

Kraków, 03.06. 2020

Prof. dr hab. inż. Wojciech Nowak
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica
Wydział Energetyki i Paliw
Al. A. Mickiewicza 30
30-059 Kraków
wnowak@agh.edu.pl

Recenzja

pracy doktorskiej mgr inż. Andrzeja Wilka

„Nowe wieloskładnikowe absorbenty aminowe wychwyty CO₂ – dobór i charakterystyka”

Wstęp

Recenzje pracy doktorskiej opracowano na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Chemiczna Politechniki Śląskiej z 15.04.2020 pismo I.dz. RDICH/SD/1565/2020 z 5.05.2020.

Zasadność tematyki

Z uwagi na europejskie zobowiązania do przechodzenia na technologie niskoemisyjne, rozwój technologii czystego węgla CCT musi następować równolegle z rozwojem technologii podnoszenia wydajności i ograniczania emisji CO₂ (min. poprzez jego wyłapywanie i składowanie). Unia Europejska dąży do zredukowania emisji CO₂ o 50% do 2050 roku. Osiągnięcie tego celu nie jest możliwe bez wychwytywania i bezpiecznego dla środowiska

składowania CO₂ wytwarzanego w elektrowniach i elektrociepłowniach. Zagadnienia te są przedmiotem dyrektywy CCS, która zakłada między innymi: konieczność uzyskania specjalnych zezwoleń na badania potencjalnych miejsc składowania wychwyconego dwutlenku węgla oraz zezwoleń na jego składowanie, określa kryteria wyboru miejsca składowania oraz procedury akceptacji strumienia dwutlenku węgla pod względem jego czystości.

Zainteresowanie kompleksowymi technologiami CCS wynika niewątpliwie z tego, że łączne zastosowanie wszystkich środków mieszczących się w ramach technologii CCT tj. (wzrost sprawności wytwarzania, współspalanie biomasy i inne) nie pozwala na uzyskanie takich rezultatów jak jest to możliwe w przypadku wychwytywania CO₂. Niewątpliwie dla wprowadzenia metod CCS niezmiernie istotne jest także zwiększenie sprawności wytwarzania energii. Sprzyja temu rozwój nowych, zaawansowanych technologii produkcji energii, który powoduje, że wprowadzanie kosztownych i energochłonnych technologii wychwytywania i magazynowania CO₂ staje się coraz bardziej realne. W technologiach CCS z góry zakłada się, iż po separacji i odzysku CO₂ z elektrowni węglowych może on być jedynie składowany.

Metody wychwytywania CO₂ dzieli się na cztery główne grupy:

- separacja CO₂ po procesie spalania (post-combustion capture),
- separacja CO₂ przed procesem spalania (pre-combustion capture),
- spalanie w atmosferze tlenowej (oxy-fuel combustion),
- spalanie w pętli chemicznej (CLC).

Absorpcja jest najczęściej wykorzystywaną metodą separacji CO₂ ze strumieni spalin kotłowych, ze względu na dużą efektywność procesu oraz uzyskiwanie produktu o wysokim stopniu czystości. Do zalet tej technologii zalicza się między innymi fakt, iż łatwiej jest tę technologię dołączyć do istniejących instalacji bez potrzeby istotnej zmiany konfiguracji technologii spalania stosowanej w danej elektrowni. Może być także swobodnie dołączona do tych źródeł emisji CO₂, które pochodzą z przemysłu – np. produkcja cementu, żelaza, stali. Technologia ta jest najodpowiedniejsza ze wszystkich dostępnych do stosowania w przypadkach pozyskiwania wodoru z gazu ziemnego. Absorpcja przy użyciu amin jest powszechnie stosowana w przypadku separacji CO₂ z gazu ziemnego. Tak pozyskany ditlenek węgla może stosowany np. w przemyśle spożywczym.

