

Politechnika Śląska
Wydział Chemiczny
Katedra Fizykochemii i Technologii Polimerów
Ul. M. Strzody 9, 44-100 Gliwice

Gliwice, 25.04.2024

Dr hab. inż. Aleksandra Rybak, Prof. PŚ
Email: Aleksandra.rybak@polsl.pl

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr Guoqiang Li, zatytułowanej

" Polymeric membranes and mixed matrix membranes (MMMs) for carbon dioxide separation",

wykonanej pod kierunkiem Prof. dr hab. Wojciecha Kujawskiego
i promotora pomocniczego Dr hab. Joanny Kujawy, prof. UMK

Wybór tematyki pracy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska dotyczy zastosowania membran heterogenicznych do separacji CO₂. Do głównych problemów z jakimi muszą obecnie się borykać badacze należy w procesie membranowej separacji gazów z zastosowaniem membran polimerowych kwestia kompromisu pomiędzy właściwościami materiału, tj. albo dobrą przepuszczalnością gazu albo odpowiednią selektywnością, co znacznie ogranicza ich szersze zastosowanie w procesach separacji. Problem ten można rozwiązać poprzez stosowne modyfikacje, jak na przykład wprowadzenie do matrycy polimerowej nieorganicznych nanonapełniaczy, uzyskując w ten sposób membrany heterogeniczne (MMM, ang. mixed matrix membranes). W powyższej rozprawie Doktorant zaproponował zsyntetyzowanie membran o strukturze włókien kanalikowych (ang. hollow fibre) i płaskich membran heterogenicznych na bazie różnorodnych polimerów, jak PEI, PDMS/PEI i Pebax® 2533 oraz dodatków ZIF, MOF lub MOF@GO. Stworzone membrany zastosowano w separacji gazów CO₂ i N₂. Swoistą nowością zaproponowaną przez Doktoranta było zsyntetyzowanie nowych zmodyfikowanych nanonapełniaczy UiO-66-NH₂, zmodyfikowanego ZIF-8, MIL-101 (Fe) oraz kompozytowego MIL-GO, zastosowanie ich w membranach heterogenicznych i zoptymalizowanie parametrów procesu wytwarzania membran o strukturze włókien kanalikowych i płaskich oraz określenie ich wpływu na własności fizykochemiczne i transportowe otrzymanych membran.

Cel rozprawy

Cel i zakres rozprawy zostały przedstawione przez Doktoranta w 2 rozdziale pracy (strony 19-20). Przedmiotem powyższej pracy doktorskiej są membrany HFM z polieteroimidu (PEI), membrany TFC-HFM z PDMS/PEI, a także heterogeniczne HF-MMM i FS-MMM na bazie Pebax® 2533 oraz dodatków ZIF, MOF lub MOF@GO, przeznaczone do separacji CO₂. Główny cel niniejszej pracy doktorskiej został zrealizowany poprzez wytworzenie membran heterogenicznych o geometrii płaskiej i kapilarnej, a następnie zbadanie ich właściwości fizykochemicznych z wykorzystaniem technik analitycznych i instrumentalnych, m.in., SEM, FTIR-ATR, TGA oraz EDX. Przeanalizowano również wpływ dodatków ZIF, MOF lub MOF@GO na morfologię, strukturę, stabilność termiczną i wytrzymałość mechaniczną otrzymanych membran heterogenicznych. Membrany te poddano również analizie ich właściwości transportowych i wyznaczono charakterystyczne współczynniki dla czystych gazów CO₂ i N₂. Przedstawiony i zrealizowany cel oraz zakres badań świadczą o bardzo dobrym przygotowaniu Doktoranta do prowadzonych badań.

