

RECENZJA

**pracy doktorskiej mgr inż. Marcina Michalskiego
pt. „Suszenie węgla brunatnego w złożu fluidalnym z wykorzystaniem
niskotemperaturowego źródła ciepła”**

1. Informacje ogólne

Praca wykonana została na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej pod kierunkiem promotora dr hab. inż. Haliny Pawlak-Kruczek, prof. Politechniki Wrocławskiej. Pracę opublikowano jako raport serii PREPRINT nr 2/2015 na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym PWr.

Recenzję opracowano w oparciu o decyzję Rady Wydziału Mechaniczno-Energetycznego PWr z dnia 15.04.2015 r.

Praca doktorska została przedstawiona na 127 stronach i zawiera sześć rozdziałów, które poprzedza spis treści i spis oznaczeń, kończy natomiast wykaz literatury (97 pozycji). W całej pracy znajduje się 125 rysunków i 39 tabel.

2. Omówienie treści pracy

We „*Wstępie*” (3 strony) Doktorant uzasadnił podjęcie tematu dysertacji, następnie sformułował tezy i cele, jakie sobie postawił: „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...”. Dodatkowo we wstępie został zdefiniowany przedmiot i zakres pracy.

W rozdziale drugim (15 stron) pt. „*Suszenie węgla brunatnego w złożu fluidalnym*”, który składa się z pięciu podrozdziałów, Doktorant zdefiniował oraz opisał proces fluidyzacyjny. Pokazał zalety oraz wady zastosowania złoża fluidalnego. Następnie omówił podstawowe rodzaje tych złożów. Opisał również wykorzystanie niskotemperaturowego ciepła do suszenia fluidalnego węgla brunatnego, zdefiniował

NS/766/2015

Wydział Mechaniczno-Energetyczny

30-06-2015

Wpłynęło dnia

oraz podał zakresy temperaturowe i moce cieplne niskotemperaturowych źródeł ciepła możliwych do zastosowania w czasie procesu suszenia. Wyliczył wartość strumienia ciepła niezbędnego do wysuszenia węgla brunatnego. W dalszej części Doktorat dokonał przeglądu technologii fluidalnego suszenia węgla brunatnego oraz zastosowanie suszarek fluidalnych w blokach energetycznych. Rozdział podsumował wyszczególnieniem zalet i wad zastosowania suszarek w czasie suszenia węgla brunatnego.

Rozdział trzeci (34 strony), którego tytuł brzmi „*Badania właściwości węgla przed i po suszeniu oraz struktury podczas procesu suszenia*”, Doktorant opisał potencjał energetyczny węgla brunatnego głównie na przykładzie Polski, a także przedstawił wpływ różnych form występowania wody w węglu brunatnym na procesy suszenia. Bazując na literaturze pokazał proces suszenia pojedynczego ziarna węgla, zdefiniował entalpię wiązania wody w węglu w zależności od zawartości wilgoci i krzywe obrazujące proces suszenia w zależności wilgoci materiału od czasu suszenia oraz w zależności od prędkości suszenia. W dalszej części Doktorant opisał aparaturę pomiarową zastosowaną w badaniach do określenia właściwości węgla. Na koniec przedstawił właściwości węgla brunatnych użytych w doświadczeniach, w szczególności węgla pochodzącego ze złoża w Bełchatowie oraz ze złoża w Turowie.

Do oceny jakościowej Doktorant wykonał obliczenia pomocnicze, tzn. przeliczył stan suchy i bezpopiołowy na stan roboczy, czyli rzeczywisty. Wykonał obliczenia wartości opałowej używając formuły Mendelejewa oraz formuły VDI stwierdzając, że zmiana wartości opałowej przyjmuje postać liniową i wzrasta ponad dwukrotnie poprzez całkowite odparowanie wilgoci. W dalszej części przedstawił wyniki badań zmiany wielkości rozmiarów cząstek węgla po procesie suszenia fluidalnego dla różnych temperatur i początkowych wielkości ziaren.

Dodatkowo Doktorant przeprowadził analizy struktury węgla brunatnych bełchatowskich i turowskich za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego dla powiększeń x100, x500, x1000 oraz x5000. Pokazał różnice pomiędzy mokrym węglem bełchatowskim oraz turowskim. Badania dotyczące wpływu czasu suszenia na procentową zmianę masy ziarna węgla dla węgla bełchatowskich oraz turowskich wykazały zgodność z podobnymi analizami spotykanymi w literaturze światowej, co potwierdza poprawność jego badań.

