

ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และภาวะทางความร้อนในการฟื้นฟูของตัวทำละลายชนิดใหม่
AMP-MPDL



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CARBON DIOXIDE ABSORPTION CAPACITY AND REGENERATION HEAT DUTY OF NOVEL
AMP-MPDL SOLVENT



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL
โดย	น.ส.รัตนภรณ์ อภัยยะกุล
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ เสมา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ เสมา)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เถลิ้มสินสุวรรณ)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.สุดคณิง สิงห์โต)	

รัตนารณ อภัยยะกุล : ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์และภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL. (CARBON DIOXIDE ABSORPTION CAPACITY AND REGENERATION HEAT DUTY OF NOVEL AMP-MPDL SOLVENT) อ.ที่ปรึกษาหลัก : อ. ดร.ธีรวัฒน์ เสมมา

ปัจจุบันคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณมากถูกปล่อยสู่บรรยากาศ ส่งผลให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้น จึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งนิยมใช้วิธีการดูดซึมด้วยตัวทำละลายเอมีน เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์สูง งานวิจัยนี้จึงศึกษาตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ความเข้มข้นรวม 30%wt. (5/25 10/20 และ 15/15 %wt. AMP/MPDL) และ 40%wt. (10/30 15/25 และ 20/20 %wt. AMP/MPDL) เปรียบเทียบกับตัวทำละลายดั้งเดิม MEA ทั้งนี้ ความจุการดูดซึมและความจุวนกลับของตัวทำละลาย AMP-MPDL ดำเนินการที่อุณหภูมิ 313 และ 363 K และความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 10.1–101.3 kPa ในส่วนของภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลาย ดำเนินการที่อุณหภูมิ 363 K เพื่อประเมินศักยภาพของตัวทำละลาย AMP-MPDL สำหรับใช้ทดแทนตัวทำละลายดั้งเดิม MEA โดยความจุการดูดซึมแสดงในหน่วย mol CO₂/mol amine ส่วนความจุวนกลับแสดงในหน่วย mol CO₂/L-amine solvent และ ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายแสดงในหน่วย kJ/mol CO₂ ผลการศึกษา พบว่า ความจุการดูดซึมเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP เพิ่มขึ้น และ ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น แต่ความจุการดูดซึมลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ทั้งที่ความเข้มข้นรวม 30%wt. และ 40%wt. ส่วนความจุวนกลับเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP เพิ่มขึ้นตลอดช่วงความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ ทั้งที่ความเข้มข้นรวม 30%wt. และ 40%wt. นอกจากนี้ ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายลดลงเมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP เพิ่มขึ้น ทั้งที่ความเข้มข้นรวม 30%wt. และ 40%wt. โดยสรุป อัตราส่วนความเข้มข้นที่มีศักยภาพสูงสุด คือ 20/20 %wt. AMP/MPDL มีความจุการดูดซึมและความจุวนกลับสูงกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA กว่า 30% และ 4.6 เท่า ตามลำดับ และมีภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายต่ำกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA 68%

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6270153823 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORD: Absorption capacity; Cyclic capacity; Regeneration heat duty.

Rattanaorn Apaiyakul : CARBON DIOXIDE ABSORPTION CAPACITY AND REGENERATION HEAT DUTY OF NOVEL AMP-MPDL SOLVENT. Advisor: Dr. TEERAWAT SEMA, Ph.D.

At present, a large amount of CO₂ is released to the atmosphere. The commonly used technology is CO₂ absorption by reactive amine solvent. This research studied novel AMP-MPDL solvent with the total concentration of 30%wt. (5/25, 10/20, and 15/15 %wt. AMP/MPDL) and 40%wt. (10/30, 15/25, and 20/20 %wt. AMP/MPDL) in comparison with the conventional MEA. Additionally, the absorption capacity and cyclic capacity were measured at 313 and 363 K, and CO₂ partial pressure range of 10.1–101.3 kPa. The regeneration heat duty was determined at 363 K. In this research, the absorption capacity was shown in mol CO₂/mol amine while the cyclic capacity was presented in mol CO₂/L-amine solvent and regeneration heat duty was presented in kJ/mol CO₂. The results showed that for both total concentration of 30 and 40%wt. the absorption capacity increased as concentration ratio of AMP and CO₂ partial pressure increased but decreased as temperature increased. The cyclic capacity increased as concentration ratio of AMP increased over range of studied CO₂ partial pressure. In addition, the regeneration heat duty decreased as concentration ratio of AMP increased. In summary, the 20/20 %wt. AMP/MPDL showed the highest potential with 30% higher absorption capacity and 4.6 time higher cyclic capacity, and 68% lower regeneration heat duty than those of conventional MEA.

Field of Study: Chemical Technology

Student's Signature

Academic Year: 2020

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และภาวะทางความร้อนในการฟื้นฟูของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจาก ผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์และความช่วยเหลืออย่างสูงจากบุคคลหลายท่าน จึงขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ เสมอ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ แนวคิด และข้อเสนอแนะที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย รวมทั้งมอบความรู้ ความเข้าใจด้านวิชาการอย่างดียิ่งตลอดจนช่วยแก้ไขปรับปรุง เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ และ ดร.สุดคณิง สิงห์โต กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์มาเป็นกรรมการสอบ พร้อมทั้งให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะและความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา “ทุนวิทยบัณฑิต” จากคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทุนอุดหนุนค่าใช้จ่ายรายเดือน จากภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่เป็นแหล่งความรู้ให้แก่ผู้วิจัยได้ศึกษาตลอดการทำงานวิจัย และคณาจารย์ทุกท่าน ในภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่าน ในภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและห้องปฏิบัติการวิจัยได้ดีมาโดยตลอด

ขอขอบคุณวรัญญา จันทอม ที่ให้ความรู้ในเรื่องเครื่องมือวิเคราะห์ คำปรึกษา คำแนะนำต่าง ๆ และให้ความช่วยเหลือเกี่ยวกับเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการวิจัยเสมอมา

ขอขอบคุณสมาชิกทุกคนของห้องปฏิบัติการ Fluidization และ Cybernetics ที่ให้การสนับสนุน และคำปรึกษา ตลอดจนพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมา ทำยนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา และครอบครัว ที่สนับสนุนและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

รัตนภรณ์ อภัยยะกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย.....	5
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	5
1.7 ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลงานวิจัย	7
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์	8
2.1.1 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ (Pre-combustion capture)	8
2.1.2 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์แบบเผาไหม้ด้วยเชื้อเพลิงที่มีออกซิเจนสูง (Oxy-fuel combustion capture)	9
2.1.3 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ (Post-combustion capture).....	9
2.2 เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้	10

2.2.1 การดูดซึม (absorption).....	11
2.2.2 การดูดซับ (adsorption).....	12
2.2.3 การแยกด้วยภาวะเย็นยวดยิ่ง (cryogenics separation).....	13
2.2.4 การแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน (membrane separation)	14
2.3 ทฤษฎีพื้นฐานสำหรับกระบวนการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวทำละลาย.....	16
2.4 ตัวทำละลายเอมีน	19
2.4.1 โมโนเอทานอลามีน (MEA).....	20
2.4.2 ไดเอทานอลามีน (DEA).....	20
2.4.3 ไตรเอทานอลามีน (TEA) และ เอ็น-เมทิลไดเอทานอลามีน (MDEA).....	20
2.4.4 2-อะมิโน-2-เมทิล-1-โพรพานอล (AMP)	21
2.4.5 พิเพอไลซีน (PZ).....	22
2.4.6 เอ็น-เมทิล-4-พิเพอริดีนอล (MPDL).....	22
2.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวทำละลายเอมีนกับคาร์บอนไดออกไซด์.....	24
2.5.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเอมีนปฐมภูมิและเอมีนทุติยภูมิกับคาร์บอนไดออกไซด์.....	25
2.5.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเอมีนตติยภูมิกับคาร์บอนไดออกไซด์.....	26
2.6 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL	27
2.7 ตัวชี้บอกสมรรถนะ	28
2.7.1 ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์	29
2.7.2 ความจุวนกลับ	29
2.7.3 ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลาย	30
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	32
2.8.1 ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ (absorption capacity).....	32
2.8.2 ความจุวนกลับ (cyclic capacity).....	34

2.8.3	ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลาย (regeneration heat duty).....	35
2.8.4	ตัวทำละลายเอมีนชนิดใหม่ <i>N</i> -methyl-4-piperidinol (MPDL).....	37
บทที่ 3	วิธีการดำเนินงานวิจัย	40
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	40
3.2	สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	41
3.2.1	สารเคมีและแก๊สที่ใช้ในการทดลอง.....	41
3.2.2	เครื่องมือและอุปกรณ์.....	41
3.3	วิธีการทดลอง.....	42
3.3.1	อุณหภูมิและอัตราส่วนความเข้มข้นที่ใช้ในการทดลอง.....	42
3.3.2	ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลายเอมีน	42
3.3.3	ความจุวนกลับของตัวทำละลายเอมีน	45
3.3.4	ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีน.....	45
3.3.5	ความจุความร้อนของตัวทำละลายเอมีน	47
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	49
4.1	ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL.....	49
4.1.1	ตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ที่ความเข้มข้นรวม 30%wt.....	49
4.1.2	ตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ที่ความเข้มข้นรวม 40%wt.....	52
4.2	ความจุวนกลับของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL	55
4.2.1	ตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ที่ความเข้มข้นรวม 30%wt.....	55
4.2.2	ตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ที่ความเข้มข้นรวม 40%wt.....	57
4.3	ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL	58
4.3.1	ตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ที่ความเข้มข้นรวม 30%wt.....	58
4.3.2	ตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ที่ความเข้มข้นรวม 40%wt.....	63
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	70

5.1 สรุปผลการวิจัย.....	70
5.2 ข้อเสนอแนะ	71
บรรณานุกรม.....	73
ภาคผนวก.....	77
ภาคผนวก ก	77
ประวัติผู้เขียน.....	90



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อด้อยของการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการดูดซึม การดูดซับ การแยกด้วยภาวะเย็นยวดยิ่ง และการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน	15
ตารางที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของตัวทำละลายเอมีนที่ใช้ในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์	23
ตารางที่ 2.3 ข้อดีและข้อด้อยของตัวทำละลายเอมีนที่ใช้ในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์	23
ตารางที่ 3.1 ความจุการดูดซึมของตัวทำละลาย MEA ความเข้มข้น 14 และ 30 %wt.	44
ตารางที่ 3.2 ความจุการดูดซึมของตัวทำละลาย AMP ความเข้มข้น 18 %wt.	44
ตารางที่ 4.1 ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์และความจุวนกลับของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ความเข้มข้นรวม 30%wt. ที่อัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL ต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 313 และ 363 K	51
ตารางที่ 4.2 ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์และความจุวนกลับของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ความเข้มข้นรวม 40%wt. ที่อัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL ต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 313 และ 363 K	54
ตารางที่ 4.3 สัดส่วนเชิงโมลของน้ำในตัวทำละลายผสมหลังการฟื้นฟู ความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิ และโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายกลับจากการฟื้นฟูของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ความเข้มข้นรวม 30 และ 40%wt. ที่อัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL ต่าง ๆ เปรียบเทียบกับตัวทำละลายดั้งเดิม MEA	61
ตารางที่ 4.4 ความจุความร้อนของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ความเข้มข้นรวม 30 และ 40%wt. ที่อัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL และอุณหภูมิต่าง ๆ เปรียบเทียบกับตัวทำละลายดั้งเดิม MEA	62
ตารางที่ 4.5 ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ความเข้มข้นรวม 30 และ 40%wt. ที่อัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL ต่าง ๆ เปรียบเทียบกับตัวทำละลายดั้งเดิม MEA	63
ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ได้จากการไทเทรตของเหลวตัวอย่าง สำหรับคำนวณความจุการดูดซึมของตัวทำละลาย 14%wt. MEA.....	78

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลที่ได้จากการไทเทรตของเหลวตัวอย่าง สำหรับคำนวณความจุการดูดซึมของตัวทำละลาย 30%wt. MEA.....	79
ตารางที่ ก.3 ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลาย 14 %wt. MEA.....	80
ตารางที่ ก.4 ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลาย 30 %wt. MEA.....	80
ตารางที่ ก.5 ข้อมูลที่ได้จากการไทเทรตของเหลวตัวอย่าง สำหรับคำนวณความจุการดูดซึมของตัวทำละลาย 5/25 %wt. AMP/MPDL ที่อุณหภูมิ 313 K.....	81
ตารางที่ ก.6 ข้อมูลที่ได้จากการไทเทรตของเหลวตัวอย่าง สำหรับคำนวณความจุการดูดซึมของตัวทำละลาย 5/25 %wt. AMP/MPDL ที่อุณหภูมิ 363 K.....	82
ตารางที่ ก.7 ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 5/25 %wt. AMP/MPDL และ ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 10.1 kPa (จากข้อ 2).....	84
ตารางที่ ก.8 ความจุความร้อนของน้ำ.....	87
ตารางที่ ก.9 ความจุความร้อนของ MEA บริสุทธิ์.....	88

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์แบบต่าง ๆ	10
รูปที่ 2.2 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการดูดซึม.....	12
รูปที่ 2.3 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการดูดซับ	13
รูปที่ 2.4 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการแยกด้วยภาวะเย็นยวดยิ่ง	14
รูปที่ 2.5 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์โดยการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน	15
รูปที่ 2.6 โครมแบบกระบวนการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวทำละลายเอมีนในหลอดดูดซึมและ ห่อฟืนฟู.....	19
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	40
รูปที่ 3.2 เครื่องมือวัดความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในตัวทำละลายเอมีน (ก) แผนภาพ การทดลอง และ (ข) Chittick apparatus.....	45
รูปที่ 3.3 เครื่องมือวัดภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีน	47
รูปที่ 3.4 Differential Scanning Calorimeter (DSC) สำหรับวัดค่าความจุความร้อน ของตัวทำละลายเอมีน.....	48
รูปที่ 4.1 ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP–MPDL ความเข้มข้น รวม 30%wt. ที่อัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL และความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ต่าง ๆ (ก) อุณหภูมิ 313 K และ (ข) อุณหภูมิ 363 K.....	52
รูปที่ 4.2 ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP–MPDL ความเข้มข้น รวม 40%wt. ที่อัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL และความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ต่าง ๆ (ก) อุณหภูมิ 313 K และ (ข) อุณหภูมิ 363 K.....	55
รูปที่ 4.3 ความจุกลับของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP–MPDL ความเข้มข้นรวม 30%wt. ที่อัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL ต่าง ๆ และความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 10.1 kPa เปรียบเทียบกับตัวทำละลายดั้งเดิม MEA.....	57

รูปที่ 4.4 ความจุวนกลับของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ความเข้มข้นรวม 40%wt. ที่อัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL ต่าง ๆ และความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 10.1 kPa เปรียบเทียบกับตัวทำละลายดั้งเดิม MEA..... 58

รูปที่ 4.5 ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ความเข้มข้นรวม 30%wt. ที่อัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL ต่าง ๆ เปรียบเทียบกับตัวทำละลายดั้งเดิม MEA..... 63

รูปที่ 4.6 ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ความเข้มข้นรวม 40%wt. ที่อัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL ต่าง ๆ เปรียบเทียบกับตัวทำละลายดั้งเดิม MEA..... 66

รูปที่ 4.7 ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 313 K และ 363 K ความจุวนกลับ และ ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ที่ความเข้มข้นรวม 30 และ 40%wt. ที่อัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL ต่าง ๆ เปรียบเทียบกับตัวทำละลายดั้งเดิม MEA 69

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเป็นความท้าทายสำคัญในการพัฒนาสังคมมนุษย์ ให้มีความยั่งยืนมากขึ้น การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโลกส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและสภาพอากาศที่รุนแรง การพัฒนาอุตสาหกรรมในด้านต่าง ๆ ส่งผลให้ความต้องการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยพลังงานที่ใช้ส่วนหนึ่งมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งทำให้เกิดก๊าซเรือนกระจกจำนวนมากถูกปล่อยสู่บรรยากาศ ส่งผลให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้น ในบรรดาก๊าซเรือนกระจกเหล่านั้น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ถูกปล่อยสู่บรรยากาศมากที่สุดประมาณ 81% ตามด้วยมีเทน (CH_4) ไนตรัสออกไซด์ (N_2O) และอื่น ๆ [1] อัตราการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากภาคอุตสาหกรรมมีความต้องการใช้พลังงานมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งภาคการผลิตไฟฟ้า [2] จนในที่สุดประเทศอุตสาหกรรมและนานาประเทศ ที่ได้รับผลกระทบ จึงหันมาตระหนักถึงผลกระทบและความเสียหายในด้านต่าง ๆ จากนั้นได้มีการลงนามรับรองอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (United Nations Framework Convention on Climate Change: UNFCCC) เพื่อหาแนวทางยับยั้งการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและป้องกันผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับสังคมมนุษย์ [3] ดังนั้น เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นอีกหนึ่งวิธีการที่สำคัญที่นำมาใช้เพื่อลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศ

เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ (pre-combustion) กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์แบบเผาไหม้ด้วยเชื้อเพลิงที่มีออกซิเจนสูง (oxy-fuel combustion) และกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ (post-combustion) โดย กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้เป็นกระบวนการที่นิยมใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรม โดยเฉพาะโรงไฟฟ้าที่เผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล [4] เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการที่ใช้งานจริงอย่างแพร่หลายมากกว่ากระบวนการอื่น ๆ ซึ่งสามารถดำเนินการได้โดยไม่กระทบกระบวนการผลิตหน่วยอื่น รวมถึงมีความคุ้มค่าในการติดตั้งและซ่อมบำรุงมากกว่ากระบวนการอื่น ๆ ซึ่งกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้มี 4 กระบวนการหลัก ๆ ได้แก่ กระบวนการดูดซึมด้วยตัวทำละลาย (absorption) กระบวนการดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับของแข็ง (adsorption) กระบวนการแยกด้วยภาวะเย็นยวดยิ่ง (cryogenics separation) และกระบวนการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน (membranes separation) ในปัจจุบันกระบวนการดูดซึมด้วยตัวทำละลายเอมีนเป็นที่นิยมมาก

เนื่องจากมีสมรรถนะในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์สูง เกิดการดูดซึมที่อุณหภูมิต่ำ และใช้อุณหภูมิในการฟื้นฟูตัวทำละลายไม่สูงมาก อีกทั้ง ตัวทำละลายเอมีนหาได้ง่ายและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ การดูดซึมด้วยตัวทำละลายเอมีนจึงเหมาะแก่การใช้เป็นเทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ [5] โดยกระบวนการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวทำละลายเอมีนแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ หอดูดซึม (absorption tower) และ หอฟื้นฟู (regeneration tower) ซึ่งหอดูดซึมมีหน้าที่ดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สปล่อยไฟ ในขณะที่หอฟื้นฟูมีหน้าที่ฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีน และนำตัวทำละลายเอมีนกลับมาใช้ใหม่ที่หอดูดซึม โดยทั่วไปหอดูดซึมมีตัวขับเคลื่อนสมรรถนะหลายรูปแบบ เช่น จลนพลศาสตร์การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 absorption kinetics) การถ่ายโอนมวลของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ (mass transfer of CO_2 absorption) ความจุการดูดซึม (absorption capacity) และความจุวนกลับ (cyclic capacity) เป็นต้น ซึ่งตัวขับเคลื่อนสมรรถนะของหอดูดซึมที่สนใจในงานวิจัยนี้ คือ ความจุการดูดซึม และความจุวนกลับ เนื่องจาก ความจุการดูดซึมและความจุวนกลับเป็นเกณฑ์สำคัญเบื้องต้นในการเลือกใช้ตัวทำละลายเอมีนในการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์อย่างมีประสิทธิภาพ ในส่วนของหอฟื้นฟูตัวขับเคลื่อนสมรรถนะที่สำคัญ คือ ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลาย (solvent regeneration heat duty) โดยตัวขับเคลื่อนสมรรถนะของหอฟื้นฟูที่สนใจในงานวิจัยนี้ คือ ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลาย ซึ่งพิจารณาจากค่าความร้อนที่ใช้ในการคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมล ในกระบวนการฟื้นฟูตัวทำละลาย (kJ/mol CO_2)

ตัวทำละลายเอมีนที่นิยมใช้ในกระบวนการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ ประกอบด้วย เอมีนปฐมภูมิ (primary amine) monoethanolamine (MEA) เอมีนทุติยภูมิ (secondary amine) diethanolamine (DEA) เอมีนตติยภูมิ (tertiary amine) triethanolamine (TEA) และ เอมีนชนิดพิเศษ ได้แก่ เอมีนปฐมภูมิที่มีโครงสร้างกีดขวางเนื่องจากขนาด (primary sterically hindered amine) 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP) และ เอมีนแบบวง (diamine) piperazine (PZ) [6] ซึ่งการดูดซึมด้วยตัวทำละลายเอมีนมีข้อจำกัดสำคัญ คือ เอมีนชนิดดั้งเดิม เช่น MEA มีความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์จำกัด และมีความสามารถในการฟื้นฟูตัวทำละลายไม่สูงมาก จากการทบทวนวรรณกรรม [7, 8] พบว่า เอมีนชนิดใหม่ คือ *N*-methyl-4-piperidinol (MPDL) มีความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์และความสามารถในการฟื้นฟูตัวทำละลายดีกว่า MEA แต่อย่างไรก็ตาม ความไวปฏิกิริยาของ MPDL ยังไม่สูงพอสำหรับใช้เป็นตัวทำละลายแบบเดี่ยว จึงต้องผสม MPDL ด้วยเอมีนที่มีความไวปฏิกิริยาสูงกับคาร์บอนไดออกไซด์ เช่น AMP เพื่อปรับปรุง จลนพลศาสตร์การดูดซึมโดยรวม ผลการศึกษา พบว่า การเติม AMP ลงในตัวทำละลาย MPDL สามารถเพิ่มจลนพลศาสตร์การดูดซึมโดยรวมของตัวทำละลายผสมชนิดใหม่ AMP-MPDL ได้ [9]

การประเมินศักยภาพของตัวทำละลายเอมีนสำหรับดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ จำเป็นต้องคำนึงถึงความจุการดูดซับ ความจุวนกลับ และความสามารถในการฟื้นฟูตัวทำละลายด้วย โดยความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์พิจารณาจากอัตราส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ถูกดูดซับต่อเอมีน หรือ CO_2 loading ในหน่วย $\text{mol CO}_2/\text{mol amine}$ ส่วนความจุวนกลับของตัวทำละลายพิจารณาจากผลต่างโมลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับต่อหน่วยปริมาตรของตัวทำละลายเอมีนระหว่างอุณหภูมิ 313 และ 363 K ในหน่วย $\text{mol CO}_2/\text{L-amine solvent}$ โดยการศึกษาความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และความจุวนกลับของตัวทำละลายในงานวิจัยนี้จะเปลี่ยนพารามิเตอร์ดำเนินการต่าง ๆ ได้แก่ อัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL ที่ 5/25 10/20 และ 15/15 %wt. AMP/MPDL สำหรับความเข้มข้นรวม 30 %wt. และ 10/30 15/25 และ 20/20 %wt. AMP/MPDL สำหรับความเข้มข้นรวม 40 %wt. ของสารละลายในน้ำ ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 10 30 50 80 และ 101 kPa และ อุณหภูมิ 313 และ 363 K และความสามารถในการฟื้นฟูตัวทำละลายพิจารณาจากค่าความร้อนที่ใช้ในการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ต่อ 1 โมล ในกระบวนการฟื้นฟูตัวทำละลาย ในหน่วย kJ/mol CO_2 ซึ่งความสามารถในการฟื้นฟูตัวทำละลายจะดำเนินการที่อุณหภูมิ 363 K ความดันบรรยากาศ และอัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL ที่ 5/25 10/20 และ 15/15 %wt. AMP/MPDL สำหรับความเข้มข้นรวม 30 %wt. และ 10/30 15/25 และ 20/20 %wt. AMP/MPDL สำหรับความเข้มข้นรวม 40 %wt. ของสารละลายในน้ำ ทั้งนี้ เพื่อศึกษาผลของพารามิเตอร์ดำเนินการต่อความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ความจุวนกลับ และ ความสามารถในการฟื้นฟูตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL และ ประเมินศักยภาพของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL สำหรับใช้ทดแทนตัวทำละลายชนิดดั้งเดิมที่เป็นเกณฑ์เปรียบเทียบกับ MEA ในเชิงความจุการดูดซับ ความจุวนกลับ และความสามารถในการฟื้นฟูตัวทำละลาย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และความจุวนกลับของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ที่อัตราส่วนความเข้มข้น ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ และอุณหภูมิต่าง ๆ
2. ศึกษาภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ
3. ประเมินศักยภาพของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL สำหรับดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในเชิงความจุการดูดซับ ความจุวนกลับ และความสามารถในการฟื้นฟูเทียบกับตัวทำละลายชนิดดั้งเดิม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาศักยภาพของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ในเชิงความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ ความจุวนกลับ และภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายเปรียบเทียบกับตัวทำละลายชนิดดั้งเดิม MEA
2. ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลายเอมีนพิจารณาจากอัตราส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมต่อเอมีน หรือ CO_2 loading ในหน่วย $\text{mol CO}_2/\text{mol amine}$ ส่วนความจุวนกลับของตัวทำละลายเอมีนพิจารณาจากผลต่างโมลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมต่อหน่วยปริมาตรของตัวทำละลายเอมีนระหว่างอุณหภูมิ 313 และ 363 K ในหน่วย $\text{mol CO}_2/\text{L-amine solvent}$ ซึ่งการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์จะดำเนินการในเครื่องปฏิกรณ์การดูดซึม ที่ความดันบรรยากาศ โดยเปลี่ยนพารามิเตอร์ดำเนินการต่าง ๆ ได้แก่ อัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL ที่ 5/25 10/20 และ 15/15 %wt. AMP/MPDL สำหรับความเข้มข้นรวม 30 %wt. และ 10/30 15/25 และ 20/20 %wt. AMP/MPDL สำหรับความเข้มข้นรวม 40 %wt. ของสารละลายในน้ำ ความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ 10 30 50 80 และ 101 kPa และ อุณหภูมิ 313 และ 363 K
3. ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีนพิจารณาจากค่าความร้อนที่ใช้ในการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ต่อ 1 โมล ในกระบวนการฟื้นฟูตัวทำละลาย ในหน่วย kJ/mol CO_2 ซึ่งการฟื้นฟูตัวทำละลายจะดำเนินการในเครื่องฟื้นฟูที่อุณหภูมิ 363 K ความดันบรรยากาศ และอัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL ที่ 5/25 10/20 และ 15/15 %wt. AMP/MPDL สำหรับความเข้มข้นรวม 30 %wt. และ 10/30 15/25 และ 20/20 %wt. AMP/MPDL สำหรับความเข้มข้นรวม 40 %wt. ของสารละลายในน้ำ

1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย

การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์, ความจุการดูดซึม, ความจุวนกลับ, ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟู, ตัวทำละลายชนิดใหม่

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

ศักยภาพเชิงความจุการดูดซึม ความจุวนกลับ และความสามารถในการฟื้นฟูของตัวทำละลายเอมีนชนิดใหม่ AMP-MPDL เพื่อใช้ในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ เปรียบเทียบกับตัวทำละลายชนิดดั้งเดิม MEA

1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพเชิงความจุการดูดซึม ความจุวนกลับ ความสามารถในการคืนสภาพ และค่าความร้อนที่ใช้ในการคืนสภาพของตัวทำละลาย รวมถึงพารามิเตอร์ดำเนินการต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อความจุการดูดซึม ความจุวนกลับ และภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีน
2. วางแผนและออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาศักยภาพของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ในเชิงความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ ความจุวนกลับ และภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลาย โดยมีพารามิเตอร์ดำเนินการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทดลองความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์และความจุวนกลับของตัวทำละลาย ได้แก่ อัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL ความเข้มข้นรวมของเอมีน ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ และอุณหภูมิ และพารามิเตอร์ดำเนินการที่เกี่ยวข้องกับการทดลองการฟื้นฟูตัวทำละลาย ได้แก่ อัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL และความเข้มข้นรวมของเอมีน
3. จัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ตัวทำละลายเอมีน ซึ่งประกอบด้วย เครื่องปฏิกรณ์การดูดซึมขนาด 125 มิลลิลิตร อ่างควบคุมอุณหภูมิ เครื่องควบแน่น ปัมพ์หมุนเวียนสำหรับน้ำหล่อเย็น อุปกรณ์ควบคุมการไหลของแก๊ส อุปกรณ์รับรู้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ และเทอร์มอมิเตอร์ ในส่วนของเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการฟื้นฟูตัวทำละลาย ประกอบด้วย เครื่องฟื้นฟูตัวทำละลายขนาด 250 มิลลิลิตร เครื่องกวนสารละลายชนิดให้ความร้อนพร้อมชุดควบคุมอุณหภูมิ อ่างน้ำมัน เครื่องควบแน่น ปัมพ์หมุนเวียนสำหรับน้ำหล่อเย็น และเทอร์มอมิเตอร์
4. ทดลองความจุของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในตัวทำละลาย AMP-MPDL ตามการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ โดยจะทำการวัดอัตราส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมต่อเอมีน หรือ CO₂ loading ของตัวทำละลาย AMP-MPDL โดยการไทเทรตของเหลวตัวอย่างจากเครื่องปฏิกรณ์การดูดซึม

กับสารละลายมาตรฐาน 1 M HCl ด้วย Chittick apparatus โดยใช้เมทิลออเรนจ์ เป็นอินดิเคเตอร์ ที่เวลาต่าง ๆ จนกระทั่ง CO₂ loading มีค่าคงที่ กล่าวคือ การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่สมดุล ทั้งนี้ ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลายที่นำมาพิจารณาในการทดลองนี้ คือ CO₂ loading ที่สมดุลนั่นเอง โดยจะทำการเปลี่ยนความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ จากการควบคุมอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจนผ่านอุปกรณ์ควบคุมการไหลของแก๊ส และวัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมจากอุปกรณ์รับรู้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์