Strona edytorska pracy doktorskiej

Praca doktorska ma układ typowy i składa się z 204 stron, 12 rysunków i 4 tabel oraz pozostałych informacji w postaci załączonych artykułów. Została ona podzielona na jedenastce głównych rozdziałów, składających się z licznych podrozdziałów, poprzedzonych spisem symboli i skrótów. Pracę kończą bibliografia, składająca się z 108 prac, streszczenia w języku polskim i angielskim, lista artykułów składających się na dysertację, wykaz dotyczący doświadczenia zawodowego i dorobku naukowego Doktoranta, oświadczenia współautorów oraz kopie publikacji składających się na pracę doktorską.

W pierwszym rozdziale stanowiącym Wprowadzenie, składającym się z 2 podrozdziałów Doktorant przedstawił charakterystykę procesu membranowego rozdzielania gazów oraz zastosowania membran heterogenicznych do wydzielania CO₂ wraz z przedstawieniem zalet i ewentualnych problemów wymagających rozwiązania. W drugim podrozdziale Doktorant przedstawił 5 głównych celi pracy doktorskiej, a mianowicie wytworzenie membrany HFM z polieteroimidu (PEI) przy użyciu techniki przedzenia strumieniowego na sucho i na mokro, wytworzenie membrany TFC-HFM z PDMS/PEI metodą zanurzeniową oraz zbadanie wpływu różnych parametrów na te procesy, synteza i charakterystyka ZIF (czysty i zmodyfikowany ZIF-8), MOF (UiO-66-NH₂, MIL-101 (Fe)) i kompozytu MOF@GO (kompozyt MIL-GO) oraz wykorzystanie ich do wytwarzania i charakterystyki membran HF-MMM i FS-MMM na bazie Pebax® 2533, zbadanie wpływu dodatków ZIF, MOF lub MOF@GO na morfologię, strukturę, stabilność termiczną, wytrzymałość mechaniczną i właściwości transportu gazów przez otrzymane membrany heterogeniczne MMM.

Drugi rozdział pt. „Research conducted in this thesis” składał się z 2 podrozdziałów, dotyczących 2 głównych nurtów przeprowadzonych badań, a mianowicie wytwarzania i charakterystyki membran o strukturze włókien kanalikowych (HFM) oraz wytwarzania i charakterystyki płaskich membran heterogenicznych (FS-MMM) i opierał się na czterech publikacjach. Z czego pierwszy podrozdział pt. „Fabrication and characterization of hollow fiber membranes (HFMs)” składał się z 4 części. W pierwszej części pt. „A review of the development of hollow fiber membranes for gas separation processes (Publication I)”

Doktorant przedstawił wyniki dotyczące przeprowadzonego przeglądu literaturowego dotyczącego postępu w rozwoju HFM, TFC-HFM i HF-MMM w procesach separacji gazów z punktu widzenia wykorzystywanych materiałów polimerowych, metod wytwarzania membran i wydajności procesu separacji gazów z ich wykorzystaniem. Uzyskane dane stanowiły punkt wyjściowy dla powyższej pracy doktorskiej w wyniku przeprowadzonej analizy metod wytwarzania oraz najważniejszych czynników mających decydujący wpływ na strukturę rozważanych membran i ich skuteczność w separacji CO₂. Doktorant obszernie opisał wpływ różnych parametrów procesu przedzenia włókien na morfologię, strukturę, grubość warstwy selektywnej oraz przepuszczalność gazu i selektywność asymetrycznych membran HFM. W przypadku następnego rodzaju membran TFC-HFM przeanalizował wpływ warunków procesu powlekania przez zanurzenie i polimeryzacji międzyfazowej na ich morfologię, strukturę porów i przepuszczalność. Ponadto Doktorant przedstawił wpływ doboru materiału polimerowego i parametrów przedzenia na morfologię międzyfazową i skuteczność separacji gazów w dwuwarstwowych HFM. Z kolei w przypadku HFM-MMM szczegółowo omówił wpływ typów, zawartości i modyfikacji powierzchni nieorganicznych wypełniaczy na właściwości materiału i skuteczność separacji gazów przez MMM.

