

Research Article

การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้โมโนเอทาโนเอมีนในช่อง

จุลภาค

Carbon dioxide capture using monoethanolamine in a microchannel

อมราภรณ์ แก้วชะญา^{1*}, ศิริณญา ทองเสมอ² และอรรถศักดิ์ จารีย์²

Amaraporn Kaewchada^{1*}, Sirinya Tongsamaur² and Attasak Jaree²

¹ ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร อาหาร และสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

² ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

¹Department of Agro-Industrial, Food and Environmental Technology, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangsue, Bangkok 10800

²Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Chatuchak, Bangkok 10900

*E-mail: amaraporn.k@sci.kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์เป็นกระบวนการที่ได้รับความสนใจค่อนข้างมาก ทั้งจากอุตสาหกรรมและงานวิจัย เพื่อลดปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์และการนำไปใช้ประโยชน์ จึงมีการพัฒนากระบวนการดักจับแก๊สแบบต่าง ๆ เช่น แบบเบดบรรจุ แบบหอฟองแก๊ส เป็นต้น งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีช่องจุลภาคในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้สารละลายโมโนเอทาโนเอมีนเป็นสารดูดซับ ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ความดัน (1-3 บรรยากาศ) อัตราส่วนโดยโมลระหว่างโมโนเอทาโนเอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์ (2:1 - 4:1) และอัตราการไหลของสารดูดซับ (3-5 มิลลิลิตรต่อนาที) พบว่า การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของสารดูดซับโดยควบคุมให้อัตราส่วนโดยโมลคงที่ ไม่ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สเปลี่ยนแปลง อัตราส่วนโดยโมลไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สมากนักที่ความดันบรรยากาศ แต่จะส่งผลมากขึ้นที่ความดัน 3 บรรยากาศ เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล พบว่าเทคโนโลยีช่องจุลภาคสามารถทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสูงกว่าระบบการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปแบบอื่น ๆ เป็นอย่างมาก

คำสำคัญ: คาร์บอนไดออกไซด์, ช่องจุลภาค, โมโนเอทานอลามีน

Abstract

Carbondioxide (CO_2) capture has considerably gained the interest from industry and research. To reduce CO_2 emission and utilize the purified CO_2 , many processes have been developed such as packed-bed, bubble column etc. This work applied micro-technology for the absorption of CO_2 by using monoethanolamine (MEA). Factors for the investigation include pressure (1-3 atm) molar ratio between MEA and CO_2 (2:1 - 4:1) and volumetric flow rate of liquid phase (3-5 ml/min). The variation of liquid phase volumetric flow rate while keeping the molar ratio constant did not significantly affect the CO_2 absorption efficiency. For atmospheric pressure, increasing the molar ratio slightly improved the performance. Increasing the operating pressure caused this effect to markedly decrease the log-mean CO_2 concentration. By comparing the mass transfer coefficient obtained from different types of unit operation, microchannel exhibited high potential due to the high value of $k_L a$.

Keywords: carbon dioxide, microchannel, monoethanolamine

บทนำ

คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่าง ๆ ได้อย่างมาก เช่น ใช้ทำน้ำแข็งแห้ง ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เป็นต้น แต่หากได้รับแก๊สนี้ในปริมาณมากก็อาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพได้ ด้วยคุณสมบัติที่ไม่มีกลิ่น อาจทำให้ผู้คนโดยไม่รู้ตัว หากสูดดมมาก ๆ อาจร้ายแรงถึงขั้นเสียชีวิตได้ แต่ในสถานะทั่ว ๆ ไปปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศมีความเข้มข้นประมาณ 400 ppm ซึ่งถือว่าไม่เป็นอันตราย ไม่เป็นพิษตามหลักมาตรฐานสากล (จุฬารัตน์และวิวัฒน์, 2555) นอกจากนี้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยสู่บรรยากาศที่มากเกินไปนั้นยังมีส่วนสำคัญต่อปรากฏการณ์เรือนกระจกที่ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม (Bernard, 2003) ถ้าปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศโลกรวมถึงแก๊สเรือนกระจกอื่น ๆ มีปริมาณมากขึ้น แก๊สเหล่านี้จะสะท้อนรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์และกักเก็บไว้ ทำให้อุณหภูมิของพื้นผิวโลกสูงขึ้น และแนวโน้มของอุณหภูมิของพื้นผิวโลกก็ยิ่งเพิ่มขึ้นทุก ๆ ปี (RamanathanและFeng, 2009)

