Bełchatów, 0,2 mm, temperatura procesu 70°C

Na rysunkach 52-54 można zaobserwować zmiany ziarna węgla bełchatowskiego wynikające z procesu suszenia. Zmiany nie są liniowe i wynikają z różnej zawartości wilgoci w węglu. Widać, że proces przebiega w kilku fazach:

faza 0 – pierwsza minuta - nagrzanie cząstki węgla,

faza I – od 1 do 6 minuty - odparowanie wilgoci powierzchniowej (struktura węgla nie ulega zmianie),

faza II – od 6 do 12 minuty - odparowanie wilgoci związanej w kapilarach (następuje kurczenie oraz pękanie ziarna węgla),

faza III - powyżej 12 minuty - odparowanie wody związanej molekularnie (ziarno nieznacznie się kurczy).

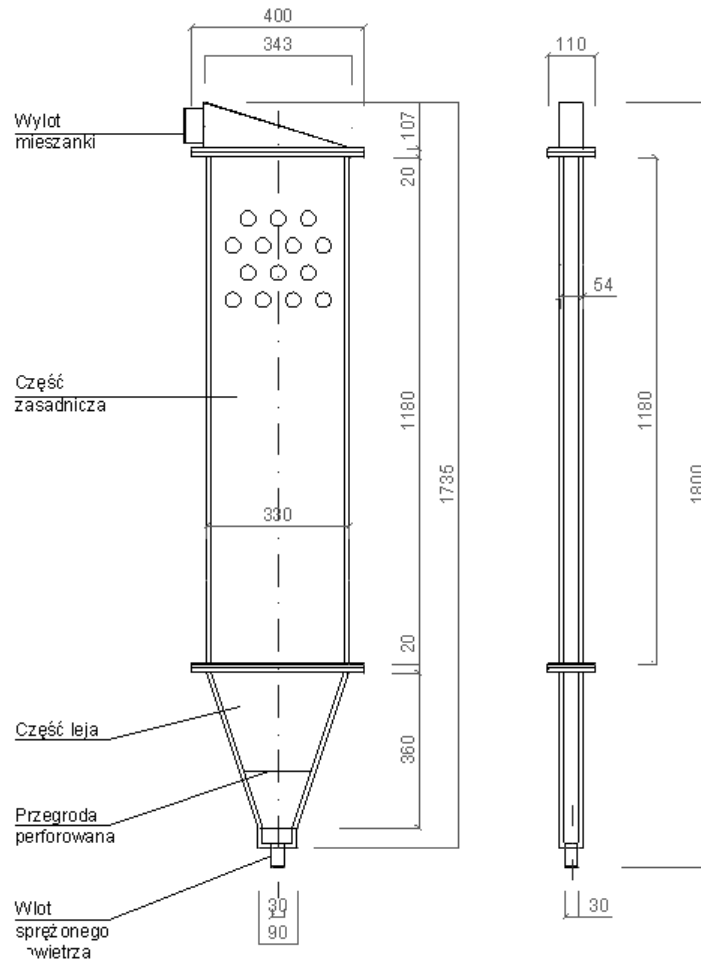
Przeprowadzone testy pokrywają się z wiedzą literaturową opisaną w rozdziale 3.1 Wpływ formy występowania wody w węglu brunatnym na proces suszenia [55, 83].

4. SUSZENIE FLUIDALNE NISKOTEMPERATUROWE

Do badań suszenia fluidalnego niskotemperaturowego zostały skonstruowane dwa rodzaje suszarek – suszarka fluidalna pęcherzykowa oraz suszarka fluidalna fontanna. Instalacje zostały wykonane z pleksi w celu stałej obserwacji zachowania się złoża oraz zachodzących zmian podczas procesu suszenia fluidalnego. Umożliwiło to przeprowadzenie szeregu wielowariantowych badań z zakresu kształtowania się złoża fluidalnego ze względu na kształt komory suszącej. Suszarki zostały wyposażone w pełen sprzęt pomiarowy umożliwiający w sposób ciągły pomiar poboru mocy elektrycznej, przepływu czynnika suszącego, ciśnienia, wilgotności względnej oraz temperatury, w kluczowych miejscach suszarek fluidalnych. Na podstawie pomiarów została określona kinetyka procesu suszenia oraz zużycie energii [84].

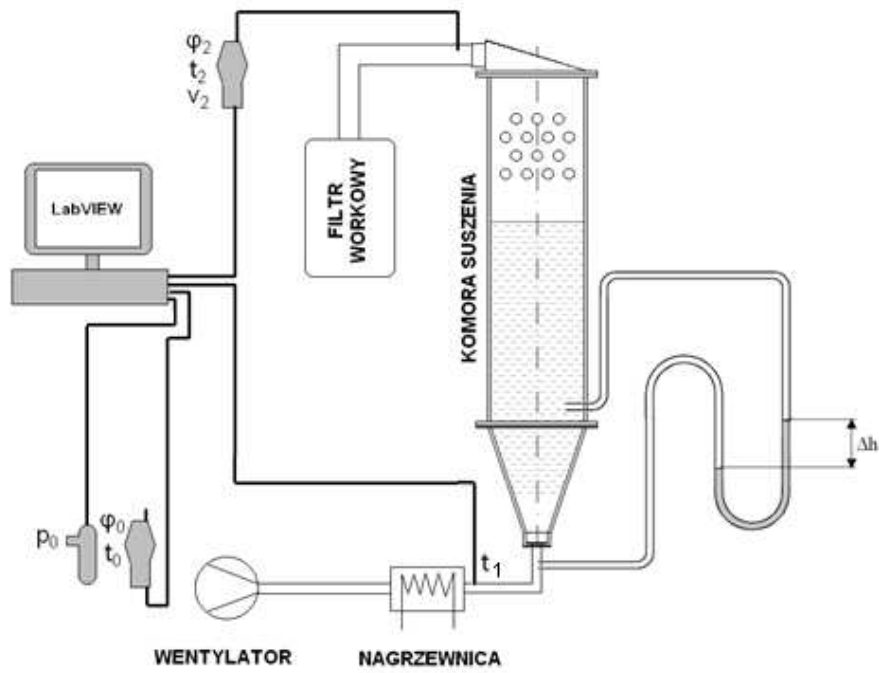
4.1 Opis stanowiska eksperymentalnego - suszarka fluidalna pęcherzykowa

Pierwsze stanowisko składa się z suszarki fluidalnej pęcherzykowej, urządzeń pomocniczych i aparatury pomiarowej. Zastosowano suszarkę fluidalną pęcherzykową o wymiarach: wysokość 1180 mm, szerokość 330mm i głębokość 54 mm oraz pojemności czynnej komory suszenia 21 dm³. Do badań komora była zasypywana węglem o ziarnistości z przedziału 0,4-6,3 mm i masie 0,7 kg, a średnia gęstość złoża fluidalnego wynosiła 0,033 dm³/kg. Schemat suszarki i stanowiska oraz zdjęcia instalacji przedstawiono na rysunkach 55-57 [84].



Rysunek 55. Schemat suszarki fluidalnej pęcherzykowej [85]

W stanowisku badawczym gorące powietrze poprzez rury kierowane jest na komorę suszenia fluidalnego. Węgiel brunatny wprowadzany jest do komory poprzez ściągnięcie górnej części suszarki, a odbierany poprzez zdjęcie przedniej szyby wykonanej z pleksi. Powietrze opuszczające suszarkę kierowane jest rurą do filtra workowego [85].



Rysunek 56. Schemat stanowiska suszarki fluidalnej pęcherzykowej [85]



Rysunek 57. Zdjęcia suszarki fluidalnej pęcherzykowej wraz z aparaturą pomiarową

Suszarka fluidalna pęcherzykowa wyposażona jest w urządzenia pomocnicze. Należy do nich wentylator promieniowy WP-7,6/3F oraz nagrzewnica kanałowa DH 125/09. Wydajność urządzeń może być zmienna poprzez zastosowanie falownika i specjalnego programu sterującego.

Tabela 20. Dane techniczne urządzeń pomocniczych w suszarce fluidalnej pęcherzykowej [86, 87]:

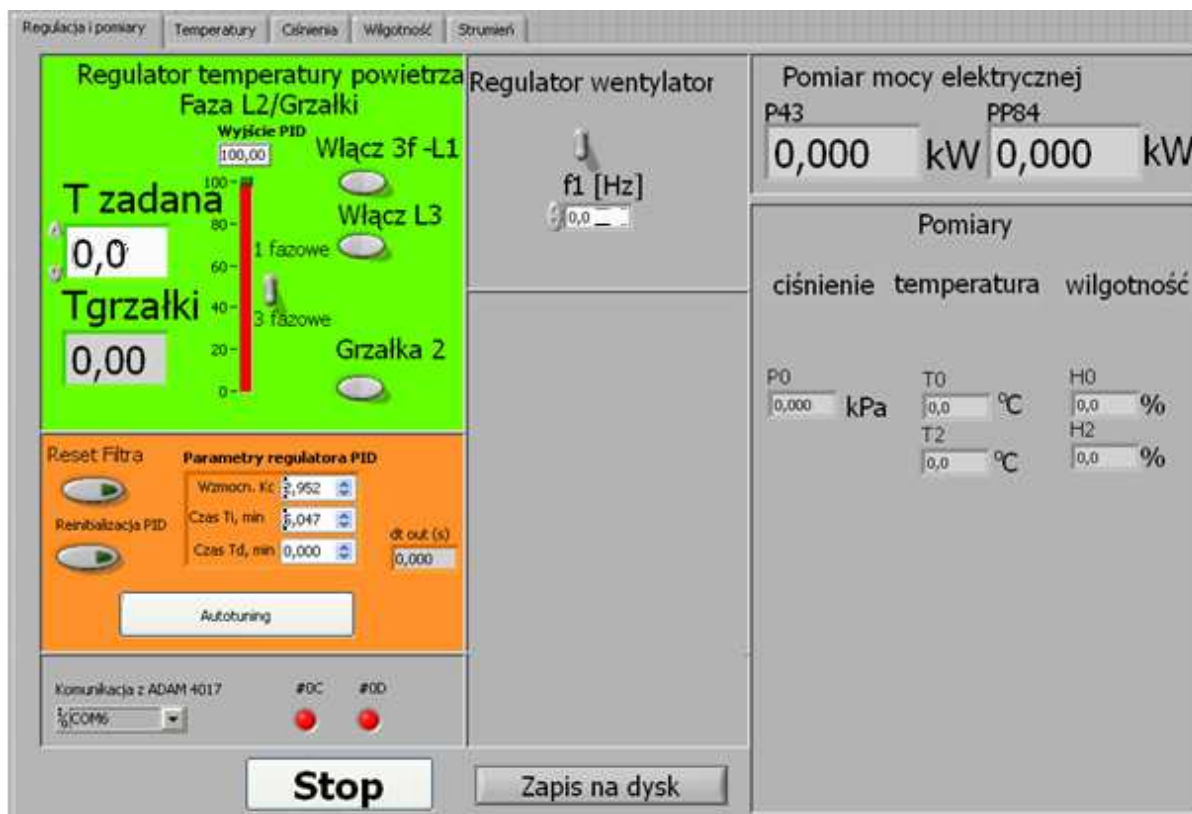
Wentylator promieniowy WP-7,6/3F	
wydajność	720 m ³ n/h
spręż dyspozycyjny	2 000 Pa
obroty	2 900 1/min
moc elektryczna	0,55 kW
zasilanie	3 x 400 V
otwór wylotowy wentylatora	73 mm
Nagrzewnica kanałowa DH 125/12	
ilość elementów grzejnych	4x300 W
maksymalna moc grzewcza	1,2 kW
zasilanie	230 V

Stanowisko wyposażono aparaturą do pomiaru temperatury, wilgotności względnej oraz prędkości przepływu za pomocą wielofunkcyjnego przyrządu pomiarowego Testo 435. Ciśnienia mierzono za pomocą przetwornika ciśnienia PC-28 PD i pomiaru różnicy ciśnień pomiędzy kanałem dolotowym, a komorą suszenia za pomocą U-rurki wypełnioną wodą. Parametry czynnika suszącego były mierzone na wlocie do suszarki i wylocie z komory suszenia.

Tabela 21. Dane techniczne aparatury pomiarowej w suszarce fluidalnej pęcherzykowej [88, 89]:

Testo 435					
pomiar temperatury		pomiar wilgotności względnej		pomiar prędkości	
typ sondy	typ T (Cu-CuNi)	typ sondy	czujnik wilgotności	typ sondy	sonda wiatraczkowa
zakres pomiarowy	-200-400°C	zakres pomiarowy	0-100%	zakres pomiarowy	0-60 m/s
błąd pomiarowy	$\pm(0,2^{\circ}\text{C} + 0,3\%$ wartości pomiaru)	błąd pomiarowy	$\pm(0,2\% + 1\%$ wartości pomiaru)	błąd pomiarowy	$\pm(0,2 \text{ m/s} + 0,5\%$ wartości pomiaru)
dokładność	0,1°C	dokładność	0,1%	dokładność	0,1 m/s
przetwornik ciśnienia PC-28 PD					
zakres pomiarowy		90-110 kPa			
błąd podstawowy		$\pm(0,02 \text{ kPa} + 0,3\%)$			
zakres temperatur kompensacji		-10-80°C			
zakres temperatur pracy		-40-80°C			
sygnał wyjściowy		4-20 mA			
zasilanie		10,5-36 V			

Do rejestracji i zbierania danych zastosowano moduł komunikacji z komputerem za portu USB urządzenia Testo 435. Narzędziem programowym umożliwiającym akwizycję danych oraz sterowanie procesem było środowisko LabView. Sterowanie wydajnością wentylatorów nawiewnych realizowane było przemiennikami częstotliwości. Regulacja mocy grzałek nagrzewnic realizowana była sterowaniem dwupołożeniowym z modulacją szerokości impulsu PWM (rysunek 58) [85].

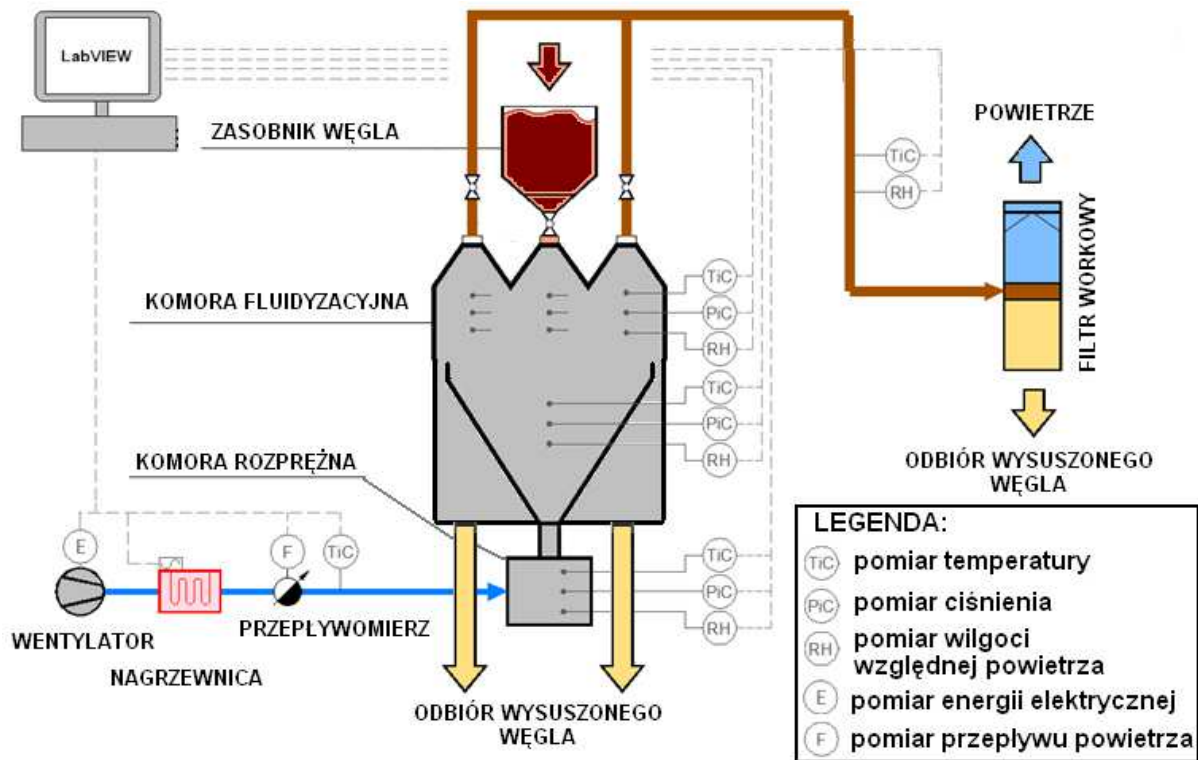


Rysunek 58. Screen z programu LabVIEW – panel do zarządzania suszarką fluidalną pęcherzykową [85]

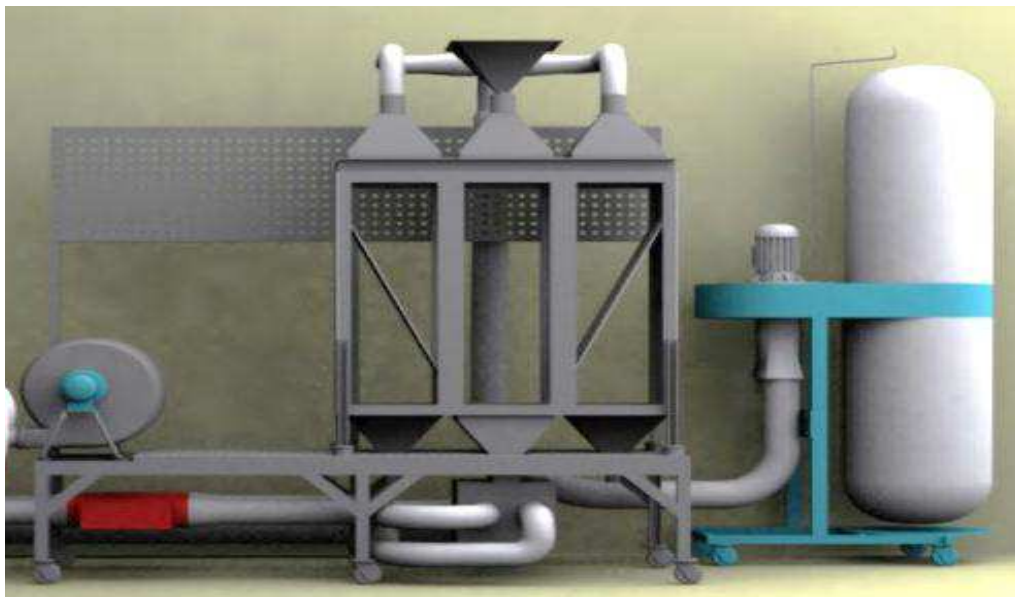
4.2 Opis stanowiska eksperymentalnego - suszarka fluidalna fontanna

Drugie stanowisko składa się z suszarki fluidalnej fontannowej, urządzeń pomocniczych i aparatury pomiarowej. Zastosowano suszarkę fluidalną fontannową o wymiarach: wysokość 1000 mm, szerokość 1050 mm i głębokość 350 mm. O pojemności komory suszenia 367 dm³, jednakże ze względu na zastosowanie powierzchni dodatkowych służących uzyskaniu złoża fontannowego powierzchnia czynna komory wynosiła 245 dm³ [85].

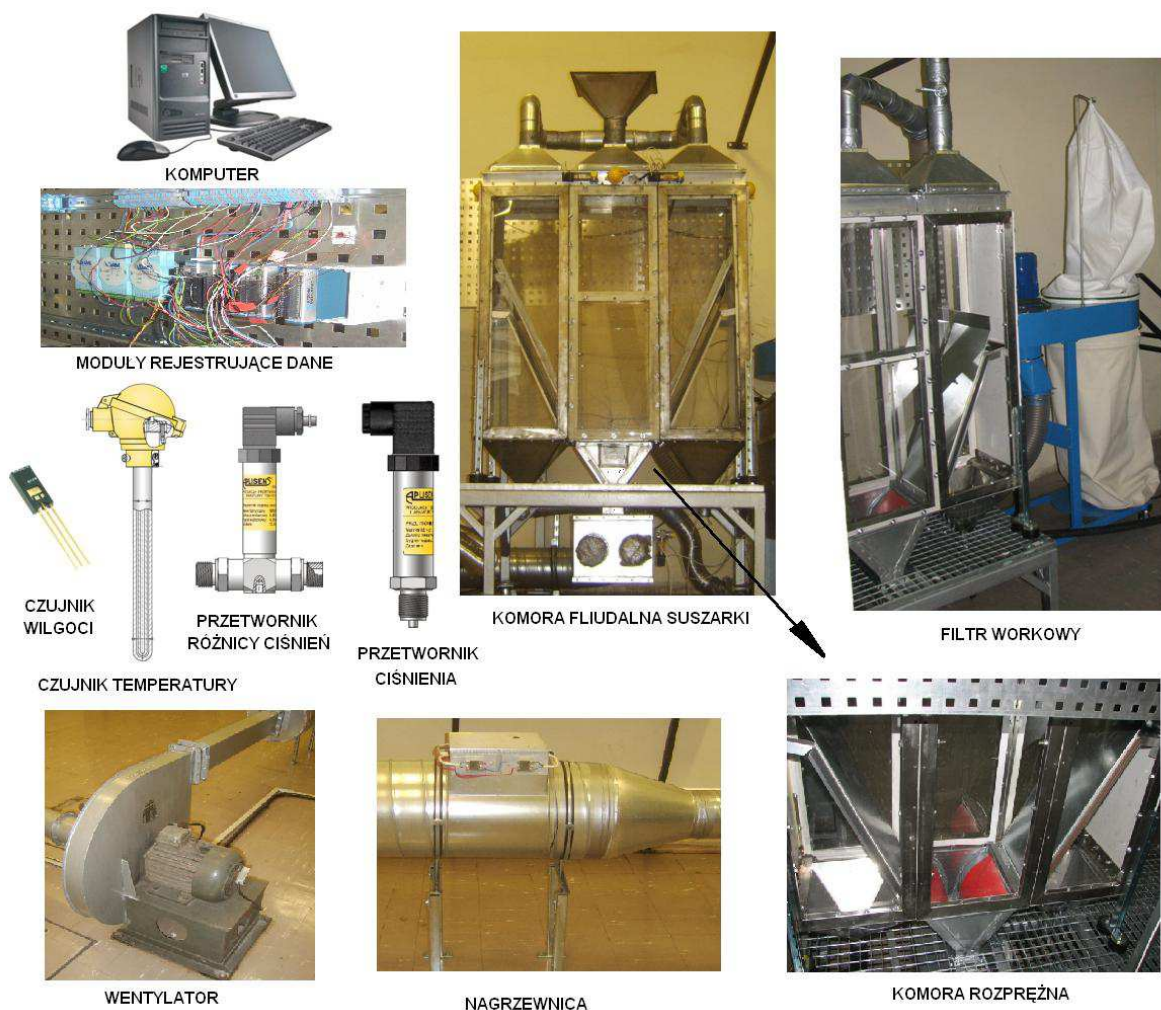
Badania prowadzono cyklicznie, komora suszarki była zasypywana węglem o ziarnistości z przedziału 0,0-8,0 mm i masie 8kg, stąd średnia gęstość złoża fluidalnego fontannowego była na poziomie 0,033 dm³/kg czyli tyle samo co w przypadku suszarki fluidalnej pęcherzykowej. Schemat suszarki i stanowiska oraz zdjęcia instalacji przedstawiono na rysunkach 59-61 [85].



Rysunek 59. Schemat stanowiska suszarki fluidalnej fontannowej [85]



Rysunek 60. Model instalacji suszącej fluidalnej fontannowej [85]



Rysunek 61. Zdjęcia suszarki fluidalnej fontannowej wraz z aparaturą pomiarową

W stanowisku badawczym powietrze za pomocą wentylatora promieniowego W14 kierowane jest na nagrzewnicę kanałową EN0-400-180, a następnie rurami do komory rozprężnej i na wlot do komory suszenia. Z komory suszenia powietrze kierowane jest do filtra workowego, gdzie osadzają się najdrobniejsze frakcje suszonego węgla. Węgiel podawany jest od góry przez specjalnie przygotowany podajnik zasypowy. Natomiast wysuszony węgiel odbierany jest z dolnej części suszarki za pomocą dwóch pojemników.

Tabela 22. Dane techniczne urządzeń pomocniczych w suszarce fluidalnej fontannowej [90, 91]:

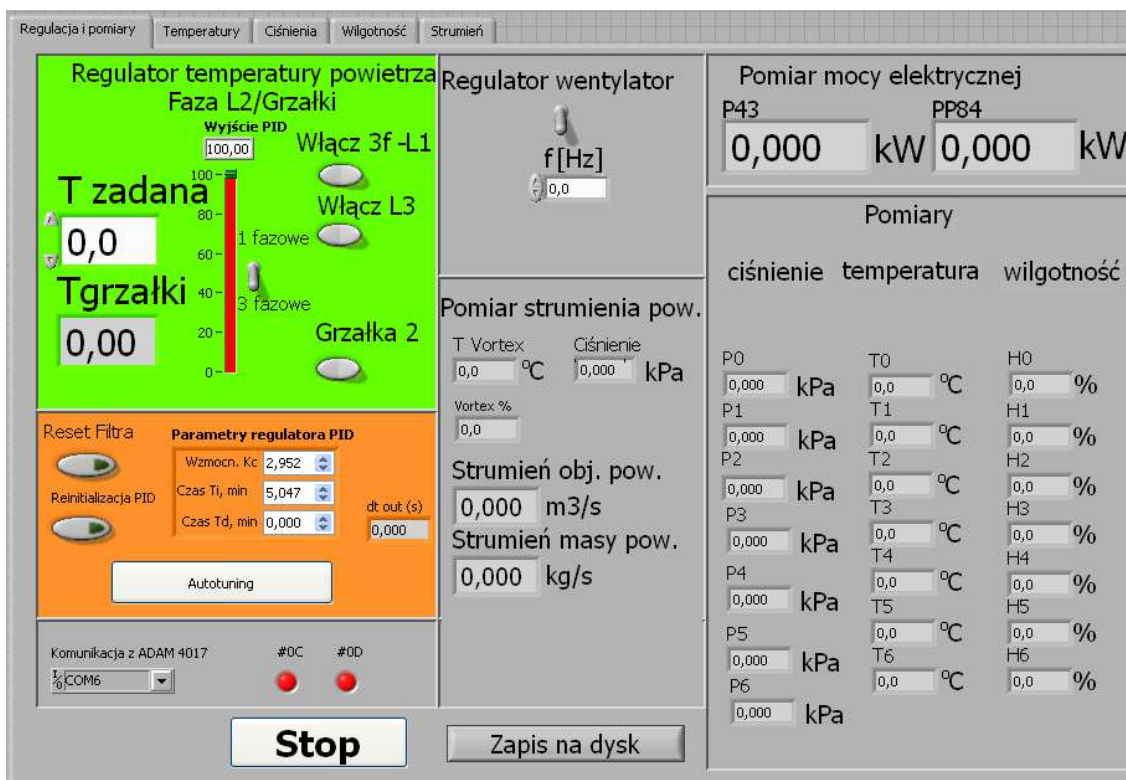
Wentylator wirowy odśrodkowy promieniowy W14	
wydajność objętościowa	22 m ³ /min
spręż wentylatora	600 mm/H ₂ O
obroty	2000 obr/min
otwór wylotowy wentylatora	160 mm
silnik elektryczny	SZJE 5,5 kW
zasilanie	3 x 400 V
Elektryczna nagrzewnica kanałowa EN0-400-180-3-A	
maksymalna moc grzewcza	18,0 kW
minimalny przepływ powietrza	680 m ³ /h
zasilanie	3x400 V

Stanowisko laboratoryjne zostało wyposażone w aparaturę pomiarową do pomiaru temperatury, wilgotności względnej oraz prędkości przepływu za pomocą wielofunkcyjnego przyrządu pomiarowego Testo 435. Ciśnienie było mierzone za pomocą przetwornika ciśnienia PC-28 PD, a różnica ciśnień pomiędzy kanałem dolotowym, a komorą suszenia za pomocą przetwornika różnicy ciśnień PR-28. Parametry czynnika suszącego były mierzone na wlocie do suszarki i wylocie z komory suszenia. W komorze suszarki zainstalowano dodatkowo liczne urządzenia pomiarowe do ciągłej rejestracji danych. Temperatura była mierzona termometrami oporowymi typu CT-GBT, wilgoć powietrza pojemnościowymi czujnikami wilgoci typu HIH, ciśnienie za pomocą przetworników ciśnienia PC-28 PD, natomiast prędkość mierzona była przepływomierzem z sondą wiatraczkową [85].

Tabela 23. Dane techniczne aparatury pomiarowej w suszarce fluidalnej fontannowej [89, 92, 93, 94]:

Czujnik temperatury CT-GBT		Czujnik wilgoci HIH 4000-004	
zakres pomiarowy	-200-150°C	Tolerancja	±2%
		zakres pomiarowy	0-100%
błąd pomiarowy	±(0,2°C +0.3% wartości pomiaru)		
dokładność	0,1°C		
przetwornik ciśnienia PC-28 PD			
zakres pomiarowy	90-110 kPa		
błąd podstawowy	±(0,02 kPa + 0,3%)		
zakres temperatur kompensacji	-10-80°C		
zakres temperatur pracy	-40-80°C		
sygnał wyjściowy	4-20 mA		
zasilanie	10,5-36 V		
Przetwornik różnicy ciśnień PR-28			
zakres pomiarowy	0-5 kPa		
błąd podstawowy	±(0.02kPa + 0,4%)		
zakres temperatur kompensacji	0-70°C		
zakres temperatur pracy	-25-80°C		
sygnał wyjściowy	4-20 mA		
zasilanie	10,5-36 V		

Do rejestracji i zbierania danych wykorzystane zostały moduły ADAM oraz NI. Narzędziem programowym umożliwiającym akwizycję danych oraz sterowanie procesem było środowisko LabView. Sterowanie wydajnością wentylatorów nawiewnych realizowane było przemiennikami częstotliwości. Regulacja mocy grzałek nagrzewnic realizowana była sterowaniem dwupołożeniowym z modulacją szerokości impulsu PWM [85].



Rysunek 62. Screen z programu LabVIEW – panel do zarządzania suszarką fontannową [85]

4.3 Metodyka badawcza

Układ pomiarowy suszarek pozwolił na rejestrowanie danych w sposób ciągły „on-line” co 6 sekund, ze względu na bezwładność urządzeń pomiarowych. Rejestrowano ciśnienie, temperaturę oraz wilgotność względną powietrza przed i za suszarką. Dodatkowo mierzono prędkość czynnika suszącego oraz zużycie energii elektrycznej na pracę wentylatorów i nagrzewnic. Do obliczeń przyjęto, że w złożu fluidalnym wilgoć z węgla brunatnego dyfunduje do powietrza fluidyzacyjnego, i temperatura powietrza w pomieszczeniu podczas badań nie ulega zmianom oraz pełną szczelność suszarek (strumień powietrza na wlocie i wylocie z suszarki jest taki sam). Pomiar zużycia energii został podzielony na dwie składowe. Ponieważ suszarki fluidalne wykorzystują dwa rodzaje energii - energię cieplną i kinetyczną. Pierwsza składowa dotyczy energii cieplnej - czyli nagrzewnicy elektrycznej, natomiast druga energii elektrycznej wentylatora, służącego do wytworzenia złoża fluidalnego. Energia wentylatora przekłada się na energię kinetyczną złoża.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów zgodnie z normą EN ISO 13788:2001 wyliczono prężność pary nasyconej w funkcji temperatury oraz zawartość wilgotności bezwzględnej [78, 95].

Prężność pary nasyconej [95]:

$$p_{sat} = 610 \cdot e^{\frac{17.269 \cdot T}{237.5 + T}}, \text{ Pa} \quad \text{dla } T \geq 0^\circ\text{C} \quad (9)$$

Zawartość wilgotności bezwzględnej w powietrzu z uwzględnieniem mierzonej wilgotności względnej [95]:

$$X = 0.622 \frac{\varphi \cdot p_{sat}}{p - \varphi \cdot p_{sat}}, \text{ kg/m}^3 \quad (10)$$

gdzie:

φ – wilgotność względna powietrza, %,

p – ciśnienie powietrza wilgotnego w przybliżeniu atmosferyczne, Pa,

p_{sat} – ciśnienie nasycenia pary wodnej, Pa.

Przyrost wilgotności w powietrzu odpowiadający ubytkowi zawartości wilgotności w węglu [95]:

$$\Delta X = 0.622 \cdot \left[\frac{\varphi_0 p_{sat0}}{p - \varphi_0 p_{sat0}} - \frac{\varphi_2 p_{sat2}}{p - \varphi_2 p_{sat2}} \right], \text{ kg/m}^3 \quad (11)$$

gdzie:

0, 2 – indeksy parametrów powietrza mierzone odpowiednio przed i za suszarką.

Strumień objętościowy powietrza określono za pomocą pomiaru prędkości.

$$V_{pow} = A \cdot v_{sr}, \text{ m}^3/\text{s} \quad (12)$$

gdzie:

A – przekrój poprzeczny kanału, m^2 ,

v_{sr} – prędkość średnia w kanale, m^3/s .

Dla określenia strumienia masowego użyto następującej zależności [95]:

$$V_{mas} = V_{pow} \cdot \rho(t), \text{ kg/s} \quad (13)$$

gdzie:

$\rho(t)$ – gęstość powietrza w danej temperaturze, kg/m^3 .

Znając przepływ ilości powietrza oraz przyrost wilgotności (ΔX) w czasie (Δt), wyliczono ile wody odparowało z węgla w danej jednostce czasu [95]:

$$w = \frac{\Delta X \cdot V_{pow}}{\Delta t}, \text{ kg} \quad (14)$$

Następnie znając masę węgla podaną do suszenia oraz jej zawartość wilgoci wyliczono procentowy udział zawartości wilgoci w węglu [95]:

$$W_r = W_{początkowe} - \frac{m_{węgla_m} - w}{m_{węgla_m}} \cdot 100\%, \quad \% \quad (15)$$

gdzie:

$W_{początkowe}$ - zawartość procentowa wody w węglu przed procesem suszenia, %,

$m_{węgla_m}$ - masa węgla mokrego, kg,

w - ilość usuniętej wilgoci z węgla, kg.

Wilgoć węgla była określana przed i po procesie suszenia według normy PN-80G-04511 [76]. Przez co była znana zawartość wilgoci podawanego surowca, natomiast wartość po suszeniu była konfrontowana z wartością wyliczoną z testu.

