

prof. dr hab. inż. Krzysztof Badyda
Instytut Techniki Ciepłej
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
Politechnika Warszawska

Recenzja rozprawy doktorskiej autorstwa mgr inż. Agaty Wirth-Ljungquist,
zatytułowanej „*Analiza wpływu jednorodności fizyko-chemicznej mieszanek
paliwowych spalanych w instalacji CFB1300 na jej awaryjność*”

1. Podstawa formalna. Sylwetka Doktorantki

Recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej z dnia 10.01.2024 r. w wyniku uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska Górnictwo i Energetyka tej Uczelni z dnia 14.12.2023 r.

Doktorantka, mgr inż. Agata Wirth-Ljungquist jest absolwentką studiów doktoranckich realizowanych w ramach programu Doktorat Wdrożeniowy.

Według mojej wiedzy Doktorantka nie ubiegała się uprzednio o nadanie stopnia doktora.

2. Cel pracy, zasadność podjęcia tematu

Przedmiotem rozważań w ocenianej rozprawie jest analiza pracy bloku energetycznego opartego na kotle fluidalnym CFB1300. Kocioł ten został wyposażony w palenisko z cyrkulacyjną warstwą fluidalną, jest pierwszą na świecie jednostką tej kategorii na nadkrytyczne parametry pary. Celem ocenianej rozprawy była identyfikacja przyczyn występujących w pracy wspomnianego bloku zaniżeń mocy i awarii układu podawania paliwa oraz analiza wpływu jednorodności fizyko-chemicznej mieszanek węgla na awaryjność kotła, a także sposoby ograniczenia spadku dyspozycyjności.

W Polsce mamy w ostatnich latach do czynienia dynamicznymi zmianami podaży węgla kamiennego, który wciąż pozostaje kluczowym paliwem dla funkcjonowania bloków zasilających Krajowy System Elektroenergetyczny. Spadek krajowego wydobycia węgla mający miejsce od lat skutkował, między innymi, znaczącym wzrostem jego importu, a także wahaniami jakości paliwa pozyskiwanego na potrzeby produkcyjne poszczególnych elektrowni z dynamicznie zmieniających się źródeł. Wybrany w rozprawie przykład dotyczy bloku wielkiej mocy (460 MW), zużywającego duże ilości węgla (w granicach miliona ton rocznie). Skala zapotrzebowania na paliwo, skutkująca koniecznością jego pozyskiwania z wielu źródeł przekłada się na trudności z utrzymaniem parametrów w pełni odpowiadających danym projektowym.

Problem odpowiedniej jakości węgla energetycznego oraz jej zmienności stanowi jedno z istotnych wyzwań dla energetyki. Obiekt rozważań wybrany został przez Doktorantkę, moim zdaniem, trafnie - zarówno z uwagi na wielkość jak i stosowaną w nim technologię spalania.

Jest on reprezentantem klasy instalacji węglowych związanych z technologią spalania fluidalnego. Technologia fluidalna rozwijana była w Polsce znacznie bardziej intensywnie niż w innych krajach. Jedną z jej często wskazywanych cech jest relatywnie niska wrażliwość na zmienność jakości paliwa. Identyfikacja i analiza problemów wynikających z przyjętego przez Doktorantkę zadania badawczego jest interesująca z poznawczego, ale również praktycznego punktu widzenia. Stanowi potencjalne źródło identyfikacji działań mogących służyć ograniczeniu negatywnych skutków wynikających ze zmienności jakości paliwa w pracy bloków węglowych, zapewne nie tylko tych korzystających z fluidalnej technologii spalania.

Politechnika Śląska, a w szczególności Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki tej Uczelni to czołowy w naszym kraju ośrodek akademicki, mający długoletnie tradycje współpracy z dużymi elektrowniami. Autorka ocenianej rozprawy, mgr inż. Agata Wirth - Ljungquist wykorzystała możliwość skorzystania z kompetencji tego ośrodka ulokowanych w Katedrze Maszyn i Urządzeń Energetycznych (do niedawna Instytutu Maszyn i Urządzeń Energetycznych) do podjęcia zadania badawczego, mającego istotny aspekt wdrożeniowy. Kompetencje te łączą się z tymi, które wynikają z zatrudnienia Doktorantki w energetyce zawodowej. Temat rozprawy uważam za bardzo ważny oraz interesujący, atrakcyjny z punktu widzenia prac o charakterze badawczym, w tym wdrożeniowym.

