

ADAM ROTKEGEL, ZENON ZIOMBROSKI

POCHŁANIANIE DITLENKU WĘGLA W KOLUMNIE ZRASZANEJ CIECZĄ JONOWĄ. CZĘŚĆ I – BADANIA DOŚWIADCZALNE

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

Przedstawiono wyniki badań pochłaniania CO₂ w cieczach jonowych [Emim][Ac] i [Bmim][Ac] pod ciśnieniem atmosferycznym, w kolumnie wypełnionej. W badaniach doświadczalnych określono wpływ zawartości CO₂ w gazie wlotowym, temperatury absorpcji oraz zawartości wody w cieczy jonowej na sprawność usuwania CO₂ z gazu. Badania pokazały, że w tych samych warunkach doświadczalnych pojemności sorpcyjne CO₂ zastosowanych cieczy jonowych i roztworów amin są porównywalne, jednakże w przypadku cieczy jonowych potrzebny jest znacznie dłuższy czas kontaktu dla usunięcia tej samej ilości CO₂.

Słowa kluczowe: absorpcja CO₂, kolumna wypełniona, ciecze jonowe.

The experimental study of CO₂ absorption in ionic liquids: [Emim][Ac] and [Bmim][Ac] in packed bed column is presented. The influence of initial CO₂ concentration, absorption temperature and water content in ionic liquid on removal efficiency was investigated. The results show that in the same experimental conditions ILs have comparable CO₂ absorption capacities with amine solution. However ILs need much longer times to absorb the same amount of carbon dioxide from gas mixture.

Keywords: CO₂ absorption, packed column, ionic liquids.

1. WPROWADZENIE

Według raportu International Energy Agency z 2011 r. prognozowany wzrost emisji CO₂ ze spalania paliw kopalnych do 2030 r. ma osiągnąć 40.2 GT [1]. W związku z rosnącym zużyciem paliw kopalnych i wzrostem emisji ditlenku węgla podejmowane są prace mające na celu opracowanie efektywnych i ekonomicznie opłacalnych technologii wychwytywania i składowania dużych ilości ditlenku węgla [2-4].

Najczęściej stosowane w przemyśle metody usuwania ditlenku węgla z gazów spalinowych (post combustion) to procesy absorpcji w kolumnach zraszanych aminami takimi jak monoetanolamina MEA, dietanolamina DEA, metyldietanolamina MDEA oraz mieszaniny amin i różnych dodatków uszlachetniających i antykorozyjnych [5,6].

Wadami rozwiązań opartych na aminach są: ograniczona pojemność sorpcyjna, utrata rozpuszczalnika poprzez odparowanie, degradacja i słaba stabilność termiczna, duża korozyjność, jak również toksyczność i słaba biodegradowalność w środowisku naturalnym [7,8]. Ponadto etap regeneracji rozpuszczalnika może zwiększyć koszty całkowite instalacji o 70% szczególnie w przypadku amin 1- i 3-rzędowych, gdzie ciepło reakcji jest duże [9,10].

W ostatnich latach, jako alternatywa dla amin, rozważane są ciecze jonowe (ILs), jako efektywne rozpuszczalniki, do absorpcji ditlenku węgla [2,11]. Ich własności takie jak: stabilność termiczna, pomijalna prężność par, mała korozyjność, duża zdolność pochłaniania ditlenku węgla, możliwość projektowania własności fizykochemicznych czynią je atrakcyjnymi odwracalnymi absorbentami ditlenku węgla. Niska pojemność cieplna (1/3 pojemności wodnych roztworów amin) wraz z obniżoną korozyjnością znacząco wpływają na redukcję kosztów inwestycyjnych i operacyjnych [12-14]. Wadą jest z kolei ich cena i wysoka lepkość.

Shiflett et al. [13] w 2010 r. przedstawili symulację procesu usuwania CO₂ przy pomocy cieczy jonowej [Bmim][Ac] jako ciekłego absorbenta i porównali z procesem opartym o MEA. Stwierdzili, że ciecz jonowa [Bmim][Ac] może zastąpić MEA w procesie absorpcji ditlenku węgla z gazów spalinowych w elektrowni węglowej (180 MW). Strata energii może być ograniczona o 16%, a koszty inwestycyjne o 11% w porównaniu do procesu z MEA. Basha et al. [15] w 2014 r. opracowali proces usuwania ditlenku węgla z gazów spalinowych wytwarzanych w 400 MW bloku elektrowni węglowej przy wykorzystaniu cieczy jonowych [Bmim][Tf₂N] oraz mieszanin dostarczonych przez Evonik-Degrass GmbH Co.Hopewell, VA, USA. Wyniki potwierdziły możliwość zastosowania badanych cieczy jonowych jako ciekłych absorbentów ditlenku węgla. Huang et al. [16] w 2014 r. porównali procesy wykorzystujące mieszaniny cieczy jonowych i amin (IL-MEA) i MEA i stwierdzili, że proces wykorzystujący IL-MEA daje 15% oszczędności wymaganego ciepła regeneracji w porównaniu do MEA [22].

