

NGHIÊN CỨU SỬ DỤNG MÀNG TẦM CHẤT LỎNG ION CHO QUÁ TRÌNH TÁCH KHÍ CO₂ RA KHỎI HỖN HỢP VỚI KHÍ METAN

Bùi Thị Lệ Thủy

Đại học Mở Địa chất, Đông Ngạc, Từ Liêm, Hà Nội

Đến Tòa soạn 02-8-2014; Chấp nhận đăng 20-6-2015

Abstract

Some supported ionic liquid membranes (SILMs) were prepared from polyvinylidene fluoride (PVDF), polyethersulfone (PES) membranes and ionic liquids butyl methyl imidazolium tetrafluoroborate ([BMIM][BF₄]), butyl methyl imidazolium acetate ([BMIM][CH₃COO]). Prepared SILMs were used for CO₂ separation from the CO₂/CH₄ gas mixture. The results showed that the ideal selectivity 10.72÷14.43 and the real selectivity 9.77÷12.85 of SILMs for CO₂/CH₄ were observed (separation yields reached 90-93 %) The mass and selectivity of SILMs were stable after working continuously for 30 days. These results exhibit the promising potential of using SILMs for CO₂ separation processes.

Keywords. Membranes, polyethersulfone, polyvinylidene fluoride.

1. MỞ ĐẦU

Việc nghiên cứu để tạo ra phương pháp và vật liệu phù hợp để tách và xử lý khí CO₂ trong các nguồn khí khác nhau ngày càng trở nên quan trọng và cấp thiết, phù hợp với xu hướng chung trên thế giới.

Màng hấp phụ chất lỏng phối hợp được các tính chất ưu việt của chất lỏng (tính khuếch tán cao) và của vật liệu màng (khả năng thấm khí) [1]. Công nghệ tách sử dụng màng hấp phụ chất lỏng đang được xem là lựa chọn tốt nhất để thay thế cho các phương pháp truyền thống do chi phí đầu tư và vận hành thấp, tiêu thụ ít năng lượng, dễ vận hành [2-4]. Một số nghiên cứu sử dụng amin, glycerin làm dung môi tẩm lên màng [5]. Nhược điểm chính của màng này trong một số nghiên cứu trước là chất lỏng sử dụng không ổn định do bay hơi và chưa chọn lọc [6, 7].

Chất lỏng ion (hợp chất có nhiệt độ nóng chảy < 100 °C) có khả năng hòa tan chọn lọc CO₂, bền nhiệt, bền hóa chất và không bay hơi nên rất phù hợp khi dùng mang lên polyme thay thế cho các dung môi thông thường để chế tạo màng [8-15].

Trong nghiên cứu này, một số chất lỏng ion sẽ được sử dụng và mang lên polyme phù hợp để tạo ra vật liệu màng có khả năng tách hiệu quả và chọn lọc CO₂.

Cơ sở lý thuyết quá trình tách khí

Các màng sử dụng để chế tạo các màng tẩm chất lỏng ion là PVDF (polyvinyliden fluorua) và PES (polyethersulfon) không có khả năng tách khí vì cả hai

khí sử dụng trong nghiên cứu này đều có kích thước nhỏ hơn kích thước mao quản của màng.

Màng hấp phụ chất lỏng ion bao gồm chất lỏng ion được mang lên màng polyme có độ xốp cao. Sự khác nhau về tính tan và tính khuếch tán hoặc tương tác hóa học của các khí tạp chất so với khí tự nhiên dẫn đến cơ chế hòa tan khuếch tán để tách các khí tạp. Sơ đồ quá trình tách được đưa ra ở hình 1.

