

ADAM ROTKEGEL^{1,2}, ZENON ZIOBROWSKI¹

BADANIA SEPARACJI DITLENKU WĘGLA I AZOTU NA CERAMICZNYCH MEMBRANACH CIEKŁYCH IMPREGNOWANYCH CIECZĄ JONOWĄ

¹InstituT Inżynierii Chemicznej PAN, ul. Bałtycka 5, 44-100 Gliwice

²Politechnika Opolska, Wydział Inżynierii Produkcji i Logistyki, ul. Gen. Sosnkowskiego 31,
45-272 Opole

W pracy przedstawiono wyniki badań separacji ditlenku węgla i azotu na ceramicznych membranach ciekłych impregnowanych cieczą jonową [Emim][Ac]. Badania przeprowadzono dla różnych materiałów ceramicznych w temperaturze 20°C dla ciśnień 1-7 bar. Ciecz jonową nanoszono metodą pokrywania oraz zanurzania. Stwierdzono, że otrzymane membrany charakteryzują się niewielkimi strumieniami masowymi oraz małymi wartościami selektywności.

Słowa kluczowe: absorpcja, ditlenek węgla, ciecze jonowe

The experimental results of carbon dioxide and nitrogen separation on ceramic membranes impregnated with ionic liquid [Emim][Ac] are presented. Different ceramic materials were investigated at the temperature of 20°C and at the pressures of 1-7 bar. The ionic liquid was introduced into ceramic support by coating and soaking. It was found, that prepared membranes are characterized by small mass fluxes and low selectivity.

Keywords: absorption, carbon dioxide, ionic liquids

1. WPROWADZENIE

W konwencjonalnych metodach usuwania ditlenku węgla wykorzystuje się głównie odwracalny proces absorpcji w aminach [1]. Wadami tych metod są straty rozpuszczalnika na skutek parowania, korozyjność roztworów amin, niska stabilność termiczna oraz znaczne koszty energetyczne. Alternatywą może być zastosowanie technologii membranowej, jako oszczędnej i ekologicznej metody rozdziału.

Membraną nazywa się półprzepuszczalną fazę, pełniącą rolę bariery dla transportu masy pomiędzy rozdzielanymi przez nią mieszaninami ciekłymi lub gazowymi. Pojęcie membrany można również rozszerzyć na fazę ciekłą - wówczas membraną ciekłą nazywamy ciecz niemieszającą się zarówno z roztworem zasilającym, jak i odbiorczym, która pełni rolę półprzepuszczalnej bariery dla transportu masy pomiędzy nimi.

Membrany ciekłe na nośniku porowatym (Supported Liquid Membranes, SLMs) to membrany, w których selektywna faza ciekła osadzona jest w porach nośnika (supportu) i utrzymywana tam przez siły kapilarne. Główną zaletą SLMs jest duża powierzchnia wymiany masy, mała ilość selektywnej fazy ciekłej oraz znacznie większa efektywność w porównaniu do innych rodzajów membran [2]. Główną wadą membran SLMs jest ich mała stabilność [3] powodowana wysychaniem lub odparowywaniem fazy ciekłej z membrany, bądź wypychaniem, czy wydmuchiwanie jej z porów nośnika.

W przypadku użycia cieczy jonowych jako fazy ciekłej w SLMs uzyskuje się membrany nazywane Supported Ionic Liquid Membrane (SILM). W SILM ditlenek węgla rozpuszcza się w membranie po stronie nadawy, dyfunduje przez membranę i jest desorbowany po stronie permeatu [4-5]. Ciecz jonowa (Ionic Liquid, IL) jest umieszczana w porach membrany, co powoduje redukcję ilości IL w porównaniu z membranami ciekłymi, a także obniżenie zużycia energii potrzebnej do transportu i podgrzania IL [6-7].

Zainteresowanie cieczami jonowymi w procesach separacji ditlenku węgla wynika z dużej rozpuszczalności CO₂ w wybranych cieczach jonowych [8]. W szczególności, ciecze jonowe oparte o kation imidazolowy charakteryzują się stosunkowo dużą rozpuszczalnością CO₂ oraz pojemnością absorpcyjną, którą dodatkowo można zwiększyć poprzez odpowiedni dobór anionu. Ciecze jonowe zawierające anion octanowy posiadają dużą pojemność absorpcyjną w szerokim zakresie temperatur i ciśnień [9].

