

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Arkadiusza Szydelko pt. **Spalanie i współspalanie paliw alternatywnych**

Recenzja została opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Mechaniczno-Energetycznego
Politechniki Wrocławskiej z dnia 01.06.2017r.

1. Celowość podjęcia tematu

Przedłożona do recenzji praca jest analizą możliwości energetycznego wykorzystania wybranych odpadów komunalnych. Odpady palne, rozdrobnione, w miarę jednorodne, z grupy odpadów innych niż niebezpieczne w pewnych warunkach mogą stanowić alternatywę dla węgla, oleju opałowego, gazu czy biomasy. Odpady te mogą być spalane lub współspalane z paliwami konwencjonalnymi, gdy prócz szeregu wymagań technologicznych, spełnione są wymagania ochrony środowiska.

Jest to zagadnienie bardzo ważne, gdyż w taki sposób rozwiązuje się dwa problemy. Po pierwsze, spalanie stanowi sposób utylizacji odpadów, których wraz z rozwojem cywilizacyjnym jest coraz więcej, wraz z coraz większym udziałem frakcji trudno degradowanych. Po drugie, poszukuje się różnych alternatywnych rozwiązań dla paliw konwencjonalnych, których to zasoby są ograniczone, wykorzystanie jest względnie drogie, a oddziaływanie ich spalania na środowisko stanowi poważny problem.

Wykorzystanie w energetyce zawodowej i ciepłownictwie odpadów w formie paliw jest możliwe po spełnieniu pewnych warunków. Po pierwsze, przedsiębiorstwa te muszą być ekonomicznie i prawnie zachęcone do stosowania takich paliw. Od ich zakupu, transportu, składowania do spalania i utylizacji żużla i popiołu. Następnie, spalanie takich paliw musi być procesem technicznie i technologicznie poznany, a własności paliw muszą być względnie stabilne. Po trzecie, oddziaływanie spalania bądź współspalania tych paliw na środowisko musi mieścić się w granicach określonych odpowiednimi normami.

Wykorzystanie odpadów jako alternatywnego paliwa w energetyce musi uwzględniać warunki spalania jakie stwarzają stosowane w kotłach paleniska, praktycznie trzy rodzaje, z rusztem mechanicznym, pyłowe lub fluidalne. Przy współspalaniu odpadów z paliwami

konwencjonalnymi należy wziąć pod uwagę budowę i własności eksploatacyjne zastosowanych w elektrowniach i ciepłowniach układów przygotowania paliwa.

Dotychczas badania paliw alternatywnych koncentrowały się na spalaniu i współspalaniu biomasy leśnej lub rolniczej. Wskazywano na szereg problemów technicznych i eksploatacyjnych, a pewne rozwiązania systemowe doprowadzały do działań co najmniej dziwnych.

Rozszerzenie badań na paliwa z odpadów komunalnych uważam za działania ze wszech miar potrzebne i przyszłościowe. Tak postrzegam temat ocenianej rozprawy doktorskiej. Zwięźle sformułowany tytuł obejmuje bardzo obszerny zakres pracy, wiele złożonych badań, dotyczących praktycznie wszystkich zagadnień eksploatacyjnych związanych z zastosowaniem wybranych odpadów komunalnych jako paliwa alternatywnego.

2. Zakres pracy, sposób jej realizacji i wyniki badań

Przedstawiona do recenzji praca doktorska składa się z 10 rozdziałów, spisu treści, spisu ważniejszych oznaczeń oraz wykazu literatury. Całość poprzedzona jest wstępem.

We wstępie przedstawiono uwarunkowania paliwowe, emisyjne i prawne, które powodują, że poszukuje się paliw alternatywnych oraz różnych sposobów zagospodarowania odpadów. Krótko pisze się o eksploatacyjnych zagrożeniach obecnych przy spalaniu odpadów. Wstęp kończy ważne zdanie wskazujące miejsce aplikacji wyników badań zawartych w rozprawie i zarazem wskazuje ich dyscyplinę naukową „Otrzymane wyniki badań oraz opracowane metody mogą być wykorzystane podczas prowadzenia procesu współspalania paliw konwencjonalnych z alternatywnymi w kotłach energetycznych oraz do przewidywania zachowania się paliw alternatywnych.”

Rozdział pierwszy stanowi przegląd stanu wiedzy, jak również uwarunkowań prawnych dotyczących energetycznego wykorzystania odpadów. Przedstawiono wielość problemów oraz potencjalnych zagrożeń związanych ze spalaniem paliw wytworzonych na bazie odpadów. Wskazuje się jakie potencjalne trudności mogą występować podczas stosowania paliw alternatywnych z odpadów komunalnych, określonych dalej w pracy skrótem SRF.