5. ทดลองความจุวนกลับของตัวทำละลาย AMP-MPDL ตามการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ โดยพิจารณาจากผลต่างโมลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมต่อหน่วยปริมาตรของตัวทำละลายเอมีนระหว่างอุณหภูมิ 313 และ 363 K (mol CO₂/L-amine solvent) ซึ่งคำนวณจาก ผลคูณระหว่างผลต่างความจุการดูดซึมของตัวทำละลายเอมีนที่อุณหภูมิ 313 และ 363 K (mol CO₂/mol amine) และ ความเข้มข้นโมลาร์ของเอมีนในตัวทำละลาย (mol amine/L-amine solvent) โดยผลต่างความจุการดูดซึมระหว่างอุณหภูมิทั้งสองได้จากการทดลองวัดความจุการดูดซึมดังกล่าวแล้วข้างต้น และความเข้มข้นโมลาร์ของเอมีนในตัวทำละลายวัดได้จากการไทเทรตตัวทำละลายเอมีนกับสารละลายมาตรฐาน 1 M HCl โดยใช้เมทิลออเรนจ์เป็นอินดิเคเตอร์
6. ทดลองการฟื้นฟูตัวทำละลาย AMP-MPDL ตามการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ โดยจะทำการวัดภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลาย AMP-MPDL ที่อัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL และความเข้มข้นรวมของเอมีนต่าง ๆ กัน โดยจะใช้ CO₂ loading เริ่มต้นเป็น CO₂ loading ที่สมดุลกับความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 10 kPa ที่อุณหภูมิ 313 K (ได้จากขั้นตอนที่ 4) ซึ่งเป็นความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ของแก๊สปล่อยทิ้งจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลที่เป็นแหล่งปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์หลักสู่บรรยากาศ จากนั้นทำการฟื้นฟูตัวทำละลายดังกล่าวที่อุณหภูมิ 363 K เป็นเวลา 80 นาที แล้วจึงวัดค่า CO₂ loading ของสารละลายในเครื่องฟื้นฟูตัวทำละลาย โดยค่าความแตกต่างของ CO₂ loading ระหว่างช่วงเวลาดังกล่าวจะถูกนำมาคำนวณหาภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายต่อไป
7. เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL กับตัวทำละลายชนิดดั้งเดิม MEA ในเชิงความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ ความจุวนกลับ และภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลาย
8. วิเคราะห์ผล สรุปผลการทดลอง และเขียนวิทยานิพนธ์

1.7 ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลงานวิจัย

ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลงานวิจัยประกอบด้วยเนื้อหาต่าง ๆ ดังนี้

บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย และ ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลงานวิจัย

บทที่ 2 เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ หลังการเผาไหม้ ทฤษฎีพื้นฐานสำหรับกระบวนการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวทำละลาย ตัวทำละลายเอมีน กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวทำละลายเอมีนกับคาร์บอนไดออกไซด์ กลไกการเกิดปฏิกิริยาของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ตัวชี้บอกสมรรถนะ และ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และ วิธีการทดลอง

บทที่ 4 ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ความจวนกลับของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันผลกระทบของภาวะโลกร้อนสามารถสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่รุนแรง และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโลก ซึ่งมีสาเหตุมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณแก๊สเรือนกระจกในบรรยากาศ ทั้งนี้ การพัฒนาอุตสาหกรรมในด้านต่าง ๆ ส่งผลให้ความต้องการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างมาก ซึ่งพลังงานที่ใช้ส่วนใหญ่มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล ทำให้แก๊สเรือนกระจกจำนวนมากถูกปล่อยสู่บรรยากาศ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เป็นแก๊สเรือนกระจกที่ทำให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้น และถูกปล่อยสู่บรรยากาศมากที่สุด [1] โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลจากการผลิตไฟฟ้าและการขนส่ง [2] จนในที่สุดประเทศอุตสาหกรรมและประเทศที่ได้รับผลกระทบจึงหันมาตระหนักถึงความเสียหายในด้านต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น จากนั้นได้มีการลงนามรับรองอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (UNFCCC) เพื่อหาแนวทางยับยั้งการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ [3] โดยวิธีการที่นำมาใช้เพื่อลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศ คือ เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์

2.1 เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์

เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จากภาคอุตสาหกรรม เป็นกระบวนการที่ใช้เพื่อลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมากสู่บรรยากาศ เทคโนโลยีดังกล่าวสามารถใช้ได้กับอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น โรงไฟฟ้าที่ผลิตไฟฟ้าจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล และการคมนาคมขนส่ง เป็นต้น โดยเทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

2.1.1 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ (Pre-combustion capture)

การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้เป็นการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังจากผ่านกระบวนการแปรสภาพเป็นแก๊ส (gasification) โดยเชื้อเพลิง (เช่น ถ่านหินหรือ แก๊สธรรมชาติ) จะผ่านการแปรสภาพเป็นแก๊สในเครื่องผลิตแก๊สสังเคราะห์ (gasifier) ภายใต้ปริมาณออกซิเจนต่ำ ซึ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สสังเคราะห์ (syngas) ประกอบด้วยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และ ไฮโดรเจน (H₂) เป็นหลัก จากนั้นคาร์บอนมอนอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับไอน้ำ ผ่านปฏิกิริยา water gas shift ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ คือ ไฮโดรเจนและ คาร์บอนไดออกไซด์ หลังจากทำการปรับคุณสมบัติให้เหมาะสมแล้วจึงทำการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออก เพื่อนำไปกักเก็บหรือใช้ต่อ โดยไฮโดรเจนและอากาศจะเกิดการเผาไหม้ (combustion) ขึ้น ทำให้ได้พลังงาน และเกิดผลิตภัณฑ์เป็น ไนโตรเจน

(N₂) ออกซิเจน (O₂) และน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยไฮโดรเจนสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน เนื่องจากเป็นเชื้อเพลิงสะอาดที่ไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ใช้ในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า และ เป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์ เป็นต้น [10]

2.1.2 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์แบบเผาไหม้ด้วยเชื้อเพลิงที่มีออกซิเจนสูง (Oxy-fuel combustion capture)

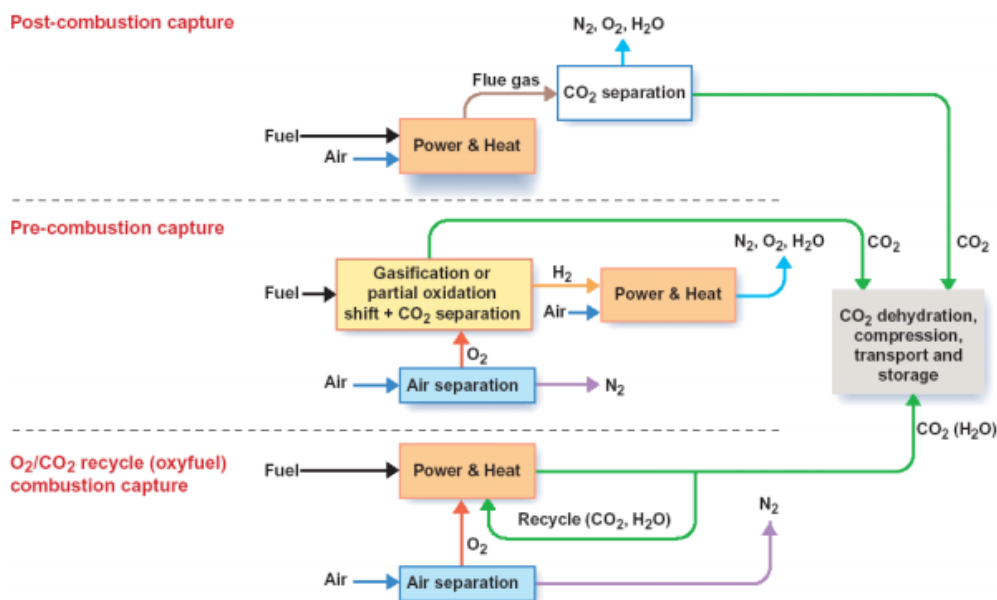
การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์แบบเผาไหม้ด้วยเชื้อเพลิงที่มีออกซิเจนสูง เป็นการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปรับเปลี่ยนองค์ประกอบของอากาศก่อนป้อนอากาศเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้ โดยอากาศจะถูกป้อนเข้าสู่หน่วยแยกออกซิเจนจากอากาศ (air separator unit) ซึ่งจะได้ออกซิเจนและไนโตรเจน ไนโตรเจนจะถูกแยกออกไปจากระบบ เนื่องจาก ไนโตรเจนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเมื่อได้รับพลังงานความร้อนที่อุณหภูมิสูง และเกิดผลิตภัณฑ์เป็นออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ซึ่งออกไซด์ของไนโตรเจนอาจส่งผลกระทบต่อกระบวนการ และ เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ เช่น การเกิดฝนกรด ในส่วนของออกซิเจนบริสุทธิ์ที่แยกได้จะเกิดการเผาไหม้กับเชื้อเพลิง โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเผาไหม้ ประกอบด้วย คาร์บอนไดออกไซด์ และ ไอน้ำ ซึ่งการใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ในกระบวนการเผาไหม้ ทำให้อุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์สูงขึ้นอย่างมาก ดังนั้น จึงป้อนแก๊สผสมขาออกกลับไปยังกระบวนการเผาไหม้อีกครั้ง เพื่อควบคุมอุณหภูมิภายในของระบบไม่ให้สูงเกินกว่าที่อุปกรณ์รองรับได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ส่งผลให้กระบวนการนี้มีต้นทุนการผลิตสูงมาก จากนั้น แก๊สปล่อยทิ้งจะถูกส่งไปยังกระบวนการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากไอน้ำ โดยใช้การควบแน่นไอน้ำให้กลายเป็นน้ำภายในเครื่องควบแน่น (condenser) ซึ่งจะได้คาร์บอนไดออกไซด์ความบริสุทธิ์สูง สำหรับใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ ต่อไป [10]

2.1.3 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ (Post-combustion capture)

การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้เป็นการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นหลังจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิง (เช่น ถ่านหิน และ แก๊สธรรมชาติ) โดยเชื้อเพลิงเหล่านี้จะเกิดการเผาไหม้กับอากาศทำให้ได้พลังงานความร้อน เพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งแก๊สที่ปล่อยออกมาหลังจากกระบวนการเผาไหม้ ประกอบด้วย ไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และ องค์ประกอบอื่น ๆ โดยคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกแยกออกจากไนโตรเจนที่อยู่ในแก๊สเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งแก๊สเผาไหม้จะมีความดันที่ใกล้เคียงกับความดันบรรยากาศ โดยป้อนแก๊สเผาไหม้เข้าสู่หอดักจับ

เพื่อดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ จากนั้นปล่อยแก๊สเผาไหม้ที่ผ่านการบำบัดแล้วสู่บรรยากาศต่อไป [10]

จากการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ทั้ง 3 ประเภท การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้เป็นเทคโนโลยีที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากมีความคล้ายคลึงกับกระบวนการผลิตเดิมมากที่สุด สามารถทำได้โดยไม่กระทบกระบวนการผลิตหน่วยอื่น ๆ มีความซับซ้อนน้อย และเป็นกระบวนการที่ใช้งานจริงได้ รวมถึงค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและซ่อมบำรุงต่ำกว่าการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ประเภทอื่น ๆ ทำให้เกิดความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ [5] จึงนิยมนำการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ไปใช้กับแหล่งปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ขนาดใหญ่ โดยเฉพาะโรงไฟฟ้าที่ผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิล โดยรูปที่ 2.1 แสดงการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ประเภทต่าง ๆ [10]



รูปที่ 2.1 กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์แบบต่าง ๆ [10]

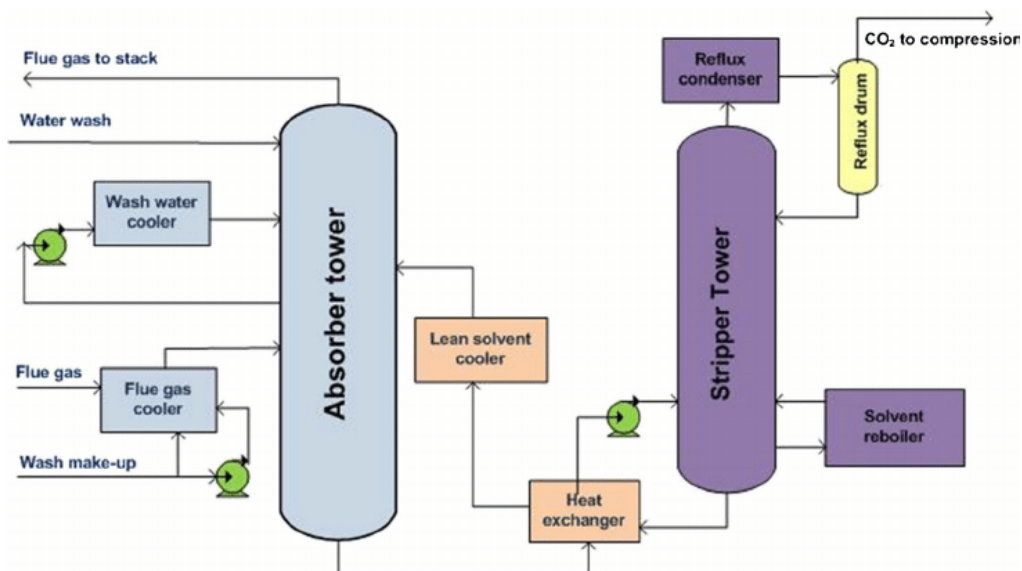
2.2 เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้

การลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยสู่บรรยากาศต้องคำนึงถึงขั้นตอนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ การขนส่ง และการกักเก็บร่วมด้วย ซึ่งการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง ดังนั้น ภาคอุตสาหกรรมจึงต้องการลดค่าใช้จ่ายในส่วนดังกล่าวลง เพื่อให้เกิดความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งสามารถทำได้โดยการเลือกกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสม ทั้งนี้ การเลือกใช้กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ปริมาณแก๊สขาเข้า ความดันแก๊ส ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ และ ความเร็วของแก๊สในระบบ

เป็นต้น [5] ซึ่งกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ มี 4 กระบวนการ ได้แก่ การดูดซึม (absorption) การดูดซับ (adsorption) การแยกด้วยภาวะเย็นยวดยิ่ง (cryogenics separation) และ การแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน (membrane separation) [10] โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 การดูดซึม (absorption)

การดูดซึมเป็นกระบวนการทางวิศวกรรมเคมีที่ใช้หลักการถ่ายโอนมวล (mass transfer) ของแก๊สผ่านการสัมผัสและการละลายในตัวทำละลายที่เป็นของเหลว (liquid solvent) โดยองค์ประกอบในเฟสแก๊สจะถ่ายโอนจากกระแสแก๊สไปยังผิวร่วมของเฟสแก๊สและเฟสของเหลว ซึ่งมีการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent) บริเวณใกล้ ๆ ผิวร่วม องค์ประกอบดังกล่าวในเฟสแก๊สจะผ่านเข้าสู่เฟสของเหลวด้วยการแพร่เชิงโมเลกุล (molecular diffusion) ทั้งนี้ องค์ประกอบดังกล่าวสามารถถ่ายโอนจากเฟสแก๊สไปยังเฟสของเหลวได้ [11] เนื่องจากความเข้มข้นขององค์ประกอบในเฟสทั้งสองมีความแตกต่างกัน ทำให้เกิดแรงขับ (driving force) สำหรับการถ่ายโอนมวล ซึ่งแรงขับที่ทำให้แก๊สแพร่ออกจากกระแสแก๊สเข้าสู่ตัวทำละลาย คือ ความแตกต่างความดันย่อย (partial pressure) ของแก๊สองค์ประกอบในกระแสแก๊สกับค่าความดันไอ (vapour pressure) ของแก๊สองค์ประกอบบริเวณผิวของตัวทำละลายที่สัมผัส การดูดซึมเกิดขึ้นเมื่อแรงขับมีค่าเป็นบวก กล่าวคือ แก๊สองค์ประกอบแพร่จากกระแสแก๊สเข้าสู่ตัวทำละลาย ในทางตรงกันข้าม ถ้าแรงขับมีค่าเป็นลบ กระบวนการที่เกิดขึ้นจะตรงข้ามกับการดูดซึม เรียกว่า การคายกลับ (desorption) หรือ การฟื้นฟู (regeneration) รูปที่ 2.2 แสดงการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการดูดซึม ซึ่งมีองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน คือ หอดูดซึม (absorption tower) และ หอฟื้นฟู (stripper tower) [12] โดยแก๊สเผาไหม้ที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกป้อนเข้าหอดูดซึมและเคลื่อนผ่านตัวทำละลายที่อยู่ภายในหอดูดซึม โดยแก๊สเผาไหม้จะไหลสวนทางกับตัวทำละลาย ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้จะถูกดูดซึมด้วยตัวทำละลาย จากนั้น แก๊สเผาไหม้ที่มีคาร์บอนไดออกไซด์น้อยลงจะถูกปล่อยสู่บรรยากาศ ส่วนตัวทำละลายที่เต็มไปด้วยคาร์บอนไดออกไซด์จะเข้าสู่หอฟื้นฟู เพื่อฟื้นฟูตัวทำละลายให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เมื่อทำการฟื้นฟูตัวทำละลายแล้ว คาร์บอนไดออกไซด์จะถูกแยกออกมา ส่วนตัวทำละลายจะถูกลดอุณหภูมิด้วยเครื่องทำความเย็น (cooler) ก่อนเข้าสู่หอดูดซึมและใช้ดักจับคาร์บอนไดออกไซด์อีกครั้ง [13] โดยข้อดีและข้อด้อยของการดูดซึม แสดงดังตารางที่ 2.1 [5, 10]

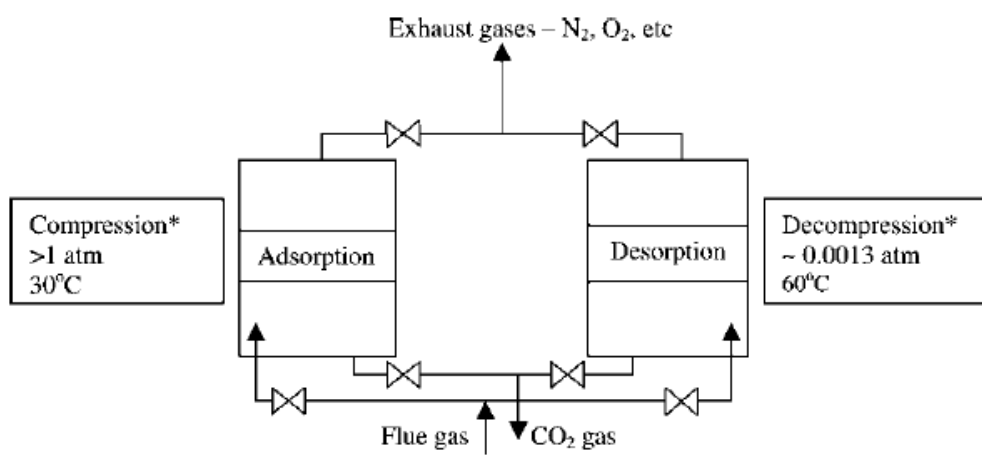


รูปที่ 2.2 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการดูดซึม [13]

2.2.2 การดูดซับ (adsorption)

การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่พื้นผิวของสารที่ถูกดูดซับ (adsorbate) ที่สัมผัสโดยตรงกับตัวดูดซับ (adsorbent) โดยสารที่มีพลังงานอิสระที่ผิว (surface free energy) ต่ำจะถูกดูดซับได้ง่าย แต่สารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวสูงจะไม่ถูกดูดซับ การดูดซับเกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างสารที่ถูกดูดซับ (เช่น ของเหลว หรือ แก๊ส) กับตัวดูดซับ (เช่น ของแข็ง) ซึ่งตัวดูดซับที่ดีมักเป็นสารที่มีความสามารถในการดูดซับสารอื่นไว้บนผิวได้ และเป็นสารที่มีพื้นที่ผิวมาก หรือ มีรูพรุนภายในมาก [5] โดยตัวดูดซับที่นิยมใช้ ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ซีโอไลต์ (zeolites) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นต้น ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณของการดูดซับ เช่น พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ อุณหภูมิ ความดัน และความเข้มข้น ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความดัน หรือ ความเข้มข้น จะทำให้ปริมาณของการดูดซับเปลี่ยนแปลง ซึ่งกระบวนการดูดซับมีองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน คือ หอดูดซับ (adsorption tower) และ หอคายซับ (desorption tower) [10] โดยแก๊สเผาไหม้ที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกป้อนเข้าไปในหอดูดซับ และเคลื่อนผ่านตัวดูดซับที่บรรจุในหอดูดซับ จากนั้น แก๊สเผาไหม้ที่ผ่านการบำบัดแล้วจะถูกปล่อยสู่บรรยากาศ ส่วนตัวดูดซับที่ใช้งานแล้ว จะถูกนำไปคืนสภาพภายในหอคายซับ โดยวิธีการลดความดัน เรียกว่า Pressure Swing Adsorption (PSA) หรือ การให้ความร้อน เรียกว่า

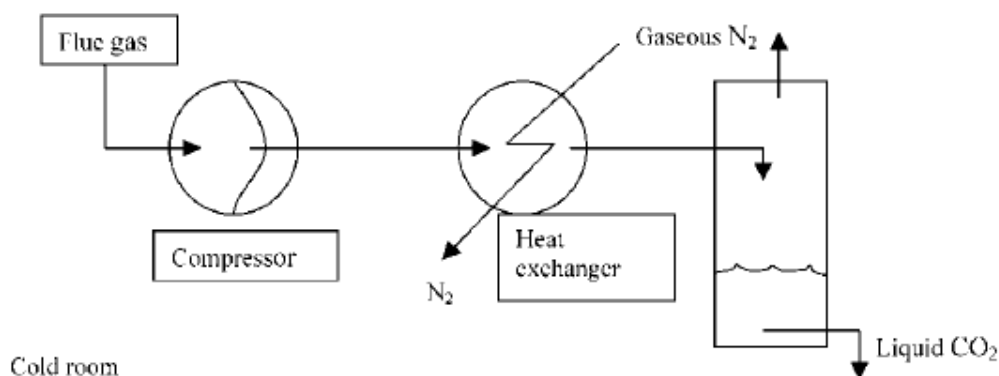
Temperature Swing Adsorption (TSA) ก่อนนำตัวดูดซับกลับมาใช้งานใหม่ ซึ่งการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการดูดซับ แสดงดังรูปที่ 2.3 โดยข้อดีและข้อด้อยของการดูดซับ แสดงดังตารางที่ 2.1 [5, 10]



รูปที่ 2.3 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการดูดซับ [14]

2.2.3 การแยกด้วยภาวะเย็นเยวดยิ่ง (cryogenics separation)

การแยกด้วยภาวะเย็นเยวดยิ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ในการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นมากออกจากแก๊สผสมด้วยคุณสมบัติที่แตกต่างกันของแก๊ส คือ อุณหภูมิจึงและความดันที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะ [5] ทั้งนี้ ก่อนเข้าสู่กระบวนการแยกด้วยภาวะเย็นเยวดยิ่ง จะมีการกำจัดแก๊สองค์ประกอบอื่น ๆ ที่อยู่ในแก๊สเผาไหม้ (เช่น NO_x , SO_x และ น้ำ) ออก ดังนั้น แก๊สขาเข้าจึงประกอบด้วย ไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และออกซิเจน จากนั้น นำแก๊สขาเข้าไปลดอุณหภูมิและบีบอัดด้วยความดันสูงด้วยเครื่องเพิ่มความดัน (compressor) เพื่อควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์ให้เปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวภายใต้ภาวะสมดุล ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์มีจุดรวมสาม (triple point) ที่อุณหภูมิ -56.6 องศาเซลเซียส และ ความดัน 7.4 บรรยากาศ โดยที่ภาวะดังกล่าว ไนโตรเจนยังคงอยู่ในสถานะแก๊ส [14] จากนั้น แก๊สผสมจะถูกส่งเข้าสู่หอแยกเพื่อแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สอื่น ๆ ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกเก็บไว้ด้านล่างหอแยกในสถานะของเหลว และไนโตรเจนจะถูกปล่อยออกทางด้านบนของหอแยกในสถานะแก๊ส การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการแยกด้วยภาวะเย็นเยวดยิ่ง แสดงดังรูปที่ 2.4 โดยข้อดีและข้อด้อยของการแยกด้วยภาวะเย็นเยวดยิ่ง แสดงดังตารางที่ 2.1 [5, 10]

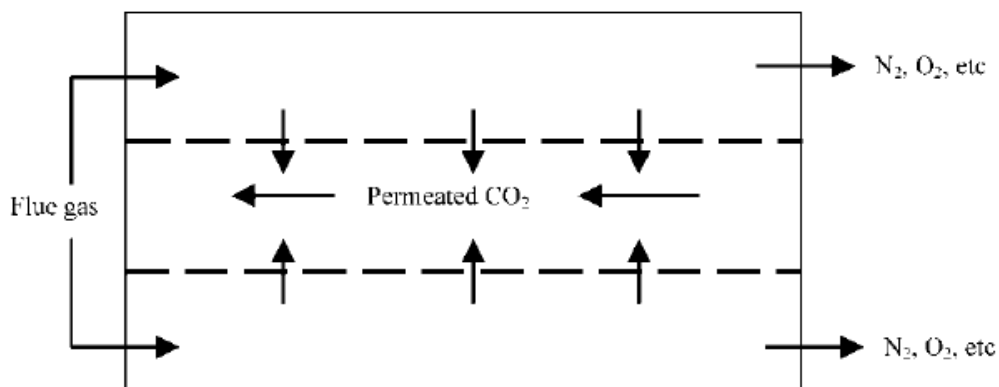


รูปที่ 2.4 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการแยกด้วยภาวะเย็นยวดยิ่ง [14]

2.2.4 การแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน (membrane separation)

การแยกด้วยเยื่อเลือกผ่านเป็นกระบวนการที่ใช้แยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สเผาไหม้ โดยเยื่อเลือกผ่าน (selective barrier) ที่ยอมให้เฉพาะองค์ประกอบที่ต้องการแยกในแก๊สเผาไหม้ผ่านไปได้ ซึ่งการเลือกใช้เยื่อเลือกผ่านสำหรับแก๊สแต่ละชนิด จะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของวัสดุที่นำมาผลิตเป็นเยื่อเลือกผ่าน โดยวัสดุที่ใช้ทำเยื่อเลือกผ่านมีหลายประเภท เช่น เยื่อเลือกผ่านแบบพอลิเมอร์ (polymeric membrane) เยื่อเลือกผ่านแบบมีรูพรุน (porous membrane) และเยื่อเลือกผ่านแบบเซรามิก (ceramic membrane) เป็นต้น ซึ่งเยื่อเลือกผ่านเหล่านี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ และยังใช้ในการแยกแก๊สอื่น ๆ ได้ เช่น แยกออกซิเจนออกจากอากาศ และ แยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สธรรมชาติ [14] โดยการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่านจะแบ่งออกเป็น 2 ฝั่ง ฝั่งแรกจะอยู่ในส่วนก่อนการแยก เรียกว่า ฝั่งรีเทนเทต (retentate side) ส่วนฝั่งที่ 2 จะอยู่ในส่วนของแก๊สที่ผ่านออกมาจากเยื่อเลือกผ่าน เรียกว่า ฝั่งเพอเมเตต (permeate side) รูปที่ 2.5 แสดงการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์โดยการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน โดยแก๊สเผาไหม้จะผ่านเข้าสู่ถังแยก (separation tank) ที่มีเยื่อเลือกผ่านอยู่ภายใน และมีความดันต่ำ (คิดเป็น 10% ของความดันฝั่งรีเทนเทต) โดยคาร์บอนไดออกไซด์จะผ่านเยื่อเลือกผ่านเข้าไปและถูกกักเก็บไว้ที่ถังรวบรวม ความแตกต่างของความดันที่ตำแหน่งทั้งสอง ส่งผลให้เกิดแรงขับที่ทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายของโมเลกุล หรือ การผ่านของแก๊สที่ผ่านเยื่อเลือกผ่านได้ [11] ส่วนองค์ประกอบอื่น ๆ ในแก๊สเผาไหม้ เช่น ออกซิเจน ไอน้ำ NO_x และ SO_x จะถูกนำไปใช้ โดยออกซิเจนสามารถนำมาใช้ในการเผาไหม้ได้ ส่วนไอน้ำจะถูกควบแน่นให้กลายเป็นหยดน้ำ และ NO_x กับ SO_x จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เปลี่ยนเป็น NO₂ และ SO₂ ตามลำดับ บางครั้งแก๊สเหล่านี้

จะถูกแยกออกไปก่อนที่จะเข้าสู่ถังแยก เพราะเป็นอันตรายต่อเยื่อเลือกผ่าน ปัจจุบันมีการนำ การแยกด้วยเยื่อเลือกผ่านไปใช้งานในอุตสาหกรรมอยู่มาก แต่ยังไม่ได้นำไปประยุกต์ ใช้กับงานขนาดใหญ่ นักวิจัยจึงสนใจแค่การศึกษาและพัฒนาวัสดุที่ใช้ทำเยื่อเลือกผ่าน และภาวะที่ใช้ในการดำเนินการ โดยข้อดีและข้อด้อยของการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน แสดงดังตารางที่ 2.1 [5, 10]



รูปที่ 2.5 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์โดยการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน [14]

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อด้อยของการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการดูดซึม การดูดซับ การแยก ด้วยภาวะเย็นยวดยิ่ง และ การแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน [5, 10]

ประเภทของ เทคโนโลยี	ข้อดี	ข้อด้อย
การดูดซึม	<ol style="list-style-type: none"> 1. มีประสิทธิภาพในการดูดซึม คาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่า 90% 2. ตัวทำละลายที่ใช้ในการดูดซึม สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยการให้ความร้อน หรือ การลด ความดัน (depressurization) 3. เป็นกระบวนการที่เหมาะสม สำหรับดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ มากที่สุด 4. เกิดการดูดซึมที่อุณหภูมิต่ำ และ ใช้อุณหภูมิจากการฟื้นฟูตัวทำ ละลายไม่สูงมาก 	<ol style="list-style-type: none"> 1. มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและ ซ่อมบำรุงสูง 2. พลังงานที่ใช้ในการฟื้นฟู ตัวทำละลายค่อนข้างสูง 3. เกิดการกัดกร่อนของอุปกรณ์สูง

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อด้อยของการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการดูดซึม การดูดซับ การแยกด้วยภาวะเย็นยวดยิ่ง และ การแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน (ต่อ) [5, 10]

ประเภทของเทคโนโลยี	ข้อดี	ข้อด้อย
การดูดซับ	<ol style="list-style-type: none"> 1. ตัวดูดซับสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยวิธีการให้ความร้อนหรือ การลดความดัน 2. มีประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่า 85% 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ต้องการพลังงานที่ใช้ในการฟื้นฟูตัวดูดซับค่อนข้างสูง 2. ตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous)
การแยกด้วยภาวะเย็นยวดยิ่ง	<ol style="list-style-type: none"> 1. คาร์บอนไดออกไซด์ที่แยกได้มีความบริสุทธิ์สูง 	<ol style="list-style-type: none"> 1. เป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานค่อนข้างสูง 2. ควรทำที่อุณหภูมิต่ำมาก ๆ 3. เป็นกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นมากกว่า 90% โดยปริมาตร 4. มีความซับซ้อนและยุ่งยากในการดำเนินงาน
การแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน	<ol style="list-style-type: none"> 1. เป็นกระบวนการที่นำมาใช้แยกแก๊สชนิดอื่น ๆ ได้ 2. มีประสิทธิภาพในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่า 80% 	<ol style="list-style-type: none"> 1. มีต้นทุนและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานสูง 2. เกิดการอุดตันบนผิวหน้าของเยื่อเลือกผ่านได้ง่าย 3. คาร์บอนไดออกไซด์ที่แยกได้มีความบริสุทธิ์ค่อนข้างต่ำ 4. มีความจำเพาะในการแยกแก๊สค่อนข้างต่ำ