Wyliczono również zapotrzebowanie na energię do odparowania jednego kilograma wody z węgla brunatnego w danej jednostce czasu. Energię podzielono ze względu na energię cieplną (nagrzewnicy) oraz energię kinetyczną fluidyzacji (wentylatora). Zapotrzebowanie wyliczono na podstawie następujących równań [96, 97]:

Energia cieplna do odparowania 1 kg H₂O jest równa:

$$E_{H_2O_{ciep}} = \frac{P_{el_nagrz}}{\frac{\Delta m_{węgla}}{\Delta t}}, \text{ kJ/kg H}_2\text{O} \quad (16)$$

gdzie:

P_{el_nagrz} - energia elektryczna pracy nagrzewnicy była odczytywana z poborów, jednakże ze względu na możliwość porównania wyników przyjęto obliczeniową moc cieplną ze wzoru:

$$P_{el_nagrz} = V_{mas} \cdot C_{p_{pow}} \cdot (t_{proces} - t_{początkowa}), \text{ kW} \quad (17)$$

gdzie:

$C_{p_{pow}}$ - ciepło właściwe powietrza – przyjęto 1 kJ/kg·K,

t_{proces} - temperatura procesu suszenia,

$t_{początkowa}$ - temperatura powietrza (otoczenia) przyjęto średnią wartość na poziomie 15°C.

Energia elektryczna do napędu wentylatora (kinetyczna) do odparowania 1 kg H₂O jest równa:

$$E_{H_2O_{kinet}} = \frac{P_{el_{went}}}{\frac{\Delta m_{węgl}}{\Delta t}}, \text{ kJ/kg H}_2\text{O} \quad (18)$$

Wykorzystując powyższą procedurę obliczeniową przeprowadzono analizę parametrów procesu suszenia to jest: rodzaju suszarki fluidalnej (pęcherzykowej i fontannowej), rodzaju węgla (bełchatowski i turoszowski), wielkości ziaren węgla, czasu przebywania w komorze suszenia, temperatury czynnika suszącego, prędkości czynnika suszącego oraz temperatury początkowej węgla. W testach dokonywano zmiany jednego z parametrów, w celu oszacowania jego wpływu na szybkość suszenia oraz wielkość zużycia energii do procesu suszenia [96, 97].

Podana w literaturze zalecana wilgoć końcowa w przypadku suszenia węgla brunatnych za pomocą ciepła niskotemperaturowego określona jest na poziomie do 20%, dlatego w przypadku analiz określono ubytek wilgoci w węglu bełchatowskim o 10, 20 i 30%, natomiast w przypadku węgla turoszowskich o 10 i 20%. Na podstawie odparowanej wilgoci określono czas procesu suszenia, zużycie energii cieplnej potrzebnej do uzyskania odpowiedniej temperatury czynnika suszącego i zużycie energii elektrycznej potrzebnej na wytworzenie i utrzymanie złoża fluidalnego [97].

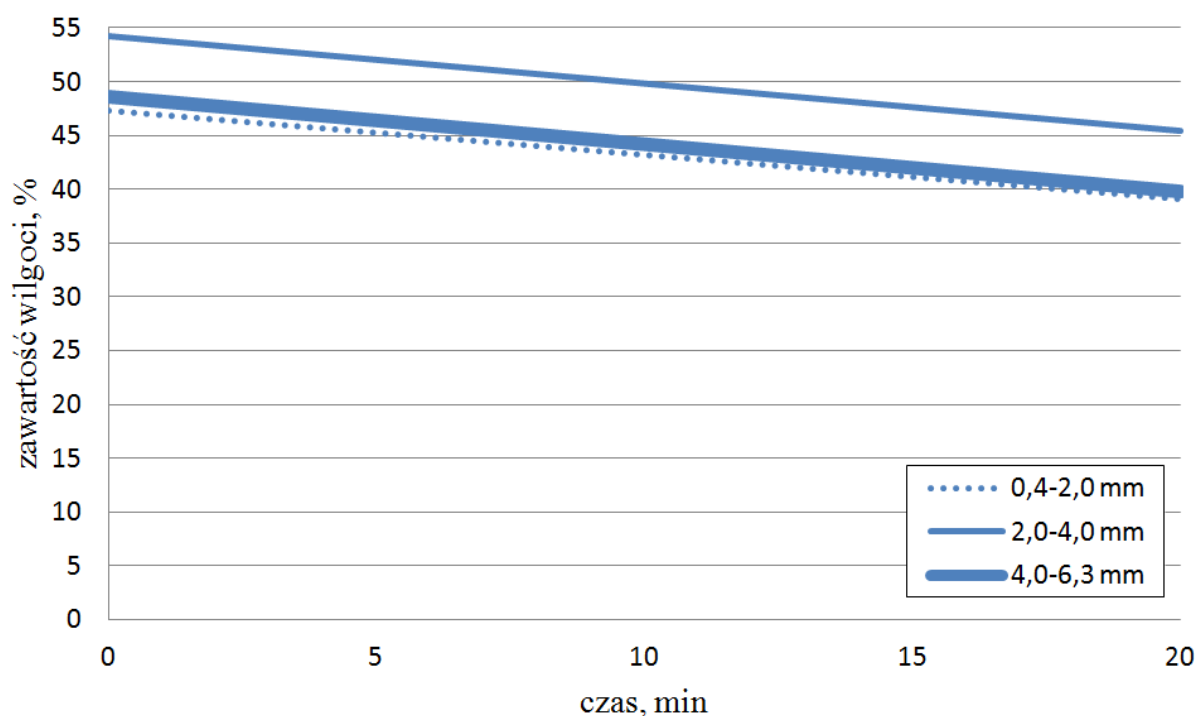
4.4 Wyniki badań eksperymentalnych

Rezultaty badań suszenia w złożu fluidalnym przedstawiono poniżej badając: wpływ wielkości ziarna, prędkości czynnika suszącego, temperatury początkowej węgla, temperatury czynnika suszącego oraz rodzaju złoża fluidalnego. Ze względu na odmienność złożów fluidalnych w przypadku złoża pęcherzykowego nie mogą być suszony węgiel o dużej różnicy objętości ziaren ze względu na pracę złoża, która musi być równomierna. Dlatego wykorzystywano ziarna z zakresów: 0,4-2,0 mm, 2,0-4,0 mm i 4,0-6,3 mm. W przypadku złoża fontannowego można zastosować większy zakres wielkości ziarna, w omawianym przypadku wynosił on 0,0-8,0 mm. W suszarce fluidalnej pęcherzykowej testy trwały 60 minut przy użyciu gorącego powietrza, o temperaturach na wlocie do suszarki: 27°C, 35°C i 50°C. W przypadku suszarki fluidalnej fontannowej testy trwały 75 minut przy użyciu gorącego powietrza, o temperaturach na wlocie do suszarki: 27°C, 35°C, 50°C, 60°C i 70°C.

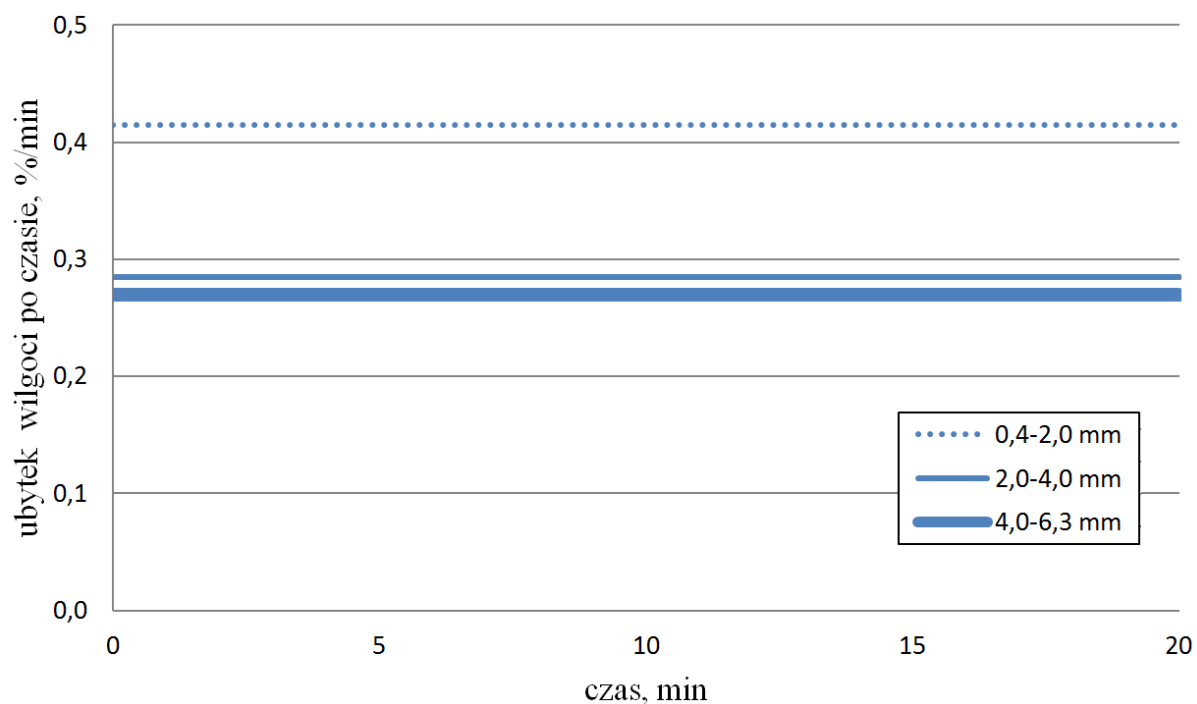
4.4.1 Wpływ wielkości ziarna węgla na proces suszenia

Jednym z parametrów wpływających na pracę suszarek fluidalnych jest rozkład ziarnowy suszonego węgla. Ma on decydujący wpływ na prędkość fluidyzacji, a przez to i zużycie energii cieplnej i elektrycznej. W testach zbadano również wpływ wielkości ziarna na ubytek wilgoci podczas suszenia.

Na rysunkach 63-66 przedstawiono wyniki eksperymentów dla węgla bełchatowskiego suszonego w złożu fluidalnym pęcherzykowym. Do testów użyto powietrza suszącego o temperaturze 27°C, czas suszenia wynosił 20 minut przy rozkładzie ziarnowym z przedziału 0,4-2,0 mm, 2,0-4,0 mm i 4,0-6,3 mm i odpowiednio prędkości czynnika suszącego na wlocie do suszarki 4,2 m/s, 6,5 m/s i 9,1 m/s. Określono wpływ wielkości ziarna węgla na zawartość wilgoci, kinetykę suszenia oraz zużycie energii cieplnej i elektrycznej.



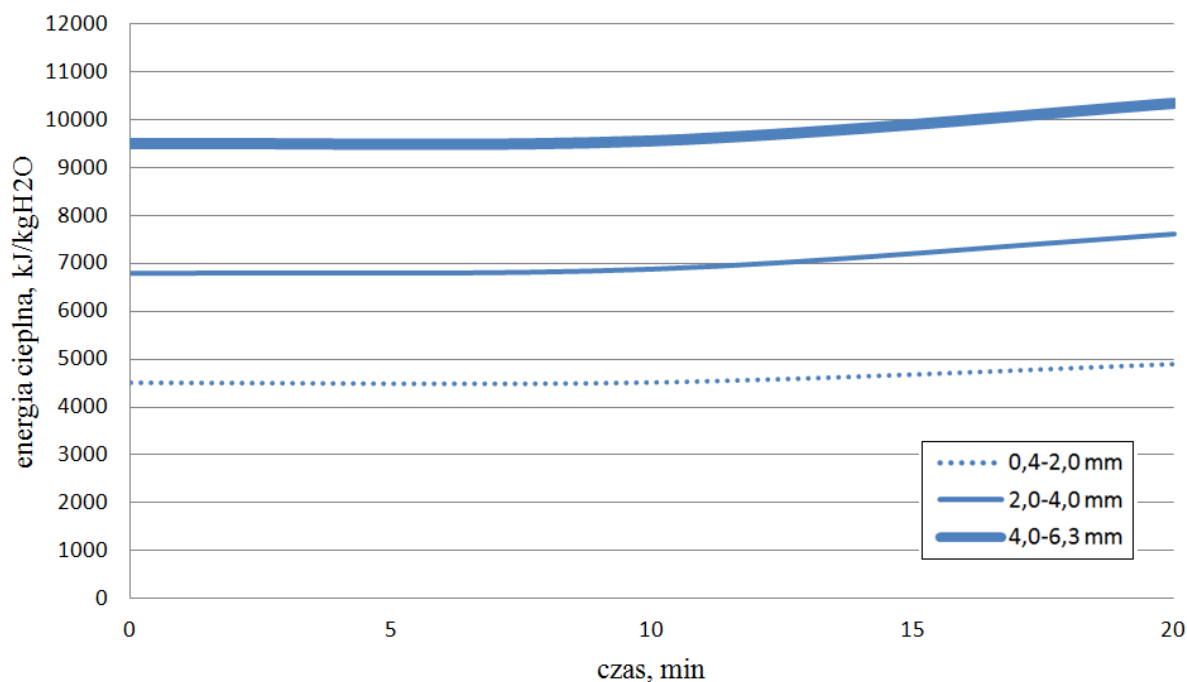
Rysunek 63. Wpływ wielkości ziarna węgla na zawartość wilgoci – węgiel z Bełchatowa, złożo pęcherzykowe



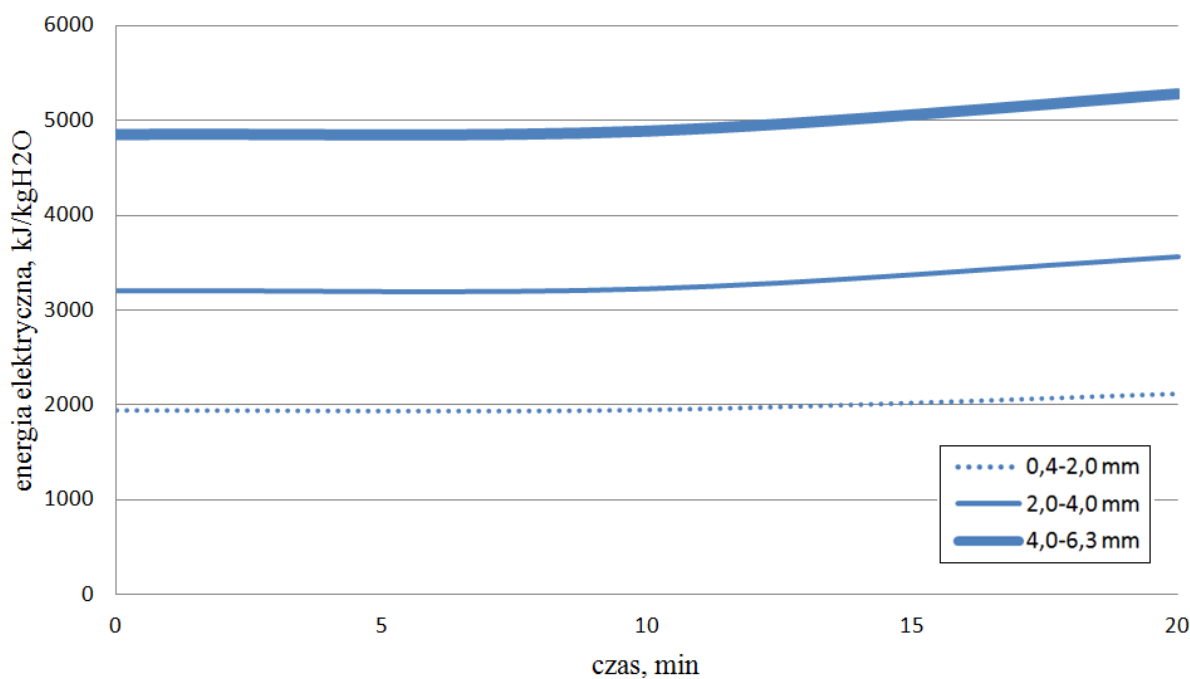
Rysunek 64. Wpływ wielkości ziarna węgla na kinetykę suszenia – węgiel z Bełchatowa, złożę pęcherzykowe

Tabela 24. Analiza wilgoci dla węgla z Bełchatowa dla różnych wielkości ziaren:

Węgiel bełchatowski				
ziarno	wilgoć przed suszeniem	wilgoć po suszeniu	ubytek wilgoci	dw/dt
	%	%	%	%/min
0,4-2,0 mm	47,36	39,06	8,30	0,415
2,0-4,0 mm	54,23	45,43	8,80	0,285
4,0-6,3 mm	48,54	39,77	8,77	0,275



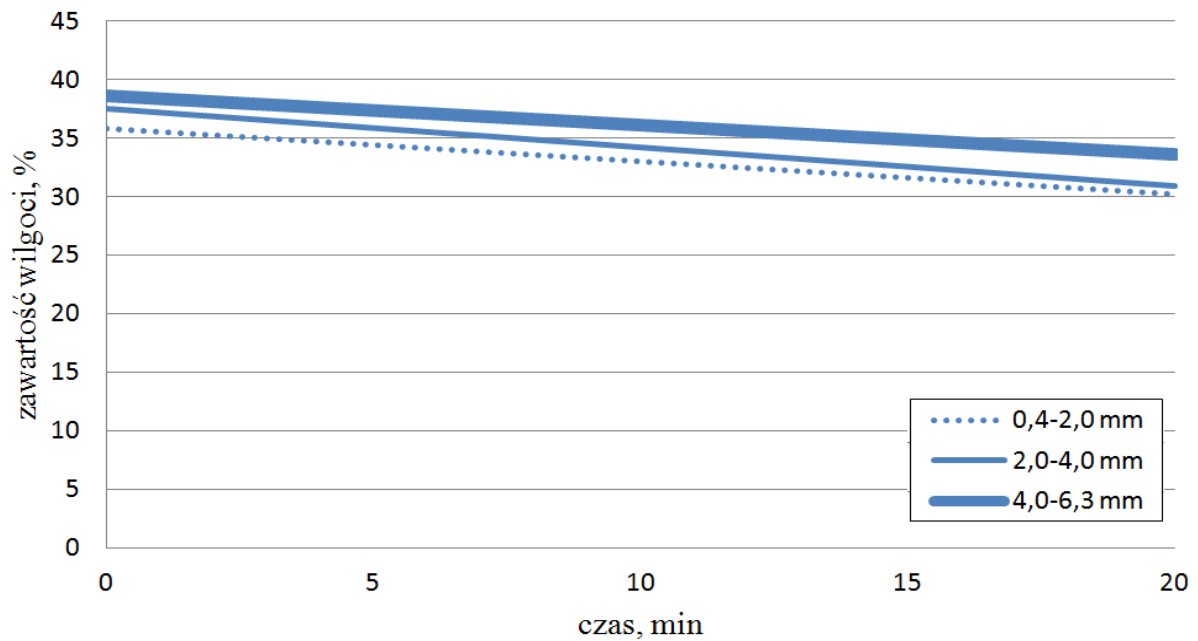
Rysunek 65. Wpływ wielkości ziarna węgla na zużycie energii cieplnej – węgiel z Bełchatowa, złożę pęcherzykowe



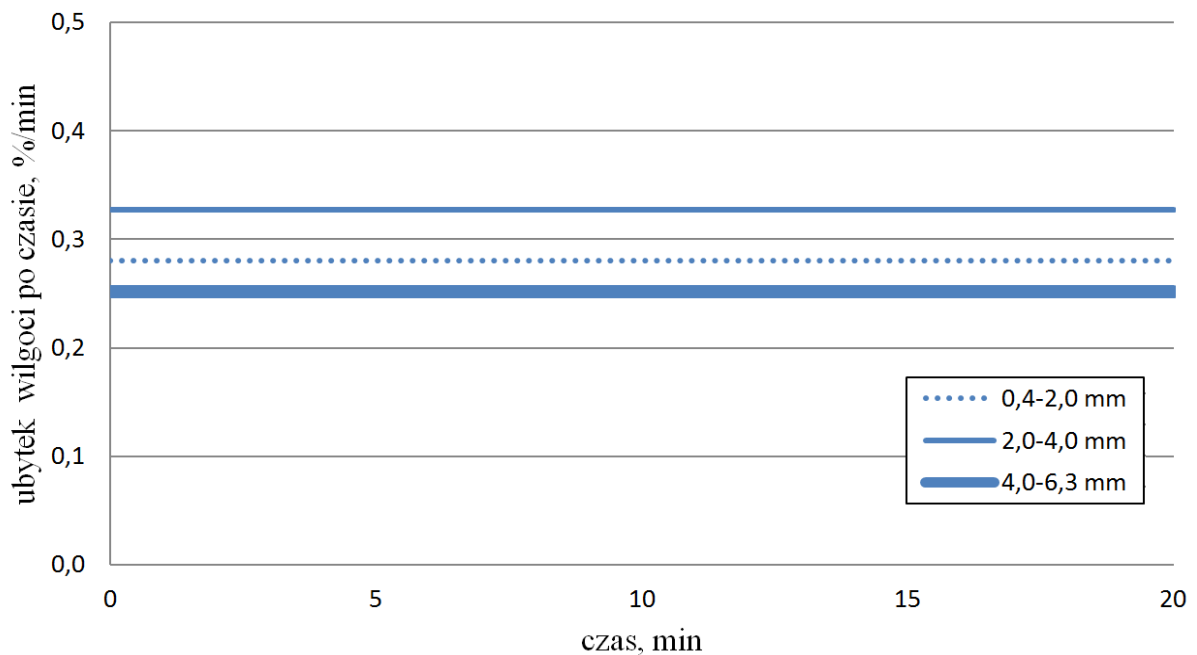
Rysunek 66. Wpływ wielkości ziarna węgla na zużycie energii elektrycznej – węgiel z Bełchatowa, złożę pęcherzykowe

Na rysunkach 67-70 przedstawiono wyniki eksperymentów dla węgla turowskiego suszonego w złożu fluidalnym pęcherzykowym. Do testów użyto powietrza suszącego o temperaturze 27°C, czas suszenia wynosił 20 minut przy rozkładzie ziarnowym z przedziału

0,4-2,0 mm, 2,0-4,0 mm i 4,0-6,3 mm i odpowiednio prędkości czynnika suszącego na wlocie do suszarki 2,8 m/s, 5,9 m/s i 8,0 m/s. Określono wpływ wielkości ziarna węgla na zawartość wilgoci, kinetykę suszenia, zużycie energii cieplnej i elektrycznej. Wyniki przedstawiono w tabeli 25.



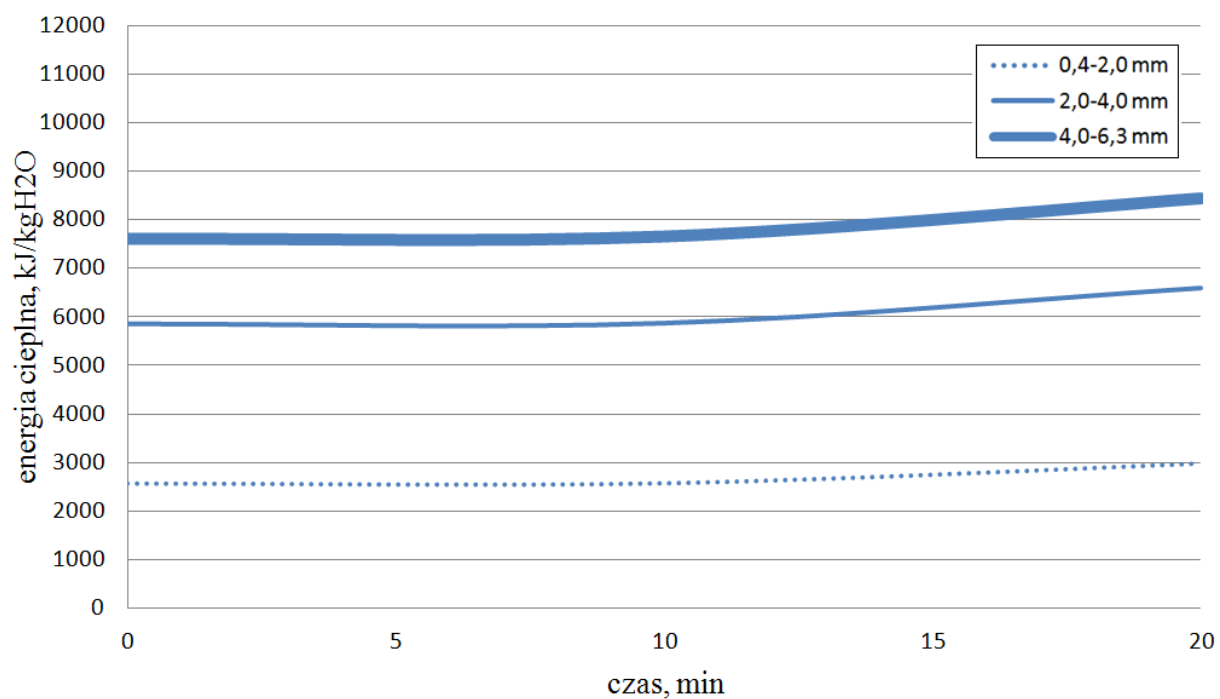
Rysunek 67. Wpływ wielkości ziarna węgla na zawartość wilgoci – węgiel z Turowa, złożę pęcherzykowe



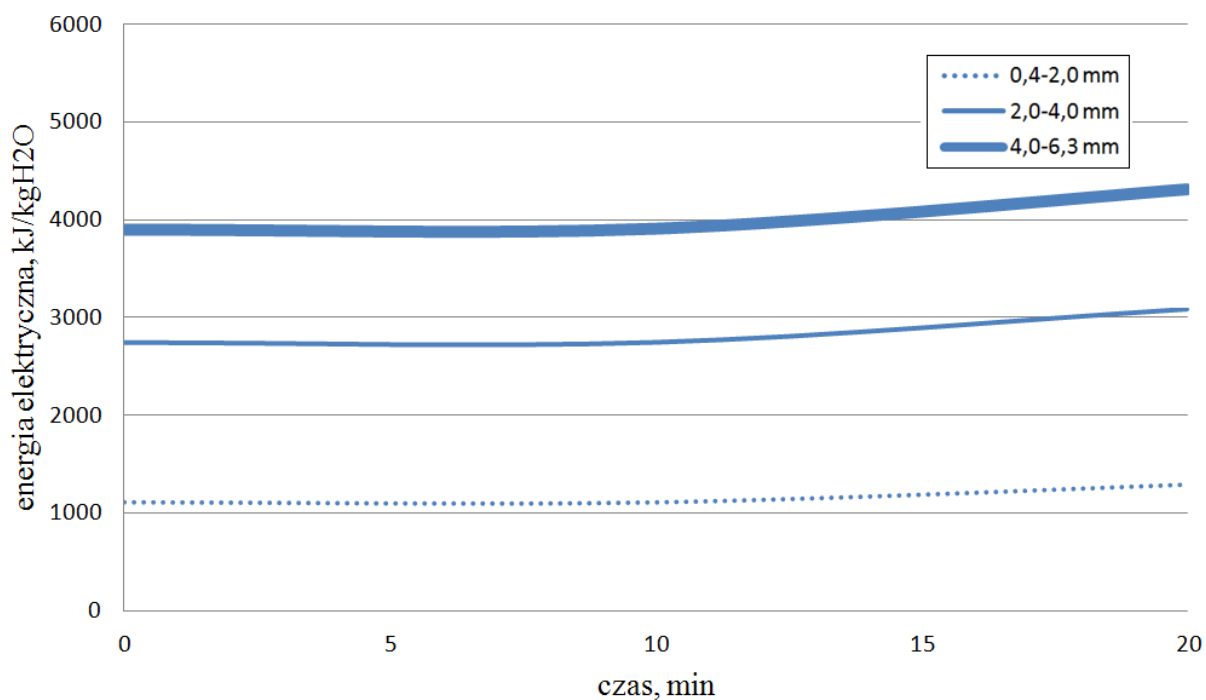
Rysunek 68. Wpływ wielkości ziarna węgla na kinetykę suszenia – węgiel z Turowa, złożę pęcherzykowe

Tabela 25. Analiza wilgoci dla węgla z Turowa dla różnych wielkości ziaren:

Węgiel turowski				
ziarno	wilgoć przed suszeniem	wilgoć po suszeniu	ubytek wilgoci	dw/dt
	%	%	%	%/min
0,4-2,0 mm	35,83	30,22	5,61	0,281
2,0-4,0 mm	37,5	30,95	6,55	0,328
4,0-6,3 mm	38,62	33,58	5,04	0,252

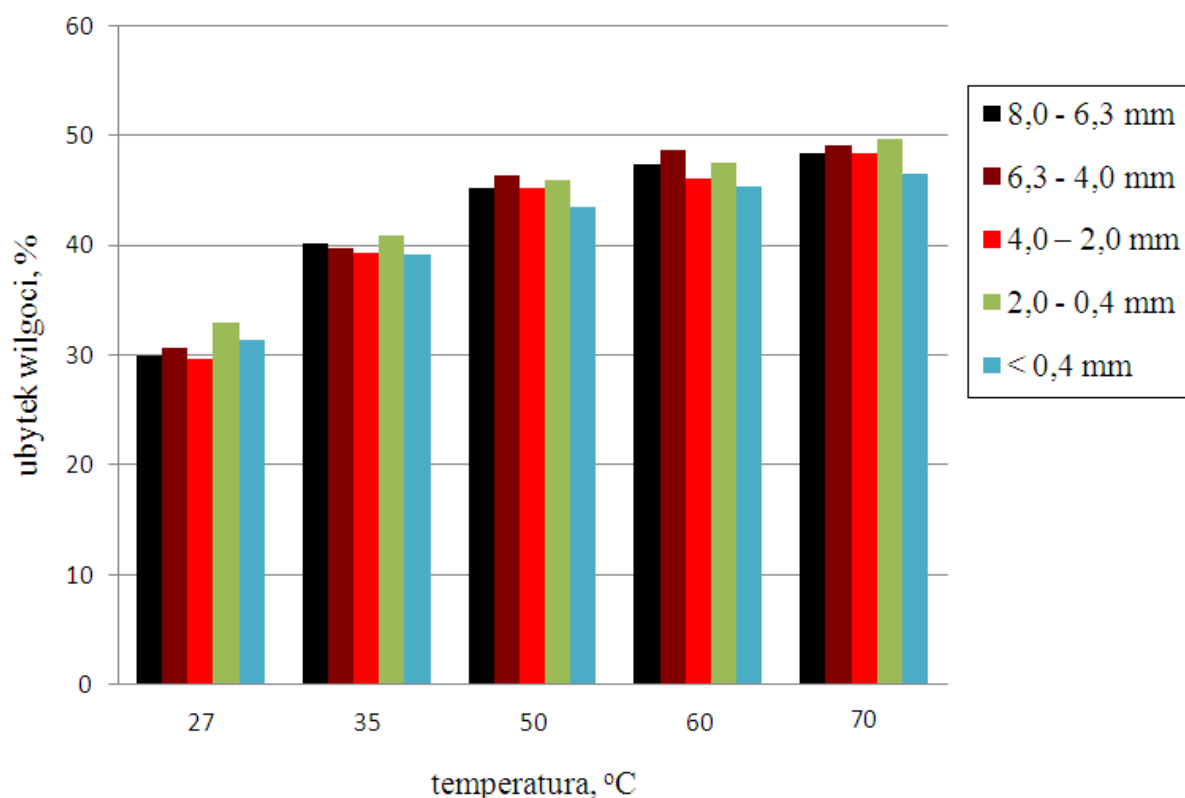


Rysunek 69. Wpływ wielkości ziarna węgla na zużycie energii cieplnej – węgiel z Turowa, złożę pęcherzykowe



Rysunek 70. Wpływ wielkości ziarna węgla na zużycie energii elektrycznej – węgiel z Turowa, złożę pęcherzykowe

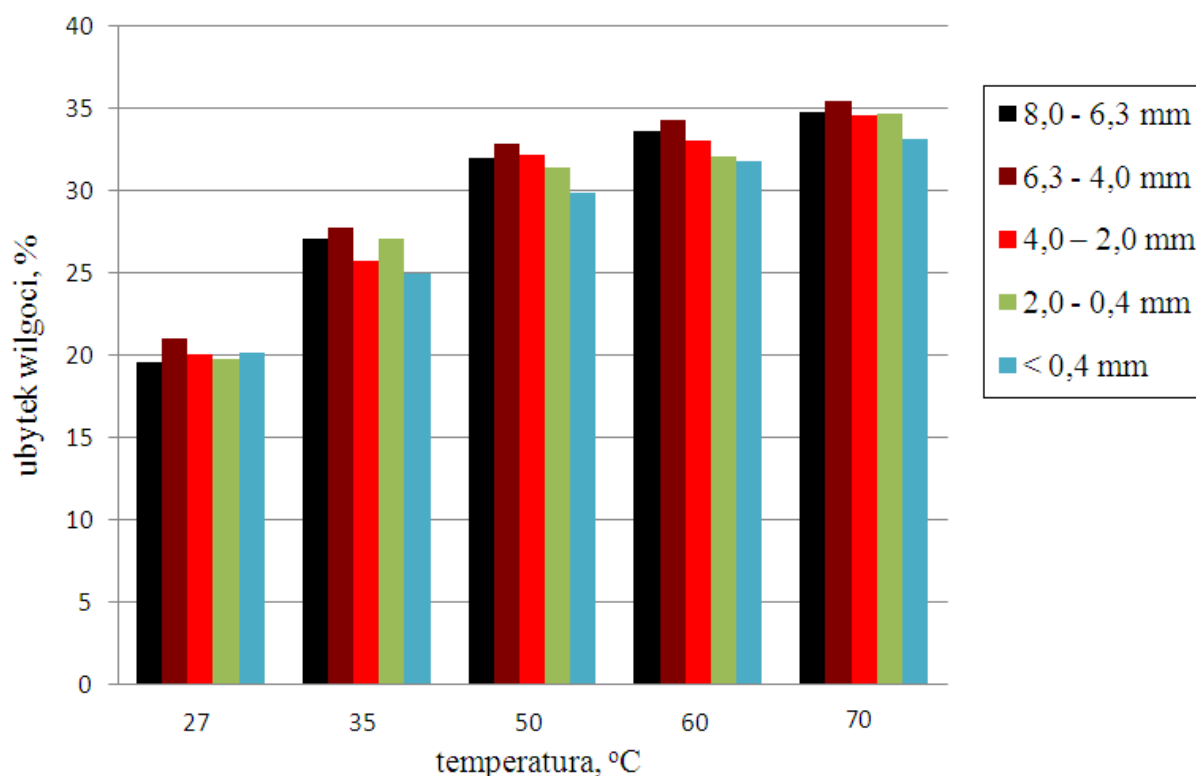
Natomiast na rysunkach 71-72 przedstawiono wyniki eksperymentów w złożu fluidalnym fontannowym dla węgla bełchatowskiego i turowskiego. Do testów użyto powietrza suszącego o temperaturze 27°C, 35°C, 50°C, 60°C i 70°C, czas suszenia wynosił 75 minut przy rozkładzie ziarnowym z przedziału 0,0-0,4 mm, 0,4-2,0 mm, 2,0-4,0 mm, 4,0-6,3 mm i 6,3-8,0 mm i prędkości czynnika suszącego na wlocie do suszarki 8 m/s. Określono wpływ wielkości ziarna węgla oraz temperatury procesu suszenia na zawartość wilgoci. Wyniki przedstawiono w tabeli 26 i 27.



