dr hab. inż. Robert Cherbański, prof. uczelni
Zakład Kinetyki i Termodynamiki Procesowej
Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej
Politechnika Warszawska,
e-mail: robert.cherbanski@pw.edu.pl

Warszawa, 13 września 2023 r.

# Recenzja

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Kowalskiego**
**pt. „Analiza teoretyczno-doświadczalna procesu regeneracji węgli aktywnych metodą ogrzewania rezystancyjnego w cyklicznych układach adsorpcyjnych"**

## Podstawa opracowania

Podstawą opracowania tej recenzji jest pismo Pani prof. dr hab. inż. Zofii Lendzion-Bieluń – Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Chemiczna w Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym w Szczecinie z 21 lipca 2023 r. oraz uchwała Rady przegłosowana na posiedzeniu 12 lipca 2023 r. w sprawie powołania recenzentów rozprawy doktorskiej mgra inż. Krzysztofa Kowalskiego.

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska pt. „Analiza teoretyczno-doświadczalna procesu regeneracji węgli aktywnych metodą ogrzewania rezystancyjnego w cyklicznych układach adsorpcyjnych" mgr. inż. Krzysztofa Kowalskiego została wykonana w Katedrze Inżynierii Chemicznej i Procesowej na Wydziale Technologii i Inżynierii Chemicznej Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, pod kierunkiem dr hab. inż. Elżbiety Gabruś, prof. ZUT oraz dr inż. Doroty Downarowicz jako promotora pomocniczego.

## Informacje o Doktorancie

Z informacji przedstawionych w pracy wynika, że mgr inż. Krzysztof Kowalski był uczestnikiem stacjonarnych studiów doktoranckich w latach 2017-2023. W roku akademickim 2017/2018 Doktorant pobierał zwiększone stypendium doktoranckie z dotacji podmiotowej na dofinansowanie zadań projakościowych przyznawanych doktorantom ZUT. W kolejnych latach, tj. w r.a. 2018/2019, 2020/2021 i 2022/2023 otrzymywał stypendium JM Rektora dla najlepszych doktorantów. Od 1.10.2018 do 30.09.2020 mgr inż. Krzysztof Kowalski był zatrudniony na stanowisku asystenta badawczo-dydaktycznego w Zakładzie Inżynierii Procesowej, Informatyki Procesowej i Ochrony Atmosfery na Wydziale Technologii i Inżynierii Chemicznej ZUT w Szczecinie. W okresie od 1.10.2020 do 31.10.2020 Kandydat

był zatrudniony na stanowisku technika, a od 1.11.2020 na stanowisku starszego technika. W kadencji 2020–2024 pełni funkcję pełnomocnika dziekana WTiICh ds. promocji.

Dorobek publikacyjny Doktoranta obejmuje cztery współautorskie artykuły w czasopismach z tzw. listy filadelfijskiej, przy czym w dwóch z nich Doktorant jest pierwszym autorem. Doktorant wymienia również swoje współautorstwo w sześciu rozdziałach w monografiach naukowych. W mojej ocenie pozycja nr 2 z tego wykazu, tj. K. Kowalski, E. Gabruś „Metody regeneracji adsorbentów po adsorpcji par związków organicznych" w Postępy w Technologii i Inżynierii Chemicznej 2020 nie spełnia wymogu monografii (0,5 arkusza wydawniczego) z uwagi na zbyt małą liczbę stron (str. 40–41). Praca ta powinna być zaliczona jako streszczenie. Doktorant wykazał współautorstwo w sześciu streszczeniach zamieszczonych w materiałach konferencyjnych. Aktywność konferencyjną mgra inż. Krzysztofa Kowalskiego oceniam pozytywnie. Jego dorobek konferencyjny obejmuje dwa referaty oraz dwie prezentacje online, przedstawione na sympozjach krajowych, oraz 2 plakaty na konferencjach międzynarodowych.

## Tematyka pracy i zawartość

Tematyka pracy doktorskiej jest związana z problemem zanieczyszczenia powietrza będącego skutkiem emisji lotnych związków organicznych (LZO). Chociaż bieżąca aktywność różnych międzynarodowych organizacji i gremiów koncentruje się raczej na ograniczaniu emisji ditlenku węgla i metanu, które w głównej mierze odpowiadają za efekt cieplarniany, to należy sobie zdać sprawę z tego, że LZO mają w tym negatywnym zjawisku swój znaczący, niechlubny udział. Niekontrolowana emisja LZO stanowi również, a może przede wszystkim, bezpośrednie zagrożenie dla zdrowia ludzi (działania toksyczne, kancerogenne i mutagenne). Z tej perspektywy wybór tematyki pracy jest w mojej ocenie bardzo aktualny i uwzględnia ważny interes społeczny.