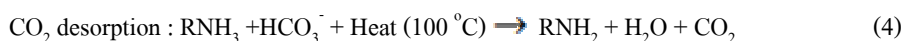
การลดปริมาณการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศนั้นทำได้โดยการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่นิยมใช้ ได้แก่ การดักจับด้วยน้ำ (water scrubbing) การดูดซับโดยการเปลี่ยนความดัน (pressure swing absorption: PSA) การแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน (membrane separation) (EbnerและRitter, 2009) การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) (Chaffeeและคณะ, 2007) และการดูดซับด้วยสารเคมี

(chemical absorption) เป็นต้น โดยทั่วไปนิยมใช้เทคนิคการดูดซับด้วยสารเคมีโดยใช้สารละลายเอมีน เนื่องจากมีราคาค่อนข้างต่ำ สารละลายที่ใช้เป็นสารดูดซับยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ มีประสิทธิภาพการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์สูงและมีเสถียรภาพทางความร้อน (McCann และคณะ, 2008) โดยตัวอย่างสารละลายเอมีนที่นิยมใช้ในกระบวนการนี้ ได้แก่ monoethanolamine (MEA), diethanolamine (DEA), methyl diglycolamine (DGA) เป็นต้น

คาร์บอนไดออกไซด์สามารถละลายน้ำได้เล็กน้อย โดยเกิดการดูดซับแบบกายภาพ มีปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้อง 2 ปฏิกิริยาดังสมการที่ 1 และ 2 (Danckwerts, 1970) ทั้งนี้ปฏิกิริยาในสมการที่ 2 เกิดขึ้นได้เร็วกว่าปฏิกิริยาในสมการที่ 1 ที่สภาวะ $\text{pH} > 10$ ดังนั้นปฏิกิริยาในสมการที่ 1 จึงไม่น่ามาพิจารณาในการคิดอัตราการดูดซับสำหรับคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลายอัลคาไลน์



ปฏิกิริยาเคมีของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอมีนเป็นดังสมการที่ 3 โดยจะเห็นได้ว่าจากสมการจะใช้สารละลายเอมีน 2 โมลต่อคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมล นอกจากนี้แล้วสารละลายเอมีนที่ผ่านการใช้งานแล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการทำปฏิกิริยา CO_2 desorption ด้วยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 80 - 100 องศาเซลเซียส แล้วทำการลดความดัน ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ สารละลายเอมีนและน้ำ (สมการที่ 4) โดยสารละลายเอมีนสามารถกลับมาใช้ในกระบวนการได้ใหม่ ส่วนคาร์บอนไดออกไซด์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่าง ๆ ได้ดังนี้ การใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ผลิตน้ำแข็งแห้ง เป็นสารตั้งต้นในการผลิตน้ำอัดลม ใช้ในระบบปั๊มลม (pneumatic system) ของเครื่องจักร หุ่นยนต์ แขนกล หรือเครื่องมือต่าง ๆ เป็นต้น



กลไกการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยโมโนเอทาโนลามีนมีปฏิกิริยาชีวิตเตอร์ไอออนเป็นปฏิกิริยาหลัก โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การสร้างโมเลกุลชีวิตเตอร์ไอออนโดยคาร์บอนไดออกไซด์หนึ่งโมเลกุลทำปฏิกิริยากับโมโนเอทาโนลามีนหนึ่งโมเลกุล เกิดเป็นโมเลกุลของชีวิตเตอร์ไอออน ดังสมการที่ 5 สำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโมโนเอทาโนลามีนนั้น จะเรียก $\text{MEA}^+\text{HCO}_3^-$ ว่า “คาร์บาเมต (carbamate)”

จากนั้นคาร์บาเมทหนึ่งโมเลกุลจะเข้าทำปฏิกิริยากับโมโนเอทานอลามีนอีกหนึ่งโมเลกุล เพื่อเป็นการถ่ายโอนโปรตอน ดังสมการที่ 6



ปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอมีนนั้น เป็นปฏิกิริยาชนิดคายความร้อนและเป็นแบบผันกลับได้ อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะนำไปสู่การผันกลับของปฏิกิริยามากขึ้น ดังนั้นในระบบที่มีอุณหภูมิสูงจะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำลง นอกจากปฏิกิริยาในสมการที่ 6 ซึ่งเป็นปฏิกิริยาหลักแล้วนั้น ยังสามารถเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงได้อีกด้วย แสดงดังสมการที่ 7



โดยที่ B คือ สารละลายเบสที่สามารถเข้ามารับโปรตอน (proton) ซึ่งเป็นได้หลายสาร ได้แก่ OH^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- หรือแม้แต่ น้ำ (H_2O) ภายใต้สภาวะการดำเนินงานวิจัยนี้จะมีผลิตภัณฑ์หลักคือ MEAH^+ กับ MEACOO^- ส่วนสารละลายเบสอื่นที่กล่าวไปข้างต้นจะมีความเข้มข้นที่ต่ำมากจึงไม่นำมาพิจารณา (Chunbol และคณะ, 2012)

ค่าฟลักซ์ของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 absorption flux: N_{CO_2}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 8

$$N_{\text{CO}_2} = \frac{n_{\text{CO}_2, \text{in}} - n_{\text{CO}_2, \text{out}}}{aV} \quad (8)$$

โดยที่ $n_{\text{CO}_2, \text{in}}$ คือ โมลของคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า
 $n_{\text{CO}_2, \text{out}}$ คือ โมลของคาร์บอนไดออกไซด์ขาออก
 V คือ ขนาดของช่องจุลภาค
 a คือ interfacial area per volume

ค่า logarithmic mean ของความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ในพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างขาเข้าและขาออกคำนวณได้จากสมการที่ 9 ดังนี้

$$\Delta C_{CO_2,m} = \frac{C_{CO_2,in} - C_{CO_2,out}}{\ln \left(\frac{C_{CO_2,in}^*}{C_{CO_2,out}} \right)} \quad (9)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคของเหลว (liquid-phase mass transfer coefficient, $k_{L,physical}$)
ค่า liquid-side mass transfer coefficient หรือ k_L และค่า liquid-side volumetric mass transfer coefficient, $k_L a$
คำนวณได้จากสมการที่ 10, 11, 12 ตามลำดับ

$$k_{L,physical} = 2\sqrt{\frac{D_{CO_2}}{\pi\tau}} \quad (10)$$

$$k_L = \frac{N_{CO_2}}{\Delta C_{CO_2}} \quad (11)$$

$$k_L a = \frac{n_{CO_2,in} - n_{CO_2,out}}{V \Delta C_{CO_2}} \quad (12)$$

เวลาของการสัมผัสระหว่างแก๊สกับของเหลว (gas-liquid contact time, τ) คำนวณได้จากสมการที่ 13

$$\tau = \frac{3600wdL}{Q_G + Q_L} \quad (13)$$

โดยที่ Q_G คือ อัตราการไหลของแก๊ส

Q_L คือ อัตราการไหลของของเหลว

Enhancement factor (E) ของการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คำนวณได้จากสมการที่ 14

$$E = \frac{k_L}{k_{L,physical}} \quad (14)$$

ในปัจจุบันหน่วยปฏิบัติการที่นิยมใช้ในกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ มีดังนี้ หอดูดซึม (absorption tower) แพ็คคอลัมน์ (packed column) (Krumdieck และคณะ, 2008) และเพลทคอลัมน์ (plate column) (Faramarzi และคณะ, 2010) ด้วยขนาดที่ใหญ่และประสิทธิภาพในการถ่ายโอนมวลที่ค่อนข้างต่ำของหน่วยปฏิบัติการดังกล่าว จึงมีความจำเป็นที่จะต้องพัฒนาหรือหาเทคโนโลยีใหม่ที่จะลดขนาดของพื้นที่และพลังงานที่ใช้

