

Warszawa, 29.04.2015.

Prof. zw. dr hab. inż. Rudolf Klemens

Politechnika Warszawska

Instytut Techniki Ciepłej

ul. Nowowiejska 21/25

00 – 665 Warszawa

**Recenzja Rozprawy Doktorskiej mgr inż. Jakuba Długosza
nt. ” Wybrane zagadnienia spalania tlenowego pyłu węglowego ”**

1. Wstęp

Tematem dysertacji jest bardzo ważny problem związany ze spalaniem paliw kopalnych, a mianowicie emisja CO_2 do atmosfery. Proces ten obwiniany jest o nasilenie tzw. efektu cieplarnianego mogącego prowadzić do powolnego narastania średniej temperatury Ziemi w skali globalnej. Spalając paliwa zawierające węgiel nie możemy uniknąć powstawania CO_2 , ale możemy zmniejszyć emisję tego gazu albo poprzez zwiększenie sprawności procesu spalania, albo też poprzez magazynowanie części powstającego dwutlenku węgla. Analizą tego problemu zajął się Autor w swojej pracy. Aby łatwiej było oddzielić CO_2 od pary wodnej w spalinach proponuje on wykorzystanie technologii spalania tlenowego. Polega ona na zastąpieniu utleniacza, którym w wypadku spalania konwencjonalnego jest powietrze, tlenem. Taka metoda separacji CO_2 ze spalin jest znacznie tańsza od metod klasycznych. Należy jednak pamiętać, że magazynowanie ogromnych ilości CO_2 jest problemem samym w sobie. W wypadku magazynowania tego gazu w pomieszczeniach podziemnych (a o takich rozwiązaniach najczęściej się myśli), należy zawsze brać pod uwagę możliwość gwałtownego wydzielenia się tego gazu do atmosfery, w wyniku n.p. niespodziewanych ruchów tektonicznych Ziemi. Taka sytuacja mogłaby doprowadzić do katastrofy na niewyobrażalną skalę. Ten problem nie wchodzi jednak w zakres omawianej dysertacji. Aby lepiej rozpoznać technologię spalania tlenowego Autor przeprowadził szereg badań eksperymentalnych i obliczeń numerycznych. Poddano szczegółowej analizie istotne procesy wpływające na całokształt zjawiska spalania węgla brunatnego, t.j. (zapłon, pirolizę i szybkość spalania, w zależności od składu atmosfery i własności cząstek węgla, takich jak granulacja, struktura i zawartość wilgoci. Szczególną uwagę położono na zawartość wilgoci, ponieważ głównym przedmiotem badań był węgiel brunatny z kopalni Turów (K8), który cechuje się wysoką (do 70%) zawartością wody. Ponieważ węgiel ten jest jednocześnie traktowany jako ważna dla Polski rezerwa energetyczna, to można przyjąć, że tematyka pracy doktorskiej została dobrana bardzo trafnie i dotyczy

ważnego i aktualnego problemu związanego z bezpieczeństwem energetycznym kraju. Z drugiej strony, biorąc pod uwagę fakt, że technologia spalania tlenowego jest jeszcze stosunkowo słabo rozpoznana, badania prowadzone w tym zakresie mają również istotne znaczenie naukowe.

2. Uwagi ogólne

Praca doktorska mgr inż. Jakuba Długosza liczy 108 stron i składa się z 6 rozdziałów oraz spisu literatury. Zawiera 57 rysunków i 9 tabel. Po krótkim wstępie, w którym Autor przedstawia istotę badanego zagadnienia oraz omawia problemy poruszane w dysertacji przechodzimy do rozdziału 2, w którym podano podstawy spalania tlenowego. Dotyczy to procesu zapłonu i związanej z nim pirolizy i odgazowania węgla oraz spalania pozostałości koksowej. Omówiono także problemy związane z radiacyjną wymianą ciepła w komorze paleniskowej.

Rozdział 3 zawiera cel, tezy i zakres pracy. W rozdziale 4 podano charakterystyki węgla wykorzystanych w badaniach oraz opisy wykorzystanych stanowisk badawczych i zastosowanej metodyki badawczej.

W rozdziale 5 przedstawiono wyniki badań własnych, zarówno eksperymentalnych jak i symulacji numerycznych. Dotyczą one: wpływu rozmiaru ziaren, ich struktury i wilgotności węgla na czas indukcji, krytyczną temperaturę, intensywność zapłonu i przebieg procesu spalania oraz wpływu wilgoci i rodzaju atmosfery na szybkość pirolizy węgla brunatnego, strukturę pozostałości koksowej i szybkość spalania koksu. Symulacje numeryczne dotyczyły modelowania procesu radiacji w komorze paleniskowej reaktora opadowego w różnych warunkach pracy.