2.3 ทฤษฎีพื้นฐานสำหรับกระบวนการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวทำละลาย

จากการศึกษาและทบทวนทฤษฎีเบื้องต้น พบว่า เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนปล่อยสู่บรรยากาศด้วยการดูดซึม (absorption) มีสมรรถนะในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์สูง

เกิดการดูดซึมที่อุณหภูมิต่ำ และใช้อุณหภูมิในการฟื้นฟูตัวทำละลายไม่สูงมาก อีกทั้ง ตัวทำละลายหาได้ง่ายและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ทำให้กระบวนการดูดซึมด้วยตัวทำละลายจึงเหมาะแก่การใช้เป็นเทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ [5]

การดูดซึมจะใช้การถ่ายโอนมวลของแก๊สผ่านการสัมผัสและการละลาย โดยเฟสแก๊สจะถ่ายโอนจากกระแสน้ำไปยังผิวร่วมของเฟสแก๊สและเฟสของเหลว ซึ่งการผ่านเข้าสู่เฟสของเหลวของแก๊สนั้นจะใช้การแพร่เชิงโมเลกุล ทั้งนี้ การถ่ายโอนมวลของเฟสแก๊สไปยังเฟสของเหลวเกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างสองเฟส ทำให้เกิดแรงขับที่ส่งผลให้แก๊สแพร่ออกจากกระแสน้ำเข้าสู่ตัวทำละลายได้ง่ายขึ้น [13] โดยการดูดซึมจะแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ การดูดซึมเชิงกายภาพ (physical absorption) และ การดูดซึมเชิงเคมี (chemical absorption) [5]

1) การดูดซึมเชิงกายภาพ เป็นการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวทำละลาย หรือ ตัวดูดซึม (absorbent) โดยคาร์บอนไดออกไซด์ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับตัวทำละลาย แต่จะใช้กฎของเฮนรี (Henry's law) แทน ปัจจัยที่ส่งผลให้ตัวทำละลายสามารถดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 partial pressure) ในเฟสแก๊ส [5] โดยคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกดูดซึมได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ และ ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์สูง ซึ่งตัวทำละลายที่ใช้ในการดูดซึมสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยใช้อุณหภูมิในการฟื้นฟูตัวทำละลายไม่สูงมาก ตัวทำละลายที่นิยมใช้โดยทั่วไป ได้แก่ ไดเมทิลอีเทอร์ (dimethyl ether) โพลีเอทิลีนไกลคอล (polyethylene glycol) และ เมทานอล (methanol) เป็นต้น

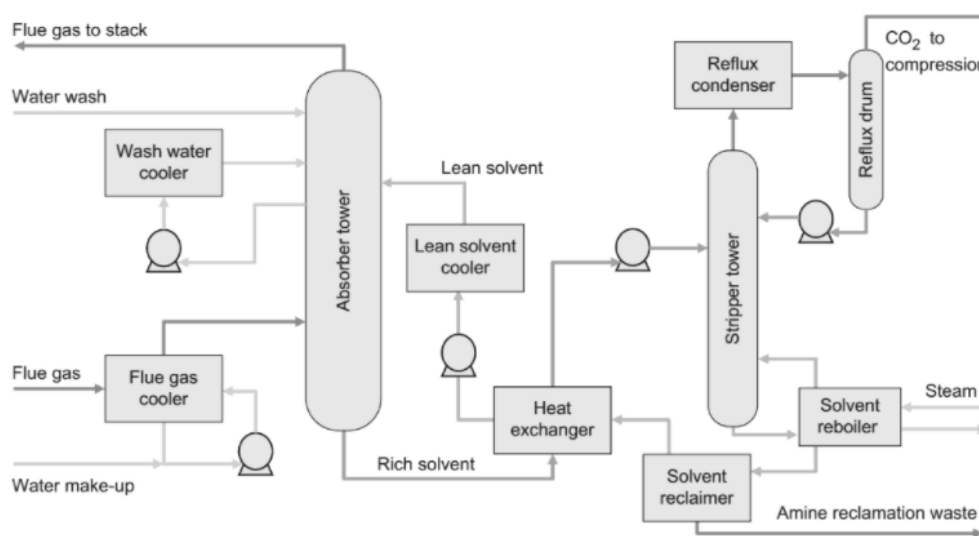
2) การดูดซึมเชิงเคมี เป็นการดูดซึมที่เกี่ยวข้องกับการทำปฏิกิริยาของคาร์บอนไดออกไซด์กับตัวทำละลาย เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีพันธะทางเคมีจับกันแบบหลวม ๆ (loosely bonded) ซึ่งตัวทำละลายที่ใช้ในการดูดซึมสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ด้วยการให้ความร้อน [5] นอกจากนี้ เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการดูดซึมด้วยตัวทำละลายมีประสิทธิภาพในการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่า 90% และได้คาร์บอนไดออกไซด์จากการคายกลับที่มีความบริสุทธิ์มากกว่าเทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์แบบอื่น ๆ [15] ส่งผลให้การดูดซึมด้วยตัวทำละลายเหมาะแก่การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ที่ปล่อยจากโรงงานอุตสาหกรรม ตัวทำละลายที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ได้แก่ ตัวทำละลายที่มีอนุพันธ์ของหมู่เอมีน และ แอมโมเนีย

จากการศึกษา พบว่า อุตสาหกรรมส่วนใหญ่ เช่น อุตสาหกรรมการแยกแก๊ส หรือ การทำบริสุทธิ์แก๊ส นิยมใช้กระบวนการดูดซึมเชิงเคมีสำหรับดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ สำหรับการดูดซึมเชิงเคมี ตัวทำละลายจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ [15] ซึ่งตัวทำละลายที่นิยมใช้ในการดูดซึม คือ ตัวทำละลายเอมีน (amine solvent) เนื่องจาก มีความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์สูง มีความไวปฏิกิริยา

กับคาร์บอนไดออกไซด์สูง และมีราคาสูง [5] จึงทำให้กระบวนการดูดซึมด้วยตัวทำละลายเอมีนเป็นที่นิยมมากกว่าการดูดซึมเชิงกายภาพ หรือ การดูดซึมโดยใช้แอมโมเนีย

ปัจจุบันเทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์นิยมใช้วิธีการดูดซึมด้วยตัวทำละลายเอมีน เนื่องจากมีสมรรถนะการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์สูง เกิดการดูดซึมที่อุณหภูมิต่ำ และใช้อุณหภูมิต่ำในการฟื้นฟูตัวทำละลายไม่สูงมาก อีกทั้ง ตัวทำละลายเอมีนหาได้ง่ายและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยวิธีการให้ความร้อน หรือ การลดความดัน ส่งผลให้การดูดซึมด้วยตัวทำละลายเอมีนเหมาะสมแก่การใช้เป็นเทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ [5] อุตสาหกรรมที่นิยมใช้การดูดซึมด้วยตัวทำละลายเอมีน เช่น อุตสาหกรรมที่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิง โดยเฉพาะอย่างยิ่งโรงไฟฟ้าที่ผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิล และ อุตสาหกรรมการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สธรรมชาติ รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างระบบการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวทำละลายเอมีนในหอดูดซึมและหอฟื้นฟู โดยกระบวนการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวทำละลายเอมีนแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ หอดูดซึม (absorption tower) และ หอฟื้นฟู (regeneration tower) ซึ่งหอดูดซึมมีหน้าที่ดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สเผาไหม้ (flue gas) ในขณะที่หอฟื้นฟูมีหน้าที่ฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีนและนำตัวทำละลายเอมีนกลับมาใช้ใหม่ที่หอดูดซึม [12] ซึ่งแก๊สเผาไหม้จะถูกป้อนเข้าทางด้านล่างของหอดูดซึมที่มีตัวทำละลายเอมีนอยู่ภายใน โดยแก๊สเผาไหม้จะมีการไหลสวนทางกับตัวทำละลายเอมีนที่ไหลลงมาจากด้านบนของหอดูดซึม คาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้จะถูกดูดซึมด้วยตัวทำละลายเอมีนภายในหอดูดซึม ซึ่งมีอุณหภูมิระหว่าง 313–333 K ส่วนแก๊สเผาไหม้ที่มีคาร์บอนไดออกไซด์น้อยลงจะออกทางด้านบนของหอดูดซึม ในส่วนของตัวทำละลายเอมีนที่เต็มไปด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (rich solvent) จากด้านล่างของหอดูดซึมจะรับความร้อนจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger) จากตัวทำละลายเอมีนที่มีคาร์บอนไดออกไซด์น้อยลง (lean solvent) ซึ่งออกจากด้านล่างของหอฟื้นฟู เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของตัวทำละลายเอมีนที่เต็มไปด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าสู่หอฟื้นฟู จากนั้น ตัวทำละลายเอมีนที่เต็มไปด้วยคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกป้อนเข้าทางด้านบนของหอฟื้นฟูเพื่อฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีนให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ที่อุณหภูมิ 363–393 K เมื่อทำการฟื้นฟูตัวทำละลายแล้วคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกแยกออกทางด้านบนของหอฟื้นฟู ส่วนตัวทำละลายเอมีนที่มีคาร์บอนไดออกไซด์น้อยลงจากด้านล่างของหอฟื้นฟูซึ่งมีอุณหภูมิสูง จะถูกทำให้เย็นลงโดยผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและทำการแลกเปลี่ยนความร้อนกับตัวทำละลายเอมีนที่เต็มไปด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้น ตัวทำละลายเอมีนที่มีคาร์บอนไดออกไซด์น้อยลงจะถูกทำให้เย็นลงอีกครั้งโดยเครื่องทำความเย็น (cooler) เพื่อลดอุณหภูมิของตัวทำละลายเอมีนที่มีคาร์บอนไดออกไซด์น้อยลงก่อนเข้าสู่หอดูดซึม และใช้ดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไป [13, 16] โดยทั่วไปหอดูดซึมมีตัวขับเคลื่อนหลายรูปแบบ

เช่น จลนพลศาสตร์การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 absorption kinetics) การถ่ายโอนมวลของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ (mass transfer of CO_2 absorption) ความจุการดูดซึม (absorption capacity) และ ความจุวนกลับ (cyclic capacity) เป็นต้น ในส่วนของหอฟื้นฟูมีตัวชี้บ่งสมรรถนะที่สำคัญ คือ ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลาย (solvent regeneration heat duty)



รูปที่ 2.6 โครงแบบกระบวนการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวทำละลายเอมีนในหอดูดซึมและหอฟื้นฟู [13]

2.4 ตัวทำละลายเอมีน

โดยทั่วไปตัวทำละลายเอมีนที่นิยมใช้ในกระบวนการดูดซึมมากที่สุด คือ สารประกอบอัลคาโนลามีน (alkanolamine compound) เนื่องจากความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 absorption capacity) สูง ความไวในการทำปฏิกิริยา (reactivity) สูง และราคาถูก ตัวอย่างสารประกอบอัลคาโนลามีน ได้แก่ เอมีนปฐมภูมิ monoethanolamine (MEA) เอมีนทุติยภูมิ diethanolamine (DEA) เอมีนตติยภูมิ triethanolamine (TEA) *N*-methyldiethanolamine (MDEA) และ เอมีนชนิดพิเศษ ได้แก่ เอมีนปฐมภูมิที่มีโครงสร้างกีดขวางเนื่องจากขนาด 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP) เอมีนแบบวง piperazine (PZ) และ เอมีนตติยภูมิแบบวง (MPDL) [6, 8] ดังแสดงในตารางที่ 2.2

2.4.1 โมโนเอทานอลามีน (MEA)

MEA เป็นเอมีนปฐมภูมิ (primary amine) เพราะมีอะตอมของคาร์บอน (C) หนึ่งอะตอมที่ติดกับอะตอมของไนโตรเจน (N) ในโครงสร้างหมู่เอมีน ซึ่งโครงสร้างทางเคมีของ MEA แสดงในตารางที่ 2.2 โดย MEA มีความไวปฏิกิริยาสูงกับคาร์บอนไดออกไซด์ และเกิดผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บาเมต (carbamate) ที่มีความเสถียรสูง จึงต้องใช้พลังงานในการฟื้นฟูตัวทำละลายสูง (หรือ พลังงานที่ใช้ในการคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์สูง) [6] ดังนั้น MEA จึงมีภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายสูง ซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายของกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นด้วย นอกจากนี้ MEA ยังมีความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จำกัดประมาณ $0.5 \text{ mol CO}_2/\text{mol amine}$ ส่งผลให้ตัวทำละลายดั้งเดิม MEA มีข้อจำกัดสำคัญ คือ มีความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จำกัด และความสามารถในการฟื้นฟูตัวทำละลายไม่สูงมาก เนื่องจากภาคอุตสาหกรรมนิยมใช้ตัวทำละลายดั้งเดิม MEA เป็นอย่างมาก จึงมักใช้ตัวทำละลาย MEA เป็นตัวทำละลายเกณฑ์เปรียบเทียบ [17] โดยข้อดีและข้อด้อยของตัวทำละลายดั้งเดิม MEA แสดงดังตารางที่ 2.3 [6, 18]

2.4.2 ไดเอทานอลามีน (DEA)

DEA เป็นเอมีนทุติยภูมิ (secondary amine) เพราะมีอะตอมของคาร์บอนสองอะตอมที่ติดกับอะตอมของไนโตรเจนในโครงสร้างของหมู่เอมีน ซึ่งโครงสร้างทางเคมีของ DEA แสดงในตารางที่ 2.2 โดย DEA สามารถทำปฏิกิริยาโดยตรงกับ NO_x ได้ และเกิดเป็น ไนโตรซามีน (nitrosamine) [5] ซึ่งเป็นสารที่มีความเป็นอันตรายสูง โดย NO_x จะปนเปื้อนอยู่ในแก๊สเผาไหม้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากการผลิตไฟฟ้าด้วยเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่ง DEA มีความไวปฏิกิริยาสูงกับคาร์บอนไดออกไซด์ และเกิดผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บาเมตที่มีความเสถียรสูง [17] ส่งผลให้ต้องใช้พลังงานในการฟื้นฟูตัวทำละลายสูง ดังนั้น DEA จึงมีภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายสูง ซึ่งจะทำให้ค่าใช้จ่ายของกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์สูงเช่นกัน นอกจากนี้ DEA ยังมีความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จำกัด [19] โดยข้อดีและข้อด้อยของตัวทำละลาย DEA แสดงดังตารางที่ 2.3 [5, 19]

2.4.3 ไตรเอทานอลามีน (TEA) และ เอ็น-เมทิลไดเอทานอลามีน (MDEA)

TEA และ MDEA เป็นเอมีนตติยภูมิ (tertiary amine) เพราะมีอะตอมของคาร์บอนสามอะตอมที่ติดกับอะตอมของไนโตรเจนในโครงสร้างของหมู่เอมีน ซึ่งโครงสร้างทางเคมี

ของ TEA และ MDEA แสดงในตารางที่ 2.2 [5] โดย TEA และ MDEA ไม่ได้ทำปฏิกิริยาโดยตรงกับคาร์บอนไดออกไซด์ เพราะว่าไม่มีอะตอมของไฮโดรเจน (H) ที่จับกับอะตอมของไนโตรเจน (N) แต่เอมีนตติยภูมิจะทำหน้าที่เป็นเบสในปฏิกิริยาการสลายพันธะด้วยน้ำ (hydrolysis) ของคาร์บอนไดออกไซด์ และเกิดผลิตภัณฑ์เป็นไบคาร์บอเนต (bicarbonate) และ เอมีนโปรโตเนต (protonated amine) [17] ซึ่งส่งผลให้ความไวปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ของ TEA และ MDEA ต่ำกว่าตัวทำละลาย MEA และ DEA นอกจากนี้ ความร้อนของปฏิกิริยาการเกิดไบคาร์บอเนตและเอมีนโปรโตเนตจะต่ำกว่าปฏิกิริยาการเกิดคาร์บาเมต ดังนั้น TEA และ MDEA จึงมีภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายต่ำกว่าตัวทำละลาย MEA และ DEA ซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายของกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง ในส่วนของความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า TEA และ MDEA มีความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าตัวทำละลาย MEA และ DEA [8] โดยข้อดีและข้อด้อยของตัวทำละลาย TEA และ MDEA แสดงดังตารางที่ 2.3 [8, 20]

2.4.4. 2-อะมิโน-2-เมทิล-1-โพรพานอล (AMP)

AMP เป็นเอมีนปฐมภูมิที่มีโครงสร้างกีดขวางเนื่องจากขนาด (sterically hindered amine) เพราะมีหมู่เมทิล (methyl group) สองหมู่ที่อยู่ใกล้กับหมู่เอมีน จึงทำให้มีโครงสร้างกีดขวางสำหรับการเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งโครงสร้างทางเคมีของ AMP แสดงในตารางที่ 2.2 [21] โดย AMP มีความไวปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ปานกลาง และเกิดผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บาเมตที่มีความเสถียรต่ำแตกต่างจาก MEA และ DEA เนื่องจากโครงสร้างกีดขวางเนื่องจากขนาดของ AMP จึงทำให้ AMP มีความไวปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่า MEA แต่คาร์บาเมตที่มีความเสถียรต่ำจะเกิดปฏิกิริยาการสลายพันธะด้วยน้ำได้ง่าย และเกิดผลิตภัณฑ์เป็นไบคาร์บอเนต และ AMP (เอมีนอิสระ) ซึ่ง AMP ที่เกิดจากปฏิกิริยาการสลายพันธะด้วยน้ำ สามารถทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ได้อีก [17] ส่งผลให้ AMP มีความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูง นอกจากนี้ ความร้อนของปฏิกิริยาการเกิดคาร์บาเมตที่มีความเสถียรต่ำและไบคาร์บอเนตมีค่าต่ำกว่าปฏิกิริยาการเกิดคาร์บาเมตที่มีความเสถียรสูง ดังนั้น AMP จึงมีภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายต่ำกว่าตัวทำละลาย MEA และ DEA ซึ่งการใช้ AMP สามารถลดค่าใช้จ่ายการดำเนินงานลงได้ โดยข้อดีและข้อด้อยของตัวทำละลาย AMP แสดงดังตารางที่ 2.3 [6, 21]

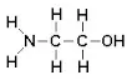
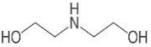
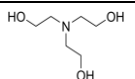
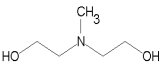
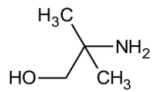

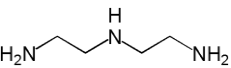
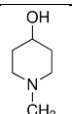
2.4.5 พิเพอไลซีน (PZ)

PZ เป็นเอมีนแบบวง (cyclical secondary diamines) และมีหมู่เอมีนสองหมู่ อยู่ภายในโครงสร้าง ดังแสดงในตารางที่ 2.2 โดย PZ มีความไวปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าตัวทำละลาย MEA และเกิดผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บาเมตที่มีความเสถียรสูง ส่งผลให้ใช้พลังงานในการฟื้นฟูตัวทำละลายสูง [22] ดังนั้น PZ จึงมีภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายสูง ซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานสูงขึ้นด้วย นอกจากนี้ PZ ยังมีความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงมาก เนื่องจากมีหมู่เอมีนสองหมู่ ในโครงสร้าง [17] โดยข้อดีและข้อด้อยของตัวทำละลาย PZ แสดงดังตารางที่ 2.3 [6, 22]

2.4.6 เอ็น-เมทิล-4-พิเพอริดีนอล (MPDL)

MPDL เป็นเอมีนตติยภูมิแบบวง (cyclical tertiary amine) เพราะมีอะตอมของคาร์บอนสามอะตอมติดกับอะตอมของไนโตรเจนในโครงสร้างของหมู่เอมีน โดยคาร์บอนอะตอมจะอยู่ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) และหมู่เอมีน และมีโครงสร้างเป็นวง ซึ่งโครงสร้างทางเคมีของ MPDL แสดงในตารางที่ 2.2 โดย MPDL เป็นเอมีนชนิดใหม่ที่น่ามาใช้แทนเอมีนตติยภูมิดั้งเดิม TEA และ MDEA ซึ่ง MPDL มีความจุการดูดซับสูงกว่า มีความไวปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า และมีภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายต่ำกว่าเอมีนตติยภูมิดั้งเดิม TEA และ MDEA [8] โดย MPDL ไม่ได้ทำปฏิกิริยาโดยตรงกับคาร์บอนไดออกไซด์ เพราะไม่มีอะตอมของไฮโดรเจนที่จับกับอะตอมของไนโตรเจน แต่ MPDL จะทำหน้าที่เป็นเบสในปฏิกิริยาการสลายพันธะด้วยน้ำของคาร์บอนไดออกไซด์ และเกิดผลิตภัณฑ์เป็นไบคาร์บอเนตและเอมีนโปรโตเนต ซึ่งส่งผลให้ความไวปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ของ MPDL ต่ำกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA AMP และ PZ แต่สูงกว่าเอมีนตติยภูมิดั้งเดิม TEA และ MDEA [7] นอกจากนี้ ความร้อนของปฏิกิริยาการเกิดไบคาร์บอเนตและเอมีนโปรโตเนตจะต่ำกว่าปฏิกิริยาการเกิดคาร์บาเมต ดังนั้น MPDL จึงมีภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายต่ำกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA AMP และ PZ ซึ่งจะทำให้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง ในส่วนของความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า MPDL มีความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA TEA และ MDEA โดยข้อดีและข้อด้อยของตัวทำละลาย MPDL แสดงดังตารางที่ 2.3 [7]

ตารางที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของตัวทำละลายเอมีนที่ใช้ในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ [6, 8]

เอมีน	CAS No.	มวลโมเลกุล (g/mol)	ประเภทของเอมีน	โครงสร้างทางเคมี
MEA	141-43-5	61.08	เอมีนปฐมภูมิ	
DEA	111-42-2	105.14	เอมีนทุติยภูมิ	
TEA	102-71-6	149.19	เอมีนตติยภูมิ	
MDEA	105-59-9	119.16	เอมีนตติยภูมิ	
AMP	124-68-5	89.14	เอมีนปฐมภูมิที่มีโครงสร้างกีดขวางเนื่องจากขนาด	
PZ	110-85-0	86.14	เอมีนแบบวง	
DETA	111-40-0	103.17	เอมีนปฐมภูมิและเอมีนทุติยภูมิ	
MPDL	106-52-5	115.17	เอมีนตติยภูมิแบบวง	

ตารางที่ 2.3 ข้อดีและข้อด้อยของตัวทำละลายเอมีนที่ใช้ในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ [5-8, 18-22]

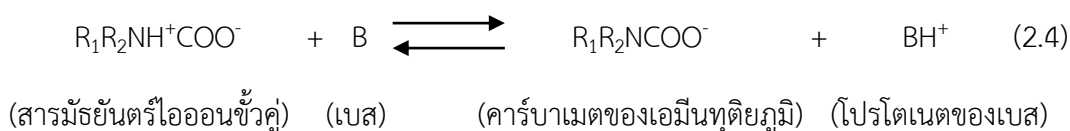
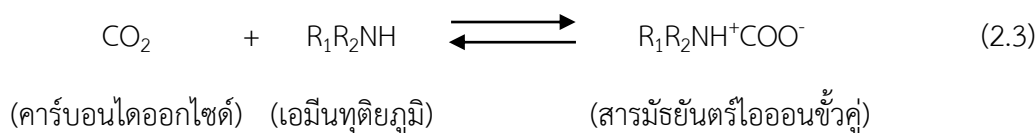
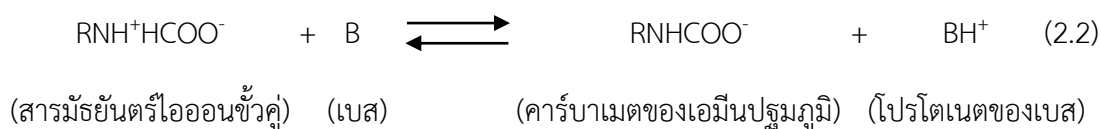
เอมีน	ข้อดี	ข้อด้อย
MEA	<ol style="list-style-type: none"> 1. จลนพลศาสตร์การดูดซึมสูง 2. ราคาถูก 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์จำกัด 2. ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายสูง
DEA	<ol style="list-style-type: none"> 1. จลนพลศาสตร์การดูดซึมสูง 2. ราคาถูก 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์จำกัด 2. ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายสูง 3. เกิดผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้เป็นไนโตรซามีน ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง

ตารางที่ 2.3 ข้อดีและข้อด้อยของตัวทำละลายเอมีนที่ใช้ในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ (ต่อ) [5-8, 18-22]

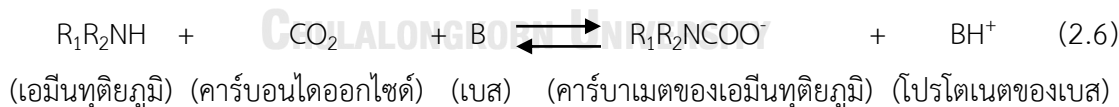
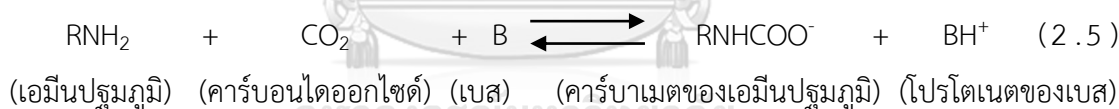
เอมีน	ข้อดี	ข้อด้อย
TEA	1. ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์สูง 2. ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายต่ำ	1. จลนพลศาสตร์การดูดซึมต่ำ
MDEA	1. ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์สูง 2. ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายต่ำ	1. จลนพลศาสตร์การดูดซึมต่ำ
AMP	1. ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์สูง 2. ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายต่ำ 3. จลนพลศาสตร์การดูดซึมปานกลาง	1. ตกตะกอนที่ความเข้มข้นสูง
PZ	1. ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์สูง 2. จลนพลศาสตร์การดูดซึมสูงมาก	1. ตกตะกอนที่ความเข้มข้นสูง 2. ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายสูง
DETA	1. ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์สูง 2. จลนพลศาสตร์การดูดซึมสูง	1. ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายสูง
MPDL	1. ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์สูง 2. ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายต่ำ	1. จลนพลศาสตร์การดูดซึมต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับ MEA AMP และ PZ

2.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวทำละลายเอมีนกับคาร์บอนไดออกไซด์

การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวทำละลายเอมีน (CO_2 absorption with amine solvent) เป็นกระบวนการดูดซึมทางเคมี โดยคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สที่เป็นกรดลิวอิส



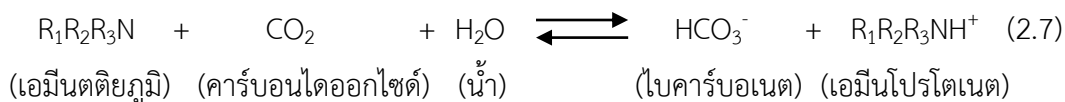
กลไกสามโมเลกุลเป็นปฏิกิริยาการเกิดคาร์บาเมตแบบขั้นตอนเดียว (single step) ซึ่งในปฏิกิริยาจะไม่มีเกิดการเกิดสารมัธยันตร์ไอออนชั่วครู่ โดยเอมีนปฐมภูมิ หรือ เอมีนทุติยภูมิ คาร์บอนไดออกไซด์ และ เบส (แทนด้วย B) เกิดปฏิกิริยาร่วมกัน โดย เบส อาจเป็น เอมีนปฐมภูมิ เอมีนทุติยภูมิ H_2O OH^- และ HCO_3^- [17] ซึ่งเอมีนปฐมภูมิ (RNH_2) ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ และเกิดผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บาเมตของเอมีนปฐมภูมิ (RNHCOO^-) และ โปรโตเนตของเบส (BH^+) ดังสมการ (2.5) ส่วนเอมีนทุติยภูมิ ($\text{R}_1\text{R}_2\text{NH}$) ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ และเกิดผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บาเมตของเอมีนทุติยภูมิ ($\text{R}_1\text{R}_2\text{NCOO}^-$) และ โปรโตเนตของเบส (BH^+) ดังสมการ (2.6) [26]



2.5.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเอมีนตติยภูมิกับคาร์บอนไดออกไซด์

สำหรับกลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเอมีนตติยภูมิกับคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นปฏิกิริยาที่เอมีนตติยภูมิ เช่น TEA และ MDEA ไม่ทำปฏิกิริยาโดยตรงกับคาร์บอนไดออกไซด์ เพราะไม่มีอะตอมของไฮโดรเจนที่จับกับอะตอมของไนโตรเจน ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเอมีนตติยภูมิกับคาร์บอนไดออกไซด์ เรียกว่า กลไกการสลายพันธะด้วยน้ำของคาร์บอนไดออกไซด์โดยมีเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (base-catalyzed hydration mechanism) [17]

โดยเอมีนตติยภูมิ ($R_1R_2R_3N$) จะเป็นเบสในปฏิกิริยาการสลายพันธะด้วยน้ำ (hydrolysis) ของคาร์บอนไดออกไซด์ และเกิดผลิตภัณฑ์เป็นไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) และ เอมีนโปรโตเนต ($R_1R_2R_3NH^+$) ดังสมการ (2.7)[17]

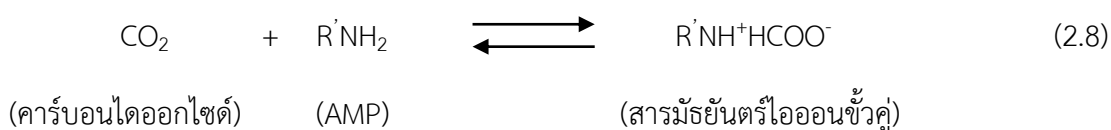


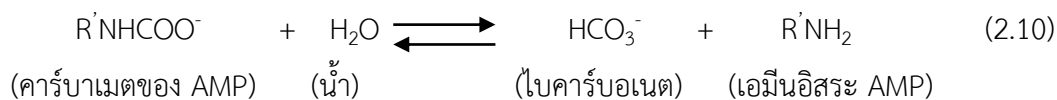
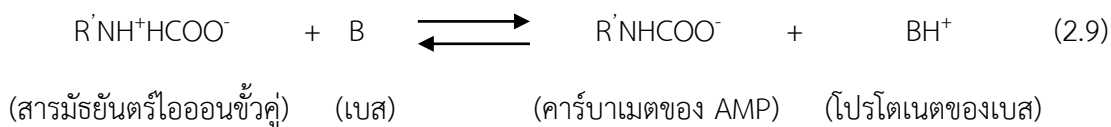
2.6 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL

ในตัวทำละลายผสมชนิดใหม่ AMP-MPDL มีเอมีนอยู่สองชนิด ได้แก่ เอมีนปฐมภูมิ ที่มีโครงสร้างกีดขวางเนื่องจากขนาด คือ AMP และ เอมีนตติยภูมิแบบวง คือ MPDL ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ของเอมีนปฐมภูมิที่มีโครงสร้างกีดขวางเนื่องจากขนาด กับเอมีนตติยภูมิแบบวงมีความแตกต่างกัน โดยมีรายละเอียดดังนี้

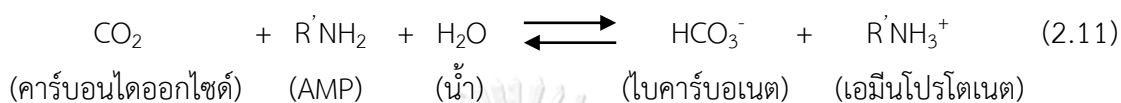
Yih และคณะ [27] กล่าวว่า กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเอมีนปฐมภูมิที่มีโครงสร้างกีดขวางเนื่องจากขนาดกับคาร์บอนไดออกไซด์ จะเกิดกลไกผสมผสานระหว่างกลไกการเกิดสารมัธยันตร์ไอออนชั่วครู่กับกลไกการสลายพันธะด้วยน้ำของคาร์บาเมต เนื่องจาก AMP มีโครงสร้างกีดขวางเนื่องจากขนาด เมื่อทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์จะเกิดผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บาเมตที่มีความเสถียรต่ำ จึงเกิดการสลายพันธะด้วยน้ำได้ง่าย โดย Bosch และคณะ [28] กล่าวว่า ส่วนใหญ่พบว่า AMP จะเกิดกลไกการเกิดสารมัธยันตร์ไอออนชั่วครู่

โดย AMP ($R'NH_2$) ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ เกิดเป็นสารมัธยันตร์ไอออนชั่วครู่ ($R'NH^+HCOO^-$) ดังสมการ (2.8) จากนั้น สารมัธยันตร์ไอออนชั่วครู่จะให้โปรตอนแก่เบส (B) โดย เบส อาจเป็น AMP, H_2O, OH^- และ HCO_3^- [17] ผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ คาร์บาเมตของ AMP ($R'NHCOO^-$) ดังสมการ (2.9) แต่คาร์บาเมตที่เกิดขึ้นมีความเสถียรต่ำกว่าคาร์บาเมตของเอมีนปฐมภูมิ และเอมีนทุติยภูมิ จึงเกิดปฏิกิริยาการสลายพันธะด้วยน้ำได้ง่าย และได้ผลิตภัณฑ์เป็นไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) และ เอมีนอิสระ AMP ($R'NH_2$) ดังสมการ (2.10) ซึ่งเอมีนอิสระ AMP ที่เกิดจากปฏิกิริยาการสลายพันธะด้วยน้ำ สามารถทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ได้อีก [27, 28]





ถ้า B เป็น AMP สามารถเขียนเป็นปฏิกิริยาโดยรวมได้ ดังสมการ (2.11)



ส่วนของกลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเอมีนตติยภูมิแบบวง MPDL กับคาร์บอนไดออกไซด์ จะเกิดกลไกการสลายพันธะด้วยน้ำของคาร์บอนไดออกไซด์โดยมีเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดย MPDL ($\text{R}_1\text{R}_2\text{CH}_3\text{N}$) จะเป็นเบสในปฏิกิริยาการสลายพันธะด้วยน้ำของคาร์บอนไดออกไซด์ และเกิดผลิตภัณฑ์เป็นไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) และ เอมีนโปรโตเนต ($\text{R}_1\text{R}_2\text{CH}_3\text{NH}^+$) ดังสมการ (2.12) [8]



2.7 ตัวชี้บอกสมรรถนะ

โดยทั่วไปแล้ว ตัวชี้บอกสมรรถนะ (performance indicator) เบื้องต้นสำหรับกระบวนการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์มีอยู่หลายรูปแบบ ซึ่งกระบวนการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวทำละลายเอมีนแบ่งได้เป็นสองส่วน คือ หอดูดซึม และ หอฟื้นฟู โดยหอดูดซึมมีตัวชี้บอกสมรรถนะ เช่น จลนพลศาสตร์การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 absorption kinetics) การถ่ายโอนมวลของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ (mass transfer of CO_2 absorption) ความจุการดูดซึม (absorption capacity) และ ความจุวนกลับ (cyclic capacity) เป็นต้น ส่วนหอฟื้นฟูมีตัวชี้บอกสมรรถนะ คือ ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลาย (solvent regeneration heat duty) ซึ่งตัวชี้บอกสมรรถนะที่สนใจในงานวิจัยนี้ คือ ความจุการดูดซึม ความจุวนกลับ และ ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลาย โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.7.1 ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์

หนึ่งในตัวชี้บอกสมรรถนะที่ใช้ในการประเมินศักยภาพของตัวทำละลายเอมีนสำหรับดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ คือ ความจุการดูดซึม หรือ สภาพการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะสมดุล (CO_2 equilibrium solubility) โดยความจุการดูดซึมเป็นข้อมูลพื้นฐานเชิงอุณหพลศาสตร์ (thermodynamic) ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการไหลภายในหอดูดซึม นอกจากนี้ ความจุการดูดซึมยังใช้บอกประสิทธิภาพของตัวทำละลายเอมีนในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ [29] โดยตัวทำละลายเอมีนที่มีประสิทธิภาพในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์สูง จะมีความจุการดูดซึมสูง ซึ่งการใช้ตัวดูดซึมเอมีนที่มีความจุการดูดซึมสูงสามารถลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในภาคอุตสาหกรรมได้ เช่น ใช้ความเข้มข้นของเอมีนน้อยลง ใช้อัตราการไหลของของเหลวต่ำลง หรือ เพิ่มอัตราการไหลของแก๊สให้สูงขึ้น เป็นต้น โดยความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลายเอมีนพิจารณาจากอัตราส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมต่อเอมีน หรือ CO_2 loading ในหน่วย $\text{mol CO}_2/\text{mol amine}$ ดังนั้น เมื่อ CO_2 loading มากขึ้น ตัวทำละลายเอมีนจะมีความจุการดูดซึมเพิ่มขึ้น โดยพารามิเตอร์ดำเนินการ (operating parameter) ที่ส่งผลต่อความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลายเอมีน ได้แก่ ความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิ ความเข้มข้นของเอมีน และชนิดของเอมีนที่ใช้ [8]

2.7.2 ความจวนกลับ

ความจวนกลับ (cyclic capacity) เป็นตัวชี้บอกสมรรถนะที่สำคัญอีกตัวหนึ่งที่ใช้ในการประเมินศักยภาพของตัวทำละลายเอมีนสำหรับดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะการดูดซึม (absorption condition) และ ภาวะการฟื้นฟู (regeneration condition) โดยความจวนกลับของตัวทำละลายเอมีนพิจารณาจากผลต่างโมลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมต่อหน่วยปริมาตรของตัวทำละลายเอมีนระหว่างอุณหภูมิ 313 และ 363 K ในหน่วย $\text{mol CO}_2/\text{L-amine solvent}$ [19] นอกจากนี้ ความจวนกลับยังใช้บอกประสิทธิภาพของตัวทำละลายเอมีนในการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะการดูดซึมและภาวะการฟื้นฟู โดยตัวทำละลายที่ดีควรมีโมลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมสูงในภาวะการดูดซึม และมีโมลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมต่ำในภาวะการฟื้นฟู ซึ่งส่งผลให้ความจวนกลับมีค่ามาก อันเป็นผลดีต่อการคายกลับ (desorption)

คาร์บอนไดออกไซด์ โดยพารามิเตอร์ดำเนินการที่ส่งผลต่อความจุณกลับของตัวทำละลายเอมีน ได้แก่ ความเข้มข้นของเอมีน และชนิดของเอมีนที่ใช้ [6]

2.7.3 ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลาย

ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลาย (regeneration heat duty) เป็นตัวชี้บ่งสมรรถนะที่สำคัญที่สุดในการประเมินศักยภาพของตัวทำละลายเอมีน สำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ เพราะค่าใช้จ่ายในการดำเนินการกว่า 70% ถูกใช้ในการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีนในหอฟื้นฟูเพื่อนำตัวทำละลายเอมีนกลับมาใช้ใหม่ที่หอดูดซึม ดังนั้น การลดภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการลง Sakwattanapong และคณะ [30] กล่าวว่า การใช้ตัวทำละลายเอมีนผสมช่วยลดภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายลงได้ โดยทำการเปรียบเทียบภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายระหว่างตัวทำละลายเอมีนผสม MEA-MDEA กับตัวทำละลายดั้งเดิม MEA พบว่า ตัวทำละลายเอมีนผสม MEA-MDEA มีภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายต่ำกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA โดยภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีนพิจารณาจากค่าความร้อนที่ใช้ในการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ต่อ 1 โมล ในกระบวนการฟื้นฟูตัวทำละลาย ในหน่วย kJ/mol CO₂ ซึ่งภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลาย (Q_{reg}) ประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ ภาระทางความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาการคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ (Q_{des} , kJ/mol CO₂) ภาระทางความร้อนในการระเหยของน้ำ (Q_{vap} , kJ/mol CO₂) และ ภาระทางความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิ (Q_{sen} , kJ/mol CO₂) ดังสมการ (2.13) [6, 31]

$$Q_{reg} = Q_{des} + Q_{vap} + Q_{sen} \quad (2.13)$$

ภาระทางความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาการคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ (Q_{des}) ของตัวทำละลายเอมีนผสม เป็นพลังงานที่ใช้ในการสลายผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ (เช่น คาร์บาเมตไบคาร์บอเนต และ คาร์บอเนต) ที่เกิดขึ้นระหว่างการทำปฏิกิริยาของเอมีนกับคาร์บอนไดออกไซด์ [6] ซึ่งภาระทางความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาการคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์จะมีปริมาณเท่ากับความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ โดย Q_{des} คำนวณได้จากผลรวมของเศษส่วนเชิงโมลของความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ของเอมีนแต่ละชนิด ดังสมการ (2.14) [31]

$$Q_{des} = \sum \frac{C_i}{C_T} \Delta H_{des_i} \quad (2.14)$$

โดย

Q_{des} = ภาระทางความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาการคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลายเอมีนผสม (kJ/mol CO₂)

C_i = ความเข้มข้นของเอมีน i^{th} ในตัวทำละลายเอมีนผสม (kmol/m³)

C_T = ความเข้มข้นของเอมีนทั้งหมดในตัวทำละลายเอมีนผสม (kmol/m³)

ΔH_{des_i} = ความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาการคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ของเอมีน i^{th} (kJ/mol CO₂)

ภาระทางความร้อนในการระเหยของน้ำ (Q_{vap}) ของตัวทำละลายเอมีนผสม เป็นความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำในกระบวนการฟื้นฟูตัวทำละลาย โดยจุดเดือดของน้ำคือ 373 K ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูตัวทำละลายจะอยู่ที่ 363 K อุณหภูมิดังกล่าวเอมีนยังไม่ระเหย จะมีแต่น้ำที่ระเหยออกไปจากระบบ เนื่องจากจุดเดือดของเอมีนอยู่ในช่วง 418–443 K ทำให้น้ำระเหยออกไปได้ง่ายกว่าเอมีน โดย Q_{vap} คำนวณได้จากปริมาณของน้ำในตัวทำละลายเอมีนผสมที่ระเหยออกไป ดังสมการ (2.15)–(2.17) [6, 31]

$$Q_{vap} = \Delta H_{vap_H_2O} \frac{P_{H_2O}}{P_{CO_2}} \quad (2.15)$$

$$P_{H_2O} = (P^{sat})_{H_2O_lean} \quad (2.16)$$

$$P_{CO_2} = 101.3 - ((P^{sat})_{H_2O_lean}) \quad (2.17)$$

โดย

Q_{vap} = ภาระทางความร้อนในการระเหยของน้ำของตัวทำละลายเอมีนผสม (kJ/mol CO₂)

$\Delta H_{vap_H_2O}$ = ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำที่อุณหภูมิ 363 K (41 kJ/mol H₂O)

P_{H_2O} = ความดันย่อยของไอน้ำ (kPa)

P_{CO_2} = ความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ (kPa)

P_{sat} = ความดันอิ่มตัวของน้ำที่อุณหภูมิการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีน 363 K (kPa)

$X_{H_2O_lean}$ = สัดส่วนเชิงโมลของน้ำในตัวทำละลายเอมีนผสมที่มีคาร์บอนไดออกไซด์น้อยลง

ภาระทางความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิ (Q_{sen}) ของตัวทำละลายเอมีนผสม เป็นพลังงานที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของตัวทำละลายเอมีนที่เต็มไปด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (313 K) ให้มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิการฟื้นฟูตัวทำละลาย (363 K) ซึ่งคำนวณจาก ค่าความจุความร้อน (specific heat capacity) ของตัวทำละลายเอมีน โดยใช้เครื่องวัด ค่าพลังงานความร้อน (differential scanning calorimeter, DSC) ทำการวิเคราะห์ หาค่าความจุความร้อน แล้วนำมาคำนวณหาค่าภาระทางความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิ ดังสมการ (2.18) [6, 31]

$$Q_{sen} = \frac{mC_p\Delta T}{(\alpha_{CO_2_rich} - \alpha_{CO_2_lean})mol_{amine}} \quad (2.18)$$

โดย

Q_{sen} = ภาระทางความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิของ ตัวทำละลายเอมีนผสม (kJ/mol CO₂)

m = มวลของตัวทำละลายเอมีนในเครื่องฟื้นฟูตัวทำละลาย (g)

C_p = ความจุความร้อนของตัวทำละลายเอมีน (kJ/g•K)

ΔT = ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างเครื่องปฏิบัติการดูดซึม (313 K) และเครื่องฟื้นฟูตัวทำละลาย (363 K) (K)

$\alpha_{CO_2_rich} - \alpha_{CO_2_lean}$ = ความแตกต่างของความจุการดูดซึมระหว่าง ตัวทำละลายเอมีนที่เต็มไปด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (rich loading) กับ ตัวทำละลายเอมีนที่มี คาร์บอนไดออกไซด์น้อยลง (lean loading) (mol CO₂/mol amine)

mol_{amine} = โมลของเอมีนในตัวทำละลายเอมีน (mol amine)

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ (absorption capacity)

Shen และคณะ [18] ศึกษาความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลาย MEA ที่ความเข้มข้น 30%wt. โดยพิจารณาจากอัตราส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ถูกดูดซึมต่อเอมีน หรือ CO₂ loading (mol CO₂/mol amine) ที่สมดุล โดยทำการ เปลี่ยนความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 10 30 50 80 และ 100 kPa และ อุณหภูมิ 313

333 353 และ 373 K พบว่า ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลาย MEA เพิ่มขึ้น เมื่อความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น เพราะมีแรงขับของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์จากเฟสแก๊สเข้าสู่เฟสของเหลวมากขึ้น จึงส่งผลให้ความจุการดูดซึมสูงขึ้น นอกจากนี้ ยังพบว่า อุณหภูมิดำเนินการส่งผลต่อความจุการดูดซึมของตัวทำละลาย MEA กล่าวคือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 313 K เป็น 363 K ความจุการดูดซึมลดลงอย่างมาก เนื่องจากปฏิกิริยาการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเอมีนเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic reaction) เมื่ออุณหภูมิดำเนินการสูงขึ้นเป็น 363 K ซึ่งเป็นภาวะดำเนินการของหอฟื้นฟู คาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมในตัวทำละลายเอมีนจะเกิดการคายกลับ ส่งผลให้ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงอย่างมากที่อุณหภูมิดังกล่าว

Choi และคณะ [32] ศึกษาศักยภาพของตัวทำละลายชนิดใหม่ MEA-AMP ในเชิงความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 24/6 18/12 12/18 และ 6/24 %wt. MEA/AMP เปรียบเทียบกับตัวทำละลายดั้งเดิม 30%wt. MEA โดยความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ถูกพิจารณาจากอัตราส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมต่อเอมีน หรือ CO_2 loading (mol CO_2 /mol amine) ที่สมดุล โดยทำการทดลองที่ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 12 kPa และ อุณหภูมิ 313 K พบว่า การเติม AMP ลงในตัวทำละลาย MEA ให้ความจุการดูดซึมของตัวทำละลายชนิดใหม่ MEA-AMP เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบตัวทำละลายชนิดใหม่ MEA-AMP ทั้งสี่อัตราส่วนความเข้มข้นกับตัวทำละลาย 30%wt. MEA พบว่า ตัวทำละลายชนิดใหม่ MEA-AMP มีความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าตัวทำละลาย 30%wt. MEA กว่า 34–93%

Mondal และคณะ [33] ศึกษาความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลายชนิดใหม่ bis(3-aminopropyl) amine หรือ dipropylenetriamine (DPTA)-AMP ความเข้มข้นรวม 30%wt. ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 5/25 %wt. DPTA/AMP โดยพิจารณาจากอัตราส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมต่อเอมีน หรือ CO_2 loading (mol CO_2 /mol amine) ที่สมดุล โดยทำการเปลี่ยนความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่าง 1–200 kPa และ อุณหภูมิ 313 K พบว่า ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลายชนิดใหม่ DPTA-AMP เพิ่มขึ้น เมื่อความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น เพราะมีแรงขับของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์จากเฟสแก๊สเข้าสู่เฟสของเหลวมากขึ้น จึงส่งผลให้ความจุการดูดซึมสูงขึ้น นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบตัวทำละลายชนิดใหม่ DPTA-AMP กับตัวทำละลายดั้งเดิม 30 % wt. MEA

พบว่า ตัวทำละลายชนิดใหม่ DPTA-AMP มีความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม 30%wt. MEA กว่า 8–63%

Wai และคณะ [15] ศึกษาศักยภาพของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-diethylenetriamine (DETA) ในเชิงความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 2.5/0.5 2/1 1.5/1.5 และ 1/2 kmol/m³ AMP/DETA เปรียบเทียบกับตัวทำละลายดั้งเดิม MEA โดยความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ถูกพิจารณาจากอัตราส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมต่อเอมีน หรือ CO₂ loading (mol CO₂/mol amine) ที่สมดุล โดยทำการทดลองที่ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 15 kPa และ อุณหภูมิ 313 K พบว่า การเติม DETA ลงในตัวทำละลาย AMP ทำให้ความจุการดูดซึมของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-DETA เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของ DETA เพิ่มขึ้น เพราะ DETA มีหมู่เอมีน 3 หมู่อยู่ในโครงสร้าง จึงทำให้ DETA สามารถดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากต่อโมลเอมีน นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-DETA ทั้งสี่อัตราส่วนความเข้มข้นกับตัวทำละลายดั้งเดิม MEA พบว่า ตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-DETA มีความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA กว่า 44–98%

2.8.2 ความจุวนกลับ (cyclic capacity)

Maneeintr และคณะ [20] ศึกษาความจุวนกลับของตัวทำละลาย MEA ที่ความเข้มข้น 2 โมลาร์ (mol/L) โดยพิจารณาจากอัตราส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมต่อเอมีนระหว่างอุณหภูมิ 298 และ 353 K (mol CO₂/mol amine) ที่สมดุล และความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 5–100 kPa พบว่า ความจุวนกลับของตัวทำละลาย MEA เพิ่มขึ้น เมื่อความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น เพราะมีแรงขับของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์จากเฟสแก๊สเข้าสู่เฟสของเหลวมากขึ้น อัตราส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมต่อเอมีนที่อุณหภูมิ 298 และ 353 K จึงสูงขึ้น ส่งผลให้ความจุวนกลับสูงขึ้น ซึ่งตัวทำละลาย MEA มีอัตราส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมต่อเอมีนในภาวะการดูดซึม (298 K) มากกว่าในภาวะการฟื้นฟู (353 K) เพราะการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน เมื่ออุณหภูมิดำเนินการสูงขึ้นเป็น 353 K ซึ่งเป็นภาวะดำเนินการของการฟื้นฟูตัวทำละลาย คาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมในตัวทำละลาย MEA จะเกิดการคายกลับ

Singto และคณะ [19] ศึกษาความจุวนกลับของตัวทำละลาย MDEA ที่ความเข้มข้น 2 โมลาร์ (mol/L) โดยพิจารณาจากอัตราส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึม

ต่อเอมีนระหว่างอุณหภูมิ 313 และ 353 K ($\text{mol CO}_2/\text{mol amine}$) ที่สมดุล และความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 3–100 kPa พบว่า เมื่อความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น จะทำให้อัตราส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมต่อเอมีนที่อุณหภูมิ 313 และ 353 K สูงขึ้น ส่งผลให้ตัวทำละลาย MDEA มีความจุวนกลับสูงขึ้น ซึ่งตัวทำละลาย MDEA มีอัตราส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมต่อเอมีนในภาวะการดูดซึม (313 K) มีค่ามากกว่าภาวะการฟื้นฟู (353 K) เพราะคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมในตัวทำละลาย MDEA จะเกิดการคายกลับที่อุณหภูมิ 353 K เนื่องจากภาวะการดูดซึมเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบความจุวนกลับของตัวทำละลาย MDEA กับ ตัวทำละลาย MEA ที่ความเข้มข้น 2 โมลาร์ และความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 15 kPa ซึ่งมีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ใกล้เคียงกับแก๊สปล่อยทิ้งจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล พบว่า ตัวทำละลาย MDEA มีความจุวนกลับสูงกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA กว่า 2.4 เท่า

Wai และคณะ [15] ศึกษาความจุวนกลับของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP–DETA ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 2.5/0.5 2/1 1.5/1.5 และ 1/2 kmol/m^3 AMP/DETA เปรียบเทียบกับตัวทำละลายดั้งเดิม MEA โดยพิจารณาจากผลต่างโมลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมต่อหน่วยปริมาตรของตัวทำละลายเอมีนระหว่างอุณหภูมิ 313 และ 363 K ($\text{mol CO}_2/\text{L-amine solvent}$) ที่สมดุล โดยทำการทดลองที่ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 15 kPa พบว่า ความจุวนกลับของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP–DETA สูงขึ้น เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ DETA สูงขึ้น ทั้งนี้ เมื่อตัวทำละลายมีความเข้มข้นของ AMP มากขึ้น คาร์บอนไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับเอมีน และได้ผลิตภัณฑ์เป็นไบคาร์บอเนตมากขึ้น ซึ่งไบคาร์บอเนตเกิดปฏิกิริยาคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ง่ายเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น กล่าวคือ โมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดการคายกลับต่อหน่วยปริมาตรของตัวทำละลายเอมีนสูงขึ้น ดังนั้น ความจุวนกลับของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP–DETA จึงสูงขึ้น เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP สูงขึ้น นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP–DETA กับตัวทำละลายดั้งเดิม MEA พบว่า ตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP–DETA ทั้งสี่อัตราส่วนความเข้มข้น มีความจุวนกลับสูงกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA กว่า 0.7–2.2 เท่า

2.8.3 ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลาย (regeneration heat duty)

Muchan และคณะ [34] ศึกษาภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลาย MEA MDEA และ AMP ที่ความเข้มข้น 2 โมลาร์ และ PZ ที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์ โดยพิจารณา

จากค่าความร้อนที่ใช้ในการคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมล ในกระบวนการฟื้นฟูตัวทำละลาย (kJ/mol CO₂) ที่อุณหภูมิ 363 K เป็นเวลา 80 นาที ผลการศึกษา พบว่า ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลาย MEA มีค่าสูงที่สุด เนื่องจากตัวทำละลาย MEA มีโครงสร้างเป็นเอมีนปฐมภูมิ เมื่อเอมีนปฐมภูมิทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในตัวทำละลาย จะเกิดผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บาเมต ซึ่งคาร์บาเมตนี้มีความเสถียรสูง ทำให้ต้องใช้พลังงานสำหรับการคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์สูง ส่งผลให้ตัวทำละลาย MEA ซึ่งเป็นเอมีนปฐมภูมิ มีภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายสูงที่สุด รองลงมา คือ ตัวทำละลาย PZ เนื่องจากคาร์บาเมตของเอมีนทุติยภูมิมีความเสถียรต่ำกว่าคาร์บาเมตของเอมีนปฐมภูมิ ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายของตัวทำละลาย PZ จึงต่ำกว่าตัวทำละลาย MEA ลำดับถัดมา คือ ตัวทำละลาย MDEA เนื่องจาก ตัวทำละลาย MDEA เป็นเอมีนตติยภูมิ โดยตัวทำละลาย MDEA ไม่ได้ทำปฏิกิริยาโดยตรงกับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในตัวทำละลาย แต่ตัวทำละลาย MDEA จะเป็นเบสในปฏิกิริยาการสลายพันธะด้วยน้ำของคาร์บอนไดออกไซด์ และเกิดผลิตภัณฑ์เป็นไบคาร์บอเนต ซึ่งไบคาร์บอเนตต้องการพลังงานสำหรับการคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่าคาร์บาเมต ดังนั้น ตัวทำละลาย MDEA จึงใช้พลังงานในการคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่าตัวทำละลาย PZ และ MEA ตามลำดับ และ ลำดับสุดท้าย คือ ตัวทำละลาย AMP ซึ่งเป็นเอมีนปฐมภูมิที่มีโครงสร้างกีดขวางเนื่องจากขนาด โดยตัวทำละลาย AMP ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ และเกิดผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บาเมตของ AMP ที่มีความเสถียรต่ำ ซึ่งต่างจากคาร์บาเมตของ MEA และ คาร์บาเมตของ PZ ที่เป็นคาร์บาเมตที่มีความเสถียรสูงกว่า ซึ่งคาร์บาเมตของ AMP ที่มีความเสถียรต่ำจะเกิดปฏิกิริยาการสลายพันธะด้วยน้ำได้ง่าย และได้ผลิตภัณฑ์เป็นไบคาร์บอเนต ส่งผลให้ตัวทำละลาย AMP มีภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายน้อยที่สุด ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ตัวทำละลาย MEA มีภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายสูงที่สุด รองลงมา คือ PZ MDEA และ AMP ตามลำดับ

Wai และคณะ [15] ศึกษาศักยภาพของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-DETA ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 2.5/0.5 2/1 1.5/1.5 และ 1/2 kmol/m³ AMP/DETA ในเชิงภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลาย โดยภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายถูกพิจารณาจากค่าความร้อนที่ใช้ในการคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมล ในกระบวนการฟื้นฟูตัวทำละลาย (kJ/mol CO₂) ที่อุณหภูมิ 363 K พบว่า ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-DETA ลดลง เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP เพิ่มขึ้น เนื่องจาก AMP ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์

จะเกิดเป็นคาร์บาเมตที่มีความเสถียรต่ำ ซึ่งเกิดปฏิกิริยาการสลายพันธะด้วยน้ำได้ง่าย จึงเกิดเป็นไบคาร์บอเนต ส่งผลให้ตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-DETA มีภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายต่ำลง นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-DETA ทั้งสี่อัตราส่วนความเข้มข้นกับตัวทำละลายดั้งเดิม MEA พบว่า ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 2.5/0.5 และ 2/1 kmol/m³ AMP/DETA มีภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายต่ำกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA เพราะทั้งสองอัตราส่วนมีปริมาณความเข้มข้นของ AMP มากกว่า DETA ซึ่งการมีปริมาณ AMP มากขึ้น จะเกิดไบคาร์บอเนตมากขึ้น โดยไบคาร์บอเนตใช้พลังงานในการคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่าคาร์บาเมต ดังนั้น ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 2.5/0.5 และ 2/1 kmol/m³ AMP/DETA จึงมีภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายต่ำกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA และที่อัตราส่วนความเข้มข้น 1.5/1.5 และ 1/2 kmol/m³ AMP/DETA มีภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายสูงกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA เพราะทั้งสองอัตราส่วนความเข้มข้นมีปริมาณของ AMP น้อยกว่าหรือเท่ากับ DETA ซึ่งการมีปริมาณ AMP น้อยลง จะทำให้เกิดไบคาร์บอเนตลดลง และ DETA เป็นเอมีนที่ประกอบด้วยเอมีนปฐมภูมิและเอมีนทุติยภูมิ อยู่ภายในโครงสร้าง เมื่อ DETA ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ จะเกิดผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บาเมต ซึ่งคาร์บาเมตนี้มีความเสถียรสูง ทำให้ต้องใช้พลังงานในการคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์สูง ส่งผลให้ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 1.5/1.5 และ 1/2 kmol/m³ AMP/DETA มีภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายสูงกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA

2.8.4 ตัวทำละลายเอมีนชนิดใหม่ *N*-methyl-4-piperidinol (MPDL)

Sema และคณะ [7] ศึกษา MPDL บริสุทธิ์ และ ตัวทำละลาย MPDL ที่ความเข้มข้น 0.5–2 โมลาร์ (mol/L) และ อุณหภูมิระหว่าง 303–333 K ในเชิงความหนาแน่นและความหนืด ซึ่งเป็นสมบัติเชิงกายภาพเบื้องต้นสำหรับประเมินศักยภาพของตัวทำละลายเอมีนในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยความหนาแน่นและความหนืดเป็นข้อมูลพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการไหลของตัวทำละลายภายในหลอดดูดซึม นอกจากนี้ ความหนาแน่นและความหนืดของตัวทำละลายเอมีนยังเป็นข้อมูลสำคัญเพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซึมและการถ่ายโอนมวลคาร์บอนไดออกไซด์ในตัวทำละลายเอมีนได้ โดยความหนาแน่นพิจารณาจากอัตราส่วนของมวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (g/cm³) ส่วนความหนืดของตัวทำละลายพิจารณาจากหน่วยของความหนืดในระบบ SI (mPa.s) พบว่า ความหนาแน่นของ MPDL บริสุทธิ์ และตัวทำละลาย MPDL ลดลง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้ ยังพบว่า MPDL บริสุทธิ์ มีความหนาแน่นต่ำกว่า