Rozdział czwarty pt. „Suszenie fluidalne niskotemperaturowe” (59 stron) prezentuje metodykę zrealizowanych przez Doktoranta badań doświadczalnych. W pierwszej części zostało omówione stanowisko do badań procesu suszenia w pęcherzykowym złożu fluidalnym. Następnie opisano stanowisko eksperymentalne związane z procesem suszenia w fontannowym złożu fluidalnym. W dalszej części przedstawiono metodykę badawczą zastosowaną przez Doktoranta. Należy podkreślić, że Doktorant przeprowadził bardzo dużą ilość badań, analizując wiele parametrów mających wpływ na proces suszenia. Można wyróżnić następujące rodzaje badań:

- wpływ wielkości ziarna węgla na proces suszenia w złożu fluidalnym pęcherzykowym w temperaturze 27°C w ciągu 20 minut dla różnych wielkości ziaren z zakresu 0.4 – 2.0 mm, 2.0 – 4.0 mm, 4.0-6.3 mm i różnych prędkości czynnika suszącego na wlocie do suszarki (4.2 m/s, 6.5 m/s oraz 9.1 m/s) dla węgla z Bełchatowa oraz 2.8 m/s, 5.9 m/s i 8 m/s dla węgla z Turowa;
- wpływ temperatury powietrza suszącego w złożu fluidalnym fontannowym na proces suszenia dla pięciu wartości temperatur: 27°C, 35°C, 50°C, 60°C i 70°C oraz czasu suszenia wynoszącego 75 minut. Wielkość rozkładu ziaren wynosiła: 0,0-0,4 mm, 0.4 – 2.0 mm, 2.0 – 4.0 mm, 4.0-6.3 mm. Natomiast wartość prędkości medium suszącego na wlocie do suszarki wynosiła 8 m/s;
- wpływ zmiany prędkości medium suszącego na proces usuwania wilgoci w suszarce fluidalnej głównie fontannowej. Badania przeprowadzono dla prędkości 10,8 m/s i 13,6 m/s, dla węgla bełchatowskich o ziarnistości z przedziału 0.0-8.0 mm i czasie suszenia wynoszącym 60 minut powietrzem o temperaturze 60°C;
- wpływ początkowej temperatury węgla turoszowskiego oraz bełchatowskiego wynoszącej odpowiednio -5°C oraz 15°C na proces suszenia. W tym celu wykonano badania laboratoryjne dla wspomnianych wartości temperatur początkowych, rozkładu ziaren 0.0-8.0 mm, w temperaturze na wlocie do suszarki wynoszącej 50°C i czasu przebywania węgla w komorze suszącej 60 minut.
- wpływ temperatury medium na proces suszenia, tzn. na ubytek wilgoci oraz zużycie energii (cieplnej i elektrycznej). Badania porównawcze przeprowadzono dla dwóch rodzajów suszarek fluidalnych, tj. pęcherzykowej i fontannowej oraz dwóch rodzajów węgla brunatnych – bełchatowskiego i turoszowskiego. W suszarce pęcherzykowej zastosowano ziarna z przedziału

2.0 – 4.0 mm i czas suszenia wynoszący 60 min oraz temperatury na wlocie do komory 27°C, 35°C i 50°C. Minimalną prędkość fluidyzacyjną Autor ustalił na 6.2 m/s. W suszarce fluidalnej fontannowej użyto ziaren z przedziału 0,0 – 8,0 mm i czasu suszenia 75 minut. Badania przeprowadzono dla pięciu temperatur 27°C, 35°C, 50°C, 60°C oraz 70°C. Minimalna prędkość fluidyzacji wynosiła około 8 m/s.

Ostatnim parametrem poddanym analizie było porównanie efektywności suszenia w złożu fluidalnym ze względu na rodzaj zastosowanego złoża. Porównanie polegało na analizie procesu suszenia dla takiej samej średniej gęstości złoża fluidalnego wynoszącego 0,033 dm³/kg, o podobnym rozkładzie ziaren wynoszącym 2.0 – 4.0 mm i minimalnych prędkościach fluidyzacyjnych wynoszących 6.2 m/s dla suszarki pęcherzykowej oraz 8.0 m/s dla suszarki fontannowej. Badania Autor przeprowadził dla 27°C, 35°C oraz 50°C temperatur czynnika suszącego. Powyższy rozdział Doktorant zakończył analizą błędów pomiarowych parametrów mierzonych w czasie badań: temperatury, wilgotności względnej, prędkości, ciśnienia, masy, różnicy masy. W rozdziale piątym (5 stron) Autor przedstawił podsumowanie i wnioski. Rozdział szósty pt. „*Bibliografia*” (5 stron) zawiera 97 pozycji. Jedenaście z tych publikacji jest sygnowanych nazwiskiem Doktoranta, jeden artykuł został opublikowany w czasopiśmie z listy filadelfijskiej.