Obserwując badania nad tą technologią prowadzone w Polsce, na uwagę zasługuje Strategiczny Program Badawczy współfinansowany w latach 2010-2015 przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju – Zaawansowane technologie pozyskiwania energii: Zadanie 1 - Opracowanie technologii dla wysokosprawnych „zero-emisyjnych” bloków węglowych zintegrowanych z wychwytem CO₂ ze spalin. W ramach tego zadania realizowano między innymi prace w obszarze usuwania CO₂ metodą absorpcji chemicznej w roztworach amin. Z przeprowadzonych badań eksperymentalnych stwierdzono, iż technologie absorpcji chemicznej wykazują największą dojrzałość technologiczną, dzięki czemu przodują w komercyjnych zastosowaniach w sektorze energetycznym. Poszczególne etapy projektu obejmowały badania absorbentów (m.in. właściwości fizykochemiczne), określone zostały charakterystyki sorpcyjne (badania pojemności i kinetyki sorpcji) oraz właściwości korozyjne. Celem powyższych badań był odpowiedni dobór składników ciekłych absorbentów. Pod uwagę brano niskie zapotrzebowanie cieplne podczas regeneracji, odporność na regenerację oraz korzystną kinetykę absorpcji. Doświadczenia prowadzono z zastosowaniem kilkudziesięciu roztworów amin: pierwszo-, drugo-, trzeciorzędowych, amin z zawadą steryczną, poliamin oraz kilku cieczy jonowych. Eksperymenty wykonano na stanowisku laboratoryjnym do badań równowag i kinetyk absorpcji CO₂ w mieszaninach amin. Opracowane metodyki testowano na referencyjnych roztworach. Uzyskane wyniki były zgodnie z dostępnymi w literaturze światowej, co potwierdza prawidłowość przygotowanych procedur, jak również szybkość absorpcji. W ramach prac badawczych opracowano także proces oznaczania zawartości ditlenku węgla w roztworach amin przy użyciu metody densymetrycznej na podstawie pomiarów gęstości roztworu i różnic w gęstości badanych roztworów wynikających ze stopnia zaabsorbowania CO₂. Dodatkowo opisano również procedurę oznaczania zawartości wybranych amin w roztworach wodnych za pomocą techniki wysokosprawnej chromatografii jonowej. Kolejny etap badań w opisywanym projekcie wiązał się z wykonaniem testów absorpcji i desorpcji CO₂ z użyciem roztworów, które wytypowano we wcześniejszych badaniach. W tym celu zostało wykorzystana instalacja laboratoryjna do badań procesu usuwania CO₂ metodą absorpcji aminowej. Na stanowisku w skali 5m³/godz. spalin wykonano testy wychwytu CO₂ z syntetycznych gazów technicznych, po czym wykonano kwalifikację roztworów amin do kolejnych badań w skali półtechnicznej i pilotowej. Kolejno, zmodyfikowaniu uległa instalacja usuwania CO₂ metodą absorpcji aminowej w skali półtechnicznej, oddana do użytku w roku 2012 w Centrum Czystych Technologii w Zabrze. Instalacja ma możliwość pracy na syntetycznych oraz rzeczywistych (procesowych) gazach, które pochodzą z innych instalacji mieszczących się w Centrum.

Modyfikacja polegała na dodaniu opcji rozdziału strumieni aminy średnio zregenerowanej i głęboko zregenerowanej, co pozwala na poprawę procesu absorpcji CO₂ w kolumnie absorpcyjnej. Następnie, na podstawie badań w Projekcie Strategicznym, w roku 2013 uruchomiono instalację pilotową, co stanowiło jeden z przełomowych momentów realizacji Zadania Badawczego nr 1. Dzięki podjętym działaniom możliwym było przeprowadzenie zaawansowanych badań procesu absorpcji chemicznej CO₂ w aminowych absorbentach. Instalację wybudowano dzięki wsparciu partnerów przemysłowych Projektu Strategicznego: TAURON Polska Energia S.A. oraz TAURON Wytwarzanie S.A. Jest to pierwsza instalacja w Polsce dedykowana badaniom procesu usuwania CO₂ z rzeczywistych spalin pochodzących z bloku węglowego, która wykorzystuje absorpcję chemiczną. Instalacja powstała jako system przewoźnych kontenerów: kontener nadzoru, technologiczny i magazynowy. Takie rozwiązanie zapewnia mobilność instalacji oraz ułatwia prowadzenie doświadczeń separacji CO₂ na różnych obiektach przemysłowych. Wydajność instalacji wynosi ponad 1t CO₂/dobę, co dostarcza wiarygodnych informacji na temat przebiegu absorpcji CO₂ prowadzonej za pomocą wodnych roztworów amin. Należy dodać, iż w Europie jest kilka instalacji o podobnej skali i charakterze badawczym. Realizacja doświadczeń w omawianym zakresie usuwania CO₂ ze spalin pochodzących ze elektrowni opalanych węglem pozwoliła na potwierdzenie możliwości efektywnego zastosowania absorpcji chemicznej w sektorze energetycznym dla celów obniżenia emisji CO₂ do atmosfery. W trakcie prowadzenia badań w szerokim zakresie pozyskana została wiedza w wielu dziedzinach związanych z realizacją separacji CO₂ przy użyciu roztworów amin, co pozwoliło określić dalsze kierunki rozwoju absorpcji chemicznej. Istotnym problemem nadal pozostaje energochłonność reakcji. Uzyskane wyniki w zakresie obniżania zużycia energii procesów na drodze doboru odpowiednich roztworów absorbentów (amin) umożliwiają uzasadnienie konieczności dalszych poszukiwań roztworów sorpcyjnych cechujących się wysoką chłonnością i niskim ciepłem absorpcji CO₂.