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań pochłaniania ditlenku węgla w cieczach jonowych pod ciśnieniem atmosferycznym, w kolumnie wypełnionej, co pozwoli ocenić możliwość zastosowania cieczy jonowych w przypadku procesów usuwania ditlenku węgla z gazów spalinowych (post combustion, gdzie ciśnienie gazów jest bliskie ciśnieniu atmosferycznemu) przy wykorzystaniu kolumn wypełnionych, które są standardowym rozwiązaniem technicznym stosowanym w wielu procesach przemysłowych i obecnie są najczęściej stosowanym rozwiązaniem w procesach pochłaniania gazów.

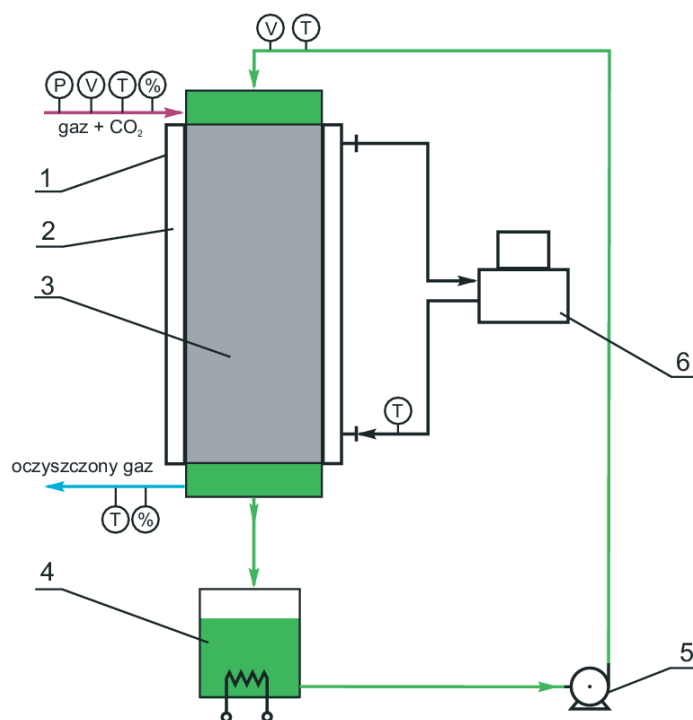
Do badań wybrano ciecze jonowe: octan 1-butylo-3-metyloimidazoliowy ([Bmim][Ac]) oraz octan 1-etylo-3-metyloimidazoliowy ([Emim][Ac]), ze wzgl. na

chemiczny charakter absorpcji, określoną dużą pojemność sorpcji, znane własności i metody otrzymywania. Zastosowanie ILS charakteryzujących się dominującym fizycznym mechanizmem absorpcji prowadzi do zdecydowanie mniejszej pojemności sorpcyjnej w porównaniu do MEA.

2. BADANIA DOŚWIADCZALNE

2.1. STANOWISKO BADAWCZE

Badania doświadczalne CO₂ w cieczach jonowych [Bmim][Ac] i [Emim][Ac] w przepływie przez złożę wypełnione przeprowadzono na stanowisku badawczym. Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego: 1 - kolumna zraszana, 2 - płaszcz termostatu, 3 - wypełnienie, 4 - naczynie zbiorcze, 5 - pompa perystaltyczna, 6 - termostat

Figure 1. Experimental setup: 1- column, 2 - water jacket, 3 - packing, 4 - collecting vessel, 5 - dosing pump, 6 - thermostat

Głównym elementem badawczym jest zraszana kolumna wypełniona (1) o średnicy wewnętrznej 50 mm i długości 350 mm wykonana ze szkła, zaopatrzona w termostatowany płaszcz grzewczy (2).

Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów do badań absorpcji CO₂ z wykorzystaniem cieczy jonowych wybrano pierścienie Rashiga $\phi 5 \times 5 \times 1$. Stwierdzono, że dla tego wypełnienia opory przepływu gazu w kolumnie badawczej były niewielkie, a spływ cieczy po wypełnieniu był równomierny. Zgodnie z zaleceniami projektowymi optymalny stosunek średnicy kolumny do średnicy elementu wypełnienia był zachowany (był większy od 7). Kolumna wypełniona została zabudowana nad stalowym zbiornikiem zbiorczym (4) o średnicy 200 mm i wysokości 250 mm wyposażonym w zamknięcie hydrauliczne, spiralę grzewczą oraz wskaźnik poziomu cieczy. Zadana temperaturę cieczy jonowej (płaszcz kolumny oraz spirala grzewcza naczynia zbiorczego) utrzymywano przy pomocy termostatu Lauda Eco Gold (6). Ciecz jonowa przy pomocy pompy perystaltycznej (5) podawana była do zraszacza, spływając po wypełnieniu kontaktowała się z mieszaniną gazową podawaną współprądowo lub przeciwprądowo. Odpowiedni skład mieszaniny gazowej zawierającej ditlenek węgla otrzymywano mieszając sprężone gazy: azot (o czystości 99,99), ditlenek węgla (o czystości 99,99) w kolumnie mieszającej, wykorzystując układ zaworów redukcyjnych i rotametrów gazowych. Kolumnę mieszającą stanowiła ogrzewana szklana rurka wypełniona ceramicznymi elementami, pozwalająca na dokładne wymieszanie gazów i ogrzanie ich do zadanej temperatury. Kolumna zraszana oraz naczynie zbiorcze zostały wyposażone w króćce do pomiaru temperatury cieczy jonowej, stężenia mieszaniny gazowej na wlocie i wylocie, różnicy ciśnień, króćce wlotu i wylotu mieszaniny ciekłej, gazowej oraz króciec spustowy.

2.2. BADANIA ABSORPCJI CO₂ W CIECZACH JONOWYCH

Wykonano badania eksperymentalne procesu absorpcji CO₂ w kolumnie wypełnionej dla cieczy jonowych [Bmim][Ac], [Emim][Ac] oraz 15% wag. wodnego roztworu MEA. Ze względu na swoje własności sorpcyjne, jak również stosunkowo niskie koszty produkcji masowej są one obiecującą alternatywą dla amin stosowanych do usuwania ditlenku węgla w warunkach przemysłowych. Własności fizykochemiczne wybranych cieczy jonowych takie jak: lepkość, gęstość, równowagowa pojemność sorpcyjna zostały przebadane i opisane w literaturze. Odpowiednie mieszaniny gazowe otrzymywano poprzez mieszanie w kolumnie mieszającej sprężonych gazów: ditlenku węgla oraz azotu. Mieszaninę gazową o określonej zawartości CO₂ podawano na złożę we współprądzie lub przeciwprądzie ze spływającą po wypełnieniu cieczą jonową. W trakcie przygotowywania aparatury do pomiarów podgrzewano ciecz jonową do zadanej temperatury przy wybranym natężeniu przepływu fazy ciekłej. Etap ten trwał około 1-2 godzin. W międzyczasie przygotowywano mieszaninę gazową o odpowiednim natężeniu przepływu i składzie (kontrolowanym miernikiem IR Madur GA - 40 T plus). Po osiągnięciu zadanej temperatury przez ciecz jonową i złożę w kolumnie oraz po ustabilizowaniu się natężeń przepływu do kolumny kierowano

mieszaninę gazową mierząc zawartość ditlenku węgla na wlocie i wylocie z kolumny wypełnionej, w określonych odstępach czasu, do pełnego nasycenia cieczy jonowej ditlenkiem węgla. Ponadto mierzono i rejestrowano następujące wielkości pomiarowe: temperatury fazy ciekłej i gazowej, natężenia przepływu fazy ciekłej i gazowej, różnice ciśnień.

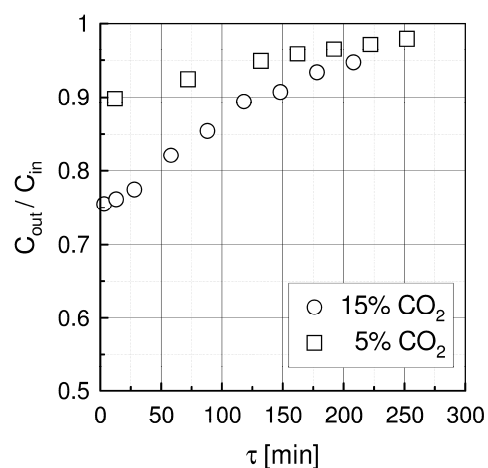
Pomiary wykonano w seriach, rejestrowano zmiany zawartości ditlenku węgla na wlocie i wylocie z kolumny w czasie, natężenia przepływu i temperatury cieczy i gazu. Stwierdzono, że w przypadku wybranego wypełnienia dla przeciwpłukowego przepływu czynników zakres natężeń fazy ciekłej zawiera się w granicach 50-100 ml/min i do 2100 ml/min dla fazy gazowej. W przypadku współprądowego przepływu czynników zakres natężeń fazy ciekłej zawiera się w granicach 50-500 ml/min dla fazy ciekłej i do 2300 ml/min dla fazy gazowej. Przy większych natężeniach fazy ciekłej lub gazowej następowało zalewanie kolumny.