Adsorpcja jest klasyczną i szeroko stosowaną metodą oczyszczania powietrza z LZO. W warunkach przemysłowych jest ona prowadzona naprzemiennie z termiczną regeneracją złoża adsorbentu i jest realizowana w sposób cykliczny. Główną wadą procesu adsorpcji zmiennotemperaturowej (ang. *Temperature Swing Adsorption*) jest wysoka energochłonność etapu regeneracji. Rosnące ceny i malejąca dostępność konwencjonalnych nośników energii sprawiają, że coraz częściej szuka się alternatywnych metod regeneracji złoża adsorbentu, które potencjalnie mogą obniżyć koszty prowadzenia całego procesu. Dobrymi przykładami takich nowatorskich metod są: mikrofalowa, indukcyjna czy metoda bezpośredniego ogrzewania rezystancyjnego (ang. *Electrothermal Temperature Swing Adsorption, ETSA*), badana

w ocenianej pracy. Cechą wspólną wymienionych metod jest produkcja ciepła bezpośrednio w złożu adsorbentu. W przypadku metody ETSA ciepło jest wytwarzane w złożu w wyniku przepływu przez nie prądu elektrycznego, zgodnie z prawem Joule'a-Lenza. Biorąc pod potencjalną możliwość obniżenia kosztów procesu, przedstawiona do oceny praca doktorska ma również ważne znaczenie ekonomiczne i utylitarne.

Praca doktorska liczy 130 stron i ma układ klasyczny. Pracę podzielono na trzy główne części: przegląd piśmiennictwa, część doświadczalną oraz część obliczeniową. W rozdziale zatytułowanym „*Przegląd piśmiennictwa*" Doktorant sklasyfikował metodę ETSA na tle innych cyklicznych metod adsorpcji zmiennotemperaturowej. Scharakteryzował proces ETSA oraz adsorbenty stosowane w procesie, omówił regenerację adsorbentu i przedstawił obszary badań nad cyklicznym procesem ETSA. Przedstawił również czynniki decydujące o efektywności regeneracji elektrotermicznej. W tej przeglądowej części pracy Doktorant zaprezentował również modele równowagi adsorpcyjnej oraz równania bilansu masy i energii.

Przeprowadzone studia literaturowe pozwoliły Doktorantowi nabrać przekonania, że zdecydowana większość opublikowanych prac dotyczy zastosowania metody ETSA do regeneracji tkaninowych oraz monolitycznych węgli aktywnych, natomiast mała ich część dotyczy węgli granulowanych (GAC). Wobec powyższego Doktorant sformułował cztery tezy badawcze i zaproponował obszerny program badań doświadczalnych w celu udowodnienia, że: 1) właściwości elektryczne i adsorpcyjne granulowanych węgli aktywnych decydują o możliwości ich regeneracji metodą ETSA; 2) sposób prowadzenia etapu adsorpcji, a w szczególności dopuszczalne wartości stężenia adsorbatu wpływają na strukturę nasycenia złoża adsorbentu, co przekłada się na równomierność ogrzewania złoża, stopień desorpcji i energochłonność procesu; 3) dobór parametrów operacyjnych procesu regeneracji wpływa na szybkość desorpcji oraz efektywność energetyczną procesu; 4) poprawne przewidywanie wydajności wewnętrznego źródła ciepła, jakim jest ogrzewane rezystancyjnie złoże węgla aktywnego, wymaga wyznaczenia zależności rezystancji jako funkcji temperatury i stężenia adsorbatu w fazie stałej.

