

Prof. dr hab. inż. Janusz Kotowicz
Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Politechnika Śląska
ul. Konarskiego 18, 44-100 Gliwice
e-mail: janusz.kotowicz@polsl.pl

Adres domowy:
ul. Sikorskiego 21
44-120 Pyskowice
tel. 32 233 31 92

Recenzja rozprawy doktorskiej
Mgr inż. Tomasza Banaszkiewicza
pt. „Procesy adsorpcji w technologii separacji powietrza atmosferycznego”

A. Wprowadzenie

Recenzowana rozprawa została wykonana w ramach strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii” – zadanie badawcze nr 2 „Opracowanie technologii spalania tlenowego dla kotłów pyłowych i fluidalnych zintegrowanych z wychwytem CO₂”.

W wymienionym programie strategicznym analizowano także dwie pozostałe technologie ograniczania emisji CO₂ tj. technologie precombustion (zad. 1) i postcombustion (zad. 3). Obie wymienione powodują znaczny spadek sprawności netto produkcji energii elektrycznej, dlatego obiecującą wydaje się trzecia metoda ograniczania emisji CO₂: oxy-combustion. Wymaga ona produkcji tlenu o czystości co najmniej 95%. Energochłonność produkcji tlenu ma zasadnicze znaczenie dla sprawności netto wytwarzania energii elektrycznej w bloku typu oxy zintegrowanym z wychwytem CO₂.

Najbardziej rozpowszechniona i najlepiej poznana jest kriogeniczna technologia produkcji tlenu. Uzyskuje się tutaj tlen o czystości powyżej 99% przy energochłonności do 220 kWh/tO₂, która zmniejsza się do 150 kWh/t O₂ dla czystości ok. 95%. Takie wskaźniki osiągnąć są jednak przy dużych wydajnościach, większych od 1000t na dobę.

Mniejsza wydajność powoduje wzrost energochłonności oraz wzrost jednostkowych kosztów separacji. Nakłady inwestycyjne są bowiem wysokie i znacząco rosną z obniżeniem wydajności.

Przy stosunkowo niskich wydajnościach, rzędu 100-200 ton tlenu na dobę, jednostkowy koszt jego wytworzenia w instalacjach adsorpcyjnych może być konkurencyjny z instalacjami kriogenicznymi. Wiąże się to zarówno z niskimi nakładami inwestycyjnymi, jak i niskimi kosztami eksploatacji. Te ostatnie istotnie zależą od energochłonności, która w zakresie podanej wydajności (100-200 t/d) w technologii adsorpcyjnej jest niższa niż w technologii kriogenicznej.

Metoda kriogeniczna produkcji tlenu wymaga dostarczenia energii w postaci elektrycznego napędu do sprężarek powietrza. Technologie adsorpcyjne bazować mogą zarówno na wykorzystaniu energii elektrycznej do zasilania sprężarki (proces PSA), jak i ciepła (proces TSA) do regeneracji stosowanego złoża adsorpcyjnego.

Technologia adsorpcyjna pozwala na wykorzystanie różnych postaci energii, zarówno energii elektrycznej jak i ciepła. Adsorpcja zmiennociśnieniowa (proces PSA) wymaga dostarczania energii elektrycznej, adsorpcja zmiennotemperaturowa potrzebuje ciepła stosowanego w etapach regeneracji złoża adsorpcyjnego.

Uwzględniając powyższy temat pracy mgr inż. Tomasza Banaszkiwicza należy uznać za ważny z poznawczego o użytkarnej charakteru prac naukowo-badawczych.

B. Zakres rozprawy

Praca doktorska mgr inż. Tomasza Banaszkiwicza zawiera łącznie 106 stron, na które składa się 9 numerowanych rozdziałów oraz streszczenie (1-stronicowe) w języku angielskim i wykaz oznaczeń.