Permeacji gazów poprzez membrany SILM poświęcona jest spora ilość prac badawczych. Jako nośnik SILM najszerzej zostały przebadane materiały polimerowe. Jednakże ich praktyczne zastosowanie w warunkach przemysłowych jest ograniczone z powodu niskich gęstości strumienia permeatu oraz słabej stabilności termicznej. Alternatywą mogą być materiały ceramiczne takie jak Al₂O₃, SiO₂ oraz TiO₂ ze względu na wysoką wytrzymałość termiczną i mechaniczną. Close et al. (2012) [10] wykonali badania permeacji CO₂ w SILM przygotowanym z Al₂O₃ nasączonego [Emim][Tf₂N] i [C₆mim][Tf₂N]. Przepuszczalność CO₂ zmierzona dla porów o średnicy 100 nm była większa niż dla porów o średnicy 20 nm (przepuszczalności membrany, permeance, wynosiła odpowiednio $P_{CO_2} = 2,65 \times 10^{-8} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ oraz $P_{CO_2} = 1,05 \times 10^{-8} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$). Autorzy wysunęli przypuszczenie, że różnice w wydajności SILM wynikają z wpływu wielkości porów i oddziaływań między cieczą jonową i ceramicznym materiałem membrany.

W pracy [11] Albo et al. (2014) badali membrany ceramiczne Al₂O₃/TiO₂ w połączeniu z [Emim][Ac], co pozwoliło na osiągnięcie dużych przepuszczalności membrany $P_{CO_2} = 2,78 \times 10^{-8} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ oraz idealnych selektywności CO₂/N₂ równych $\alpha_{CO_2/N_2} = 30,72$, znacznie przewyższających wartości zmierzone dla procesów separacji przy wykorzystaniu materiałów polimerowych. Idealny współczynnik selektywności α_{CO_2/N_2} zdefiniowany może być jako iloraz przepuszczalności czystych składników:

$$\alpha_{CO_2/N_2} = \frac{P_{CO_2}}{P_{N_2}} \quad (1)$$

gdzie przepuszczalność membrany dla *i*-tego składnika (P_i) zdefiniowana jest jako iloraz gęstości strumienia tego składnika przechodzącego przez membranę ($\text{kmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) i różnicy ciśnień panujących nad i pod membraną (Pa)

W pracy [12] Chojniak et al. (2014) badali nanoporowate membrany ceramiczne TiO_2 i $\text{SiO}_2\text{-ZrO}_2$ o kontrolowanej wielkości porów (1- 20 nm) przygotowanych metodą zol-żel i nasączonych cieczą jonową [Emim][Ac], charakteryzującą się dużą rozpuszczalnością CO_2 . Membrany SILM otrzymano poprzez ręczne nanoszenie cieczy jonowej na powierzchnię membrany oraz poprzez pokrywanie warstwą rozpylonej cieczy jonowej, co prowadziło do otrzymania dużych wartości przepuszczalności membrany $P_{\text{CO}_2} = 4,31 \pm 0,13 \times 10^{-8} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ oraz idealnej selektywności CO_2/N_2 , $\alpha_{\text{CO}_2/\text{N}_2} = 31,18$. Zmierzone przepuszczalności membrany dla porów 20 nm były o ponad 60% większe niż dla porów 1nm. Różnic nie można wyjaśnić jedynie efektywną grubością cieczy jonowej lub zawartością wody, ale głównie zmianami własności cieczy jonowej w porach materiału ceramicznego.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań przepuszczalności i selektywności rozdziału czystych gazów CO_2 i N_2 dla membran SILM otrzymanych poprzez impregnację ceramicznego nośnika cieczą jonową [Emim][Ac] (octan 1-etylo-3-metyloimidazolu). W badaniach użyto różnych materiałów ceramicznych z Al_2O_3 , SiO_2 oraz TiO_2 , w postaci rurek o średnicy zewnętrznej 10 mm, grubości 2-3mm i długości 250 mm.