ตัวทำละลาย MPDL เพราะ MPDL บริสุทธิ์ มีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำ สาเหตุนี้จึงทำให้ความหนาแน่นของตัวทำละลาย MPDL ลดลง เมื่อความเข้มข้นของ MPDL เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ความหนาแน่นของ MPDL บริสุทธิ์ และตัวทำละลาย MPDL มีค่าใกล้เคียงกับ น้ำ MEA บริสุทธิ์ และ ตัวทำละลาย 30%wt. MEA ตามลำดับ ส่วนความหนืดของ MPDL บริสุทธิ์ และ ตัวทำละลาย MPDL มีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ความหนืดของ MPDL บริสุทธิ์ มีค่าใกล้เคียงกับ AMP บริสุทธิ์ และสูงกว่า MDEA บริสุทธิ์ และ MEA บริสุทธิ์ ตามลำดับ นอกจากนี้ เมื่อความเข้มข้นของ MPDL เพิ่มขึ้น ความหนืดของตัวทำละลาย MPDL จะสูงขึ้น โดยความหนืดของตัวทำละลาย MPDL ที่ความเข้มข้น 1.5 และ 2 โมลาร์ มีค่าใกล้เคียงกับตัวทำละลาย 30%wt. MEA และต่ำกว่าตัวทำละลาย 30%wt. MDEA และ 30%wt. AMP ตามลำดับ ดังนั้น MPDL จึงเป็นเอมีนที่สามารถใช้ในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้

Xiao และคณะ [8] ศึกษาความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาการคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลาย MPDL เปรียบเทียบกับตัวทำละลายดั้งเดิม MDEA ที่ความเข้มข้น 2 โมลาร์ ซึ่งเอมีนทั้งสองเป็นเอมีนตติยภูมิ โดยความจุการดูดซับพิจารณาจากอัตราส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับต่อเอมีน หรือ CO_2 loading ($\text{mol CO}_2/\text{mol amine}$) ที่สมดุล และ พิจารณาความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาการคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ ในหน่วย kJ/mol CO_2 พบว่า MPDL มีความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าและมีความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาการคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MDEA นอกจากนี้ Sema และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ MPDL โดยพบว่า MPDL มีจลนพลศาสตร์ของการดูดซับสูงกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MDEA และ TEA จากผลการศึกษาดังกล่าว สรุปได้ว่า MPDL เป็นเอมีนตติยภูมิชนิดใหม่ที่มีศักยภาพสำหรับใช้แทนที่เอมีนตติยภูมิชนิดดั้งเดิม เช่น MDEA และ TEA ในเชิงความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ จลนพลศาสตร์ของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลาย แต่ MPDL ยังมีจลนพลศาสตร์ของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ไม่สูงพอที่จะใช้เป็นตัวทำละลายแบบเดี่ยว (single solvent) จึงอาจผสม MPDL ด้วยตัวทำละลายเอมีนที่มีความไวในการทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์สูง เช่น AMP เพื่อปรับปรุงจลนพลศาสตร์ของการดูดซับโดยรวม (overall absorption kinetics constant) ของตัวทำละลายผสม

Sema และคณะ [9] ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL เพื่อใช้ทดแทนตัวทำละลายดั้งเดิม AMP-TEA และ TEA โดยพิจารณาจาก

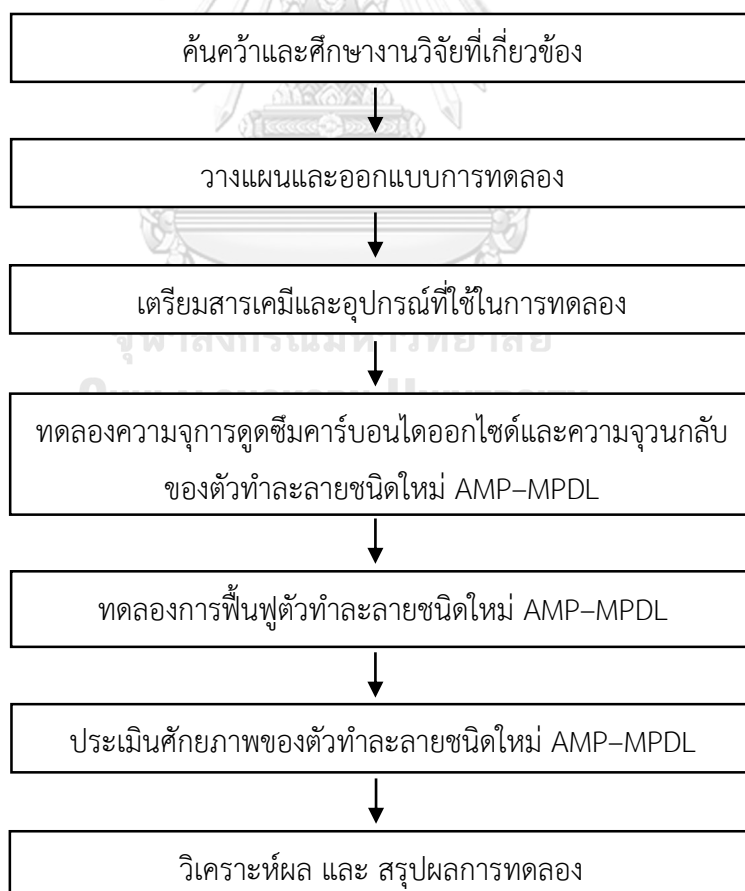
ค่าคงตัวจลนพลศาสตร์ของการดูดซึมโดยรวม พบว่า การเติม AMP ลงในตัวทำละลาย MPDL ทำให้ค่าคงตัวจลนพลศาสตร์ของการดูดซึมโดยรวมของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL สูงขึ้นกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม AMP-TEA และ TEA ประมาณ 95% และ 350% ตามลำดับ Sema และคณะ [9] จึงเสนอว่าจำเป็นต้องศึกษาความจุการดูดซึม ความจุวนกลับ และ ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL เพื่อประเมินศักยภาพของตัวทำละลายดังกล่าวให้ครอบคลุมยิ่งขึ้น



บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ความจุวนกลับ และ ความสามารถในการฟื้นฟูของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL เพื่อประเมินศักยภาพของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL สำหรับใช้ทดแทนตัวทำละลายเอมีนดั้งเดิมให้ครอบคลุมยิ่งขึ้น ดังนั้น ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยจึงครอบคลุมตั้งแต่ค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง วางแผนและออกแบบการทดลอง โดยมีพารามิเตอร์ดำเนินการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง จัดเตรียมสารเคมีและอุปกรณ์การทดลอง ทดลองความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และความจุวนกลับของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ทดลองการฟื้นฟูตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL รวมทั้งประเมินศักยภาพของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL และ สรุปผลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 สารเคมีและแก๊สที่ใช้ในการทดลอง

1. 2-อะมิโน-2-เมทิล-1-โพรพานอล (2-amino-2-methyl-1-propanol: AMP) (ความบริสุทธิ์ 98%, ผลิตโดย บริษัท Sigma-Aldrich ประเทศ สวิตเซอร์แลนด์)
2. เอ็น-เมทิล-4-พิเพอริดีนอล (N-methyl-4-piperidinol: MPDL) (ความบริสุทธิ์ 98%, ผลิตโดย บริษัท Sigma-Aldrich ประเทศ สวิตเซอร์แลนด์)
3. โมโนเอทานอลามีน (monoethanolamine: MEA) (ความบริสุทธิ์ 98%, ผลิตโดย บริษัท Merck ประเทศเยอรมนี)
4. สารละลายมาตรฐาน 1 M HCl (ผลิตโดย บริษัท QRec ประเทศนิวซีแลนด์)
5. เมทิลออเรนจ์ 0.1%wt. (ผลิตโดย บริษัท แกมมาโก้ จำกัด ประเทศไทย)
6. น้ำกลั่น (distilled water)
7. คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) (ความบริสุทธิ์ 99.5%, ผลิตโดย บริษัท ไทย-เจแปน จำกัด ประเทศไทย)
8. ไนโตรเจน (N₂) (ความบริสุทธิ์ 99.5%, ผลิตโดย บริษัท ไทย-เจแปน จำกัด ประเทศไทย)

3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องปฏิกรณ์การดูดซึม (absorption reactor) ขนาด 125 มิลลิลิตร
2. อ่างควบคุมอุณหภูมิ (water bath) (รุ่น WD11 จากบริษัท Hanyang Scientific Equipment ประเทศเกาหลี)
3. เครื่องควบแน่น (condenser)
4. ปั๊มหมุนเวียนสำหรับน้ำหล่อเย็น (coolant pump)
5. อุปกรณ์ควบคุมการไหลของแก๊ส (gas flow controller)
6. อุปกรณ์รับรู้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ analyzer) (รุ่น SprintIR-6S100% จากบริษัท CO₂ METER ประเทศแคนาดา)
7. Chittick apparatus
8. เครื่องฟื้นฟูตัวทำละลาย (desorption reactor) ขนาด 250 มิลลิลิตร

9. เครื่องกวนสารละลายชนิดให้ความร้อนพร้อมชุดควบคุมอุณหภูมิ (hotplate and magnetic stirrer) (รุ่น C-MAGHS7+ETS-D5 จากบริษัท เมริทเทค จำกัด ประเทศไทย)
10. อ่างน้ำมัน (oil bath)
11. เทอร์มอมิเตอร์ (thermometer)
12. เครื่องกวนสาร (magnetic stirrer)
13. บิวเรต (burette) ขนาด 50 มิลลิลิตร
14. ขวดรูปชมพู่ (erlenmeyer flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร
15. ปีกเกอร์ (beaker)
16. ปิเปตแก้ว (graduated pipette)
17. ที่ปั๊มปิเปต (pipette pump)
18. ปีกเกอร์พลาสติก (plastic beaker)

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 อุณหภูมิและอัตราส่วนความเข้มข้นที่ใช้ในการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาตัวทำละลายเอมีนผสม AMP-MPDL ที่ความเข้มข้นรวม 30 %wt. ของสารละลายในน้ำ ที่อัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL 5/25 10/20 และ 15/15 %wt. AMP/MPDL และ ความเข้มข้นรวม 40 %wt. ของสารละลายในน้ำ ที่อัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL 10/30 15/25 และ 20/20 %wt. AMP/MPDL โดยความจุการดูดซึ่มคาร์บอนไดออกไซด์และความจวนกลับของตัวทำละลายเอมีน จะดำเนินการที่อุณหภูมิ 313 และ 363 K ซึ่งเป็นอุณหภูมิทั่วไปของหอดูดซึ่มและหอฟื้นฟู ตามลำดับ และความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 10 30 50 80 และ 101 kPa (10–100 %v/v) ในส่วนของภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีน จะดำเนินการที่อุณหภูมิ 363 K ซึ่งเป็นอุณหภูมิของการฟื้นฟูตัวทำละลาย จึงกล่าวได้ว่า ภาวะดำเนินการในงานวิจัยนี้ สอดคล้องกับการใช้ตัวทำละลายเอมีนในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรม

3.3.2 ความจุการดูดซึ่มคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลายเอมีน

ความจุการดูดซึ่มคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลายเอมีนเป็นหนึ่งในตัวชี้บอกสมรรถนะที่สำคัญที่ใช้บอกถึงประสิทธิภาพของตัวทำละลายเอมีนสำหรับดูดซึ่ม

คาร์บอนไดออกไซด์ โดยความจุการดูดซึมพิจารณาจากอัตราส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมต่อเอมีน หรือ CO_2 loading ในหน่วย $\text{mol CO}_2/\text{mol amine}$ เครื่องมือที่ใช้วัดความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในตัวทำละลายเอมีน แสดงดังรูปที่ 3.2(ก) [15] ในการทดลองดังกล่าว ตัวทำละลายเอมีน ปริมาตร 25 มิลลิลิตรถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิบัติการการดูดซึมที่ความดันบรรยากาศ เครื่องปฏิบัติการการดูดซึมถูกควบคุมอุณหภูมิที่ 313 และ 363 K โดยอ่างควบคุมอุณหภูมิ (WD11, Hanyang Scientific Equipment Co., Ltd, Korea) ซึ่งมีอุณหภูมิดำเนินการในช่วง 303–373 K และความเสถียรของอุณหภูมิ ± 0.2 °C คาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจนถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิบัติการการดูดซึมในอ่างควบคุมอุณหภูมิ โดยอัตราการป้อนของแก๊สทั้งสองถูกควบคุมโดยอุปกรณ์ควบคุมการไหลของแก๊ส เพื่อให้ได้ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 10 30 50 80 และ 101 kPa (ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสม 10–100 %v/v) ทั้งนี้ ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในเฟสแก๊สถูกวัดโดยอุปกรณ์รับรู้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีช่วงดำเนินการคือ 0–100 %v/v ของคาร์บอนไดออกไซด์ และมีความแม่นยำ $\pm 0.3\%$ (SprintIR-6S100%, CO_2 METER, Canada) โดยคาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจนจะถูกป้อนเข้าสู่เครื่องเพิ่มความชื้น (saturation cell) ก่อน ทำให้คาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจนมีความชื้นมากขึ้น เพื่อป้องกันความเข้มข้นของตัวทำละลายเอมีนในเครื่องปฏิบัติการการดูดซึมเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากเครื่องปฏิบัติการการดูดซึมน้ำอยู่ภายใน ซึ่งน้ำจะเกิดการแพร่จากเฟสของเหลวเข้าสู่เฟสแก๊สแห้งได้ จากนั้น คาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความชื้น (wet gas) จะผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยากับตัวทำละลายเอมีนภายในเครื่องปฏิบัติการการดูดซึม โดยเครื่องควบแน่นที่ทางออกด้านบนของเครื่องปฏิบัติการการดูดซึมทำหน้าที่นำของเหลวผลควบแน่น เช่น น้ำ และ เอมีน กลับสู่เครื่องปฏิบัติการการดูดซึม ซึ่งเป็นการคงความเข้มข้นของตัวทำละลายเอมีนให้คงตัวตลอดการทดลอง หลังจากคาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับตัวทำละลายเอมีนแล้ว จึงทำการวัดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมด้วยตัวทำละลายเอมีน หรือ CO_2 loading ($\text{mol CO}_2/\text{mol amine}$) โดยไทเทรตของเหลวตัวอย่างจากเครื่องปฏิบัติการการดูดซึมกับสารละลายมาตรฐาน 1 M HCl ด้วย Chittick apparatus [35] ตามมาตรฐาน AOAC (Association of Official Analytical Chemist) ดังรูปที่ 3.2(ข) โดยใช้เมทิลออเรนจ์เป็นอินดิเคเตอร์ ซึ่งการวัด CO_2 loading จะทำทุก 1 ชั่วโมง จนกระทั่ง CO_2 loading มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง กล่าวคือ ระบบเข้าสู่สมดุล โดย CO_2 loading ที่สมดุล คือ ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลายเอมีน เพื่อยืนยันความแม่นยำและความเชื่อถือได้ของเครื่องมือและวิธีการวัดความจุการดูดซึม

จึงทำการสอบเทียบด้วยตัวทำละลายดั้งเดิม MEA ความเข้มข้น 14 และ 30 %wt. และ ตัวทำละลาย AMP ความเข้มข้น 18 %wt. ที่อุณหภูมิ 313 K และ ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 10 30 50 80 และ 101 kPa พร้อมทั้งทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง พบว่า ความจุการดูดซึมที่วัดได้มีความสอดคล้องกับข้อมูลจากวรรณกรรม โดยมีร้อยละความเบี่ยงเบนเฉลี่ยสัมบูรณ์ (absolute average deviation percentages หรือ %AADs) 3.38 2.78 และ 3.63 % ตามลำดับ [18, 20, 21] และ มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) 0.015 จึงกล่าวได้ว่า เครื่องมือและวิธีการวัดความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในตัวทำละลายเอมีนที่ใช้มีความแม่นยำและเชื่อถือได้

ตารางที่ 3.1 ความจุการดูดซึมของตัวทำละลาย MEA ความเข้มข้น 14 และ 30 %wt.

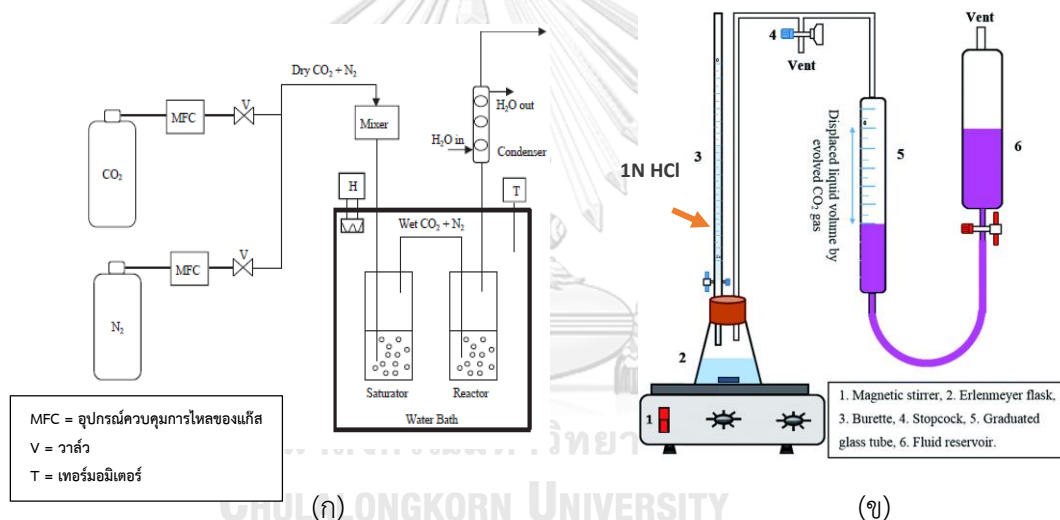
ความดันย่อย คาร์บอนไดออกไซด์ (kPa)	ความจุการดูดซึม ($\text{mol CO}_2/\text{mol amine}$)			
	14%wt. MEA		30%wt. MEA	
	Reference [20]	Experiment	Reference [18]	Experiment
10.1	0.573	0.570	0.508	0.496
30.4	0.641	0.611	0.541	0.518
50.7	0.684	0.625	0.562	0.547
81.1	0.734	0.728	0.581	0.569
101.3	0.752	0.769	0.594	0.608

ตารางที่ 3.2 ความจุการดูดซึมของตัวทำละลาย AMP ความเข้มข้น 18 %wt.

ความดันย่อย คาร์บอนไดออกไซด์ (kPa)	ความจุการดูดซึม ($\text{mol CO}_2/\text{mol amine}$)	
	18%wt. AMP	
	Reference [21]	Experiment
10.1	0.718	0.762
30.4	0.799	0.846
50.7	0.849	0.858
81.1	0.913	0.893
101.3	0.968	0.940

3.3.3 ความจุวนกลับของตัวทำละลายเอมีน

ความจุวนกลับของตัวทำละลายเอมีนเป็นหนึ่งในตัวชี้บอกสมรรถนะที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งที่ใช้บอกประสิทธิภาพของตัวทำละลายเอมีน โดยความจุวนกลับพิจารณาจากผลต่างโมลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมต่อหน่วยปริมาตรของตัวทำละลายเอมีนระหว่างอุณหภูมิ 313 และ 363 K ในหน่วย mol CO₂/L-amine solvent ซึ่งคำนวณจากผลคูณระหว่าง ผลต่างความจุการดูดซึมของตัวทำละลายเอมีนที่อุณหภูมิ 313 และ 363 K (mol CO₂/mol amine) และ ความเข้มข้นโมลาร์ของเอมีนในตัวทำละลาย (mol amine/L-amine solvent) โดยผลต่างความจุการดูดซึมระหว่างอุณหภูมิทั้งสองได้จากการทดลองวัดความจุการดูดซึมดังกล่าวแล้วข้างต้น และ ความเข้มข้นโมลาร์ของเอมีนในตัวทำละลายวัดได้จากการไทเทรตตัวทำละลายเอมีนกับสารละลายมาตรฐาน 1 M HCl โดยใช้เมทิลออเรนจ์เป็นอินดิเคเตอร์

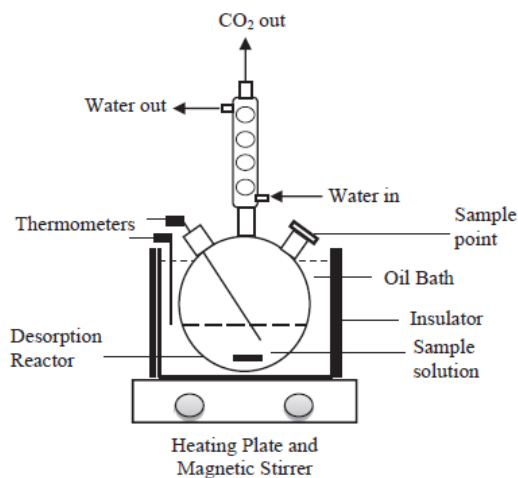


รูปที่ 3.2 เครื่องมือวัดความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในตัวทำละลายเอมีน (ก) แผนภาพการทดลอง และ (ข) Chittick apparatus [15, 35]

3.3.4 ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีน

ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีนเป็นตัวชี้บอกสมรรถนะที่สำคัญที่สุดในการประเมินศักยภาพของตัวทำละลายเอมีนสำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายพิจารณาจากค่าความร้อนที่ใช้ในการคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ต่อ 1 โมล ในกระบวนการฟื้นฟูตัวทำละลาย ในหน่วย kJ/mol CO₂ ซึ่งภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลาย (Q_{reg})

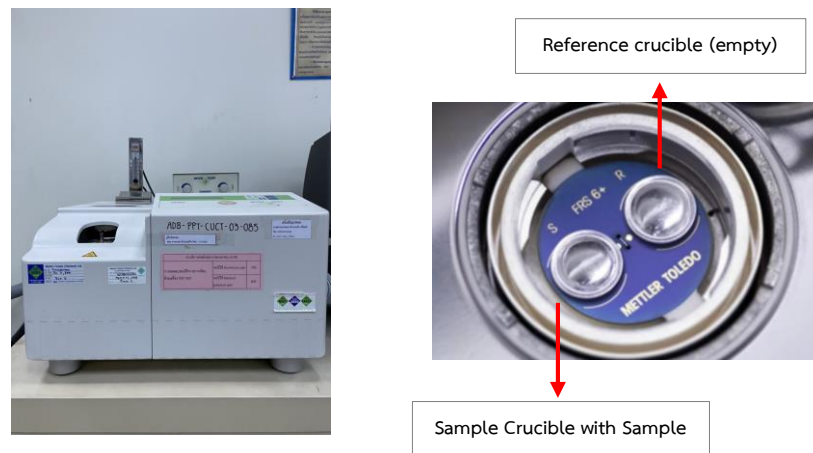
ประกอบด้วย 3 ส่วน ดังสมการ (2.13) ได้แก่ 1) ภาระทางความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาการคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ (Q_{des}) คำนวณมาจากสมการ (2.14) 2) ภาระทางความร้อนในการระเหยของน้ำ (Q_{vap}) คำนวณมาจากสมการ (2.15)–(2.17) และ 3) ภาระทางความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิ (Q_{sen}) คำนวณมาจากสมการ (2.18) [6, 31] และ ดำเนินการที่อุณหภูมิ 363 K ซึ่งเป็นอุณหภูมิของการฟื้นฟูตัวทำละลาย เครื่องมือที่ใช้วัดภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีน แสดงดังรูปที่ 3.3 [31] ในการทดลองดังกล่าว เครื่องกวนสารละลายชนิดให้ความร้อนพร้อมชุดควบคุมอุณหภูมิ (hotplate and magnetic stirrer) จะให้ความร้อนแก่อ่างน้ำมัน และ ตัวทำละลายเอมีนที่เติมไปด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (ซึ่งมีค่าเท่ากับ CO_2 loading ที่สมดุลของตัวทำละลายเอมีนที่ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 10 kPa และ อุณหภูมิ 313 K ในหัวข้อ 3.3.2) ปริมาตร 100 มิลลิลิตรถูกป้อนเข้าสู่เครื่องฟื้นฟูตัวทำละลาย ซึ่งเครื่องฟื้นฟูตัวทำละลายจุ่มอยู่ในอ่างน้ำมันที่อุณหภูมิ 363 K และ ความดันบรรยากาศ เทอร์มอมิเตอร์จะวัดอุณหภูมิของตัวทำละลายเอมีนที่อยู่ภายในเครื่องฟื้นฟูตัวทำละลาย ส่วนเครื่องควบแน่นที่ทางออกด้านบนของเครื่องฟื้นฟูตัวทำละลายทำหน้าที่นำของเหลวผลควบแน่น เช่น น้ำ และ เอมีนกลับสู่เครื่องฟื้นฟูตัวทำละลาย ซึ่งเป็นการคงความเข้มข้นของตัวทำละลายเอมีนให้คงตัวตลอดการทดลอง จากนั้น ทำการวัด CO_2 loading ของตัวทำละลายเอมีนที่เติมไปด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิการฟื้นฟูตัวทำละลาย 363 K ทุก ๆ 10 นาที (ทั้งหมด 80 นาที) จากเครื่องฟื้นฟูตัวทำละลาย โดยไทเทรตของเหลวตัวอย่างจากเครื่องฟื้นฟูตัวทำละลายกับสารละลายมาตรฐาน 1 M HCl ด้วย Chittick apparatus [35] ซึ่ง CO_2 loading ที่เวลา 80 นาที จะมีค่าน้อยกว่า CO_2 loading ที่เวลาเริ่มต้น (0 นาที) ดังนั้น ผลต่างของ CO_2 loading ที่เวลา 80 นาที กับเวลาเริ่มต้น จะใช้ในการคำนวณหาภาระทางความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิ (Q_{sen}) ดังสมการ (2.18)



รูปที่ 3.3 เครื่องมือวัดภาวะทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีน [31]

3.3.5 ความจุความร้อนของตัวทำละลายเอมีน

ความจุความร้อนของตัวทำละลายเอมีนเป็นหนึ่งในข้อมูลสำคัญที่นำมาคำนวณหาค่าภาวะทางความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิ หรือ Q_{sen} ดังสมการ (2.18) โดยความจุความร้อนจะใช้เครื่องวัดค่าพลังงานความร้อน (differential scanning calorimeter: DSC) (METTLER TOLEDO DSC-822e) มาทำการวิเคราะห์หาค่าความจุความร้อน เครื่องมือที่ใช้วัดความจุความร้อนของตัวทำละลายเอมีน แสดงดังรูปที่ 3.4 โดยใช้วิธีมาตรฐาน Cp by sapphire (DIN 51007) ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง คือ 293–363 K โดยค่าความจุความร้อนจะแสดงในหน่วยของ kJ/g·K จากนั้น นำมาคำนวณหาค่าภาวะทางความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิของตัวทำละลายเอมีน จาก 313 เป็น 363 K เพื่อยืนยันความแม่นยำและความเชื่อถือได้ของเครื่องมือและวิธีการวัดความจุความร้อน จึงทำการสอบเทียบด้วยน้ำและ MEA บริสุทธิ์ ผลการสอบเทียบ พบว่า ความจุความร้อนที่วัดได้มีความสอดคล้องกับข้อมูลวรรณกรรม โดยมีร้อยละความเบี่ยงเบนเฉลี่ยสัมบูรณ์ (%AADs) 6.15% และ 5.35% ตามลำดับ [36-38] จึงกล่าวได้ว่า เครื่องมือและวิธีการวัดความจุความร้อนของตัวทำละลายเอมีนที่ใช้มีความแม่นยำและเชื่อถือได้



รูปที่ 3.4 Differential Scanning Calorimeter (DSC) สำหรับวัดค่าความจุความร้อน
ของตัวทำละลายเอมีน [31, 38]



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

บทนี้แสดงผลการทดลองของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL โดยจะแบ่งผลการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ ความจุวนกลับ และ ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลาย

4.1 ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL

4.1.1 ตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ที่ความเข้มข้นรวม 30%wt.