Rysunek 71. Wpływ wielkości ziarna węgla i temperatury suszenia na ubytek wilgoci w węglu z Bełchatowa, złoża fontannowe

Tabela 26. Zawartość wilgoci w węglu w zależności od wielkości ziarna oraz temperatury procesu suszenia – węgiel z Bełchatowa:

Węgiel bełchatowski											
temp. suszenia	mokry	27°C	ΔW_r	35°C	ΔW_r	50°C	ΔW_r	60°C	ΔW_r	70°C	ΔW_r
rozkład ziarnowy, mm	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
8,0 - 6,3	52,67	22,73	29,94	12,50	40,17	7,50	45,17	5,32	47,35	4,26	48,41
6,3 - 4,0	52,86	22,22	30,63	13,16	39,70	6,58	46,28	4,26	48,60	3,72	49,13
4,0 - 2,0	51,85	22,22	29,63	12,50	39,35	6,73	45,12	5,81	46,04	3,49	48,36
2,0 - 0,4	52,75	19,81	32,94	11,90	40,84	6,86	45,88	5,26	47,48	3,13	49,62
< 0,4	50,00	18,57	31,43	10,81	39,19	6,52	43,48	4,69	45,31	3,57	46,43
średnia	52,02	21,11	30,91	12,17	39,85	6,84	45,19	5,07	46,96	3,63	48,39



Rysunek 72. Wpływ wielkości ziarna węgla i temperatury suszenia na ubytek wilgoci w węglu z Turowa, złoża fontannowe

Tabela 27. Zawartość wilgoci w węglu w zależności od wielkości ziarna oraz temperatury procesu suszenia:

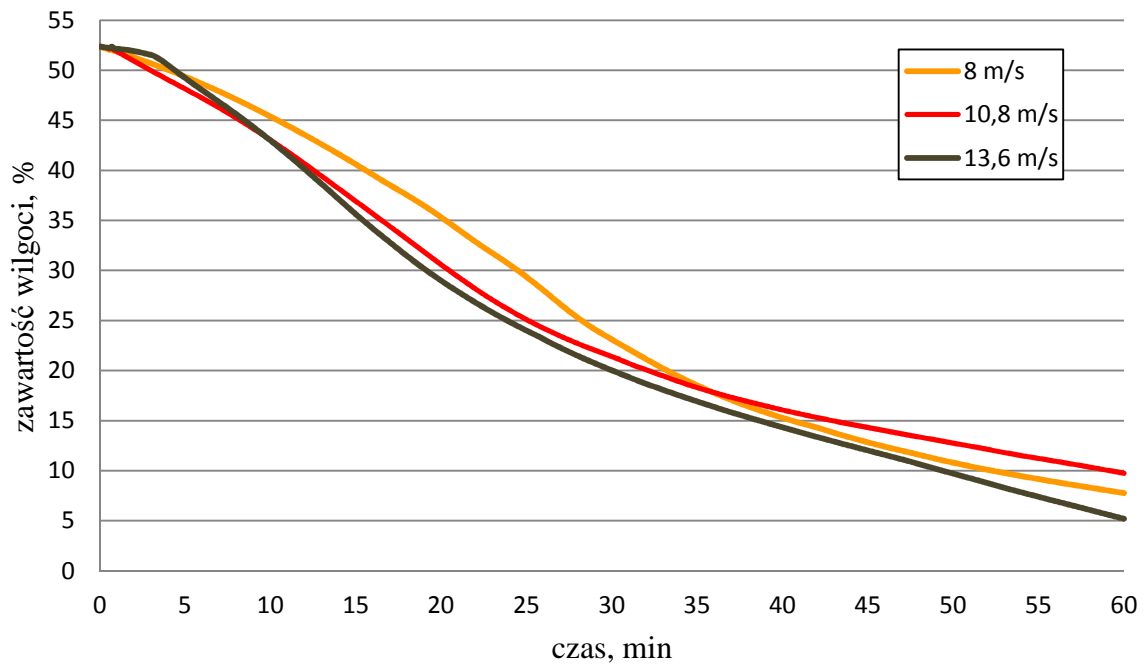
Węgiel turowski											
temp. suszenia	mokry	27°C	ΔW_r	35°C	ΔW_r	50°C	ΔW_r	60°C	ΔW_r	70°C	ΔW_r
rozkład ziarnowy, mm	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
8,0 - 6,3	38,18	18,60	19,58	11,11	27,07	6,25	31,93	4,57	33,61	3,41	34,77
6,3 - 4,0	38,82	17,78	21,05	11,11	27,71	5,98	32,84	4,57	34,25	3,41	35,41
4,0 - 2,0	37,72	17,31	20,41	12,00	25,72	5,56	32,16	4,76	32,96	3,23	34,49
2,0 - 0,4	37,04	17,02	20,02	10,00	27,04	5,71	31,32	5,00	32,04	2,39	34,65
< 0,4	36,07	16,28	19,79	11,11	24,95	6,25	29,82	4,32	31,75	3,02	33,05
średnia	37,57	17,40	20,17	11,07	26,50	5,95	31,61	4,64	32,92	3,09	34,47

Na podstawie przeprowadzonych testów zaobserwowano niewielki wpływ wielkości ziarna na ubytek wilgoci, bez względu na rodzaj złoża fluidalnego oraz zakres temperatur. Na podstawie tabel 24 i 25 dotyczących suszarki fluidalnej pęcherzykowej, zaobserwowano różnicę w usunięciu wilgoci rzędu 0,5% dla węgla bełchatowskiego i 1,5% dla węgla turowskiego w stosunku do różnych wielkości ziaren, dla czasu suszenia 20 minut, w temperaturze 27°C. Natomiast w przypadku złoża fluidalnego fontannowego (tabela 26

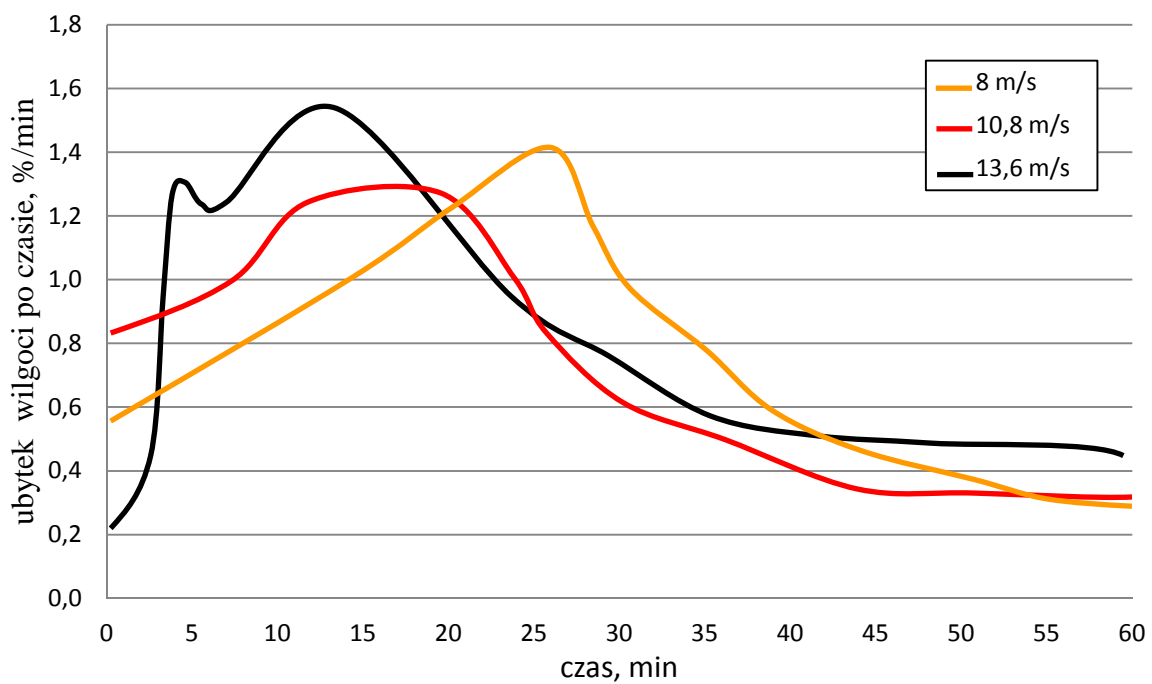
i 27) różnica w usunięciu wilgoci dla węgla bełchatowskiego i turoszowskiego dla różnych wielkości ziaren jest rzędu 1,5-2,5%, dla czasu suszenia 75 minut i temperatur z zakresu 27-70°C. Przedstawiona zależność ma szczególne znaczenie w przypadku złoża fluidalnego fontannowego, gdzie ze względu na specyfikę jego pracy mogą być wykorzystywane ziarna o zróżnicowanej wielkości, co ze względów praktycznych ułatwia przygotowanie surowca do suszenia. W przypadku złoża fluidalnego pęcherzykowego, wielkości ziarna w sposób znaczący decyduje o prędkości fluidyzacji, a przez to na zużycie energii. Ziarna o wielkości 4,0-6,3 mm potrzebują aż 4 krotnie większej energii do pracy złoża, niż suszenie ziaren z zakresu 0,4-2,0 mm. Zdecydowanie większe nakłady energetyczne związane z suszeniem ziaren o większej objętości w nieznaczący sposób wpływają na zawartość wilgoci po procesie suszenia. Zaobserwowano również niewielki wpływ temperatury czynnika suszącego w złożu fluidalnym fontannowym pomiędzy 50°C, a 70°C na szybkość suszenia.

4.4.2 Wpływ prędkości czynnika suszącego na proces suszenia

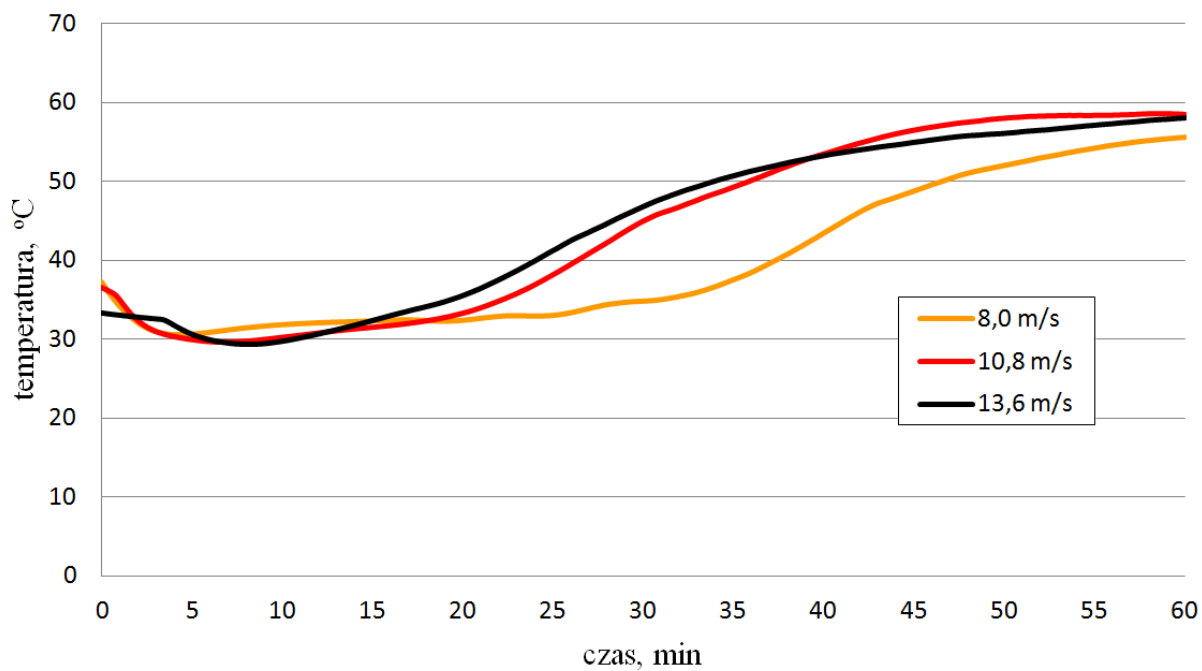
W kolejnych testach zbadano wpływ zmiany prędkości czynnika suszącego na proces usuwania wilgoci. Do badań wykorzystano suszarkę fluidalną fontannową. Natomiast w przypadku suszarki fluidalnej pęcherzykowej posłużono się badaniami z wcześniejszego podrozdziału (4.4.1). W suszarce fluidalnej fontannowej zbadano wpływ prędkości o wartościach 8,0 m/s (minimalna prędkość fluidyzacji dla opisywanych warunków), 10,8 m/s i 13,6 m/s, dla węgla bełchatowskiego, o ziarnistości z przedziału 0,0-8,0 mm i czasie suszenia 60 minut powietrzem o temperaturze na wlocie do suszarki 60°C. Na rysunku 73 pokazano wpływ prędkości powietrza suszącego na ubytek wilgoci w czasie, natomiast na rysunku 74 przedstawiono kinetykę procesu. Rysunek 75 przedstawia temperaturę panującą w złożu podczas testów, a rysunek 76 względną wilgotność powietrza opuszczającego komorę suszenia. Rysunki 77 i 78 przedstawiają zużycie energii cieplnej i elektrycznej na proces suszenia.



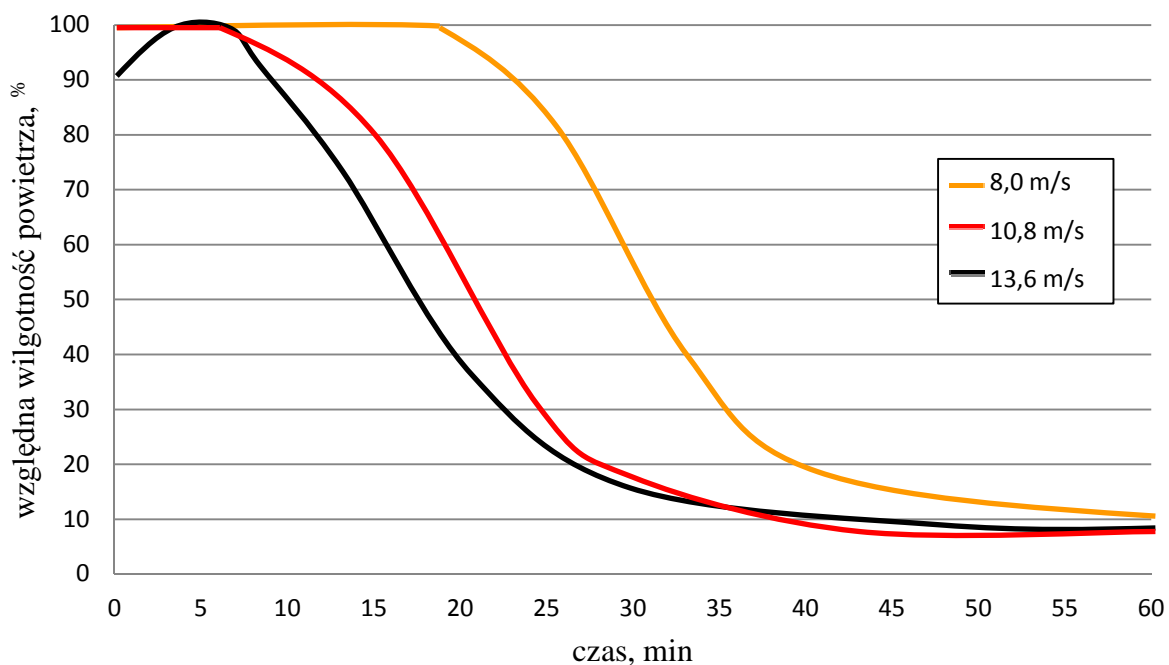
Rysunek 73. Wpływ prędkości czynnika suszącego na zawartość wilgoci – węgiel z Bełchatowa, złożę fontannowe



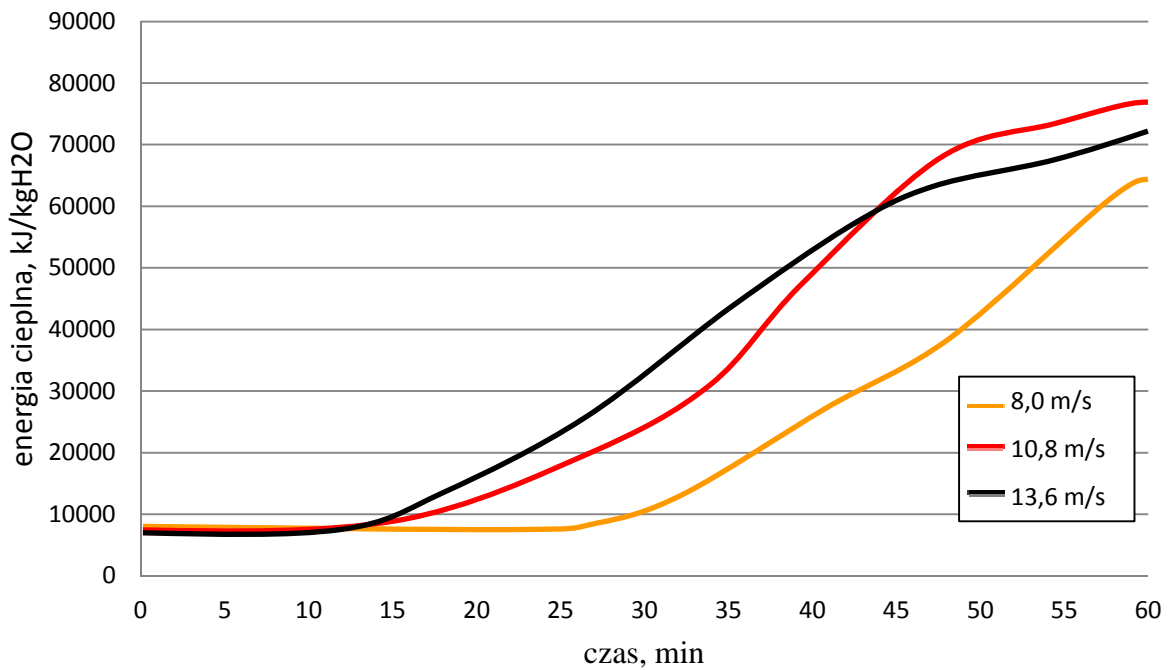
Rysunek 74. Wpływ prędkości czynnika suszącego na kinetykę suszenia – węgiel z Bełchatowa, złożę fontannowe



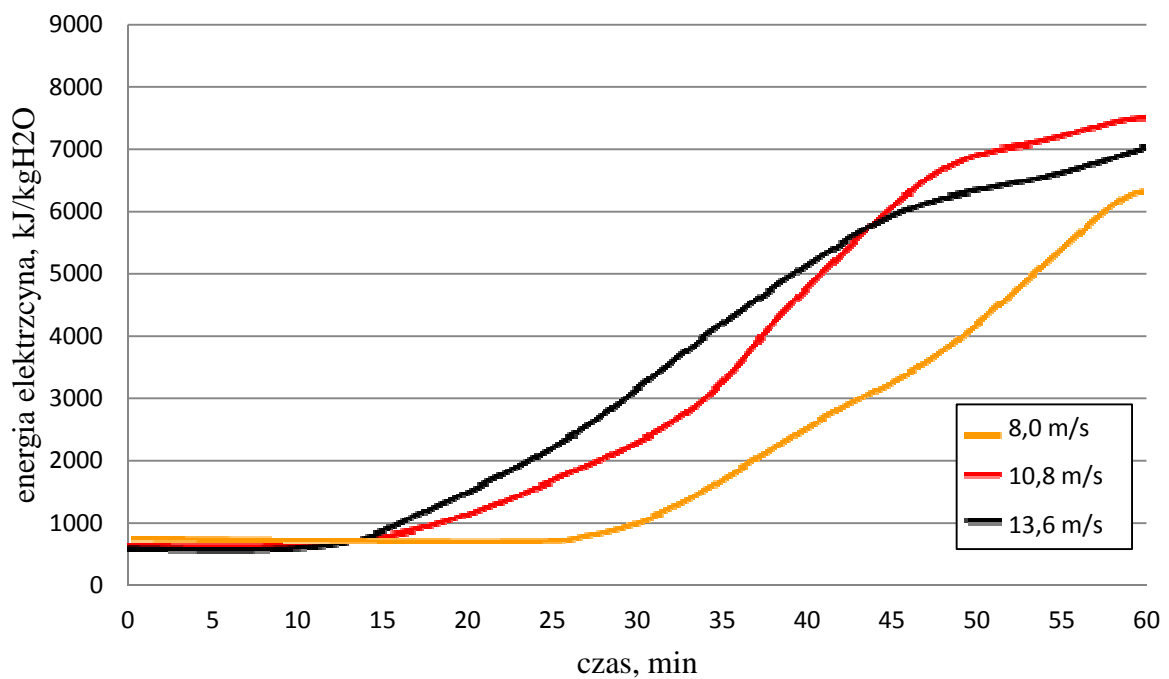
Rysunek 75. Zmiana temperatury w suszarce w zależności od prędkości czynnika suszącego dla węgla z Bełchatowa, złoża fontannowe



Rysunek 76. Zawartość wilgotności względnej powietrza na wylocie z suszarki w zależności od prędkości czynnika suszącego - węgiel z Bełchatowa, złoża fontannowe



Rysunek 77. Wpływ prędkości czynnika suszącego na zużycie energii cieplnej – węgiel z Belchatowa, złoża fontannowe



Rysunek 78. Wpływ prędkości czynnika suszącego na zużycie energii elektrycznej – węgiel z Belchatowa, złoża fontannowe

Tabela 28. Zużycie energii ze względu na ubytek wilgoci z węgla bełchatowskiego dla różnych prędkości:

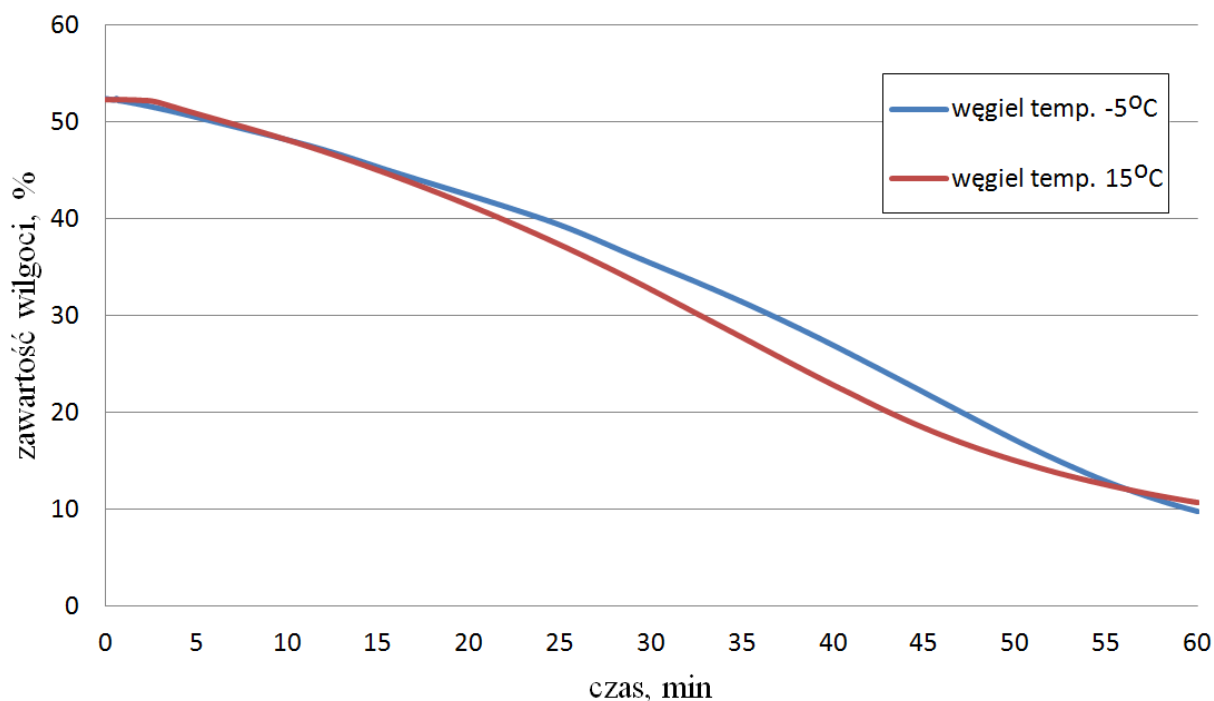
węgiel bełchatowski, suszarka fluidalna fontannowa, temp. czynnika suszącego: 60°C, wielkość ziaren: 0-8 mm, czas suszenia: 60 min.				
Ubytek wilgoci o 10%,				
prędkość, m/s	czas, min	energia cieplna, kJ/kgH ₂ O	energia elektryczna, kJ/kgH ₂ O	energia całkowita, kJ/kgH ₂ O
8,0	13	6899	701	7600
10,8	11	7806	775	8581
13,6	10	8228	812	9040
Ubytek wilgoci o 20%				
prędkość, m/s	czas, min	energia cieplna, kJ/kgH ₂ O	energia elektryczna, kJ/kgH ₂ O	energia całkowita, kJ/kgH ₂ O
8,0	23	8368	850	9218
10,8	19	10091	1002	11093
13,6	17	11437	1128	12565
Ubytek wilgoci o 30%				
prędkość, m/s	czas, min	energia cieplna, kJ/kgH ₂ O	energia elektryczna, kJ/kgH ₂ O	energia całkowita, kJ/kgH ₂ O
8,0	31	12690	1289	13979
10,8	29	25896	2572	28468
13,6	27	25437	2509	27946

Wyniki testów przedstawiono w tabeli 28, gdzie określono zużycie energii ze względu na prędkość czynnika suszącego, jak i ubytek wilgoci odpowiednio o 10%, 20% i 30%. Wpływ prędkości na odparowanie wilgoci z węgla ma znaczenie ze względu na wymianę ciepła i masy oraz przebywanie ziarna w złożu. Im wyższa prędkość czynnika suszącego, tym krótszy czas suszenia. Czas suszenia do określonej wartości ubytku wilgoci zmienia się średnio o 3-5 minut wraz ze wzrostem prędkości o 5,6 m/s. Taki wzrost prędkości przekłada się znacznie na zużycie energii szczególnie przy odparowaniu wilgoci o 30%, gdzie zużycie energii elektrycznej i cieplnej jest ponad dwukrotnie większe dla suszarki fluidalnej fontannowej. Dlatego w celu optymalizacji procesu suszenia zalecana jest minimalna prędkość czynnika suszącego do wzbudzenia złoża fluidalnego. Na podstawie rysunków 63-70 oraz tabel 24 i 25 zaobserwowano podobną sytuację jak powyżej, dla suszenia w złożu fluidalnym pęcherzykowym. W przypadku węgla bełchatowskich wzrost prędkości czynnika suszącego od 4,2 do 9,1 m/s powoduje aż 4-krotnie większe zużycie energii, podobna sytuacja jest dla węgla turowskiego, dla zmiany prędkości z 2,8 do 8,0 m/s. Dlatego, również w przypadku złoża fluidalnego pęcherzykowego zaleca się zastosowanie minimalnych prędkości fluidyzacji, a do tego wybór jak najmniejszej wielkości suszonych ziaren.

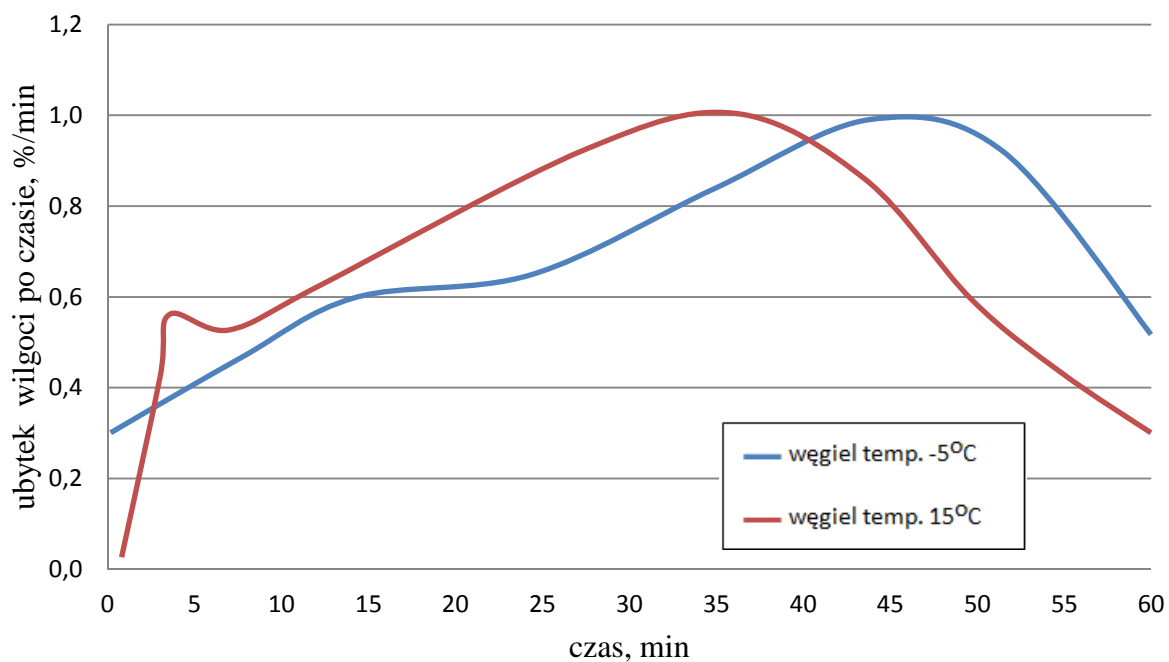
4.4.3 Wpływ początkowej temperatury węgla na proces suszenia

Następnie zbadano wpływ temperatury początkowej węgla ze względu na parametry procesu suszenia. Tego typu badania miały na celu zbadanie, czy w czasie letnim i zimowym należy inaczej konfigurować suszarkę ze względu na uzyskanie tej samej wartości wilgoci końcowej. Węgiel brunatny w elektrowniach składowany jest na zewnątrz, z tego powodu ma on temperaturę otoczenia. Dlatego testy wykonano dla warunków symulujących różne pory roku. Węgiel do symulacji zimy ochłodzono do temperatury -5°C , a do symulacji lata przyjęto temperaturę węgla równą 15°C . Testy przeprowadzono w suszarce fluidalnej fontannowej dla węgla bełchatowskich i turowskich, o rozkładzie ziarnowym 0,0-8,0 mm, za pomocą gorącego powietrza o temperaturze na wlocie do suszarki równiej 50°C i czasu przebywania węgla w komorze suszącej 60 minut.

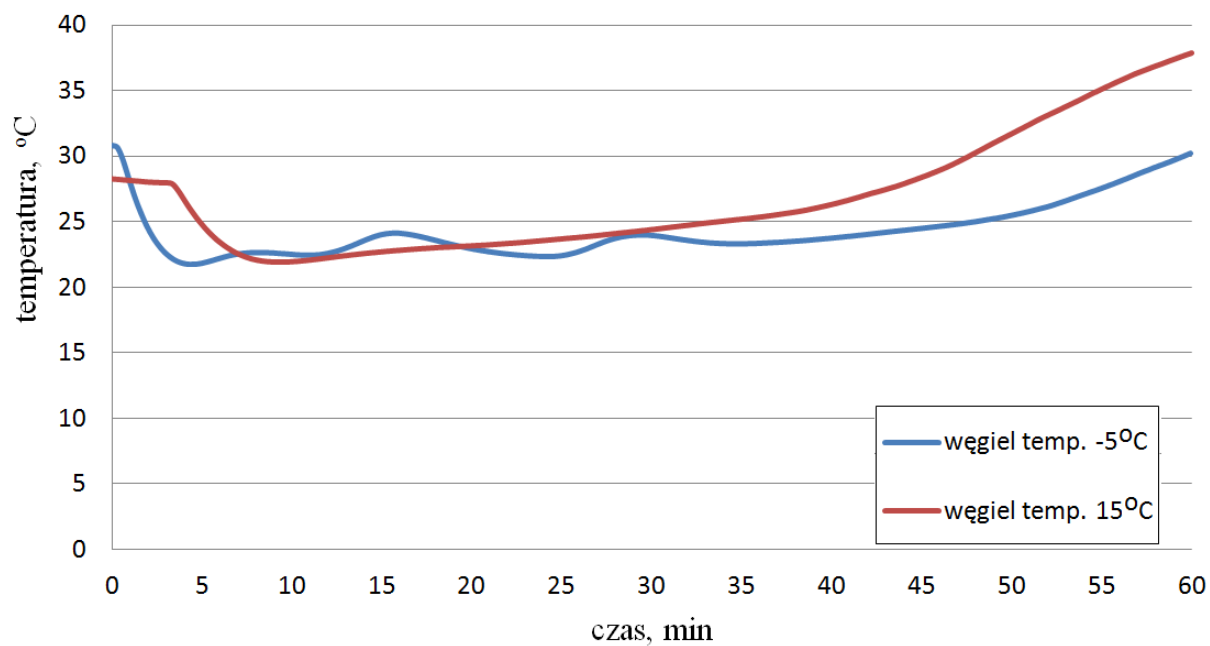
Na rysunkach 79-84 przedstawiono wyniki eksperymentów dla węgla bełchatowskiego. Określono wpływ temperatury początkowej węgla na zawartość wilgoci, kinetykę suszenia, wpływ temperatury gorącego powietrza na zawartość wilgoci, zmiany temperatury w suszarce podczas procesu oraz zużycie energii cieplnej i elektrycznej. Wyniki przedstawiono w tabeli 29.