2. BADANIA DOŚWIADCZALNE

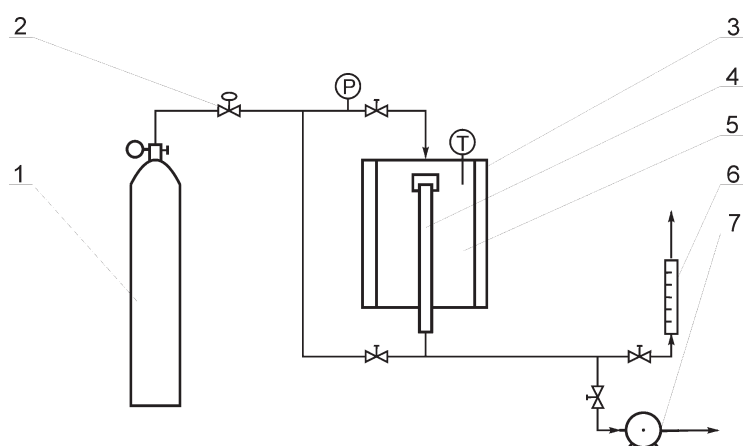
2.1. Stanowisko badawcze

Stanowisko do badania procesów rozdziału gazów przedstawiono na rys. 1. Głównym elementem stanowiska jest moduł membranowy (5) z zamontowaną membraną SILM (4).

Gaz z butli (1) poprzez zawór redukcyjny (2) podawany jest do termostatowanej komory badawczej (5) o średnicy 50 mm i długości 200 mm, wykonanej ze stali kwasoodpornej i wyposażonej w płaszcz grzewczy (3). W komorze (1) zamocowana jest membrana SILM (4), w postaci rurki wykonanej z Al_2O_3 . Ciśnienie w komorze badawczej utrzymywano na stałym poziomie w zakresie 1 do 7 bar nadciśnienia. Gaz przenika przez membranę i poprzez przepływomierz (6) wyprowadzany jest do otoczenia.

W czasie eksperymentów utrzymywano w komorze badawczej stałą temperaturę równą 20°C .

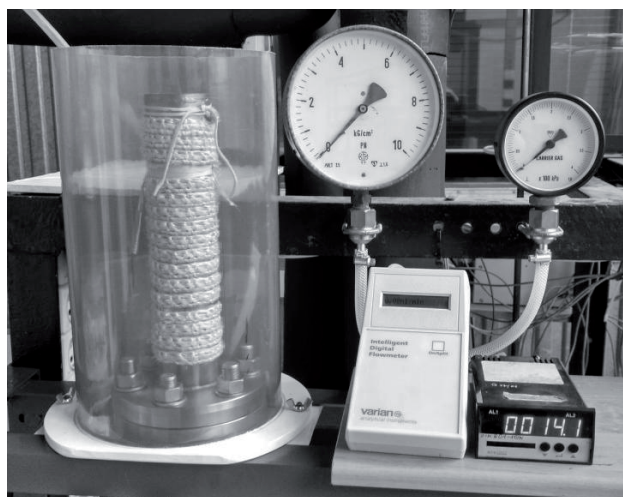
Przed badaniami właściwymi aparaturę opróżniano z gazów pompą próżniową (7), a następnie wypełniano czystym gazem z butli (1).



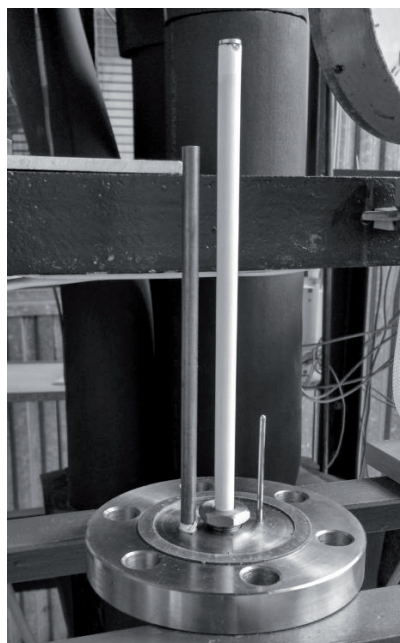
Rys. 1. Stanowiska badawcze: 1 - butla z gazem, 2 - reduktor ciśnienia, 3 - grzejnik, 4 - membrana SILM, 5 - komora badawcza, 6 - przepływomierz, 7 - pompa próżniowa

