

R e c e n z j a

**pracy doktorskiej mgr inż. Sylwii Berdowskiej z Politechniki Śląskiej,
z tytułem „Wpływ membranowo-kriogenicznej technologii separacji tlenu z
powietrza i instalacji CCS na efektywność super nadkrytycznego bloku węglowego
z kotłem pyłowym”.**

1. Uwagi ogólne

Wspomniana wyżej praca doktorska wykonana została w Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej. Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Janusz Kotowicz, zaś promotorem pomocniczym dr inż. Anna Skorek-Osikowska. Pracę wydano jako raport IMiUE w Gliwicach w 2015 r. Wykonywana jest ona w dyscyplinie energetyka.

Rozprawa doktorska napisana została na 144 stronach. Składa się ze: spisu treści, wykazu ważniejszych oznaczeń, 13 rozdziałów merytorycznych i spisu tabel (18), rysunków (66), wykazu bibliografii (106) i streszczenia po polsku i angielsku.

Recenzję wykonano w oparciu o pismo Pana Prodziekana ds. Organizacji i Rozwoju WISiE P.Śl. prof. dr hab. inż. Krzysztofa Barbusińskiego z dnia 9.06.2015 r.

2. Omówienie treści pracy

Rozdział pierwszy pracy (3 str.) zatytułowany „Wstęp” zawiera przegląd technologii wytwarzania energii elektrycznej z węgla, przy jednoczesnym zmniejszeniu emisji CO₂. Doktorantka zadeklarowała, że jej uwaga zostanie skupiona na technologii oxy, w której dostarczanie zwiększonej ilości tlenu odbywać się będzie poprzez separację powietrza drogą kriogeniczną i przy pomocy membran.

„Cel i zakres pracy” przedstawiono w rozdziale drugim (2 str.). Autorka rozprawy za podstawę analizy wybrała super nadkrytyczny blok węglowy o mocy elektrycznej 600 MW z kotłem pyłowym o parametrach pary świeżej 31,1 MPa/650 °C i pary wtórnie przegrzanej 6,15 MPa/670 °C.

Przewidziano prowadzenie analizy etapami. Etapy te są następujące: badanie technologii membranowej separacji tlenu i wyznaczenie jej energochłonności, wyznaczenie podobnych parametrów dla metody kriogenicznej, określenie minimalnego zapotrzebowania energii dla zintegrowanych układów produkcji tlenu, ustalenie energochłonności instalacji separacji i sprężanie CO₂, analiza zintegrowanego układu bloku węglowego z technologią oxy i membranowo-kriogeniczną metodą dostarczania tlenu oraz separacją i sprężaniem CO₂. Kończącym etapem analizy jest wyznaczenie charakterystyk ekonomicznych układu.

Rozdział trzeci (4 str.) nosi tytuł „Podstawy prawne regulujące emisję CO₂ w Polsce i UE”. W rozdziale tym Doktorantka dokonała przeglądu dyrektyw UE dotyczących realizacji polityki związanej z emisją gazów cieplarnianych oraz odpowiadające im krajowe akty prawne i omówiła czekającą nas (a częściowo już realizowaną) procedurę rozdziału uprawnień do emisji ww. gazów.

Rozdział czwarty (7 str.) poświęcony jest metodom zmniejszania emisji CO₂ w blokach węglowych. W oparciu o literaturę Doktorantka podzieliła te metody na:

- wychwyt CO₂ przed procesem spalania,
- wychwyt CO₂ po procesie spalania i
- spalanie w atmosferze o zwiększonej koncentracji tlenu.

Autorka wskazała na szczegóły technologiczne powyższych metod tj. na procesy absorpcji chemicznej i fizycznej, adsorpcji, separacji przy użyciu membran polimerowych oraz separacji kriogenicznych, wskazując jako najdojrzalszą absorpcję chemiczną w układach realizowanych po procesie spalania. Doktorantka zestawiała też energochłonność każdej z wyżej wymienionych metod separacji CO₂.