Po zakończeniu serii pomiarowej ciecz jonową regenerowano desorbując ditlenek węgla w temperaturze 85°C przy przepływie gazu inertnego (hel) przez złożo. Proces desorpcji prowadzono do zupełnego usunięcia ditlenku węgla z fazy ciekłej, kontrolując wagowo całkowity ubytek CO₂ (około 12-24 godz.).

2.3. WYNIKI BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

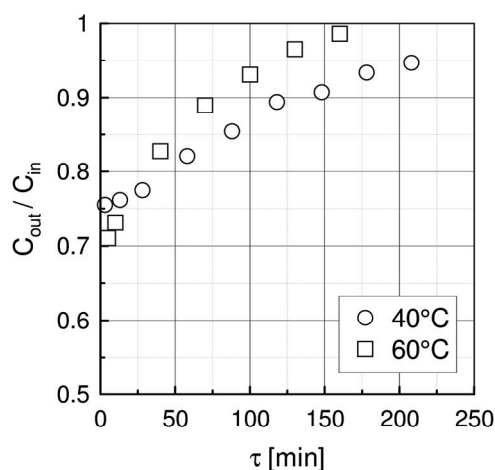
Wyniki badań doświadczalnych procesu absorpcji CO₂ w cieczach jonowych przedstawiono na rys. 2-6. Stosunek C_{out}/C_{in} przedstawia bezwymiarowe stężenia CO₂ w gazie opuszczającym kolumnę wypełnioną. Na początku każdego eksperymentu wartość stosunku C_{out}/C_{in} jest niska z powodu braku zawartości CO₂ w fazie ciekłej. Po odpowiednio długim czasie wartość $C_{out}/C_{in} = 1$, ciecz jonowa zostaje nasycona i proces absorpcji zatrzymuje się. Badania prowadzono do momentu uzyskania stężenia w gazie wylotowym $C_{out}/C_{in} = 0,90-0,98$.

Na rys. 2-3 pokazano wpływ zawartości CO₂ w fazie gazowej na wlocie oraz temperatury procesu absorpcji na zawartość CO₂ w mieszaninie gazowej opuszczającej kolumnę wypełnioną zraszaną cieczą jonową [Emim][Ac] (współprąd). Dla małej zawartości ditlenku węgla w mieszaninie wlotowej (5% obj.) zaobserwowano niewielkie zmiany profilu stężeń, natomiast dla większej zawartości ditlenku węgla na wlocie (15% obj.) początkowe obniżenie stężenia CO₂ w gazie wylotowym jest większe i potrzeba dłuższego okresu czasu do osiągnięcia wylotowego stężenia CO₂ $C_{out}/C_{in} = 0,95$ w temperaturze 40°C (rys.2). Przy wyższej temperaturze absorpcji (60°C) i 15% obj. zawartości ditlenku węgla na wlocie początkowe obniżenie stężenia CO₂ w gazie wylotowym jest mniejsze i wzrasta szybciej niż dla temperatury 40°C.



Rys. 1. Wpływ stężenia CO_2 w gazie wlotowym na stężenie CO_2 w gazie wylotowym dla [Emim][Ac], $t=40^\circ C$

Fig. 2. The effect of CO_2 concentration in inlet gas on outlet gas concentration profiles for [Emim][Ac] $t=40^\circ C$

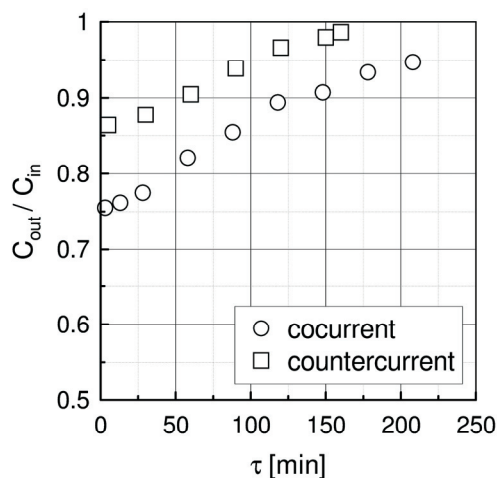


Rys. 3. Wpływ temperatury absorpcji na stężenia CO_2 w gazie wylotowym dla [Emim][Ac], $C_{in}=15\%$ obj.