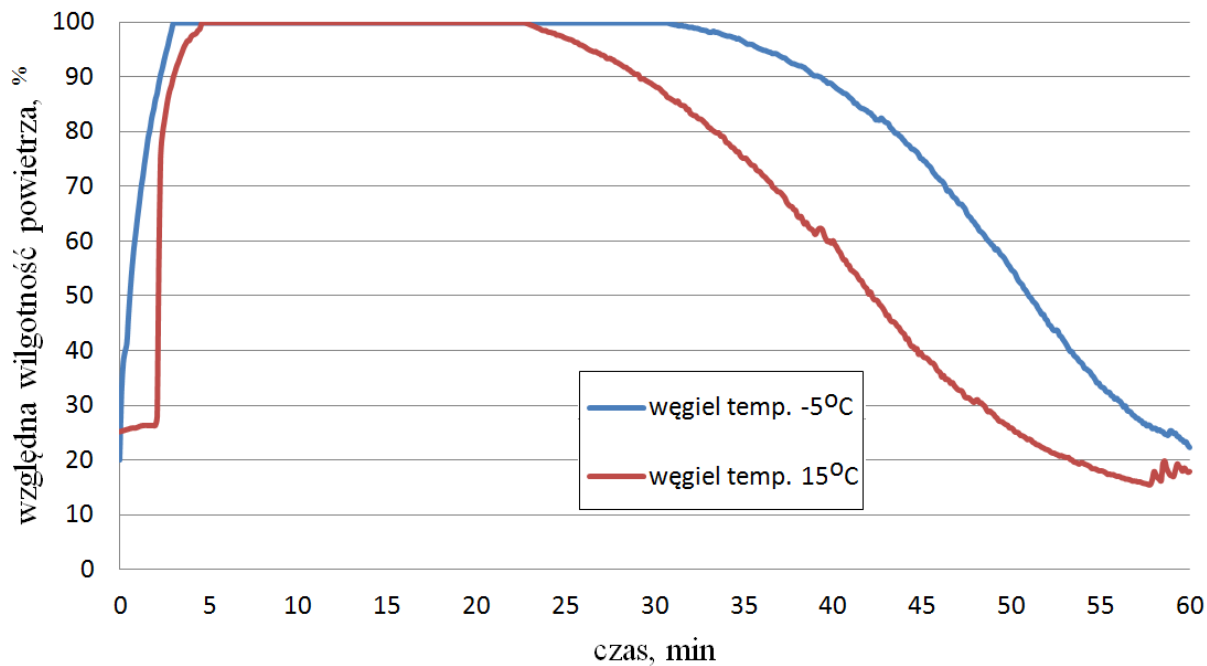
Rysunek 79. Wpływ temperatury początkowej węgla na zawartość wilgoci – węgiel z Bełchatowa, złoża fontannowe



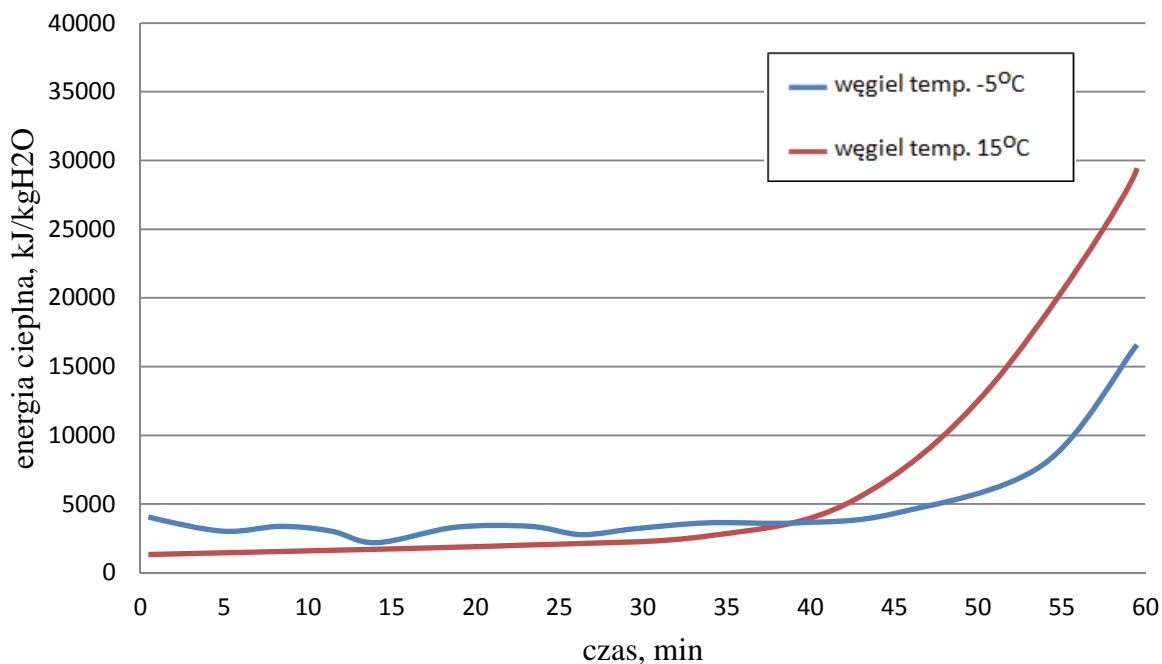
Rysunek 80. Wpływ temperatury początkowej węgla na kinetykę suszenia – węgiel z Bełchatowa, złoża fontannowe



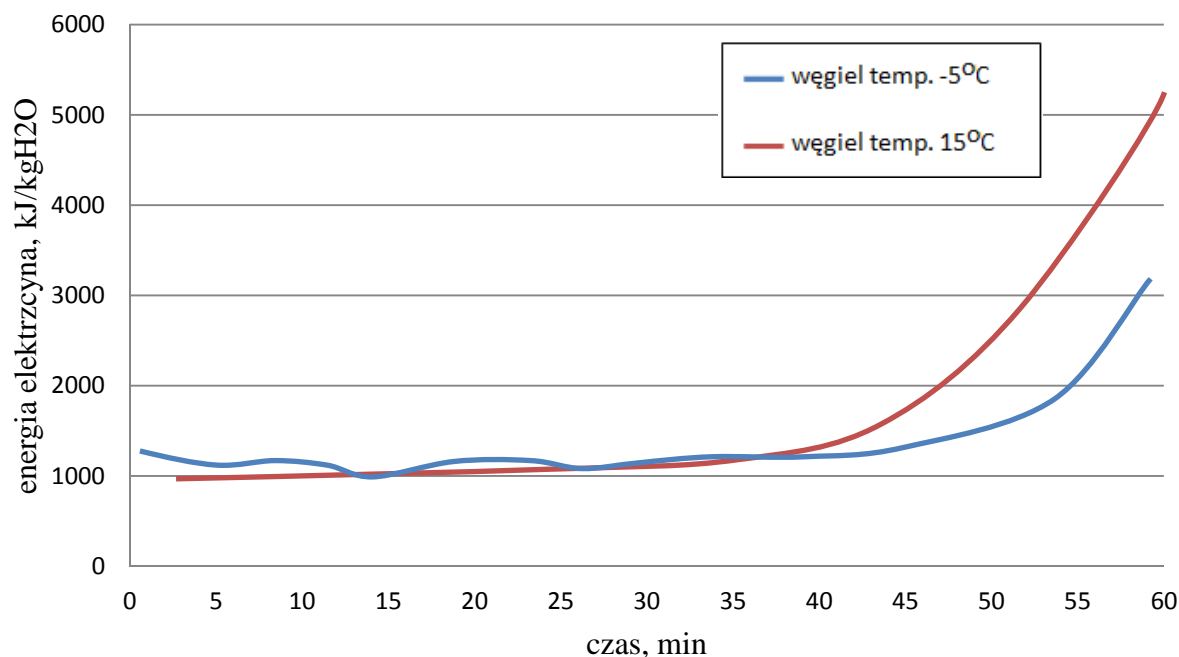
Rysunek 81. Zmiana temperatury w suszarce ze względu na czas i temperaturę początkową węgla – węgiel z Bełchatowa, złoża fontannowe



Rysunek 82. Zawartość wilgotności względnej powietrza na wylocie z suszarki w zależności od temperatury początkowej węgla - węgiel z Bełchatowa, złożo fontannowe



Rysunek 83. Wpływ temperatury początkowej węgla na zużycie energii cieplnej – węgiel z Bełchatowa, złożo fontannowe

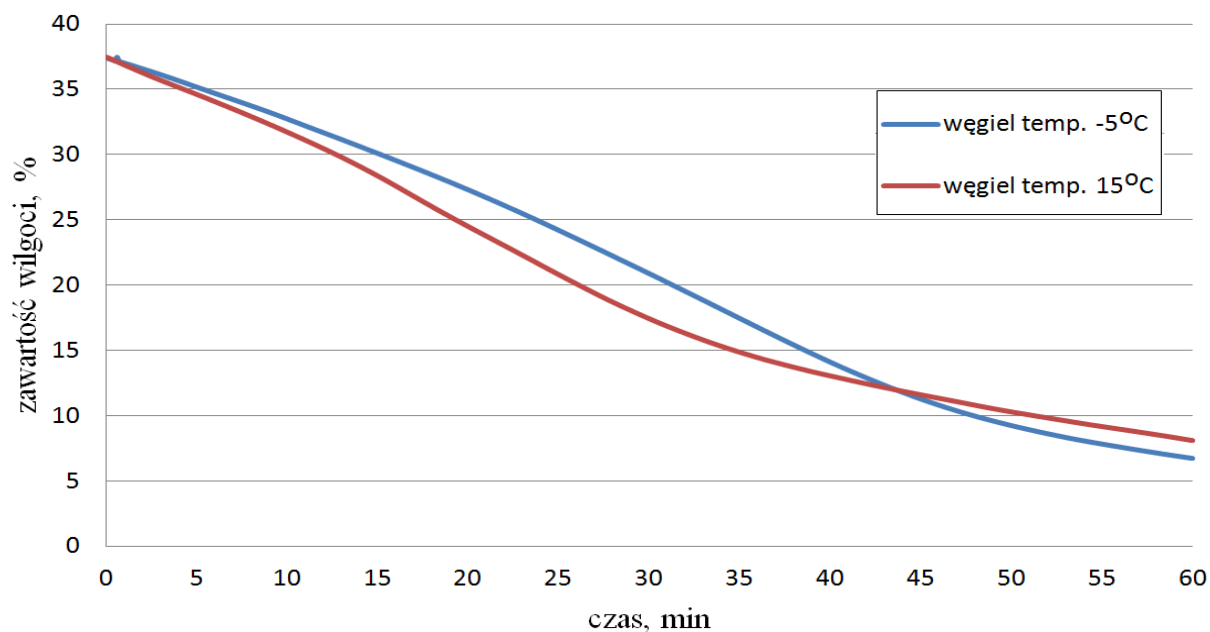


Rysunek 84. Wpływ temperatury początkowej węgla na zużycie energii elektrycznej – węgiel z Bełchatowa, złoża fontannowe

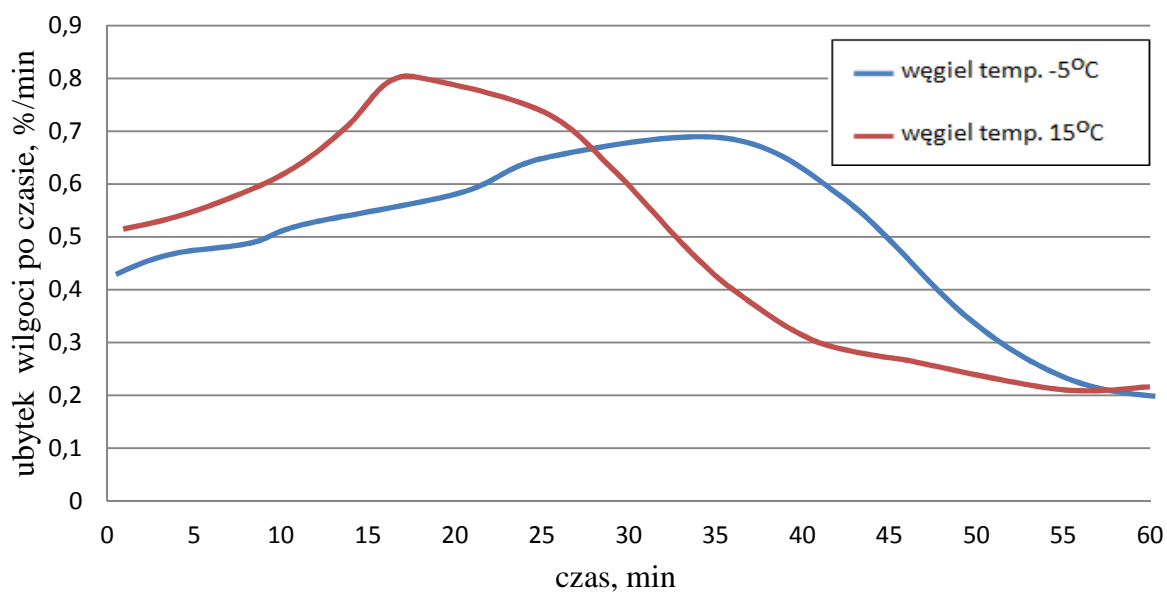
Tabela 29. Zużycie ze względu na ubytek wilgoci z węgla bełchatowskiego dla różnej temperatury początkowej węgla:

węgiel bełchatowski, suszarka fluidalna fontanna, temp. czynnika suszącego: 50°C, wielkość ziaren: 0-8 mm, czas suszenia: 60 min.				
Ubytek wilgoci o 10%				
temp. węgla, °C	czas, min	energia cieplna, kJ/kgH ₂ O	energia elektryczna, kJ/kgH ₂ O	energia całkowita, kJ/kgH ₂ O
-5	20	7364	1172	8535
15	19	5761	917	6678
Ubytek wilgoci o 20%				
temp. węgla, °C	czas, min	energia cieplna, kJ/kgH ₂ O	energia elektryczna, kJ/kgH ₂ O	energia całkowita, kJ/kgH ₂ O
-5	34	7273	1157	8430
15	30	6000	955	6955
Ubytek wilgoci o 30%				
temp. węgla, °C	czas, min	energia cieplna, kJ/kgH ₂ O	energia elektryczna, kJ/kgH ₂ O	energia całkowita, kJ/kgH ₂ O
-5	45	7953	1266	9219
15	41	8601	1369	9970

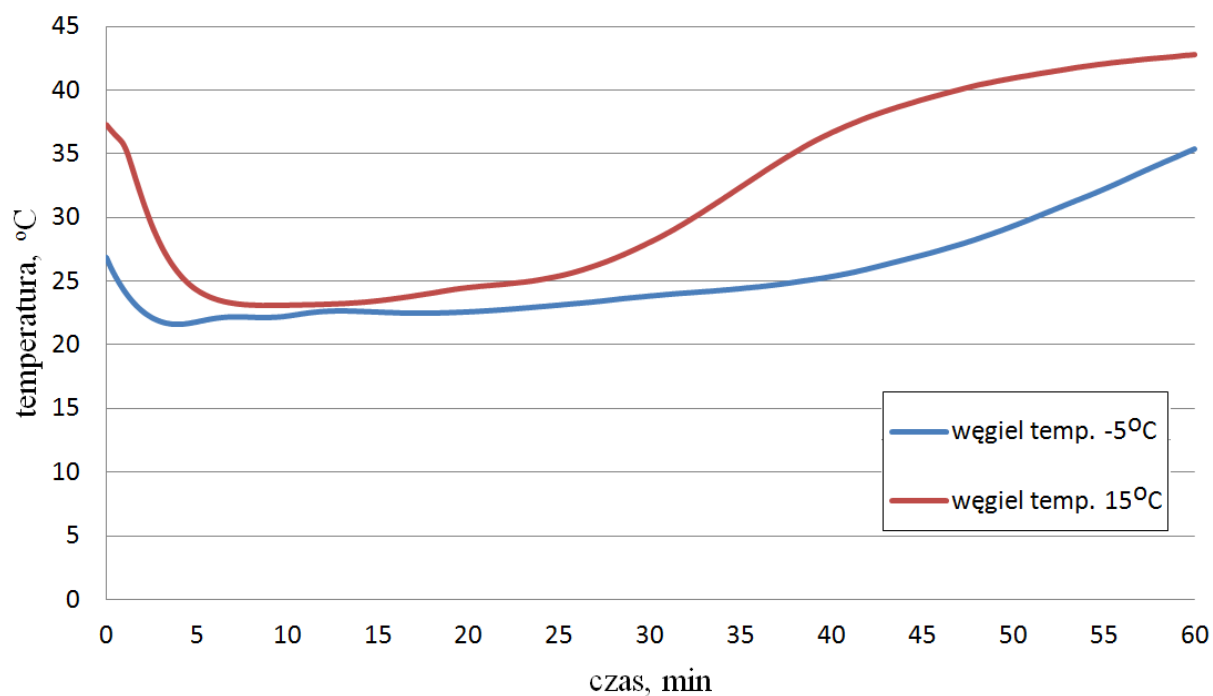
Na rysunkach 85-90 przedstawiono wyniki eksperymentów dla węgla turoszowskiego. Określono wpływ temperatury początkowej węgla na zawartość wilgoci, kinetykę suszenia, wpływ temperatury gorącego powietrza na zawartość wilgoci, zmiany temperatury w suszarce podczas procesu oraz zużycie energii cieplnej i elektrycznej. Wyniki przedstawiono w tabeli 30.



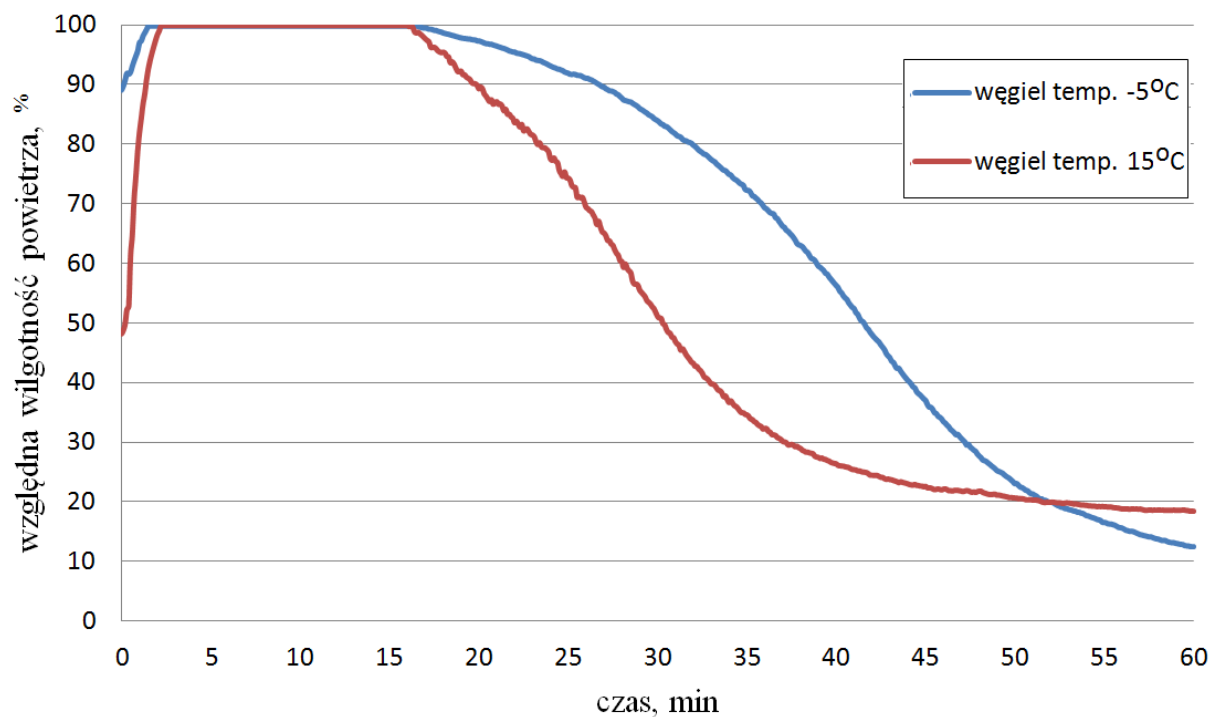
Rysunek 85. Wpływ czasu i temperatury początkowej węgla na zawartość wilgoci – węgiel z Turowa, złoża fontannowe



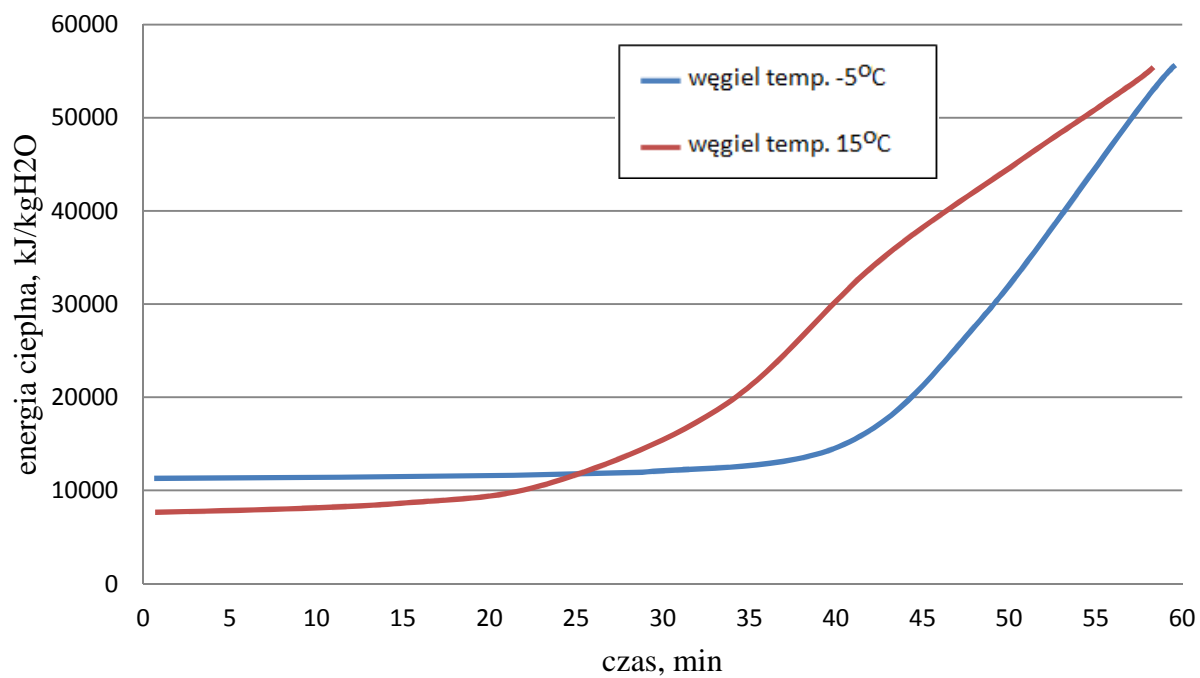
Rysunek 86. Wpływ temperatury początkowej węgla na kinetykę suszenia – węgiel z Turowa, złoża fontannowe



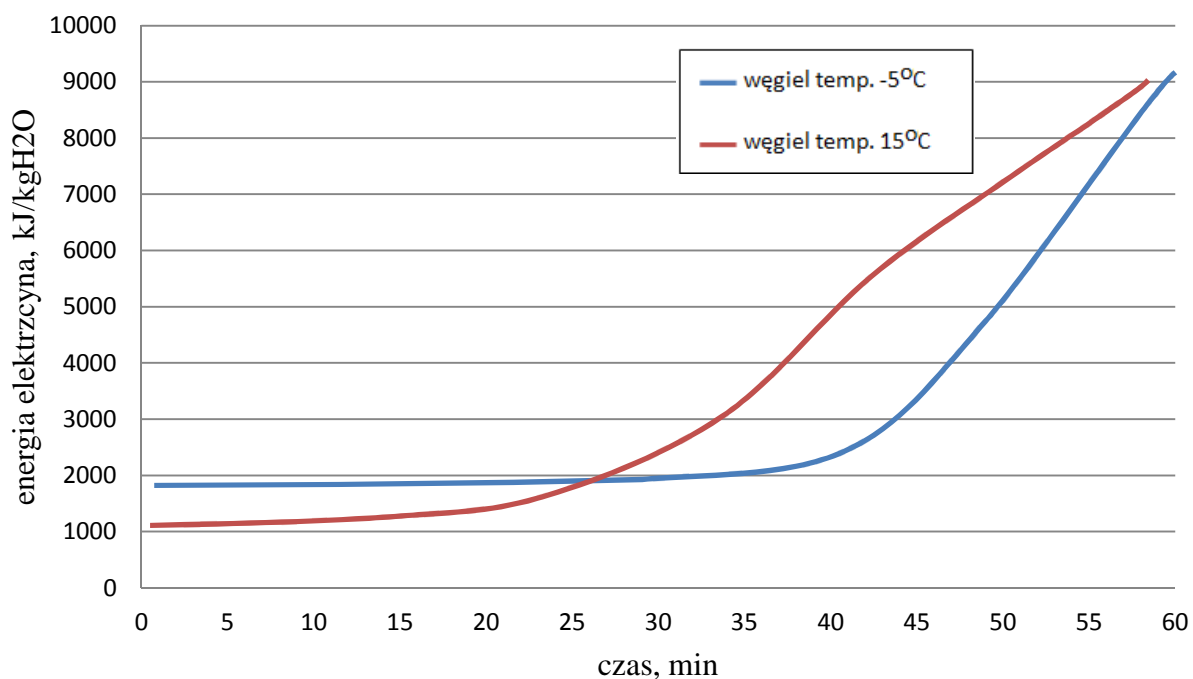
Rysunek 87. Zmiana temperatury w suszarce ze względu na czas i temperaturę początkową węgla– węgiel z Turowa, złoża fontannowe



Rysunek 88. Zawartość wilgotności względnej powietrza na wylocie z suszarki w zależności od temperatury początkowej węgla - węgiel z Turowa, złoża fontannowe



Rysunek 89. Wpływ temperatury początkowej węgla na zużycie energii cieplnej – węgiel z Turowa, złożo fontannowe



Rysunek 90. Wpływ temperatury początkowej węgla na zużycie energii elektrycznej – węgiel z Turowa, złożo fontannowe

Tabela 30. Zużycie energii ze względu na ubytek wilgoci z węgla turoszowskiego dla różnej temperatury początkowej węgla:

węgiel turoszowski, suszarka fluidalna fontannowa, temp. czynnika suszącego: 50°C, wielkość ziaren: 0-8 mm, czas suszenia: 60 min.				
Ubytek wilgoci o 10%				
temp. węgla, °C	czas, min	energia cieplna, kJ/kgH ₂ O	energia elektryczna, kJ/kgH ₂ O	energia całkowita, kJ/kgH ₂ O
-5	20	11692	1860	13553
15	16	8516	1355	9871
Ubytek wilgoci o 20%				
temp. węgla, °C	czas, min	energia cieplna, kJ/kgH ₂ O	energia elektryczna, kJ/kgH ₂ O	energia całkowita, kJ/kgH ₂ O
-5	35	12663	2015	14678
15	30	14567	2318	16885

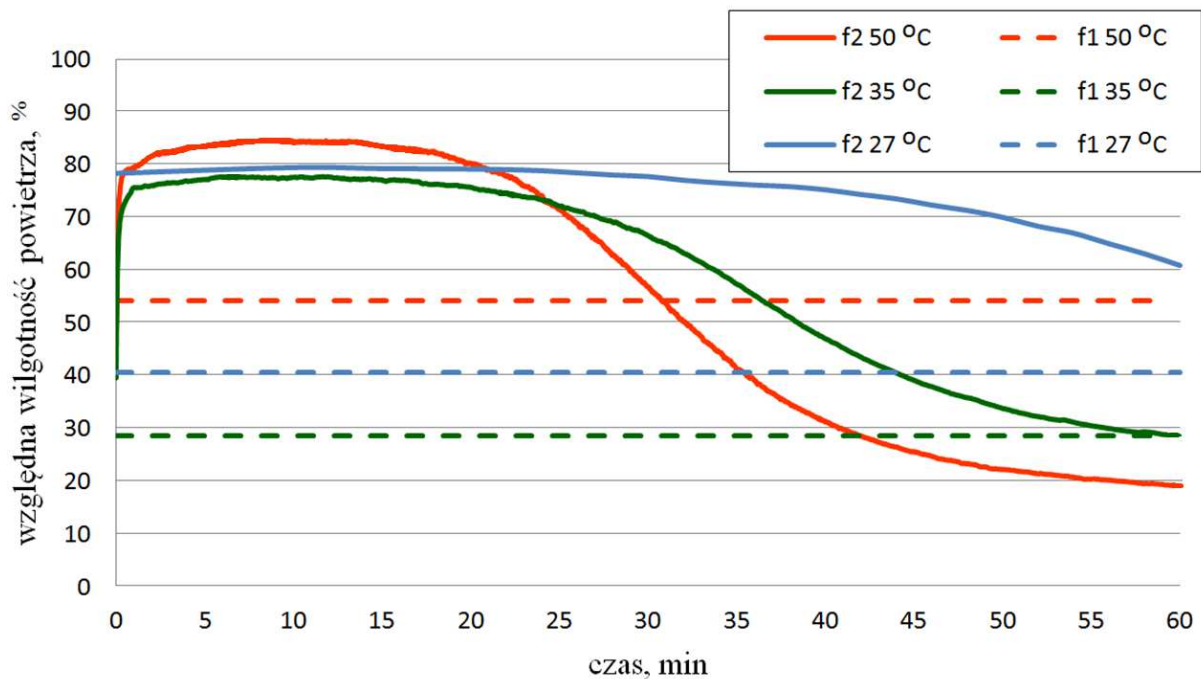
Analiza parametrów procesu suszenia, to jest szybkość suszenia i zużycie energii dla obu badanych węgli brunatnych wykazała wpływ początkowej temperatury węgla. Charakterystyki suszenia przedstawiają się w odmienny sposób, w zależności od czasu suszenia. W pierwszej i drugiej fazie suszenia szybkość suszenia jest większa dla węgla o temperaturze początkowej 15°C. Natomiast w trzeciej fazie widoczny jest korzystny wpływ wynikający z zamrożenia węgla i szybkość suszenia jest wyższa dla węgla o temperaturze początkowej również -5°C, co pokazuje rysunek 80 dla węgla bełchatowskich i rysunek 86 dla węgla turoszowskich. Różnica w szybkościach suszenia może wynikać ze zmiany objętości wody zawartej w węglu, której zamarznięcie powoduje rozerwanie części porów w węglu i łatwiejsze wydostanie się wody w zamkniętych porach oraz związanej molekularnie podczas procesu suszenia, co wpływa na poprawę ubytku wilgoci podczas suszenia. Skutkuje to większym usunięciem wilgoci z węgla o temperaturze początkowej również -5°C ale tylko jeśli proces nie zostanie przerwany podczas III fazy suszenia. Dla węgla bełchatowskiego zrównanie wilgoci w węglu następuje w 56 minucie i wynosi 12%. Po tym czasie usuwanie wilgoci w zamrożonym węglu jest większe, niż w przypadku węgla o temperaturze początkowej również 15°C. Dla węgla turoszowskiego czas zrównania się wilgoci suszonego węgla następuje w 44 minucie i wynosi 13%. W przypadku zastosowania suszenia przemysłowego proces nie trwa dłużej jak do odparowania wilgoci do poziomu około 20%, dlatego pozytywny skutek zamarzniętego węgla nie będzie występował w zastosowaniu przemysłowym. Niska temperatura początkowa węgla spowalnia proces w dwóch pierwszych fazach suszenia i przyczynia się do większych nakładów energetycznych. Na podstawie tabeli 29 widać wzrost zapotrzebowania na energię całkowitą dla węgla bełchatowskiego o 22% (z

6678 kJ/kgH₂O do 8535 kJ/kgH₂O) dla ubytku wilgoci o 10%, o 17% (z 6955 kJ/kgH₂O do 8430 kJ/kgH₂O) dla ubytku wilgoci o 20% i o 7,5% (z 9219 kJ/kgH₂O do 9970 kJ/kgH₂O) dla ubytku wilgoci o 30%. Natomiast dla węgla turosszowskiego (tabela 30) wzrost zapotrzebowania na energię całkowitą dla usunięcia wilgoci o 10% wynosi 27% (z 9871 kJ/kgH₂O do 13553 kJ/kgH₂O), a dla usunięcia wilgoci o 20% wynosi 13% (z 14678 kJ/kgH₂O do 16885 kJ/kgH₂O). Dodatkowo susząc węgiel o niższej temperaturze wydłuża się czas procesu do osiągnięcia tej samej wilgoci końcowej co dla węgla o wyższej temperaturze początkowej. W przeprowadzonych testach czas suszenia średnio wydłużył się o 4-5 minut niezależnie od rodzaju węgla dla uzyskania tej samej wilgotności końcowej dla zakresu ubytku wilgoci o 20-30% dla węgla bełchatowskiego i 10-20% dla węgla turosszowskiego. Dlatego w okresie zimy należy liczyć się z większymi nakładami energetycznymi oraz dłuższym czasem suszenia dla uzyskania takich samych rezultatów, co w okresie letnim.

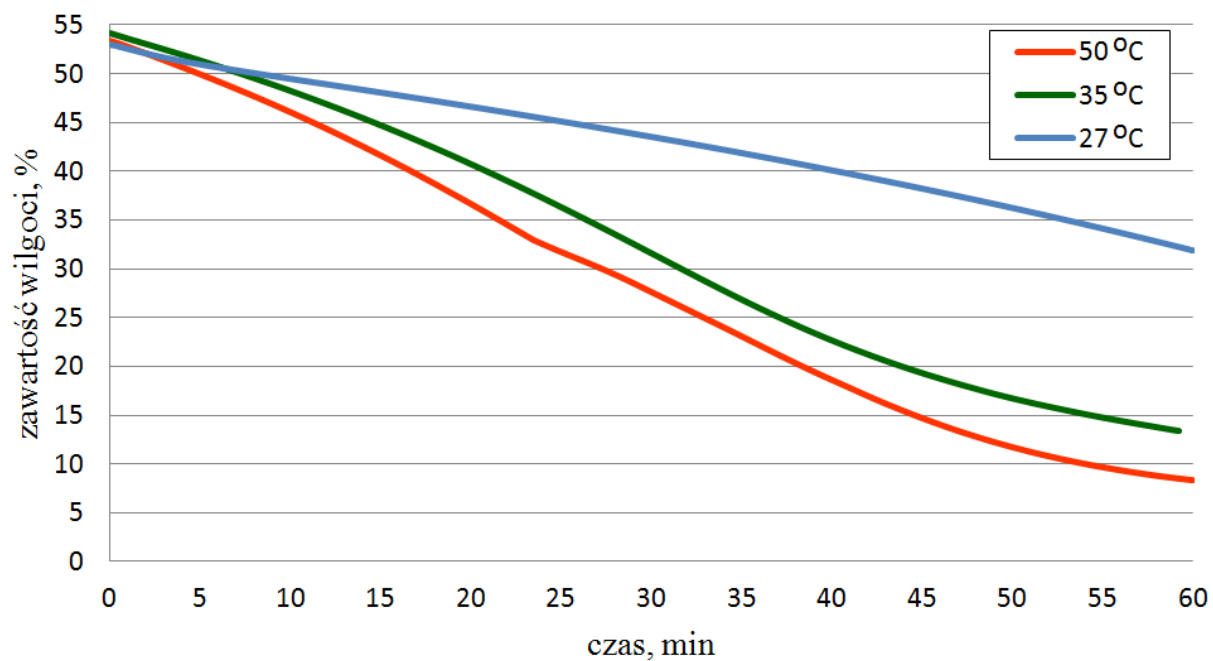
4.4.4 Wpływ temperatury czynnika suszącego na proces suszenia

W badaniach określono wpływ temperatury czynnika suszącego na ubytek wilgoci i zużycie energii. Testy przeprowadzono na dwóch rodzajach suszarek fluidalnych pęcherzykowej i fontannowej oraz dla dwóch rodzajów węgla brunatnych - bełchatowskiego i turosszowskiego. W suszarce fluidalnej pęcherzykowej użyto ziaren z przedziału 2,0-4,0 mm i czasu suszenia równego 60 minut przy temperaturach czynnika suszącego na wlocie do komory suszenia równych 27°C, 35°C i 50°C. W badaniach zastosowano minimalną prędkość fluidyzacyjną dla wyżej wymienionych warunków na poziomie 6,2 m/s. Natomiast w suszarce fluidalnej fontannowej użyto ziaren z przedziału 0,0-8,0 mm i czasu suszenia równego 75 minut przy temperaturach czynnika suszącego na wlocie do komory suszenia równych 27°C, 35°C, 50°C, 60°C i 70°C. W badaniach zastosowano minimalną prędkość fluidyzacyjną dla wyżej wymienionych warunków na poziomie 8 m/s.