Przedział 6 zawiera podsumowanie i wnioski.

W rozdziale 7 podano wykaz literatury.

3. Ocena merytoryczna

Po zapoznaniu się z całością pracy nasunęły mi się następujące uwagi:

- Str. 6, wiersz 10 od góry, na czym polega wychwytywanie dwutlenku węgla przed spalaniem.
- Str. 17, wiersz 8 od góry, proponuję: "...następnie ich zapłonie i spalaniu, a w ostatecznej fazie na zapłonie i spalaniu pozostałości koksowej."
- Str. 17, wiersz 2 od dołu: po raz czwarty Autor podaje etapy spalania pyłu węglowego, poprzednio na stronach 4, 9 i 10.
- Str. 19, wiersz 1 od góry, co to znaczy „intensywność promieniowania promienia radiacyjnego...”
- Str. 32, rys. 4.1.3. „prawa strona jednej z krzywych wykresu jest źle zinterpretowana, jest to funkcja rosnąca, ale jej wartość nie może przekroczyć 100%

- Str.43, dlaczego dla ziaren o średnicy mniejszej niż 0,09 mm wilgotność badanego węgla wynosiła 7% i 24% a dla ziaren w przedziale 0,16 – 0,20 mm odpowiednio 7% i 33%.
- Str.45, rys.4.2.10. ,jakie składniki tworzą pierwotny i wtórny strumień gazów.
- Str.47, dlaczego w atmosferze OXY20 najdłuższym czasem indukcji charakteryzowały się najdrobniejsze ziarna węgla.
- Str.50, dlaczego na wykresach 5.1.4 ÷ 5.1.7 ,ograniczono wartość sygnału do 200 mV. Stracono przez to dodatkowe informacje związane z dynamiką zapłonu.
- Str.52 , dlaczego do badań wykorzystano atmosfery OXY20 i OXY25, a nie OXY21, co umożliwiłoby lepsze porównanie z powietrzem atmosferycznym.
- Str.53 ,dlaczego w atmosferze OXY węgiel o wilgotności 18% ma niższą temperaturę zapłonu niż węgiel o wilgotności 7%, podczas gdy dla powietrza jest odwrotnie.
- Str.58, względem czego oznacza się masę próbek m_{BT} i m_{TR} , czy względem m_0 ? Od jakiego momentu liczy się czas t_{BT} i t_{TR} . Dlaczego dla dużych cząstek przyjęto wilgotność węgla 33%, zamiast 24%, jak to było dla małych cząstek.
- Str.58 ,dlaczego we wzorze 5.2.1. i 5.2.2. prędkość spalania oznaczono przez W , skoro w ten sam sposób oznaczono już wilgotność węgla.
- Str.59, z Rys.5.2.1. i 5.2.2 wyznaczono „czas wypalania”, czy „szybkość wypalania”, str.61, drugi wiersz od góry.
- Str.62 , dlaczego w ubogiej w tlen atmosferze OXY15 duże cząstki wypalają się szybciej niż cząstki drobne , a dla OXY35 jest odwrotnie (trzeci wiersz od dołu).
Rys.5.2.4. dlaczego dla OXY15 szybkość wypalania rośnie ze wzrostem średnicy ziarna, a dla OXY 35 maleje.
- Str.63 ,Rys.5.2.5., dlaczego szybkość nagrzewania maleje ze wzrostem OXY
- Str.68 , wiersz 6 od góry, powinno być chyba „ w atmosferze CO_2 ...”
- Str.71 ,W jakich jednostkach podane są masy A_{fuel} , A_{char} , X_{char} , X_{fuel} w gramach, czy w procentach. Jeżeli w % to względem czego liczonych ?
- Str.72, wiersz 6 od góry , napisano : „ wszystkie masy odnoszą się do próbek w stanie suchym, a na Rys.5.3.2.1. i Rys.5.3.2.2.podano, że wilgotność węgla wynosiła 7 lub 14%
- Str.72 ,wiersz 4 od dołu, czym się różni „...bezwzględny i względny ubytek masy, skoro oba podane są w % ,”
- Str.72 , Rys.5.3.2.1. powinno chyba być : „ ubytek całkowity paliwa”... , bo węgiel występuje jeszcze na tym rysunku oddzielnie jako pierwiastek.