Fig.1. Experimental setup: 1 - gas bottle, 2 - pressure valve, 3 - heater, 4 - SILM membrane, 5 - membrane module, 6 - flowmeter, 7 - vacuum pump

Gotowy moduł membranowy pokazano na fotografiach (rys. 2 i rys 3), przy czym na rys. 2 pokazano moduł membranowy gotowy do pracy, natomiast na rys. 3. pokazano moduł ze zdjętą osłoną i widoczną zamontowaną membraną SILM



Rys. 2. Stanowisko badawcze
Fig. 2. Experimental setup



Rys. 3. Moduł membranowy z zamontowaną rurkową membraną ceramiczną

Fig. 3. Membrane module without cover

2.2. Wybór nośnika SILM

Do badań wybrano materiały ceramiczne w postaci rurek wykonanych z Al_2O_3 , SiO_2 oraz TiO_2 o średnicach zewnętrznych 10 mm, grubości 2-3 mm, długości 250 mm. Materiały charakteryzują się wysoką wytrzymałością termiczną i mechaniczną [7]. Odpowiednie połączenie tych materiałów z wybranymi cieczami jonowymi może pozwolić na uzyskanie membran SILM o dużej selektywności i przepuszczalności oraz opracowanie oszczędnych i bardziej efektywnych technologii rozdziału.

2.3. Sposób przygotowania membran SILM

Proces impregnacji materiału nośnika w IL może być realizowany pod ciśnieniem atmosferycznym poprzez ręczne nanoszenie IL przy pomocy gazy zwilżonej cieczą jonową, a następnie usunięcie nadmiaru IL z powierzchni membrany za pomocą bibuły [3]. Najczęstszą metodą tworzenia SILM jest zamoczenie porowatego nośnika w cieczy jonowej na czas zazwyczaj kilku do kilkunastu godzin. [11]. Z uwagi na wysoką lepkość cieczy jonowych, a także niską prężność par operację tę często przeprowadza się w warunkach próżniowych lub ciśnieniowych, aby zminimalizować prawdopodobieństwo występowania pęcherzyków powietrza w membranie.

Materiał ceramiczny impregnowano cieczą jonową metodą pokrywania i zanurzenia. Metoda pokrywania (coating) polega na nanoszeniu na czystą i odtłuszczoną powierzchnię ceramiczną cieczy jonowej za pomocą pędzla. Nadmiar cieczy jonowej zbiera się z powierzchni rurki za pomocą bibuły, a następnie rurkę ceramiczną zostawia się do wyschnięcia (od 30 do 120 min). Proces nanoszenia powtarza się od 1 do 3 razy. Ilość naniesionej cieczy jonowej kontroluje się metodą wagową. Metoda zanurzenia (soaking) polega na zanurzeniu czystej i odtłuszczonej rurki ceramicznej w cieczy jonowej na czas od 8 do 24 h. Po tym czasie rurkę wyciąga się z cieczy jonowej, a nadmiar cieczy usuwa się bibułą. Ilość naniesionej cieczy jonowej kontroluje się metodą wagową.

2.3 Wyniki badań doświadczalnych

Badania doświadczalne wykonano na stanowisku badawczym, rys.1. W badaniach tych użyto różnych materiałów ceramicznych oznaczonych odpowiednio:

1. A - rurki ceramiczne kupione w Instytucie Ceramiki i Materiałów Budowlanych, Gliwice (oznaczenie producenta A160)
2. B - rurki ceramiczne kupione w Instytucie Ceramiki i Materiałów Budowlanych, Gliwice (oznaczenie producenta A190)
3. C - membrany ceramiczne badane na zlecenie Instytutu Szkła, Ceramiki, Materiałów Ogniotrwałych i Budowlanych, Gliwice (oznaczenie producenta GIS, Raport 2008)
4. D - membrany ceramiczne firmy Pervatech BV z aktywną powłoką krzemionkową stosowane do separacji wody od alkoholu butylowego na instalacji przemysłowej w Zakładach Azotowych Kędzierzyn S.A. (oznaczenie producenta 1050)

Powyższe materiały ceramiczne służyły do przygotowania ciekłych membran SILM poprzez impregnację rurek ceramicznych octanem 1-eutylo-3-metyloimidazolu ([Emim][Ac]).