ในระบบ (Chunboและคณะ, 2012) เทคโนโลยีหนึ่งที่น่าสนใจคือเทคโนโลยีระดับจุลภาค ซึ่งเป็นเทคโนโลยีได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในช่วงเวลา 15 ปีที่ผ่านมา เนื่องจากคุณสมบัติด้านการถ่ายเทมวลสารที่ดี มีพื้นที่ผิวที่สูงและขนาดเล็ก จึงทำให้เทคโนโลยีระดับจุลภาคมีข้อได้เปรียบและนิยมใช้ทางด้านการทำปฏิกิริยาเคมี เพราะการมีพื้นที่ผิวที่สูงทำให้สารสามารถสัมผัสและทำปฏิกิริยาได้ดี นอกจากนี้แล้วเทคโนโลยีระดับจุลภาคยังนิยมใช้สำหรับปฏิกิริยาการแยกสารและการวิเคราะห์สารอีกด้วย (Allen, 2001) โดยหน่วยปฏิบัติการจะเป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาค (microchannel reactor) ภายในเครื่องปฏิกรณ์จะมีช่องภายในเครื่องขนาดเล็กระดับไมโครเมตร โดยจะให้สารไหลผ่านช่องจุลภาค ซึ่งทำให้เกิดการถ่ายเทมวลได้ดี สามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว สามารถระบายความร้อนได้ในอัตราที่สูง มีความกะทัดรัดของอุปกรณ์สูงและประหยัดพลังงานและที่สำคัญการเพิ่มกระบวนการผลิตทำได้โดยการเพิ่มจำนวนของช่องจุลภาคโดยไม่ทำให้เกิดความดันตกคร่อม (pressure drop)

จากข้อดีของเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาคที่ได้กล่าวไปข้างต้นแล้วนั้นจึงทำให้เครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาคถูกเลือกเพื่อนำมาใช้เป็นหน่วยปฏิบัติการสำหรับกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโมโนเอทานอลามีนในงานวิจัยนี้