- Str.74, wiersz 17 od góry, czy „skumulowana powierzchnia właściwa „ i „ skumulowana objętość właściwa „ to to samo co „ całkowita powierzchnia właściwa „ i „ całkowita objętość właściwa „
- Str.75. Rys.5.3.3.1., jakie jednostki znajdują się na osi odciętych. Czy wartości liczbowe na osi rzędnych są wspólne dla powierzchni właściwej i objętości właściwej
- Str.76, Rys.5.3.3.2., jak definiowana jest powierzchnia względna i objętość względna porów. Jakie jednostki znajdują się na osi odciętych. Czy wartości liczbowe na osi rzędnych są takie same dla powierzchni względnej i objętości względnej
- Str.78, czym się różni „ wewnętrzna powierzchnia właściwa mezo i makroporów pozostałości koksowej „ od „ wewnętrznej powierzchni właściwej pozostałości koksowej „.
- Str.82, dlaczego do obliczeń przyjęto atmosferę OXY30, a nie OXY21 oraz wilgotność węgla równą 15% , a nie 14%, jak to było w badaniach eksperymentalnych.
- Str.83, w Tabeli 5.5.1a nie sumuje się lewa kolumna, podobnie w Tabeli 5.5.1.b nie sumuje się prawa kolumna.
- Str.88, Rys.5.5.5 i 5.5.4 są trudno czytelne z uwagi na zbyt skumulowany opis.
- Str.89 ,dlaczego przebiegi wartości współczynnika absorpcji tak bardzo się różnią, w zależności od przyjętego modelu, Rys.5.5.5 i 5.5.6.
- Str.90, wiersz 3 od góry , proponuję zapis „...jaką pokonuje w danym ośrodku promieniowanie radiacyjne „ . Dlaczego na oznaczenie wilgotności węgla wprowadzono dwa oznaczenia „ W „ i „ M „
- Str.91, wiersz 1 od góry, w zdaniu „Podobne zachowanie dotyczy osłabienia promieniowania, które jest słabsze w atmosferze OXY30 niż w atmosferze powietrza „ nie wiadomo co jest słabsze, osłabienie promieniowania czy promieniowanie.
- Str.94, dla przypadku „ grzałka „ i „ ściana „ spadek wartości promieniowania rozpoczyna się w odległości ok. 3,5 m od górnej krawędzi reaktora, a nie w odległości 2,8 m jak napisano w pracy, trzeci wiersz od dołu.
- Str.96, Rys.5.5.14. Czym się różni „ gęstość radiacyjna strumienia ciepła „ od „ opromieniowania „ , Rys. 5.5.13. Co przedstawia pik na Rys.5.5.14 , usytuowany w odległości ok.3 m od górnej krawędzi reaktora.
- Str.98, wiersz drugi od dołu: czy w pracy badano cząstki węgla o średnicy 0.5 mm.?
- Str.99, wiersz trzeci od dołu, atmosfery OXY 30 i powietrze nie mają chyba podobnego masowego udziału tlenu, jak napisano w tym miejscu. Dodatkowo, na str, 98 i wcześniej podano, że w atmosferach OXY stężenie tlenu podawane jest w % obj.

4. Uwagi szczegółowe

- Str.3 , wiersz 3 od góry, zmienić ustawienie przecinków.
- Str.3 , wiersz 17 od dołu powinno być „ ..zostało zrównoważone ...”
- Str 3 ,wiersz 15 od dołu, proponuję ...” oraz na zjawisku polegającym na tym, że...”
- Str.4 ,wiersz 10 Od dołu, proponuję „i w różnych atmosferach ..”
- Str.7 ,wiersz 16 od dołu, proponuję „.....od absorpcji stosowanej...”
- Str.7, wiersz 5 od dołu, proponuję „.....rozkłady te...”
- Str.9, wiersz 9 od góry, powinno być : „ polskich węgla brunatnych „
- Str.12, Autor podaje udział pięciu kopalni w całkowitym wydobyciu węgla brunatnego w Polsce, przy czym z podanych danych wynika, że cztery pierwsze dają już 100% wydobycia.
- Str.14,15,24 i inne, powinno być : „przedeksponentialnym”, a nie „przedeksponencjalnym „
- Str.16, wiersz 3 od dołu i str.17 wiersz 4 od góry ,powinno być „...temperatury zapłonu ...”
- Str.17, wiersz 9 od góry, powinno być : „...ich zapłonie i spalaniu...” oraz „...na zapłonie i spalaniu...”
- Str.17, wiersz 12 od góry, proponuję : ...ale też od użytego...”
- Str.17, wiersz 7 od dołu, powinno być „ bar „, a nie „ atm „
- -Str.18, wiersz 12 od dołu, proponuję : „ para wodna”, zamiast „woda”
- Str.20, wiersz 16 od góry, usunąć „ razy „
- Str.20, wiersz 6 od dołu, proponuję „....,oni też zaobserwowali ...”
- Str.22, wiersz 7 od dołu, powinno być : „ discrete coordinates „
- Str.29, wiersz 4 od dołu, proponuję : „ Określono też szybkość spalania. „
- Str.30, wiersz 13 od góry, proponuję : „ Jest to znacznie...”
- Str.30, wiersz 2 od dołu, proponuję : „...spalania, decydują...”
- Str.40, wiersz 9 od dołu, proponuję : „...płuczący, o natężeniu 4 – dcm^3/min ...”
- Str.44, wiersz 9 od góry, proponuję : „...długiej pionowej rury...”
- Str.60, Tab.5.2.3 ,co oznacza liczba „ 5 „ w kolumnie „ pow „, Powinno być chyba „10.75”.
- Str.61, wiersz 2 od dołu :proponuję „...OXY20 i OXY25 przebiegały podobnie...”
- Str.62, wiersz 8 od dołu, powinno być : „.0,2 mm) niezależnie od...”
- Str.63,wiersz 4 od dołu, powinno być: „...węgla turoszowskiego...”
- Str.65, wiersz 4 od dołu, usunąć „ o „ , chyba nie chodzi o atomy tlenu.
- Str.73, wiersz 3 od dołu, proponuję „...w tym na porowatość ...”
- Str,91, wiersz 1 od góry oraz str.92.,wiersz 5 od dołu, proponuję : „... absorpcji promieniowania...”