W rozdziale piątym (7 str.) przedstawiono „Metody separacji tlenu z powietrza”. Doktorantka wskazała (w oparciu o studia literaturowe), że najbardziej zaawansowaną i wydajną jest metoda rozdziału drogą rektyfikacji skroplonego powietrza (metoda kriogeniczna). Daje ona możliwość uzyskania tlenu o dużej czystości i w ilości od kilkuset do kilkunastu tysięcy ton tlenu na dobę.

Drugą wskazaną metodą jest separacja tlenu przy pomocy membran polimerowych. Metodą tą raczej wzbogaca się zawartość tlenu w powietrzu w odróżnieniu od układów z membranami ceramicznymi, w których czystość tlenu wynosi 100% . Z innych rozpatrywanych metod separacji tlenu z powietrza, wskazaną przez Doktorantkę jest metoda adsorpcji na sitach molekularnych. Wydajność do 60 Mg/dobę, a czystość 93-95%. Ostatnią rozpatrywaną metodą jest technologia CAR

(Cyclic Autothermal Recovery) opierająca się na adsorbacji tlenu na złożu wykonanym ze specjalnego materiału ceramicznego. Duża wydajność metody (do 180 kg/s) i niska energochłonność stawia ją w rzędzie metod przyszłości, choć wymagane są dodatkowe badania.

W dwóch kolejnych rozdziałach tj. szóstym (19 str.) i siódmym (15 str.) Doktorantka zajmuje się bardziej szczegółowo rolą i własnościami kolejno membranowej i kriogenicznej metody separacji gazów, w tym tlenu. W początkowej części przedstawiono metodę membranową. Autorka przedstawiła podział i charakterystykę membran. Charakterystykę tę stanowi przepuszczalność P (w $\text{kmol/m}^2\text{s}$) procesu membranowego i selektywność α czyli zdolność separacyjna dla poszczególnych składników. W dalszej części Doktorantka przedstawiła modele matematyczne, przy pomocy programu Aspen Custom Modeler procesu rozdziału powietrza dla różnych konfiguracji układu. Wykonała dla wybranych membran obliczenia, których wyniki zestawiała w tabelach i na rysunkach. Były to: czystość permeatu Y_{O_2} i stopień odzysku tlenu R . Zmiennymi niezależnymi były zaś: ciśnienie permeatu, powierzchnie membrany, ciśnienie nadawy. Wykonała też obliczenia energochłonności dla procesu membranowego (rys. 6.12, 6.15 i 6.16). Wynikiem tych badań był wybór do dalszej analizy membrany z żywicy fenolowej.

Kriogeniczna metoda separacji tlenu polega na skropleniu mieszanin gazowych a następnie ich rozdziału w kolumnach rektyfikacyjnych. Ze względu na własności mieszanin procesy te zachodzą w temperaturach kriogenicznych, co jest powodem nazwy metody. Doktorantka przedstawiła zasady techniki niskich temperatur, w tym schemat i zasady pracy kolumny rektyfikacyjnej. Omówiła model kolumny pojedynczej i podwójnej.

Wynikiem tej analizy były wykresy czystości otrzymanego produktu Y_{O_2} oraz stopnia odzysku tlenu R w zależności od stężenia tlenu w nadawie. Zdefiniowano i obliczono również energochłonność instalacji kriogenicznej. Wyniki tych obliczeń przedstawiono na rys. 7.7 ÷ 7.9. Z powyższych rysunków wynika, że energochłonność metody kriogenicznej jest tym mniejsza im więcej stopni posiada sprężarka powietrza, im lepiej gaz zostanie schłodzony pomiędzy tymi stopniami i im niższe jest ciśnienie końcowe sprężarki.

W rozdziale ósmym (9 str.) Autorka zajmuje się analizą integracji modułu membranowego z kriogenicznym separatorem tlenu. Doktorantka postawiła tezę, że układ hybrydowy membranowo-kriogeniczny cechuje niższe zużycie energii

elektrycznej niż referencyjny układ kriogeniczny. W tym celu zestawiała projekt takiej instalacji, określiła odpowiednie zależności bilansowe i wykonała obliczenia, które potwierdziły sugestie Autorki. Na rys. 8.2 krzywa energochłonności układu hybrydowego posiada minimum wynoszące 0,209 kWh/kg_{O₂} dla ciśnienia permeatu $P_p = 0,4$ bara.