Uwarunkowania wskazane w rozdziale 1 były pomocne przy formułowaniu treści rozdziału 2, który zawiera cel, tezę i zakres pracy. Rozgraniczono tu naukowe cele rozprawy, szczegółowo je formułując oraz cele praktyczne – aplikacyjne. Porządkują one działania Autora i ułatwiają oddzielenie informacji literaturowych od oryginalnych Jego osiągnięć. Wymienione szczegółowe cele praktyczne wskazują ważną, aplikacyjną stronę rozprawy

dotyczącą możliwości opracowania procedur technicznych umożliwiających spalanie i współspalanie badanych paliw alternatywnych w kotłach energetycznych.

Zakres pracy, obejmujący sześć etapów związanych z badaniami wskazanych paliw, ich spalania, własności popiołów oraz poziomu emisji jest szerokim zakresem badań. Ich realizacja spowodowała, że praca jest bardzo obszerna. Jednocześnie przyjęty chronologiczny porządek, układ, oraz dyscyplina w oznaczeniach ułatwia jej studiowanie. Jest to ważne przy tak dużej liczbie wyników różnorodnych badań.

W rozdziałach 3 i 4 przedstawiono odpowiednio badane paliwa, zastosowaną procedurę badawczą, techniki badawcze, wykorzystaną aparaturę oraz normy, na których się oparto. Jako badane paliwa wytypowano 6 paliw wytworzonych z odpadów komunalnych (SRF), 3 rodzaje odpadów wytworzonych z odpadów komunalnych tj. makulaturę kartonową, makulaturę mieszaną papierową, tworzywa sztuczne politetraetylenowe (PET) oraz osad ściekowy. Jako paliwa referencyjne przyjęto jeden węgiel kamienny i jeden węgiel brunatny o własnościach typowych dla paliw stosowanych w energetyce zawodowej. Węgłe te służyły również do sporządzania mieszanin z badanymi paliwami alternatywnymi. Określono własności fizykochemiczne badanych paliw i umiejscowiono je na wykresie van Krevelena. Wyznaczono zawartości chloru i rtęci, a także frakcji biogenicznej. Przeprowadzono analizę i opracowano zestawienia oraz wykresy występujących zależności w obrębie składu badanych paliw. Rozdziały 3 i 4 zawierają dyskusję uzyskanych wyników, a także szereg innych porównań i zestawień.

W rozdziale 5 przedstawiono mechanizm spalania i współspalania badanych paliw oraz ich mieszanin. Omówiono kinetykę procesu, zastosowaną aparaturę i procedurę badawczą oraz wyniki badań. Wyniki te opracowano w postaci profili odgazowania i spalania pozostałości koksowej (ubytku masy próbki i reaktywności). W dalszej części wyznaczono parametry kinetyczne odgazowania części lotnych oraz pozostałości koksowej, a także określono związki między parametrami fizykochemicznymi badanych paliw a przebiegiem procesu ich spalania. Całość przedstawionych wyników badań uzupełniona jest obszerną dyskusją i opisem postulowanego mechanizmu spalania badanych paliw alternatywnych.

Rozdział 6 zawiera opis badań zapłonu i wybuchu mieszanin paliw alternatywnych z węglem. Przedstawiono metodologię badań samozapłonu, zapłonu oraz wybuchu badanych paliw. Opisano stanowiska badawcze i przyjęte techniki badawcze i pomiarowe. Określono czasy opóźnienia zapłonu, czas indukcji zapłonu oraz minimalne temperatury zapłonu badanych paliw. Określono związki między minimalnymi temperaturami zapłonu mieszaniny

pyłowo-powietrznej i czasem opóźnienia zapłonu a własnościami fizykochemicznymi analizowanych paliw.

Rozdział 7 poświęcony jest problemowi zachowania się związków chloru podczas spalania paliw alternatywnych i wpływu różnych dodatków mineralnych na wiązanie chloru. Poddano ocenie poziom związków chloru w badanych paliwach oraz oszacowano ryzyko pojawienia się korozji chlorowej poprzez wyznaczenie współczynników Blomberga i Borna. Określono skuteczność wiązania chloru przez różne dodatki mineralne, również te dotąd niestosowane w energetyce. Zbadano także możliwość wiązania chloru przez osad ściekowy, który mógłby być dodawany do spalanych paliw z odpadów komunalnych. Rozdział ten, podobnie jak poprzednie, zawiera obszerną analizę i dyskusję wyników badań.