Fig. 4. The effect of absorption temperature on outlet gas concentration for [Emim][Ac], $C_{in}=15\%$ vol.

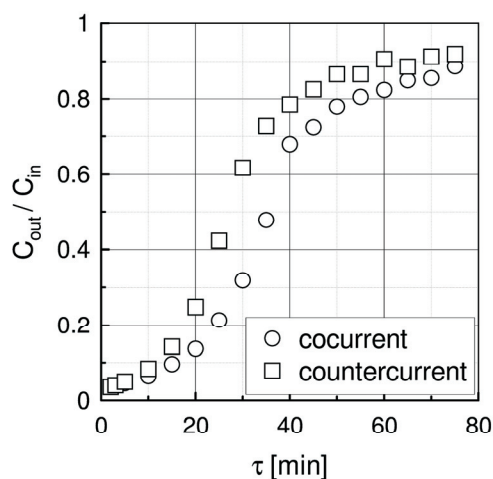
Na rys.4-5 porównano profile stężeń dla [Emim][Ac] i 15% MEA otrzymane dla współprądu i przeciwprądu w temperaturze $40^\circ C$ przy zawartości CO_2 w gazie wlotowym 15% obj. Jak można zauważyć, dla obu układów zmierzone zawartości

CO₂ w gazie wylotowym są większe dla przeciuprądu niż dla współprądu. Otrzymano różne profile stężeń dla cieczy jonowej i roztworu MEA .



Rys. 5. Profile stężeń dla [Emim][Ac] we współprądzie i przeciuprądzie

Fig. 6. Concentration profiles of [Emim][Ac] in cocurrent and countercurrent flow

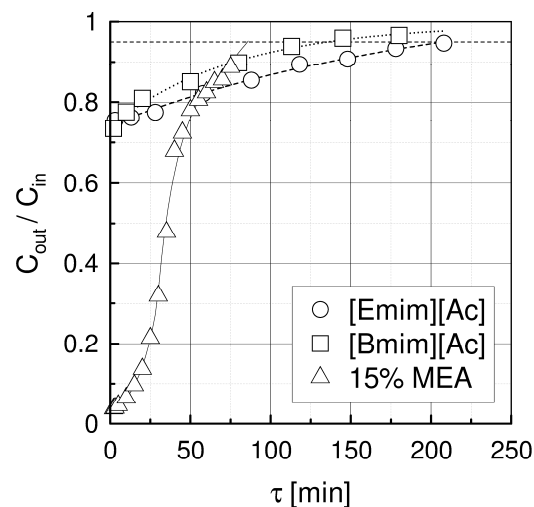


Rys. 7. Profile stężeń dla 15% wag. MEA we współprądzie i przeciuprądzie

Fig. 8. Concentration profiles of 15% MEA in cocurrent and countercurrent flow

Na rys.6 porównano wyniki badań absorpcji CO₂ w cieczach jonowych [Bmim][Ac], [Emim][Ac] oraz w 15% wag. roztworze MEA w tych samych warunkach: przepływ współprądowy, wlotowa zawartość CO₂ 15% obj., temperatura T=40°C. Dodatkowo na wykres naniesiono przybliżone profile stężeń otrzymane z aproksymacji punktów doświadczalnych w celu porównania stężeń CO₂ na wylocie

z kolumny oraz czasów potrzebnych do osiągnięcia stosunku stężeń ratio $C_{out}/C_{in} = 0,95$.

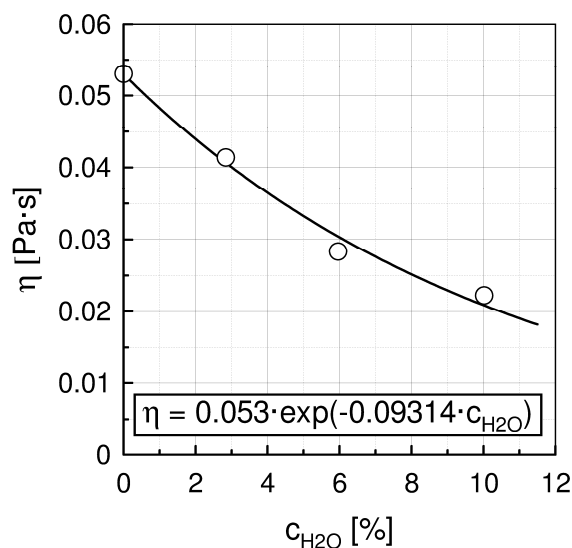


Rys. 9. Porównanie zmierzonych stężeń CO_2 w [Emim][Ac], [Bmim][Ac] i 15% MEA
Fig. 10. Comparison of outlet CO_2 concentration profiles of [Emim][Ac], [Bmim][Ac] and 15% MEA