W kolejnych częściach rozdziału Doktorantka przedstawiła możliwe zmiany niektórych parametrów prowadzące do dalszego obniżenia energochłonności (p. rys. 8.3 ÷ 8.8).

Rozdziały dziewiąty (4 str.) i dziesiąty (16 str.) noszą tytuły „Charakterystyka super nadkrytycznego bloku węglowego typu oxy” i „Analiza termodynamiczna...” takiego bloku”. Rozdział dziewiąty zawiera schemat bloku z instalacją tlenowni oraz układem sekwestracji i sprężania dwutlenku węgla. Dla zespołu tego Autorka ustaliła zależność na sprawność wytwarzania energii elektrycznej netto, która uwzględnia wszystkie potrzeby własne ww. podukładów.

Rozdział dziesiąty jest nieco bardziej rozbudowany. Do wykonania zawartych w nim obliczeń użyto programu GateCycleTM. Rozważano w nim instalację turbiny parowej (600 MW brutto). Składa się ona z trzech sekcji (wysoko 30,0 MPa, średnio (6,0 MPa) i niskoprężnej (526 kPa) z przegrzewem po sekcji wysokoprężnej ($P_m = \sim 6,0$ MPa). Sprawność obiegu turbiny 51,93%.

Drugą analizowaną instalacją jest kocioł pyłowy typu oxy. Obliczenia wykonano tu przy pomocy tego samego programu (GateCycleTM). Przyjęty schemat organizacyjny kotła pozwolił na ustalenie parametrów jego pracy przytoczonych w tabelach 10.2 i 10.3.

Strumień pary świeżej to 412,56 kg/s ciśnienie 31,1 MPa a $t_p = 654,9$ °C. Sprawność kotła wynosi 94,16%, a zawartość tlenu w utleniaczu zmieniano w przedziale 21÷40%. Średnie składniki spalin to: CO₂ \cong 78,7%; H₂O \cong 10%; O₂ \cong 5%; N₂ \cong 5,6%, SO₂ \cong 0,5%. Ciśnienie spalin wynosi 1,013 bara, temperatura 46,2 °C a ich ilość to 131,33 kg/s.

Trzecią modelowaną i analizowaną instalacją jest instalacja separacji i sprężania CO₂. Doktorantka wskazała, że w procesie separacji CO₂ poza czystością wyznaczany jest parametr nazywany stopniem odzysku CO₂. Modelowanie i obliczenia w tej części oparte zostały o program Aspen Plus. Spaliny kierowane są do instalacji osuszającej, której modelowanie zawiera obliczenia procesu usuwania m.in. wody. Później oczyszczane są one z N₂, O₂, SO₂. Daje to spaliny z zawartością

$\text{CO}_2=95\%$. Ich ciśnienie to 150 bar a energochłonność separacji i sprężenie CO_2 wynosi 147,09 kWh/Mg CO_2 .

W końcowej części rozdziału Doktorantka przedstawiła wyniki obliczeń wskaźników energetycznych całej elektrowni oxy. W ich podsumowaniu warto zwrócić uwagę, że całkowita moc potrzeb własnych elektrowni wynosi 163,98 MW, co stanowi 27,3% założonej jej mocy brutto. W tych potrzebach własnych największy udział ma tlenowania (12,3%) i instalacja CCS (9,7%). Ostatecznie sprawność produkcji energii elektrycznej wynosi 35,55%.

W rozdziale jedenastym (14 str.) przedstawiona została analiza integracji tlenowni oraz CCS z blokiem energetycznym. Rozpatrywany w poprzednim rozdziale zbiór choć złożony z siłowni oxy oraz układu membranowo-kriogenicznego i układu separacji i sprężania CO_2 nie aspirował do pojęcia układu zintegrowanego. Nie wykorzystano bowiem wszystkich możliwości podzespołów istniejących w tym zbiorze. Dlatego Doktorantka przedstawiła stosowne w tym względzie uzupełnienie, dopuszczając np. do wyłączenia niektórych podgrzewaczy regeneracyjnych (niskotemperaturowych) i zastąpienie dostarczanego przez nie ciepła energią z wymienników instalacji osuszania lub kompresji spalin. Można w ten sposób obniżyć wskaźnik potrzeb własnych separatora tlenu i sekwestracji CO_2 do 0,208, co skutkuje wzrostem sprawności bloku oxy do 36,12%. Jest to wynik lepszy o 0,57%.