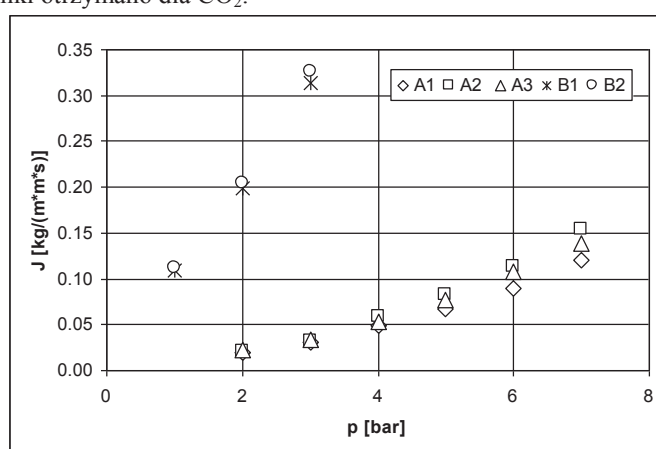
Rurki ceramiczne wykonane z materiału A oznaczone A1, A2, A3, z materiału B oznaczone B1, B3 oraz z materiałów C i D - po oczyszczeniu, wysuszeniu oraz odtłuszczeniu ważono. Po zamontowaniu w aparaturze badawczej mierzono masowe strumienie CO₂ i N₂ przechodzące przez daną rurkę ceramiczną przed impregnacją cieczą jonową.

Następnie rurki ceramiczne: impregnowano cieczą jonową poprzez zanurzenie w cieczy jonowej lub poprzez pokrywanie. Po naniesieniu cieczy jonowej i wysuszeniu (ewentualnie osuszeniu bibułą) rurki ważono przed oraz po pomiarze. W ten sposób określano ilość cieczy jonowej wchłoniętej po impregnacji oraz utratę cieczy jonowej w trakcie pomiaru, co stanowiło o stabilności membrany przy danym ciśnieniu. W zależności od rodzaju materiału, rozkładu porów, lepkości cieczy jonowej przy

wyższych ciśnieniach część cieczy jonowej jest wypychana z porów materiału ceramicznego, co powoduje pogorszenie działania membrany lub jej zniszczenie.

W trakcie pomiarów mierzono masowe strumienie gazów (J [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$]) przechodzących przez otrzymaną membranę SILM oraz obliczano idealną selektywność α , dla czystych gazów CO_2 i N_2 (r-nie 1). Wyniki badań doświadczalnych dla wybranych materiałów ceramicznych przed i po impregnacji, przedstawiono poniżej.

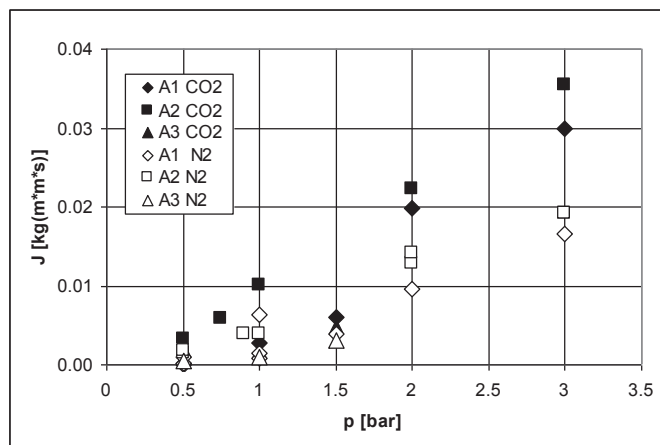
Na rysunku 4 przedstawiono wyniki pomiarów strumienia azotu płynącego przez membranę dla badanych rurek ceramicznych A i B nie pokrytych cieczą jonową. Analogiczne wyniki otrzymano dla CO_2 .



