

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Adama Tatarczuka

pt.: „Wpływ integracji termicznej na energochłonność procesu usuwania CO₂ ze spalin kotłowych”

1. Charakterystyka ogólna rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska mgr inż. Adama Tatarczuka pt.: „Wpływ integracji termicznej na energochłonność procesu usuwania CO₂ ze spalin kotłowych” składa się z 9 rozdziałów plus załączniki, w sumie ponad 200 stron tekstu, wzorów, tabel i rysunków. Praca zawiera wykaz rysunków, tabel oraz spis oznaczeń i skrótów użytych w pracy. Rozprawa jest napisana od strony językowej i stylistycznej dobrze i interesująco, z niewielką ilością błędów literowych. Wszystkie rysunki, schematy i tabele są bardzo czytelne i prawidłowo opisane. Wykaz literatury zawiera 201 pozycji, z czego w około 40tu z nich doktorant jest głównym autorem lub współautorem. Można zatem stwierdzić, że średnio w 20u %ach doktorant odwołuje się do wcześniej opublikowanych swoich badań, z których najstarsze mają już 10 lat. Niestety brak jest wśród nich publikacji w renomowanych czasopismach, co wykluczyło przygotowanie rozprawy doktorskiej w oparciu o cykl publikacji. Niemniej jednak świadczy to o Jego dużej wiedzy w tym temacie oraz o dużej dojrzałości badawczej, a rozprawa doktorska jest tego potwierdzeniem.

Tematyka badawcza przedstawiona w pracy doktorskiej jest ważna i bardzo aktualna i jej wybór nie wymaga specjalnego uzasadnienia.

Rozprawa doktorska będąca przedmiotem niniejszej recenzji jest rezultatem prac prowadzonych przez Doktoranta w grupie badawczej IChPW w ramach dużych projektów badawczych, m.in. Strategicznego Programu Badawczego współfinansowanego przez NCBiR „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii: Opracowanie technologii dla wysokosprawnych „zero-emisyjnych” bloków węglowych zintegrowanych z wychwytem CO₂ ze spalin” oraz w ramach programu UE w zakresie badań naukowych i innowacji – Horizon 2020, projekt „CO₂ methanation system for electricity storage through SNG production (CO₂-SNG)”.

Doktorant rozpoczyna rozprawę od *Wprowadzenia*, w którym krótko naświetla sytuację klimatyczną oraz konieczność i sposoby zmian w sektorze energetycznym zmierzające do redukcji emisji gazów cieplarnianych, w tym głównie dwutlenku węgla. Tym samym uzasadniając ważność podjętej tematyki badawczej. Już tutaj, metoda absorpcji chemicznej jest wymieniana jako najbardziej obiecująca i dojrzała technologicznie. Doktorant będąc ważnym elementem zespołu badawczego IChPW, analizując wybór i dobór odpowiedniej metody usuwania CO₂ ze spalin kotłowych dla warunków krajowych, wytypował do dalszych badań metodę absorpcji chemicznej w roztworach amin jako najbardziej odpowiednią i technologicznie dojrzałą, jednak na stan obecny dość energochłonną. W związku z tym, jako główny cel pracy doktorskiej wybrano wykazanie jak i czy integracja termicznej desorbera może poprawić efektywności energetycznej procesu absorpcji aminowej usuwania CO₂ ze spalin kotłowych. Dokładnie cel i zakres pracy został przedstawiony w *rozdziale II*. Wymieniono tu szereg celów szczegółowych oraz przedstawiono sposób ich realizacji, który głównie opiera się na analizie danych eksperymentalnych uzyskanych na instalacji pilotowej do badania absorpcji chemicznej CO₂ ze spalin kotłowych, opracowanej w ramach Strategicznego Programu Badawczego, o którym była mowa powyżej. Pozyskane i obrobione dane pomiarowe były podstawą przy tworzeniu modeli w symulatorze ProTreat. Doktorant również zaproponował porównawczą analizę ekonomiczną proponowanego rozwiązania instalacji z integracją termiczną desorbera.

Rozdział III jest rozdziałem przeglądowym pokazującym aktualny stan wiedzy na temat usuwania CO₂ ze spalin kotłowych z zastosowaniem roztworów amin. Dokonano tu m.in. przeglądu konfiguracji instalacji wychwytu, w tym konfiguracji procesu absorpcji i desorpcji. W tym drugim przedstawiono ideę integracji termicznej desorbera, która to jest dalej szczegółowo analizowana w różnych konfiguracji instalacji wychwytu.