W rozdziale 8 poddano analizie zagadnienie transformacji substancji nieorganicznej w paliwach alternatywnych podczas ich spalania. Wyznaczono składy tlenkowe popiołów badanych paliw oraz dla każdego z paliw temperatury, odpowiednio spiekania, mięknięcia, topliwości i płynięcia popiołu. Oceniono możliwość określenia związków pomiędzy składem tlenkowym a charakterystycznymi temperaturami topliwości popiołu. Wyznaczono wartości charakterystycznych wskaźników (oznaczonych literami A – F), na podstawie których można ocenić tendencję popiołu do tworzenia fazy stopionej. Starano się również znaleźć związki między tymi wskaźnikami a charakterystycznymi temperaturami topliwości popiołu. W oparciu o oprogramowanie FactSage 6.4 wyznaczono zmiany udziałów i przejścia fazowe związków chemicznych zawartych w popiele wszystkich badanych paliw w zakresie 700 - 1500 °C. Wyznaczono również zależności między temperaturami topliwości popiołów i ich składem a ilością powstającej fazy stopionej. Na sporządzonych wykresach posłużono się również wprowadzonymi wcześniej wskaźnikami. Przydatny tutaj okazał się wprowadzony przez Autora nowy wskaźnik (F) do prognozowania wpływu składu tlenkowego popiołu na wartość temperatury, przy której pojawia się faza stopiona.

W rozdziale 9 przedstawiono wyniki badań emisji NO_x i SO₂ podczas spalania badanych węgli oraz ich mieszanin z wybranymi paliwami alternatywnymi, a także mieszanin tych węgli z osadem ściekowym. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że obecność dodatków do węgla na poziomie przyjętym w badaniach nie wpływa na końcowy poziom tlenków azotu i tlenków siarki.

Rozdział 10 - Podsumowanie i wnioski końcowe – zawiera syntetyczne zebranie (na trzech stronach) głównych wniosków wynikających z przeprowadzonych badań, których wyniki zawiera rozprawa.

Literatura zebrana i wykorzystana w pracy jest obszerna i aktualna. Liczy ponad 200 pozycji.

3. Charakterystyka pracy

Temat recenzowanej rozprawy doktorskiej jest bardzo aktualny z punktu widzenia środowiskowego i energetycznego oraz ważny i interesujący naukowo. Badania różnych niekonwencjonalnych paliw są częstym tematem w czasopiśmiennictwie naukowym z obszaru energetyki i spalania. Badane są jednak najczęściej wybrane aspekty np. kinetyka procesu spalania, oddziaływanie korozyjne na powierzchnie grzewcze czy problemy związane z emisją. Rzadko można spotkać tak kompleksowe podejście do zagadnienia jak w recenzowanej rozprawie. Paliwa o silnie zróżnicowanym składzie (SRF) i inne, w tym węgle traktowane jako paliwo referencyjne, poddano wszechstronnym analizom; od badań własności fizykochemicznych, poprzez kinetykę spalania i współspalania, mechanizm zapłonu i wybuchu, zachowanie się związków chloru, badania transformacji popiołu, do badań emisji. Zakres zrealizowanych badań jest dużo bardziej obszerny niż zwyczajowo wymaga się od prac doktorskich.

Wykorzystana w badaniach, w dużej mierze nowoczesna aparatura analityczna i pomiarowa, przyjęte i starannie opisane procedury i stosowane normy czynią uzyskane wyniki wiarygodnymi i mogą stanowić dane porównawcze dla innych osób zajmujących się naukowo tą tematyką. Składy paliw i ich mieszanin czynią szereg z uzyskanych wyników badań oryginalnymi naukowo.

Uzyskane wyniki mają duże znaczenie praktyczne. Mogą być wykorzystane zarówno na etapie projektowania palenisk (wartość opałowa, kinetyka spalania, temperatury topliwości popiołu, wiązanie chloru) czy eksploatacji kotłów (np. zmiany nastaw w instalacjach podawania paliwa i powietrza oraz poziom emisji).

Praca jest zredagowana bardzo przejrzysto i komunikatywnie. Redakcyjnie ją ujednolicono, przez co ułatwione jest jej studiowanie. Każdy głównych rozdziałów posiada podsumowanie badań nim opisanych. Ułatwia to również spis konsekwentnie stosowanych oznaczeń. Na uwagę zasługuje bardzo staranna i jednolita redakcja rysunków, tabel i zestawień.

Praca, po uzupełnieniach wynikami badań literaturowych dotyczących innych paliw alternatywnych, zwłaszcza powstałych z różnych innych odpadów, stanowić może dużą część materiału redakcyjnego na książkę (podręcznik akademicki).