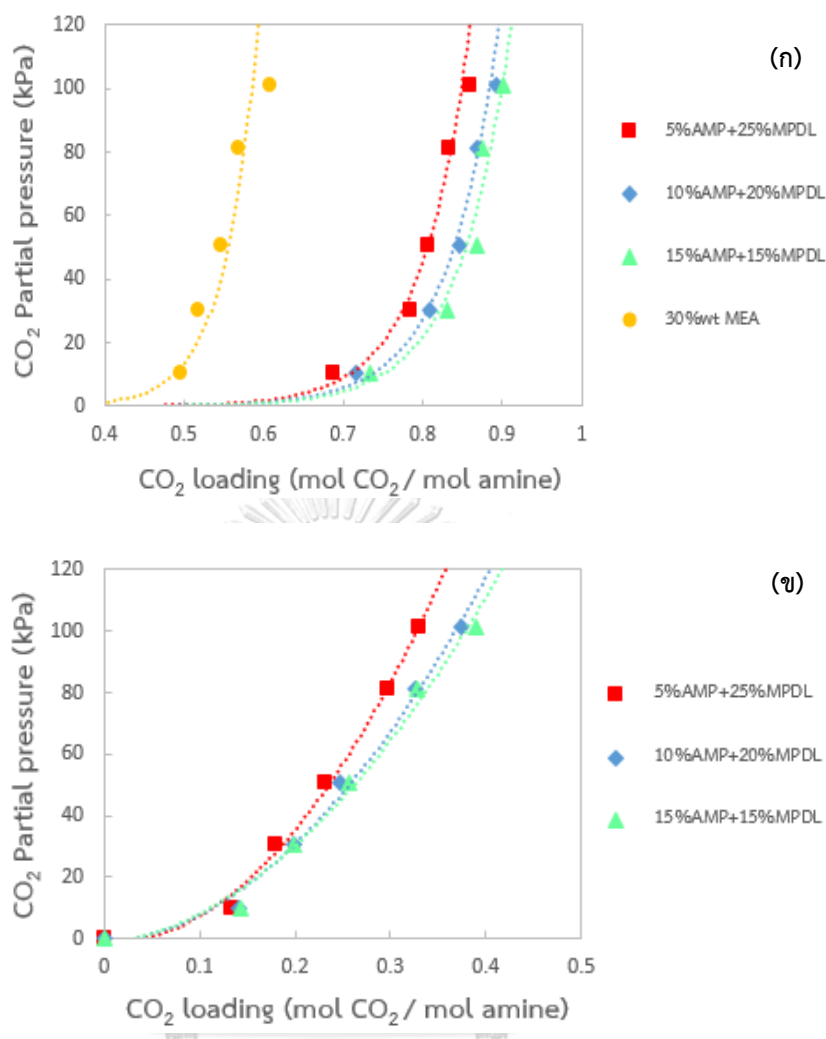
ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 5/25 10/20 และ 15/15 %wt. AMP/MPDL อุณหภูมิ 313 และ 363 K และ ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 10.1–101.3 kPa แสดงดังตาราง 4.1 และ รูปที่ 4.1 ผลการศึกษา พบว่า ความจุการดูดซึมของตัวทำละลาย AMP-MPDL เพิ่มขึ้นเมื่อความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น เพราะมีแรงขับของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์จากเฟสแก๊สเข้าสู่เฟสของเหลวมากขึ้น จึงส่งผลให้ความจุการดูดซึมสูงขึ้น นอกจากนี้ ยังพบว่า อุณหภูมิดำเนินการส่งผลต่อความจุการดูดซึมของตัวทำละลาย AMP-MPDL กล่าวคือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 313 K เป็น 363 K ความจุการดูดซึมลดลงอย่างมาก ดังแสดงในตาราง 4.1 และ รูปที่ 4.1(ก) และ 4.1(ข) ทั้งนี้ เนื่องจากปฏิกิริยาการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวทำละลายเอมีนเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนเมื่ออุณหภูมิดำเนินการสูงขึ้นเป็น 363 K ซึ่งเป็นภาวะดำเนินการของหอฟื้นฟูคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมในตัวทำละลายเอมีนจะเกิดการคายกลับ ส่งผลให้ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงอย่างมากที่อุณหภูมิดังกล่าว เมื่อพิจารณาผลของการเติม AMP ลงในตัวทำละลาย MPDL พบว่า ความจุการดูดซึมของตัวทำละลาย AMP-MPDL เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP เพิ่มขึ้น เพราะ AMP มีความจุการดูดซึมสูงกว่า MPDL จึงส่งผลให้สารละลายผสมมีความจุการดูดซึมเพิ่มขึ้น [8, 21] ทั้งที่อุณหภูมิ 313 และ 363 K และตลอดช่วงความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ศึกษา นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบตัวทำละลาย AMP-MPDL ทั้งสามอัตราส่วนความเข้มข้นกับตัวทำละลายดั้งเดิม 30%wt. MEA ที่อุณหภูมิ 313 K พบว่า ตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL มีความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA กว่า 39–60% ดังแสดงในรูปที่ 4.1(ก) นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบความจุการดูดซึมของตัวทำละลายทั้งสอง

ที่อุณหภูมิ 313 K และ ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 10.1 kPa (ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสม 10 %v/v) ซึ่งมีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ใกล้เคียงกับแก๊สปล่อยทิ้งจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล พบว่า ตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 5/25 10/20 และ 15/15 %wt. AMP/MPDL มีความจุการดูดซึมสูงกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม 30%wt. MEA กว่า 39 45 และ 48% ตามลำดับ จากผลการศึกษาข้างต้น จึงจัดลำดับความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลายได้ ดังนี้ 15/15 %wt. AMP/MPDL > 10/20 %wt. AMP/MPDL > 5/25 %wt. AMP/MPDL > 30 %wt. MEA



ตารางที่ 4.1 ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และความจุการดูดซับของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ความเข้มข้นรวม 30%wt. ที่อัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL ต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 313 และ 363 K

ความดันย่อย คาร์บอนไดออกไซด์ (kPa)	ความจุการดูดซับ (mol CO ₂ /mol amine)						ความจุกลับ (mol CO ₂ /L-amine solvent)			
	30 %wt. MEA	AMP			MPDL			AMP/MPDL		
		5/25 %wt. 313 K	10/20 %wt. 313 K	15/15 %wt. 313 K	5/25 %wt. 363 K	10/20 %wt. 363 K	15/15 %wt. 363 K	5/25 %wt.	10/20 %wt.	15/15 %wt.
10.1	0.496	0.688	0.134	0.717	0.141	0.733	0.143	1.500	1.628	1.738
30.4	0.518	0.785	0.179	0.810	0.198	0.831	0.199	1.641	1.724	1.861
50.7	0.547	0.807	0.231	0.847	0.247	0.869	0.256	1.560	1.696	1.805
81.1	0.569	0.833	0.298	0.868	0.326	0.876	0.327	1.449	1.532	1.617
101.3	0.608	0.859	0.330	0.893	0.375	0.901	0.389	1.433	1.464	1.508



รูปที่ 4.1 ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ความเข้มข้นรวม 30%wt. ที่อัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL และความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ต่าง ๆ

(ก) อุณหภูมิ 313 K และ (ข) อุณหภูมิ 363 K

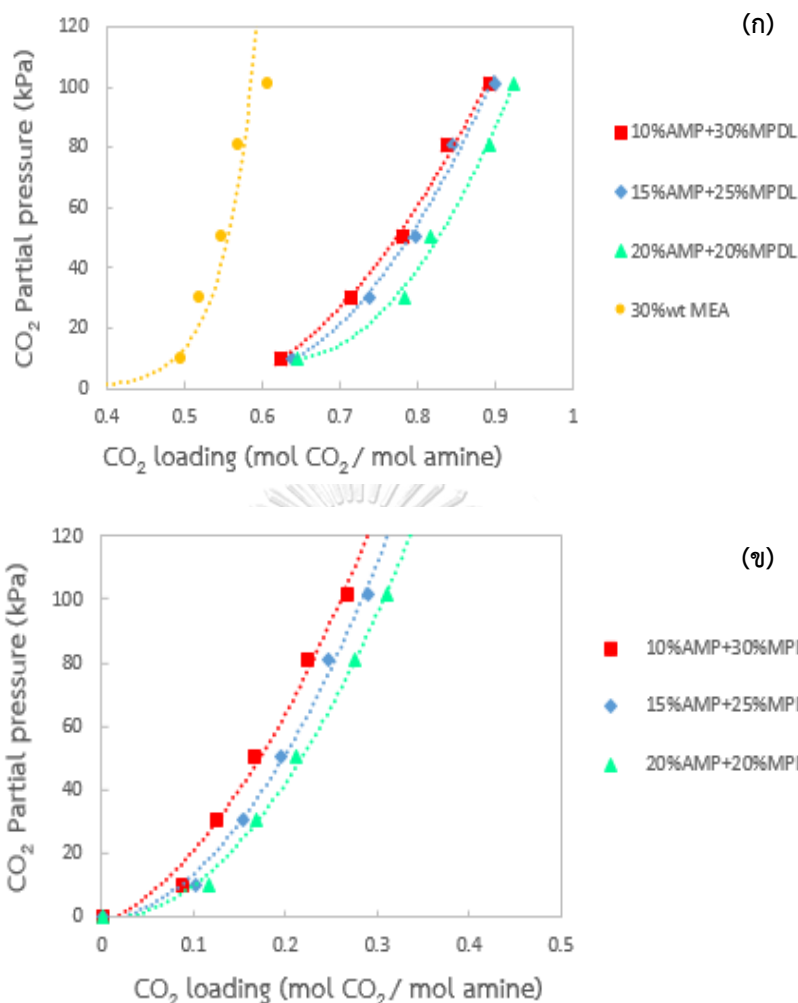
4.1.2 ตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ที่ความเข้มข้นรวม 40%wt.

ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 10/30 15/25 และ 20/20 %wt. AMP/MPDL อุณหภูมิ 313 และ 363 K และ ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 10.1–101.3 kPa แสดงดังตาราง 4.2 และ รูปที่ 4.2(ก) และ 4.2(ข) ผลการศึกษา พบว่า เมื่อพิจารณาผลของความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ และ อุณหภูมิดำเนินการ ที่ส่งผลต่อความจุการดูดซึมของตัวทำละลาย AMP-MPDL พารามิเตอร์ดำเนินการทั้งสองส่งผลในลักษณะเดียวกันกับที่ความเข้มข้นรวม 30%wt. AMP-MPDL นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาผลของการเติม AMP ลงในตัวทำละลาย

MPDL (มีอัตราส่วนความเข้มข้น AMP/MPDL แตกต่างจากที่ความเข้มข้นรวม 30%wt.) พบว่า การเพิ่มอัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP ส่งผลให้ความจุการดูดซึมของตัวทำละลาย AMP-MPDL เพิ่มขึ้น ในแนวโน้มเดียวกันกับที่ความเข้มข้นรวม 30%wt. ทั้งที่อุณหภูมิ 313 และ 363 K และตลอดช่วงความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ศึกษา นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบตัวทำละลาย AMP-MPDL ทั้งสามอัตราส่วนความเข้มข้นที่ความเข้มข้นรวม 40%wt. กับตัวทำละลายดั้งเดิม 30%wt. MEA ที่อุณหภูมิ 313 K พบว่า ตัวทำละลาย AMP-MPDL มีความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA กว่า 26–57% ดังแสดงในรูปที่ 4.2(ก) นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบความจุการดูดซึมของตัวทำละลายทั้งสองที่อุณหภูมิ 313 K และ ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 10.1 kPa พบว่า ตัวทำละลาย AMP-MPDL ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 10/30 15/25 และ 20/20 %wt. AMP/MPDL มีความจุการดูดซึมสูงกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม 30%wt. MEA กว่า 26 28 และ 30% ตามลำดับ จากผลการศึกษาข้างต้น จึงจัดลำดับความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลายได้ ดังนี้ 20/20 %wt. AMP/MPDL > 15/25 %wt. AMP/MPDL > 10/30 %wt. AMP/MPDL > 30 %wt. MEA

ตารางที่ 4.2 ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และความจุโมลกลับของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ความเข้มข้นรวม 40%wt. ที่อัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL ต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 313 และ 363 K

ความดันย่อย คาร์บอนไดออกไซด์ (kPa)	ความจุการดูดซับ (mol CO ₂ /mol amine)						ความจุกลับ (mol CO ₂ /L-amine solvent)			
	30 %wt. MEA	AMP/MPDL						AMP/MPDL		
		10/30 %wt.	15/25 %wt.		20/20 %wt.		10/30 %wt.	15/25 %wt.	20/20 %wt.	
10.1	313 K	363 K	313 K	363 K	313 K	363 K	10/30 %wt.	15/25 %wt.	20/20 %wt.	
30.4	0.496	0.087	0.637	0.103	0.646	0.117	1.975	2.026	2.068	
50.7	0.518	0.124	0.738	0.153	0.784	0.169	2.170	2.219	2.405	
81.1	0.547	0.167	0.797	0.194	0.816	0.211	2.258	2.288	2.366	
101.3	0.569	0.223	0.845	0.247	0.893	0.275	2.258	2.269	2.416	
	0.608	0.267	0.899	0.290	0.923	0.311	2.302	2.311	2.393	



รูปที่ 4.2 ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ความเข้มข้นรวม 40%wt. ที่อัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL และความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ต่าง ๆ

(ก) อุณหภูมิ 313 K และ (ข) อุณหภูมิ 363 K

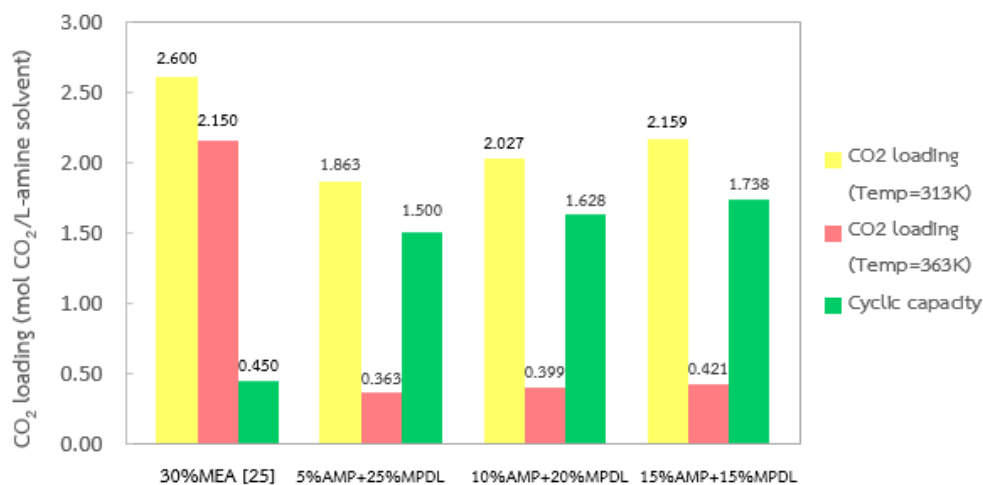
4.2 ความจุวนกลับของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL

4.2.1 ตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ที่ความเข้มข้นรวม 30%wt.

ความจุวนกลับของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 5/25 10/20 และ 15/15 %wt. AMP/MPDL และความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 10.1–101.3 kPa แสดงดังตาราง 4.1 ส่วนรูปที่ 4.3 แสดงความจุวนกลับของตัวทำละลาย AMP-MPDL ที่ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 10.1 kPa ซึ่งเห็นได้ว่า ความจุวนกลับคือ ผลต่างโมลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับต่อหน่วยปริมาตรของตัวทำละลายเอมีน

ระหว่างอุณหภูมิ 313 และ 363 K ทั้งนี้ ผลการศึกษา พบว่า ความจุวนกลับของตัวทำละลาย AMP-MPDL เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP เพิ่มขึ้นในทุกช่วงความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ ดังแสดงในตาราง 4.1 จากที่ทราบโดยทั่วไปว่า ตัวทำละลายที่ดีควรมีโมลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมในภาวะการฟื้นฟูต่ำ แต่เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP ในตัวทำละลาย AMP-MPDL สูงขึ้นพบว่า โมลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมต่อปริมาตรของตัวทำละลาย AMP-MPDL ที่ภาวะการฟื้นฟู (363 K) มีมากขึ้น (ดังแสดงในรูปที่ 4.3) จึงกล่าวได้ว่า การเพิ่มอัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP ไม่เอื้อต่อการฟื้นฟูตัวทำละลาย เนื่องจาก AMP ซึ่งเป็นเอมีนปฐมภูมิที่มีโครงสร้างกีดขวางเนื่องจากขนาด คีโนสภาพได้ยากกว่า MPDL ซึ่งเป็นเอมีนตติยภูมิ [8, 31] นอกจากนี้ ยังพบว่า โมลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมต่อปริมาตรของตัวทำละลาย AMP-MPDL ที่ภาวะการดูดซึม (313 K) เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP เพิ่มขึ้นอีกด้วย เพราะ AMP สามารถดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากกว่า MPDL [8, 31] เมื่อพิจารณาผลการทดลองจากรูปที่ 4.3 พบว่า เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP สูงขึ้น ส่วนเพิ่มของโมลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมต่อปริมาตรของตัวทำละลายที่ภาวะการดูดซึมมีค่ามากกว่าส่วนเพิ่มดังกล่าวที่ภาวะการฟื้นฟู ดังนั้น ความจุวนกลับของตัวทำละลาย AMP-MPDL จึงมากขึ้น เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP ในตัวทำละลายสูงขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความจุวนกลับนี้ เป็นผลดีต่อการคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ กล่าวคือ โมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดการคายกลับต่อหน่วยปริมาตรของตัวทำละลายสูงขึ้นนั่นเอง

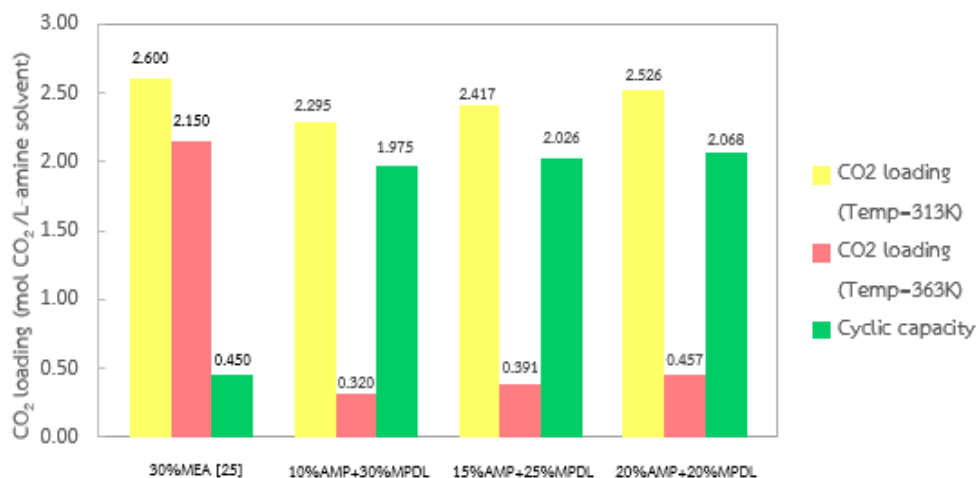
เนื่องจากความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 10.1 kPa สอดคล้องกับความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ของแก๊สปล่อยทิ้งจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล ที่เป็นแหล่งปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์หลักสู่บรรยากาศ งานวิจัยนี้จึงเปรียบเทียบความจุวนกลับของตัวทำละลาย AMP-MPDL ทั้งสามอัตราส่วนความเข้มข้นกับตัวทำละลายดั้งเดิม 30%wt. MEA ที่ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 10.1 kPa ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 5/25 10/20 และ 15/15 %wt. AMP/MPDL มีความจุวนกลับสูงกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม 30%wt. MEA กว่า 3.3 3.6 และ 3.9 เท่า ตามลำดับ จากผลการศึกษาข้างต้น จึงจัดลำดับความจุวนกลับของตัวทำละลายได้ ดังนี้ 15/15 %wt. AMP/MPDL > 10/20 %wt. AMP/MPDL > 5/25 %wt. AMP/MPDL > 30 %wt. MEA



รูปที่ 4.3 ความจุวนกลับของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP–MPDL ความเข้มข้นรวม 30%wt. ที่อัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL ต่าง ๆ และความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 10.1 kPa เปรียบเทียบกับตัวทำละลายดั้งเดิม MEA [15]

4.2.2 ตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP–MPDL ที่ความเข้มข้นรวม 40%wt.

ความจุวนกลับของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP–MPDL ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 10/30 15/25 และ 20/20 %wt. AMP/MPDL และความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 10.1–101.3 kPa แสดงดังตาราง 4.2 ส่วนรูปที่ 4.4 แสดงความจุวนกลับของตัวทำละลาย AMP–MPDL ที่ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 10.1 kPa ผลการศึกษา พบว่า เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP ที่ส่งผลต่อความจุวนกลับของตัวทำละลาย AMP–MPDL ความเข้มข้นรวม 40%wt. ในทุกช่วงความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลในแนวโน้มเดียวกันกับความเข้มข้นรวม 30%wt. AMP–MPDL นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบความจุวนกลับของตัวทำละลาย AMP–MPDL ทั้งสามอัตราส่วนความเข้มข้นกับตัวทำละลายดั้งเดิม 30%wt. MEA ที่ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 10.1 kPa ซึ่งสอดคล้องกับความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ของแก๊สปล่อยทิ้งจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล พบว่า ตัวทำละลาย AMP–MPDL ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 10/30 15/25 และ 20/20 %wt. AMP/MPDL มีความจุวนกลับสูงกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม 30%wt. MEA กว่า 4.4 4.5 และ 4.6 เท่า ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 จากผลการศึกษาข้างต้น จึงจัดลำดับความจุวนกลับของตัวทำละลายได้ ดังนี้ 20/20 %wt. AMP/MPDL > 15/25 %wt. AMP/MPDL > 10/30 %wt. AMP/MPDL > 30 %wt. MEA



รูปที่ 4.4 ความจุกลับของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ความเข้มข้นรวม 40%wt. ที่อัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL ต่าง ๆ และความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 10.1 kPa เปรียบเทียบกับตัวทำละลายดั้งเดิม MEA [15]

4.3 ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL

4.3.1 ตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ที่ความเข้มข้นรวม 30%wt.

ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 5/25 10/20 และ 15/15 %wt. AMP/MPDL และอุณหภูมิ 363 K เปรียบเทียบกับตัวทำละลายดั้งเดิม 30%wt. MEA แสดงดังรูปที่ 4.5 ผลการศึกษา พบว่า ภาระทางความร้อนที่ใช้ในปฏิบัติการคายกลับของคาร์บอนไดออกไซด์ (Q_{des}) ของตัวทำละลาย AMP-MPDL ต่ำกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA เพราะ ความร้อนที่ใช้ในปฏิบัติการคายกลับของคาร์บอนไดออกไซด์ของ (ΔH_{des}) MPDL น้อยกว่า AMP และ MEA ตามลำดับ [8] จึงส่งผลให้ตัวทำละลาย AMP-MPDL มีภาระทางความร้อนที่ใช้ในปฏิบัติการคายกลับของคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA ซึ่งสอดคล้องกับการคำนวณภาระทางความร้อนที่ใช้ในปฏิบัติการคายกลับของคาร์บอนไดออกไซด์ ตามสมการ (2.14) เมื่อพิจารณาผลของการเติม AMP ลงในตัวทำละลาย MPDL ดังรูปที่ 4.5 พบว่า ภาระทางความร้อนที่ใช้ในปฏิบัติการคายกลับของคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลาย AMP-MPDL เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับข้อเท็จจริงที่ว่า AMP ใช้ความร้อนในปฏิบัติการคายกลับของคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่า MPDL จึงส่งผลให้ตัวทำละลาย

AMP-MPDL มีภาระทางความร้อนที่ใช้ในปฏิบัติการคายกลับของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น [31]

สำหรับภาระทางความร้อนในการระเหยของน้ำ (Q_{vap}) พบว่า ตัวทำละลาย AMP-MPDL มีภาระทางความร้อนในการระเหยของน้ำมากกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA เพราะตัวทำละลาย AMP-MPDL มีสัดส่วนเชิงโมลของน้ำในตัวทำละลายผสมหลังการฟื้นฟูตัวทำละลาย ($x_{H_2O_lean}$) มากกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA ดังแสดงในตารางที่ 4.3 โดยสัดส่วนเชิงโมลของน้ำในตัวทำละลายผสมหลังการฟื้นฟูตัวทำละลายพิจารณาจากการไทเทรตหาความเข้มข้นของเอมีนในสารละลาย ซึ่งการคำนวณภาระทางความร้อนในการระเหยของน้ำจะพิจารณาจากอัตราส่วนเชิงโมลของความดันย่อยของไอน้ำ (P_{H_2O}) ต่อความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ (P_{CO_2}) ดังสมการ (2.15) ซึ่งความดันย่อยของทั้งไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์จะพิจารณาจากสัดส่วนเชิงโมลของน้ำในตัวทำละลายผสมหลังการฟื้นฟูตัวทำละลาย ดังสมการ (2.16) และ (2.17) ตามลำดับ ดังนั้น ภาระทางความร้อนในการระเหยของน้ำจึงขึ้นอยู่กับสัดส่วนเชิงโมลของน้ำในตัวทำละลายผสมหลังการฟื้นฟูตัวทำละลาย ทั้งนี้ เมื่อสัดส่วนเชิงโมลของน้ำในตัวทำละลายผสมหลังการฟื้นฟูตัวทำละลายของตัวทำละลาย AMP-MPDL มากกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA จะทำให้ความดันย่อยของไอน้ำในเฟสแก๊สของตัวทำละลาย AMP-MPDL มากกว่าความดันย่อยของไอน้ำของตัวทำละลายดั้งเดิม MEA จึงส่งผลให้เกิดการระเหยของน้ำมากกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA [31] เมื่อพิจารณาผลของการเติม AMP ลงในตัวทำละลาย MPDL ดังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่า ภาระทางความร้อนในการระเหยของน้ำของตัวทำละลาย AMP-MPDL เท่ากันทั้งสามอัตราส่วนความเข้มข้น เนื่องจากสัดส่วนเชิงโมลของน้ำในตัวทำละลายผสมหลังการฟื้นฟูตัวทำละลายทั้งสามอัตราส่วนความเข้มข้นแตกต่างกันน้อยมาก ดังแสดงในตารางที่ 4.3 จึงส่งผลให้ความดันย่อยของไอน้ำมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้น ภาระทางความร้อนในการระเหยของน้ำจึงเท่ากันทั้งสามอัตราส่วนความเข้มข้น

นอกจากนี้ รูปที่ 4.5 ยังแสดงให้เห็นว่า ภาระทางความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิ (Q_{sen}) ของตัวทำละลาย AMP-MPDL ต่ำกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA เพราะตัวทำละลาย AMP-MPDL มีความจุความร้อนต่ำกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA ดังแสดงในตาราง 4.4 นอกจากนี้ ตัวทำละลาย AMP-MPDL ยังมีความจุความร้อนกลับสูงกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA ดังแสดงในตาราง 4.1 และ รูปที่ 4.3 ซึ่งการคำนวณหาภาระทางความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิพิจารณาจากค่าความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิต่อโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายกลับจากการฟื้นฟูของตัวทำละลาย ดังสมการ (2.18) จากผลการทดลอง

พบว่า ตัวทำละลาย AMP-MPDL มีความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิต่ำกว่าและโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายกลับจากการฟื้นฟูของตัวทำละลายสูงกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA ดังแสดงในตาราง 4.3 จึงทำให้อัตราส่วนของความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิต่อโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายกลับจากการฟื้นฟูของตัวทำละลาย AMP-MPDL น้อยกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA ซึ่งส่งผลให้ภาระทางความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิของตัวทำละลาย AMP-MPDL ต่ำกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาผลของการเติม AMP ลงในตัวทำละลาย MPDL พบว่า เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP เพิ่มขึ้น ภาระทางความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิของตัวทำละลาย AMP-MPDL ลดลง แต่ความจุความร้อนของตัวทำละลาย AMP-MPDL จะสูงขึ้น ดังแสดงในตาราง 4.4 จากผลการทดลองส่วนของความจุความร้อน ดังแสดงในตาราง 4.1 และ รูปที่ 4.3 พบว่า เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP สูงขึ้น โมลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับต่อปริมาตรของตัวทำละลาย AMP-MPDL ที่ภาวะการดูดซับ (313 K) และ ภาวะการฟื้นฟู (363 K) เพิ่มขึ้น จึงทำให้ความจุความร้อนของตัวทำละลาย AMP-MPDL สูงขึ้นจาก 1.500 เป็น 1.738 mol CO₂/L-amine solvent เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจาก 5/25 เป็น 15/15 %wt. AMP/MPDL ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความจุความร้อน แสดงให้เห็นว่า โมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดการคายกลับต่อหน่วยปริมาตรของตัวทำละลายสูงขึ้น จากสมการ (2.18) ภาระทางความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิพิจารณาจากอัตราส่วนของความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิต่อโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายกลับจากการฟื้นฟูของตัวทำละลาย AMP-MPDL ซึ่งความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิ แสดงในตาราง 4.3 พบว่า ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 5/25 มีความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิน้อยกว่า 10/20 และ 15/15 %wt. AMP/MPDL ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับความจุความร้อนที่สูงขึ้น เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP เพิ่มขึ้น แต่โมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายกลับจากการฟื้นฟูของตัวทำละลาย AMP-MPDL ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 15/15 มีค่ามากกว่า 10/20 และ 5/25 ดังแสดงในตาราง 4.3 โดยการเพิ่มขึ้นของ AMP ทำให้โมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายกลับจากการฟื้นฟูตัวทำละลายเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับความจุความร้อนที่เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP เพิ่มขึ้น ดังนั้น จากการคำนวณดังสมการ (2.18) พบว่า ภาระทางความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิของตัวทำละลาย AMP-MPDL ลดลง เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.5

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบตัวทำละลาย AMP-MPDL ทั้งสามอัตราส่วนความเข้มข้นกับตัวทำละลายดั้งเดิม MEA พบว่า ตัวทำละลาย AMP-MPDL มีภาระ

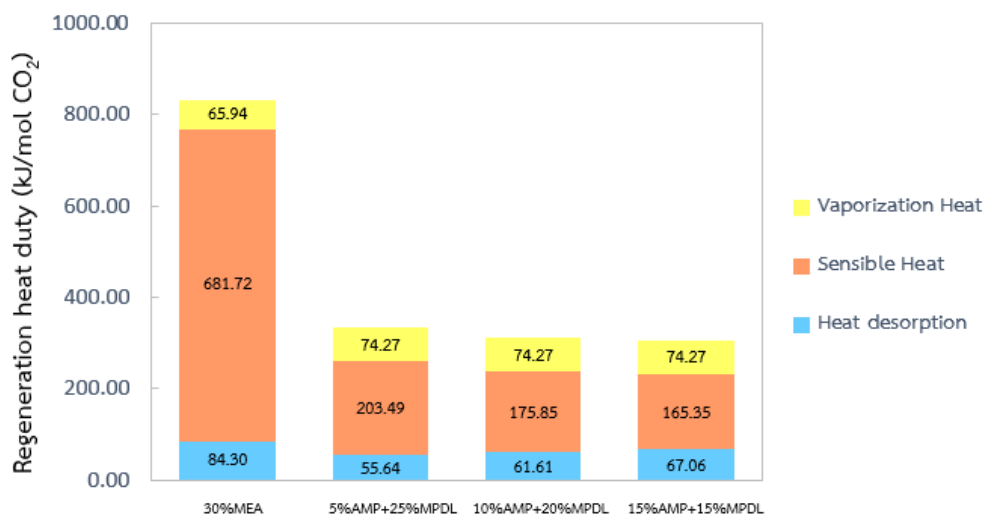
ทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายต่ำกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA กว่า 60–63% ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และ ตาราง 4.5 จากผลการศึกษาดังกล่าว จึงจัดลำดับภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายได้ ดังนี้ 30 %wt. MEA > 5/25 %wt. AMP/MPDL > 10/20 %wt. AMP/MPDL > 15/15 %wt. AMP/MPDL ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าการเติม AMP ลงในตัวทำละลาย MPDL ส่งผลให้ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งภาระทางความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิ

ตารางที่ 4.3 สัดส่วนเชิงโมลของน้ำในตัวทำละลายผสมหลังการฟื้นฟู ความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิ และโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายกลับจากการฟื้นฟูของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP–MPDL ความเข้มข้นรวม 30 และ 40%wt. ที่อัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL ต่าง ๆ เปรียบเทียบกับตัวทำละลายดั้งเดิม MEA

อัตราส่วนความเข้มข้น	สัดส่วนเชิงโมลของน้ำ	ความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิ (kJ)	โมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายกลับจากการฟื้นฟู (mol CO ₂)
30 %wt. MEA	0.886	19.77	0.029
5/25 %wt. AMP/MPDL	0.931	17.15	0.084
10/20 %wt. AMP/MPDL	0.929	17.30	0.098
15/15 %wt. AMP/MPDL	0.927	17.53	0.106
10/30 %wt. AMP/MPDL	0.903	16.58	0.111
15/25 %wt. AMP/MPDL	0.892	17.33	0.121
20/20 %wt. AMP/MPDL	0.890	17.54	0.128

ตารางที่ 4.4 ความจุความร้อนของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ความเข้มข้นรวม 30 และ 40%wt. ที่อัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL และอุณหภูมิต่าง ๆ เปรียบเทียบกับตัวทำละลายดั้งเดิม MEA

อุณหภูมิ (°C)	ความจุความร้อน (J/g°C)						
	30 %wt. MEA	AMP/MPDL					
		5/25 %wt.	10/20 %wt.	15/15 %wt.	10/30 %wt.	15/25 %wt.	20/20 %wt.
25	3.605	3.261	3.410	3.476	3.307	3.349	3.399
30	3.697	3.303	3.419	3.490	3.314	3.387	3.411
35	3.757	3.336	3.432	3.502	3.323	3.411	3.427
40	3.805	3.367	3.444	3.509	3.326	3.434	3.451
45	3.842	3.402	3.455	3.515	3.331	3.451	3.480
50	3.871	3.417	3.463	3.517	3.337	3.465	3.510
55	3.909	3.422	3.478	3.524	3.342	3.482	3.525
60	3.943	3.469	3.498	3.528	3.348	3.499	3.548
65	3.920	3.472	3.507	3.535	3.353	3.526	3.570
70	3.936	3.483	3.517	3.541	3.357	3.547	3.593
75	3.951	3.492	3.533	3.548	3.362	3.567	3.615
80	3.967	3.496	3.548	3.556	3.366	3.587	3.638
85	3.982	3.534	3.563	3.564	3.370	3.602	3.660
90	3.998	3.553	3.568	3.572	3.374	3.620	3.683



รูปที่ 4.5 ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ความเข้มข้นรวม 30%wt. ที่อัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL ต่าง ๆ เปรียบเทียบกับตัวทำละลายดั้งเดิม MEA

ตารางที่ 4.5 ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ความเข้มข้นรวม 30 และ 40%wt. ที่อัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL ต่าง ๆ เปรียบเทียบกับตัวทำละลายดั้งเดิม MEA

อัตราส่วนความเข้มข้น	ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลาย (kJ/mol CO ₂)
30 %wt. MEA	831.96
5/25 %wt. AMP/MPDL	333.40
10/20 %wt. AMP/MPDL	311.73
15/15 %wt. AMP/MPDL	306.68
10/30 %wt. AMP/MPDL	276.47
15/25 %wt. AMP/MPDL	272.53
20/20 %wt. AMP/MPDL	269.77

4.3.2 ตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ที่ความเข้มข้นรวม 40%wt.

ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 10/30 15/25 และ 20/20 %wt. AMP/MPDL และอุณหภูมิ 363 K

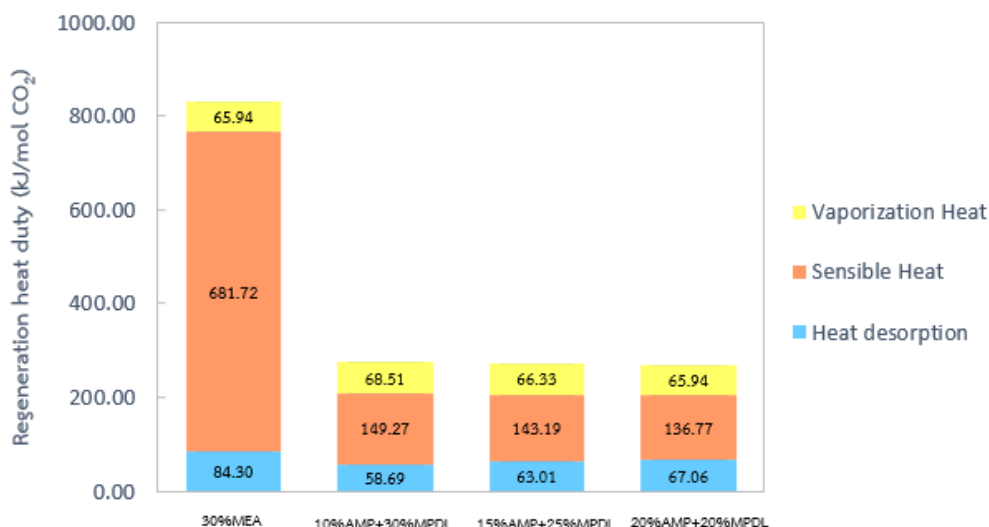
เปรียบเทียบกับตัวทำละลายดั้งเดิม 30%wt. MEA แสดงดังรูปที่ 4.6 ผลการศึกษา พบว่า ภาระทางความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาการคายกลับของคาร์บอนไดออกไซด์ (Q_{des}) ของตัวทำละลาย AMP-MPDL ต่ำกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาผลของการเติม AMP ลงในตัวทำละลาย MPDL ดังรูปที่ 4.6 พบว่า ภาระทางความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาการคายกลับของคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลาย AMP-MPDL ความเข้มข้นรวม 40%wt. เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP เพิ่มขึ้นในแนวโน้มเดียวกับที่ความเข้มข้นรวม 30%wt. แม้ว่าอัตราส่วนความเข้มข้น AMP/MPDL จะแตกต่างจากที่ความเข้มข้นรวม 30%wt.

สำหรับภาระทางความร้อนในการระเหยของน้ำ (Q_{vap}) พบว่า ภาระทางความร้อนในการระเหยของน้ำของตัวทำละลาย AMP-MPDL มากกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA เพราะตัวทำละลาย AMP-MPDL ความเข้มข้นรวม 40%wt. มีสัดส่วนเชิงโมลของน้ำในตัวทำละลายผสมหลังการฟื้นฟูตัวทำละลาย ($x_{H_2O_lean}$) มากกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA ดังแสดงในตารางที่ 4.3 จึงทำให้เกิดการระเหยของน้ำมากกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA ซึ่งส่งผลในแนวโน้มเดียวกับที่ความเข้มข้นรวม 30%wt. เมื่อพิจารณาผลของการเติม AMP ลงในตัวทำละลาย MPDL ดังแสดงในรูปที่ 4.6 พบว่า ภาระทางความร้อนในการระเหยของน้ำของตัวทำละลาย AMP-MPDL ความเข้มข้นรวม 40%wt. ลดลง เพราะสัดส่วนเชิงโมลของน้ำในตัวทำละลายผสมหลังการฟื้นฟูตัวทำละลายของตัวทำละลาย AMP-MPDL ลดลง ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ทำให้ความดันย่อยของไอน้ำในเฟสแก๊สของตัวทำละลายผสมต่ำลง จึงส่งผลให้ภาระทางความร้อนในการระเหยของน้ำลดลง เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP เพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ รูปที่ 4.6 ยังแสดงให้เห็นว่า ภาระทางความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิ (Q_{sen}) ของตัวทำละลาย AMP-MPDL ความเข้มข้นรวม 40%wt. ต่ำกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA เพราะความจุความร้อนของตัวทำละลาย AMP-MPDL ต่ำกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA ดังแสดงในตาราง 4.4 นอกจากนี้ ความจวนกลับของตัวทำละลาย AMP-MPDL ความเข้มข้นรวม 40%wt. สูงกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA ดังแสดงในตาราง 4.2 และ รูปที่ 4.4 จากการคำนวณหาภาระทางความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิ ดังสมการ (2.18) พบว่า ความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิ และ โมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายกลับจากการฟื้นฟูของตัวทำละลาย AMP-MPDL ความเข้มข้นรวม 40%wt. ส่งผลในแนวโน้มเดียวกับที่ความเข้มข้นรวม 30%wt. ดังแสดงในตาราง 4.3 ทำให้ภาระทางความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิของตัวทำละลาย AMP-MPDL ความเข้มข้นรวม 40%wt. ต่ำกว่า

ตัวทำละลายดั้งเดิม MEA นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาผลของการเติม AMP ลงในตัวทำละลาย MPDL พบว่า เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP เพิ่มขึ้น ภาระทางความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิของตัวทำละลาย AMP-MPDL ความเข้มข้นรวม 40%wt. ลดลง แต่ตัวทำละลาย AMP-MPDL ความเข้มข้นรวม 40%wt. มีความจุความร้อนเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตาราง 4.4 ในส่วนของความจุวนกลับ ดังแสดงในตาราง 4.2 และ รูปที่ 4.4 พบว่า เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจาก 10/30 เป็น 20/20 %wt. AMP/MPDL ความจุวนกลับของตัวทำละลายผสมสูงขึ้นจาก 1.975 เป็น 2.068 mol CO₂/L-amine solvent ดังแสดงในรูปที่ 4.4 จากการคำนวณโดยใช้สมการ (2.18) พบว่า ความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิ และ โมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายกลับจากการฟื้นฟูของตัวทำละลาย AMP-MPDL ดังแสดงในตาราง 4.3 มีแนวโน้มเดียวกันกับที่ความเข้มข้นรวม 30%wt. จากรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าภาระทางความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิของตัวทำละลาย AMP-MPDL ความเข้มข้นรวม 40%wt. ลดลง เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP เพิ่มขึ้น ดังนั้น ภาระทางความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิของตัวทำละลายผสมจะมีแนวโน้มเดียวกันกับที่ความเข้มข้นรวม 30%wt.

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูของตัวทำละลาย AMP-MPDL ความเข้มข้นรวม 40%wt. ทั้งสามอัตราส่วนความเข้มข้นกับตัวทำละลายดั้งเดิม 30%wt. MEA พบว่า ตัวทำละลาย AMP-MPDL ความเข้มข้นรวม 40%wt. มีภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายต่ำกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA กว่า 67-68% ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และ ตาราง 4.5 จากผลการศึกษาดังกล่าว จึงจัดลำดับภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายได้ ดังนี้ 30%wt. MEA > 10/30 %wt. AMP/MPDL > 15/25 %wt. AMP/MPDL > 20/20 %wt. AMP/MPDL ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายลดลง เมื่อเติม AMP ลงในตัวทำละลาย MPDL มากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งภาระทางความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิ ซึ่งสอดคล้องอย่างยิ่งกับผลการทดลองการฟื้นฟูของตัวทำละลาย AMP-MPDL ความเข้มข้นรวม 30%wt.



รูปที่ 4.6 ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP–MPDL ความเข้มข้นรวม 40%wt. ที่อัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL ต่าง ๆ เปรียบเทียบกับตัวทำละลายดั้งเดิม MEA

จากผลการทดลอง เมื่อทำการเปรียบเทียบความจุการดูดซึมที่อุณหภูมิ 313 K และ 363 K ความจุวนกลับ และ ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูของตัวทำละลาย AMP–MPDL ที่ความเข้มข้นรวม 30%wt. และ 40%wt. ดังแสดงในรูปที่ 4.7 เห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเอมีนรวมจาก 30%wt. เป็น 40%wt. พบว่า ความจุการดูดซึมที่อุณหภูมิ 313 K และ 363 K มีค่าลดลง เนื่องจาก ความจุการดูดซึมพิจารณาจากอัตราส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมต่อเอมีน (mol CO₂/mol amine) เมื่อตัวทำละลาย AMP–MPDL มีความเข้มข้นโดยรวมสูงขึ้น กล่าวคือ ตัวทำละลายผสมมีจำนวนโมลของเอมีนที่สามารถดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ได้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีโมลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมด้วยสารละลายเอมีนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม ความจุการดูดซึมถูกจำกัดความเป็นโมลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมต่อโมลเอมีนในสารละลาย ถึงแม้โมลคาร์บอนไดออกไซด์จะสูงขึ้น เมื่อความเข้มข้นรวมของเอมีนในสารละลายมากขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของโมลคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าการเพิ่มของโมลเอมีนมากเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเอมีนรวมจาก 30%wt. เป็น 40%wt. ดังนั้น สัดส่วนระหว่างโมลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมต่อโมลเอมีนในสารละลาย หรือ ความจุการดูดซึม จึงลดลงเมื่อความเข้มข้นรวมของเอมีนเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งแนวโน้มการลดลงของความจุการดูดซึม เมื่อความเข้มข้นเอมีนรวมเพิ่มขึ้นนั้น สอดคล้องกับผลการศึกษาในงานวิจัยอื่น ๆ [8, 21] นอกจากนี้ ยังพบว่า ความจุวนกลับของตัวทำละลาย AMP–MPDL สูงขึ้น เมื่อความเข้มข้นโดยรวมเพิ่มจาก 30%wt. เป็น 40%wt. ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ถึงแม้ว่า ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลาย AMP–MPDL

ที่ความเข้มข้นรวม 30%wt. จะมากกว่าที่ความเข้มข้นรวม 40%wt. ทั้งในภาวะการดูดซึมและภาวะการฟื้นฟู แต่พบว่า ความแตกต่างระหว่างความจุการดูดซึมที่ภาวะการดูดซึมและภาวะการฟื้นฟูของตัวทำละลายเอมีนความเข้มข้นรวม 40%wt. มากกว่าตัวทำละลายเอมีนความเข้มข้นรวม 30%wt. ซึ่งส่งผลให้ผลต่างโมลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมต่อหน่วยปริมาตรของตัวทำละลายเอมีนระหว่างอุณหภูมิ 313 และ 363 K เพิ่มขึ้น กล่าวคือ ความจุกลับมากขึ้นนั่นเอง ดังนั้น ความจุกลับของตัวทำละลาย AMP-MPDL ที่ความเข้มข้นรวม 40%wt. จึงมากกว่าที่ความเข้มข้นรวม 30%wt.

รูปที่ 4.7 ยังแสดงให้เห็นว่า ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลาย AMP-MPDL ลดลง เมื่อความเข้มข้นโดยรวมเพิ่มขึ้นจาก 30%wt. เป็น 40%wt. ทั้งนี้ ภาระทางความร้อนที่ใช้ในการฟื้นฟูตัวทำละลาย ประกอบด้วย 3 ความร้อนองค์ประกอบ ได้แก่ ภาระทางความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาการคายกลับของคาร์บอนไดออกไซด์ ภาระทางความร้อนในการระเหยของน้ำ และภาระทางความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิ ดังสมการ (2.13) ผลการศึกษา พบว่า ภาระทางความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาการคายกลับของคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลาย AMP-MPDL ที่ความเข้มข้นรวม 30%wt. มีค่าต่ำกว่าที่ความเข้มข้นรวม 40%wt. เล็กน้อย ดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ เนื่องจาก เมื่อความเข้มข้นเอมีนรวมในตัวทำละลายผสมมากขึ้น ความร้อนที่ต้องใช้สำหรับปฏิกิริยาการคายกลับจึงมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น จึงพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเอมีนรวมจาก 30%wt. เป็น 40%wt. ภาระทางความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาการคายกลับของคาร์บอนไดออกไซด์จึงเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากมีส่วนเพิ่มของความเข้มข้นของเอมีนไม่มาก จึงพบว่า ภาระทางความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาการคายกลับของคาร์บอนไดออกไซด์จึงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.7

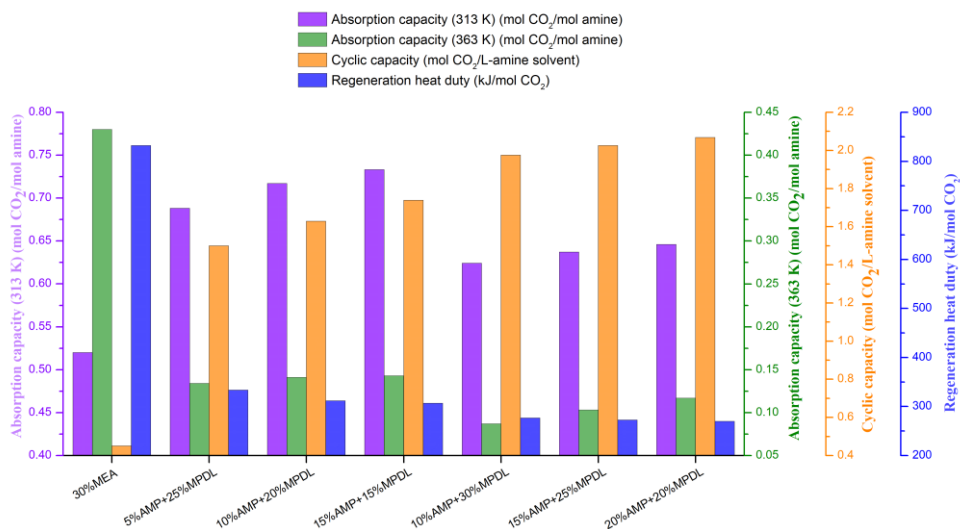
สำหรับภาระทางความร้อนในการระเหยของน้ำ พบว่า ตัวทำละลาย AMP-MPDL ที่ความเข้มข้นรวม 30%wt. มีภาระทางความร้อนในการระเหยของน้ำสูงกว่าที่ความเข้มข้นรวม 40%wt. ดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ เพราะสัดส่วนเชิงโมลของน้ำในตัวทำละลายผสมหลังการฟื้นฟูตัวทำละลายที่ความเข้มข้นรวม 40%wt. ลดลง ดังแสดงในตารางที่ 4.3 เนื่องจากในตัวทำละลายผสมมีความเข้มข้นของเอมีนรวมมากขึ้น ทำให้ความดันย่อยของไอน้ำในเฟสแก๊สของตัวทำละลาย AMP-MPDL ที่ความเข้มข้นรวม 40%wt. น้อยกว่าความดันย่อยของไอน้ำของตัวทำละลาย AMP-MPDL ที่ความเข้มข้นรวม 30%wt. จึงส่งผลให้ที่ความเข้มข้นรวม 40%wt. เกิดการระเหยของน้ำน้อยกว่าที่ความเข้มข้นรวม 30%wt. ดังนั้น ภาระทางความร้อนในการระเหยของน้ำที่ความเข้มข้นรวม 30%wt. จึงมีค่ามากกว่าที่ความเข้มข้นรวม 40%wt.

สำหรับภาระทางความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิ พบว่า เมื่อความเข้มข้นเอมีนรวมเพิ่มขึ้นจาก 30%wt. เป็น 40%wt. ความจุความร้อนของตัวทำละลาย AMP-MPDL ลดลง ดังแสดงใน

ตาราง 4.4 และ ความจุวนกลับของตัวทำละลาย AMP-MPDL จะเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ดังนั้น ภาระทางความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิของตัวทำละลาย AMP-MPDL จึงลดลง เมื่อความเข้มข้นเอมีนรวมเพิ่มขึ้นจาก 30%wt. เป็น 40%wt. ดังรูปที่ 4.5 และ 4.6

เมื่อพิจารณาความร้อนองค์ประกอบทั้งสาม พบว่า ตัวทำละลาย AMP-MPDL ที่ความเข้มข้นรวม 40%wt. มีภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายน้อยกว่าที่ความเข้มข้นรวม 30%wt. ดังแสดงในตาราง 4.5 และ รูปที่ 4.7 อย่างไรก็ตาม ภาระทางความร้อนที่ใช้ในปฏิบัติการคายกลับของคาร์บอนไดออกไซด์ และ ภาระทางความร้อนในการระเหยของน้ำ สำหรับความเข้มข้นรวม 30%wt. และ 40%wt. มีค่าไม่ต่างกันมากนัก และความร้อนองค์ประกอบทั้งสองมีส่วนร่วมต่อภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายน้อยกว่าภาระทางความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.6 ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า ภาระทางความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิมิมีส่วนสำคัญต่อภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลาย การเลือกใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเอมีนในเชิงภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายควรพิจารณาจากตัวทำละลายที่มีภาระทางความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิต่ำก่อน

ทั้งนี้ จากผลการทดลองข้างต้น เมื่อพิจารณาศักยภาพของตัวทำละลาย AMP-MPDL ในเชิงความจุการดูดซึม ความจุวนกลับ และ ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลาย พบว่า ตัวทำละลาย AMP-MPDL มีศักยภาพสูง สำหรับใช้ทดแทนตัวทำละลายดั้งเดิม MEA เพื่อดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ ดังรูปที่ 4.7 โดยตัวทำละลาย AMP-MPDL มีความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 313 K และความจุวนกลับสูงกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA นอกจากนี้ ตัวทำละลาย AMP-MPDL ยังมีภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายต่ำกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA มาก เมื่อพิจารณาตัวทำละลาย AMP-MPDL ที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ ได้แก่ 5/25 10/20 15/15 10/30 15/25 และ 20/20 %wt. AMP/MPDL พบว่า การเติม AMP ลงในตัวทำละลาย MPDL และ การเพิ่มความเข้มข้นรวมของตัวทำละลาย AMP-MPDL ทำให้ศักยภาพโดยรวมของตัวทำละลายผสมดีขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.7 ดังนั้น เมื่อพิจารณาตัวชี้บอสมรรถนะที่ส่งผลต่อความจุการดูดซึม ความจุวนกลับ และ ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลาย พบว่า 20/20 %wt. AMP/MPDL เป็นอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดจากทั้งหมดอัตราส่วนความเข้มข้นที่ศึกษา ซึ่งตัวทำละลาย 20/20 %wt. AMP/MPDL มีความจุการดูดซึมและความจุวนกลับสูงกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA กว่า 30% และ 4.6 เท่า ตามลำดับ และ มีภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายต่ำกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA กว่า 68%



รูปที่ 4.7 ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 313 K และ 363 K ความจุวนกลับ และ ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ที่ความเข้มข้นรวม 30 และ 40%wt. ที่อัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL ต่าง ๆ เปรียบเทียบกับตัวทำละลายดั้งเดิม MEA

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP–MPDL ในเชิงความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ ความจุวนกลับ และ ภาระทางความร้อน ในการฟื้นฟูตัวทำละลาย ความเข้มข้นรวม 30%wt. ของสารละลายในน้ำ ที่อัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL 5/25 10/20 และ 15/15 %wt. AMP/MPDL และ ความเข้มข้นรวม 40%wt. ของสารละลายในน้ำ ที่อัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL 10/30 15/25 และ 20/20 %wt. AMP/MPDL โดยความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์และความจุวนกลับของตัวทำละลายเอมีน ดำเนินการที่อุณหภูมิ 313 และ 363 K ซึ่งเป็นอุณหภูมิทั่วไปของหอดูดซึมและหอฟื้นฟู ตามลำดับ และความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 10.1–101.3 kPa ซึ่งความจุการดูดซึมพิจารณาจากอัตราส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมต่อเอมีน ($\text{mol CO}_2/\text{mol amine}$) ส่วนความจุวนกลับพิจารณาจากผลต่างโมลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมต่อหน่วยปริมาตรของตัวทำละลายเอมีนระหว่างอุณหภูมิ 313 และ 363 K ($\text{mol CO}_2/\text{L-amine solvent}$) ในส่วนของภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลาย ดำเนินการที่อุณหภูมิ 363 K ซึ่งเป็นอุณหภูมิของการฟื้นฟูตัวทำละลาย โดยภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายพิจารณาจากค่าความร้อนที่ใช้ในการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ต่อ 1 โมล ในกระบวนการฟื้นฟูตัวทำละลาย (kJ/mol CO_2) จากผลการศึกษสามารถสรุปผลได้ดังนี้

การศึกษาความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP–MPDL พบว่า ความจุการดูดซึมของตัวทำละลาย AMP–MPDL เพิ่มขึ้น เมื่อความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นในช่วง 10.1–101.3 kPa และ เมื่ออุณหภูมิดำเนินการลดลงจาก 363 K เป็น 313 K นอกจากนี้ ยังพบว่า ความจุการดูดซึมของตัวทำละลาย AMP–MPDL เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP ในตัวทำละลายเพิ่มขึ้น ทั้งที่อุณหภูมิ 313 และ 363 K และตลอดช่วงความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ศึกษา นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบความจุการดูดซึมของตัวทำละลาย AMP–MPDL ที่อุณหภูมิ 313 K และ ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 10.1 kPa พบว่า ตัวทำละลาย AMP–MPDL ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 5/25 10/20 15/15 10/30 15/25 และ 20/20 %wt. AMP/MPDL มีความจุการดูดซึมสูงกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม 30 %wt. MEA กว่า 39 45 48 26 28 และ 30% ตามลำดับ

การศึกษาความจุณกลับของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL พบว่า ความจุณกลับของตัวทำละลาย AMP-MPDL เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP เพิ่มขึ้น ในทุกช่วงความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ศึกษา ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบความจุณกลับของตัวทำละลาย AMP-MPDL ที่ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 10.1 kPa พบว่า ตัวทำละลาย AMP-MPDL ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 5/25 10/20 15/15 10/30 15/25 และ 20/20 %wt. AMP/MPDL มีความจุณกลับสูงกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม 30 %wt. MEA กว่า 3.3 3.6 3.9 4.4 4.5 และ 4.6 เท่าตามลำดับ

การศึกษาภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL พบว่า ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูของตัวทำละลาย AMP-MPDL ลดลงเมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP ในตัวทำละลายเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบตัวทำละลาย AMP-MPDL ทั้งหกอัตราส่วนความเข้มข้นกับตัวทำละลายดั้งเดิม MEA พบว่า ตัวทำละลาย AMP-MPDL ที่ความเข้มข้นรวม 30%wt. และ 40%wt. มีภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายต่ำกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA กว่า 60-63% และ 67-68% ตามลำดับ

ทั้งนี้ ตัวทำละลาย AMP-MPDL ความเข้มข้น 20/20 %wt. AMP/MPDL มีศักยภาพในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในเชิงความจุการดูดซึม ความจุณกลับ และ ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลาย ดีที่สุดจากทั้งหกอัตราส่วนความเข้มข้นที่ศึกษา นอกจากนี้ ยังพบว่า ตัวทำละลายชนิดใหม่ 20/20 %wt. AMP/MPDL มีความจุการดูดซึม ความจุณกลับ และ ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายสูงกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม 30%wt. MEA กว่า 30% 4.6 เท่า และ 68% ตามลำดับ ทั้งนี้ ภาระทางความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิมีส่วนร่วมสำคัญต่อภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายมากกว่าภาระทางความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาการคายกลับของคาร์บอนไดออกไซด์ และ ภาระทางความร้อนในการระเหยของน้ำ ดังนั้น จึงควรเลือกใช้ตัวทำละลายที่มีภาระทางความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิต่ำก่อน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การถ่ายโอนมวลของตัวทำละลายเป็นหนึ่งในตัวชี้บอสมรรถนะที่สำคัญสำหรับประเมินศักยภาพของตัวทำละลาย เพื่อให้การศึกษาตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ครอบคลุมยิ่งขึ้น จึงควรศึกษาการถ่ายโอนมวลของตัวทำละลาย AMP-MPDL ด้วย

2. ศึกษาความเสถียร (stability) ของตัวทำละลายเพิ่มเติม เช่น การเสื่อมสภาพ (degradation) การกัดกร่อน (corrosion) ของตัวทำละลาย เพื่อนำตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ไปใช้ในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์อย่างมีประสิทธิภาพและเกิดความคุ้มค่ามากที่สุด

3. การเพิ่มจลนพลศาสตร์การดูดซึมโดยรวมของตัวทำละลายเอมีนผสมให้สูงขึ้น สามารถทำได้ โดยผสม MPDL กับเอมีนที่มีจลนพลศาสตร์การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์สูง เช่น PZ



บรรณานุกรม

1. J.G.J, O. and P. J.A.H.W, *Trends in global CO₂ and total greenhouse gas emissions*. 2019 report. 2020, The Hague, the Netherlands: PBL Publishers. 1-70.
2. Sarkodie, S.A. and V. Strezov, *Effect of foreign direct investments, economic development and energy consumption on greenhouse gas emissions in developing countries*. *Sci Total Environ*, 2019. **646**: p. 862-871.
3. Metz, B., et al., *Carbon dioxide capture and storage. IPCC Special Report*. . 2005, Policy Stud.
4. Mukherjee, A., et al., *Review of post-combustion carbon dioxide capture technologies using activated carbon*. *J Environ Sci (China)*, 2019. **83**: p. 46-63.
5. Wang, M., et al., *Post-combustion CO₂ capture with chemical absorption: A state-of-the-art review*. *Chemical Engineering Research and Design*, 2011. **89**(9): p. 1609-1624.
6. Nwaoha, C., et al., *Carbon dioxide (CO₂) capture: Absorption-desorption capabilities of 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP), piperazine (PZ) and monoethanolamine (MEA) tri-solvent blends*. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016. **33**: p. 742-750.
7. Sema, T., W. Khuenkaew, and O. Sirirathomsud, *Kinetics of CO₂ Absorption in Novel Tertiary N-Methyl-4-Piperidinol Solvent*. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2019. **90**.
8. Xiao, M., et al., *A new model for correlation and prediction of equilibrium CO₂ solubility in N-methyl-4-piperidinol solvent*. *AIChE Journal*, 2017. **63**(8): p. 3395-3403.
9. Sema, T., et al., *Absorption kinetics of CO₂ in novel formulated 2-amino-2-methyl-1-propanol and N-methyl-4-piperidinol solvent*. *Energy Reports*, 2020. **6**: p. 143-150.
10. Leung, D.Y.C., G. Caramanna, and M.M. Maroto-Valer, *An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies*. *Renewable and*

- Sustainable Energy Reviews, 2014. **39**: p. 426-443.
11. Barauskas, D., et al., *Selective Ultrasonic Gravimetric Sensors Based on Capacitive Micromachined Ultrasound Transducer Structure-A Review*. Sensors (Basel), 2020. **20**(12).
 12. Kohl, A.L. and R. Nielsen, *Gas Purification*. 1997: Elsevier Science.
 13. White, C.M., et al., *Separation and capture of CO₂ from large stationary sources and sequestration in geological formations--coalbeds and deep saline aquifers*. J Air Waste Manag Assoc, 2003. **53**(6): p. 645-715.
 14. Aaron, D. and C. Tsouris, *Separation of CO₂ from Flue Gas: A Review*. Separation Science and Technology, 2011. **40**(1-3): p. 321-348.
 15. Wai, S.K., et al., *Absorption heat, solubility, absorption and desorption rates, cyclic capacity, heat duty, and absorption kinetic modeling of AMP-DETA blend for post-combustion CO₂ capture*. Separation and Purification Technology, 2018. **194**: p. 89-95.
 16. Kim, H. and K.S. Lee, *Energy analysis of an absorption-based CO₂ capture process*. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2017. **56**: p. 250-260.
 17. Sema, T., et al., *Part 5b: Solvent chemistry: reaction kinetics of CO₂ absorption into reactive amine solutions*. Carbon Management, 2012, April. **3**(2): p. 201-220.
 18. Shen, K.P. and M.H. Li, *Solubility of carbon dioxide in aqueous mixtures of monoethanolamine with methyldiethanolamine*. Journal of Chemical & Engineering Data, 1992, January. **37**: p. 96-100.
 19. Singto, S., et al., *Synthesis of new amines for enhanced carbon dioxide (CO₂) capture performance: The effect of chemical structure on equilibrium solubility, cyclic capacity, kinetics of absorption and regeneration, and heats of absorption and regeneration*. Separation and Purification Technology, 2016. **167**: p. 97-107.
 20. Maneeintr, K., et al., *Synthesis, solubilities, and cyclic capacities of amino alcohols for CO₂ capture from flue gas streams*. Energy Procedia, 2009. **1**(1): p. 1327-1334.