Tezy postawione przez Doktoranta wyznaczyły kierunek jego dalszych prac doświadczalnych i obliczeniowych. W nawiązaniu do pierwszej z tez Doktorant przeprowadził badania wstępne, które polegały na wytypowaniu dwóch typów granulowanych węgli aktywnych o najkorzystniejszych właściwościach elektrycznych i wysokiej pojemności adsorpcyjnej względem izopropanolu (IPA) i 2-butanolu (2BUT), wybranych reprezentantów alkoholi alifatycznych. Na podstawie wyników badania kinetyki ogrzewania złoża adsorbentu Doktorant wytypował do dalszych badań dwa (Supersorbon K40 oraz BPL 4x6) spośród

czterech komercyjnych węgli aktywnych, które w najlepiej spełniały wymagania procesu ETSA. W ramach tego etapu prac Doktorant przeprowadził również badania zdolności adsorpcyjnych wybranych węgli. W tym celu posłużył się metodą analizy termograwimetrycznej. Badania przeprowadził w zakresie temperatur 20–120 °C, natomiast do opisu równowag adsorpcji wykorzystał wielotemperaturowe modele Sipsa, Totha, Dubinina-Raduszkiewicza (D-R) oraz niehomogeniczny Dubinina-Astachowa (DA1+DA2).

Żeby uzasadnić drugą tezą Doktorant wykonał badania w stanowisku pomiarowym, którego głównym elementem była szklana kolumna adsorpcyjna o średnicy 42 mm i wysokości złoża 160 mm. Wielkość adsorpcji oraz stopień desorpcji były obliczane na podstawie pomiarów wagowych kolumny przed i po zakończeniu adsorpcji/regeneracji. W ramach tego etapu prac Doktorant pokazał wpływ rodzaju adsorbatu (IPA i 2-BUT) na rezystancję złoża adsorbentu SK40 w trakcie jego regeneracji. Po regeneracji Doktorant zarejestrował przyrost rezystancji względem rezystancji początkowej dla układu SK40-IPA oraz spadek dla układu SK40-2BUT. Doktorant zbadał również wpływ początkowego stężenia IPA i 2BUT w fazie stałej na opór elektryczny obu węgli aktywnych i stwierdził spadek rezystancji wraz ze wzrostem stężenia. Przy wzroście początkowego stężenia adsorbatu w złożu malało zapotrzebowanie na energię elektryczną oraz rósł stopień desorpcji. Nowatorskim etapem badań było określenie wpływu struktury nasycenia złoża adsorbentu, rozumianej jako stosunek $C/C_0$ na wylocie kolumny po etapie adsorpcji. Doktorant udowodnił, że struktura nasycenia złoża ma istotny wpływ na pojawianie się miejscowych przegrzań w złożu. W pobliżu górnej elektrody wynosiło ono nawet 50 °C dla układu SK40-IPA przy $C/C_0$ równym 25%. Może to mieć istotne znaczenie dla termicznej stabilności adsorbatów oraz potencjalnej degradacji samego złoża węgla aktywnego. Uzyskane wyniki pokazały, że całkowite wysycenie złoża adsorbentu na etapie adsorpcji wpływa na obniżenie zapotrzebowania na energię elektryczną w etapie regeneracji złoża.

Żeby udowodnić trzecią tezę Doktorant zbadał wpływ kilku parametrów operacyjnych na szybkość desorpcji oraz efektywność energetyczną procesu. Jednym z tych parametrów jest napięcie elektryczne. Wyższe wartości napięcia zwiększają szybkość desorpcji, chociaż mogą powodować miejscowe przegrzania w złożu. W momencie włączenia systemu regulacji temperatury Doktorant zarejestrował zużycie energii elektrycznej na podobnym poziomie dla obydwu napięć. W tym etapie badań Doktorant ocenił również wpływ izolacji termicznej adsorbera na przebieg i efektywność regeneracji, a także wpływ wielkości i wzajemnej konfiguracji kierunków przepływu gazu (współprąd/przeciwprąd) w etapie adsorpcji i desorpcji. Zastosowanie izolacji wpłynęło głównie na obniżenie wskaźników

zapotrzebowania na energię elektryczną (obliczone dla $C/C_0$ = 0,8) o 12% dla SK40-IPA oraz 15% dla BPL-2BUT. Wielkość strumienia gazu wymywającego nie miała istotnego wpływu na temperaturę średnią złoża, a jedynie na temperaturę w pobliżu elektrody górnej po osiągnięciu temperatury regulacji. Wpływ konfiguracji przepływu wpływał głównie na obniżenie zapotrzebowania na energię elektryczną o ok. 10% po 45 min regeneracji w przypadku przepływu współprądowego.