Przedstawiony wynik został osiągnięty bez przeprowadzania metodycznej procedury optymalizacyjnej, co może być podstawą do twierdzenia, że dalsza poprawa efektywności elektrowni „oxy” z hybrydową tlenownią jest możliwa.

Rozdział dwunasty (14 str.) nosi tytuł „Analiza efektywności ekonomicznej bloku energetycznego z tlenownią membranowo-kriogeniczną”. Doktorantka podjęła w nim próbę wyznaczenia granicznej ceny sprzedaży energii elektrycznej dla trzech wariantów bloku węglowego o mocy 600 MW tj. dla układu referencyjnego, układu typu oxy, w którym membranowo-kriogeniczny separator tlenu użytkuje membrany przez 20 lat, oraz takiego samego bloku ale użytkującego membrany przez 5 lat. Przyjmując szereg dodatkowych założeń, Autorka dokonała oszacowania ceny granicznej energii elektrycznej (analizy wrażliwości) w przypadku zmian nakładów inwestycyjnych, ceny paliwa, ceny zakupu uprawnień do emisji CO_2 , dyspozycyjności bloku węglowego, oraz ceny zakupu membrany i zmiany współczynnika selektywności membrany. Rozważania te pokazały, że w bloku referencyjnym cena energii

elektrycznej wynosi 63,4 €/MWh zaś w innych przypadkach zmienia się, niekiedy znacznie (np. 65,0 €/MWh ÷ 71,5 €/MWh).

Rozdział trzynasty (4 str.) zawiera uwagi końcowe, będące autorskim podsumowaniem pracy.

Bibliografia zawiera 106 pozycji w większości angielskojęzycznych.

3. Ocena pracy

3.1. Wybór tematyki badawczej

Problemy, z którymi spotyka się współczesna energetyka mają zróżnicowaną naturę. Z jednej strony wzrost populacji użytkowników, zwłaszcza energii elektrycznej, wraz z rozszerzaniem się regionów uprzemysłowionych jest nieunikniony. Są to tzw. „gospodarki wschodzące”, których symbolem są Chiny, Indie, Brazylia, RPA, Indonezja i in. Nie są to kraje bogate w ropę lub gaz, a często mają łatwy dostęp do węgla. Energetyka oparta na tym surowcu posiada ze względów ekologicznych złą sławę. Z drugiej strony zasoby gazu ziemnego i ropy naftowej jakkolwiek stanowiące podstawę energetyki, zwłaszcza krajów rozwiniętych, splecione są z trudnościami natury politycznej i z wizją ich wyczerpywania się. Energetyka jądrowa nie odzyskała swojej dynamiki po katastrofie w Czarnobylu, choć postęp techniczny jaki osiągnęła w ciągu ostatnich trzydziestu lat jest imponujący.

Energetyka ze źródeł odnawialnych i poprawa efektywności procesów konwersji energii zapewne wpłynie na zmianę struktury zużycia pierwotnych nośników energii, ale ich nie rozwiąże, zwłaszcza, że głównym powodem ich stosowania jest próba ograniczenia emisji do atmosfery gazów cieplarnianych, w tym CO₂.

Inne, realne technologie energetyczne (fuzja termojądrowa, wykorzystanie wodoru, helioenergetyka) wymagają rozwiązania wielu kosztownych i trudnych problemów technicznych i organizacyjnych. Dlatego też poszukiwanie mało inwazyjnych w środowisko, powszechnie dostępnych i tanich technologii węglowych jest niezbędne. W ten nurt wpisuje się tematyka ocenianej rozprawy doktorskiej. Szczegółowy jej temat jest niezwykle ważny dla energetyki polskiej, gdyż wymóg minimalizacji emisji CO₂ jest dla elektrowni na węgiel kamienny i węgiel brunatny bardzo aktualny, zwłaszcza w kontekście prawa UE.