Dla obu cieczy jonowych zmierzone początkowe stężenie CO_2 na wylocie z kolumny oraz czas potrzebny do osiągnięcia stosunku stężeń $C_{out}/C_{in} = 0,95$ są znacząco wyższe niż dla 15% wag. roztworu MEA. Dla MEA zmierzona początkowa wartość stosunku stężeń wynosi $C_{out}/C_{in} = 0,03$ (0,53% obj.) natomiast dla [Emim][Ac] $C_{out}/C_{in} = 0,76$ (11,4% obj.). Porównując przybliżone profile stężeń na rys.6 można zauważyć, że wylotowe stężenie CO_2 dla roztworu MEA rośnie szybciej i osiąga wartość $C_{out}/C_{in} = 0,95$ po około 80 minutach. W przypadku [Emim][Ac] i [Bmim][Ac] wartość $C_{out}/C_{in} = 0,95$ zostaje osiągnięta odpowiednio po 210 minutach i 135 minutach.

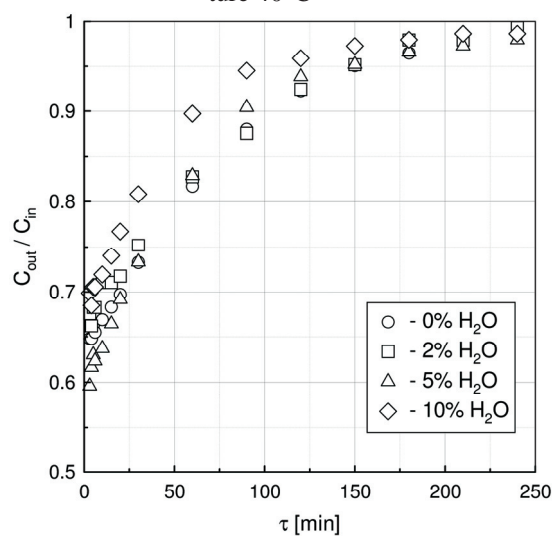
2.4. BADANIA WPŁYWU NIEWIELKIEJ ZAWARTOŚCI WODY NA PROCES ABSORPCJI CO_2 W CIECZACH JONOWYCH

Przeprowadzono także badania dotyczące wpływu niewielkiej zawartości wody na proces absorpcji CO_2 w kolumnie wypełnionej dla cieczy jonowej [Emim][Ac] (rys.8). Przed pomiarami dotyczącymi wpływu zawartości wody na proces absorpcji CO_2 w kolumnie wypełnionej zmierzono przy pomocy wiskozymetru Hoesplera lepkości cieczy jonowej bez i z dodatkiem wody oraz wyznaczono zależność lepkości cieczy jonowej od zawartości wody, rys.7.



Rys. 7 Zależność lepkości cieczy jonowej [Emim][Ac] od zawartości wody w temperaturze 40°C

Fig. 7. The effect of water content on viscosity of ionic liquid [Emim][Ac] in the temperature 40°C



Rys. 8. Porównanie wpływu zawartości wody na mierzone wylotowe wartości stężeń CO₂ dla [Emim][Ac]

Fig. 8. The effect of water content in [Emim][Ac] on the outlet CO₂ concentration

Jak wynika z przeprowadzonych pomiarów, wpływ dodatku 2% lub 5% wag. wody na efektywność procesu absorpcji CO₂ w kolumnie wypełnionej dla cieczy jonowej [Emim][Ac] jest niewielki. Większe różnice można zaobserwować przy 10%

wag. wody. W tym wypadku efektywność procesu ulega widocznemu pogorszeniu, jednakże może to także wynikać z mniejszej pojemności sorpcyjnej roztworu cieczy jonowej z dodatkiem 10% wag. wody.