2. THỰC NGHIỆM

2.1. Nguyên liệu

2.2.1. Các màng polyme xốp

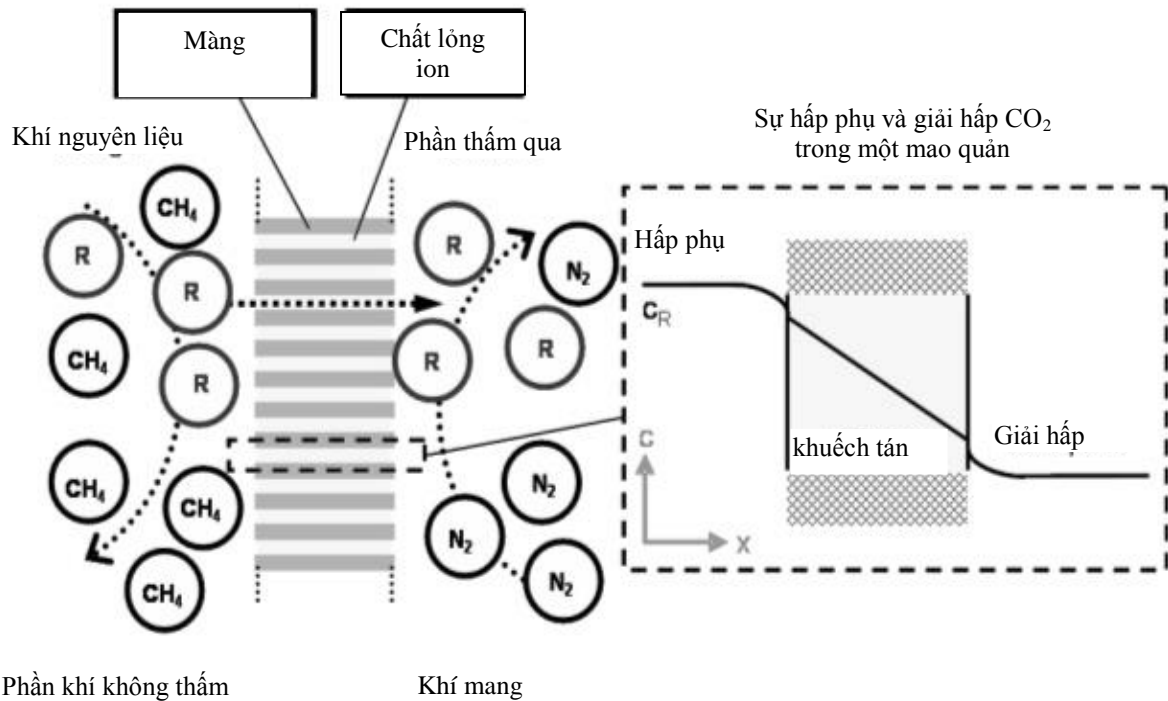
Hai loại màng polyme được sử dụng để chế tạo các màng tẩm chất lỏng ion là PVDF và PES. Hai màng này có vai trò như là vật liệu mang chất lỏng ion do công ty Sterlitech, USA cung cấp. Các màng này được đặc trưng bởi tính bền hóa học cao và đã được sử dụng nhiều trong các nghiên cứu sử dụng màng để làm chất mang trong các màng tẩm chất lỏng. Các tính chất cơ bản của hai màng bao gồm: kích thước mao quản 0,2 μm, độ xốp 70-80 %, đường kính màng 47 mm, độ dày trung bình 150 μm.

2.2.2. Các chất lỏng ion

Các chất lỏng ion 1-butyl-3-metylimidazol tetrafluoroborat ([BMIM][BF₄]) và 1-butyl-3-

methylimidazol axetat ([BMIM][CH₃COO]) đều được tổng hợp từ phòng thí nghiệm bộ môn Lọc Hóa dầu, Trường Đại học Mỏ - Địa chất Hà Nội. Sau khi được

tổng hợp, sản phẩm được đo phổ IR và NMR để khẳng định sự tạo thành của các chất lỏng ion.



Hình 1: Sơ đồ của quá trình tinh chế khí sử dụng màng (R: CO₂)

Các khí

Các khí CO₂, CH₄, N₂ và hỗn hợp hai khí CO₂ và CH₄ với tỷ lệ 50:50 theo thể tích (độ tinh khiết 99,99 %) được mua của Công ty khí Cryotech.

2.2. Phương pháp chế tạo màng tấm chất lỏng ion

Các màng tấm chất lỏng ion trong nghiên cứu này được chế tạo theo phương pháp ngâm tấm trực tiếp [15].

2.3. Xác định chênh áp phù hợp giữa ngăn nguyên liệu và ngăn thấm

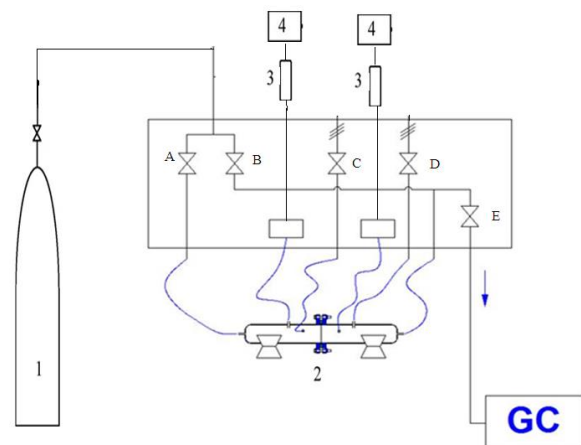
Độ chênh áp thích hợp giữa hai ngăn (ngăn nguyên liệu và ngăn thấm) được xác định để đánh giá áp suất làm việc ổn định của các màng tấm chất lỏng ion.