Konkludując uważam, że wybrana tematyka jest aktualna, potrzebna i pozwalająca na zademonstrowanie umiejętności badawczych Doktorantki.

3.2. Ocena wyników badań

Doktorantka w czterech pierwszych rozdziałach pracy zarysowała panoramę problemów związanych ze zmniejszaniem emisji CO₂ w blokach węglowych. Pomocny był w tym jej udział w realizacji strategicznego Programu Badawczego – Zaawansowane technologie pozyskiwania energii: Opracowanie technologii spalania tlenowego dla kotłów pyłowych i fluidalnych zintegrowanych z wychwytem CO₂.

Autorka dokonała dekompozycji zagadnień związanych z tym problemem wskazując, że uzyskanie zarówno jakościowych jak i ilościowych informacji o procesach oksydowania wymaga:

- ❖ stworzenia modelu fizycznego i matematycznego podukładu przygotowującego tlen niezbędny do spalania,
- ❖ stworzenia modelu fizycznego i matematycznego instalacji sekwestracji i sprężania CO₂,
- ❖ adaptację modelu fizycznego i matematycznego bloku węglowego do potrzeb technologii oxy w tym modelu obiegu turbiny i kotła.
- W odniesieniu do wybranych podukładów Doktorantka zaproponowała rozwiązania nowatorskie. Dotyczy to zwłaszcza membranowo-kriogenicznego układu otrzymywania tlenu.
- Wynikiem opisu tak zdekomponowanych podzespołów było zdefiniowanie i określenie ilościowe wielkości charakteryzujących podukłady.
- W kolejnym kroku Autorka dokonała syntezy podukładów i przeprowadziła analizę termodynamiczną super nadkrytycznego bloku węglowego typu oxy. Wyznaczyła w tej analizie efektywność bloku i jego energochłonność. Jak zauważono wyżej energochłonność ta jest wyższa niż w bloku bez CCS, czyli sprawność netto elektrowni spada.
- Doktorantka zaproponowała też zintegrowanie częściowe układu CCS z układem (obiegim) turbiny, co pozwala na wyłączenie upustów, a tym samym wzrost generowanej mocy turbiny. Autorka wskazywała na cechy

jakie powinny być spełniane przez układ membranowo-kriogeniczny by następowало obniżenie energochłonności układu.

- Końcowy temat, który był rozpatrywany przez Doktorantkę, to analiza efektywności ekonomicznej bloku energetycznego z tlenownią membranowo-kriogeniczną. Autorka opracowała metodologię wyznaczania granicznej ceny sprzedaży energii elektrycznej i obliczyła tę cenę dla niektórych przypadków. W oparciu o wcześniej wykonane obliczenia wskazywała w jakim kierunku powinny iść badania by można było tę cenę obniżyć.

3.3. Ocena metodologii badań

Doktorantka postawione przed sobą zadanie rozwiązała drogą analizy i modelowania matematycznego poszczególnych podzespołów. Każdy z nich opisywany był zbiorem parametrów charakterystycznych dla tego zespołu i zbiorem wielkości zdefiniowanych przez Autorkę, a pełniących rolę integrującą rozprawę.

Doktorantka posługiwała się komercyjnymi wersjami kodów obliczeniowych takich jak GateCycleTM, Aspen Plus i Aspen Custom Modeler. Pozytywna odpowiedź na pytanie postawione w celu pracy, a dotyczące możliwości wykorzystania w blokach z oksyspalaniem separatora tlenu membranowo-kriogenicznego i układu wychwytu i sprężania CO₂ ma tylko kilka rozwiązań liczbowych, ustalonych dla optymalnych lub ekstremalnych sytuacji. Blok węglowy z oksyspalaniem zintegrowany z dodatkowymi instalacjami jest układem opisanym przez wiele zmiennych i z wieloma sformułowanymi (czasami niezbyt wyraźnie) oczekiwaniami. Problem ten kwalifikuje się do zadania polioptymalizacyjnego. Szkoda, że Doktorantka nie poruszyła jasno tego zagadnienia w pracy, choć ustalała wartości zmiennych lub ich przedziały jako ważne w przedstawionej analizie.