W drugiej części pt. "The effects of PEI hollow fiber substrate characteristics on PDMS/PEI hollow fiber membranes for CO₂/N₂ separation (Publication II)", Doktorant szczegółowo przedstawił wyniki dotyczące wpływu PEI na membrany z włókien kanalikowych PDMS/PEI przeznaczonych do separacji CO₂ i N₂. Doktorant stwierdził, że warunki przedzenia miały decydujący wpływ na strukturę i morfologię włókien kanalikowych. Natomiast stężenie PEI (20% roztwór) miało istotny wpływ na strukturę porów, grubość warstwy naskórkowej, zewnętrzną średnicę włókien i przepuszczalność gazów. Z kolei natężenie przepływu roztworu polimeru miało dominujący wpływ na grubość ścianki i grubość wewnętrznej warstwy. Zastosowanie dodatku NMP do roztworu spowodowało zmniejszenie długości palczastych przestrzeni oraz wzrost przepuszczalności CO₂ i N₂ (z 6500 GPU i 6000 GPU do 9000 GPU i 8000 GPU) w wyniku powstania bardziej porowatej powierzchni wewnętrznej i zmniejszenia grubości warstwy naskórkowej.

W trzeciej części pt. „Fabrication of polydimethylsiloxane (PDMS) dense layer on polyetherimide (PEI) hollow fiber support for the efficient CO₂/N₂ separation membranes (Publication III)” Doktorant zawarł dane dotyczące wytwarzania membran TFC-HFM z PDMS/PEI przy użyciu powlekania przez zanurzenie przeznaczonych do separacji CO₂/N₂. Podczas badań przeanalizował wpływ parametrów powlekania (stężenie roztworu, czas powlekania, temperatura utwardzania i liczba warstw powłoki) na właściwości permeacyjne badanych membran. Doktorant stwierdził, że na grubość warstwy PDMS wpływało stężenie roztworu powlekającego i czas powlekania. TFC-HFM wytworzone z 15% wag. roztworu PDMS i powlekane przez 10 minut wykazywały najwyższą skuteczność separacji gazów przy przepuszczalności CO₂ wynoszącej 51 GPU i selektywności CO₂/N₂ wynoszącej 21. Na wydajność separacji gazów niekorzystnie wpływał wzrost temperatury utwardzania i liczba warstw powłoki.

W czwartej części pt. "Thin film mixed matrix hollow fiber membrane fabricated by incorporation of amine functionalized metal-organic framework for CO₂/N₂ separation (Publication IV)" Doktorant przeszedł do omówienia wyników dotyczących wytwarzania i charakterystyki membran HF-MMM na bazie Pebax-UiO-66-NH₂/PP. W pierwszym etapie

uzyskano UiO-66-NH₂ metodą solwotermiczną, które następnie wprowadzono do roztworu powlekającego. W następnym kroku uprzednio powleczony nośnik w postaci PP włókien kanalikowych poddano procesowi pokrycia przez zanurzenie w 6% wag. roztworze Pebax® 2533 zawierającym cząstki UiO-66-NH₂. Tak wytworzone membrany HF-MMM zbadano pod kątem wpływu zawartości dodatku wypełniacza na morfologię, chemię powierzchni i właściwości przenikania gazów. Stwierdzono, że uprzednie powlekanie PP włókien kanalikowych 3% roztworem Pebax ułatwiło wytworzenie pozbawionej defektów warstwy selektywnej. Z kolei dodatek nanocząstek UiO-66-NH₂ do roztworu powlekającego Pebax® 2533 zmienił morfologię, chemię powierzchni i skuteczność separacji gazów na membranach HF-MMM na bazie Pebax®2533-UiO-66-NH₂/PP. Chropowatość wytworzonych powłok na membranach HF-MMM rosła, gdy ilość dodatku MOF wzrastała z 0 do 50% wag. Przy niskiej zawartości dodatku (5 i 10% wag.), zaobserwowano jednorodną dyspersję cząstek UiO-66-NH₂ w matrycy Pebax®2533. Agregację nanocząstek UiO-66-NH₂ zaobserwowano przy większych ilościach dodatku w matrycy Pebax® 2533 (15, 20 i 50% wagowych). Jeżeli chodzi o właściwości permeacyjne i selektywność otrzymanych membran, to przenikalność CO₂ rosła wraz z dodatkiem MOF, osiągając 30 GPU, podczas gdy dla azotu nastąpił wzrost po przekroczeniu 15% wagowych dodatku. Z kolei selektywność CO₂/N₂ wzrosła z 30 do 37 dla 10% dodatku, jednakże dla większych dodatków zarejestrowano znaczny jej spadek do 21 przy 50% dodatku MOF. Z tego wynika, że optymalne wyniki otrzymano dla membran z dodatkiem 10%, co wskazuje na obecność pozbawionej defektów cienkiej membrany heterogenicznej na nośniku z PP włókien kanalikowych.