3. Charakterystyka i ocena rozprawy

Oceniana rozprawa, jest dość obszerna, podzielona została na 17 ponumerowanych rozdziałów, w tym trzy o charakterze wprowadzenia stanowią „Wstęp”, „Cel i zakres pracy” oraz „Kotły fluidalne w energetyce”. Kolejne trzy rozdziały „Nadkrytyczny blok energetyczny w kotłem fluidalnym”, „Składowisko węgla” oraz „Układ podawania paliwa i odbioru popiołu” zawierają opis obiektu rozważań. Pozostałe dotyczą bardziej szczegółowych rozważań nad kolejnymi podejmowanymi aspektami podjętego zadania badawczego. Zasadniczy tekst rozprawy liczy 174 strony. Dalszą część stanowią załączniki, uzupełniające całość do 212 stron. Przyjęta kompozycja pracy jest logiczna, kolejne prezentowane zagadnienia dotyczące wpływu jakości węgla na przebieg fluidalnego procesu spalania, podatności transportowej węgla, analizy kierunków dostaw paliwa, nawęglania, zmienności parametrów paliwa, a następnie ubytków mocy i problemów eksploatacyjnych stanowią naturalny ciąg analiz prowadzący do wniosków i podsumowania.

Bibliografia cytowana w rozprawie zawiera relatywnie niewielką liczbę 32 pozycji: w postaci monografii, związanych tematycznie artykułów w czasopismach, dokumentacji bloku oraz odwołań do stron internetowych (w liczbie 10). Doktorantka nie znalazła się na liście autorów pozycji literatury cytowanych w rozprawie. Stanowi to dla mnie pewne zaskoczenie. Pani Agata Wirth jest współautorką publikacji w czasopiśmie Rynek Energii, zbieżnej tematycznie z problematyką poruszaną w rozprawie, a zatytułowanej: „Analiza wpływu jakości węgla na efektywność pracy kotła fluidalnego”.

Zakres problemów eksploatacyjnych wynikających z braku dostosowania paliwa do parametrów, na które rozważana jednostka została zaprojektowana Autorka wskazała w rozdziale drugim (Cel i zakres pracy). Są to w szczególności:

- składowanie i podawanie paliwa do kotła o zmiennej jakości, wpływające na koszty zmienne,
- obniżenie dyspozycyjności układów podawania paliwa oraz odbioru popiołu,

- erozja ekranów parownika części ciśnieniowej, w tym w wyniku trudności z pracą paleniska w dedykowanym oknie temperaturowym,
- trudności związane ze stabilną pracą bloku w wyniku odchodzenia od zakładanej przy projektowaniu jakości paliwa.

W dalszej części rozdziału przedstawiona została w czytelny sposób, w postaci schematu blokowego przyjęta przez Doktorantkę metodyka prowadzenia zrealizowanych w ramach rozprawy badań. Jako poprzedzający zakończenie etap działań wskazane zostało „*Określenie możliwości przygotowania odpowiednich mieszanek paliw na podstawie ich parametrów fizyko-chemicznych*”. Jako finalny efekt wskazane zostały wnioski i propozycje poprawy pracy bloku.

W rozdziale trzecim Doktorantka przedstawiła stan rozwoju i wykorzystania kotłów fluidalnych w energetyce, ze wskazaniem zróżnicowania ich cech konstrukcyjnych oraz listy aplikacji krajowych. Rozdział czwarty dotyczy opisu rozważanego bloku energetycznego, ze szczególnym uwzględnieniem kotła CFB1300 oraz danych projektowych pola paliwowego. W krótkim, trzystronicowym rozdziale piątym zamieszczony został opis składowiska węgla, a w rozdziale szóstym - układu podawania paliwa oraz odprowadzania popiołu. Rozdział siódmy dotyczy roli węgla kamiennego w procesie spalania fluidalnego, z uwzględnieniem wpływu jakości tego paliwa na eksploatację, w tym istotnych wskaźników charakteryzujących tendencje do spiekania węgla oraz zanieczyszczania powierzchni ogrzewalnych. W końcowej części tego rozdziału analizie poddany został wpływ składu chemicznego węgla na ścieralność popiołu.