3. Ocena pracy

3.1. Wybór tematu rozprawy

Zwiększenie ogólnej sprawności bloków energetycznych oraz obniżenie emisji gazów będących produktem spalania paliw kopalnych jest kluczowym celem krajowych elektrowni węglowych w najbliższych latach. W Polsce około 30% energii elektrycznej jest produkowane przez elektrownie, których paliwo stanowi węgiel brunatny, charakteryzujący się wysoką zawartością wilgoci dochodzącą do 55% dla węgla bełchatowskich i około 43% dla węgla turoszowskich. Jak zostało pokazane w pracy, obniżenie zawartości wilgoci w węglu może w najlepszym przypadku doprowadzić do wzrostu sprawności bloku i kotła o 3-5% oraz spowodować spadek emisji NO_x, CO₂, SO₂ i Hg.

Doktorant w swojej dysertacji podjął się analizy wykorzystania niskotemperaturowych odpadowych źródeł energii w celu odparowania wody

z węgla za pomocą techniki suszenia w złożu fluidalnym. Aby skutecznie zmniejszyć zawartość wilgoci w węglu brunatnym, należy starannie dobrać prędkości, temperatury oraz metody suszenia. Wykorzystanie zoptymalizowanego złoża fluidalnego spowoduje, że relatywnie niskimi nakładami energetycznymi zostanie podniesiona sprawność konwersji energii, czego skutkiem będzie zmniejszenie emisji szkodliwych gazów. Dlatego wybór tematyki pracy uważam za ambitny i naukowo trafny.

3.2. Ocena wyników badań

- Doktorant wykazał, że do efektywnego procesu spalania węgla brunatnego zarówno w starych jak i nowych blokach energetycznych należałoby używać węgla o zawartości wilgoci na poziomie 15-20%, gdyż znajduje to uzasadnienie ekonomiczne oraz procesowe.
- Doktorant stwierdził, że do suszenia węgla brunatnego przy zastosowaniu niskotemperaturowych źródeł energii jedną z najlepszych technik jest zastosowanie fluidalnego złoża fontannowego. Złoże to jest nieczułe na rozmiar ziaren węgla, co w konsekwencji powoduje mniejsze zużycia energii cieplnej do procesu suszenia oraz energii elektrycznej do napędu wentylatorów w porównaniu ze złożem fluidalnym pęcherzykowym.
- Z badań oraz analiz teoretycznych, jakie przeprowadził Doktorant, wynika, że kluczowymi parametrami wpływającymi na proces suszenia w złożu fluidalnym są czas przebywania węgla w złożu oraz temperatura czynnika suszącego.
- Doktorant zaobserwował w czasie badań, że rozmiar ziarna w zakresie 0-8 mm ma niewielki wpływ na ubytek wody z węgla.
- Doktorant przeanalizował też wpływ temperatury początkowej złoża w szczególności temperatury ujemnej na czas suszenia oraz strukturę węgla. Zauważył, że dzięki zmianom fazowym wody w procesie zamrażania następuje rozerwanie struktury węgla, powiększenie porów i w konsekwencji skuteczniejsze odparowanie wody z węgla.

3.3. Ocena metodologii badań

Doktorant w celu udowodnienia tezy i osiągnięcia celu pracy posługiwał się głównie technikami doświadczalnymi.

Badania, jakie przeprowadził, można podzielić na trzy główne nurty:

- badania dotyczące określenia składu elementarnego węgla brunatnych, przy użyciu m.in. analizatora *PerkinElmer 2400 Series II CHNS/O Elemental Analyzer*, do określenia zawartości części mineralnych i lotnych oraz zawartości wilgoci w węglu brunatnym użyto *Termograwimetru Pyris Diamond*, a masy węgla oraz ich gęstość nasypową wyznaczano przy użyciu wagi pomiarowej *Radwag PS 6000/Y*;
- badania związane z obserwacją struktury węgla brunatnych ze względu na rodzaj i zawartość wilgoci przeprowadzono za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego, a zmianę struktury węgla w czasie suszenia za pomocą mikroskopu *Biolux AL*;
- badania w dwóch rodzajach złoża fluidalnego: fontannowego oraz pęcherzykowego na specjalnie w tym celu zaprojektowanych stanowiskach doświadczalnych służyły do analiz wpływu poszczególnych parametrów procesu (prędkości i temperatur czynnika suszącego, rodzaju złoża, wielkości ziaren węgla) na dynamikę oraz skuteczność suszenia;

Sumując należy zauważyć, że Doktorant przeprowadził wnikliwą analizę doświadczalną. Zakres przeprowadzonych badań jest szeroki, kompleksowy i niewątpliwie poszerza wiedzę odnośnie struktur węgla brunatnych oraz wpływu głównych parametrów na proces suszenia.