Z kolei drugi podrozdział pt. „Fabrication and characterization of flat sheet mixed matrix membranes (FS-MMMs)” składał się z 2 części. W pierwszej z nich pt. „Evaluation of CO₂ separation performance with enhanced features of materials - Pebax®2533 mixed matrix membranes containing ZIF-8-PEI@[P(3)HIm][Tf₂N] (Publication V)” Doktorant przeprowadził ocenę skuteczności separacji CO₂ na membranach heterogenicznych opartych o Pebax®2533 i dodatek ZIF-8 zmodyfikowany PEI i cieczą jonową [P(3)HIm][Tf₂N]. Zmodyfikowany dodatek oraz membrany heterogeniczne poddano wnikliwej analizie różnymi technikami celem ustalenia wpływu przeprowadzonych modyfikacji na różne właściwości zsyntetyzowanych materiałów. Doktorant stwierdził, że dzięki obecności PEI i ILs w ZIF-8, pole powierzchni BET, całkowita objętość porów i średnia średnica porów zmniejszyły się po modyfikacji, podczas gdy struktura krystaliczna ZIF-8 została dobrze zachowana. Odkryto, że oddziaływanie pomiędzy grupami aminowymi w łańcuchach polimerowych PEI i Pebax poprawiają kompatybilność pomiędzy wypełniaczem a matrycą polimerową. Modyfikacja aminą i cieczą jonową ZIF-8 znacząco zwiększyła przepuszczalność CO₂ oraz idealną selektywność CO₂/N₂ otrzymanych membran (przekroczenie linii Robesona przy dodatku 15%), dzięki zwiększonemu powinowactwu CO₂ do wypełniaczy przez obecność cieczy jonowych oraz dodatkowym drogami transportu cząsteczek CO₂ z grup aminowych na PEI.

Druga część z kolei pt. „Pebax® 2533/PVDF thin film mixed matrix membranes containing MIL-101 (Fe)/GO composite for CO₂ capture (Publication VI)” dotyczyła charakterystyki płaskich membran heterogenicznych opartych o Pebax® 2533/PVDF i kompozytowy dodatek składający się z MOF w postaci MIL-101(Fe) i nanocząsteczek tlenku grafenu (GO) uzyskanych metodą solwotermiczną. Doktorant dokonał charakterystyki uzyskanego wypełniacza oraz membran heterogenicznych. W porównaniu z MIL-101 (Fe), pole

powierzchni BET i całkowita objętość porów kompozytu MIL-GO zmniejszyły się w wyniku pokrycia nieporowatymi nanocząsteczkami GO na MIL-101 (Fe). Wysoka ilość GO w procesie syntezy MIL-101 (Fe) może hamować wzrost kryształów MIL-101 (Fe). MMM poniżej dodatku 13% wag. wykazywały równomierną dyspersję cząsteczek wypełniacza, a powyżej tej wartości pojawiły się aglomeraty.