W rozdziale ósmym Autorka rozprawy opisała kompleks zagadnień dotyczących podatności transportowej węgla, istotnego parametru, wiążącego się w głównej mierze ze składem granulometrycznym i zawartością wilgoci, dodatkowo także składem chemicznym. W tym interesującym fragmencie pracy zabrakło, jak mi się wydaje, klarownej informacji we wstępnej części rozdziału, że wysoki wskaźnik podatności transportowej oznacza w istocie niską podatność transportową. Bez takiego poprzedzającego komentarza zdanie Autorki o treści: „*Niska podatność transportowa powodowała przestoje instalacji w celu ich oczyszczenia, w celu ich oczyszczenia, a także liczne awarie*” oraz następujące bezpośrednio po nim zdanie: „*Przeprowadzone badania wykazały największy wzrost wskaźnika podatności transportowej dla granulacji poniżej 0,5 mm, natomiast dla frakcji powyżej 3 mm jest on bliski zeru*” mogą się mniej zorientowanemu czytelnikowi wydawać nie do końca spójne. Komentarz wyjaśniający ze strony Doktorantki znalazł się co prawda kilka akapitów dalej, w zdaniu: „*W tym przypadku wzrost wilgoci znacząco wpływa na pogorszenie (obniżenie) podatności transportowej, a tym samym wzrost wskaźnika*”.

Rozdział dziewiąty zawiera informacje o źródłach dostaw węgla dla rozważanego bloku energetycznego w latach 2017-2020. Ten okres wybrano również do analiz prowadzonych w dalszej części rozprawy, dotyczących związku parametrów węgla otrzymywanego od poszczególnych dostawców z dotrzymywaniem wymogów jakościowych węgla (rozdział 11) oraz popiołu (rozdział 12). W krótkim rozdziale 10 przedstawione zostały procedury postępowania związane z nawęglaniem, w tym raportowaniem dotyczącym dostaw oraz analiz paliwa. W rozdziale 13 analizie poddany został związek jakości węgla kamiennego ze składem chemicznym popiołu, pod kątem skłonności do żużlowania oraz skłonności do tworzenia osadów, a tym samym do zanieczyszczania komory paleniskowej. Autorka wskazała na niską skłonność do żużlowania charakteryzującą węgiel od wszystkich dostawców oraz wysoką skłonność do zanieczyszczania komory paleniskowej dla wszystkich dostawców - mierzoną wskaźnikiem do zanieczyszczania powierzchni grzewczych FU. W

przypadku wskaźnika AK (indeks alkaliczności) duże i bardzo duże skłonności do zanieczyszczania stwierdzone zostały dla większości dostawców (8 spośród 14).

Analiza procesu nawęglania dla wybranych miesięcy z lat 2017 - 2020 była przedmiotem rozważań w rozdziale 14. Autorka zwróciła uwagę na odbiegającą od danych projektowych granulację węgla otrzymywanego od większości dostawców. Analizie poddane zostały wyniki 863 pomiarów. Nieodpowiednia granulacja została stwierdzona w większości spośród nich, w szczególności w odniesieniu do limitowanej zawartości frakcji najdrobniejszej (średnica poniżej 0,4 mm). W konkluzji podkreślony został istotny wpływ nadmiernego rozdrobnienia na niską podatność transportową paliwa.

Rodzaje oraz przyczyny ubytków mocy są przedmiotem analizy przedstawionej w rozdziale piętnastym rozprawy. W oparciu o raporty dobowe dotyczące ubytków mocy z lat 2017-2020 Doktorantka dokonała selekcji ubytków energii możliwej do wyprodukowania, ze wskazaniem odnotowanych przyczyn. Blisko 120 tys. MWh powiązanych było z niską podatnością transportową, kolejnych ponad 200 tys. MWh powiązanych było z awariami oraz niedrożnością układów nawęglania i odpopielania. Analiza objęła olbrzymi materiał źródłowy. W przekonujący sposób wykazane zostało powiązanie pomiędzy zestawieniem przyczyn i skutków ubytków energii. Zabrakło, moim zdaniem, obrazowego wskazania skali powstałych strat (strat możliwej do wyprowadzenia energii w stosunku do całości możliwości produkcyjnych bloku).