W trakcie badań mierzono także przy pomocy wiskozymetru Hoesplera lepkości cieczy jonowej bez i z dodatkiem wody przed i po procesie absorpcji w kolumnie wypełnionej. Zmierzone wartości lepkości zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1. Lepkość [Emim][Ac] przed i po procesie absorpcji CO₂

Table 1. [Emim][Ac] viscosity before and after CO₂ absorption.

zawartość wody % wag.	0	2	5	10
lepkość przed absorpcją [Pas]	0,05188	0,0456	0,03773	0,02627
lepkość po absorpcji [Pas]	0,05653	0,05216	0,04331	0,02782

Jak można zauważyć, absorpcji ditlenku węgla w cieczy jonowej towarzyszy zwiększenie lepkości cieczy jonowej. Wzrost ten, w przypadku pełnego nasycenia CO₂, wynosi od 6 do 15% i jest największy dla 2 i 5% dodatku wody (wzrost o około 15%), nieco mniejszy dla cieczy jonowej bez dodatku wody (wzrost o około 10%) i najmniejszy dla cieczy jonowej z dodatkiem 10% wody (wzrost o ok. 6%).

5. WNIOSKI

Ciecze jonowe [Bmim][Ac] i [Emim][Ac] mogą być użyte do usuwania CO₂ z gazów, jednak ze względu na ich wysoką lepkość oraz wysoką cenę zastosowanie ich jest obecnie ograniczone.

Sprawność usuwania CO₂ z gazów zależy od temperatury absorpcji oraz początkowego stężenia CO₂ w gazie (rys. 2 i 3).

W tych samych warunkach eksperymentalnych [Bmim][Ac] i [Emim][Ac] mają podobną pojemność sorpcyjną CO₂, jak 15% roztwór MEA, jednakże w przypadku cieczy jonowych usuwanie CO₂ z gazów jest znacznie wolniejsze i usunięcie tej samej ilości wymaga znacznie dłuższego czasu (rys. 6).

Wpływ dodatku 2% lub 5% mas. wody na efektywność procesu absorpcji CO₂ w kolumnie wypełnionej dla cieczy jonowej [Emim][Ac] jest niewielki. Dodatek 10% mas. powoduje nieznaczne pogorszenie absorpcji CO₂ (Rys.9).

Dalsze badania są niezbędne do opracowania przemysłowych metod usuwania CO₂ z gazów za pomocą cieczy jonowych. Masowa produkcja niedrogich cieczy jo-

nowych charakteryzujących się stabilnością, małą korozyjnością, a przede wszystkim małą lepkością może pozwolić na zastosowanie cieczy jonowych na większą skalę.

OZNACZENIA–SYMBOLS

- A - powierzchnia wypełnienia, m^2
bed area
- C - koncentracja CO_2 w fazie gazowej, $kmol \cdot m^{-3}$
 CO_2 concentration in gas phase
- D - współczynnik dyfuzji, $m^2 \cdot s^{-1}$
diffusion coefficient
- E - współczynnik wzmocnienia
enhancement factor
- G_L - całkowita masa cieczy, $kmol$
total mass of liquid
- k - współczynnik wnikania masy, $kmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
mass transfer coefficient
- K_{ov} - współczynnik przenikania masy, $kmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
total mass transfer coefficient
- N_{CO_2} - strumień absorpcji CO_2 , $kmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
 CO_2 absorption flux
- Re - liczba Reynoldsa
Reynolds number
- Sc - liczba Schmidta
Schmidt number
- Sh - liczba Sherwooda
Sherwood number
- T - temperatura, $^{\circ}C$
temperature
- t - czas, s
time
- V - natężenie przepływu, $kmol \cdot s^{-1}$
flow rate
- x - ułamek molowy w fazie ciekłej
mol fraction in liquid phase
- y - ułamek molowy w fazie gazowej
mol fraction in gas phase
- η - lepkość (Pa·s)
viscosity

INDEKS DOLNY–SUBSCRIPTS

- G - gaz
gas
i - inert
inert
in - wlot do kolumny
column inlet
L - ciecz
liquid
m - średnia wartość na drodze dyfuzji
mean value along the diffusion path
out - wylot z kolumny
column outlet

INDEKS GÓRNY–SUPERSSCRIPTS

- * - stan równowagi
equilibrium state
- - średnia wartość na wlocie i wylocie z kolumny
mean value between inlet and outlet of the column