W recenzowanej rozprawie można zasadniczo wyróżnić dwa nurty. Pierwszy związany jest z modelowaniem i symulacjami obliczeniowymi procesu separacji tlenu z powietrza atmosferycznego metodami adsorpcyjnymi, drugi z badaniami eksperymentalnymi tego zjawiska.

Rozdział 2 zatytułowany jest „Termodynamiczne podstawy rozdziału mieszanin gazowych”. W pierwszym rzędzie (punkt 2.1) Autor podaje zależności na minimalną pracę rozdziału mieszanin gazowych i wykorzystując ją wyznacza minimalną pracę

separacji tlenu z powietrza. (Wielkość ta jest równa 51,3 kWh/tonę tlenu o czystości 100%).

Różne technologie adsorpcyjnej metody rozdziału powietrza opisano w punkcie 2.2. Dla technologii PSA, TSA, VPSA, PTSA pokazano podstawowe recepty separacji tlenu – polegających na wyszczególnieniu poszczególnych etapów procesu separacji. Adsorpcyjne złożo zeolitowe 5A przybliżono w punkcie 2.3; pokazano tam także przykładowy wykres izotermy i izobary powietrza (także azotu i tlenu) na tym złożu. Metodologię wyznaczania minimalnej pracy rozdziału powietrza opracował mgr inż. T. Banaszkiewicz w rozdziale 2.4. Obliczenia wykonano na podstawie izotermicznej adsorpcji azotu oraz tlenu z powietrza. Przy tworzeniu ich wykorzystania modelu DSL (Double-Side-Langmuir) szczegółowo omówiono w rozdziale 4. Obliczenia wykonano dla procesu mieszanego PTSA – jako najbardziej ogólnego procesu adsorpcji. W pierwszej kolejności Autor wyznaczył minimalną pracę sprężenia powietrza (w kWh/tonę O₂), w drugiej ciepło potrzebne do regeneracji złoża (również w kWh/tonę O₂). Obie te wielkości po dodaniu stanowią zdaniem T. Banaszkiewicza energochłonność separacji tlenu. Wielkość tę wyznaczono dla różnych temperatur regeneracji złoża. W rozdziale 3 Autor przedstawia podstawy fizyczne procesu adsorpcji. Wyjaśnia pojęcia i zagadnienia podstawowe, takie jak: adsorbent i siły adsorpcyjne, oddziaływanie adsorbent-adsorbat, równania adsorpcji, kondensacja kapilarna, teoria objętościowego zapełniania mikroporów czy ciepła adsorpcji.

W rozdziale czwartym mgr inż. T. Banaszkiewicz wybiera do dyskusji model adsorpcji na zeolitowym 5A. Jest to model izotermy DSL (Dual-Site Langmuir). Wykorzystując dane (punkty) pomiarowe izoterm czystego azotu i tlenu na zeolicie 5A znalezione w literaturze przedmiotu wyznacza wartości współczynników izoterm DSL. Pozwala to określić izotermy adsorpcji powietrza (jako sumy izoterm i azotu) dla różnych temperatur adsorpcji.

W rozdziale piątym przedstawiono badania laboratoryjne adsorpcyjnych instalacji separacji tlenu. W pierwszym rzędzie (punkt 5.1) dotyczy to technologii PSA. Zaprojektowano i zbudowano tutaj instalację o wydajności do 0,6 m³/h wytwarzającą

tlen o czystości do 95%. Instalacja jest dobrze opomiarowana oraz wyposażona w panel sterowniczy umożliwiający ustawienie stosowanej recepty (tj. pełnego cyklu pracy generatora). Recepta składa się z 6 etapów, pokazano przykładowe rozkłady ciśnień (wewnątrz zbiorników adsorpcyjnych i tlenu) oraz czystość tlenu – w trakcie ich trwania. Przeprowadzono badania zależności czystości separowanego tlenu od różnicy pomiędzy ciśnieniem adsorpcji a ciśnieniem w zbiorniku produktu.