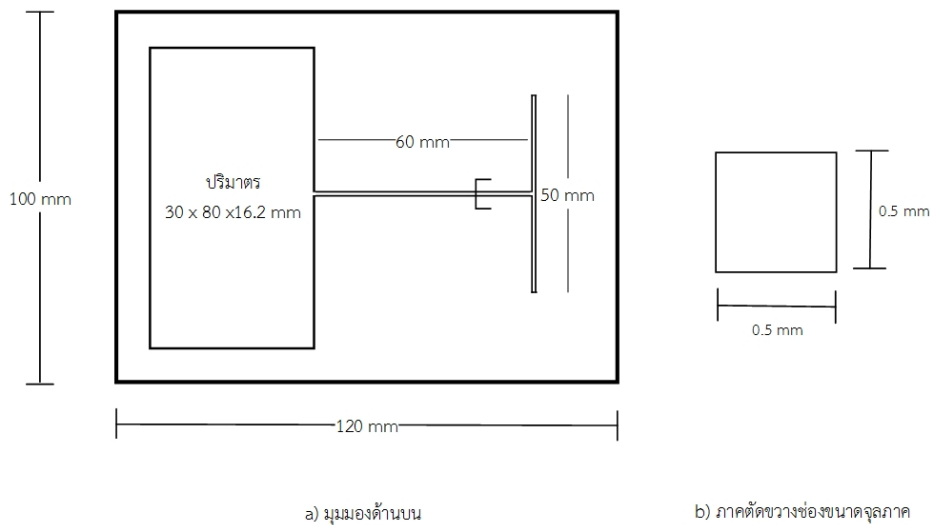
วิธีการทดลอง

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

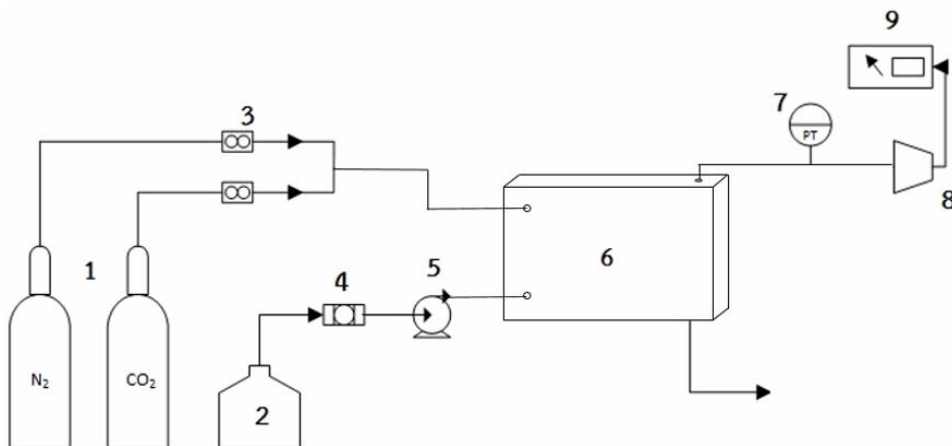
โมโนเอทานอลามีน 97% AR Grade จาก Ajax Finechem PTY Ltd. แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 99.9% จาก Praxair (THAILAND) Co., Ltd. แก๊สไนโตรเจน 99.9% จาก TIG Co., Ltd. น้ำจัดไอออนแล้ว (deionized water) และแก๊สชีวภาพ

วิธีดำเนินการทดลอง

ลักษณะของแผ่นช่องจุลภาคที่ใช้เป็นชนิด T มีลักษณะดังรูปที่ 1 และการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดลองเป็นดังรูปที่ 2 โดยเริ่มจากแก๊สผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจน (หมายเลข 1) จะถูกป้อนสู่เครื่องปฏิกรณ์โดยมีเครื่องควบคุมอัตราการไหลเชิงมวลในการป้อนแก๊ส (หมายเลข 3) เพื่อให้ได้สัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมตามที่ต้องการ ส่วนทางด้านของเหลวหรือสารที่ใช้ในการดูดซับนั้นจะถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์โดยผ่านตัวกรองและปั๊ม (หมายเลข 4 และ 5) โดยทั้งสายแก๊สและของเหลวจะถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาค (หมายเลข 6) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของสองวัฏภาคคือวัฏภาคแก๊สและของเหลว โดยแก๊สจะปล่อยออกทางด้านบน ผ่านเครื่องวัดความดันแก๊ส เครื่องควบคุมความดันแบบย้อนกลับ (หมายเลข 7 และ 8) และเข้าสู่เครื่องวัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (หมายเลข 9) เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหลืออกมาจากช่องจุลภาค



รูปที่ 1. ลักษณะแผ่นช่องจุลภาคชนิด T แบบแยกวัฏภาค



รูปที่ 2. การติดตั้งอุปกรณ์การทดลองของแผ่นช่องจุลภาค

(1. ถังแก๊ส 2. ปิกเกอร์ไสสารดูดซึม 3. เครื่องวัดอัตราการไหลโดยมวล 4. ตัวกรอง 5. ปั๊ม 6. เครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาค 7. เครื่องวัดความดันแก๊ส 8. เครื่องปรับความดันย้อนกลับ 9. เครื่องวัดความเข้มข้น CO₂)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองดักจับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ช่องจุลภาคที่สภาวะความดัน 1-3 บรรยากาศ และอุณหภูมิห้อง เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และโมโนเอทานอลเอมีนและอัตราการไหลของสารดูดซึม ทั้งนี้ค่า GHSV ของแก๊สผสมระหว่างไนโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ตลอดการทดลองถูกกำหนดให้คงที่ คือ $1.2 \times 10^6 \text{ h}^{-1}$ ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 1 ส่วนแรกเป็นการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของสารดูดซึม โดยที่มีการปรับความเข้มข้นของสารละลายโมโนเอทานอลเอมีนเพื่อให้ได้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างโมโนเอทานอลเอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์คงที่ จะเห็นว่าอัตราการไหลของสารดูดซึมนั้นไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการดักจับแก๊สแต่อย่างใด สะท้อนถึงการสัมผัสและถ่ายโอนมวลข้ามวัฏภาคที่สามารถเกิดได้อย่างรวดเร็ว ถัดมาเป็นการปรับเปลี่ยนความดันของระบบ พบว่าเมื่อเพิ่มความดันจะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซึมแก๊สเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มความดันของระบบจะทำให้คาร์บอนไดออกไซด์ละลายในวัฏภาคของเหลวได้มากขึ้น ซึ่งจะถูกดักจับด้วยโมโนเอทานอลเอมีนในวัฏภาคของเหลวโดยทันที อัตราส่วนโดยโมลระหว่างโมโนเอทานอลเอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วง 4:1 ถึง 2:1 นั้น ให้ผลการดูดซึมใกล้เคียงกันมาก โดยที่อัตราส่วน 4:1 ให้ประสิทธิภาพสูงสุด