Các thực nghiệm đánh giá độ chênh áp phù hợp đối với từng màng tấm chất lỏng ion được thực hiện bằng cách sử dụng hệ thiết bị tách khí, như được mô tả trong hình 1 và khí N₂. Khí nitơ được đưa vào ngăn nguyên liệu, độ chênh áp giữa hai ngăn tăng dần cho tới khi màng tấm chất lỏng ion không ổn định. Từ đó, xác định được khoảng làm việc ổn định của màng tấm chất lỏng ion trong các thực nghiệm về thấm khí.

2.4. Các thực nghiệm về sự thấm khí

2.4.1. Khí nguyên chất

Độ thấm khí nguyên chất của các màng tấm chất lỏng ion đối với các khí CO₂ và CH₄ thu được bằng cách sử dụng hệ thiết bị như được mô tả trong hình 2.



Hình 2: Hệ thiết bị sử dụng để xác định độ thấm của các khí ((1): Bình khí; (2): Thiết bị đo độ thấm khí gồm 2 ngăn; (3): Đầu đo áp suất; (4): Thiết bị hiển thị áp suất của 2 ngăn chứa khí) A, B, C, D, E là các van khí)

Thiết bị đo độ thấm khí gồm một ngăn nguyên liệu và một ngăn thấm, ở giữa hai ngăn đặt màng tấm chất lỏng ion. Khí đưa từ bình (1) vào ngăn nguyên liệu. Độ chênh áp giữa ngăn nguyên liệu và ngăn thấm là 0,7 tới 1,3 atm. Sự thay đổi áp suất giữa hai ngăn được đo bằng hai đầu đo áp suất (3) và được hiển thị ở hai thiết bị (4). Từ các giá trị về áp suất ở hai ngăn sẽ tính được độ thấm của từng khí đơn theo các công thức như ở mục 2.5.1.

2.4.2. Khí hỗn hợp

Khí hỗn hợp được sử dụng có tỷ lệ CO₂:CH₄ là 50:50 theo thể tích, các thực nghiệm về độ thấm khí cũng được thực hiện tương tự như đối với khí nguyên chất. Khí được đưa vào ngăn nguyên liệu (sao cho độ chênh áp của hai ngăn từ 0,7 tới 1,3 atm), theo dõi sự thay đổi áp suất của cả hai ngăn theo thời gian sử dụng hai đầu đo áp suất như trong hình 1. Kết thúc thí nghiệm, khí ở ngăn thấm sẽ được thu gom và phân tích bằng sắc ký khí để xác định thành phần của từng khí trong hỗn hợp.

2.5. Phương pháp tính toán

2.5.1. Độ thấm

Độ thấm của khí nguyên chất qua màng được tính toán từ các dữ liệu về áp suất thu được ở hai ngăn (ngăn nguyên liệu và ngăn thấm) của thiết bị, được thể hiện trong công thức 1:

$$\frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{[P_{feed} - P_{perm}]_0}{[P_{feed} - P_{perm}]} \right) = \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{\Delta p_0}{\Delta p} \right) = P \frac{t}{l} \quad (1)$$

Trong đó p_{feed} và p_{perm} là áp suất trong ngăn nguyên liệu và ngăn thấm (Pa), P là độ thấm của màng ($m^2 s^{-1}$), t là thời gian (s), l là độ dày của màng (m). Thông số hình học đặc trưng cho hình dạng của bình, được cho bởi công thức 2 [16-18]:

$$\beta = A \times \left(\frac{1}{V_{feed}} + \frac{1}{V_{perm}} \right) \quad (2)$$

Trong đó A là diện tích màng (m^2) và V_{feed} và V_{perm} là thể tích của ngăn nguyên liệu và ngăn thấm (m^3).

2.5.2. Độ chọn lọc

Độ chọn lọc lý tưởng $\alpha_{A/B}$ có thể được xác định bởi các độ thấm riêng của hai khí nguyên chất khác nhau (A và B) [13, 16, 19].