W rozdziale 16, bogato zilustrowanym materiałem fotograficznym, przedstawione zostały usterki, awarie, problemy eksploatacyjne oraz sposoby rozwiązania tych trudności. W części 16.2 rozdziału przedstawiono działania naprawcze mające na celu ograniczenie skutków erozji najbardziej narażonych elementów. W części 16.3 zawarto propozycje rozwiązań dotyczących ograniczenia problemów eksploatacyjnych będących skutkami niewłaściwej granulacji węgla prowadzącej do uszkodzeń w obszarze podawania paliwa i odprowadzenia żużla. Pula wskazanych w pracy rozwiązań naprawczych w świetle treści rozdziałów poprzednich jest wynikiem systematycznie przeprowadzonej, racjonalnej analizy mechanizmów powodujących uszkodzenia i zasługuje na w pełni pozytywną ocenę. Sposób prezentacji niektórych modyfikacji mógłby być przedstawiony nieco bardziej klarownie. O tym jest mowa w następnym rozdziale niniejszej opinii.

Przedstawione w ostatnim rozdziale podsumowanie stanowi dobrze przygotowaną syntezę jej treści. Doktorantka dokonała podsumowującej oceny jakości węgla od największych dostawców. W wyniku kompleksu przeprowadzonych badań wskazana została pula rekomendacji dla głównych kierunków dostaw węgla. Przedstawione wnioski uważam za poprawne i trafne.

Strona redakcyjna rozprawy została oceniona w kolejnym rozdziale niniejszej opinii.

3. Uwagi krytyczne, uwagi redakcyjne

Liczba zauważonych przeze mnie w trakcie lektury usterek redakcyjnych w pracy jest umiarkowana. Sam tekst napisany jest poprawnym, czytelnym językiem. Zdarzają się drobne literówki, które zostały przeze mnie zaznaczone w ocenianym egzemplarzu pracy przekazanym Doktorantce do wykorzystania przy korekcie przed dalszymi publikacjami. W kilku miejscach pojawiają się pomyłki, czasami nie w pełni jasny tekst. Na niektórych rysunkach przydatne by były dodatkowe komentarze, lub oznaczenia elementów uzupełnione legendą w podpisie. Dotyczy to w głównej mierze rozdziału 6 (na przykład rys. 6.2, 6.3 czy

6.4) oraz rozdziału 16.3 (na przykład rys. 16.25, 16.26, 16.27 i 16.28) – to sprawa wspomnianych wcześniej modyfikacji.

Rysunek 15.1 stanowi próbę kompleksowego zestawienia informacji o związku niewłaściwej granulacji węgla ze zdarzeniami awaryjnymi. Moim zdaniem jego struktura jest nadmiernie zagęszczona w kierunku osi poziomej. Rozciągnięcie rysunku na kilka części, na przykład na okresy roczne zapewne ułatwiłoby jego analizę.

Przykładowe usterki redakcyjne wymieniam poniżej:

str.43, niejasne jest, moim zdaniem, pierwsze zdanie z rozdziału 7.1: „*Istotną rolę odgrywa udział pierwiastkowy oraz materia mineralna, która jako niepalna zawarta jest w popiele*”;

str.47, niejasne jest, moim zdaniem, trudne do powiązania z kontekstem zdanie z trzeciego akapitu: „*Najistotniejsza i najbardziej pożądana jest substancja organiczna, jest ona źródłem surowca do procesów chemicznych i „produkcji” energii, wilgoć natomiast i substancja mineralna to balast, który nie ma wykorzystania w tym procesie*”;

str.50, korekty wymaga ostatnie zdanie: „*Diagram przedstawiony na rys. 7.2. obrazuje zależność prędkości fluidyzacji u^* i rozmiar ziaren d_z^{**}* ”;

strona 110, koniec oraz początek strony 111: celowa byłaby, moim zdaniem, zmiana kolejności ostatniego akapitu ze strony 110 i pierwszego akapitu ze strony 111. Tekst byłby bardziej czytelny;

str.139, mylnie podany numer rysunku (19.3 zamiast 16.22);

str.142, mylnie podany numer rysunku (19.6 zamiast 16.25);

str. 147, druga linia pierwszego akapitu. „Kocioł cyrkulacyjnym złożem fluidalnym”, zabrakło „z” po słowie „Kocioł”.

Pytania do Doktorantki, które nasunęły się po lekturze rozprawy:

Analizując kierunki dostaw paliwa Doktorantka przedstawiła zestawienia tabelaryczne dla poszczególnych lat, ze wskazaniem dostawców z poszczególnych lat (2017, 2018, 2019 i 2020) w tabelach i na wykresach. W tabeli 9.5 dokonano zestawienia zbiorczego dostawców z lat 2017-2020. Te dane wskazują na dużą dynamikę zmian kierunków dostaw węgla. Czy był to wynik prowadzonej polityki mającej na celu dostosowanie jakości kupowanego paliwa do potrzeb bloku? Czy może były to tylko rezultaty rozstrzygnięć finansowych przetargów na dostawę paliwa? Jakie narzędzia dotyczące dostosowania paliwa do założeń projektowych bloku możliwe były do wykorzystania, jakie stosowano?