Przytoczyłem obszerny opis instalacji oraz badań prowadzonych w ramach Zadania 1 Programu Strategicznego ponieważ Autor brał w nich udział i wróć do tej kwestii w rozdziale *Uwagi krytyczne*.

Koncepcja CCS pojawia się w założeniach Green Deal - jako (hipotetyczna) jedyna alternatywa dla paliw kopalnych po 2040. Ze scenariusza dotyczącego wysokiej efektywności energetycznej zawartego w planie działania w dziedzinie energii na rok 2050 wynika, że do 2035 r. możliwa jest instalacja ogółem 32 GW CCS, a wartość ta może wzrosnąć do około 190 GW do roku 2050. Niestety doświadczenia na rynku europejskim nie wskazują na wzrost

inwestycji w CCS i dostępność sprawdzonych komercyjnie technologii obecnie. Technologie CCS mogą być bardziej dostępne rynkowo przy wyższych cenach uprawnień emisyjnych (50-100 Eur/tonę) i konieczności ich stosowania w niektórych technologiach przemysłowych. Z uwagi na stałą presję cenową zeroemisyjnych technologii w energetyce i niską rynkową cenę energii, CCS raczej nie osiągnie poziomu konkurencyjności w zastosowaniach stricte energetyki wytwórczej, a na pewno nie w perspektywie 2030. CCS stanowi obecnie jedną z głównych dostępnych technologii, które mogą przyczynić się do zmniejszenia emisji CO₂ w sektorze energetycznym. Aby wykorzystać ten potencjał CCS musi stać się technologią konkurencyjną kosztowo, tak aby można zacząć ją stosować komercyjnie, przyczyniając się do przejścia gospodarki europejskiej na technologie niskoemisyjne. Konieczna jest pilna reakcja polityczna na zasadnicze wyzwanie, jakim jest pobudzanie inwestycji w działania demonstracyjne w dziedzinie CCS, aby sprawdzić, czy wykonalne jest późniejsze wdrożenie i budowa infrastruktury związanej z CO₂. Pierwszym krokiem w tym kierunku jest zatem zapewnienie powodzenia demonstracji w dziedzinie CCS na skalę komercyjną w Europie, która potwierdziłaby efektywność techniczną i rentowność technologii CCS jako racjonalnego pod względem kosztów środka ograniczającego emisję gazów cieplarnianych w sektorze energetycznym i przemysłowym. Wdrażanie CCS na skalę, która czyni z CCS istotny wkład w redukcję emisji CO₂ wymaga pokonania obecnych barier, w tym kosztów, złożoności w całym łańcuchu, niepewność regulacyjna i polityczna, akceptacja społeczna, składowiska na dużą skalę i kwestie odpowiedzialności długoterminowej. Jednakże, kluczową barierą dla CCS jest brak polityki zachęcającej i wspierającej jego wdrażanie, tworzącej równe szanse z innymi opcjami technologicznymi.