Trong các thí nghiệm về hỗn hợp khí, độ chọn lọc ($\alpha_{A/B}$) được cho bởi công thức (3) [20]:

$$\alpha_{A/B} = \frac{y_A / x_A}{y_B / x_B} \quad (3)$$

Trong đó y_A và y_B là phần mol của khí A và khí B trong ngăn thấm, và x_A và x_B là phần mol của khí A và khí B trong ngăn nguyên liệu.

2.5.3. Phương pháp xác định độ ổn định của màng tấm chất lỏng ion

Độ ổn định của các màng tấm chất lỏng ion được xác định bằng cách đo sự thay đổi về khối lượng của màng tấm chất lỏng ion theo thời gian sử dụng. Sau mỗi khoảng thời gian tiến hành các thực nghiệm, màng sẽ được cân lại để xác định khối lượng tại thời điểm đó. Độ ổn định của màng chính là khoảng thời gian mà màng có sự thay đổi đáng kể về khối lượng so với khối lượng ban đầu.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Độ chênh áp phù hợp giữa ngăn nguyên liệu và ngăn thấm

Để tiến hành đo độ thấm cần phải lựa chọn độ chênh áp giữa ngăn nguyên liệu và ngăn thấm cho phù hợp. Nếu độ chênh áp cao quá sẽ làm cho độ bền của màng bị giảm, có thể sẽ làm hỏng màng. Nếu độ chênh áp thấp quá thì thời gian tách sẽ khí sẽ lâu. Các kết quả đo độ chênh áp phù hợp của từng màng tấm chất lỏng ion được trình bày trong bảng 1.

Các kết quả thu được trong bảng 1 cho thấy độ chênh áp giới hạn của màng PES và PVDF là 1,5 atm. Tuy nhiên, để các màng tấm chất lỏng ion làm việc ổn định, trong các thí nghiệm đo độ thấm độ chênh áp sẽ được lựa chọn trong khoảng từ 0,7-1,3 atm.

3.2. Đánh giá khả năng tách CO₂ của màng tấm chất lỏng ion

3.2.1. Độ chọn lọc lý tưởng của các khí nguyên chất

Độ thấm của các khí đơn CO₂ và CH₄ qua các màng polyme tấm chất lỏng ion khác nhau được thể hiện trong bảng 2. Các kết quả cho thấy độ thấm của các khí đơn khá ổn định và phụ thuộc vào từng loại màng tấm chất lỏng ion. Độ thấm của CO₂ cao hơn rõ rệt độ thấm của CH₄ cho thấy tiềm năng sử dụng màng này cho quá trình tách khí CO₂ trong hỗn hợp với khí CH₄.

Bảng 3 đưa ra các giá trị về độ chọn lọc lý tưởng và hiệu suất tách lý tưởng thu được từ các thực nghiệm với các màng tấm chất lỏng ion được khảo sát. Độ chọn lọc lý tưởng được tính toán dựa trên tỉ số của các giá trị về độ thấm của các khí nguyên chất. Tương ứng với mỗi giá trị về độ chọn lọc là giá

trị về hiệu suất tách (thể hiện rõ ràng hơn về hiệu quả tách khí của các màng tấm chất lỏng ion).

Bảng 1: Độ chênh áp phù hợp giữa ngăn nguyên liệu và ngăn thấm

Màng \ Áp suất (atm)	0,4	0,7	1	1,3	1,5	1,7
PES tấm [BMIM][BF ₄]	Ổn định	Ổn định	Ổn định	Ổn định	Ổn định	Không ổn định
PES tấm [BMIM][CH ₃ COO]	Ổn định	Ổn định	Ổn định	Ổn định	Ổn định	Không ổn định
PVDF tấm [BMIM][BF ₄]	Ổn định	Ổn định	Ổn định	Ổn định	Ổn định	Không ổn định
PVDF tấm [BMIM][CH ₃ COO]	Ổn định	Ổn định	Ổn định	Ổn định	Ổn định	Không ổn định