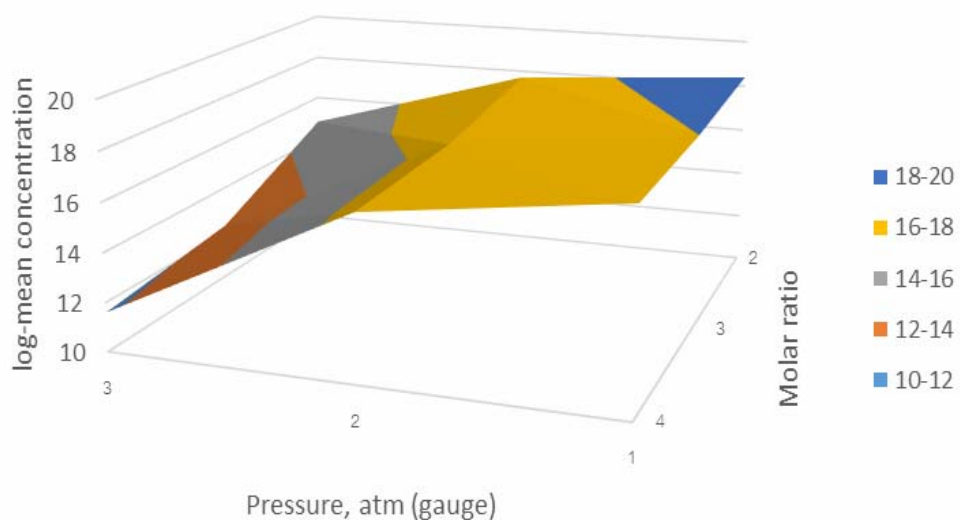
เมื่อนำข้อมูลการทดลองเฉพาะส่วนที่ใช้อัตราการไหลของสารดูดซึมเป็น 5 มิลลิลิตรต่อนาที ($\text{LHSV} = 1.02 \times 10^4 \text{ h}^{-1}$) มาวิเคราะห์ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล ได้ผลแสดงในรูปที่ 3 และ 4 พบว่าที่ความดันสูง 3 บรรยากาศ และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างโมโนเอทานอลเอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูง 4:1 จะทำให้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำที่สุด และในทางตรงข้ามเมื่อใช้ความดันบรรยากาศ และอัตราส่วนเชิงโมลที่ 2:1 จะให้ค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์สูงที่สุด สังเกตได้ว่าที่ความดันบรรยากาศนั้น การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลไม่ส่งผลกระทบต่อค่าพารามิเตอร์ทั้ง 2 มากนัก เมื่อนำไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลด้านวัฏภาคของเหลวจึงให้ค่าสูงสุดที่สภาวะความดัน 3 บรรยากาศ และอัตราส่วนเชิงโมล 4:1 การเพิ่มอัตราส่วนเชิงโมลในช่วง 2:1 ถึง 4:1 ที่ความดัน 3 บรรยากาศ นั้น ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเพิ่มขึ้นประมาณ 29 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามการใช้ปริมาณโมโนเอทานอลเอมีนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ต้นทุนของกระบวนการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย จึงควรมีการพิจารณาทางเศรษฐศาสตร์ประกอบการเลือกใช้สภาวะดำเนินการต่อไป

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลด้านวัฏภาคของเหลวมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่เป็นการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายโมโนเอทานอลเอมีน ดังแสดงในตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าหน่วยปฏิบัติการชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ดูดซึมแก๊สนั้น ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลที่แตกต่างกันค่อนข้างมาก หน่วยปฏิบัติการแบบเบดบรรจุและหอฟองแก๊สให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลต่ำที่สุด ส่วนหน่วยปฏิบัติการแบบช่องจุลภาคนั้นให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลที่ค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตามพฤติกรรมการณ์ที่เกิดขึ้นภายในช่องจุลภาคนั้นมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวค่อนข้างมาก เช่น แบบเป็นห้วงวัฏภาค การไหลแบบเป็นโพรง หรือแบบฟองฟุ้ง เป็นต้น