3.4. Uwagi krytyczne

- ❖ Pewnym mankamentem dysertacji jest brak modelu matematycznego opisującego proces suszenia ziarna w złożu fluidalnym. Model nie musiałby być skomplikowany, ale pokazywałby teoretycznie, jak wyselekcjonowane przez Doktoranta parametry wpływają na zjawisko. Pozwoliłoby to na pewne uogólnienia odnośnie procesów suszenia węgla brunatnych.

- ❖ W pracy praktycznie nie wspomniano o mechanizmie dyfuzyjnym wody w ziarnie węgla. Mając takie zaplecze doświadczalne, jakim dysponował Doktorant, można było pokusić się o choćby wstępną analizę tego zjawiska zakładając, że węgiel jest strukturą porowatą.
- ❖ Na stronie 10. pracy przedstawiono równania bilansowe określające minimalną ilość ciepła niezbędnego do podgrzania, a później wysuszenia węgla do zakładanej wilgotności. W dalszej części pracy zaprezentowano badania polegające na wyznaczaniu czasu suszenia w zależności od temperatury początkowej, gdzie za jedną z temperatur początkowych przyjęto -5°C . Dlaczego w takim razie w pracy nie uwzględniono ciepła topnienia lodu?
- ❖ Opis stanowisk doświadczalnych w szczególności badań w złożu fluidalnym jest niepełny. Brak informacji, jak zostały zamontowane czujniki wilgoci, temperatury czy ciśnienia. Trudno jest stwierdzić poprawność wyników bez tych informacji.
- ❖ W pracy brak także informacji odnośnie samych procedur pomiarowych. Nie wiadomo, jak zostały pobrane próbki do badań i czy były reprezentatywne dla wybranych typów węgla? Co z powtarzalnością badań?
- ❖ Doktorant wylicza wartości energii cieplnej i elektrycznej dostarczonej do złoża w czasie procesu suszenia. Z informacji zawartych w pracy wynika, że układ nie był izolowany cieplnie. W takim przypadku konieczne jest określenie strat cieplnych, a jeżeli są one małe w stosunku do nakładów energetycznych, wówczas taka informacja powinna znaleźć się w pracy z określeniem procentowego udziału strat do całkowitej energii cieplnej lub elektrycznej.
- ❖ We wnioskach na stronie od 119 do 122 została podana informacja o programie komputerowym bazującym na badaniach doświadczalnych przeprowadzonych przez Doktoranta. Nie wiadomo, dlaczego ta informacja znalazła się jedynie we wnioskach. Opis tego programu, procedur obliczeniowych, zakresu stosowalności mógłby stanowić osobny rozdział dysertacji.
- ❖ W prezentacji wykresów brakuje naniesionych błędów pomiarowych, obszarów niepewności pomiarowych.

Powyższe uwagi krytyczne należy przeanalizować i ewentualnie uwzględnić przed dalszym rozpowszechnianiem pracy. Wymienione uwagi krytyczne nie wpływają zasadniczo na dobry merytoryczny poziom pracy.

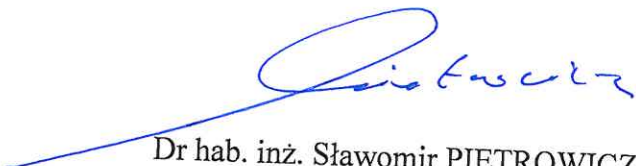
3.5. Uwagi redakcyjne

Praca zawiera dużo nieprecyzyjnych sformułowań. Uwagi dotyczące tych uchybień zostaną przekazane Autorowi w bezpośrednim kontakcie z recenzentem. Przykładowo jest to widoczne na stronie 2. w spisie oznaczeń i tak: *zawartość wilgoci w węglu* - brak określenia czy jest to udział masowy czy objętościowy; *ciepło właściwe dla powietrza* - przy stałym ciśnieniu czy objętości?; *przyrost czasu w komorze* - powinno być „czasu przebywania próbki w komorze”. *Strumień objętościowy/masowy* powinno być „objętościowe/ masowe natężenie przepływu” etc.

4. Podsumowanie

Biorąc pod uwagę przedstawioną rozprawę doktorską, jej temat i sposób prowadzenia badań, tj. dekompozycję problemu na zadania cząstkowe, sposób doboru narzędzi badawczych i syntezę osiągniętych wyników, można wysunąć wniosek, że mgr inż. Marcin Michalski wykazał się wiedzą i umiejętnościami badawczymi niezbędnymi do prowadzenia badań w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie energetyka i spełnia warunki do ubiegania się o stopień doktora nauk technicznych.

Wnoszę więc, zgodnie z Ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z 14.03.2003r. o dopuszczenie Go do obrony pracy i nadanie mu stopnia doktora nauk technicznych.


Dr hab. inż. Sławomir PIETROWICZ