Bảng 2: Độ thấm của CO₂ và CH₄ qua các màng tấm chất lỏng ion

Màng tấm chất lỏng ion	Độ thấm của khí đơn (m ³ /s.m)	
	CO ₂	CH ₄
PVDF tấm chất lỏng ion [BMIM][BF ₄]	3,16×10 ⁻¹⁰	2,19×10 ⁻¹¹
PES tấm chất lỏng ion [BMIM][BF ₄]	4,99×10 ⁻¹⁰	3,67×10 ⁻¹¹
PVDF tấm chất lỏng ion [BMIM][CH ₃ COO]	2,63×10 ⁻¹⁰	2,17×10 ⁻¹¹
PES tấm chất lỏng ion [BMIM][CH ₃ COO]	2,39×10 ⁻¹⁰	2,23×10 ⁻¹¹

Bảng 3: Độ chọn lọc lý tưởng và hiệu suất tách lý tưởng của các màng tấm chất lỏng ion

Màng tấm chất lỏng ion	Độ chọn lọc lý tưởng CO ₂ /CH ₄	Hiệu suất tách lý tưởng (%)
PVDF tấm chất lỏng ion [BMIM][BF ₄]	14,43	93,52
PES tấm chất lỏng ion [BMIM][BF ₄]	13,6	93,15
PVDF tấm chất lỏng ion [BMIM][CH ₃ COO]	12,12	92,38
PES tấm chất lỏng ion [BMIM][CH ₃ COO]	10,72	91,47

Độ chọn lọc lý tưởng của các màng tấm chất lỏng ion đối với các khí cũng phụ thuộc vào loại chất lỏng ion và loại chất mang (màng polyme). Trong nghiên cứu này, màng PVDF tấm chất lỏng ion [BMIM][BF₄] thể hiện độ chọn lọc và hiệu suất

tách lý tưởng cao nhất, tương ứng là 14,43 và 93,52 %. Các màng còn lại cũng thể hiện hiệu suất tách lý tưởng khá cao, đều trên 90 %.

Theo báo cáo của Hanioka và cộng sự về nghiên cứu tách CO₂ ra khỏi CH₄ dùng 2 chất lỏng ion gốc N-aminopropyl-methylimidazol trong khoảng nhiệt độ 25-75 °C thì độ thấm của CO₂ và CH₄ tăng từ 500 đến 1500 và 10-60 barrer (hiệu suất tách 84-88 %) [22].

3.2.2. Độ chọn lọc của khí trong hỗn hợp

Để mô phỏng quá trình tách CO₂ trong thực tế, độ chọn lọc của hỗn hợp khí gồm 50 % CO₂ và 50 % CH₄ (theo thể tích) cũng được nghiên cứu tương tự như với các khí đơn. Hỗn hợp khí được đưa vào ngăn nguyên liệu với độ chênh áp thích hợp với ngăn thấm. Sau khi tiến hành thực nghiệm, thành phần của khí thấm qua màng được xác định nhờ phương pháp sắc kí khí (GC). Độ chọn lọc của CO₂ và CH₄ khi thấm qua màng polyme tấm chất lỏng ion được tính theo công thức 4. Các kết quả về độ chọn lọc và hiệu suất tách của hỗn hợp khí được đưa ra trong bảng 4.

Bảng 4: Độ chọn lọc và hiệu suất tách đối với hỗn hợp khí của các màng tấm chất lỏng ion

Màng tấm chất lỏng ion	Độ chọn lọc hỗn hợp CO ₂ /CH ₄	Hiệu suất tách của hỗn hợp khí (%)
PVDF tấm chất lỏng ion [BMIM][BF ₄]	12,85	92,8
PES tấm chất lỏng ion [BMIM][BF ₄]	11,72	92,1
PVDF tấm chất lỏng ion [BMIM][CH ₃ COO]	10,40	91,9
PES tấm chất lỏng ion [BMIM][CH ₃ COO]	9,77	90,9

Các giá trị thu được trong bảng 4 cho thấy, tương tự như đối với khí lý tưởng, độ chọn lọc và hiệu suất tách của màng PVDF tẩm chất lỏng ion [BMIM][BF₄] đối với hỗn hợp khí thể hiện giá trị cao nhất, tương ứng là 12,85 và 92,8 %. Các giá trị về hiệu suất tách của các màng tẩm chất lỏng ion còn lại đều trên 90 %. Mặc dù, các thực nghiệm trên mới chỉ giới hạn ở một tỷ lệ và thành phần nhất định của hỗn hợp khí, tuy nhiên, các kết quả khả quan về độ chọn lọc thu được cho thấy có thể sử dụng các màng polyme tẩm chất lỏng ion cho quá trình tinh chế khí tự nhiên có chứa nhiều CO₂.