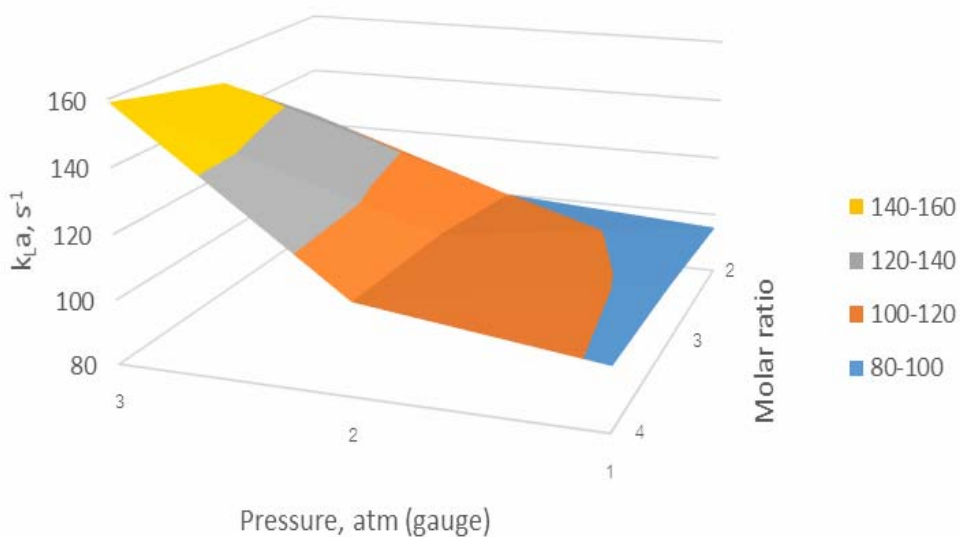
สำหรับการไหลแบบฟองที่จะเกิดผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคขึ้นได้มากเมื่อเปรียบเทียบกับการไหลแบบอื่น ๆ ดังนั้นจะเห็นว่าเทคโนโลยีของจุลภาคมีศักยภาพสูงในการนำมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะสามารถช่วยลดขนาดของหน่วยปฏิบัติการลงได้มาก

ตารางที่ 1. ประสิทธิภาพการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ (อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส)

MEA:CO ₂	flow rate (ml/min)	MEA wt. %	P (bar)	ประสิทธิภาพ (%)
4:1	5	17	3	99.06
	5		2	95.79
	5		1	94.52
	4	20	3	99.10
	4		2	96.13
	4		1	94.55
	3	27	3	99.26
	3		2	96.27
	3		1	94.80
3:1	5	12	3	98.77
	5		2	95.57
	5		1	94.35
	4	15	3	98.87
	4		2	95.67
	4		1	94.65
	3	20	3	99.08
	3		2	95.76
	3		1	94.72
2:1	5	8	3	97.32
	5		2	94.68
	5		1	93.88
	4	10	3	97.57
	4		2	95.24
	4		1	94.01
	3	14	3	98.93
	3		2	95.65
	3		1	94.17



รูปที่ 3. Log-mean concentration ของคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 4. ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลด้านวิทยาศาสตร์ของเหลว

ตารางที่ 2. สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลด้านวิทยาศาสตร์ของเหลวสำหรับหน่วยปฏิบัติการชนิดต่าง ๆ

หน่วยปฏิบัติงาน	liquid-side vol mass transfer coefficient, $k_L a$ (s^{-1}) ($\times 10^{-2}$)
Countercurrent packed columns (Charpentier, 1981)	0.04 - 7
Packed bed (Zhang และคณะ, 2005)	490 -620
Bubble columns (Charpentier, 1981)	0.5–24
Microreactor (Yue และคณะ, 2007)	30–2,100
Microreactor (Ganapath และคณะ, 2014)	1,100–13,200
งานวิจัยนี้	8,526 -15,906