Jak już podkreślono, praca napisana jest bardzo starannie. Nie mniej jednak Autor nie ustrzegł się pewnych błędów przy redagowaniu rozprawy. Przykładowo:

Str.77 - Rys.5.3 bardziej dotyczy przebiegu procedury badawczej niż schematycznie zaznaczonych zmian masy paliwa. Krzywą grzania oznaczono niebieską linią.

Str.111 – Zamienione kolory linii na Rys.6.4a i b.

S tr.116 - Błąd w numeracji rysunku.

Str.122 – W ostatniej linii chodzi chyba o ryzyko wystąpienia zapłonu podczas składowania i transportu w instalacji tych paliw.

Str. 131 i dalsze – Czy nie należy używać określenia przyrost ciśnienia zamiast narost?

Str.169 – Czy wartości wskaźnika F w tabelach 8.4 i 8.5 (niskie wartości) są poprawne?

Inne, nieliczne błędy interpunkcyjne czy gramatyczne zaznaczyłem w studiowanym egzemplarzu rozprawy.

4. Uwagi dyskusyjne i krytyczne

W trakcie studiowania rozprawy nasuwają się następujące uwagi:

W pracy nie znalazłem danych dotyczących gęstości nasypowej badanych paliw. W tabeli 3.2 podano, że wykorzystano do jej wyznaczenia autorskie stanowisko badawcze. Natomiast na wybrane wartości gęstości nasypowej natknąłem się dopiero na str. 108. Jest to wielkość ważna w kontekście pracy układów paleniskowych i strumienia paliwa (strumienia energii) podawanego do kotła. Nawet jeśli trudno ją dla paliw SFR wyznaczyć, należy oszacować przedział jej zmienności.

W zdecydowanej większości rozprawa dotyczy pomiarów często złożonych wielkości fizycznych. Część wymaga jedynie odczytów wskazań aparatury pomiarowej, część zastosowania całych skomplikowanych procedur. Oddzielnym problemem jest reprezentatywność i liczba próbek danego paliwa wzięta do badań. Studiując pracę nie spotkałem się z danymi metrologicznymi zastosowanej aparatury np. w tabeli 3.2 czy w zestawieniach dotyczących innych mierzonych wprost czy wyznaczanych pośrednio wielkości. Rozumiem, że w przypadku tak silnie zróżnicowanych materiałów jak odpady komunalne odchylenie standardowe wielkości charakteryzujących paliwo może być znaczne, tj. niepewność typu A może być znacznie większa niż typu B, ale należy o tym napisać. Analiza przedstawiona na str. 50 i dalszych wskazuje jedynie, że badane paliwa SRF1-6 mogą być uznane za grupę reprezentatywną paliw alternatywnych wyprodukowanych z odpadów komunalnych.

Analizując wyniki badań odgazowania i spalania paliw alternatywnych wykonane metodą termogravimetryczną nasuwa się pytanie, jak przenieść wyniki tych badań,

wykonanych na mikropróbkach, na paliwa o składzie ziarnowym stosowanym w paleniskach energetycznych? Jak to wygląda w porównaniu z badaniami odgazowania i spalania dużych ziaren w specjalistycznych reaktorach?

Uwagi powyższe mają głównie charakter dyskusyjny i nie podważają wiarygodności przedstawionych w rozprawie badań.

5. Ocena pracy

Stopień rozwiązania zadań przyjętych w pracy jest, z punktu widzenia jej celu, wysoki i spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim z zakresu nauk technicznych. Uważam, że zakres zrealizowanych badań jest bardzo obszerny i wykracza poza zwyczajowo przyjęty zakres badań spotykany w pracach doktorskich. Uważam również, że praca Pana Arkadiusza Szydełko wyróżnia się zakresem, poziomem realizacji badań i starannością ich opracowania spośród znanych mi oraz recenzowanych przeze mnie rozpraw doktorskich.

Realizując pracę Autor wykazał się rzetelnością i dociekliwością w prowadzeniu badań naukowych. Warto podkreślić złożoność analizowanych w rozprawie zjawisk, a także na walory aplikacyjne uzyskanych wyników.

Praca dotyczy wieloaspektowości spalania i współspalania paliw energetycznych, a także oddziaływania procesu spalania na powierzchnie ogrzewalne oraz emisję gazową i mieści się w dyscyplinie naukowej energetyka.

6. Konkluzja

Uważam, że praca doktorska Pana Arkadiusza Szydełko w pełni zasługuje na jej dopuszczenie do publicznej obrony. Przemawia za tym duży naukowy wkład pracy Autora, oryginalność uzyskanych wyników, a także praktyczne ich znaczenie.

Uważam, że Pan Arkadiusz Szydełko wykazał się umiejętnością planowania i realizacji badań.

Stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska Pana Arkadiusza Szydełko spełnia wymogi *Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki* stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