Độ chọn lọc của màng tẩm chất lỏng ion đối với

hỗn hợp khí nhỏ hơn so với khí lý tưởng từ 10-12 %. Điều này có thể được lý giải như sau: trong hỗn hợp khí có sự cạnh tranh về sự thấm qua, trong khí nguyên chất thì không có hiện tượng này. Điều này có thể làm cho độ thấm của khí CO₂ giảm, dẫn tới làm giảm độ chọn lọc. Tuy nhiên, hiệu suất tách chỉ giảm từ 0,5 đến 1 %.

3.3. Độ ổn định của màng tẩm chất lỏng ion

Sau 30 ngày sử dụng liên tục, các màng polyme tẩm chất lỏng ion được đem cân kiểm tra khối lượng (bảng 5).

Bảng 5: Sự thay đổi khối lượng của màng theo thời gian

Thời gian (ngày)	1	3	5	7	10	30
Khối lượng [BMIM][BF ₄] trên màng PES (g)	0,2037	0,2034	0,2032	0,2032	0,2032	0,2032
Khối lượng [BMIM][CH ₃ COO] trên màng PES (g)	0,2018	0,2015	0,2014	0,2014	0,2014	0,2014
Khối lượng [BMIM][BF ₄] trên màng PVDF (g)	0,1592	0,1590	0,1590	0,1590	0,1588	0,1588
Khối lượng [BMIM] trên màng PVDF (g)	0,1394	0,1391	0,1390	0,1390	0,1390	0,1390

Kết quả cho thấy khối lượng của màng thay đổi rất ít trong vài ngày đầu sau đó ổn định, đó là do một phần nhỏ lượng chất lỏng ion bám trên bề mặt ngoài của màng bị trôi đi trong quá trình thử nghiệm. Các kết quả đo độ thấm và độ chọn lọc của các màng này cũng không thay đổi. Từ đó có thể kết luận chất lỏng ion ổn định trên các màng chế tạo được.

4. KẾT LUẬN

Các màng polyme tẩm chất lỏng ion trong nghiên cứu này có khả năng thẩm thấu chọn lọc đối với CO₂ trong hỗn hợp với CH₄. Hiệu suất tách đạt trên 90 % với tất cả các màng tẩm chất lỏng ion trong nghiên cứu này. Mặt khác, các màng tẩm chất lỏng ion cũng khá ổn định trong các điều kiện tiến hành thực nghiệm. Các kết quả thu được cho thấy tiềm năng của màng tẩm chất lỏng ion trong tinh chế khí tự nhiên, khí biomass... đặc biệt là các khí có hàm lượng CO₂ cao.

Lời cảm ơn. Tác giả trân trọng cảm ơn sự hỗ trợ kinh phí của Bộ Khoa học và Công nghệ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Maqsood Ahmad Malik và các cộng sự. *Ionic liquid*

- in supported liquid membrane technology*, Chemical Engineering Journal, **171**, 242-254 (2011)
- C. Myers, H. Pennline, D. Luebke, J. Ilconich, J.K. Dixon, E. J. Maginn, J. F. Brennecke. *High temperature separation of carbon dioxide/hydrogen mixtures using facilitated supported ionic liquid membranes*, J. Membr. Sci., **322**, 28-31 (2008).
 - F. J. Hernández-Fernández, A. P. de los Ríos, F. Tomás-Alonso, D. Gómez, G. Villora. *Preparation of supported ionic liquid membranes: influence of the ionic liquid immobilization method on their operational stability*, J. Membr. Sci., **341**, 172-177 (2009).
 - A. P. de los Rios, F. J. Hernandez-Fernandez, F. Tomas-Alonso, J. M. Palacios, D. Gomez, M. Rubio, G. Villora. *A SEM-EDX study of highly stable supported liquid membranes based on ionic liquids*, J. Membr. Sci., **300**, 88 (2007).
 - A. S. Kovvali, H. Chen, G. Obuskovic, S. Majumdar, K. K. Sirkar. *Immobilized liquid membranes for CO₂ separation*, Center for Membrane Technologies, Department of Chemical Engineering, Chemistry and Environmental Science, New Jersey Institute of Technology, Newark, NJ 07102.
 - Jiang Yingying, et al. *Permeability and selectivity of sulfur dioxide and carbon dioxide in supported ionic liquid membranes*, Separation Science and Engineering-Chinese Journal of Chemical Engineering, **17(4)**, 594-601 (2009).