W dłuższej perspektywie technologia CCS jest również konieczna, aby umożliwić ograniczenie emisji w sektorach przemysłu w przypadku emisji procesowych, których nie można uniknąć, a przede wszystkim przy wytwarzaniu wodoru z gazu ziemnego.

Uważam, iż z tego powodu tematyka rozprawy doktorskiej wiąże się bezpośrednio z obecnymi trendami poszukiwania skutecznych i tanich metod ograniczenia emisji CO₂ nie tylko w sektorze energetycznym, a zwłaszcza poszukiwania nowych absorbentów wychwytu CO₂. Problem naukowy został postawiony poprawnie oraz rozwinięty za pośrednictwem sformułowanych tez rozprawy. Cel jak i zakres pracy adekwatnie wynikają z przeprowadzonej analizy literatury przedmiotu oraz postawionego problemu przez Autora.

Układ pracy

Praca została podzielona na osiem rozdziałów. Rozdziały 1 i 2 zestawiają krótki wstęp oraz główne zagadnienia dotyczące technologii wychwytu CO₂. W Rozdziale 3 Autor szczegółowo omawia absorbenty aminowe. Przedstawia budowę i właściwości amin pierwszorzędowych, drugorzędowych oraz trzeciorzędowych, a także mieszaniny amin i roztwory hybrydowe. Podsumowuje, iż niezbędne jest opracowanie nowych absorbentów, które mogłyby być zastosowane komercyjnie i umożliwiłyby ograniczenie energochłonności procesu przy zachowaniu korzystnych zdolności absorpcyjnych.

Rozdział 4 obejmuje kryteria doboru absorbentów oraz wnioski z przeglądu literaturowego. Na podstawie analizy literatury z zakresu absorpcyjnych metod usuwania CO₂ Autor w rozdziale 5 przedstawił tezę badawczą: „jest możliwe opracowanie nowych absorbentów wieloskładnikowych na bazie amin, które wykazą lepszą efektywność procesu wychwytu CO₂, w tym zmniejszenie zużycia energii do regeneracji roztworu na jednostkę usuniętego CO₂, w porównaniu do rozpuszczalnika referencyjnego - 30% wodnego roztworu monoetanoloaminy”. W rozdziale tym podał cele i zakres pracy doktorskiej.

W rozdziale 6 pokazano wyniki badań eksperymentalnych doboru absorbentów aminowych do usuwania CO₂, w tym:

- metody badawcze i opis aparatury,
- charakterystykę układów dwuskładnikowych,
- charakterystykę wieloskładnikowych absorbentów aminowych,
- uzasadnienie wyboru absorbentu do badań procesu wychwytu CO₂ ze spalin w laboratoryjnej instalacji absorpcji-desorpcji.

W rozdziale 7 zaprezentowano badania wybranych układów w instalacji laboratoryjnej absorpcji-desorpcji. Do badań procesu separacji CO₂ ze spalin wykorzystywana była instalacja laboratoryjna, którą pozwalała na prowadzenie procesu absorpcji-desorpcji w systemie ciągłym o składzie zbliżonym do spalin. Wyniki badań laboratoryjnych procesu wychwytu CO₂ w układzie ciągłym absorpcja-desorpcja, potwierdziły wnioski wynikające z badań podstawowych parametrów absorbentów aminowych opisane w rozdziale 6. Badania procesu absorpcji i desorpcji CO₂ w roztworach amin w skali laboratoryjnej były częścią przygotowań do badań przemysłowych z wykorzystaniem spalin pochodzących z pracującego

bloku elektrowni węglowej. Badania te opisano w rozdziale 8. Podsumowanie i wnioski zawarto w rozdziale 9.

Praca doktorska jest obszerna (188 stron) i przemyślana, oparta na naukowych materiałach źródłowych. Cytowana literatura obejmuje pozycje bibliograficzne (w sumie 267), w większości anglojęzyczne, które przedstawiają aktualny nurt badań w tematyce pracy.

Lektura pracy doktorskiej mgr inż. Andrzeja Wilka, według mojej opinii nie budzi zastrzeżeń merytorycznych i stanowi wymierny wkład w rozwiązanie problemu naukowego, wnosząc istotne wartości poznawcze. Należy podkreślić duży nakład pracy i czasu związany z przeprowadzeniem badań eksperymentalnych oraz interpretacją wyników, a także ich aplikacyjny charakter.