สรุปผลการทดลอง

ช่องจุลภาคเป็นอุปกรณ์ที่มีศักยภาพสูงในการนำมาประยุกต์ใช้เพื่อดักจับแก๊ส งานวิจัยนี้ได้ใช้ช่องจุลภาคแบบดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายโมโนเอทานอลามีน ในการทดลองได้กำหนดให้อัตราการไหลของแก๊สอยู่ที่ ($1.2 \times 10^6 \text{ h}^{-1}$) โดยปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของสารดูดซึม อัตราส่วนเชิงโมลระหว่างโมโนเอทานอลามีน และความดัน การเปลี่ยนอัตราการไหลของสารดูดซึมโดยกำหนดให้อัตราส่วนเชิงโมลมีค่าคงที่ไม่ส่งผลต่อการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ การเพิ่มอัตราส่วนเชิงโมลทำให้สามารถดักจับแก๊สได้มากขึ้นเล็กน้อยที่ความดันบรรยากาศ และสามารถดักจับได้เพิ่มขึ้นอีกที่ความดัน 3 บรรยากาศ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลด้านวิทยาศาสตร์ของเหลวอยู่ในช่วง $8,526 -15,906 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ซึ่งมากกว่าหน่วยปฏิบัติการชนิดอื่น เช่น เบดบรรจุ หอฟองแก๊ส เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่สนับสนุนงบประมาณการทำวิจัย และขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร อาหาร และสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

จุฑารัตน์ ฉัตรวิริยวงศ์ และวิวัฒน์ เอกบูรณะวัฒน์, (2555) Carbon dioxide, ที่มา: http://www.summacheeva.org/index_thaitox_carbon_dioxide.htm, สืบค้น 1 มิถุนายน 2558.

Allen R., (2001) Microchannel reactors: chemical engineering in another dimension?. Ingenia, Issue 9, pp. 40-45.

- Bernard T., (2003) Sources d'énergie primaires et effet de serre. C. R. Geosci., 335(6-7): 597-601. (with abridged English version)
- Chaffee A.L., Knowles G.P. and Liang Z., Zhang J., Xiao P. and Webley P.A., (2007) CO₂ capture by adsorption: materials and process development. Int. J. Greenh. Gas Con., 1: 11-18.
- Charpentier J.C., (1981) Mass-transfer rates in gas-liquid absorbers and reactors. Adv. Chem. Eng., 11: 1-133.
- Chunbo Y., Guangwen C. and Quan Y., (2012) Process characteristics of CO₂ absorption by aqueous monoethanolamine in a microchannel reactor. Chinese J. Chem. Eng., 20(1): 111-119.
- Danckwerts P. V., (1970) Gas-liquid Reactions, McGraw-Hill Book Co., 276 P.
- Ebner A.D. and Ritter J.A., (2009) State of the art adsorption and membrane separation processes for carbon dioxide production from carbon dioxide emitting industries. Separ. Sci. Technol., 44(6): 1273-1421.
- Faramarzi L., Kontogeorgis G.M., Michelsen M.L., Thomsen K. and Stenby E.H., (2010) Absorber model for CO₂ capture by monoethanolamine. Ind. Eng. Chem. Res., 49(8): 3751-3759.
- Ganapathy H., Shooshtari A., Dessiatoun S., Alshehhi M. and Ohadi M., (2014) Fluid flow and mass transfer characteristics of enhanced CO₂ capture in a minichannel reactor. Appl. Energy, 119: 43-56.
- Krumdieck S., Wallace J. and Curnow O., (2008) Compact, low energy CO₂ management using amine solution in a packed bubble column. Chem. Eng. J., 135(1-2): 3-9.
- McCann N., Maeder M. and Attalla M., (2008) Simulation of enthalpy and capacity of CO₂ absorption by aqueous amine systems. Ind. Eng. Chem. Res., 47(6): 2002-2009.
- Ramanathan V. and Feng Y., (2009) Air pollution, greenhouse gases and climate change: global and regional perspectives. Atmos. Environ., 43: 37-50.
- Yue J., Chen G., Yuan Q., Luo L. and Gonthier Y., (2007) Hydrodynamics and mass transfer characteristics in gas-liquid flow through a rectangular microchannel. Chem. Eng. Sci., 62(7): 2096-2108
- Zhang X., Schubert S., Gruenewald M. and Agar D.W., (2005) Studies on the kinetics of carbon dioxide absorption with immobilised amines (IA). Chem. Eng. J., 107(1-3): 97-102.