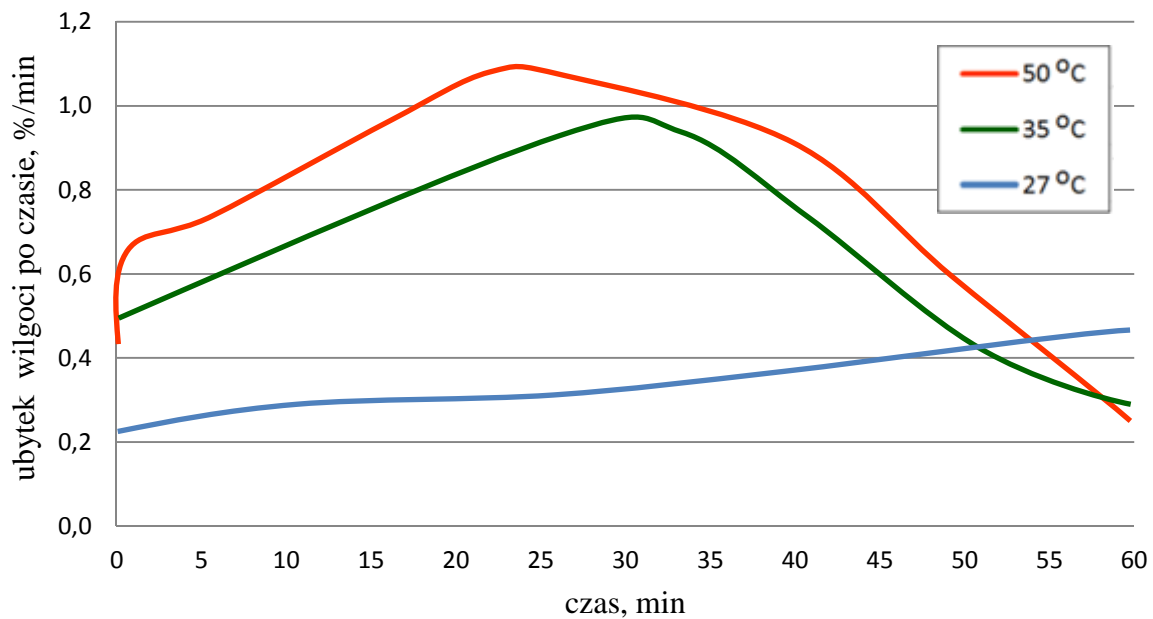
Na rysunkach 91-96 przedstawiono wyniki eksperymentów dla węgla bełchatowskiego suszonego w złożu fluidalnym pęcherzykowym. Określono zawartość wilgotności względnej powietrza na wlocie i wylocie z suszarki w zależności od temperatury, wpływ temperatury gorącego powietrza na zawartość wilgoci, kinetykę suszenia, zmiany temperatury w suszarce podczas procesu oraz zużycie energii cieplnej i elektrycznej. Wyniki przedstawiono w tabeli 31.



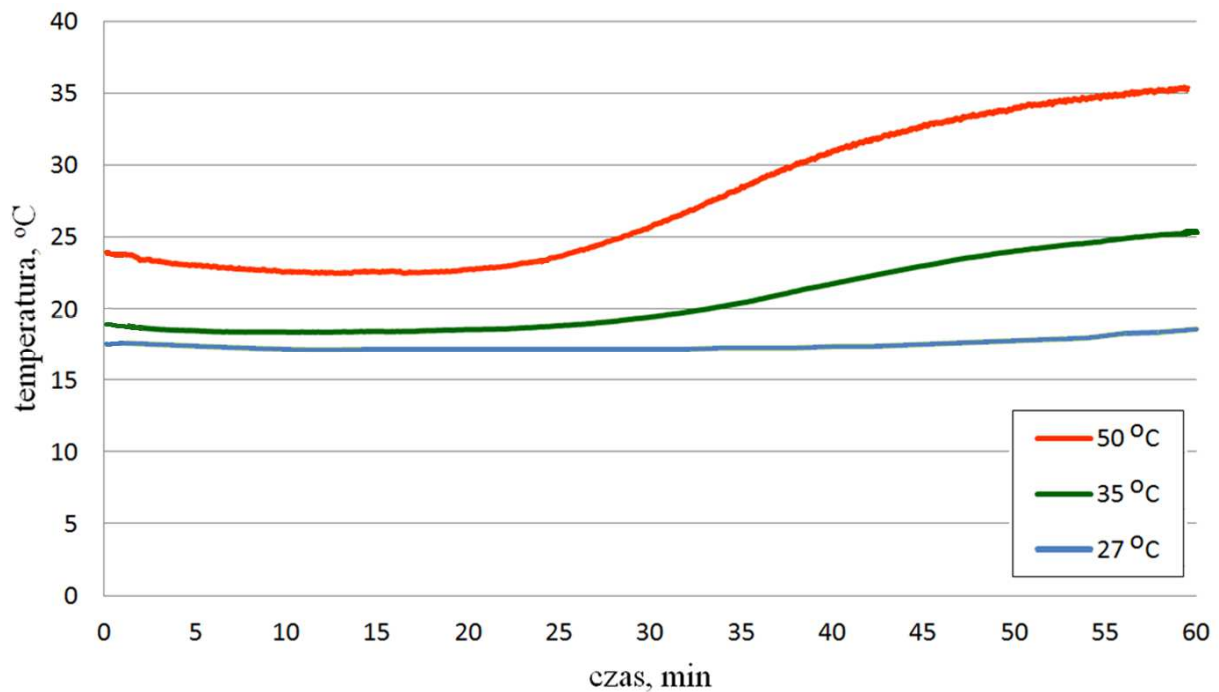
Rysunek 91. Zawartość wilgotności względnej powietrza na wlocie i wylocie z suszarki w zależności od temperatury dla węgla z Bełchatowa, złożę pęcherzykowe



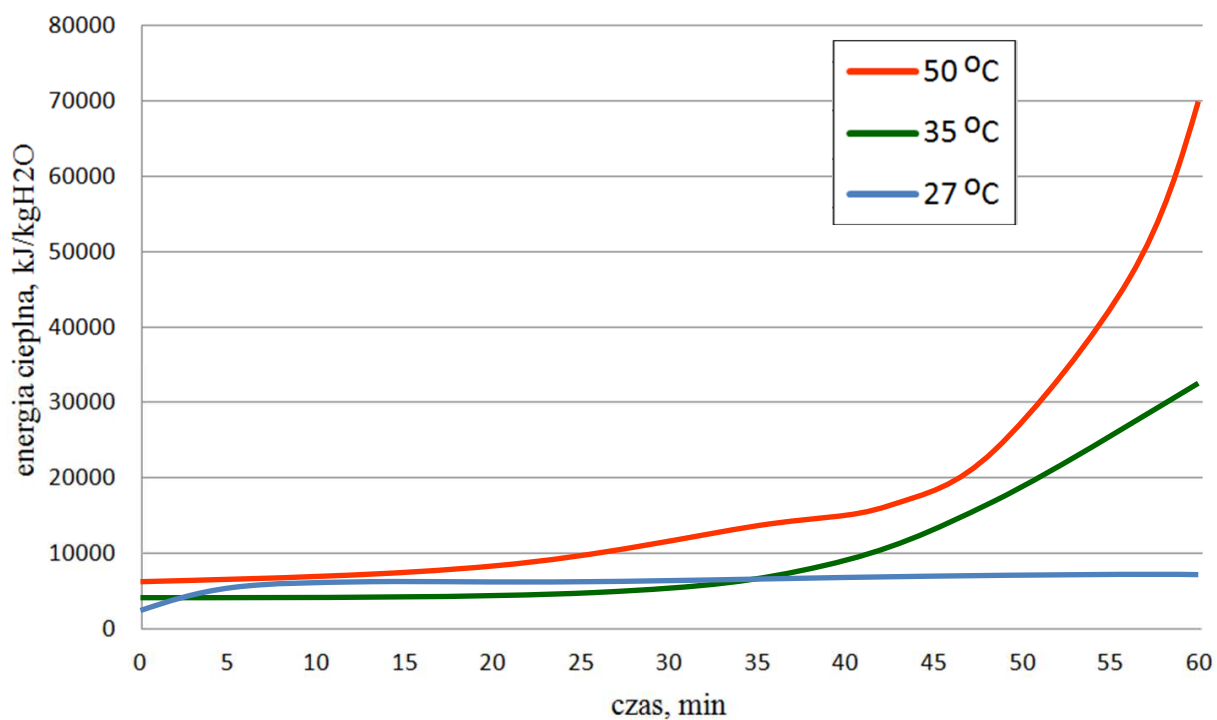
Rysunek 92. Wpływ temperatury procesu suszenia na zawartość wilgoci – węgiel z Bełchatowa, złożę pęcherzykowe



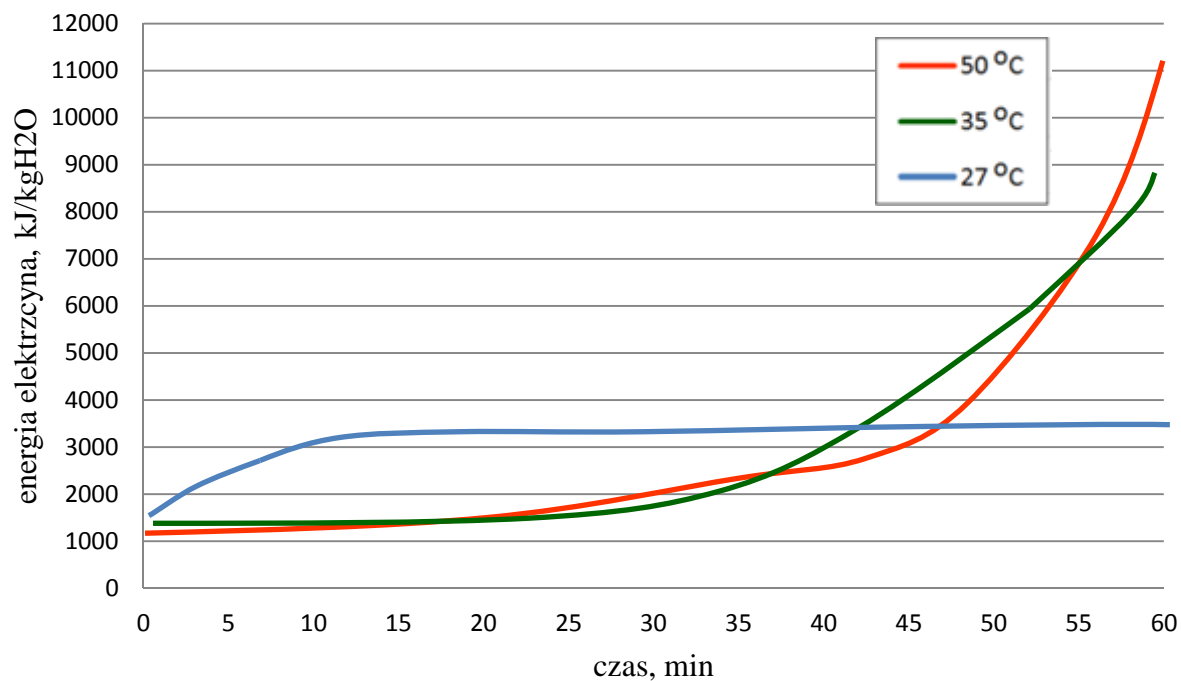
Rysunek 93. Wpływ temperatury procesu suszenia na kinetykę suszenia – węgiel z Bełchatowa, złożę pęcherzykowe



Rysunek 94. Zmiana temperatury w suszarce ze względu na czas i temperaturę dolotową – węgiel z Bełchatowa, złożę pęcherzykowe



Rysunek 95. Wpływ temperatury procesu suszenia na zużycie energii cieplnej– węgiel z Bełchatowa, złożę pęcherzykowe

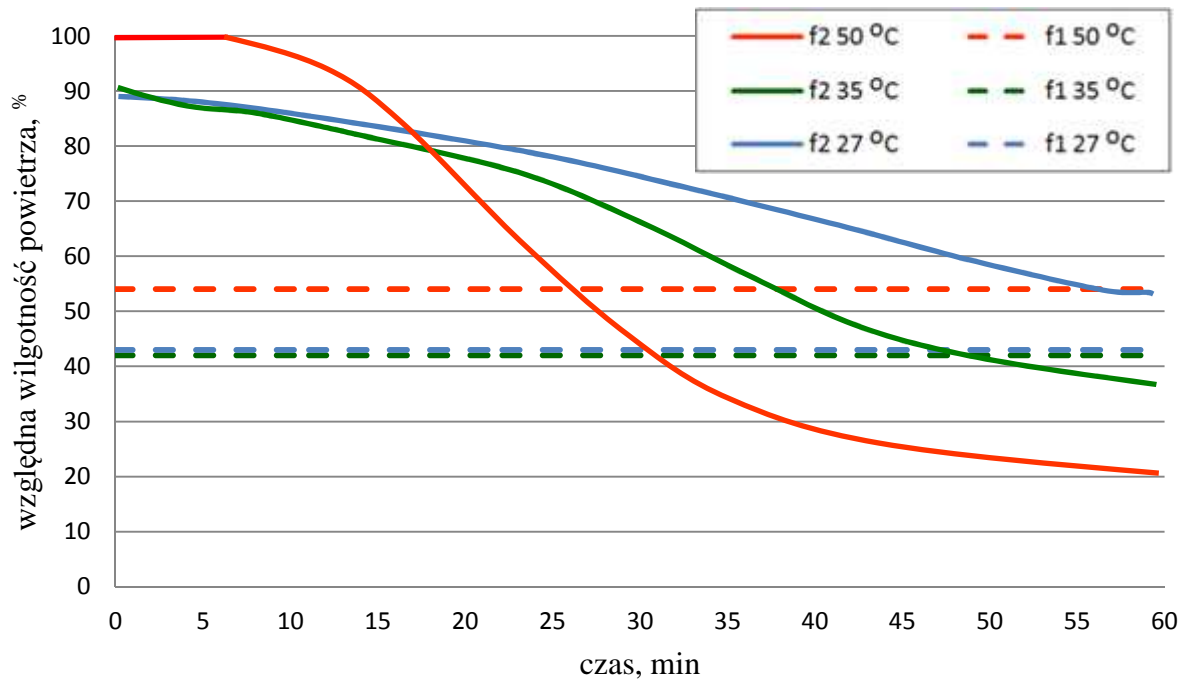


Rysunek 96. Wpływ temperatury procesu suszenia na zużycie energii elektrycznej– węgiel z Bełchatowa, złożę pęcherzykowe

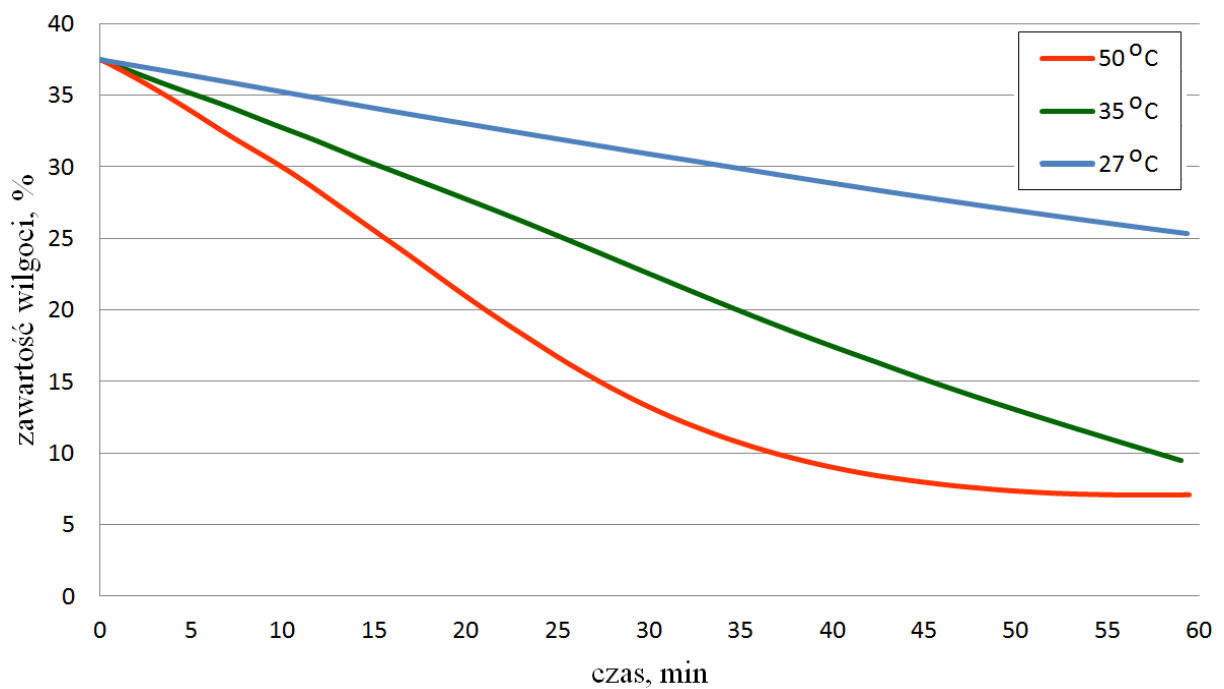
Tabela 31. Zużycie energii ze względu na ubytek wilgoci z węgla bełchatowskiego dla różnej temperatury suszenia w złożu pęcherzykowym:

węgiel bełchatowski, suszarka fluidalna pęcherzykowa, wielkość ziaren: 2,0-4,0 mm, czas suszenia: 60 min.				
Ubytek wilgoci o 10%				
temp. suszenia, °C	czas, min	energia cieplna, kJ/kgH ₂ O	energia elektryczna, kJ/kgH ₂ O	energia całkowita, kJ/kgH ₂ O
27	30	7178	3356	10534
35	17	5127	1431	6558
50	13	7613	1217	8829
Ubytek wilgoci o 20%				
temp. suszenia, °C	czas, min	energia cieplna, kJ/kgH ₂ O	energia elektryczna, kJ/kgH ₂ O	energia całkowita, kJ/kgH ₂ O
27	56	7281	3404	10686
35	28	5801	1619	7420
50	23	8786	1404	10191
Ubytek wilgoci o 30%				
temp. suszenia, °C	czas, min	energia cieplna, kJ/kgH ₂ O	energia elektryczna, kJ/kgH ₂ O	energia całkowita, kJ/kgH ₂ O
27	-	-	-	-
35	39	9290	2593	11884
50	33	17028	2722	19749

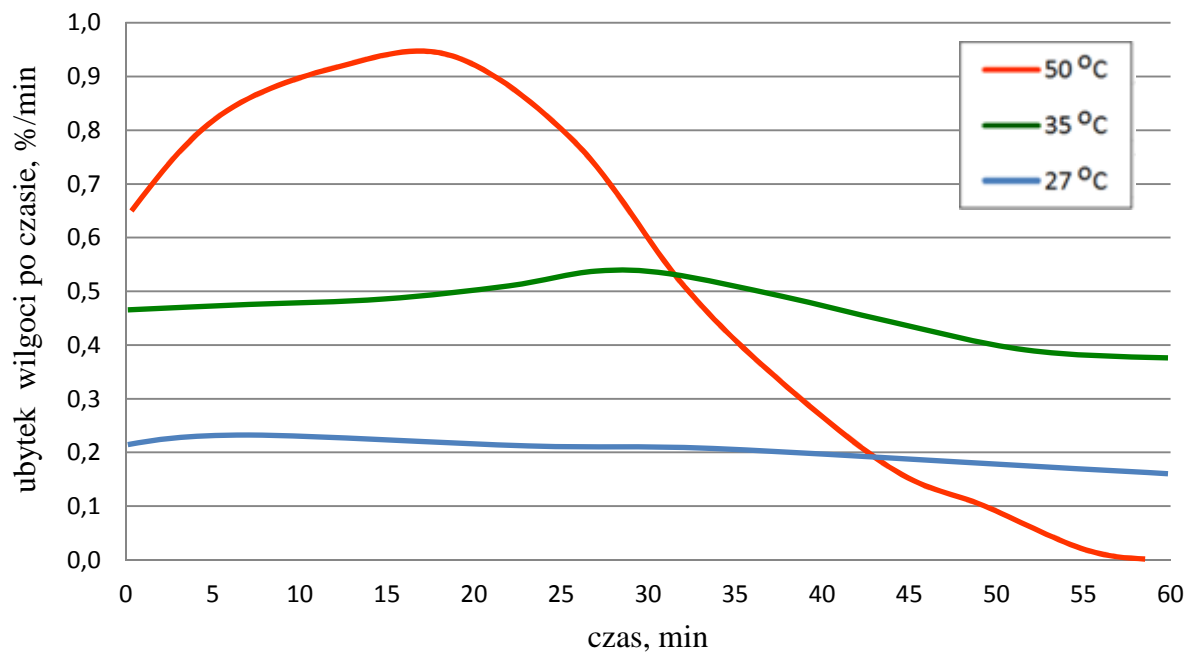
Na rysunkach 97-102 przedstawiono wyniki eksperymentów dla węgla turosszowskiego suszonego w złożu fluidalnym pęcherzykowym. Określono zawartość wilgotności względnej powietrza na wlocie i wylocie z suszarki w zależności od temperatury, wpływ temperatury gorącego powietrza na zawartość wilgoci, kinetykę suszenia, zmiany temperatury w suszarce podczas procesu oraz zużycie energii cieplnej i elektrycznej. Wyniki przedstawiono w tabeli 32.



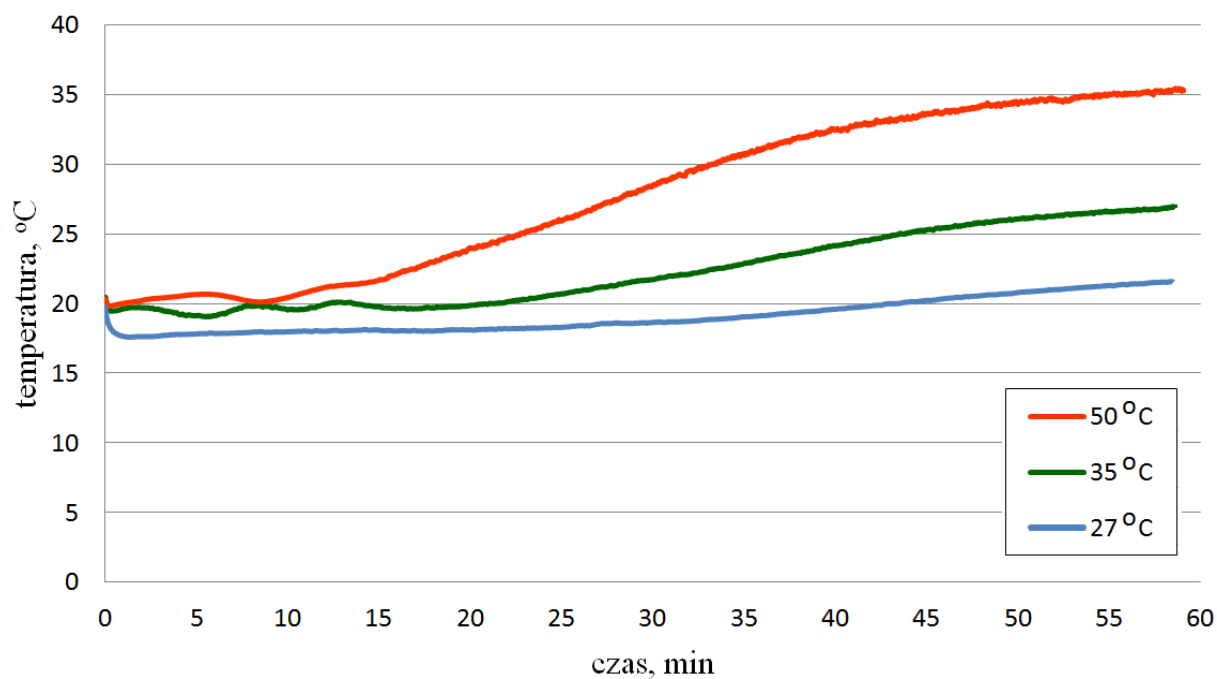
Rysunek 97. Zawartość wilgotności względnej powietrza na wlocie i wylocie z suszarki w zależności od temperatury dla węgla z Turowa, złoża pęcherzykowe



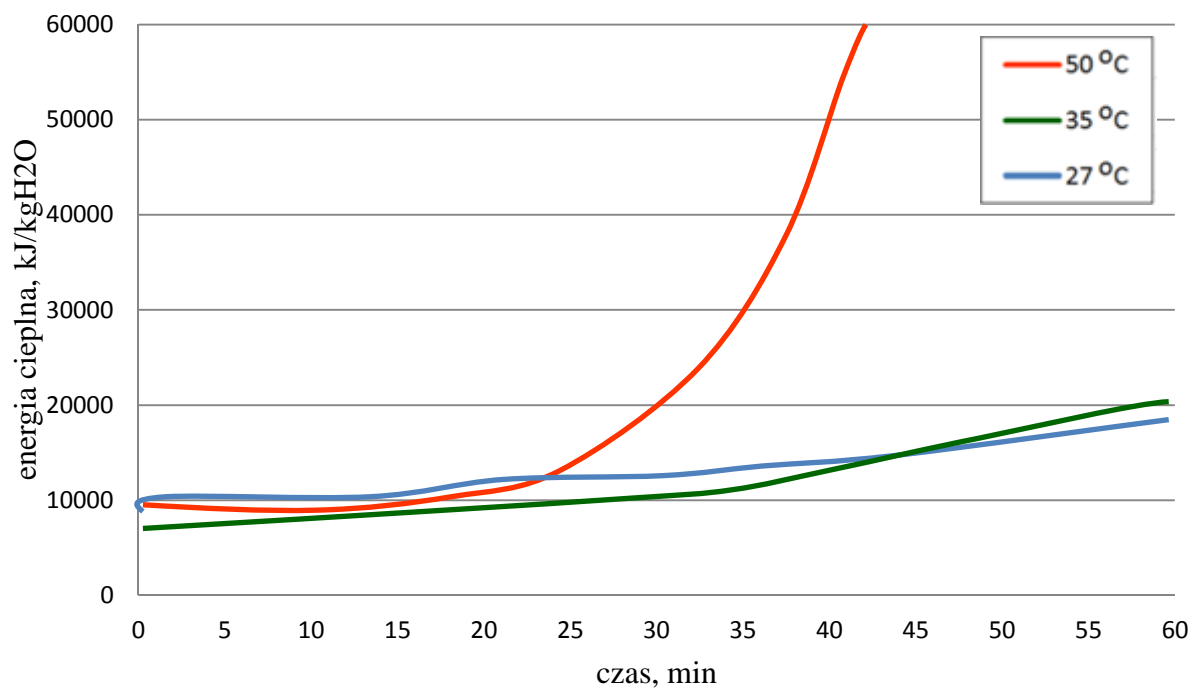
Rysunek 98. Wpływ temperatury procesu suszenia na zawartość wilgoci – węgiel z Turowa, złoża pęcherzykowe



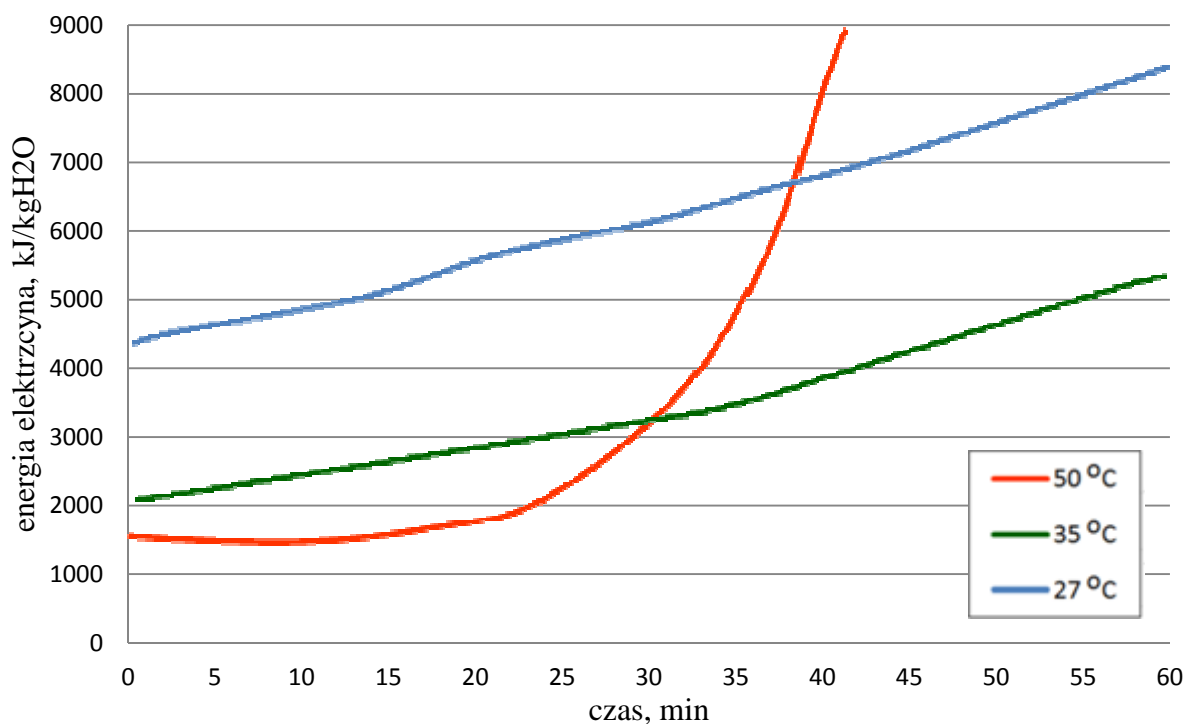
Rysunek 99. Wpływ temperatury procesu suszenia na kinetykę suszenia – węgiel z Turowa, złożę pęcherzykowe



Rysunek 100. Zmiana temperatury w suszarce ze względu na czas i temperaturę dolotową – węgiel z Turowa, złożę pęcherzykowe



Rysunek 101. Wpływ czasu i temperatury procesu suszenia na zużycie energii cieplnej – węgiel z Turowa, złożo pęcherzykowe



Rysunek 102. Wpływ czasu i temperatury procesu suszenia na zużycie energii elektrycznej – węgiel z Turowa, złożo pęcherzykowe

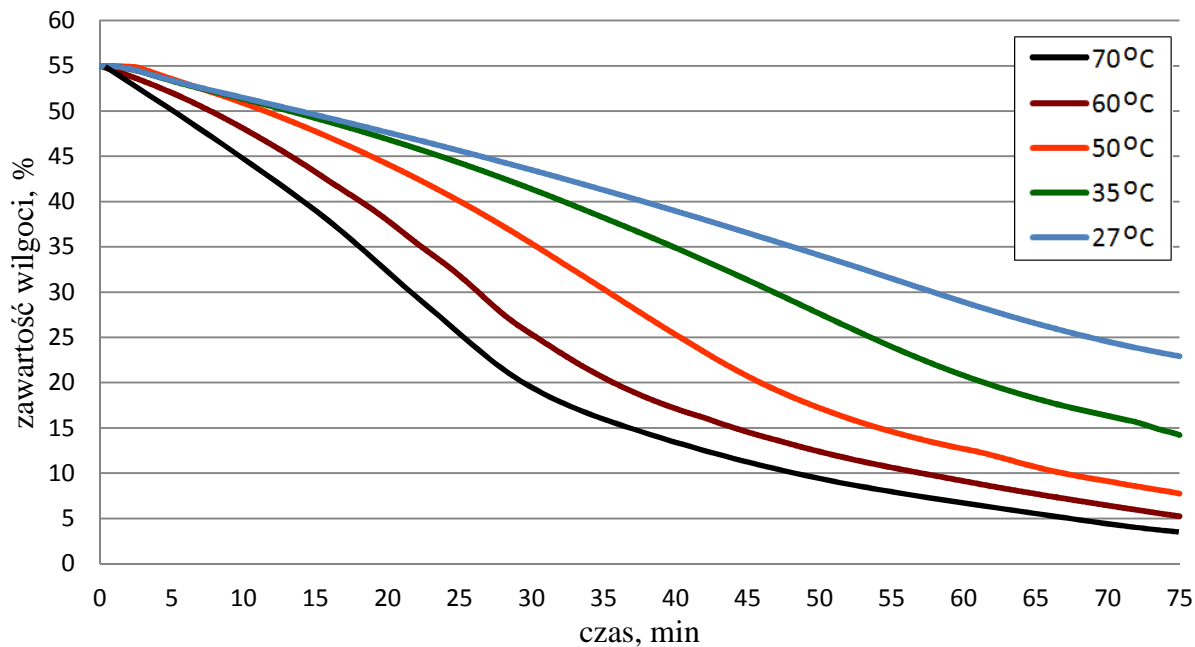
Tabela 32. Zużycie energii ze względu na ubytek wilgoci z węgla turoszowskiego dla różnej temperatury suszenia w złożu pęcherzykowym:

węgiel turoszowski, suszarka fluidalna pęcherzykowa, wielkość ziaren: 2,0-4,0 mm, czas suszenia: 60 min.				
Ubytek wilgoci o 10%				
temp. suszenia, °C	czas, min	energia cieplna, kJ/kgH ₂ O	energia elektryczna, kJ/kgH ₂ O	energia całkowita, kJ/kgH ₂ O
27	47	15464	7230	22694
35	20	9712	2711	12422
50	13	9360	1496	10856
Ubytek wilgoci o 20%				
temp. suszenia, °C	czas, min	energia cieplna, kJ/kgH ₂ O	energia elektryczna, kJ/kgH ₂ O	energia całkowita, kJ/kgH ₂ O
27	-	-	-	-
35	40	13332	3721	17053
50	24	12984	2075	15059

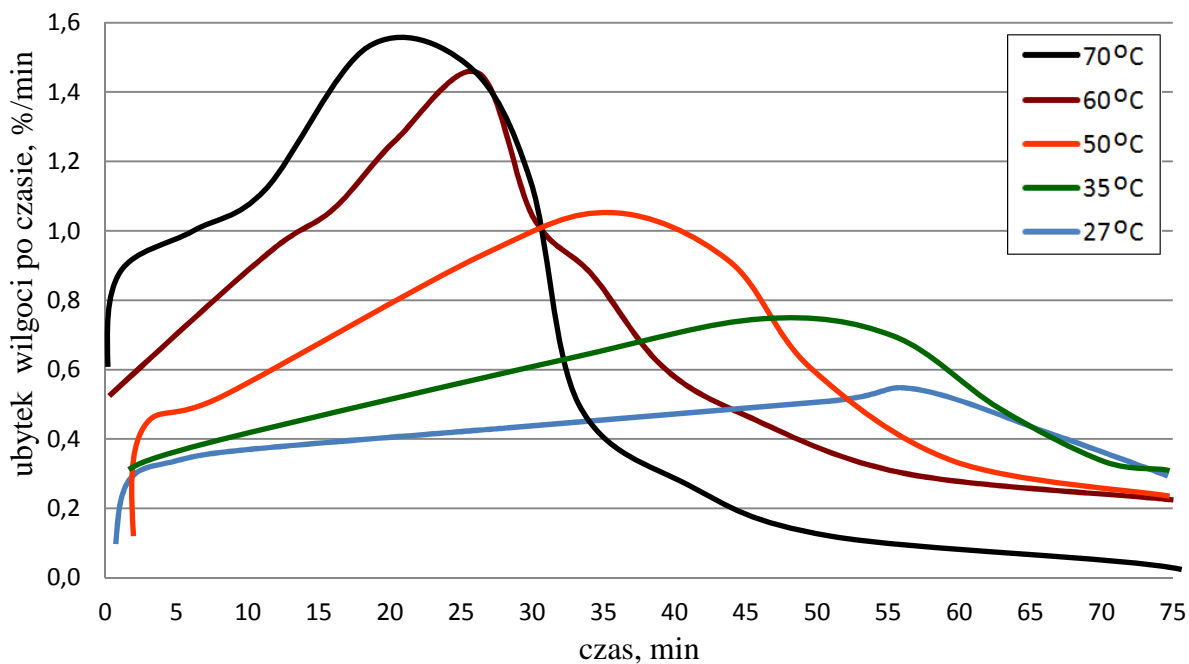
W przypadku suszarki fluidalnej pęcherzykowej widać zasadniczy wpływ temperatury czynnika suszącego na kinetykę suszenia. W przypadku węgla bełchatowskiego kinetyka suszenia (rysunek 93) dla temperatury 27°C jest praktycznie linią prostą wzrastającą w przedziale czasu 60 minut od wartości 0,2 %/min do 0,5%/min. W przypadku wyższych temperatur, kinetyka suszenia przyjmuje kształt paraboliczny i osiąga swoje maksimum dla 35°C równe 0,9 %/min po 30 minutach trwania suszenia, a dla 50°C równe 1,1%/min po 24 minutach suszenia. W przypadku węgla turoszowskiego (rysunek 99) dla temperatury 27°C kinetyka suszenia przyjmuje kształt prostej lekko opadającej o wartości około 0,2 %/min. W przypadku wyższych temperatur kształt kinetyki suszenia nabiera charakteru paraboli i dla temperatury suszenia 35°C maksimum wynosi 0,5 %/min po 30 minutach suszenia, a dla 50°C wynosi 0,9 %/min po 18 minutach suszenia. W obu przypadkach temperatura czynnika suszącego ma zasadniczy wpływ na kinetykę suszenia. Kinetyka suszenia w sposób bezpośredni wpływa także na zużycie energii cieplnej i elektrycznej. Zarówno dla węgla bełchatowskiego jak i turoszowskiego (tabela 31 i 32) wzrost temperatury czynnika suszącego powoduje zmniejszenie czasu przebywania węgla w suszarce ze względu na osiągnięcie określonego stanu zawartości wilgoci końcowej. Wpływa również na zwiększenie zużycia energii cieplnej, ale zmniejszenie energii elektrycznej pracy wentylatora.