Pomijając drobne niedociągnięcia językowe i edytorskie można przyjąć, że rozprawa została napisana poprawnie. Praca posiada przejrzysty układ treści, konsekwentnie stosowane nazewnictwo oraz symbolikę.

Elementy oryginalności pracy

Za najważniejsze walory pracy w *aspekcie naukowym* uważam:

1. Udowodnienie, iż zastosowanie w mieszaninach amin dodatków cieczy organicznej oraz piperazyny jest korzystne zarówno pod kątem przebiegu absorpcji jak i regeneracji.
2. Pokazanie, iż zastosowanie pierwszorzędowej aminy z zawadą steryczną (AMP) znacząco obniża wartość RCO_2 w całym zakresie badanych ciśnień cząstkowych CO_2 . Biorąc pod uwagę znaczący wzrost Da w układzie zawierającym AMP Autor zaproponował ten związek jako aminę bazową.
3. W wyniku badań doświadczalnych Autor pokazał, iż wielkości takie jak pojemność absorpcyjna oraz szybkość absorpcji osiągały najwyższe wartości dla układu MEA-AMP-PZ-NMP. Szybkość oraz pojemność absorpcyjna były wyższe niż dla 30% MEA co wskazuje na to, iż zastosowanie takiego roztworu wieloskładnikowego w instalacji separacji CO_2 ze spalin daje wymierne korzyści procesowe.
4. Wskazanie, iż zawartość 20% NMP gwarantuje uniknięcie problemów operacyjnych, w procesie separacji CO_2 ze spalin, wynikających ze zbyt niskiego stężenia wody w roztworze.
5. Autor pokazał, iż roztwór trójskładnikowy o zwiększonym stężeniu aminy bazowej i aktywatora (30% AMP – 10% PZ) pozwala na uzyskanie parametrów zbliżonych do

roztworu wieloskładnikowego MEA-AMP-NMP-PZ. Dodatkowo Autor udowodnił, iż układ 30%AMP - 10%PZ cechuje się potencjalnie lepszymi parametrami niż 30% MEA przy zastosowaniu go do usuwania ditlenku węgla z gazów o podwyższonej zawartości CO₂ (znacznie wyższe pojemności operacyjne Da i szybkość RCO₂).

W rozważaną tematykę autor wniósł również *istotny własny wkład twórczy*, a w szczególności do Jego *osiągnięć praktycznych* zaliczyć można:

1. Wskazanie, iż o przydatności danego absorbentu do wychwytu CO₂, oprócz szybkości absorpcji i pojemności absorpcyjnej, decyduje również wielkość ciepła absorpcji, które ma bezpośrednie odzwierciedlenie w ilości energii niezbędnej do regeneracji absorbentów aminowych w węźle desorpcji.
2. Pokazanie, iż najwyższym ciepłem cechują się roztwory bazujące na monoetanolaminie i zbliżonych do niej budową aminach takich jak 2-aminopropanol i 3-aminopropanol. Roztwory te wykazują ciepło absorpcji w zakresie 87 – 95 kJ/ mol CO₂.
3. Wskazanie, iż układy MEA-AMP-NMP-PZ oraz AMP-PZ są efektywniejszymi absorbentami niż MEA, a zapotrzebowanie na energię było nawet o około 25% niższe dla roztworu wieloskładnikowego w porównaniu do referencyjnego roztworu MEA.
4. Wyniki badań pilotowych potwierdziły lepszą efektywność roztworu AMP-PZ w porównaniu do roztworu MEA w procesie usuwania CO₂ ze spalin.
5. Autor opracował cenne wytyczne procesowe do dalszych badań związanych z projektowaniem instalacji do wychwytu CO₂ metodą aminową. Pomiary w instalacji pilotowej wykonane w szerokim zakresie parametrów operacyjnych, uzupełnione o bilanse cieplne całego układu, dostarczają nowych danych istotnych do oceny możliwości oszczędności energii i obniżenia kosztów wychwytu CO₂.