Wyznaczono charakterystyki czystości produkowanego tlenu i przepływu tlenu oraz energochłonności jego produkcji, wszystkie w funkcji czasu etapu adsorpcji (dla ciśnienia adsorpcji 6 bar). Wykorzystując je poprawiono receptę pracy i dla ciśnienia adsorpcji – 6 bar i wskazanej długości etapu adsorpcji określono charakterystyki energochłonności i czystości w funkcji wydajności separacji tlenu. Wynika z nich, że przy wydajności $0,8m_n^3$ energochłonność wynosi 2100 kWh/tO₂ o czystości > 95%, zaś przy wydajności 1m³/h wielkości te wynoszą odpowiednio 1680 kWh/tO₂ i 90%. W dalszym ciągu określono potrzeby własne instalacji, co pozwoli określić energochłonność netto produkcji tlenu. Badania układu pracującego w technologii VPSA pokazano w rozdziale 5.2. Przeprowadzono je na instalacji zbudowanej przez firmę Eurol. Wyznaczono charakterystyki wydajności od energochłonności i czystości. Dla wydajności ok. 52m³/h uzyskano tutaj czystość 90% i energochłonność ok. 680 kWh/tO₂. Badanie technologii PTSA zawiera rozdział 5.3. Przekształcono tutaj instalację PSA do pracy w technologii PTSA, polegało to głównie na wyposażeniu zbiorników adsorpcyjnych w grzałki dostarczające ciepło do procesu desorpcji (regeneracji). Mgr inż. T. Banaszek wyznaczył energochłonność procesu separacji PTSA przy różnych ciśnieniach adsorpcji i porównał ją z minimalną energochłonnością wyznaczoną w rozdziale 2.4.

Możliwości skojarzenia procesów sorpcyjnych z instalacjami energetycznymi Autor przedstawił w rozdziale 6. Pokazuje tutaj zarówno schematy ideowe tego skojarzenia jak i ilustracje na wykresach T-s. Punktem wyjścia jest metoda PSA gdzie skojarzenie polega na dostarczeniu energii elektrycznej z bloku, dalej metoda TSA – wykorzystująca ciepło odpadowe z bloku. W przypadku metody PTSA Autor pokazuje

dwa sposoby integracji – pierwszy „klasyczny kogeneracyjny”, drugi dodatkowo z pompą ciepła. T. Banaszkiewicz w tym punkcie porównuje wymienione sposoby integracji wykorzystując do tego spadek sprawności wytwarzanej energii elektrycznej bloku energetycznego.

Rozdział 7 zawiera jednostronicowe podsumowanie, a rozdział 8 wnioski w podobnej objętości. Prace kończy spis literatury zawierający 74 pozycje.

C. Ocena rozprawy

Zdaniem recenzenta tematyka pracy jest ważna i interesująca. Praca jest napisana przejrzysto i podzielona na logiczne, wynikające z układu pracy rozdziały. Wymagała od Autora dobrego opanowania zagadnień teoretycznych związanych zarówno z termodynamiką jak i energetyką oraz zagadnień związanych z przeprowadzeniem eksperymentu, opracowaniem i analizą wyników.

Energochłonność produkcji tlenu ma zasadnicze znaczenie dla sprawności bloku energetycznego typu oxy. Dlatego punktem wyjścia do analiz energetycznych jest wyznaczenie minimalnej pracy separacji tlenu z powietrza. Autor w pracy przedstawił metodologię wyznaczania minimalnej pracy rozdziału powietrza na złożu zeolitowym 5A. Wykorzystując ją określił wpływ ciśnienia adsorpcji i temperatury regeneracji złoża na energochłonność separacji tlenu.

Obliczenia minimum termodynamicznego separacji tlenu na złożu zeolitowym 5A T. Banaszkiewicz wykonuje na podstawie izoterm adsorpcji azotu oraz tlenu z powietrza, wykorzystując do tego umiejętnie model DSL (Double-Side-Langmuir). Niezbędne parametry tego modelu wyznacza iteracyjnie, wykorzystując do tego punkty pomiarowe izoterm adsorpcji czystego tlenu i azotu na zeolicie 5A znalezione w literaturze przedmiotu. Wyznaczone parametry znajdują potwierdzenie u innych badaczy.