Na rysunkach 103-109 przedstawiono wyniki eksperymentów dla węgla bełchatowskiego suszonego w złożu fluidalnym fontannowym. Określono zawartość wilgotności względnej powietrza na wlocie i wylocie z suszarki w zależności od temperatury,

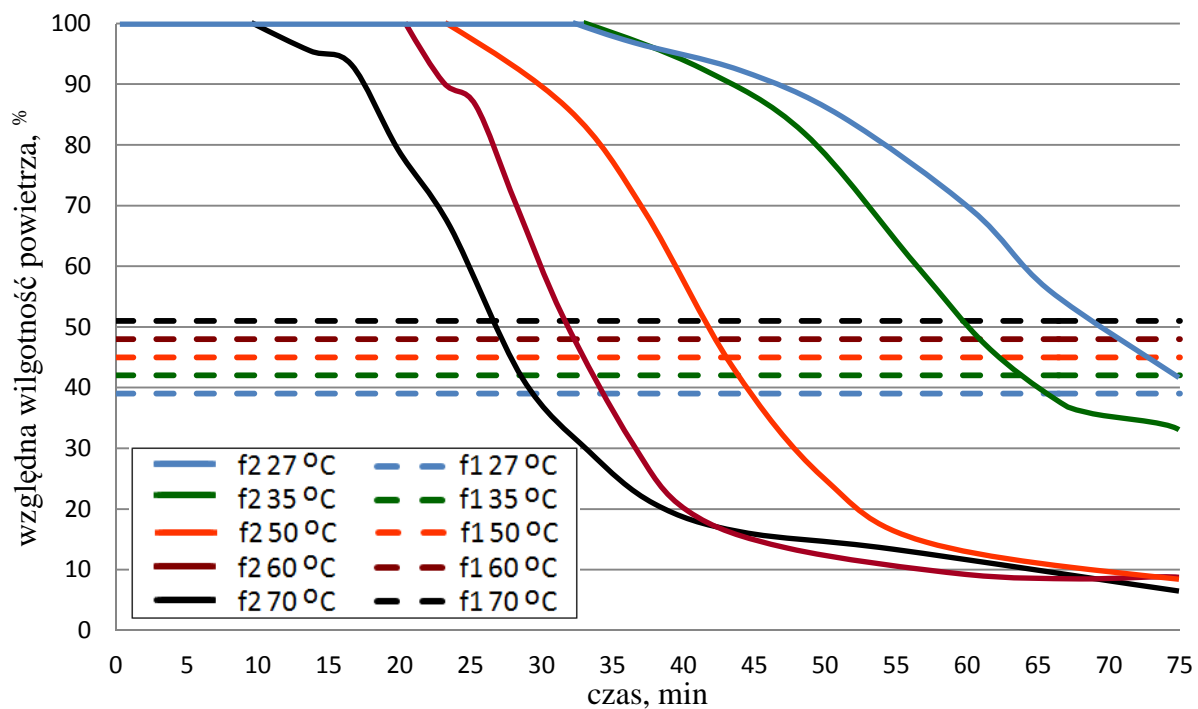
wpływ temperatury gorącego powietrza na zawartość wilgoci, kinetykę suszenia, zmiany temperatury w suszarce podczas procesu, straty ciśnienia w suszarce oraz zużycie energii cieplnej i elektrycznej. Wyniki przedstawiono w tabeli 33.



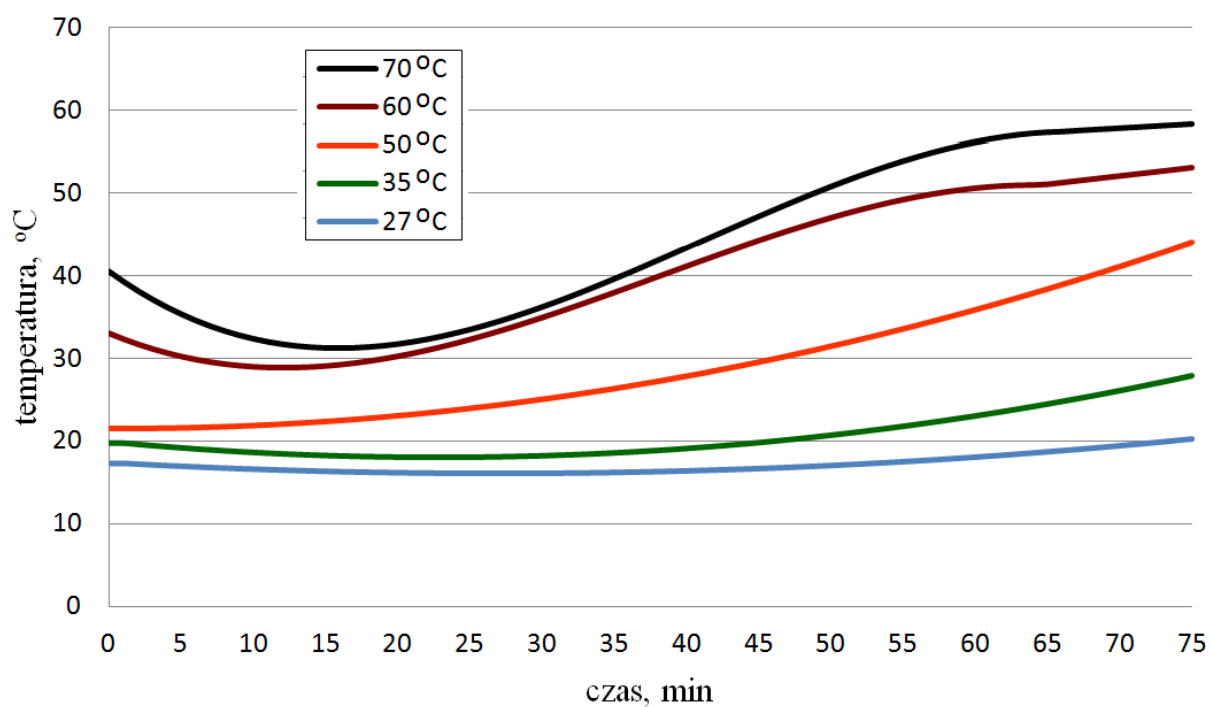
Rysunek 103. Wpływ temperatury procesu suszenia na zawartość wilgoci – węgiel z Bełchatowa, złoża fontannowe



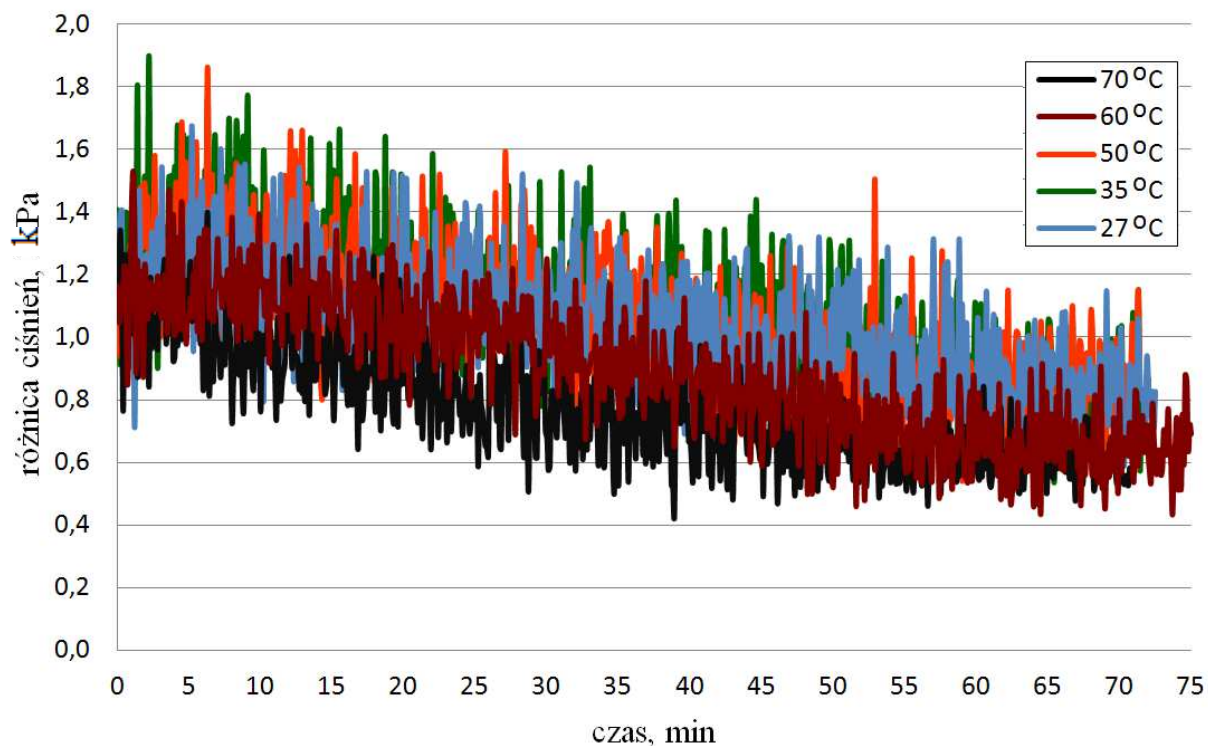
Rysunek 104. Wpływ temperatury procesu suszenia na kinetykę suszenia – węgiel z Bełchatowa, złoża fontannowe



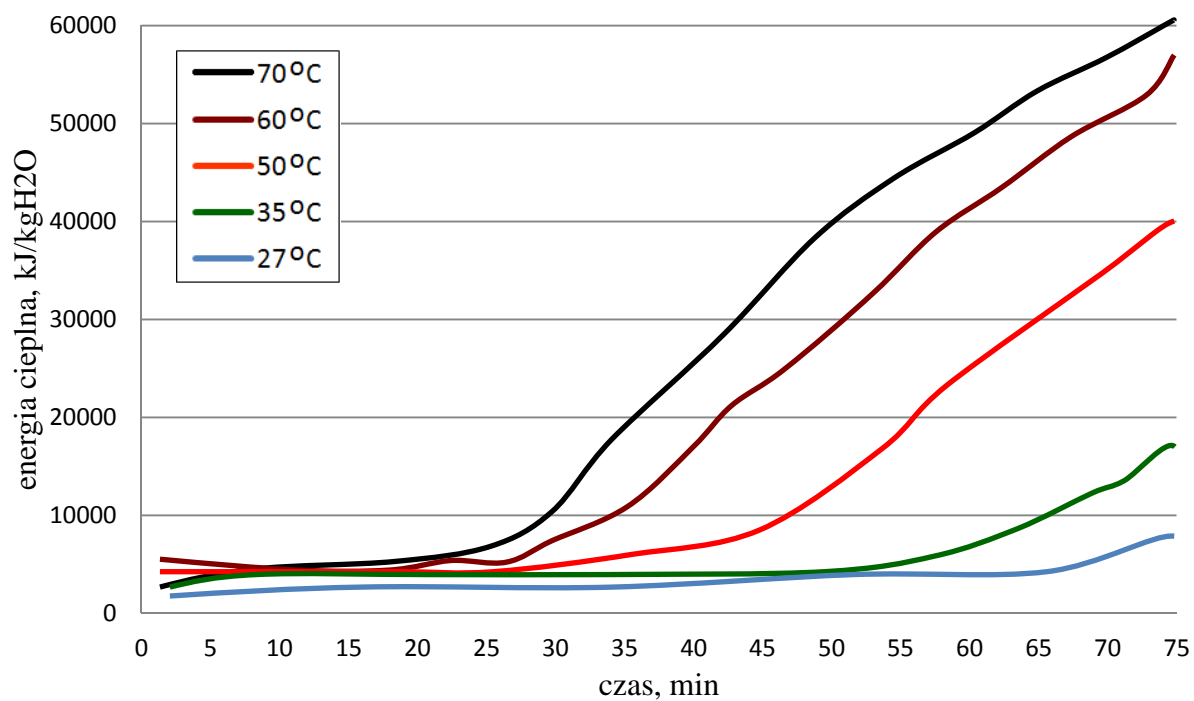
Rysunek 105. Zawartość wilgotności względnej powietrza na wlocie i wylocie z suszarki w zależności od temperatury dla węgla z Bełchatowa, złoża fontannowe



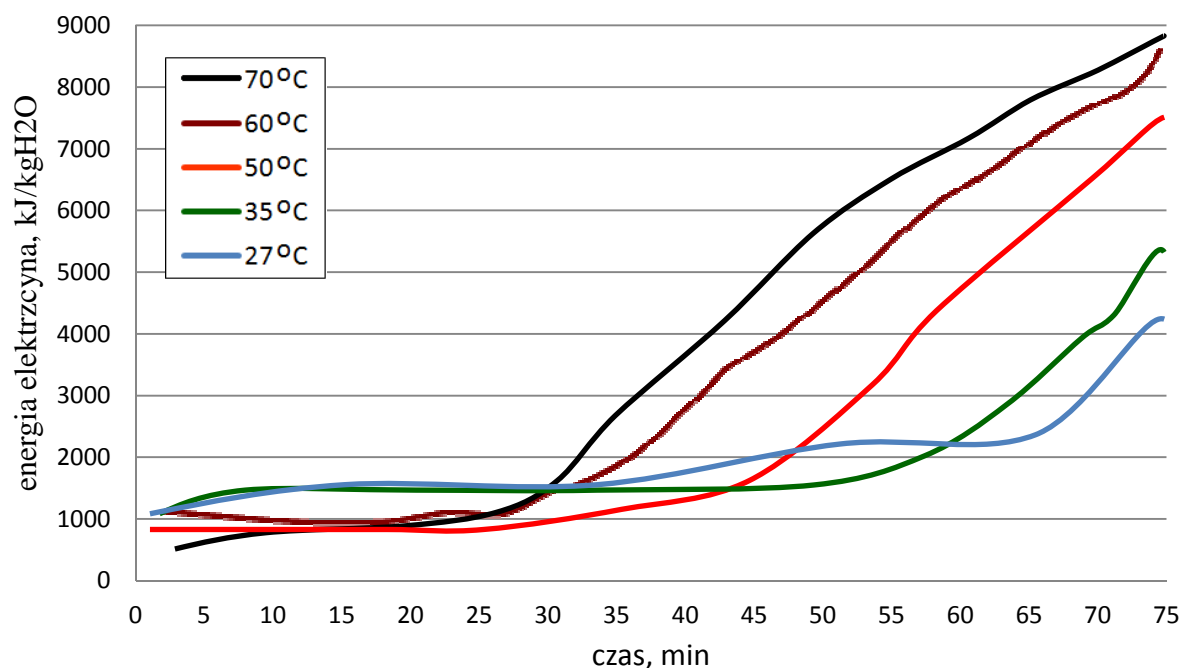
Rysunek 106. Zmiana temperatury w suszarce ze względu na czas i temperaturę dolotową – węgiel z Bełchatowa, złoża fontannowe



Rysunek 107. Różnica ciśnień pomiędzy wlotem, a komorą suszenia w zależności do temperatury suszenia - Bełchatów, złożo fontannowe



Rysunek 108. Wpływ temperatury procesu suszenia na zużycie energii cieplnej – węgiel z Bełchatowa, złożo fontannowe

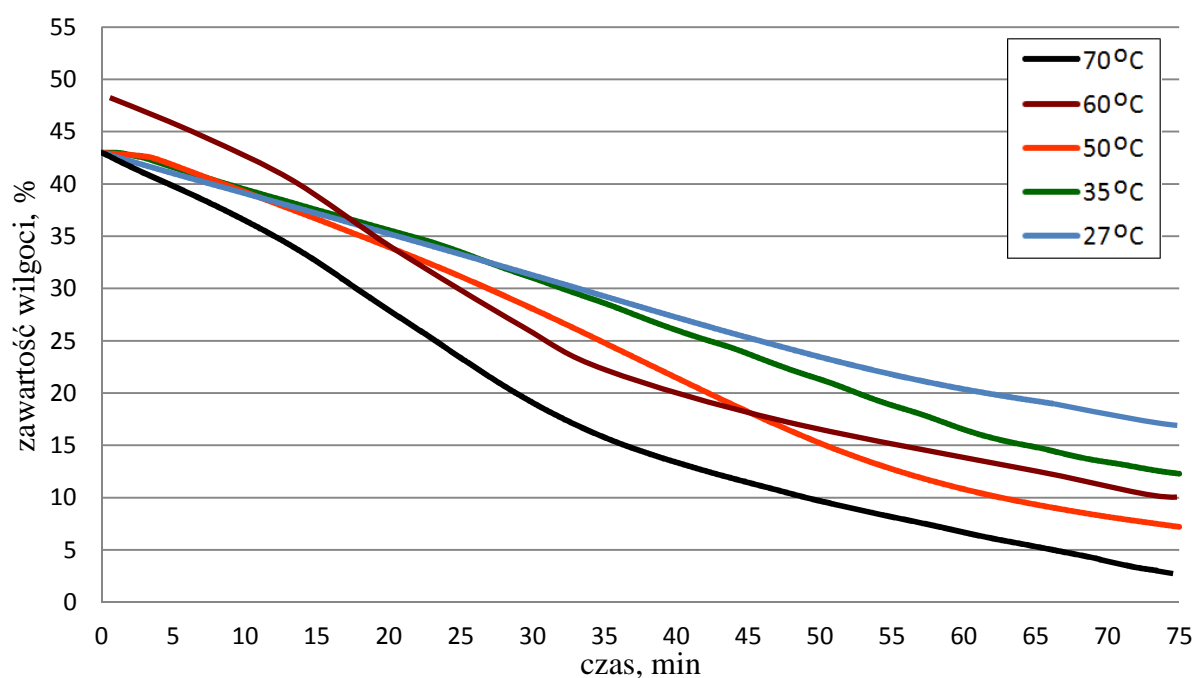


Rysunek 109. Wpływ temperatury procesu suszenia na zużycie energii elektrycznej – węgiel z Bełchatowa, złożo fontannowe

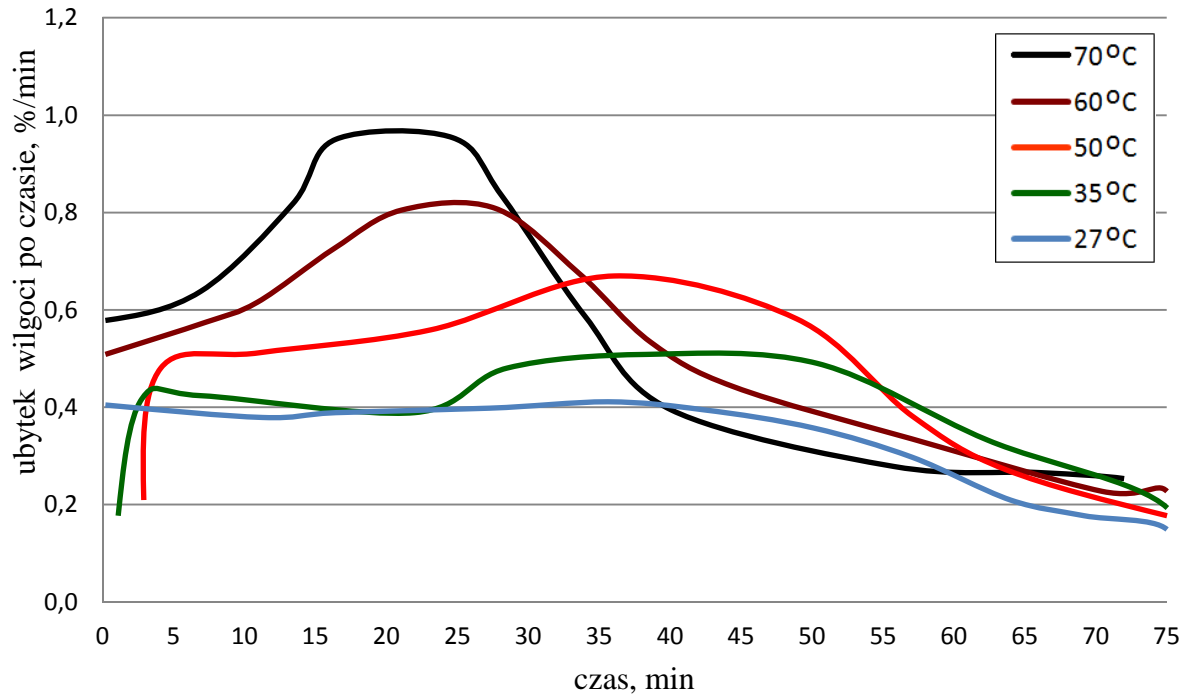
Tabela 33. Zużycie energii ze względu na ubytek wilgoci z węgla bełchatowskiego dla różnej temperatury suszenia w złożu fontannowym:

węgiel bełchatowski, suszarka fluidalna fontannowa, wielkość ziaren: 0,0-8,0 mm, czas suszenia: 75 min.				
Ubytek wilgoci o 10%				
temp. suszenia, °C	czas, min	energia cieplna, kJ/kgH2O	energia elektryczna, kJ/kgH2O	energia całkowita, kJ/kgH2O
27	26	2741	1549	4290
35	24	3664	1221	4886
50	19	4579	875	5455
60	13	4512	666	5178
70	10	4429	538	4967
Ubytek wilgoci o 20%				
temp. suszenia, °C	czas, min	energia cieplna, kJ/kgH2O	energia elektryczna, kJ/kgH2O	energia całkowita, kJ/kgH2O
27	48	3241	1832	5072
35	40	3950	1317	5267
50	30	4796	917	5713
60	22	4944	730	5675
70	18	5159	627	5786
Ubytek wilgoci o 30%				
temp. suszenia, °C	czas, min	energia cieplna, kJ/kgH2O	energia elektryczna, kJ/kgH2O	energia całkowita, kJ/kgH2O
27	69	5690	3216	8906
35	53	5003	1668	6670
50	40	6363	1216	7580
60	30	7796	1152	8948
70	25	6640	807	7447

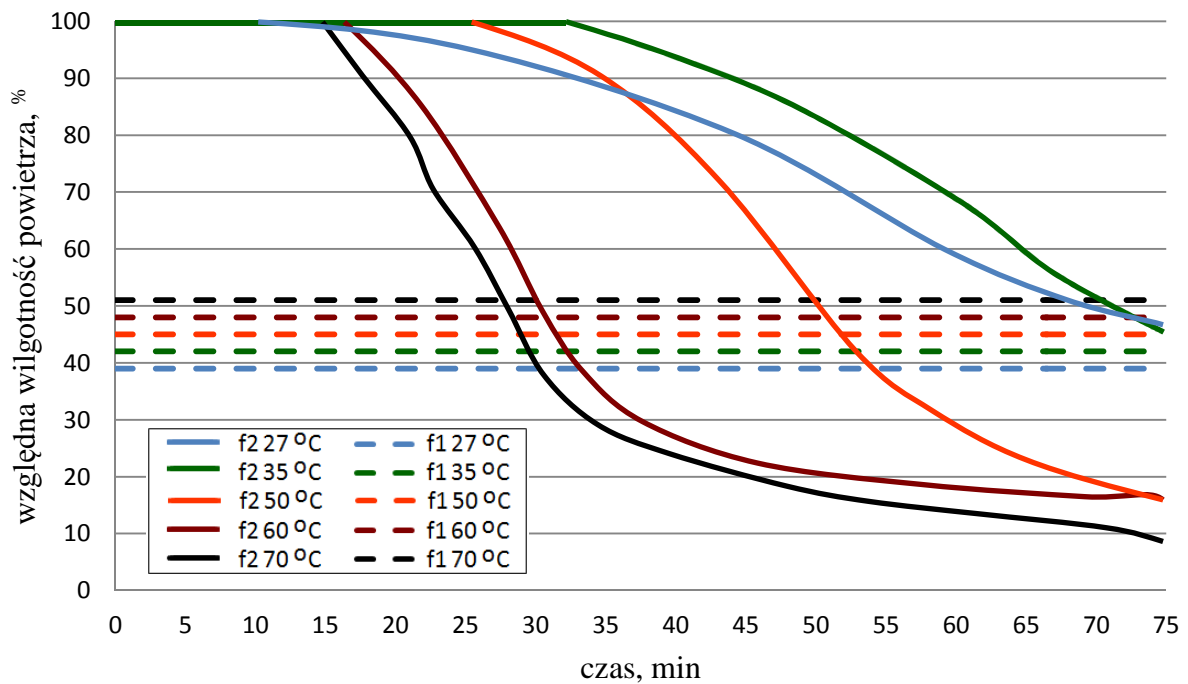
Na rysunkach 110-116 przedstawiono wyniki eksperymentów dla węgla turowskiego suszonego w złożu fluidalnym fontannowym. Określono zawartość wilgotności względnej powietrza na wlocie i wylocie z suszarki w zależności od temperatury, wpływ temperatury gorącego powietrza na zawartość wilgoci, kinetykę suszenia, zmiany temperatury w suszarce podczas procesu, straty ciśnienia w suszarce oraz zużycie energii cieplnej i elektrycznej. Wyniki przedstawiono w tabeli 34.



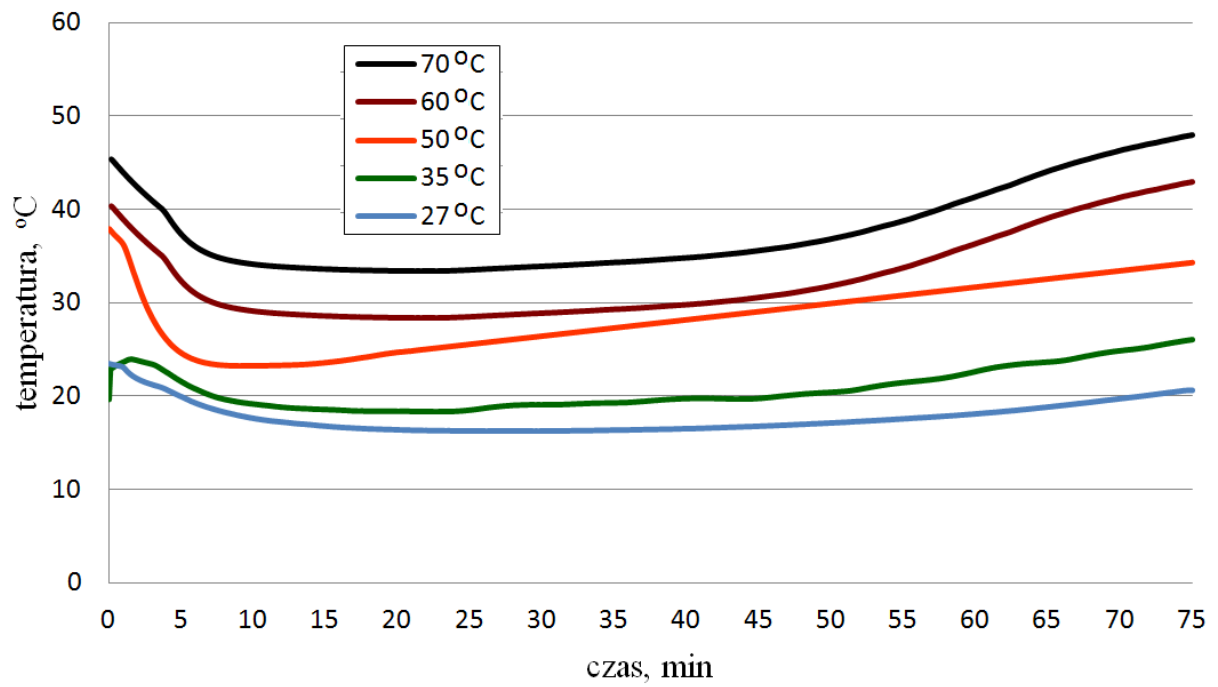
Rysunek 110. Wpływ temperatury procesu suszenia na zawartość wilgoci – węgiel z Turowa, złożo fontannowe



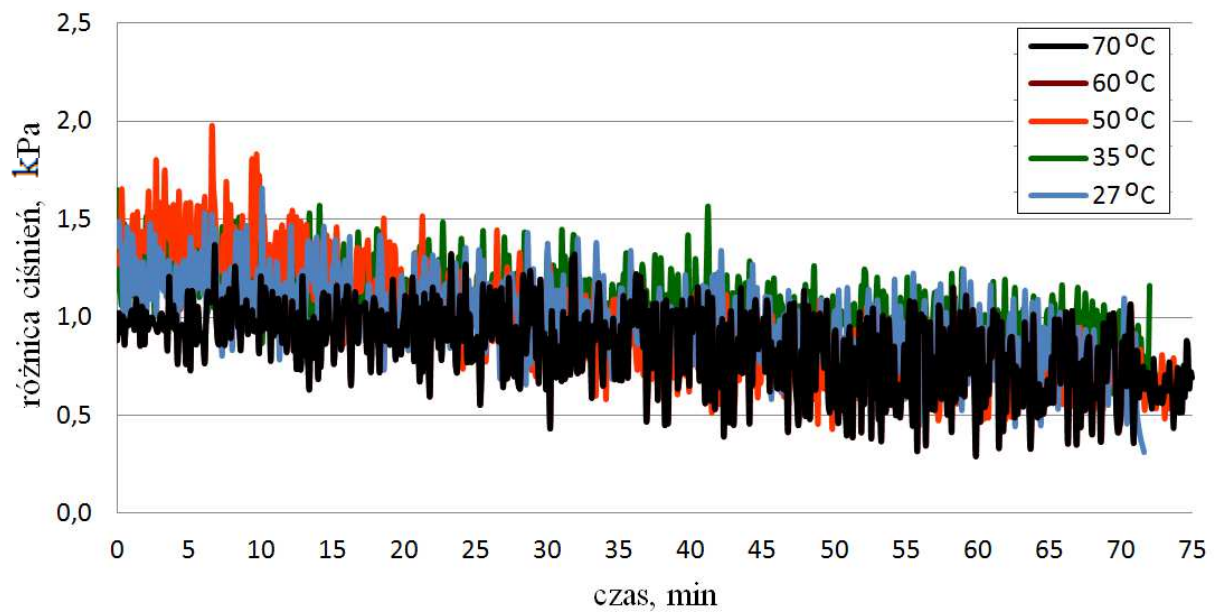
Rysunek 111. Wpływ temperatury procesu suszenia na kinetykę suszenia – węgiel z Turowa, złożo fontannowe



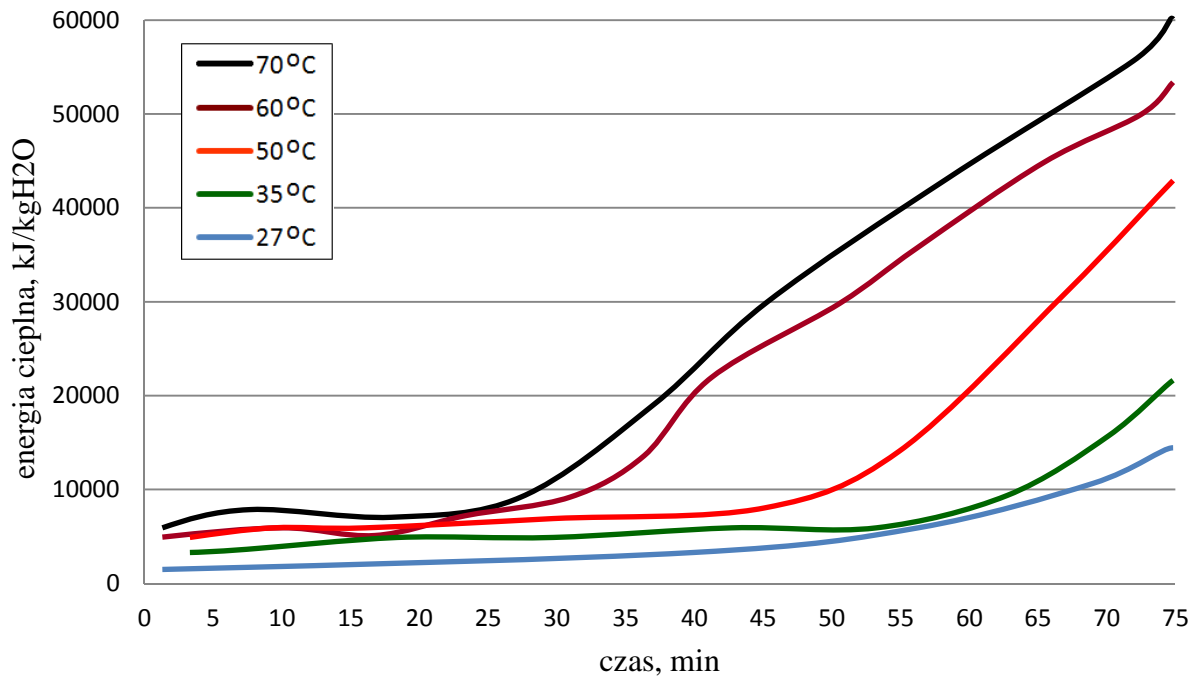
Rysunek 112. Zawartość wilgotności względnej powietrza na wlocie i wylocie z suszarki w zależności od temperatury dla węgla z Turowa, złożo fontannowe