Analizując rys. 15.1 wyraźnie widoczne jest, że mamy do czynienia z dużą niezgodnością składu frakcyjnego paliwa dostarczanego do bloku 10 Elektrowni Łagisza w stosunku do danych projektowych. Interesująca jest opinia co do przyczyny tej niezgodności. Z tabeli 11.5 wynika, że węgiel od największych dostawców z analizowanego okresu miał znacząco przekroczony w stosunku do oczekiwanego udział frakcji najdrobniejszej (do 0,4 mm). Czy, zdaniem Doktorantki, na etapie formułowania założeń projektu autorom zabrakło wiedzy jakie paliwo może być dla bloku dostępne, czy zaszła istotna zmiana w możliwościach dostawców, na przykład zmiana warunków technologicznych czy geologicznych w kopalniach? Czy był to wyłącznie wynik rekomendacji (oczekiwań) dostawcy kotła?

W pracy wykorzystano dane dotyczące dostaw paliwa na potrzeby Bloku 10 w Elektrowni Łagisza dla lat 2017-2020, z pewnym uzupełnieniem o dane z początku roku 2021. Ciekawość budzi jakie zmiany parametrów paliwa mogły nastąpić w okresie po wstrzymaniu dostaw na rynek krajowy węgla z rynku rosyjskiego i pojawieniu się dużych ilości węgla z

importu. Czy na potrzeby bloku dostarczane było paliwo importowane? Jeśli tak, czy miały miejsce problemy dotyczące jego jakości? Jeśli tak, to czy te problemy były istotnie różne od występujących wcześniej?

4. Ostateczna ocena pracy

Do najważniejszych osiągnięć własnych Doktorantki w przedstawionej do recenzji pracy należy, według mojej oceny, zaliczyć:

- zebranie i poddanie wieloaspektowej analizie olbrzymiego materiału informacyjnego dotyczącego wpływu jakości paliwa na awaryjność w obrębie wyspy kotłowej bloku parowego wielkiej mocy, wyposażonego w kocioł z cyrkulacyjnym paleniskiem fluidalnym;
- wytypowanie i analiza puli czynników, które są przyczyną spadku dyspozycyjności takiego bloku;
- dobór, analiza i weryfikacja rozwiązań umożliwiających ograniczenie wskazanych ryzyk eksploatacyjnych, w tym poszerzenie puli badań paliwa mających na celu identyfikację potencjalnych źródeł zagrożenia.

W podsumowaniu opinii informuję, że przedstawione uwagi krytyczne są nieliczne i nie podważają pozytywnej oceny rozprawy. Doktorantka zrealizowała przedstawiony w rozdziale 2 rozprawy cel pracy. Uważam, że należy podkreślić kompleksowy charakter, wysoki poziom, pracowitość oraz charakter przeprowadzonych badań zbieżny z celami programu Doktorat Wdrożeniowy.

Autorka rozprawy, mgr inż. Agata Wirth-Ljungquist, wykazała się wiedzą praktyczną i teoretyczną w dyscyplinie Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka, niezbędną do przygotowania rozprawy. Wynika to z treści ocenianej pracy doktorskiej.

Na podstawie przedstawionej do recenzji rozprawy stwierdzam, że jej Autorka, mgr inż. Agata Wirth-Ljungquist wykazała umiejętność formułowania zadania naukowego, opanowanie podstaw teoretycznych badanego problemu, znajomość stanu osiągnięć w obszarach wiedzy związanych z pracą oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia badań.

Będąc przedmiotem oceny rozprawa doktorska mgr inż. Agaty Wirth-Ljungquist **pt.: „Analiza wpływu jednorodności fizyko-chemicznej mieszanek paliwowych spalanych w instalacji CFB1300 na jej awaryjność”** stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, spełnia wymogi określone w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki oraz w Ustawie Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce. W oparciu o powyższe stawiam wniosek o skierowanie rozprawy doktorskiej do publicznej obrony.

Podpisał Krzysztof Badyda