Najbardziej obiecujące wyniki uzyskano dla MIL-GO-2, gdzie przepuszczalność CO₂ (303 Barrera) i idealna selektywność CO₂/N₂ (24), były odpowiednio o 50% i 41% wyższe niż w przypadku membran homogenicznych. Wzrost ten może być związany z synergią efektu wyższego powinowactwa dodatku MIL-GO-2 do CO₂, dodatkowymi drogami transportu cząsteczek gazu zapewnianych przez MOF i krętych ścieżek dyfuzji N₂, stworzonych przez GO. Dalszy wzrost zawartości MIL-GO-2 w MMM do 13,0% wag. spowodował spadek przepuszczalności CO₂ i idealnej selektywności CO₂/N₂.

Rozdział trzeci „Conclusions” stanowi podsumowanie wyników przedstawionych w pracy doktorskiej.

Oceniana praca doktorska została napisana w sposób staranny, także pod względem językowym i stylistycznym.

W rozdziale czwartym Doktorant zamieścił informacje dotyczące przyszłych kierunków swojej pracy badawczej. Zaplanował kontynuację przeprowadzonych badań z zastosowaniem stosownej mieszaniny gazów wraz z parą nasyconą oraz wyznaczenia wydajności separacyjnej badanych membran oraz współczynników dyfuzji i sorpcji. Doktorant zaplanował również kontynuację prac nad strukturami metaloorganicznymi MOF, poprzez dalsze ich modyfikacje, a także analizę właściwości morfologicznych i transportowych membran heterogenicznych po ich wprowadzeniu.

Strona merytoryczna pracy doktorskiej

Uwagi i pytania:

Rozdział 1.1 The background review of the work

1. Czy linia Robeson jest miarodajnym wyznacznikiem zastosowania membran, biorąc pod uwagę fakt, że opiera się na danych eksperymentalnych, zmieniających się z czasem?

Rozdział 2.1.2 The effects of PEI hollow fiber substrate characteristics on PDMS/PEI hollow fiber membranes for CO₂/N₂ separation (Publication II).

1. Podczas analizy danych doświadczalnych Doktorant stosował analizę niepewności pomiarowych, ale w oparciu o jakie metody i czy dotyczyła pojedynczych pomiarów, czy ich serii bądź badań serii takich samych membran?

2. W jaki sposób dokonano wyboru NMP jako dodatku podczas produkcji włókien kanalikowych?

3. Jaki wpływ miały palczaste przestrzenie w strukturze na własności otrzymanych membran i czy próbowano wprowadzić modyfikacje mające na celu ich zmianę?

Rozdział 2.1.3 Fabrication of polydimethylsiloxane (PDMS) dense layer on polyetherimide (PEI) hollow fiber support for the efficient CO₂/N₂ separation membranes (Publication III).

1. W jaki sposób Doktorant wyznaczał grubość warstwy PDMS i jaka była optymalna dla zastosowań separacyjnych oraz w jakich warunkach ją wygenerowano?
2. Czy Doktorant zoptymalizował samodzielnie proces dip-coatingu membran o geometrii kapilarnej?

Rozdział 2.1.4 Thin film mixed matrix hollow fiber membrane fabricated by incorporation of amine functionalized metal-organic framework for CO₂/N₂ separation (Publication IV).

1. Z czego wynikał wybór PP włókien kanalikowych jako nośnika warstwy aktywnej i odejście od wcześniej wykorzystywanych PEI?
2. W jaki sposób Doktorant wyznaczał grubość warstwy selektywnej w membranach Pebax® 2533-UiO-66-NH₂, czy zsyntezował membrany o różnych grubościach warstwy selektywnej i jaki miało to wpływ na właściwości separacyjne tych membran?
3. Czy Doktorant pracował nad schematycznym przedstawieniem wiązań pomiędzy Pebax®2533 i stosowanym wypełnieniem UiO-66-NH₂, wykorzystując ich potwierdzoną strukturę chemiczną metodą FTIR?

Rozdział 2.2.1 Evaluation of CO₂ separation performance with enhanced features of materials - Pebax®2533 mixed matrix membranes containing ZIF-8-PEI@[P(3)HIm][Tf₂N] (Publication V).