PIŚMIENNICTWO CYTOWANE–REFERENCES

- [1] International Energy Agency, CO₂ emissions from fuel combustion highlights, Paris, 2011.
[2] Blatha J., Deublerb N., Hirtha T., Schiestelb T., 2012. Chemisorption of carbon dioxide in imidazolium based ionic liquids with carboxylic anions, Chemical Engineering Journal, 181/182, 152-158.
[3] Zhao Z., Dong H., Zhang X., 2012. Research Progress of CO₂ Capture with Ionic Liquids, Chinese Journal of Chemical Engineering, 20(1), 120-129.
[4] D'Alessandro D.M., Simit B., Long J., 2010. Carbon dioxide capture: prospects for new materials, Angew. Chem. Int. Ed., 49, 6058-6082.
[5] Rochelle G.T., 2009. Amine scrubbing for CO₂ capture, Science, 325, 1652-1654.
[6] 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.
[7] Hasib-ur-Rahmana M., Siaj M., Larachia F., 2010. Ionic liquids for CO₂ capture-Development and Progress Chemical Engineering and Processing, 49, 313-322.
[8] Zhao B., Sun Y., Yuan Y., Gao J., Wang S., Zhuo Y., Chen C., 2011. Study on corrosion in CO₂ chemical absorption process using amine solution, Energy Proced., 4, 93-100.
[9] Metz B., Davidson O., de Coninck H., Loos M., Meyer L. (Eds.), 2005. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, New York.

- [10] Schäfer B., Mather A.E., Marsh K.N., 2002. Enthalpies of solution of carbon dioxide in mixed solvents, *Fluid Phase Equilib.*, 194, 929-935.
- [11] Baltus R.E., et al., 2005. Examination of the potential of ionic liquids for gas separations, *Sep. Sci. Technol.* 40 (1-3), 525-541.
- [12] Yujiao Xie, Yingying Zhang, Xiaohua Lu, Xiaoyan Ji, 2014. Energy consumption analysis for CO₂ separation using imidazolium-based ionic liquids, *Applied Energy*, 136, 325-335.
- [13] Shiflett M.B., Drew D.W., Cantini R.A., Yokozeki A., 2010. Carbon Dioxide Capture Using Ionic Liquid 1-Butyl-3-methylimidazolium Acetate, *Energy Fuels*, 24, 5781-5789.
- [14] Perissi I., Bardi U., Caporali S., Lavacchi A., 2006. High temperature corrosion properties of ionic liquids, *Corrosion Sci.*, 48 (9), 2349-2362.
- [15] Basha O.M., Heintz Y.J., Keller M.J., Luebke D.R., Resnik K.P., Morsi B.I., 2014. Development of a conceptual process for selective capture of CO₂ from fuel gas streams using two TEGO ionic liquids as physical solvents, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 53, 3184-3195.
- [16] Huang Y., Zhang Y., Dong H., Zhang S., Thermodynamic modeling and assessment of ionic liquid-based CO₂ capture processes. *Ind Eng. Chem. Res.*, 53, 1805-1817.

ADAM ROTKEGEL, ZENON ZIOBROWSKI

ABSORPTION OF CARBON DIOXIDE IN PACKED COLUMN SPRAYED WITH IONIC LIQUID, PART I-EXPERIMENTAL RESEARCH

The study of CO₂ absorption in ionic liquids: [Emim] [Ac], [Bmim] [Ac] and 15% MEA solution in packed bed column is presented. Absorption column of inner diameter 0.05 m and 0.35 m length was filled with Rashig rings $\phi 5 \times 5 \times 1$ mm. Investigations were performed at low pressures what is important in the case of post combustion flue gases. The influence of initial CO₂ concentration, absorption temperature, gas and liquid flow direction and 2, 5, 10% wt. water addition on removal efficiency was investigated.

The results show that in the same experimental conditions ILs have comparable CO₂ absorption capacities with MEA solution. However ILs need much longer times to absorb the same amount of carbon dioxide from gas mixture. The research for new ILs with lower viscosity and price is needed to take advantages of ionic liquids for the process of CO₂ stripping in packed column.

Small amounts of water (5 - 10%) was added to ionic liquid [bmim][Ac]. It was found that 5% amount of water increases CO₂ absorption rates significantly, while equilibrium absorption capacity does not change. Higher amount of water (10%) does not increase CO₂ absorption rate, but decreases absorption capacity (fig. 5).

The small amounts of water decrease significantly viscosity of [Emim][Ac] Tab.1. However influence of water content in [Emim][Ac] on CO₂ efficiency absorption in packed column is small (Fig.7).

The CO₂ absorption efficiency in packed column depends on temperature and initial CO₂ concentration. The addition of small amounts of water to [Emim][Ac] is of minor effect on CO₂ absorption.

The results show, that in the same experimental conditions investigated ILs have comparable CO₂ absorption capacities with MEA solution. However liquid side mass transfer coefficients for ILs are signifi-

cantly lower and times of removal the same amount of carbon dioxide from gas mixture are much longer. The research for new ILs with lower viscosity and price is needed to take advantages of ionic liquids for the process of CO₂ stripping in packed column

Received: 2.09.2016 r.

Accepted: 20.10.2016 r.