Ważnym osiągnięciem pracy jest także zaprojektowanie i budowa (udział w tym Autora) adsorpcyjnego generatora tlenu pracującego w technologii PSA, następnie przekształcenie tego stanowiska do pracy w technologii PTSA.

Wyznaczone na w/w stanowiskach charakterystyki są istotnym rozszerzeniem i uzupełnieniem wiedzy podawanej w literaturze przedmiotu. W szczególności dotyczy to:

- a) badania (PSA) wpływu różnicy pomiędzy ciśnieniem adsorpcji, a ciśnieniem w zbiorniku produktu na czystość separowanego tlenu
- b) wpływu czasu adsorpcji na energochłonność procesu, czystość tlenu i wydajność procesu.

Opracowanie przez Autora nowej procedury pracy generatora PSA ma także znaczenie użytkowe, bowiem pozwala wyznaczyć warunki jego pracy z minimalną energochłonnością przy zachowaniu wymaganej czystości produkowanego tlenu i odpowiedniej wydajności.

Uczestnictwo T. Banaszkiwicza w badaniach technologii VPSA na stanowisku zbudowanym przez firmę Eurol (i wyznaczenie tych samych charakterystyk co dla technologii PSA i PTSA) umożliwiło T. Banaszkiwiczowi przeprowadzenie kompleksowej oceny rozważanych procesów adsorpcji.

Zaproponowanie i dyskusja przez Autora metod integracji adsorpcyjnych generatorów tlenu z blokiem energetycznym (lub układami energetycznymi) jest bardzo ważne ze względu na całkowitą efektywność energetyczną.

D. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

- odnośnie równania (2.14) na stronie 34. Nie można używać tego samego symbolu do oznaczanie różnych wielkości po lewej i prawej stronie równania - bo z tego wynika, że $n_{pow} = n_{N_2}$
- równanie 2.17 jest z błędem, co w konsekwencji wpływa także na błąd w równaniu 2.18 (widać to po jednostkach w liczniku w rów. 2.18).
- nieprawidłowy podpis pod rysunkiem 2.23 oraz 2.25. Proponuję zmianę opisu (rys. (2.25) na: "Ciepło potrzebne do regeneracji złoża..."

- Nie należy dodawać w prosty sposób energochłonności związanej ze sprężaniem do ciepła wymaganego do desorpcji.
- Autor na str. 62 napisał "Parametry równań odpowiadają znalezionym w literaturze..." - jak bardzo odpowiadają, jakie są różnice. Proszę to wyjaśnić.
- Autor na str.66 napisał "W ramach badań laboratoryjnych zaprojektowano zbudowano adsorpcyjny generator tlenu" - Kto to zrobił i jaki jest w tym udział Doktoranta?
- Dlaczego nie oszacowano potrzeb własnych instalacji VPSA (rozdział 5.2) tak jak to zrobiono dla instalacji PSA?
- Autor na str.84 napisał "W tym celu zaprojektowano przekształcenie aparatury PSA do pracy w technologii TSA i PTSA." - co to znaczy i kto to zrobił - jaki jest w tym udział Autora.
- Lepiej byłoby rozbić energochłonność całkowitą pokazaną w tabeli 5.4 dla technologii PTSA na związaną ze sprężaniem i ciepłem (rozdział 5.3)
- Brak opisu metodologii pomiaru dla instalacji TSA (rozdział 5.3)
- Brak informacji o czystości produktów w technologii TSA.
- Dla obliczeń pokazanych na rys. 6.1 i 6.2 brakuje ciśnienia pary aby można było wykresy te wykorzystać (lub należy podać inne założenia).
- Proszę o wyjaśnienie (szczegółowe) sposobu porównania efektów sprzęgnięcia tlenowni, co pokazano w tabeli 6.1. Co znaczy spadek wytwarzania energii elektrycznej i jak go wyznaczano?
- na str.97 Autor napisał " W porównaniu z procesem PSA, procesy PTSA, poprawiają nieznacznie ekonomikę separacji tlenu." - przecież Autor nie badał ekonomiki procesów.