W *rozdziale IV* omówiono mobilne stanowisko eksperymentalne instalacji pilotowej procesu absorpcji aminowej usuwania CO₂ ze spalin kotłowych. Instalacja pracowała w dwóch elektrowniach Grupy TAURON, zbierając dane pomiarowe dla różnych stanów pracy i konfiguracji instalacji wychwytu. Instalacja ta umożliwia pracę w 5 wariantach konfiguracji procesowych, w tym dla każdego z nich bez lub z integracją termiczną. W rozdziale tym opisano dokładnie budowę, działanie oraz układ pomiarowy przedmiotowej instalacji pilotowej.

Rozdział V zawiera opis metodologii prowadzonych badań eksperymentalnych, sposób definiowania, określania oraz wyznaczania poszczególnych wielkości charakterystycznych dla omawianych procesów. Do weryfikacji otrzymanych wielkości na podstawie danych pomiarowych oraz w celu otrzymania pełniejszej informacji i wiedzy na temat analizowanego procesu stworzono modele w symulatorze ProTreat. Wskazano na problemy ze zgodnością obliczeń symulacyjnych i danych eksperymentalnych.

Obszerne wyniki badań dla testów pilotowych dla dwóch rodzajów amin zaprezentowano w *rozdziale VI* dysertacji. Dokładnie opisano i nazwano kampanie pomiarowe będące przedmiotem analiz. Wyniki tych badań zostały uzupełnione w *rozdziale VII* obliczeniami modelowymi w symulatorze ProTreat. Oba te rozdziały stanowią kluczową część rozprawy doktorskiej, ukazując ogromny wkład pracy Doktoranta w pozyskaniu danych, ich opracowaniu, budowę modeli obliczeniowych oraz opracowaniu wyników.

Rozdział VII pracy zawiera analizę ekonomiczną proponowanej integracji termicznej, do której zastosowano znane, sprawdzone i powszechnie stosowane metody. Dla założonych danych wejściowych do analizy ekonomicznej określono nakłady inwestycyjne i zwrot inwestycji, który wyniósł tylko niecałe 4 lata, co wydaje się być dość krótkim okresem.

Doktorant rozprawę doktorską kończy bardzo rzetelnym podsumowaniem oraz wnioskami w *rozdziale IX*.

2. Ocena rozprawy doktorskiej

Recenzowana rozprawa doktorska stanowi ogromne źródło wiedzy na temat technologii wychwytu dwutlenku węgla metodą absorpcji chemicznej z wykorzystaniem wodnych roztworów amin. Zastosowany warsztat badawczy, składający się ze stanowiska badawczego, instalacji pilotowej o wydajności spalin $\sim 200\text{m}^3/\text{h}$, oraz symulatora ProTreat, pozwolił na otrzymanie szeregu wartościowych danych, które mogą być punktem odniesienia lub stanowić porównanie dla innych badaczy zajmujących się podobną tematyką. Równie cenne są wnioski i spostrzeżenia autora na temat sposobu prowadzenia tego typu badań oraz interpretacji rezultatów.

Doktorant w swojej pracy potwierdził zalety aminowego usuwania CO_2 ze spalin kotłowych, takie jak wysoka sprawność procesu i duża czystość uzyskanego gazu. Zwrócił uwagę na wciąż dużą energochłonność tego procesu. Jedną z metod jej zmniejszenia jest integracja termiczna wykorzystująca wymienniki (rekuperatory) ciepła zabudowane w desorberze. W podsumowaniu pracy Doktorant bardzo precyzyjnie w kilkunastu punktach przedstawił najważniejsze wnioski ze zrealizowanych badań. Dodatkowo zaproponował kierunki i obszary dalszych badań, gdzie wykorzystanie integracji termicznej desorbera należy wziąć szczególnie pod rozwagę.

Wnioski przedstawione w pracy są trafne i potwierdzone zarówno wynikami pomiarów na instalacji pilotowej jak i symulacjami przy pomocy programu ProTreat. Obniżenie energochłonności procesu wychwytu CO_2 ze spalin metodą absorpcji chemicznej z integracją termiczną desorbera o kilka czy nawet kilkanaście procent, w zależności od użytego absorbentu czy konfiguracji instalacji, nie stanowi oczywiście przełomu w technologiach sekwestracji dwutlenku węgla, ale może częściowo przyczynić się do przekroczenia granicy opłacalności dyskutowanej w pracy metody wychwytu.