Rys.4. Porównanie strumieni masy N_2 dla różnych materiałów ceramicznych bez cieczy jonowej, temperatura 20°C

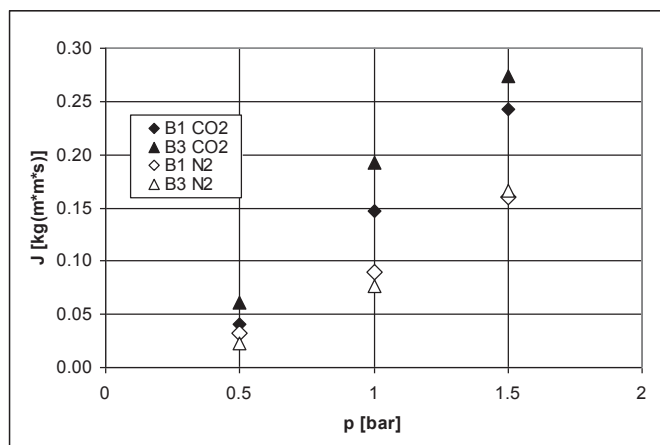
Fig. 4. Comparison of N_2 mass fluxes for various ceramic materials without ionic liquid, temperature 20°C

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono zależności strumienia N_2 i CO_2 płynącego przez membranę od różnicy ciśnień dla badanych rurek ceramicznych A1, A2 i A3 (rys 5) i B1 i B3 (rys 6), w temperaturze 20°C .



Rys.5. Porównanie strumieni masy CO₂ i N₂ dla materiału ceramicznego A1, A2 i A3 impregnowanego [Emim][Ac], temperatura 20°C

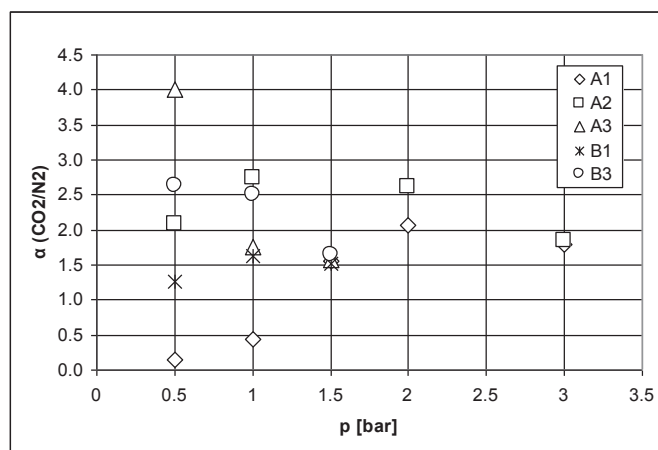
Fig. 5. Comparison of CO₂ and N₂ mass fluxes for ceramic material A1, A2 and A3 impregnated with [Emim][Ac], temperature 20°C



Rys.6. Porównanie strumieni masy CO₂ i N₂ dla materiału ceramicznego B1 i B3 impregnowanego [Emim][Ac], temperatura 20°C

Fig. 6. Comparison of CO₂ and N₂ mass fluxes for ceramic material B1 and B3 impregnated with [Emim][Ac], temperature 20°C

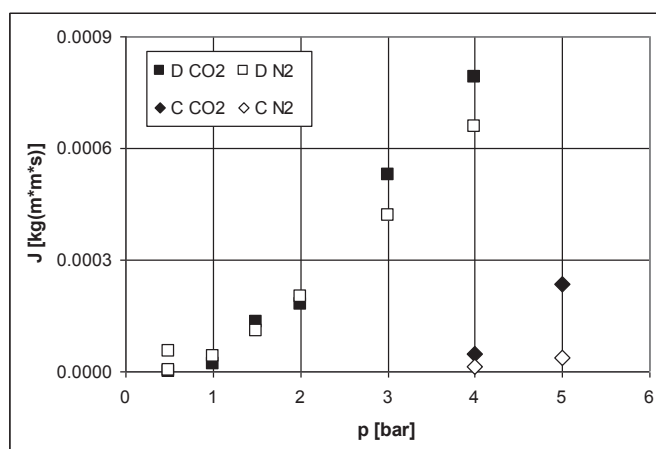
Na rysunku 7 przedstawiono wyniki pomiarów selektywności rozdzielu CO₂/N₂ dla badanych membran A i B.