Udowodnienie czwartej tezy wymagało od Doktoranta opracowania matematycznej zależności oporności właściwej złoża od temperatury i stężenia adsorbatu w fazie stałej. Zaproponowane równania wielomianowe dla układów SK40-IPA i BPL-2BUT dały zadawalającą zgodność wyników obliczeń i doświadczeń. Doktorant sformułował równanie dla wydajności wewnętrznego objętościowego źródła ciepła i zweryfikował je w oparciu o wyniki doświadczalne. Otrzymał dobrą jakościową i gorszą ilościową zgodność wyników; zidentyfikował również prawdopodobną przyczynę słabszej zgodności wyników obliczeń i doświadczeń dla układu SK40-IPA.

Doktorant sporządził również bilans ciepła dla etapu regeneracji. Obliczenia przeprowadzone dla przykładowego pomiaru z izolacją termiczną pokazały strukturę zużycia energii: 25% - ciepło jawne, ok. 9% - ogrzanie gazu, ok. 13% - ciepło desorpcji, ok. 53% - straty do otoczenia.

## Ocena formalna rozprawy doktorskiej

Praca jest napisana dość poprawnym językiem naukowym, który generalnie można określić jako zrozumiały, zwięzły, logiczny i obiektywny. Praca zawiera jednak pewną liczbę uchybień utrudniających zrozumienie tekstu. Są to głównie błędy składniowe, interpunkcyjne (dość liczne), fleksyjne oraz zbyt dosłowne tłumaczenia anglojęzycznych tekstów źródłowych (pojedyncze).

Rysunki i wykresy są czytelne (wielkość znaczników, grubość linii, rozmiar czcionki), a ich forma graficzna jest staranna. Popełnione uchybienia dotyczą głównie braku odpowiednich oznaczeń rysunków (np. a i b) w przypadku, gdy są one prezentowane grupowo (np. Rys. 7.14, 7.15, 7.22, 7.25). Uważam, że porównywanie poszczególnych krzywych na wykresach byłoby dużo łatwiejsze i intuicyjne, gdyby kolory krzywych były takie same dla porównywanych przypadków (np. Rys. 7.26 i Rys. 7.27 oraz Rys. 7.28). Niektóre ilustracje (Rys. 2.3–2.8) sprawiają wrażenie bezpośrednio przeniesionych z prac innych autorów, a wstawienie do nich polskich objaśnień jest w moim odczuciu niewystarczające, żeby przyjąć

za uzasadniony komentarz Autora – „na podstawie [lit.]". Rys. 6.4 (b) to raczej ilustracja, a nie schemat, który w tym przypadku byłby lepszy.

Wyniki zaprezentowane w kilku tabelach (Tab. 7.2, 7.3, 7.5, 7.6, 8.1 oraz Tab. 7.2 w załączniku Z2) zostały przedstawione dla serii pomiarowych A, B i C, bez dokładnego objaśnienia znaczenia tych symboli w podpisach tabel. Taki skrócony opis utrudnia analizę wyników i wymaga ponownego szukania w tekście pracy znaczenia tych oznaczeń.

Praca zawiera dość dużą liczbę błędnych odnośników do równań (np. 5.6 zamiast 3.1, 5.10 zamiast 3.4, 5.11 zamiast 3.6, 5.13 zamiast 3.8 w Tab. 6.3), rysunków (np. Rys. 7.14 zamiast Rys. 7.16 na str. 84, Rys. 7.17 i 7.18 zamiast Rys. 7.19 i Rys. 7.20 na str. 86, czy Rys. 7.19 i 7.20 zamiast Rys. 7.21 i 7.22 na str. 87), tabel (Tab. 3.1 zamiast 5.1 na str. 58, Tab. 4.2 zamiast 8.1 na str. 96)

Symbole zostały objaśnione w pracy w dwojaki sposób, tj.: bezpośrednio pod równaniami i dodatkowo w spisie symboli na końcu pracy (np. równania równowag adsorpcyjnych, 3.1–3.10) albo jedynie w spisie symboli (równania bilansu masy i energii, 3.9–3.11). Niestety dość duża liczba symboli nie została objaśniona w pracy, np.: $G_i$ w równaniach (3.9 i 3.11), $c_a$, $c_s$, a, $\rho_U$, $\Delta H$, $k_w$ w równaniu (3.11), $Q_G$, $Q_A$, $Q_U$ w równaniu (9.1). W objaśnieniu pod równaniem (9.2) występują symbole, które nie zostały użyte (np. $m_Z$, $q_{max}$, $E_{loss}$).

## Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Rozprawę doktorską Pana mgr. inż. Krzysztofa Kowalskiego oceniam dobrze. Uwagi krytyczne, które zgłaszam do pracy, dotyczą głównie: podziału i doboru treści, błędów merytorycznych oraz uchybień o charakterze formalnym i porządkowym; te ostatnie omówiłem powyżej.

Struktura pracy ma układ klasyczny, w którym wyodrębniono część teoretyczno-przeglądową, część doświadczalną i część obliczeniową. Uważam jednak, że podział treści na część teoretyczno-przeglądową, liczącą 40 stron, część doświadczalną, liczącą 42 strony, i obliczeniową, liczącą 10 stron, jest zachwiany. Część teoretyczno-przeglądowa zawiera niepotrzebne informacje, które nie mają bezpośredniego związku z tematem pracy – część zatytułowana „*Przegląd prac nad adsorpcyjnym usuwaniem $CO_2$*" (str. 23–28) – i mogłyby być usunięte z pracy bez utraty jej spójności. Równania bilansu masy i energii, które zostały zaprezentowane w rozdziale o tym samym tytule (rozdz. 3.2) nie zostały wykorzystane w części obliczeniowej pracy i dlatego ich wprowadzanie do pracy jest niepotrzebne. Część doświadczalna jest najsilniejszą częścią pracy. Zaprezentowano w niej dość szeroki i ambitny program badań wraz z wynikami. Niestety część obliczeniowa jest bardzo skromna i jedynie

w niewielkim stopniu wykorzystuje obszerny zbiór wyników eksperymentalnych. Ta część pracy wzbudziła zdecydowanie mój największy niedosyt.

W trakcie lektury pracy nasunęły mi się następujące pytania o charakterze merytorycznym i dyskusyjnym, które będę chciał zadać Doktorantowi w trakcie publicznej obrony.

1. Całkowita energia elektryczna dostarczana do złoża adsorbentu została zapisana w równaniu (2.6) jako suma chwilowych mocy grzejnych oraz jako suma ilorazów kwadratów chwilowych napięć i oporów elektrycznych w równaniu (2.7), co jest ewidentnym błędem (z równań wynika, że energia elektryczna ma wymiar mocy elektrycznej). Ponadto w poprawionych równaniach znak sumy powinien być zastąpiony znakiem całki, zaś symbole $I$ i $U$ powinny być opisane jako wartości skuteczne w przypadku zastosowania prądu zmiennego jednofazowego.
2. Z informacji przedstawionych na stronie 58. wiadomo, że stężenia adsorbatów w fazie gazowej były mierzone metodą chromatograficzną. Z informacji przedstawionych na stronie 70. wiadomo również, że w celu określenia zawartości rozpuszczalnika w złożu kolumnę ważono przed i po zakończeniu adsorpcji i regeneracji. Te dwie niezależne metody pomiarowe pozwalają na sprawdzenie, czy wyniki uzyskane metodą chromatograficzną są zgodne z pomiarem wagowym. Czy Doktorant podjął taką próbę?
3. W tabeli 6.1 przedstawiono powierzchnie właściwe BET oraz całkowite objętości porów dla badanych węgli aktywnych. Dla wszystkich badanych adsorbentów wartości tych parametrów są bardzo podobne. Wpływ struktury nasycenia złoża na przebieg regeneracji pokazuje, że w określonych przypadkach mogą pojawiać się w złożu lokalne przegrzania. Czy taki lokalny wzrost temperatury może powodować zmianę struktury wewnętrznej węgla aktywnego? Jeżeli tak, to jaki wpływ może mieć taka zmiana struktury wewnętrznej na przebieg regeneracji?
4. Krzywe przedstawione na Rys. 6.2 pokazują, że w przypadku trzech węgli aktywnych średnia temperatura złoża jest wyraźnie wyższa niż temperatura regulacji równa 120 °C. Takie zachowanie układu może wskazywać na pewien rozkład temperatur w trakcie ogrzewania świeżego złoża adsorbentu. Doktorant stwierdził również obecność miejscowych przegrzań w przypadku niejednorodnej struktury nasycenia złoża po etapie adsorpcji. Czy te dwa nakładające się na siebie efekty mogą zostać rozdzielone?