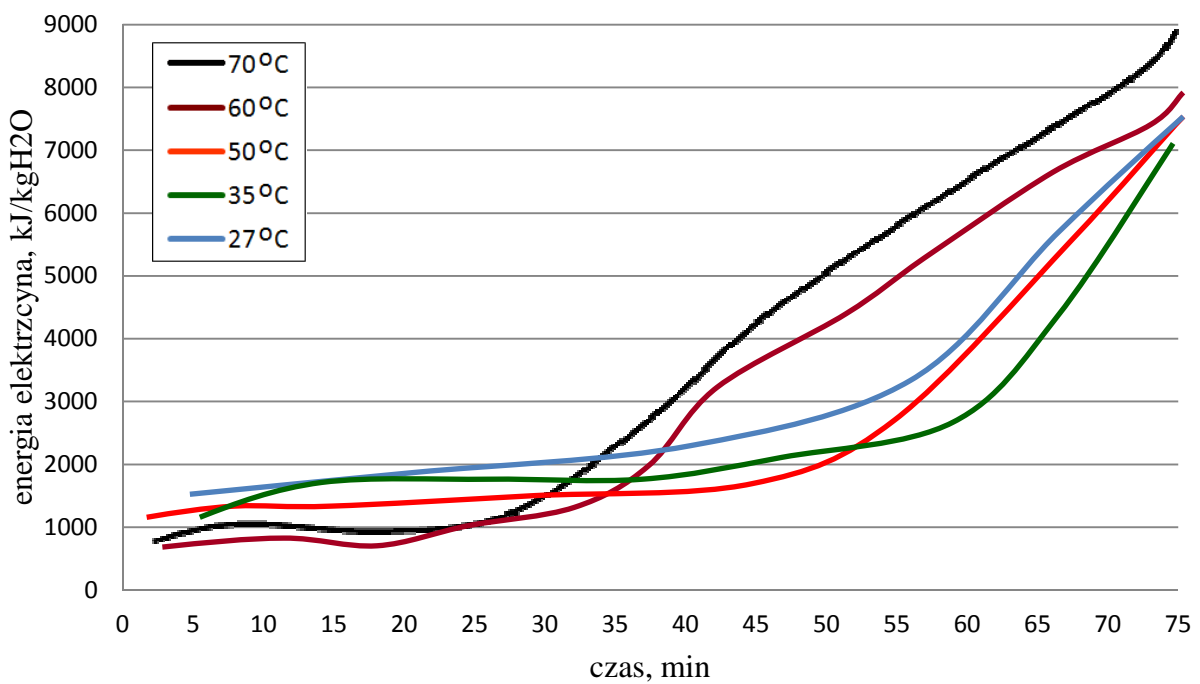
Rysunek 113. Zmiana temperatury w suszarce ze względu na czas i temperaturę dolotową – węgiel z Turowa, złożo fontannowe



Rysunek 114. Różnica ciśnień pomiędzy wlotem, a komorą suszenia w zależności do temperatury suszenia - węgiel z Turowa, złożo fontannowe



Rysunek 115. Wpływ temperatury procesu suszenia na zużycie energii cieplnej – węgiel z Turowa, złoża fontannowe



Rysunek 116. Wpływ temperatury procesu suszenia na zużycie energii elektrycznej – węgiel z Turowa, złoża fontannowe

Tabela 34. Zużycie energii ze względu na ubytek wilgoci z węgla turoszowskiego dla różnej temperatury suszenia w złożu fontannowym:

węgiel turoszowski, suszarka fluidalna fontannowa, wielkość ziaren: 0,0-8,0 mm, czas suszenia: 75 min.				
Ubytek wilgoci o 10%				
temp. suszenia, °C	czas, min	energia cieplna, kJ/kgH ₂ O	energia elektryczna, kJ/kgH ₂ O	energia całkowita, kJ/kgH ₂ O
27	26	3435	1942	5377
35	25	4433	1478	5911
50	22	7291	1394	8684
60	15	5861	866	6727
70	14	7398	899	8297
Ubytek wilgoci o 20%				
temp. suszenia, °C	czas, min	energia cieplna, kJ/kgH ₂ O	energia elektryczna, kJ/kgH ₂ O	energia całkowita, kJ/kgH ₂ O
27	51	5123	2896	8019
35	46	5723	1908	7631
50	38	7926	1515	9441
60	27	8060	1191	9250
70	25	9063	1101	10164

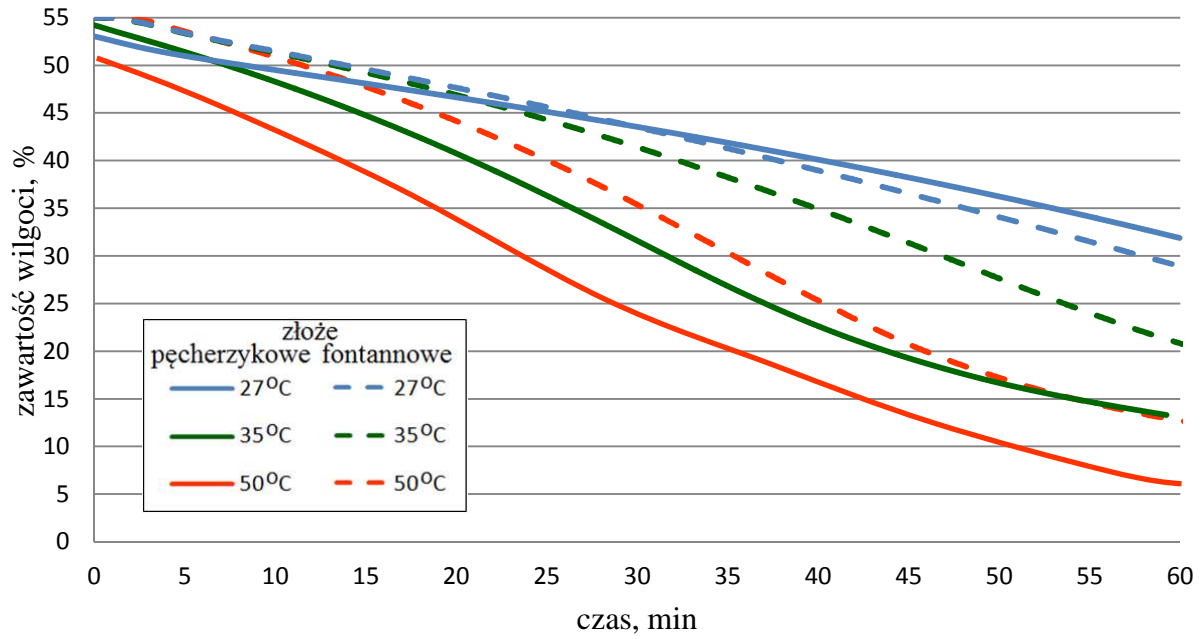
Podobne zależności jak w przypadku suszarki fluidalnej pęcherzykowej zaobserwowano w suszarce fluidalnej fontannowej. W przypadku kinetyki suszenia węgla bełchatowskiego (rysunek 104) przyjmuje ona kształt paraboliczny dla każdej badanej temperatury i osiąga swoje maksimum dla 27°C równe 0,5 %/min po 57 minutach suszenia, dla 35°C równe 0,8 %/min po 57 minutach trwania suszenia, dla 50°C równe 1,1 %/min po 36 minutach suszenia, dla 60°C równe 1,4 %/min po 26 minutach suszenia oraz dla 70°C równe 1,6 %/min po 17 minutach suszenia. W przypadku węgla turoszowskiego (rysunek 111) kinetyka suszenia nabiera charakterystyki parabolicznej od 35°C i osiąga maksimum dla tej temperatury suszenia równe 0,5 %/min po 45 minutach, dla 50°C równe 0,7 %/min po 37 minutach suszenia, dla 60°C równe 0,8 %/min po 24 minutach suszenia oraz dla 70°C równe 1,0 %/min po 16 minutach suszenia. Wartości maksimum kinetyki suszenia w złożu fluidalnym fontannowym dla obu badanych węgli są praktycznie takie same jak w złożu pęcherzykowym dla temperatur 27°C, 35°C i 50°C, ale osiągnięte w późniejszym czasie, co świadczy o szybszym przebiegu suszenia w złożu fluidalnym pęcherzykowym. Również w złożu fluidalnym pęcherzykowym wzrost temperatury czynnika suszącego ma zasadniczy wpływ na kinetykę suszenia oraz zużycie energii cieplnej i elektrycznej (tabela 33 i 34). Wzrost temperatury czynnika suszącego powoduje zmniejszenie czasu przebywania węgla w suszarce ze względu na osiągnięcie określonego stanu zawartości wilgoci końcowej.

Krótszy czas suszenia wpływa na mniejsze zużycie energii elektrycznej pracy wentylatora, ale zwiększa zużycie energii cieplnej. Często duże zapotrzebowanie energii cieplnej do uzyskania wysokiej temperatury czynnika suszącego przekracza oszczędność wynikającą ze skrócenia czasu suszenia. Dlatego zastosowanie suszarki do suszenia węgla w istniejących blokach wymaga analizy istniejących źródeł ciepła, które mogą być wykorzystywane, a przez to zminimalizować zużycie energii cieplnej i w bardzo efektywny sposób wpłynąć na zmniejszenie kosztów suszenia węgla brunatnego. W przypadku wykorzystania odpadowej energii cieplnej o temperaturze ponad 50°C można uzyskać zużycie energii elektrycznej wentylatora w zakresie 1000-1500 kJ/kgH₂O, w zależności od rodzaju suszonego węgla i obniżenia wilgoci końcowej węgla o 10%-30%.

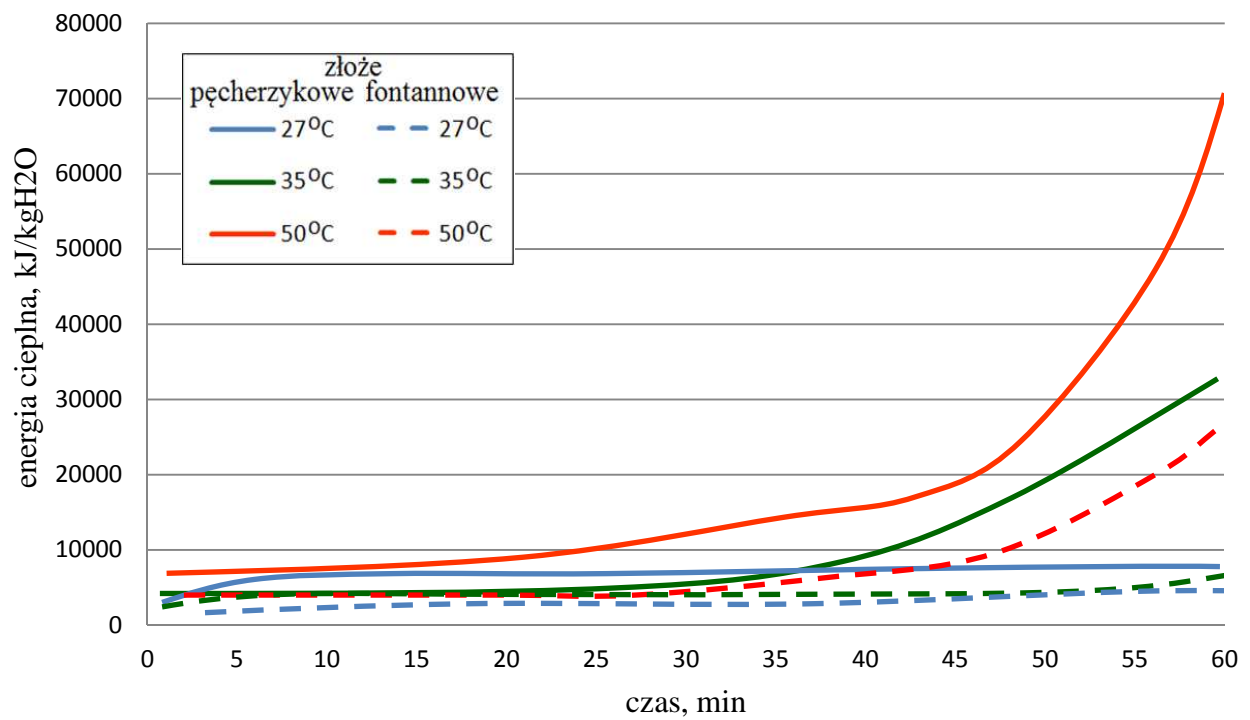
4.4.5 Wpływ rodzaju złoża fluidalnego na proces suszenia

Ostatnim badanym parametrem był rodzaj złoża fluidalnego. Na podstawie przeprowadzonych testów dokonano porównania efektywności suszenia w złożu fluidalnym pęcherzykowym i fontannowym ze względu na kinetykę oraz zużycie energii. Do testów użyto węgla bełchatowskiego i turoszowskiego o rozkładzie ziarnowym 2,0-4,0 mm i minimalnych prędkościach fluidyzacyjnych (suszarka fluidalna pęcherzykowa 6,2 m/s, suszarka fluidalna fontanna 8,0m/s). W obu suszarkach była taka sama średnia gęstość złoża fluidalnego na poziomie 0,033 dm³/kg. Badania wykonano dla temperatur czynnika suszącego na wlocie do komory o wartościach 27°C, 35°C i 50°C.

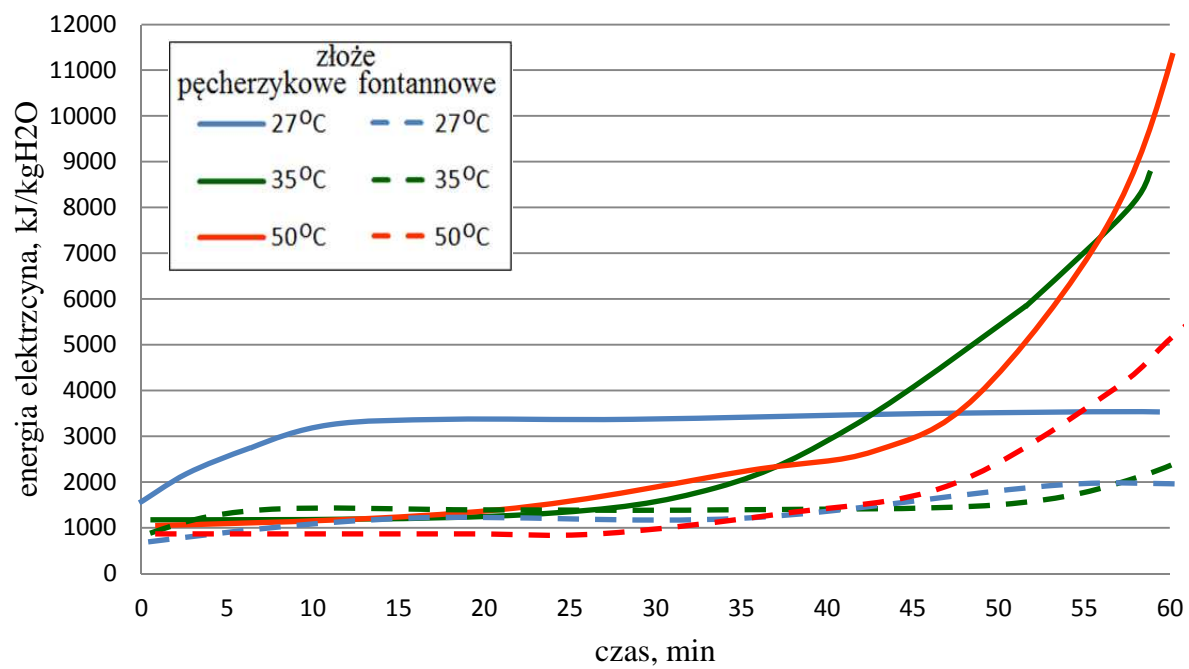
Na rysunkach 117-119 przedstawiono wyniki eksperymentów dla węgla bełchatowskiego. Określono wpływ rodzaju złoża na zawartość wilgoci, kinetykę suszenia, zużycie energii cieplnej i elektrycznej. Wyniki przedstawiono w tabeli 35.



Rysunek 117. Wpływ rodzaju suszarki i temperatury procesu suszenia na zawartość wilgoci – węgiel z Bełchatowa



Rysunek 118. Wpływ rodzaju suszarki i temperatury procesu suszenia na zużycie energii cieplnej – węgiel z Turowa

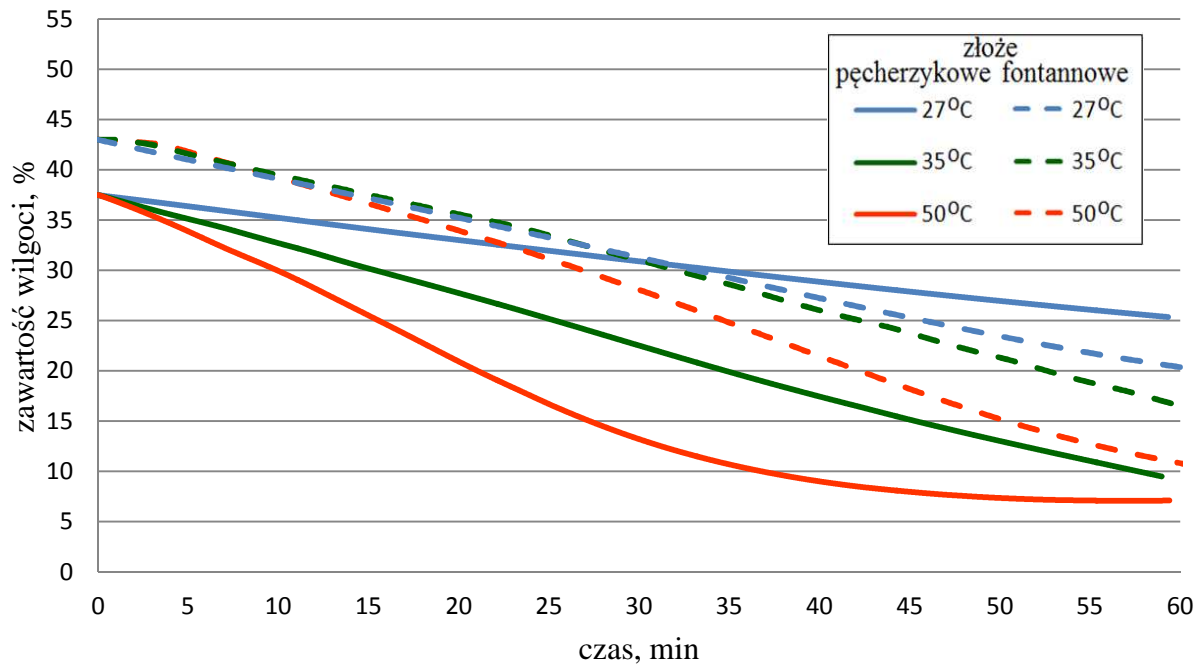


Rysunek 119. Wpływ rodzaju suszarki i temperatury procesu suszenia na zużycie energii elektrycznej – węgiel z Bełchatowa

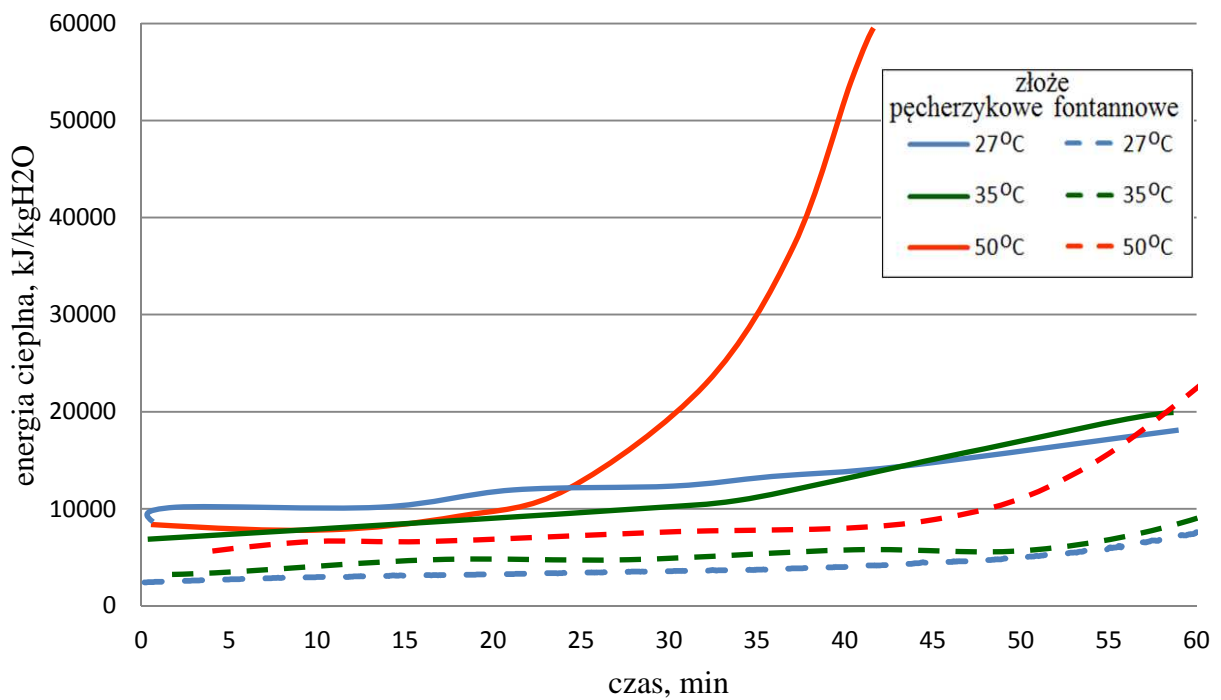
Tabela 35. Zużycie energii ze względu na ubytek wilgoci z węgla bełchatowskiego dla różnych rodzajów złoża fluidalnego:

węgiel bełchatowski, złożo fluidalne pęcherzykowe i fontannowe, czas suszenia: 60 min.					
Ubytek wilgoci o 10%					
	temp. suszenia, °C	czas, min	energia cieplna, kJ/kgH ₂ O	energia elektryczna, kJ/kgH ₂ O	energia całkowita, kJ/kgH ₂ O
pech.	27	30	7178	3356	10534
font.	27	26	2741	1549	4290
pech.	35	17	5127	1431	6558
font.	35	24	3664	1221	4886
pech.	50	13	7613	1217	8829
font.	50	19	4579	875	5455
Ubytek wilgoci o 20%					
	temp. suszenia, °C	czas, min	energia cieplna, kJ/kgH ₂ O	energia elektryczna, kJ/kgH ₂ O	energia całkowita, kJ/kgH ₂ O
pech.	27	56	7281	3404	10686
font.	27	48	3241	1832	5072
pech.	35	28	5801	1619	7420
font.	35	40	3950	1317	5267
pech.	50	23	8786	1404	10191
font.	50	30	4796	917	5713
Ubytek wilgoci o 30%					
	temp. suszenia, °C	czas, min	energia cieplna, kJ/kgH ₂ O	energia elektryczna, kJ/kgH ₂ O	energia całkowita, kJ/kgH ₂ O
pech.	27	-	-	-	-
font.	27	-	-	-	-
pech.	35	39	9290	2593	11884
font.	35	53	5003	1668	6670
pech.	50	33	17028	2722	19749
font.	50	40	6363	1216	7580

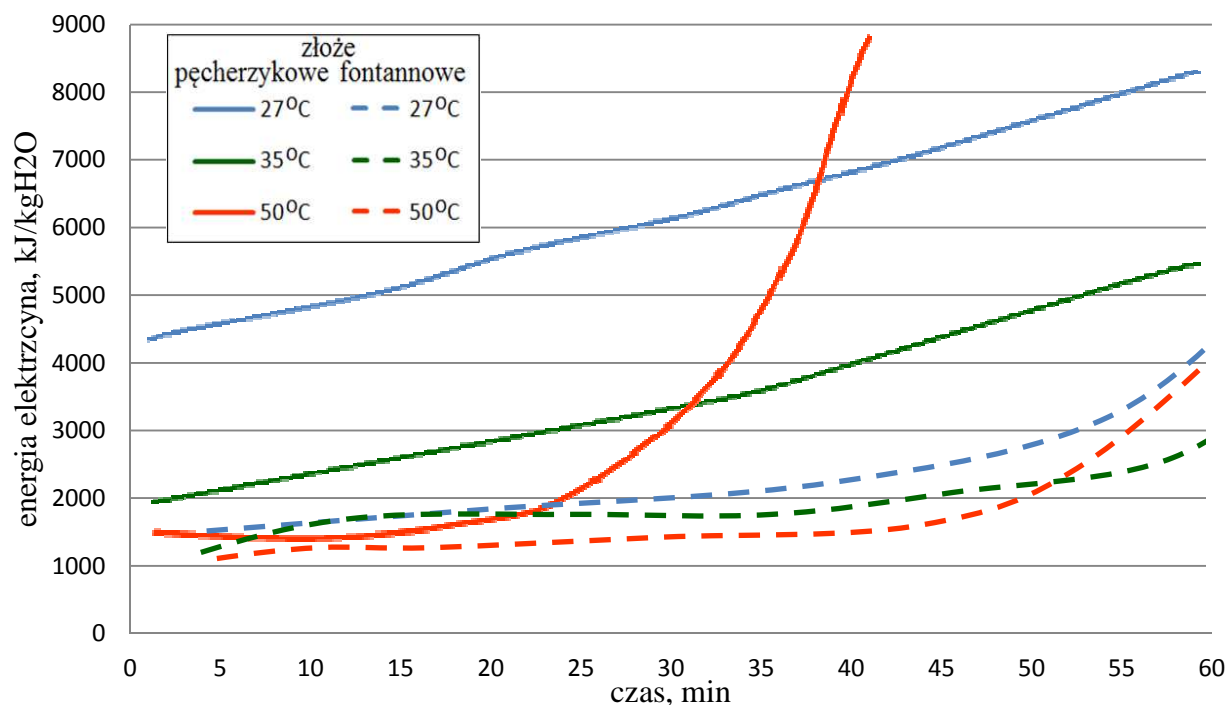
Na rysunkach 120-122 przedstawiono wyniki eksperymentów dla węgla turosszowskiego. Określono wpływ rodzaju złoża na zawartość wilgoci, kinetykę suszenia, zużycie energii cieplnej i elektrycznej. Wyniki przedstawiono w tabeli 36.



Rysunek 120. Wpływ rodzaju suszarki i temperatury procesu suszenia na zawartość wilgoci – węgiel z Turowa



Rysunek 121. Wpływ rodzaju suszarki i temperatury procesu suszenia na zużycie energii cieplnej – węgiel z Turowa



Rysunek 122. Wpływ rodzaju suszarki i temperatury procesu suszenia na zużycie energii elektrycznej – węgiel z Turowa

Tabela 36. Zużycie energii ze względu na ubytek wilgoci z węgla turowskiego dla różnych rodzajów złoża fluidalnego:

węgiel turowski, złożo fluidalne pęcherzykowe i fontannowe, czas suszenia: 60 min.					
Ubytek wilgoci o 10%					
	temp. suszenia, °C	czas, min	energia cieplna, kJ/kgH ₂ O	energia elektryczna, kJ/kgH ₂ O	energia całkowita, kJ/kgH ₂ O
pech.	27	47	15464	7230	22694
font.	27	26	3435	1942	5377
pech.	35	20	9712	2711	12422
font.	35	25	4433	1478	5911
pech.	50	13	9360	1496	10856
font.	50	22	7291	1394	8684
Ubytek wilgoci o 20%					
	temp. suszenia, °C	czas, min	energia cieplna, kJ/kgH ₂ O	energia elektryczna, kJ/kgH ₂ O	energia całkowita, kJ/kgH ₂ O
pech.	27	-	-	-	-
font.	27	-	-	-	-
pech.	35	40	13332	3721	17053
font.	35	46	5723	1908	7631
pech.	50	24	12984	2075	15059
font.	50	38	7926	1515	9441

Wybór rodzaju złoża fluidalnego ma istotny wpływ na czas i zużycie energii suszenia węgla brunatnych. W przypadku węgla bełchatowskich (tabela 35) dla temperatur suszenia 35°C i 50°C szybsze usunięcie wilgoci następuje w złożu fluidalnym pęcherzykowym średnio o 5-7 minut w stosunku do złoża fluidalnego fontannowego, w zakresie usunięcia wilgoci o 10-30%. Jednakże zużycie energii jest większe około 35-40% dla odparowania wody o 10% i rośnie z wielkością usunięcia wilgoci - około 50% dla usunięcia wilgoci o 20% i aż 60% dla usunięcia wilgoci o 30%. Podobna sytuacja jest w przypadku suszenia węgla turosszowskich (tabela 36), gdzie zużycie energii jest większe o około 40-60%. W przypadku temperatury czynnika suszącego na wlocie do komory równej 27°C czas suszenia w złożu fluidalnym pęcherzykowym jest znacznie większy niż w złożu fluidalnym fontannowym (o około 4-8 minut dla węgla bełchatowskiego i 20 minut dla węgla turosszowskiego), do tego duże nakłady energetyczne przekraczające 10000 kJ/kgH₂O automatycznie wykluczają tę metodę do zastosowania przemysłowego.

Suszenie w złożu fluidalnym pęcherzykowym zapewnia szybszy efekt usuwania wilgoci powyżej temperatury czynnika suszącego 35°C, niż suszenie w złożu fluidalnym fontannowym. Jednakże pochłania większą ilość energii cieplnej i elektrycznej. Dodatkowo na niekorzyść wykorzystania złoża pęcherzykowego wpływa konieczność zastosowania ziaren o zbliżonej wielkości. W przypadku złoża fontannowego można zastosować szerszy zakres wielkości suszonych ziaren węgla. Dlatego docelowo do zastosowania przemysłowego zaleca się stosowanie suszarki fluidalnej fontannowej.

4.5 Analiza błędów pomiarowych

Na podstawie dokładności pomiarowej przyrządów podanej przez producenta określono błędy pomiarów. Ponieważ używane przyrządy były cyfrowe, graniczny błąd bezwzględny dla pomiarów bezpośrednich jest sumą dwóch składników. Jeden ze składników jest addytywny (nie zależy od mierzonej wartości) natomiast drugi jest multiplikatywny (proporcjonalny do mierzonej wartości).

Graniczny błąd bezwzględny określono na podstawie poniższego równania:

$$\Delta = \pm a \pm m\% \cdot \text{wartość zmierzona} \quad (19)$$

Δ - Graniczny błąd bezwzględny pomiaru,

a – składnik addytywny błędu,

m - składnik multiplikatywny błędu.

Graniczny błąd względny pomiarów bezpośrednich obliczono z poniższej zależności:

$$\delta = \frac{\Delta}{\text{wartość zmierzona}} \cdot 100\% \quad (20)$$

δ - błąd względny pomiaru, %

Ze względu na zbyt dużą bazę danych, błędy zostały przedstawione tylko dla niektórych wartości.

Tabela 37. Błędy graniczne względne i bezwzględne dla bezpośrednio mierzonych wartości w suszarce fluidalnej pęcherzykowej:

Wartości błędów pomiarów bezpośrednich					
błąd pomiaru temperatury			błąd pomiaru prędkości		
błąd pomiarowy według producenta TESTO $\pm(0,2^{\circ}\text{C} + 0,3\%$ wartości pomiaru)			błąd pomiarowy według producenta TESTO $\pm(0,2 \text{ m/s} + 0,5\%$ wartości pomiaru)		
wartość zmierzona	błąd graniczny bezwzględny	błąd graniczny względny	wartość zmierzona	błąd graniczny bezwzględny	błąd graniczny względny
			m/s	m/s	%
$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	%	1,0	$\pm 0,2$	20,5
20,0	$\pm 0,3$	1,3	2,0	$\pm 0,2$	10,5
30,0	$\pm 0,3$	1,0	3,0	$\pm 0,2$	7,2
40,0	$\pm 0,3$	0,8	4,0	$\pm 0,2$	5,5
50,0	$\pm 0,4$	0,7	5,0	$\pm 0,2$	4,5
błąd pomiaru wilgotności względnej			6,0	$\pm 0,2$	3,8
błąd pomiarowy według producenta TESTO $\pm(0,2\% + 1\%$ wartości pomiaru)			7,0	$\pm 0,2$	3,4
			8,0	$\pm 0,2$	3,0
wartość zmierzona	błąd graniczny bezwzględny	błąd graniczny względny	9,0	$\pm 0,2$	2,7
%	%	%	10,0	$\pm 0,3$	2,5
20,0	$\pm 0,4$	2,0	błąd pomiaru ciśnienia		
30,0	$\pm 0,5$	1,7	błąd pomiarowy według producenta PC-38 PD $\pm(0,02\text{kPa} + 0,3\%$ wartości pomiaru)		
40,0	$\pm 0,6$	1,5	wartość zmierzona	błąd graniczny bezwzględny	błąd graniczny względny
50,0	$\pm 0,7$	1,4	kPa	kPa	%
60,0	$\pm 0,8$	1,3	90,00	$\pm 0,29$	0,32
70,0	$\pm 0,9$	1,3	100,00	$\pm 0,32$	0,32
80,0	$\pm 1,0$	1,3	110,00	$\pm 0,35$	0,32
90,0	$\pm 1,1$	1,2	120,00	$\pm 0,38$	0,32
100,0	$\pm 1,2$	1,2			

Tabela 38. Błędy graniczne względne i bezwzględne dla bezpośrednio mierzonych wartości w suszarce fluidalnej fontannowej:

Wartości błędów pomiarów bezpośrednich					
błąd pomiaru temperatury			błąd pomiaru prędkości		
błąd pomiarowy według producenta CT-GBT $\pm(0,2^{\circ}\text{C} + 0,3\%$ wartości pomiaru)			błąd pomiarowy według producenta TESTO $\pm(0,2 \text{ m/s} + 0,5\%$ wartości pomiaru)		
wartość zmierzona	błąd graniczny bezwzględny	błąd graniczny względny	wartość zmierzona	błąd graniczny bezwzględny	błąd graniczny względny
			m/s	m/s	%
$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	%	1,0	$\pm 0,2$	20,5
20,0	$\pm 0,3$	1,3	2,0	$\pm 0,2$	10,5
30,0	$\pm 0,3$	1,0	4,0	$\pm 0,2$	5,5
40,0	$\pm 0,3$	0,8	5,0	$\pm 0,2$	4,5
50,0	$\pm 0,4$	0,7	6,0	$\pm 0,2$	3,8
60,0	$\pm 0,4$	0,6	8,0	$\pm 0,2$	3,0
70,0	$\pm 0,4$	0,6	9,0	$\pm 0,2$	2,7
błąd pomiaru wilgotności względnej			10,0	$\pm 0,3$	2,5
błąd pomiarowy według producenta H1H $\pm 2\%$			11,0	$\pm 0,3$	2,3
			12,0	$\pm 0,3$	2,2
wartość zmierzona	błąd graniczny bezwzględny	błąd graniczny względny	13,0	$\pm 0,3$	2,0
%	%	%	14,0	$\pm 0,3$	1,9
20,0	$\pm 2,0$	10,0	błąd pomiaru ciśnienia		
30,0	$\pm 2,0$	6,7	błąd pomiarowy według producenta PC-38 PD $\pm(0,02\text{kPa} + 0,3\%$ wartości pomiaru)		
40,0	$\pm 2,0$	5,0	wartość zmierzona	błąd graniczny bezwzględny	błąd graniczny względny
50,0	$\pm 2,0$	4,0	kPa	kPa	%
60,0	$\pm 2,0$	3,3	100,0	$\pm 0,32$	0,32
70,0	$\pm 2,0$	2,9	200,0	$\pm 0,62$	0,31
80,0	$\pm 2,0$	2,5	300,0	$\pm 0,92$	0,31
90,0	$\pm 2,0$	2,2	400,0	$\pm 1,22$	0,31
100,0	$\pm 2,0$	2,0			

Tabela 39. Błędy graniczne względne i bezwzględne dla pomiarów masy za pomocą wagi Radwag PS 6000/Y i zawartości wilgoci w węglu:

błąd pomiaru masy		
błąd pomiarowy według producenta Radwag PS 6000/Y		
±0,03 g		
wartość zmierzona	błąd graniczny bezwzględny	błąd graniczny względny
g	g	%
pomiary wagowe do analizy sitowej		
300,00	±0,03	0,01
200,00	±0,03	0,02
100,00	±0,03	0,03
50,00	±0,03	0,06
10,00	±0,03	0,30
pomiary wagowe do określenia wilgoci		
15,00	±0,03	0,20
10,00	±0,03	0,30
5,00	±0,03	0,60
błąd pomiaru wilgoci obliczonej metodą różnicy masy		
wilgoć	błąd graniczny bezwzględny	błąd graniczny względny
%	%	%
55,0	±0,7	1,2
50,0	±0,6	1,1
40,0	±0,4	1,0
30,0	±0,3	0,9
20,0	±0,2	0,9
10,0	±0,1	0,8
5,0	±0,1	0,8

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzone w pracy badania w zakresie oceny parametrów procesu suszenia niskotemperaturowego węgla brunatnego w złożu fluidalnym ze względu na jego rodzaj, czas suszenia, temperaturę i prędkość czynnika suszącego, zakres wielkości ziaren oraz temperatury początkowej węgla pozwoliły na określić kinetykę suszenia oraz nakłady energetyczne. Kinetyka suszenia węgla oraz zużycie energii ma zasadnicze znaczenie dla wdrożenia technologii suszenia węgla brunatnych w istniejących oraz nowo budowanych elektrowniach. Biorąc pod uwagę kinetykę suszenia i zużycie energii do suszenia, które zależy od parametrów suszenia, ale również właściwości samego węgla oraz w jakiej postaci występuje w nim woda, należy przyjąć że końcowa wilgoć węgla powinna wynosić około 15-20%. Węgiel o takiej zawartości wilgoci można spalać zarówno w starych jak i nowych blokach energetycznych.