Rys. 7. Porównanie selektywności różnych materiałów ceramicznych impregnowanych [Emim][Ac], temperatura 20°C

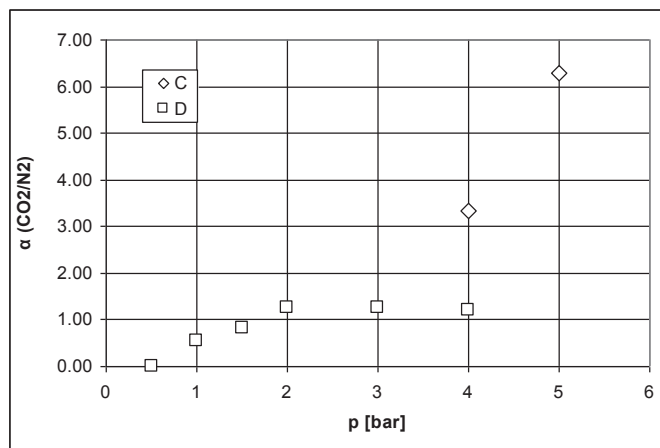
Fig. 7. Comparison of CO₂/N₂ selectivity for various SILMs impregnated with [Emim][Ac], temperature 20°C

Wyniki uzyskane dla membran C i D przedstawiono na rysunkach 8 i 9



Rys.8. Porównanie strumieni masy CO₂ i N₂ dla materiału ceramicznego C i D impregnowanego [Emim][Ac], temperatura 20°C

Fig. 8. Comparison of CO₂ and N₂ mass fluxes for ceramic material C and D impregnated with [Emim][Ac], temperature 20°C



Rys. 9. Porównanie selektywności materiałów ceramicznych C i D impregnowanych [Emim][Ac], temperatura 20°C

Fig. 9. Comparison of selectivity of CO₂/N₂ separation (α) for ceramic material C and D impregnated with [Emin][Ac], temperature 20°C

Tabela 1. Masy cieczy jonowej naniesione na powierzchnię SILM
Table 1. Masses of ionic liquid applied to SILM

Membrana	Masa IL [g]		
	przed pomiarem	po pomiarze	utracona w trakcie pomiaru
A1 - Zanurzona na 24 h	3,464	1,946	1,519 (43,8%)
B1 - Zanurzona na 24 h	4,137	1,547	2,590 (62,6%)
A2 - Nanoszenie 1x	0,449	0,360	0,089 (19,9%)
B3 - Nanoszenie 1x	1,854	1,027	0,827 (44,6%)
A3 - Nanoszenie 2x	0,601	0,561	0,040 (6,7%)
C - Zanurzona na 48 h	3,162	1,657	1,505 (47,6%)
D - Nanoszenie 3x	1,696	1,323	0,373 (22,0%)

Analizując powyższą tabelę można zauważyć, że membrany przygotowywane metodą zanurzenia (A1, B1 - C) wykazują najwyższą stratę naniesionej cieczy jonowej, sięgającą do 62% masy początkowej. Membrany przygotowane poprzez nanoszenie wykazują mniejszą utratę cieczy jonowej w czasie pomiarów, w szczególności membrany: A2, która została pokryta jednokrotnie -19% utraty IL i A3 pokrywana dwukrotnie - 6,7% utraty masy.

WNIOSKI

- Ciekłe membrany SILM nadają się do rozdziału mieszanin gazowych oraz usuwania CO₂ z gazów.
- Sposób nanoszenia (impregnacja) cieczy jonowej na podłoże ceramiczne ma duże znaczenie dla trwałości membrany. Grube powłoki SILM ograniczają przepuszczalność membrany, z kolei zbyt cienkie mogą przyczynić się do niestabilności i krótkiego okresu poprawnego działania membrany.
- Wyniki badań wskazują, że badane materiały ceramiczne A, B, C i D po impregnacji cieczą jonową wykazują słabe własności separacyjne badanych gazów. Selektywność idealna $\alpha_{\text{CO}_2/\text{N}_2}$ wynosiła od 1 do 6, przy czym ze wzrostem ciśnienia selektywność malała. Zaobserwowano, że wyższe ciśnienie gazu powodowało wydmuchiwanie cieczy jonowej z porów materiału ceramicznego, co prowadziło do zniszczenia membrany. Wielkości porów badanych materiałów ceramicznych, zawierające się w granicach 0,5 – 10 μm , wydają się być zbyt duże do prawidłowej pracy otrzymanych membran SILM.