3. Uwagi szczegółowe

Ilość informacji i danych zawartych w dysertacji jest bardziej niż wystarczająca, jednak dotarcie do nich jest czasochłonne. Dla potwierdzenia tezy, że implementacja integracji termicznej desorbera zmniejsza energochłonność procesu wychwytu CO₂ wystarczyłoby znacznie mniej przykładów. Dużo bardziej przejrzyste dla czytającego byłoby, gdyby np. na wybranych schematach przedstawiających wybrane konfiguracje instalacji, oprócz (lub zamiast) symboli w punktach charakterystycznych były wielkości wybranych parametrów, np. temperatury, ciśnienia czy strumienia. Można by wtedy w łatwy sposób prześledzić cały proces i porównać z innymi przypadkami.

Niemniej jednak, podczas analizowania przedstawionych rezultatów badań nasuwa się kilka uwag i komentarzy, takich jak:

- Dlaczego w instalacji pilotowej nie wykonano izolacji termicznej desorbera? Można to wywnioskować z przedstawionej w pracy analizy strat ciepła na skutek zmian temperatury otoczenia.
- Co zdecydowało o wyborze symulatora ProTreat? Jest to program głównie do modelowania oczyszczania gazów. Czy obliczenia można prowadzić w trybie design i off-design? Ma to ogromne znaczenie przy walidacji modelu dla danych eksperymentalnych oraz przy obliczeniach dla zmiennych warunków pracy, co w rzeczywistej instalacji jest normą.
- Zabrakło w dysertacji precyzyjnego opisu tego programu, od strony budowy modelu. Jakie dane wprowadzono do modelu i co było powodem rozbieżności w wartości ciepła właściwego roztworu nasyconego pomiędzy modelem a pomiarami? W pracy zwrócono uwagę, że była to jakaś niedoskonałość od strony programu. Może takich niedoskonałości było więcej?
- Jak może zmieniać się energochłonność procesu przy zmianie strumienia spalin, np. o połowę? Czy badano to na stanowisku pilotowym lub analizowano w symulatorze ProTreat?
- Jak modelowano w tym programie wymienniki ciepła? Szczególnie dla struktury z HIS. Czy rozmiary wymienników były stałe?
- Czy próbowano zastosować inne programy do modelowania omawianej technologii, np. Aspen Plus?
- W pracy wykazano, że im bardziej efektywny absorbent tym korzyści z zastosowanej metody integracji termicznej są mniejsze. Jakie własności absorbentu mogą decydować o braku opłacalności modyfikacji struktury technologicznej instalacji procesu absorpcji aminowej usuwania CO₂?

- Na jakim poziomie powinna być energochłonność omawianych procesów aby możliwa była budowa instalacji wychwytu dla dużych bloków węglowych i czy przy tych przepływach spalin wystarczy jeden zestaw absorber-desorber, czy trzeba budować układy równoległe?
- Czy zastanawiano się jakie źródła ciepła można potencjalnie wykorzystać do desorpcji CO₂ z roztworu? Można by wtedy „pokolorować” otrzymywany dwutlenek węgla ze spalin kotłowych, tak jak to zrobiono z wodorem. Czy w jednostkach wytwórczych dużych mocy w grę wchodzi tylko para wodna pobierana z turbiny?

4. Wnioski końcowe

Mgr inż. Adam Tatarczuk w swojej rozprawie doktorskiej pt.: „Wpływ integracji termicznej na energochłonność procesu usuwania CO₂ ze spalin kotłowych” w sposób niezwykle obszerny i rzetelny przedstawił wyniki swoich badań realizowanych od kilku lat w grupie badawczej IChPW. Tematyka przedstawiona w pracy jest aktualna i ważna, stanowi jeden z kilku elementów poprawy efektywności energetycznej metod absorpcyjnych wychwytu dwutlenku węgla ze spalin. Założony cel pracy został w pełni zrealizowany.

Niniejszym z pełnym przekonaniem stwierdzam, że przedstawiona praca spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim w Ustawie o Stopniach i Tytułach Naukowych i wnioskuję do Rady Naukowej Instytutu Inżynierii Chemicznej PAN o dopuszczenie jej do publicznej obrony.