Do zastosowań przemysłowych na podstawie badań stwierdzono większą przydatność do suszenia zastosowanie złoża fluidalnego fontannowego. Pozwala ono na stosowanie ziaren o szerszym zakresie rozmiarów oraz obniżenie zużycia energii cieplnej i elektrycznej, w porównaniu ze złożem fluidalnym pęcherzykowym.

Najbardziej istotnymi parametrami w procesie suszenia fluidalnego odgrywają czas i temperatura czynnika suszącego. W przypadku zastosowania ciepła odpadowego należy wybrać takie rozwiązanie aby uzyskać jak największą temperaturę. Przeprowadzone testy pokazują, że zastosowanie temperatur rzędu 50-60°C jest już wystarczające dla efektywnego odprowadzenia wilgoci z węgla brunatnego. W przypadku niższych temperatur zaleca się zastosowanie dodatkowego podgrzewu lub użycie rozwiązań opartych na pompach ciepła/kolektorach słonecznych w celu podniesienia temperatury czynnika suszącego. W przypadku zastosowania dodatkowego podgrzania wystarczającą temperaturą czynnika suszącego jest 60°C. Zwiększenie temperatury do 70°C powoduje nieznaczny wzrost szybkości suszenia, a wpływa znacząco na większe zużycie nakładów energetycznych na proces suszenia.

Parametrem decydującym w największym stopniu szybkości suszenia stąd również rozmiarze komory suszącej jest temperatura. Jednakże z drugiej strony ze wzrostem temperatury rośnie zużycie energii na suszenie węgla. Dlatego ważnym jest dobór parametrów dostępnych w blokach energetycznych to jest: temperatury, mocy i rodzaju

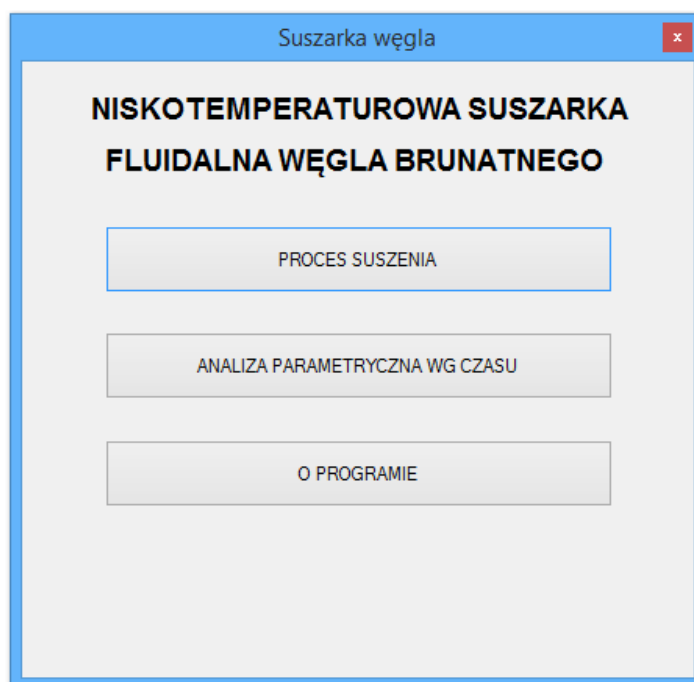
czynnika suszącego pozwalającego na zminimalizowanie zużycia energii do suszenia. W przeprowadzonych badaniach w zależności od użytej temperatury i rodzaju węgla, czas przebywania w suszarce fluidalnej wynosi około 30-45 minut dla temperatur 50-70°C dla węgla z Bełchatowa i około 30-40 minut dla temperatur 50-70°C dla węgla z Turowa.

Przeprowadzone badania wykazały, że rozmiar cząstki w zakresie 0-8 mm ma niewielki wpływ na ubytek wody z węgla, jednakże wpływa na prędkość fluidyzacji. W celu optymalizacji tego parametru niezbędne jest porównanie kosztów związanych z rozdrobieniem węgla oraz kosztów utrzymania minimalnej prędkości fluidyzacji. Problem ten jest indywidualny w zależności od rozwiązań danej elektrowni. Zbadany wpływ prędkości, a co za tym idzie strumienia czynnika suszącego, również obrazuje niewielki wpływ zwiększenia prędkości na stopień wysuszenia węgla, natomiast można zaobserwować znaczny wpływ na zużycie energii na pracę suszarki. Z tego powodu zaleca się stosowanie minimalnej prędkości umożliwiającej uzyskanie złoża fluidalnego w suszarce.

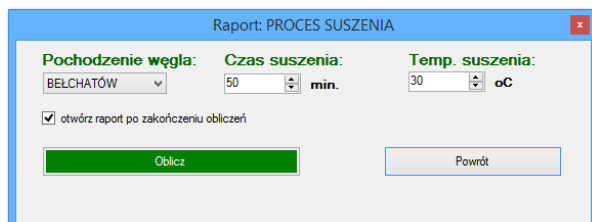
Temperatura początkowa węgla wpływa na proces suszenia. Niższa temperatura węgla podanego do suszarki wykazuje większe zapotrzebowanie na ciepło. W przypadku kiedy temperatura jest ujemna i dochodzi do zamarznięcia wody w węglu dochodzi do dodatkowego zjawiska fizycznego. Zamrożona woda zwiększa swoją objętość przez co rozrywa pory, co w przełożeniu na proces suszenia powoduje łatwiejsze odparowanie wody z zamkniętych porów oraz związanej molekularnie. Jednakże wpływ ten jest nieistotny ze względu na suszenie węgla w elektrowni, ponieważ następuje dopiero w trzeciej fazie suszenia, kiedy proces na skalę przemysłową jest nieopłacalny. Początkowa temperatura węgla wpływa na czas suszenia, dlatego w różnych porach roku należy kontrolować proces ze względu na wilgoć końcową poprzez skracanie bądź wydłużanie przebywania surowca w suszarni.

Dodatkowo dane pomiarowe z suszarki fluidalnej fontannowej posłużyły do sporządzenia bazy danych, która została wykorzystana do specjalnie napisanego programu. Program jest narzędziem do doboru parametrów suszenia dla założonych danych wejściowych, na przykład źródła ciepła o danej temperaturze. Baza danych pozwala na określenie parametrów suszenia węgla bełchatowskiego i turowskiego w zakresie temperatur 25-70°C i czasie przebywania węgla w komorze suszenia 0-75 minut. W przypadku podania tych samych parametrów początkowych co w przeprowadzonym teście program bezpośrednio odwołuje się do wartości zmierzonych, natomiast w przypadku podania parametrów, dla których nie było przeprowadzonych badań, program dokonuje

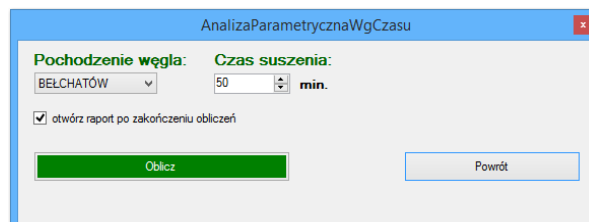
wyliczeń stanów pośrednich wykorzystując interpolację liniową między badanymi punktami. W ten sposób generowane są punkty z dokładnością co do 1min i 1°C, które przedstawiane są w postaci funkcji.



a)



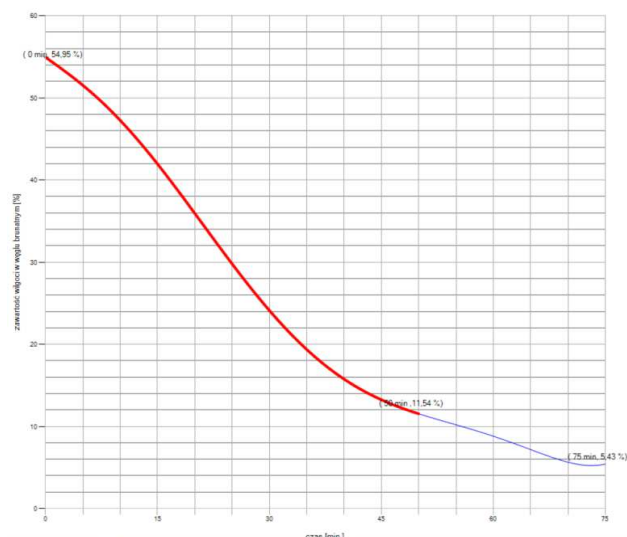
b)



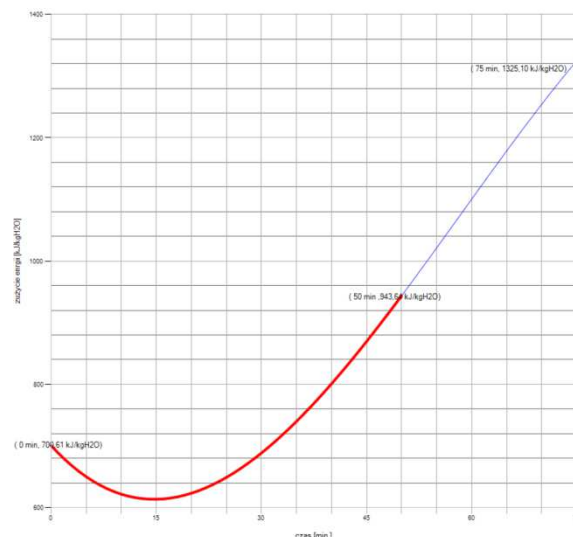
c)

Rysunek 123. *Interfejs programu: a) menu główne, b) interfejs trybu pracy programu pt. „Proces suszenia” c) interfejs trybu pracy programu pt. „Analiza parametryczna według czasu”*

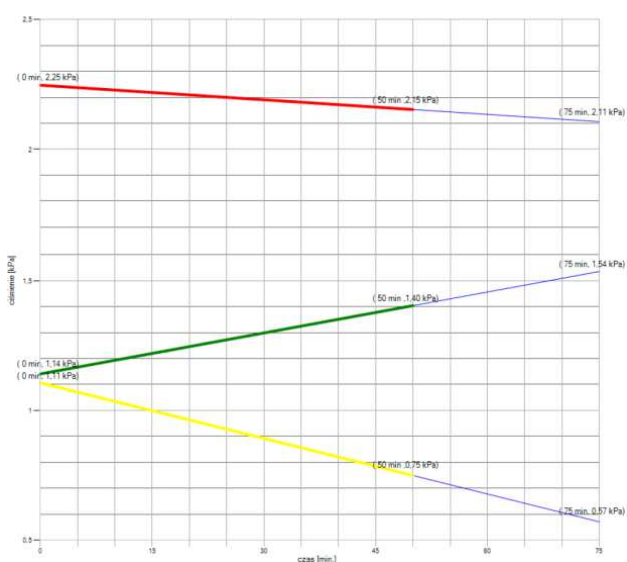
Program zawiera dwa tryby pracy. Tryb pracy pt. „Proces suszenia” służy do uzyskania raportu zawierającego wykresy przedstawiające przebieg procesu suszenia (zawartości wilgoci, temperatury w suszarce, rozkładu ciśnień oraz zużycie energii) dla zadanych parametrów (rodzaju węgla, czasu suszenia oraz temperatury czynnika suszącego).



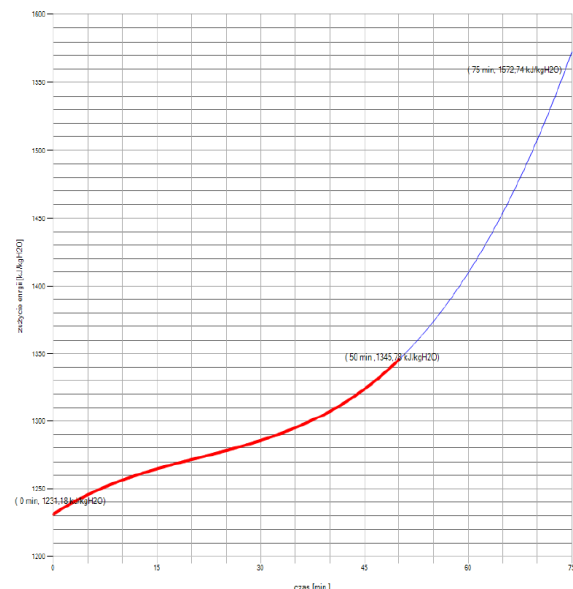
a)



b)



c)



d)

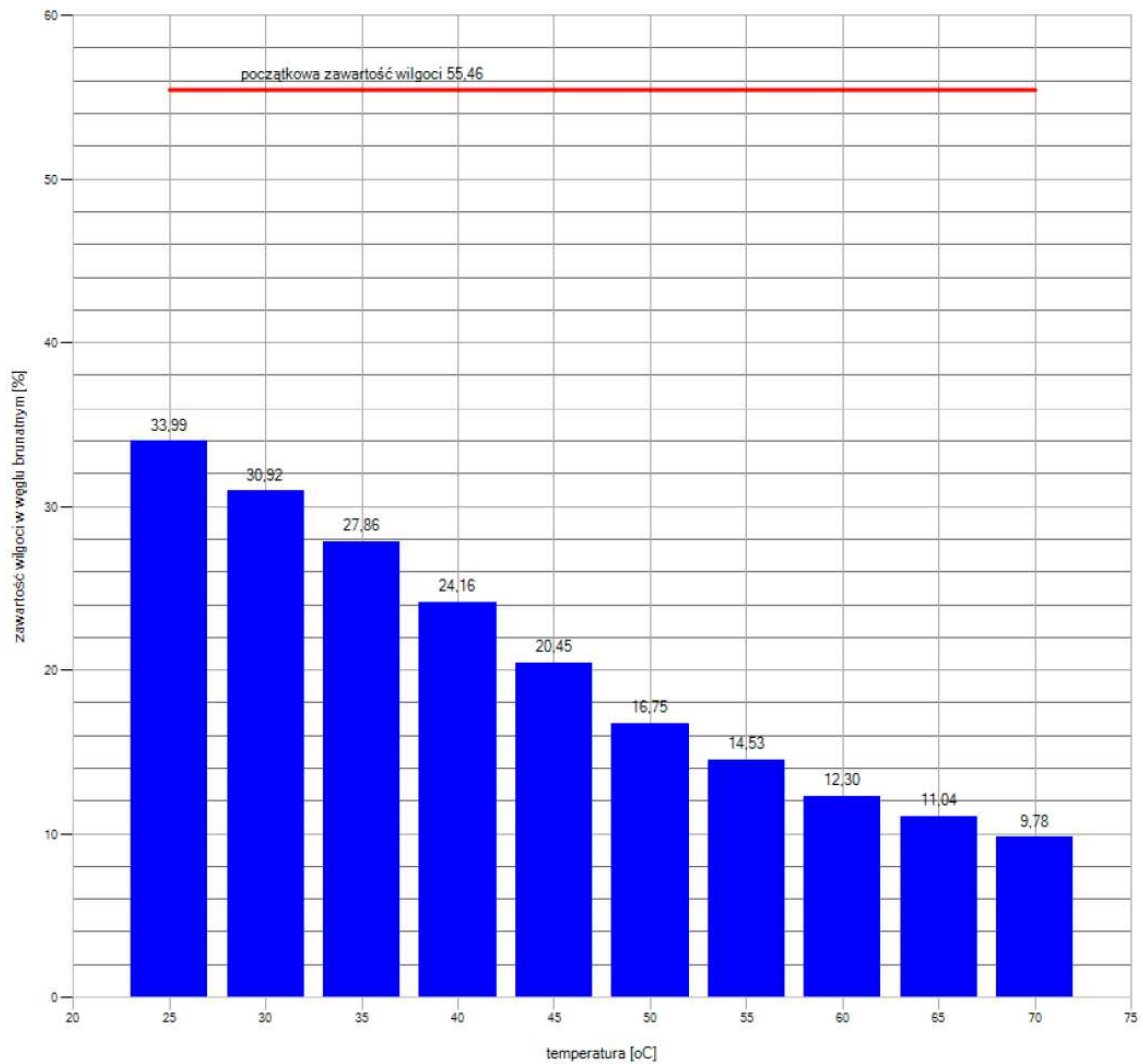
Rysunek 124. Przykładowy raport z programu z trybu pracy pt. „Proces suszenia” (węgiel Bełchatów, czas suszenia 50 min, temperatura suszenia 63°C)
 a) zawartość wilgoci, b) temperatura w komorze suszenia, c) rozkład ciśnień, d) zużycie energii.

Drugi tryb pracy pt. „Analiza parametryczna według czasu” również odnosi się do bazy danych. Program na podstawie zadanych parametrów (rodzaju węgla oraz czasu suszenia) generuje wykres zawartości wilgoci w zależności od temperatury (zmienna co 5°C, od 25°C do 70°C).

Pochodzenie próbki węgla: BEŁCHATÓW

Czas suszenia: 50 min.

1. Ubytek zawartości wilgoci w węglu brunatnym:



Rysunek 125. Przykładowy raport z programu z trybu pracy pt. „Analiza parametryczna według czasu” (węgiel Bełchatów, czas suszenia 50 min)

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Pawlak-Kruczek H. „Wybrane zagadnienia spalania młodych węgli kopalnych o małym stopniu metamorfizmu”, Praca Naukowa ITCIMP PWr, Wrocław 2003
- [2] Kruczek H, Modified 200 MW power plant cycle utilizing predrying brown coal combustion, Workshop Proceedings Power Generation Units with High Efficiency, Wrocław, Poland, 13,10, 1999
- [3] Kasztelewicz Z. „Strategia rozwoju węgla brunatnego w pierwszej połowie XXI wieku w Polsce”, Kraków 2008
- [4] Mujumdar A. S. "Handbook of Industrial Drying", Editor, CRC Press, New York 2006
- [5] Kruczek S. „Kotły – konstrukcje i obliczenia”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2001
- [6] Nowak W. "Technika fluidalna XXI w.", Materiały konferencji międzynarodowej „Spalanie węgla”. Ustroń Marzec 1999
- [7] Chmielniak T. "Technologie energetyczne", Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2004
- [8] Bis Z.: "Kotły fluidalne. Teoria i praktyka", Wydawnictwo politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2010
- [9] Pawłowski K. F., Romankow p. G., Noskow "Przykłady i zadania z zakresu aparatury i inżynierii chemicznej", WNT, Warszawa 1988
- [10] Dziubiński M., Prywer J. "Mechanika płynów dwufazowych". WNT, Warszawa 2009
- [11] Miller A., Lewandowski J. "Układy gazowo – parowe na paliwo stałe". WNT, Warszawa 1993
- [12] Orzechowski Z., Prywer J., Zarzycki R. "Mechanika płynów w inżynierii i ochronie środowiska". WNT, Warszawa 2009
- [13] Laudyn D., Pawlik M., Strzelczyk F. "Elektrownie", WNT, Warszawa 2000
- [14] Guidelines for Use Vapor Cloud Dispersion Models wyd. przez American Institute of Chemical Engineers, New York 1996
- [15] <http://www.elturow.pgegiek.pl>
- [16] Pawlak – Kruczek H, Lichota J. Jędrusyna A., Tomczuk K. Ostrycharczyk M. „Zapotrzebowanie na energię do układów suszenia węgla brunatnego”, Rynek Energii 2011
- [17] Szargut J. "Termodynamika techniczna" Wydawnictwo Politechniki Śląskiej 2011
- [18] Wiśniewski S. "Termodynamika techniczna", Wydawnictwa Naukowo-Techniczne WNT 2013
- [19] Mazurek W., Bryszewska-Mazurek A., Pawlak-Kruczek H., Lichota J. "Układ suszenia węgla brunatnego z zastosowaniem pompy ciepła". Rynek Ciepła 2011: materiały i studia : praca zbiorowa / pod red. Henryka Kapronia. Lublin : Kaprint, 2011
- [20] Michalski M., Ostrycharczyk M., "Metody suszenia węgla brunatnego", Górnictwo Odkrywkowe 52, nr 1/2, Wrocław 2011
- [21] Materiały firmy Tianli, strona internetowa <http://en.kytl.com/>, 2014

- [22] Fąfara Z., Twardowski K., "Analiza zmienności wilgotności naturalnej węgla brunatnych". – Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Górnictwo, z. 243, 1999
- [23] FLUOSOLIDS ECHNOLOGY Broszura informacyjna firmy Technip, www.technip.com, California USA 2014
- [24] Levy E., raport: „Use of Coal Drying to reduce water consumed in pulverized coal power plants”, Energy Research Centre, Lehigh University, Bethlehem 2005
- [25] Opracowanie Studium Wykonalności dla projektu inwestycyjnego „Suszenie Węgla Brunatnego” w lokalizacji PGE Górnictwo i Energetyka Konwencjonalna SA Oddział KWB Turów”, OPRACOWANIE Nr. 02.OP.11-1 rev.2, Gliwice, wrzesień 2011
- [26] Lechner S., Höhne O., Krautz H. J., "Druckaufgeladene Dampfwirbelschicht-Trocknung (DDWT) von Braunkohlen", artykuł Uniwersytetu BTU, Cottbus 2008
- [27] Krautz H.J, "Ausblick auf zukünftige Entwicklungen der Braunkohle-Kraftwerkstechnologien", Tagung "Braunkohle im Europäischen Energiemarkt", Cottbus 2002
- [28] Kruczek H, "Thermodynamic Analysis of Modified Power Plant Cycle Utilizing Condensation Heat from Pre-dried Brown Coal, Workshop Proceedings, Pre-drying Processes For The Efficient And Clean Utilization Of Brown Coal In The Enlarged EU Market", Athens, Greece – 23 April 1999
- [29] Schwendig, F., Klutz, H-J., Ewers, J., "The Dry Lignite-Fired Power Plant", RWE-VGB, PT 12, Essen, Germany, 2006
- [30] Pawlak – Kruczek H, Lichota J., Ostrycharczyk M., "Instalacja suszenia węgla brunatnego na świecie”, Rynek Ciepła 2011: materiały i studia: praca zbiorowa/pod red. Henryka Kapronia. Lublin: Kaprint, 2011
- [31] Pawlak – Kruczek H., Lichota J., Ostrycharczyk M., "Stan wiedzy w zakresie suszenia węgla – wybrane zagadnienia, instalacje na świecie", raport wewnętrzny PWR, Wrocław, 2010
- [32] Michalski M, "Wpływ wstępnego suszenie węgla brunatnego na pracę kotłów energetycznych typu BB-1150 i CFB-672". Rynek Ciepła 2012: materiały i studia: praca zbiorowa / pod red. Henryka Kapronia. Lubin: Kaprint, 2012
- [33] Halawa T.- „Postęp w budowie bloków energetycznych dużej mocy opalanych węglem brunatnym” Instytut Automatyki Systemów Energetycznych – Energetyka grudzień 2007 r.
- [34] Strupczewski A. Radovic U.: "Koszty zewnętrzne wytwarzania energii elektrycznej w Polsce", Biuletyn PSE, Styczeń 2006
- [35] Tajduś A., Czaja P., Kasztelewicz Z., "Stan obecny i strategia rozwoju branży węgla brunatnego w I połowie XXI wieku". Kwartalnik "Górnictwo i geologia", Tom 5, Zeszyt 3. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice 2010
- [36] Bednarczyk J., "Scenariusze rozwoju technologicznego przemysłu wydobywania i przetwórstwa węgla brunatnego". Projekt celowy FORESIGHT. Redakcja "Górnictwa Odkrywkowego". Instytut Górnictwa Odkrywkowego Poltegor-Instytut, Wrocław 2008
- [37] Strupczewski A.: " Koszty zewnętrzne wytwarzania energii elektrycznej w Unii Europejskiej", Biuletyn Miesięczny PSE, grudzień 2005

- [38] Magdalena Anglart-Maciejewska „Kopalnia węgla brunatnego Bełchatów” – Akademia im. J. Długosza w Częstochowie Studia Podyplomowe „Przyroda”, Częstochowa 2004
- [39] Węgiel brunatny – 2006 nr.3/56 – kwartalny biuletyn informacyjny - <http://www.ppwb.org.pl/>
- [40] Pawlak-Kruczek H, Hęś M. „Metodyka określania parametrów charakterystycznych paliw i kinetyki termicznego procesu suszenia za pomocą analizy termogravimetrycznej,, – Raport wewnętrzny z zadania nr 1.1.1, nr projektu POIG.01.03.01-00-040/08, grudzień 2010
- [41] Kwiecińska B., Wagner M., "Typizacja cech jakościowych węgla brunatnego z krajowych złóż według kryteriów petrograficznych i chemiczno – technologicznych dla celów dokumentacji geologicznej złóż oraz obsługi kopalń". Wyd. PPGSMiE PAN, Kraków 1997
- [42] Matl K., "Osady węglonośne trzeciorzędu na niżu środkowoeuropejskim" Mat. XXII Symp. Geol. form. węgl. Polski, Wyd. AGH, Kraków 1999
- [43] Matl K., "Surowce mineralne świata, Węgiel Brunatny: Złóża. Wyd. Geolog.". Warszawa 1981
- [44] Bartuś T. badania statutowe nr.: 11.11.140.808 "Parametry chemiczno-technologiczne i oparte na nich klasyfikacje węgla brunatnych". Akademia Górniczo-Hutnicza Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Zakład Geologii Ogólnej i Matematycznej
- [45] Fąfara Z., Twardowski K., "Analiza zmienności wilgotności naturalnej węgla brunatnych". – Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Górnictwo, z. 243, 1999
- [46] Ciuk E., – "Schematy litostratigraficzne trzeciorzędu Niżu Polskiego". - Kwartalnik Geologiczny, t. 14, nr 4, 1970
- [47] Tomków K., Surowce mineralne świata, Węgiel Brunatny: Użytkowanie i przetwórstwo. Wyd. Geolog.. Warszawa 1981
- [48] Fąfara Z., Twardowski K., "Możliwości predykcji wilgotności naturalnej węgla brunatnych". – Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Górnictwo, z. 246, 2000
- [49] Plutecki Z. Wstępne Suszenie Węgla dla Celów Energetycznych, projekt POIG.01.03.01-00-040/08, 2011, Politechnika Opolska 2011
- [50] Buschsieweke F. "Suszenie węgla brunatnego w złożu fluidalnym", fragmenty pracy doktorskiej, Institut fuer Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen der Universitaet Stuttgart, 2006
- [51] D.J. Allardice, D.H. Attwood and D.G. Cooke. "Evaporative drying of brown coal slurries", English, Article, Report edition: Published[Melbourne] : State Electricity Commission of Victoria, 1980.
- [52] David G. Evans , "The brown-coal/water system", Fuel Volume 52, Issue 3, July 1973
- [53] norma PN-91/G-97051/00
- [54] Allardice, D.J.: "The water in brown coal", Ph.D. Thesis, University of Melbourne 1968
- [55] Grochal M. „Użytkowanie Energii Ciepłej” Wydawnictwa Naukowo Techniczne, Warszawa 2002
- [56] Boszko M., instrukcja z Laboratorium Procesów Wymiany Masy pt „Kinetyka

- suszenia” Politechnika Warszawska Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii Instytut Inżynierii Mechanicznej Zakład Aparatury Przemysłowej Płock 2009
- [57] Strumiłło Cz.: „Podstawy teorii i techniki suszenia”. WNT, Warszawa 1983
- [58] Pabis S.: „Teoria konwekcyjnego suszenia produktów rolniczych”. PWRiL, Warszawa 1982
- [59] Instrukcja obsługi analizatora elementarnego 2400 Series II CHNS/O Elemental Analyzer
- [60] Instrukcja obsługi Termograwimetru „Diamond TG/DTA” firmy Perki Elmer
- [61] Instrukcja obsługi wagi Radwag PS 6000/Y
- [62] Instrukcja obsługi Pieca „Classic”
- [63] Instrukcja sit analitycznych Prufsiebring TGL
- [64] http://www.kgmip.wnoz.us.edu.pl/podstawy_mikroskopii_skaningowej.pdf
- [65] Encyklopedia PWN hasło "mikroskop elektronowy skaningowy", Warszawa 2012
- [66] Instrukcja obsługi mikroskopu Biolux AL firmy Bresser
- [67] Kasztelewicz Z. „Górnictwo węgla brunatnego w Polsce” – Energetyka ciepła i zawodowa, 12/2010 r.
- [68] <http://www.elbelchatow.pgegiel.pl>
- [69] Kasztelewicz Z., "Węgiel brunatny - optymalna oferta energetyczna dla Polski". Związek Pracodawców Porozumienie Producentów Węgla Brunatnego. "Górnictwo Odkrywkowe", Bogatynia-Wrocław 2007
- [70] Bednarczyk J., Nowak A., "Strategie i scenariusze perspektywicznego rozwoju produkcji energii elektrycznej z węgla brunatnego w świetle występujących uwarunkowań". Górnictwo i Geoinżynieria. Rok 34. Zeszyt 4. Kraków 2010
- [71] Kasiński J., R. Mazurek S., Piwocki M., "Waloryzacja i ranking złóż węgla brunatnego Polsce". Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 2006
- [72] norma PN-G-04571:1998
- [73] norma PN-G-04584:2001
- [74] norma ISO-19579:2006
- [75] norma PN-G-04560
- [76] norma PN-80G-04511
- [77] norma PN-81/G-04513
- [78] Pawlak-Kruczek H., Plutecki Z., Michalski M., "Brown Coal Drying In Fluidized Bed by Low-Temperature Gaseous Medium" Drying Technology, 15.01.2014
- [79] Michalski M. "Nowoczesne metody suszenia węgla brunatnego – badania własne", Zeszyty Energetyczne, Wrocław 2014
- [80] Zbigniew Plutecki, Michalski Marcin "Brown coals pre-drying for energy combustion." Komunikaty konf. Power Engineering 2011
- [81] Plutecki Z., Michalski M., "Właściwości termokinetyczne węgla brunatnego w procesie suszenia fluidalnego". Rynek Ciepła 2011: materiały i studia: praca zbiorowa/pod red. Henryka Kapronia. Lublin:Kaprint, 2011
- [82] Plutecki Z., Michalski M. Komunikaty konferencyjne, "Brown coals pre-drying in fluidized bed for energy generation". CaReTECH 2011 : proceedings of the International Conference on Carbon Reduction Technologies, Polish Jurassic Highland, Poland, September 19-22, 2011. Gliwice: Institute of Thermal Technology,

Silesian University of Technology, 2011

- [83] Plutecki Z., Michalski M., "Niskotemperaturowe suszenie węgla brunatnego dla energetyki zawodowej. Badania własne", *Górnictwo Odkrywkowe*, 3-4/2012 ISSN 0043-2075, Wrocław 2012
- [84] Plutecki Z, Michalski M., Ryszczuk K., Sattler P., "Badania procesu w suszarni "fontannowo-pęcherzykowej" studia i monografie Energetyka "Suszenie Węgla Niskogatunkowego" pod redakcją Haliny Pawlak-Kruczek i Zbigniewa Pluteckiego, Wydawnictwo "Nowa Energia", Wrocław 2014
- [85] Plutecki Z., Pawlak-Kruczek H., Michalski M., Kierzowska-Makar W., Król A., Raporty serii SPR - Analiza parametryczna i opracowanie wyników badań testowych suszenia węgla dla wybranych parametrów odpowiadających warunkom bloku energetycznego, Raport 2012 SPR7/2012
- [86] Instrukcja wentylator promieniowy WP-7,6/3F
- [87] Instrukcja nagrzewnica kanałowa DH 125/09
- [88] Instrukcja multimetr Testo 435
- [89] Instrukcja przetwornik ciśnienia PC-28 PD
- [90] Instrukcja Wentylator wirowy odśrodkowy promieniowy W14
- [91] Instrukcja Elektryczna nagrzewnica kanałowa EN0-400-180-3-A
- [92] Instrukcja Czujnik temperatury CT-GBT
- [93] Instrukcja Czujnik wilgoci HIH 4000-004
- [94] Instrukcja Przetwornik różnicy ciśnień PR-28
- [95] norma EN ISO 13788:2001
- [96] Z. Chen, W. Wu, P.K. "Agarwal Steam-drying of coal. Part 1. Modeling the behavior of a single particle", *Fuel* 79, 2000
- [97] Pawlak-Kruczek H., Michalski M, Ostrycharczyk M., "Suszenie w różnych rozwiązaniach technologicznych" studia i monografie Energetyka "Suszenie Węgla Niskogatunkowego" pod redakcją Haliny Pawlak-Kruczek i Zbigniewa Pluteckiego, Wydawnictwo "Nowa Energia", Wrocław 2014