PIŚMIENNICTWO CYTOWANE - REFERENCES

- [1] Budzianowski W.M., 2015. Single solvents, solvent blends, and advanced solvent systems in CO₂ capture by absorption: a review, *Int. J. Global Warming*, Vol. 7, No. 2, 184-225.
- [2] Parhi P.K., 2013. Supported liquid membrane principle and its practices: a short review, *J. Chem.*, vol. 2013, 1-11.
- [3] Bernardo P., Drioli E., Golemme G., 2009. Membrane gas separation: a review/state of the art, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 48 (10), 4638–4663.
- [4] Santos E., Albo J., Irabien A., 2014. Acetate based supported ionic liquid membranes (SILMs) for CO₂ separation: Influence of the temperature, *J. Membr. Sci.*, 452, 277– 283.
- [5] Albo J., Tsuru T., 2014. Thin Ionic Liquid Membranes Based on Inorganic Supports with Different Pore Sizes, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 53, 8045–8056.
- [6] Bernard P., Drioli E., Golemme G., 2009. Membrane gas separation: A review/state of the art, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 48, 4638– 4663.
- [7] Merkel T.C., Lin H., Wei X., Baker R., 2010. Power plant post-combustion carbon dioxide capture: An opportunity for membranes, *J. Membr. Sci.*, 359 (1–2), 126–139.
- [8] Zhang Y., Ji X., Xie Y., Lu X., 2016. Screening of conventional ionic liquids for carbon dioxide capture and separation, *Applied Energy* 162, 1160-1170.
- [9] Shiflett M.B., Niehaus A.M.S., Elliott B.A., Yokozeki A., 2012. Phase behavior of N₂O and CO₂ in room-temperature ionic liquids [bmim][Tf₂N], [bmim][BF₄], [bmim][N(CN)₂], [bmim][Ac], [eam][NO₃], and [bmim][SCN], *Int. J. Thermophys.*, 33, 412–436.
- [10] Close J.J., Farmer K., Moganty S.S., Baltus R.E., 2012. CO₂/N₂ separations using nanoporous alumina-supported ionic liquid membranes: Effect of the support on separation performance *J. Membr. Sci.*, 390–391, 201–210.
- [11] Albo J., Yoshioka T., Tsuru T., 2014. Porous Al₂O₃/TiO₂ tubes in combination with 1-ethyl-3-methylimidazolium acetate ionic liquid for CO₂/N₂ separation, *Sep. Purif. Technol.*, 122, 440–448.
- [12] Hojniak S.D., Silverwood I.P., Khan A.L., Vankelecom I.F.J., Dehaen W., Kazarian S.G., Binnemans K., 2014. Highly Selective Separation of Carbon Dioxide from Nitrogen and Methane

by Nitrile/Glycol-Difunctionalized Ionic Liquids in Supported Ionic Liquid Membranes (SILMs),
J. Phys. Chem. B, 118, 7440–7449.

ADAM ROTKEGEL, ZENON ZIJBROWSKI

CARBON DIOXIDE AND NITROGEN SEPARATION ON CERAMIC LIQUID MEMBRANES IMPREGNATED WITH IONIC LIQUID

In conventional methods of CO₂ removal from flue gases generally a reversible amine absorption processes is used. As an alternative gas separation on membranes in combination with ionic liquids (ILs), the so-called supported ionic liquid membranes (SILMs) are extremely attractive due to energy efficiency and compact equipment. The paper presents the experimental results of carbon dioxide and nitrogen separation on ceramic membranes impregnated with ionic liquid 1-Ethyl-3-methylimidazolium ([Emim][Ac]). The type of ceramic support used in SILMs membranes, as well as the support structure are very important for the stability of the membrane. Different ceramic tubes of 10 mm outer diameter and 250 mm length, made of Al₂O₃, SiO₂ and TiO₂, were used to prepare supported ionic liquid membranes (SILMs). The performance of SILMs depends generally on impregnation method of ceramic support. Thick SILM layer decreases membrane permeability, but too thin SILM layer may reduce the performance and stability of the membrane. Two impregnation methods were used: coating and soaking. The tests were carried out in the experimental setup shown in Figs.1-3 at the temperature of 20°C and at the pressures of 1-7 bar. The measured carbon dioxide and nitrogen mass fluxes and ideal selectivities for the prepared SILMs based on different ceramic materials were presented in Figs.4-9. The prepared SILM membranes are characterized by small mass fluxes and low ideal selectivities.

Received: 21.09.2018

Accepted: 24.10.2018