Uwagi szczegółowe:

str.3 oraz 47 - brak w numeracji rozdziałów 3.2.4. i 3.2.5.

str.14 - wzory 2.1 oraz 2.2 - albo x albo y. Ponadto brakuje objaśnienia w wykazie oznaczeń.

str.15 - wzór 2.5 - brak wyjaśnienia dla indeksu AR.

str.19 - 3 w od dołu - błędnie gramatycznie sformułowane zdanie - "...efektywność separacji tlenu tego zeolity względem....."

str.21 - podpis pod rys. 2.6 - przy wielkościach odnoszących się do temperatury i ciśnienia powinny być oznaczenia w indeksach - tak jak na wykresie.

str.22 - rys.2.8 - w podpisie błąd - zdaje się, że to powiększenie rys.2.7 a nie rys.2.4.

str. 38 - błąd w jednostce - jest kWh/t O₂, powinno być kWh/t O₂.

str.44 - wykresy przedstawione na rys.3.3 nie są kompatybilne.

str.58 - 2 wers od dołu - powinien być wzór 4.1 a nie 5.1 - takiego nie ma.

str.59 - 3 wers od dołu - brakuje literki "w" przed słowami "celu uzupełnienia".

str.66 - 7 wers od dołu - brakuje literki "W" na początku zdania "przypadku instalacji.."

- brakuje znaków interpunkcyjnych w zdaniu "W ramach badań laboratoryjnych zaprojektowano zbudowano adsorpcyjny generator tlenu".

str.78 - 4 wers od dołu - w środku zdania wyraz "Energochłonność" powinien być z małej litery.

str.82 - 5 wers od góry - napisano "... operacja płukania tlenem" - czy na pewno tlenem?

str.89 - Napisano "Sprawność obiegu Carnota przy odbiorze pewnego procenta pary przegrzanej można wyrazić wzorem". To nie jest dobra sentencja. Należy ją zastąpić np. "... przy wykorzystaniu części pracy wykonanej przez silnik do innych celów"

str.90 - pomiędzy wykresami - powinno być "z wykresu" a nie "w wykresu.

str.95, 99 - jest podana jednostka m^3/h - czy chodzi o m^3_n ? W wielu miejscach pracy Autor używa jednostki m^3O_2/h - należałoby zaznaczyć, że chodzi o m^3_n .

str.95 - ostatnie zdanie "świetnie nadaje się do porównywania efektywności..." - nie zgadzam się z tym stwierdzeniem.

E. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska Pana *mgr inż. Tomasza Banaszkiwicza* pt. "*Procesy adsorpcji w technologii separacji powietrza atmosferycznego*" zawiera sformułowanie ważnych w dyscyplinie „budowa i eksploatacja maszyn” zadań badawczych, ich rozwiązanie i dyskusję wyników.

Postawione zadania, zakres i cele Autor rozwiązał posługując się właściwymi metodami. Praca ma także ważne znaczenie użytkowe. Na szczególne podkreślenie zasługuje umiejętne połączenie modelowania i symulacji obliczeniowych procesu separacji tlenu z powietrza atmosferycznego metodami adsorpcyjnymi z badaniami eksperymentalnymi tego zjawiska. Te ostatnie wymagały od T. Banaszkiwicza zarówno umiejętności projektowania, budowy i prowadzenia stanowisk badawczych oraz prowadzenia pomiarów, jak i umiejętności opracowania i interpretacji wyników. Kompozycja rozprawy tworzy logicznie przemyślaną i spójną całość potwierdzającą dojrzałość Autora do prowadzenia badań naukowych.

Uważam, że opiniowana praca mgr inż. Tomasza Banaszkiwicza w pełni spełnia ustawowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim w odpowiednich przepisach i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