- Str.97, wiersz 13 od góry, proponuję: „Krytyczna temperatura zapłonu maleje,,,”
- Str.97, wiersz 2 od dołu, proponuję : „ Dla temperatury...”
- Str.101,wiersz 9 od dołu, proponuję: ...” dla wyznaczonej wartości..”
Praca nie zawiera wykazu oznaczeń, co utrudnia jej czytanie.

Ogólnie :

- Proponuję, aby na wykresach stosować tylko polskie napisy.
- Temperatura może być wyższa lub niższa , a nie większa lub mniejsza.
- Czas może być krótszy lub dłuższy, a nie większy lub mniejszy.
- Objętość właściwa może być mniejsza lub większa a nie niższa lub wyższa

5. Podsumowanie

Dysertacja opracowana jest bardzo starannie, zarówno pod względem graficznym , jak i językowym. Niektóre wykresy są trudne do interpretacji, ale wynika to przede wszystkim ze złożoności badanych procesów.

Pomimo wymienionych usterek praca posiada szereg walorów poznawczych, a wyniki uzyskane przez Autora znacznie poszerzają naszą wiedzę w zakresie mechanizmów kontrolujących spalanie węgla brunatnego w różnych warunkach. Praca napisana jest dobrym językiem i stanowi zwarte opracowanie badanego problemu. Autor podjął się bardzo trudnego zadania określenia wpływu rozmiaru cząstek węgla, ich struktury, zawartości wilgoci i zawartości części lotnych oraz składu atmosfery gazowej na czas indukcji, krytyczną temperaturę zapłonu i intensywność zapłonu pyłu węgla brunatnego. Są to złożone procesy, które w dodatku oddziałują na siebie z różną intensywnością, w zależności od warunków ich prowadzenia. Przy tak dużej liczbie zmiennych uzyskuje się czasami trudne do uzasadnienia wyniki. Autor sobie z tym jednak dobrze poradził. Za najbardziej wartościowy wynik pracy uważam wykazanie, że istnieje możliwość zastosowania atmosfery OXY w procesie stabilnego i efektywnego spalania węgla brunatnego, pozwalającego na jednoczesną redukcję CO₂ . Przypominam, że moim zdaniem problem magazynowania CO₂ na skalę przemysłową nie został jeszcze rozwiązany i stanowi on duże zagrożenie dla ludzi przebywających w pobliżu miejsca składowania. Uzyskane wyniki będą mogły być wykorzystane do opracowania optymalnych wytycznych procesowych i projektowych dla układów OXY spalania węgla brunatnego, stanowiących podstawę do zastosowania tej technologii w istniejących jednostkach kotłowych lub do budowy w Polsce instalacji pilotujących. W ten sposób zrealizowany został cel pracy. Doktorant wykazał , że opanował dostępną literaturę dotyczącą badanego zagadnienia, potrafi planować i zrealizować program badań eksperymentalnych oraz prowadzić obliczenia numeryczne związane z badanym problemem. W swoich rozważaniach nie odniósł się jednak do udziału kosztów pozyskiwania tlenu w ogólnym bilansie cenowym

proponowanej przez siebie technologii. Uważam, że taką analizę kosztów należy przeprowadzić przed podjęciem dalszych badań w tym zakresie.

Zauważone niedociągnięcia nie umniejszają znacząco wartości pracy i mogą być łatwo usunięte w procesie publikowania osiągniętych wyników.

Dlatego stwierdzam, że praca spełnia wymogi określone w ustawie z dnia 18 marca 2011 r. o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki (Dz.U. 2011 nr 84 poz.455) i stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Jakuba Długosza do publicznej obrony Jego rozprawy doktorskiej .

Ryszard Klement