7. H. Takeuchi, et al. *Some observation on the stability of supported liquid membranes*, Journal of Membrane Science, **34**, 19-24 (1987).
8. Bates E. D., Mayton R. D., Ntai I., Davis J. H. *CO₂ capture by a task-specific ionic liquid*, J. Am. Chem. Soc., **124**, 926-927 (2002).
9. Wu W., Han B., Gao H., Liu Z., Jiang T., Huang J. *Sulfurization of flue gas: SO₂ absorption by an ionic liquid*, Angew. Chem. Int. Ed., **43**, 2415-2417 (2004).
10. Welton T. *Room-temperature ionic liquids, solvents for synthesis and catalysis*, Chemical Reviews, **99**(8), 2071-2083 (1999).
11. Keskin S., Kayrak-Talay D., Akman U., Hortaçsu Ö. *A review of ionic liquids towards supercritical fluid applications*, Journal of Supercritical Fluids, **43**(1), 150-180 (2007).
12. A. P. de los Ríos, F. J. Hernández-Fernández, M. Rubio, F. Tomás-Alonso, D. Gómez, G. Vllora. *Prediction of the selectivity in the recovery of transesterification reaction products using supported liquid membranes based on ionic liquids*, Journal of Membrane Science, **307**(2), 225-232 (2008).
13. A. P. de los Ríos, F. J. Hernández-Fernández, M. Rubio, F. Tomás-Alonso, D. Gómez, G. Vllora. *On the importance of the nature of the ionic liquids in the selective simultaneous separation of the substrates and products of a transesterification reaction through supported ionic liquid membranes*. Journal of Membrane Science, **307**(2), 233-238 (2008).
14. P. Scovazzo, J. Kieft, D. A. Finan, C. Koval, D. DuBois, R. Noble. *Gas separations using non-hexafluorophosphate [PF₆]⁻anion supported ionic liquid membranes*, J. Membr. Sci., **238**, 57-63 (2004).
15. J. Ilconich, C. Myers, H. Pennline, D. Luebke. *Experimental investigation of the permeability and selectivity of supported ionic liquid membranes for CO₂/He separation at temperatures up to 125 °C*, Journal of Membrane Science, **298**(1-2), 41-47 (2007).
16. Bùi Thị Lê Thủy. *Nghiên cứu quá trình mang chất lỏng ion lên màng polyme định hướng cho quá trình tách khí CO₂ khỏi hỗn hợp với khí hydrocacbon*, Tạp chí Dầu khí, **3**, 45-50 (2013).
17. P. Luis, L. A. Neves, C. A. M. Afonso, I. M. Coelho, J. G. Crespo, A. Gareia, A. Irabien. *Facilitated transport of CO₂ and SO₂ through Supported Ionic Liquid Membranes (SILMs)*, Desalination, **245**, 485-493 (2009).
18. E. L. Cussler, Diffusion. *Mass transfer in fluid systems*, 2nd Ed. Cambridge University Press, USA. 1997.
19. Tai-Shung Chung, Lan Ying Jiang, Yi Li, Santi Kulprathipanja. *Mixed matrix membranes (MMMs) comprising organic polymers with dispersed inorganic fillers for gas separation*, Prog. Polym. Sci., **32**, 483-507 (2007).
20. S.H. Barghi, M. Adibib, D. Rashtchian. *An experimental study on permeability, diffusivity, and selectivity of CO₂ and CH₄ through [bmim][PF₆] ionic liquid supported on an alumina membrane: Investigation of temperature fluctuations effects*, Journal of Membrane Science, **263**(1-2), 346-352 (2010).
21. Luísa A. Neves, João G. Crespo, Isabel M. Coelho. *Gas permeation studies in supported ionic liquid membranes*, Journal of Membrane Science, **357**, 160-170 (2010).
22. Hanioka S., Maruyama T., Sotani T., Teramoto M., Matsuyama H., Nakashima, K., Hanaki M., Kubota F., Goto M. *CO₂ separation facilitated by task-specific ionic liquids using a supported liquid membrane*, Journal of Membrane Science, **314**, 1-2, 1-4 (2008).

Liên hệ: **Bùi Thị Lê Thủy**

Trường Đại học Mỏ-Địa chất Hà Nội

Đông Ngạc, Từ Liêm, Hà Nội

E-mail: thuykhai2001@gmail.com; Điện thoại: 0437520219, 0977476139.