Poziom warsztatowy

Przedstawiona rozprawa jest wynikiem bardzo trudnych u uciążliwych analiz eksperymentalnych w bardzo trudnych warunkach prowadzenia badań. Autor wykazał bardzo dobre opanowanie technik pomiarowych oraz wystarczający dla właściwego postawienia problemu znajomość potrzeb energetyki i technologii chemicznych. Zarówno dobór tematyki jak i analizowanych źródeł uznać należy za prawidłowy.

Uwagi krytyczne

W trakcie czytania pracy nasunęły mi się pewne uwagi krytyczne, a dotyczą zagadnień omówionych poniżej.

1. Przegląd literatury - powinien być krytyczny i uporządkowany. Tymczasem mimo, iż Autor uczestniczył w pracach Strategicznego Programu Badawczego współfinansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju – „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii: Opracowanie technologii dla wysokosprawnych „zero-emisyjnych” bloków węglowych zintegrowanych z wychwytem CO₂ ze spalin”. Prace w tym zadaniu realizowano w obszarze usuwania CO₂ metodą absorpcji chemicznej w roztworach amin. Niestety pomija w przeglądzie ten sam program - Zadanie badawcze Nr 2 „Opracowanie technologii spalania tlenowego dla kotłów pyłowych i fluidalnych zintegrowanych z wychwytem CO₂”. Nie powołuje się na literaturę polskich zespołów w zakresie adsorpcji i sorbentów, zwłaszcza zeolitowych. Podobna uwaga dotyczy separacji z wykorzystaniem selektywnych membran (str. 21). W ramach prac w zadaniu 2 przedstawiono analizy wpływu technologii membranowej na charakterystyki termodynamiczne i ekonomiczne bloku energetycznego na parametry nadkrytyczne, przeprowadzone zostały badania eksperymentalne membran oraz obliczenia oparte procesach modelowania układów membranowych do separacji CO₂. W ramach projektu zaprojektowano i zbudowano stanowisko do badań membranowej separacji CO₂, a zespół pod kierownictwem prof. Janusza Kotowicza opublikował wiele prac w tej tematyce w liczących się czasopismach.

Odnoszę wrażenie, że olbrzymi wkład polskich naukowców w tematykę wychwytywania CO₂ nie został zauważony przez Autora.

2. Rysunek 2.3. zaczerpnięty z literatury [11] jest bardzo uproszczony i mało precyzyjny; pomija szereg procesów m.in. przy ASU brakuje azotu.
3. Str. 23 – Autor podaje, iż *w ostatnich kilkunastu latach wiele instytucji badawczych we współpracy z firmami z branży chemicznej i energetycznej prowadziło badania procesu separacji ditlenku węgla ze spalin na instalacjach pilotowych/demonstracyjnych*; - brakuje literatury.