1. Doktorant dokonał przedstawienia wyników dla membran z ZIF-8 na wykresie Robesona, porównując je z danymi literaturowymi. Czy dokonał również porównania dla pozostałych membran, jakie jest ich umiejscowienie względem tej linii i jakie jest ich potencjalne zastosowanie w rozwiązaniach przemysłowych?
2. Czy Doktorant próbował przedstawić schematycznie wiązania pomiędzy Pebax®2533 i stosowanym dodatkiem ZIF-8-PEI@[P(3)HIm][Tf₂N] z wykorzystaniem danych uzyskanych metodą FTIR?
3. W jaki sposób Doktorant stwierdził wzrost kompatybilności pomiędzy fazą organiczną i dodatkiem? Jaki bezpośredni wpływ miał on na właściwości fizykochemiczne i separacyjne membran?

Rozdział 2.2.2 Pebax® 2533/PVDF thin film mixed matrix membranes containing MIL-101 (Fe)/GO composite for CO₂ capture (Publication VI).

1. Czym kierował się Doktorant wybierając poszczególne składniki kompleksowego wypełniacza MIL-101 (Fe)/GO, w jaki sposób one oddziaływały między sobą oraz matrycą polimerową i jaki był ostatecznym efekt ich zastosowania w MMMs?
2. Czy zestaw do wylewania membran był oryginalny czy wyprodukowany przez zespół (brak danych odnośnie producenta)?
3. Doktorant opisał stosowane metody badania struktury i właściwości fizykochemicznych wyprodukowanych membran. Czy wykonał również badania wytrzymałości mechanicznej bądź parametrów reologicznych, biorąc pod uwagę ich znaczenie dla zastosowania membran?

Pozostałe

1. W pracy przedstawiono podstawowe informacje dotyczące pomiarów przenikalności gazów. Jak wyznaczono optymalny czas procesu stabilizacji układu podczas pomiarów i czym kierowano się przy doborze parametrów p i T ? Czy pomiary powtarzano dla serii membran?
2. Czy Doktorant badał trwałość analizowanych membran i możliwość ich wielokrotnego wykorzystania?
3. Które membrany spośród zsyntetyzowanych w pracy Doktorant wybrałby do zastosowań przemysłowych, jako najbardziej obiecujące i dlaczego? Jakie modyfikacje mogłyby być pomocne w aplikacji tych membran?
4. Czy Doktorant próbował zastosować modele (Maxwella, Bruggemana, Lewisa-Nielsena, Pala, Felske, itd.) służące do symulacji współczynników transportu gazów przez membrany heterogeniczne do opisu swoich danych eksperymentalnych?
5. Jakie optymalne warunki odnośnie membran kapilarnych i płaskich zaproponowałby Doktorant, biorąc pod uwagę wpływ parametrów na proces membranowy?
6. Czy Doktorant próbował przedstawić uzyskane wyniki na wykresie Robesona i ustalić ewentualne potencjalne zastosowanie zsyntetyzowanych membran do rozdzielania mieszanin badanych gazów na tle pozostałych membran?

Należy zaznaczyć, że Doktorant wykonał olbrzymią ilość pomiarów badania przenikania dla czystych gazów CO_2 i N_2 przez membrany heterogeniczne o geometrii płaskiej i kapilarnej, wiele syntez i modyfikacji zaproponowanych wypełniaczy oraz wiele analiz dotyczących własności fizykochemicznych zsyntetyzowanych wypełniaczy i membran, które pozwoliły mu na dogłębną interpretację uzyskanych wyników. Zaprezentowane w tekście liczne wykresy, rysunki i tabele pozwoliły na odpowiednie śledzenie toku rozumowania.