5. Na Rys. 6.5 przedstawiono izotermy adsorpcji dla różnych temperatur z zakresu 20–120 °C. Punkty doświadczalne zostały opisane w pracy modelem niehomogenicznej izotermy adsorpcji Dubinina-Astachowa w przypadku układów SK40-IPA, SK40-2BUT oraz BPL-IPA, oraz modelem izotermy Sipsa dla układu BPL-2BUT. Maksymalne pojemności adsorpcji w temperaturze odniesienia $T_0$ dla układu BPL-IPA (izoterma Sipsa) mają takie same wartość w Tab. 6.3 oraz na Rys. 6.5 (c). Z tego wynika, że Doktorant przyjął temperaturę odniesienia równą 293 K (brak informacji w pracy). Jeżeli tak jest, to dlaczego wartości maksymalnych pojemności adsorpcji w temperaturze odniesienia, które zostały przedstawione w Tab. 6.3 dla pozostałych układów (izoterma D-A), nie zgadzają się z odpowiednimi wartościami odczytanymi z Rys. 6.5 (a, b, d)? Proszę o komentarz i wyjaśnienie.
6. Na Rys. 7.1 przedstawiono profile mocy grzejnej w trakcie regeneracji złoża SK40 nasyconego parami IPA i 2-BUT. Zużycie energii elektrycznej dla tych układów przedstawiono na Rys. 7.3. Szacunkowe obliczenia pokazują całkowity brak zgodności krzywych dla układu SK40-IPA. Proszę o komentarz i wyjaśnienie.
7. Na Rys. 7.8 (a) przedstawiono kilka krzywych przedstawiających zależności oporu elektrycznego od temperatury średniej dla różnych stężeń izopropanolu w fazie stałej. Krzywa przedstawiona dla q=3,5 mol/kg zdecydowanie odbiega od trendu wynikającego z pozostałych krzywych. Co może być powodem takiego zachowania układu?
8. Na stronie 77. pracy Doktorant zdefiniował współczynnik efektywności energetycznej procesu, którego wartość jest wielokrotnie obliczana w pracy. Przyjmuje on wyższe wartości dla bardziej energochłonnych wariantów realizacji procesu ETSA. Czy w związku z tym ten parametr nie powinien być zdefiniowany jako współczynnik energochłonności procesu?
9. W Tab. 7.2 zostały zamieszczone wyniki pomiarów desorpcji dla układów SK40-IPA, SK40-2BUT oraz BPL-2BUT. Przedstawione tam wartości parametru $n_{80\%}$, zdefiniowanego jako liczba moli zdesorbowanego związku, są dużo niższe niż te które są obliczone z równania $(q_0-q_{RES})*m_{złoża}$, nawet dla pomiarów o podobnym stopniu desorpcji bliskim 80%. Proszę o wyjaśnienie i komentarz.
10. Komentując wyniki przedstawione na Rys. 7.27, Doktorant stwierdza, że „układ charakterystyk mocy grzejnej wskazuje, że w początkowym etapie procesu wytwarzana jest tym większa moc grzejna [,] im bardziej jednorodna jest struktura

nasycenia złoża po etapie adsorpcji". Ten komentarz jest niespójny z wynikami przedstawionym na tym rysunku. Proszę o wyjaśnienie i komentarz.

## Wniosek końcowy

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgra inż. Krzysztofa Kowalskiego stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego przedstawionego w pracy pt. „Analiza teoretyczno-doświadczalna procesu regeneracji węgli aktywnych metodą ogrzewania rezystancyjnego w cyklicznych układach adsorpcyjnych". Praca zawiera istotne elementy nowości, które zostały przedstawione przez Doktoranta w czterech tezach, a następnie udowodnione.

W swojej pracy mgr inż. Krzysztof Kowalski wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie inżynieria chemiczna. Doktorant wykorzystał swoją wiedzę między innymi do modelowania matematycznego równowag adsorpcji, analizy wpływu licznych parametrów na przebieg adsorpcji i desorpcji, sformułowania modelu matematycznego wydajności wewnętrznego objętościowego źródła ciepła i bilansowania ciepła. Doktorant wykazał się również umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, co udowodnił prowadząc badania doświadczalne w prototypowym stanowisku pomiarowym, jak również w wadze termograwimterycznej, oraz prawidłowo planując program badania i interpretując ich wyniki.

Stwierdzam, że praca doktorska mgra inż. Krzysztofa Kowalskiego spełnia wszystkie warunki określone w art. 13 ust. 1 ustawy z dnia 14.03.2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2016 r., poz. 882) i wnoszę do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Chemiczna Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie o dopuszczenie mgra inż. Krzysztofa Kowalskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

.....

(dr hab. inż. Robert Cherbański, prof. uczelni)