4. Na str. 31 Autor podaje, że kinetyka reakcji chemicznych ma wpływ na koszty inwestycyjne – proszę podać wielkość CAPEX dla roztworów amin pierwszo- i drugorzędnych i porównać je z innymi reagentami. Podobnie na str. 34 wspomina o relatywnie niskiej cenie MEA – jak jest ta cena ?
5. W tekście rozprawy pojawia się pojęcie *zużycie energii* – energia się nie zużywa zgodnie z zasadą zachowania energii.
6. Autor na str. 66 wspomina, iż instalacja pilotowa została zaprojektowana w ramach Programu Strategicznego NCBiR. Rezultatem tych badań była monografia - Ściążko M., Więclaw-Solny L., Krótki A., Tatarczuk A., Wilk A., Śpiewak D., Spietz T., Asendrych D., Niegodajew P., Drobnik S., Stec M., Marek M., Elsner W., Szczypiński, T., Chmielniak T., Łukowicz H., Mroncz M., Tokarski S. *Absorpcyjne usuwanie ditlenku węgla ze spalin kotłowych*. IChPW, Zabrze, 2015, w której zaprezentowano również badania doświadczalne. Mgr inż. Andrzej Wilk jak widać jest współautorem i proszę o wyjaśnienie jaki był udział Autora w badaniach absorpcyjnego usuwania CO₂. Proszę o wyraźne wskazanie czym praca doktorska przedstawiona do recenzji różni się od wyżej wymienionej monografii.
7. Uważam się, iż technologia adsorpcyjna VPSA będzie konkurencyjna w stosunku do wychwytu CO₂ za pomocą absorpcji aminowej zwłaszcza dla małych strumieni spalin. W przypadku instalacji adsorpcyjnych należy wspomnieć o zaprojektowaniu, wybudowaniu a następnie uruchomieniu pilotowej mobilnej zmiennociśnieniowej instalacji adsorpcyjnej do badań wychwytu CO₂ ze spalin. Instalacja powstała w ramach Strategicznego Programu Badań Naukowych i Prac Rozwojowych pt. „Zawansowane technologie pozyskiwania energii” Zadanie Badawcze nr 2 „Opracowanie technologii spalania tlenowego dla kotłów pyłowych i fluidalnych zintegrowanych z wychwytem CO₂” przy udziale partnera przemysłowego: TAURON Wytwarzanie S.A. Instalacja została podłączona do kanału spalin największego kotła fluidalnego na parametry nadkrytyczne, który znajduje się w Elektrowni Łagisza. Uzyskane sprawności usuwania CO₂ były na poziomie 90 %, a więc porównywalne do tych uzyskanych na instalacji absorpcyjnej w skali pilotowej (Rys. 8.3). W technologii VPSA proponowanymi adsorbentami są zeolity i węgle aktywne, aczkolwiek coraz większą uwagę przykładana się do wykorzystywania w jednostkach adsorpcyjnych nowych metaloorganicznych struktur (MOFs) postrzeganych jako przyszłość technologii VPSA. Dzięki wysokiej selektywności i pojemnościom sorpcyjnym MOFs powodują redukcję warstwy adsorbentu potrzebnego od usuwania CO₂ ze strumienia

gazów o dużych objętościach. Technologię VPSA rekomenduje się do stosowania w tych sektorach przemysłu, gdzie stężenie CO₂ przekracza 20%obj. , np. w przemyśle cementowym lub metalurgicznym czy produkcji wodoru.

Proszę Autora o komentarz.

Wnioski końcowe

Reasumując można stwierdzić, iż tematyka rozprawy doktorskiej mgr inż. Andrzeja Wilka „Nowe wieloskładnikowe absorbenty aminowe wychwyty CO₂ – dobór i charakterystyka” jest aktualna. Problem naukowy został postawiony poprawnie oraz rozwinięty za pośrednictwem sformułowanych tez rozprawy. Cel jak i zakres pracy adekwatnie wynikają z przeprowadzonej analizy literatury przedmiotu oraz postawionego problemu przez Autora.

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska zawiera rozwiązanie ważnego zadania naukowego jakim jest opracowanie optymalnego składu roztworu absorpcyjnego, w oparciu o mieszaninę amin, do usuwania CO₂ ze spalin, który stanowiłby lepszą alternatywą dla 30% wodnego roztworu monoetanolaminy MEA. Zaproponowane roztwory dwu i wieloskładnikowe, bazujące na aminach komercyjnie dostępnych oraz produkowanych wielkotonażowo, nie były do tej pory przebadane w literaturze w sposób systematyczny i szeroki jak w recenzowanej pracy.

Poziom merytoryczny pracy doktorskiej uważam za dobry. Poprawnie wybrano przedmiot analiz i metodykę, uzyskano ważne wyniki eksperymentalne pozwalające na porównanie zdolności regeneracji testowanych układów w pełnym cyklu absorpcja-desorpcja. Autor dokonał weryfikacji efektywności zaproponowanych, nowych wieloskładnikowych roztworów absorpcyjnych w pierwszej w Polsce Instalacji Pilotowej usuwania CO₂ z gazów spalinowych pochodzących z obiektu energetycznego, w skali do 200 m³n/h.

Autor wykazał się dużymi umiejętnościami w prowadzeniu trudnych analiz eksperymentalnych.

Podsumowując stwierdzam, iż przedstawiona do oceny rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane przez obowiązującą ustawę o stopniach i tytułach naukowych. Wobec powyższego wnioskuję, by Wysoka Rada Dyscypliny Inżynierii Chemicznej Politechniki Śląskiej dopuściła mgr inż. Andrzeja Wilka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