Oceniana praca doktorska kończy się podsumowaniem, gdzie Doktorant zawarł szereg wniosków dotyczących przedstawionych badań, z których najważniejsze, to stwierdzenie, że stężenie polimeru oraz skład i prędkość przepływu roztworu polimerowego miały wpływ na morfologię, strukturę porów i przepuszczalność membran na bazie PEI. Jednak, na przepuszczalność gazu, idealną selektywność CO_2/N_2 oraz strukturę membran (grubość warstwy PDMS), największy wpływ miało stężenie roztworu powlekającego i czas powlekania. W przypadku membran HF-MMM na bazie Pebax®2533 i płaskich membran MMM wprowadzenie odpowiedniej ilości wypełniacza do matrycy polimerowej umożliwiło jednocześnie polepszenie przepuszczalności CO_2 i wzrost selektywności idealnej CO_2/N_2 . Jednakże, w przypadku wysokich stężeń, następowała aglomeracja wypełniacza w matrycy polimerowej, co w negatywny sposób wpływało na wydajność separacji gazów. Dzięki modyfikacji ZIF-8 polietylenoiminą o rozgałęzionej strukturze, a następnie funkcjonalizacji cieczą jonową ([P(3)HIm][Tf₂N]) zachowano strukturę krystaliczną dodatku, jednakże powierzchnia właściwa, całkowita objętość porów i ich średnica uległy zmniejszeniu. Membrany heterogeniczne ZIF-8-PEI@IL/Pebax®2533 wykazywały lepszą kompatybilność pomiędzy fazą nieorganiczną i organiczną oraz znaczną poprawę wydajności separacyjnej. Zastosowanie jako dodatku MIL-GO-2 w matrycy Pebax jednocześnie zwiększyło przepuszczalność CO_2 i idealną selektywność CO_2/N_2 wytworzonych membran heterogenicznych MIL-GO-2-Pebax®2533/PVDF. Jest to prawdopodobnie spowodowane

ułatwionym transportem cząsteczek CO₂ z grup aminowych na PEI oraz zwiększonym powinowactwem CO₂ do cząstek wypełniaczy dzięki zastosowaniu cieczy jonowych i MIL-GO-2, a także stworzonym krętym ścieżkom dyfuzji przez wprowadzony tlenek grafenu.

Dorobek naukowy Pana mgr Guoqiang Li obejmuje 22 artykuły opublikowane w czasopismach z Listy JCR, 5 prezentacji posterowych i 10 prezentacji ustnych wygłoszonych podczas konferencji naukowych. Był beneficjentem 5 grantów, w tym 4 dla Młodych Naukowców w latach 2019-2022 i Grants4NCUStudents II edycja w 2021 oraz zdobył 5 nagród na wyjazdy naukowe. Brał również udział w 5 projektach badawczych oraz 5 stażach naukowych w Institute on Membrane Technology (ITM), Rende, Italy, Institute of Chemical Process Fundamentals, Prague, Czech Republic, Lithuanian Energy Institute, Kaunas, Lithuania, Membrain Innovation Centre, Czech Republic, State Key Laboratory of Material-Oriented Chemical Engineering, College of Chemical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing, China. Zdobył 6 nagród naukowych, w tym 3 Zespołowe Nagrody Rektora Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu oraz 3 z konferencji naukowych.

Jego sumaryczny IF wynosi 152,9, suma punktów MEiN 2950, h-index 13, a liczba cytowań 364.

Podsumowanie

Podsumowując, recenzowana rozprawa doktorska stanowi liczący się wkład w problematykę membranowej separacji gazów, w szczególności CO₂ za pomocą heterogenicznych membran polimerowych i zawiera istotne elementy nowości naukowej.

Stwierdzam, iż rozprawa doktorska mgr Guoqiang Li, zatytułowana "**Polymeric membranes and mixed matrix membranes (MMMs) for carbon dioxide separation**", spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim, określone w ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. (j.t. Dz. U. z 2022 r. poz. 574, z późn. zm.) i wnioskuję o dopuszczenie mgr Guoqiang Li do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Uważam, że praca ze względu na nowe, ciekawe rozwiązania i bogaty materiał doświadczalny oraz jego przedstawienie w licznych renomowanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym i wysokim współczynniku oddziaływania zasługuje na wyróżnienie.

Wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana mgr Guoqiang Li.

dr hab. inż. Aleksandra Rybak, Prof. PŚ