21. Tontlwachwuthikul, P., A. Meisen, and C.J. Llm, *Solubility of CO₂ in 2-Amino-2-methyl-1-propanol solutions*. Journal of Chemical & Engineering Data, 1991, January. **36**: p. 130-133.
22. Sema, T., et al., *Correlations for Equilibrium Solubility of Carbon Dioxide in Aqueous 4-(Diethylamino)-2-butanol Solutions*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011. **50**(24): p. 14008-14015.
23. จันทร์สุวรรณ, ว., สมดุลกรด-เบส (*Acid-Base Equilibria*). ตำราเรียนเคมีสำหรับวิศวกร, 2012. **2**: p. 241-298.
24. Crooks, J.E. and J.P. Donnellan, *Kinetics and mechanism of the reaction between carbon dioxide and amines in aqueous solution*. Journal of the Chemical Society, 1989. **2**: p. 331-333.
25. Caplow, M., *Kinetics of carbamate formation and breakdown*. Journal of the American Chemical Society, 1968, November: p. 6795-6803.
26. Vaidya, P.D. and E.Y. Kenig, *Termolecular Kinetic Model for CO₂-Alkanolamine Reactions: An Overview*. Chemical Engineering & Technology, 2010. **33**(10): p. 1577-1581.
27. Yih, S.M. and K.P. Shen, *Kinetics of carbon dioxide reaction with sterically hindered 2-amino-2-methyl-1-propanol aqueous solutions*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1988, June **27**: p. 2237-2241.
28. Bosch, H., *Kinetics of the reaction of CO₂ with the sterically hindered amine 2-amino-2-methylpropanol at 298 K*. Chemical Engineering Science 1990, September **45**: p. 1167-1173.
29. Rayer, A.V., et al., *Part 5C: solvent Chemistry: solubility of CO₂ in reactive solvents for post-combustion CO₂* Carbon Management, 2012, April. **3**: p. 467-484.
30. Sakwattanapong, R., A. Aroonwilas, and A. Veawab, *Behavior of reboiler heat duty for CO₂ capture plants using regenerable single and blended alkanolamines*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2005, May. **44**(12): p. 4465-4473.
31. Nwaoha, C., et al., *Heat duty, heat of absorption, sensible heat and heat of vaporization of 2-Amino-2-Methyl-1-Propanol (AMP), Piperazine (PZ) and*

- Monoethanolamine (MEA) tri-solvent blend for carbon dioxide (CO₂) capture.* Chemical Engineering Science, 2017. **170**: p. 26-35.
32. Choi, W.-J., et al., *Removal characteristics of CO₂ using aqueous MEA/AMP solutions in the absorption and regeneration process.* Journal of Environmental Sciences, 2009. **21**(7): p. 907-913.
33. Mondal, B.K., S.S. Bandyopadhyay, and A.N. Samanta, *Equilibrium solubility and enthalpy of CO₂ absorption in aqueous bis(3-aminopropyl) amine and its mixture with MEA, MDEA, AMP and K₂CO₃.* Chemical Engineering Science, 2017. **170**: p. 58-67.
34. Muchan, P., et al., *Screening tests of aqueous alkanolamine solutions based on primary, secondary, and tertiary structure for blended aqueous amine solution selection in post combustion CO₂ capture.* Chemical Engineering Science, 2017. **170**: p. 574-582.
35. Horwitz, W., *Official methods of analysis of AOAC.* 1975, April Menasha, WI, USA:: George Banta Co.
36. Chiu, L.-F., H.-F. Liu, and M.H. Li, *Heat capacity of alkanolamine aqueous solutions.* Journal of Chemical and Engineering Data, 1999, November. **44**: p. 1396–1401.
37. Lee, L.L., *Thermodynamic models for natural gas sweetening fluids, annual report to gas research institute.* 1994, University of Oklahoma: Norman, OK.: Norman, OK.
38. Osborne, N.S., H.F. Stimson, and D.C. Ginnings, *Measurements of heat capacity and heat of vaporization of water in the Range 0 °C to 100 °C.* Journal of Research of the National Bureau of Standards, 1939, August. **23**: p. 197–260.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

1. การคำนวณร้อยละความเบี่ยงเบนเฉลี่ยสัมบูรณ์ (%AADs)

เพื่อยืนยันความแม่นยำและความเชื่อถือได้ของเครื่องมือและวิธีการวัดความจุการดูดซึม จึงทำการสอบเทียบด้วยตัวทำละลายดั้งเดิม MEA ความเข้มข้น 14 และ 30 %wt. ที่อุณหภูมิ 313 K และ ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 10.1–101.3 kPa โดยนำข้อมูลที่บันทึกได้จากการไทเทรตของเหลวตัวอย่างด้วย Chittick apparatus มาคำนวณความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ โดยพิจารณาจากอัตราส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมต่อเอมีนในตัวทำละลาย หรือ CO₂ loading ในหน่วย mol CO₂/mol amine จากนั้น นำผลการทดลองในส่วนของความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ไปเปรียบเทียบกับข้อมูลจากวรรณกรรม และ คำนวณหาค่าร้อยละความเบี่ยงเบนเฉลี่ยสัมบูรณ์

1.1 การคำนวณความจุการดูดซึม

ตัวอย่างการคำนวณ

จาก		Absorption capacity หรือ CO ₂ loading =	$\frac{\text{mol CO}_2}{\text{mol amine}}$	(ก.1)
เมื่อ	mol CO ₂	คือ	โมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึม (mol)	
	mol amine	คือ	โมลของเอมีนในตัวทำละลาย (mol)	

ข้อมูลที่ใช้ (condition) :- เตรียมตัวทำละลาย MEA ความเข้มข้น 14 %wt. (2 โมลาร์) ปริมาตร

25 ml

- มวลโมเลกุลของ MEA = 61.08 g/mol

- ความหนาแน่นของ MEA = 1.012 g/ml

- อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (STP) (1 mol) = 22400 ml

- ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ = 10.1 kPa

- อุณหภูมิ = 313 K

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ได้จากการไทเทรตของเหลวตัวอย่าง สำหรับคำนวณความจุการดูดซึมของตัวทำละลาย 14%wt. MEA

ข้อมูลที่ได้	
ปริมาตรของ HCl ที่จุดยุติ	1.8 ml
ปริมาตรของ HCl ทั้งหมด	4 ml
ปริมาณของ CO ₂	27 ml

การคำนวณ mol amine

$$\text{mol amine} = \frac{(1 \text{ mol}) \times (1.8 \text{ ml})}{1000 \text{ ml}}$$

$$= 0.0018 \text{ mol}$$

การคำนวณ mol CO₂

$$\text{mol CO}_2 = \frac{(1 \text{ mol}) \times (27 - 4 \text{ ml})}{(22400 \text{ ml})}$$

$$= 0.0010 \text{ mol}$$

จากนั้น นำค่าที่คำนวณได้ไปแทนในสมการ (ก.1)

$$\text{จะได้ Absorption capacity หรือ CO}_2 \text{ loading} = \frac{\text{mol CO}_2}{\text{mol amine}}$$

$$= \frac{0.0010 \text{ mol}}{0.0018 \text{ mol}}$$

$$= 0.570 \text{ mol CO}_2/\text{mol amine}$$

$$= 0.570 \text{ mol CO}_2/\text{mol amine}$$

ข้อมูลที่ใช้ (condition) :- เตรียมตัวทำละลาย MEA ความเข้มข้น 30 %wt. (5 โมลาร์) ปริมาตร 25 ml

- มวลโมเลกุลของ MEA = 61.08 g/mol

- ความหนาแน่นของ MEA = 1.012 g/ml

- อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (STP) (1 mol) = 22400 ml

- ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ = 10.1 kPa

- อุณหภูมิ = 313 K

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลที่ได้จากการไทเทรตของเหลวตัวอย่าง สำหรับคำนวณความจุการดูดซึมของตัวทำละลาย 30%wt. MEA

ข้อมูลที่ได้	
ปริมาตรของ HCl ที่จุดยุติ	5 ml
ปริมาตรของ HCl ทั้งหมด	10 ml
ปริมาณของ CO ₂	65.5 ml

การคำนวณ mol amine

$$\text{mol amine} = \frac{(1 \text{ mol}) \times (5 \text{ ml})}{1000 \text{ ml}}$$

$$= 0.005 \text{ mol}$$

การคำนวณ mol CO₂

$$\text{mol CO}_2 = \frac{(1 \text{ mol}) \times (65.5 - 10 \text{ ml})}{(22400 \text{ ml})}$$

$$= 0.0025 \text{ mol}$$

จากนั้น นำค่าที่คำนวณได้ไปแทนในสมการ (ก.1)

$$\text{จะได้ Absorption capacity หรือ CO}_2 \text{ loading} = \frac{\text{mol CO}_2}{\text{mol amine}}$$

$$= \frac{0.005 \text{ mol}}{0.0025 \text{ mol}}$$

$$= 0.496 \text{ mol CO}_2/\text{mol amine}$$

1.2 การคำนวณร้อยละความเบี่ยงเบนเฉลี่ยสัมบูรณ์

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\text{จาก Average Absolute Deviation (\%AADs)} = \frac{1}{N} \sum \frac{|\alpha_{\text{experiment}} - \alpha_{\text{reference}}|}{|\alpha_{\text{reference}}|} \times 100 \quad (\text{ก.2})$$

เมื่อ $\alpha_{\text{experiment}}$ คือ ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์จากการทดลอง (mol CO₂/mol amine)

$\alpha_{\text{reference}}$ คือ ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์จากวรรณกรรม (mol CO₂/mol amine)

ตารางที่ ก.3 ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลาย 14 %wt. MEA

ความดันย่อยของ คาร์บอนไดออกไซด์ (kPa)	ความจุการดูดซึม ($\text{mol CO}_2/\text{mol amine}$)	
	Reference [18]	Experiment
10.1	0.573	0.570
30.4	0.641	0.611
50.7	0.684	0.625
81.1	0.734	0.728
101.3	0.752	0.769

จากนั้น นำความจุการดูดซึมไปแทนในสมการ (ก.2)

$$\begin{aligned}
 \text{จะได้ } \% \text{AADs} &= \frac{1}{N} \sum \frac{|\alpha_{\text{experiment}} - \alpha_{\text{reference}}|}{|\alpha_{\text{reference}}|} \times 100 \\
 &= \frac{1}{5} \times (0.005 + 0.047 + 0.086 + 0.008 + 0.023) \times 100 \\
 &= 3.38 \%
 \end{aligned}$$

ตารางที่ ก.4 ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลาย 30 %wt. MEA

ความดันย่อยของ คาร์บอนไดออกไซด์ (kPa)	ความจุการดูดซึม ($\text{mol CO}_2/\text{mol amine}$)	
	Reference [16]	Experiment
10.1	0.508	0.496
30.4	0.541	0.518
50.7	0.562	0.547
81.1	0.581	0.569
101.3	0.594	0.608

จากนั้น นำค่าที่คำนวณได้ไปแทนในสมการ (ก.2)

$$\begin{aligned}
 \text{จะได้ } \% \text{AADs} &= \frac{1}{N} \sum \frac{|\alpha_{\text{experiment}} - \alpha_{\text{reference}}|}{|\alpha_{\text{reference}}|} \times 100 \\
 &= \frac{1}{5} \times (0.024 + 0.043 + 0.027 + 0.021 + 0.024) \times 100 \\
 &= 2.78 \%
 \end{aligned}$$

2. การคำนวณความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL

งานวิจัยนี้ศึกษาตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ที่ความเข้มข้นรวม 30 %wt. ของสารละลายในน้ำ ที่อัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL 5/25 10/20 และ 15/15 %wt. AMP/MPDL และ ความเข้มข้นรวม 40 %wt. ของสารละลายในน้ำ ที่อัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL 10/30 15/25 และ 20/20 %wt. AMP/MPDL โดยความจุการดูดซึมของตัวทำละลายเอมีน ดำเนินการที่อุณหภูมิ 313 และ 363 K และ ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 10.1–101.3 kPa โดยนำข้อมูลที่บันทึกได้จากการไทเทรตของเหลวตัวอย่างด้วย Chittick apparatus มาคำนวณความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งพิจารณาจากอัตราส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมต่อเอมีน หรือ CO₂ loading ในหน่วย mol CO₂/mol amine

การคำนวณความจุการดูดซึม

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\text{จาก Absorption capacity หรือ CO}_2 \text{ loading} = \frac{\text{mol CO}_2}{\text{mol amine}} \quad (\text{ก.1})$$

ข้อมูลที่ใช้ (condition) :- เตรียมตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ที่อัตราส่วนความเข้มข้น

5/25 %wt. AMP/MPDL (2.708 โมลาร์) ปริมาตร 25 ml

- อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (STP) (1 mol) = 22400 ml

- ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ = 10.1 kPa

- อุณหภูมิ = 313 K

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลที่ได้จากการไทเทรตของเหลวตัวอย่าง สำหรับคำนวณความจุการดูดซึมของตัวทำละลาย 5/25 %wt. AMP/MPDL ที่อุณหภูมิ 313 K

ข้อมูลที่ได้	
ปริมาตรของ HCl ที่จุดยุติ	2.5 ml
ปริมาตรของ HCl ทั้งหมด	6 ml
ปริมาณของ CO ₂	44.5 ml

การคำนวณ mol amine

$$\text{mol amine} = \frac{(1 \text{ mol}) \times (2.5 \text{ ml})}{1000 \text{ ml}}$$

$$= 0.0025 \text{ mol}$$

การคำนวณ mol CO₂

$$\begin{aligned} \text{mol CO}_2 &= \frac{(1 \text{ mol}) \times (44.5 - 6 \text{ ml})}{(22400 \text{ ml})} \\ &= 0.0017 \text{ mol} \end{aligned}$$

จากนั้น นำค่าที่คำนวณได้ไปแทนในสมการ (ก.1)

$$\begin{aligned} \text{จะได้ Absorption capacity หรือ CO}_2 \text{ loading} &= \frac{\text{mol CO}_2}{\text{mol amine}} \\ &= \frac{0.0017 \text{ mol}}{0.0025 \text{ mol}} \\ &= 0.688 \text{ mol CO}_2/\text{mol amine} \end{aligned}$$

ข้อมูลที่ใช้ (condition) :- เตรียมตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 5/25 %wt. AMP/MPDL (2.708 โมลาร์) ปริมาตร 25 ml

- อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (STP) (1 mol) = 22400 ml
- ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ = 10.1 kPa
- อุณหภูมิ = 363 K

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลที่ได้จากการไทเทรตของเหลวตัวอย่าง สำหรับคำนวณความจุการดูดซึมของตัวทำละลาย 5/25 %wt. AMP/MPDL ที่อุณหภูมิ 363 K

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	
ข้อมูลที่ได้	
ปริมาตรของ HCl ที่จุดยุติ	2.5 ml
ปริมาตรของ HCl ทั้งหมด	6 ml
ปริมาณของ CO ₂	13.5 ml

การคำนวณ mol amine

$$\begin{aligned} \text{mol amine} &= \frac{(1 \text{ mol}) \times (2.5 \text{ ml})}{1000 \text{ ml}} \\ &= 0.0025 \text{ mol} \end{aligned}$$

การคำนวณ mol CO₂

$$\text{mol CO}_2 = \frac{(1 \text{ mol}) \times (13.5 - 6 \text{ ml})}{(22400 \text{ ml})}$$

$$= 0.0003 \text{ mol}$$

จากนั้น นำค่าที่คำนวณได้ไปแทนในสมการ (ก.1)

$$\begin{aligned} \text{จะได้ Absorption capacity หรือ CO}_2 \text{ loading} &= \frac{\text{mol CO}_2}{\text{mol amine}} \\ &= \frac{0.0003 \text{ mol}}{0.0025 \text{ mol}} \\ &= 0.134 \text{ mol CO}_2/\text{mol amine} \end{aligned}$$

3. การคำนวณความจุวนกลับของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL

งานวิจัยนี้ศึกษาตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ที่ความเข้มข้นรวม 30 %wt. ของสารละลายในน้ำ ที่อัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL 5/25 10/20 และ 15/15 %wt. AMP/MPDL และ ความเข้มข้นรวม 40 %wt. ของสารละลายในน้ำ ที่อัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL 10/30 15/25 และ 20/20 %wt. AMP/MPDL โดยความจุวนกลับของตัวทำละลายเอมีน ดำเนินการที่อุณหภูมิ 313 และ 363 K และ ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 10.1–101.3 kPa โดยความจุวนกลับพิจารณาจากผลต่างโมลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมต่อหน่วยปริมาตรของตัวทำละลายเอมีนระหว่างอุณหภูมิ 313 และ 363 K ในหน่วย mol CO₂/L-amine solvent

ตัวอย่างการคำนวณ

ความจุวนกลับ คำนวณจากผลคูณระหว่าง ผลต่างความจุการดูดซึมของตัวทำละลายเอมีน ที่อุณหภูมิ 313 และ 363 K และ ความเข้มข้นโมลาร์ของเอมีนในตัวทำละลาย โดยผลต่างความจุการดูดซึมระหว่างอุณหภูมิทั้งสอง ได้จากการคำนวณความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ (จากข้อ 2) และ ความเข้มข้นโมลาร์ของเอมีนในตัวทำละลาย วัดได้จากการไทเทรตตัวทำละลายเอมีน

จาก Cyclic capacity = (ผลต่างความจุการดูดซึมของตัวทำละลายเอมีนที่อุณหภูมิ 313 และ 363 K) × (ความเข้มข้นโมลาร์ของเอมีนในตัวทำละลาย)

$$\text{Cyclic capacity} = \frac{\text{mol CO}_2}{\text{mol amine}} \times \frac{\text{mol amine}}{\text{L-amine solvent}}$$

$$\text{Cyclic capacity} = \frac{\text{mol CO}_2}{\text{L-amine solvent}} \quad (\text{ก.3})$$

3.1 ผลต่างความจุการดูดซึมของตัวทำละลายเอมีนที่อุณหภูมิ 313 และ 363 K

ข้อมูลที่ใช้ (condition) :- ตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 5/25 %wt. AMP/MPDL (2.708 โมลาร์) ปริมาตร 25 ml

- ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ = 10.1 kPa
- อุณหภูมิ = 313 และ 363 K

ตารางที่ ก.7 ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 5/25 %wt. AMP/MPDL และ ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 10.1 kPa (จากข้อ 2)

อุณหภูมิ (K)	ความจุการดูดซึม ($\text{mol CO}_2/\text{mol amine}$)
313	0.688
363	0.134

การคำนวณหาผลต่างความจุการดูดซึม

$$\begin{aligned} \frac{\text{mol CO}_2}{\text{mol amine}} &= (0.688 \text{ mol CO}_2/\text{mol amine}) - (0.134 \text{ mol CO}_2/\text{mol amine}) \\ &= 0.554 \text{ mol CO}_2/\text{mol amine} \end{aligned}$$

3.2 ความเข้มข้นโมลาร์ของเอมีนในตัวทำละลาย ที่อัตราส่วน 5/25 %wt. AMP/MPDL

$$\frac{\text{mol amine}}{\text{L-amine solvent}} = 2.708 \text{ mol amine/L-amine solvent}$$

จากนั้น นำค่าที่คำนวณได้ไปแทนในสมการ (ก.3)

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } \text{Cyclic capacity} &= \frac{\text{mol CO}_2}{\text{L-amine solvent}} \\ &= (0.554 \text{ mol CO}_2/\text{mol amine}) \times (2.708 \text{ mol amine/L-amine solvent}) \\ &= 1.500 \text{ mol CO}_2/\text{L-amine solvent} \end{aligned}$$

4. การคำนวณภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL

งานวิจัยนี้ศึกษาตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ที่ความเข้มข้นรวม 30 %wt. ของสารละลายในน้ำ ที่อัตราส่วนความเข้มข้น AMP ต่อ MPDL 5/25 10/20 และ 15/15 %wt. AMP/MPDL และ ความเข้มข้นรวม 40 %wt. ของสารละลายในน้ำ ที่อัตราส่วนความเข้มข้น AMP

ต่อ MPDL 10/30 15/25 และ 20/20 %wt. AMP/MPDL โดยภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลาย ดำเนินการที่อุณหภูมิ 363 K ซึ่งค่าภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายพิจารณาจากค่าความร้อนที่ใช้ในการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ต่อ 1 โมล ในกระบวนการฟื้นฟูตัวทำละลาย ในหน่วย kJ/mol CO₂ ซึ่งภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลาย (Q_{reg}) ประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ ภาระทางความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ (Q_{des}) ภาระทางความร้อนในการระเหยของน้ำ (Q_{vap}) และ ภาระทางความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิ (Q_{sen})

4.1 การคำนวณภาระทางความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\text{จาก} \quad Q_{des} = \sum \frac{C_i}{C_T} \Delta H_{des_i} \quad (2.14)$$

ข้อมูลที่ใช้ (condition) :- เตรียมตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ที่อัตราส่วนความเข้มข้น

5/25 %wt. AMP/MPDL (C_T = 2.708 โมลาร์) ปริมาตร 100 ml

- ความเข้มข้นของ AMP = 0.556 โมลาร์

- ความเข้มข้นของ MPDL = 2.152 โมลาร์

- ΔH_{des_i} ของ AMP = 80.96 kJ/mol CO₂ [28]

- ΔH_{des_i} ของ MPDL = 49.1 kJ/mol CO₂ [7]

จากนั้น นำค่าที่คำนวณได้ไปแทนในสมการ (2.14)

$$\begin{aligned} \text{จะได้} \quad Q_{des} &= \sum \frac{C_i}{C_T} \Delta H_{des_i} \\ &= \left(\frac{0.556 \text{ โมลาร์}}{2.708 \text{ โมลาร์}} \times 80.96 \text{ kJ/mol CO}_2 \right) + \\ &\quad \left(\frac{2.152 \text{ โมลาร์}}{2.708 \text{ โมลาร์}} \times 49.1 \text{ kJ/mol CO}_2 \right) \\ &= 55.64 \text{ kJ/mol CO}_2 \end{aligned}$$

4.2 การคำนวณภาระทางความร้อนในการระเหยของน้ำ

ตัวอย่างการคำนวณ

จาก

$$Q_{\text{vap}} = \Delta H_{\text{vap_H}_2\text{O}} \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{P_{\text{CO}_2}} \quad (2.15)$$

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = (P^{\text{sat}})X_{\text{H}_2\text{O_lean}} \quad (2.16)$$

$$P_{\text{CO}_2} = 101.3 - ((P^{\text{sat}})X_{\text{H}_2\text{O_lean}}) \quad (2.17)$$

ข้อมูลที่ใช้ (condition) :- เตรียมตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ที่อัตราส่วนความเข้มข้น

5/25 %wt. AMP/MPDL (2.708 โมลาร์) ปริมาตร 100 ml

$$- \Delta H_{\text{vap_H}_2\text{O}} = 41 \text{ kJ/mol H}_2\text{O} [28]$$

$$- P_{\text{sat}} = 70.182 \text{ kPa (จากการเปิดตาราง water saturation pressure)}$$

$$- X_{\text{H}_2\text{O_lean}} = 0.93 \text{ (ที่เวลา 80 นาที)}$$

การคำนวณหาความดันย่อยของไอน้ำ (จากสมการ 2.16)

$$\begin{aligned} P_{\text{H}_2\text{O}} &= (P^{\text{sat}})X_{\text{H}_2\text{O_lean}} \\ &= (70.182 \text{ kPa}) \times (0.93) \\ &= 65.27 \text{ kPa} \end{aligned}$$

การคำนวณหาความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ (จากสมการ 2.17)

$$\begin{aligned} P_{\text{CO}_2} &= 101.3 - ((P^{\text{sat}})X_{\text{H}_2\text{O_lean}}) \\ &= 101.3 - [(70.182 \text{ kPa}) \times (0.93)] \\ &= 36.03 \text{ kPa} \end{aligned}$$

จากนั้น นำค่าที่คำนวณได้ไปแทนในสมการ (2.15)

$$\begin{aligned} \text{จะได้} \quad Q_{\text{vap}} &= \Delta H_{\text{vap_H}_2\text{O}} \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{P_{\text{CO}_2}} \\ &= (41 \text{ kJ/mol CO}_2) \times \frac{65.27 \text{ kPa}}{36.03 \text{ kPa}} \\ &= 74.27 \text{ kJ/mol CO}_2 \end{aligned}$$

4.3 การคำนวณภาระทางความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิ

ตัวอย่างการคำนวณ

ภาระทางความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิ คำนวณจากค่าความจุความร้อนของตัวทำละลาย เอมีน โดยใช้เครื่อง DSC มาทำการวิเคราะห์ความจุความร้อน เพื่อยืนยันความแม่นยำและความเชื่อถือได้ของเครื่องมือวัดความจุความร้อน จึงทำการสอบเทียบด้วยน้ำ และ MEA บริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ ระหว่าง 303–353 K จากนั้น นำความจุความร้อนที่วัดได้เปรียบเทียบกับข้อมูลจากวรรณกรรม และ คำนวณหาค่าร้อยละความเบี่ยงเบนเฉลี่ยสัมบูรณ์

1) การคำนวณหาค่าร้อยละความเบี่ยงเบนเฉลี่ยสัมบูรณ์

ตัวอย่างการคำนวณ

จาก Average Absolute Deviation (%AADs) = $\frac{1}{N} \sum \frac{|\alpha_{\text{experiment}} - \alpha_{\text{reference}}|}{|\alpha_{\text{reference}}|} \times 100$ (ก.2)

ตารางที่ ก.8 ความจุความร้อนของน้ำ

อุณหภูมิ (K)	ความจุความร้อน (kJ/kg·K)	
	Reference [33]	Experiment
303	4.181	4.19
308	4.180	4.26
313	4.181	4.31
318	4.182	4.36
323	4.183	4.39
328	4.185	4.43
333	4.187	4.48
338	4.189	4.53
343	4.192	4.59
348	4.195	4.65
353	4.199	4.70

จากนั้น นำความจุความร้อนที่วัดได้ไปแทนในสมการ (ก.2)

$$\text{จะได้ } \% \text{AADs} = \frac{1}{N} \sum \frac{|\alpha_{\text{experiment}} - \alpha_{\text{reference}}|}{|\alpha_{\text{reference}}|} \times 100$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{11} \times (0.002+0.019+0.031+0.043+0.049+0.059+0.070 \\
&\quad +0.081+0.095+0.108+0.119) \times 100 \\
&= 6.15 \%
\end{aligned}$$

ตารางที่ ก.9 ความจุความร้อนของ MEA บริสุทธิ์

อุณหภูมิ (K)	ความจุความร้อน (kJ/kg·K)	
	Reference [32]	Experiment
303	2.720	2.73
308	2.760	2.80
313	2.801	2.86
318	2.841	2.92
323	2.882	2.98
328	2.923	3.05
333	2.963	3.11
338	3.004	3.18
343	3.044	3.32
348	3.085	3.43
353	3.125	3.54

จากนั้น นำค่าความจุความร้อนไปแทนในสมการ (ก.2)

จะได้

$$\begin{aligned}
\%AADs &= \frac{1}{N} \sum \frac{|\alpha_{\text{experiment}} - \alpha_{\text{reference}}|}{|\alpha_{\text{reference}}|} \times 100 \\
&= \frac{1}{11} \times (0.004+0.014+0.021+0.028+0.034+0.043+0.050 \\
&\quad +0.059+0.091+0.112+0.133) \times 100 \\
&= 5.35 \%
\end{aligned}$$

2) การคำนวณภาระทางความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิ

การคำนวณภาระทางความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิ เป็นการคำนวณพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิ ระหว่างอุณหภูมิ 313 ถึง 363 K ของตัวทำละลายเอมีนที่อัตราส่วนต่าง ๆ

ตัวอย่างการคำนวณ

จาก

$$Q_{\text{sen}} = \frac{mC_p\Delta T}{(\alpha_{\text{CO}_2_{\text{rich}}} - \alpha_{\text{CO}_2_{\text{lean}}})\text{mol}_{\text{amine}}} \quad (2.18)$$

ข้อมูลที่ใช้ (condition) :- เตรียมตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ที่อัตราส่วนความเข้มข้น

5/25 %wt. AMP/MPDL (2.708 โมลาร์) ปริมาตร 100 ml

- $m = 99.144$ g solution

- $C_p \cdot \Delta T = 0.173$ kJ/g solution

- $\text{mol}_{\text{amine}} = 0.2708$ mol amine

- $\alpha_{\text{CO}_2_{\text{rich}}} = 0.694$ mol CO_2 /mol amine
(ที่ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 10.1 kPa)

- $\alpha_{\text{CO}_2_{\text{lean}}} = 0.383$ mol CO_2 /mol amine

จากนั้น นำค่าที่คำนวณได้ไปแทนในสมการ (2.18)

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } Q_{\text{sen}} &= \frac{(99.144 \text{ g solution}) \times (0.173 \text{ kJ/g solution})}{(0.694 - 0.383 \text{ mol CO}_2/\text{mol amine}) \times (0.2708 \text{ mol amine})} \\ &= 203.49 \text{ kJ/mol CO}_2 \end{aligned}$$

จากนั้น นำภาระทางความร้อนทั้ง 3 ส่วน รวมกัน จะได้ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูของตัวทำละลายชนิดใหม่ AMP-MPDL ดังสมการ (2.13)

$$Q_{\text{reg}} = Q_{\text{des}} + Q_{\text{vap}} + Q_{\text{sen}} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } Q_{\text{reg}} &= 55.64 + 74.27 + 203.49 \\ &= 333.40 \text{ kJ/mol CO}_2 \end{aligned}$$

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวรัตนามภรณ์ อภัยยะกุล
วัน เดือน ปี เกิด	18 กันยายน 2539
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลสระบุรี จังหวัดสระบุรี ประเทศไทย
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	30 ซอย 6 ถนนพิชัยณรงค์สงคราม ตำบลปากเพรียว อำเภอเมือง จังหวัดสระบุรี 18000
ผลงานตีพิมพ์	Rattanaporn Apaiyakul, Pipat Na Ranong, Thanthip Kiattinirachara, Pattaraporn Posoknistakul, Pet Pakchotanon, Ratana Jiraratananon, Paitoon Tontiwachwuthikul, Teerawat Sema. Density, Viscosity, Physical CO ₂ Diffusivity, and CO ₂ Absorption Capacity of Novel Blended N-Methyl-4-Piperidinol and Piperazine Solvent, Energy Reports (2021) Accepted Manuscript
รางวัลที่ได้รับ	1) Best Paper Award จากงานวิจัยเรื่อง Density, Viscosity, Physical CO ₂ Diffusivity, and CO ₂ Absorption Capacity of Novel Blended N-Methyl-4-Piperidinol and Piperazine Solvent ในการประชุม วิชาการระดับนานาชาติ “The 16th International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment & Sustainability (TMREES-2021)” วันที่ 28-30 พฤษภาคม 2564 (การ ประชุมออนไลน์) 2) รางวัลการนำเสนอผลงานแบบวาจาดีเด่น จากงานวิจัยเรื่อง CO ₂ Absorption Capacity and Cyclic Capacity of Novel AMP-MPDL Solvent ในการประชุมวิชาการระดับชาติ “การประชุมวิชาการและการ นำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติเครือข่ายบัณฑิตศึกษามหาวิทยาลัยราชภัฏ ภาคเหนือ ครั้งที่ 21 (GNRU-2021)” ในวันที่ 9 มิถุนายน 2564 (การ ประชุมออนไลน์)