3.4. Uwagi krytyczne i redakcyjne

Oprócz powyższej uwagi dotyczącej polioptymalizacji, to podczas czytania dysertacji, recenzentowi nasunęły się inne uwagi krytyczne.

- 1) W całej pracy zamiennie używa się na związek chemiczny „CO₂” określenia dwutlenek węgla lub di tlenek węgla. Czy jest to okres przejściowy w nazewnictwie tego związku, czy w termodynamice i energetyce można używać nazwy tradycyjnej?
- 2) Na stronie 21 można przeczytać: „... Kolumna absorpcyjna pracuje pod ciśnieniem wyższym od atmosferycznego wykorzystując tym sposobem mechanizm wzrostu rozpuszczalności gazów ze wzrostem ciśnienia, dlatego zapotrzebowanie na ciepło zależy od ciśnienia w jakim prowadzony jest proces: dla niskich ciśnień wynosi 0,11 kWh/kg_{CO2}, dla wyższych 0,34 kWh/kg_{CO2} ...”. Co w tym przypadku oznaczają określenia „niskie” a co „wysokie” ciśnienie?
- 3) Użycie na str. 26 w wierszu 2 od góry określenia „przemysł medyczny” można chyba uznać za niezręczność.
- 4) Na stronie 35 w równaniu 6.1 występuje cecha materiału „P_i” nazywana „przepuszczalnością” (wyrażona w kmol/m²s). Na str. 37 we wzorze 6.5 „P_i” oznacza „współczynnik przepuszczalności”, by znów na str. 38 spotkać „P_i” nazwany „przepuszczalnością”. Jednocześnie na str. 39 w tabeli 6.1 wielkości P_{O₂} i P_{N₂} otrzymały nazwy „przenikalności”, choć traktowane są jako „przepuszczalność” (zgodnie ze wzorem 6.1) i z jednostką „barrer”. Natomiast w tabeli 6.2 (str. 41) do opisu własności membran użyto „współczynnika przenikalności” (jednostka: barrer). Czy „przepuszczalność” = „współczynnik przepuszczalności” = „przenikalność” = „współczynnik przenikalności” ?

W pracy zauważono też kilka niezręczności językowych lub tzw. błędów maszynopisu. Przykładowo są to:

- str. 36, wiersz 13÷15 od góry – tekst niezrozumiały;
- str. 66, wiersz 5 od dołu – błąd maszynopisu;
- str. 110, wiersz 13 od dołu – jw.;
- str. 111, wiersz 2 od dołu – niezręczność stylistyczna;
- str. 112, wiersz 7 od góry – czy €/m² to nie pomyłka;
- str. 127, wiersz 2 od dołu – błąd maszynopisu.

Pomimo tych uwag uważam, że praca została napisana dobrym językiem technicznym z użyciem pojęć i słownictwa charakterystycznego dla energetyki.

Struktura tekstu nie budzi zastrzeżeń. Myśli formułowane są poprawnie, a przytoczone uwagi końcowe świadczą, że Doktorantka potrafi wskazać najistotniejsze fragmenty rozprawy i uzasadnić je. Jest świadoma koniecznych dalszych badań.

4. Podsumowanie

Biorąc pod uwagę przedstawioną rozprawę doktorską, jej temat i sposób prowadzenia badań obejmujący metodologię, użytą aparaturę, wykorzystane kody obliczeniowe, wzbogacone o własne propozycje, dekompozycję tematyki a po weryfikacji jej ponowną syntezę, przedłożone wnioski i propozycje to można uznać, że Pani mgr inż. Sylwia Berdowska jest doświadczonym i rzetelnym naukowcem, który posiada znaczące osiągnięcia i umiejętności badawcze w dziedzinie nauk technicznych i dyscyplinie energetyka. Wnoszę więc, zgodnie z Ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. wraz z późniejszymi zmianami o dopuszczenie Jej do obrony pracy doktorskiej i nadanie Jej stopnia doktora nauk technicznych. Wnoszę ponadto o wyróżnienie pracy.

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Gnutek

