

สมรรถนะการดูดซึมและการคืนสภาพตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA สำหรับการดักจับคาร์บอน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ABSORPTION AND REGENERATION PERFORMANCE OF AMP-PZ-TEA SOLVENT FOR  
CARBON CAPTURE



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 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมรรถนะการดูดซึมและการคืนสภาพตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA สำหรับการดักจับคาร์บอน
โดย	น.ส.วรรณวัน เทพอารยางกุล
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ เสมา

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

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

วรรณวัน เทพอารยางกุล : สมรรถนะการดูดซึมและการคืนสภาพตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA สำหรับการดักจับคาร์บอน. ( ABSORPTION AND REGENERATION PERFORMANCE OF AMP-PZ-TEA SOLVENT FOR CARBON CAPTURE) อ.ที่  
 ปริญญาหลัก : ผศ. ดร.ธีรวัฒน์ เสมา

งานวิจัยนี้ศึกษาสมรรถนะการดูดซึมและการคืนสภาพตัวทำละลายเอมีน AMP-PZ-TEA ในเชิงพฤติกรรมการตกตะกอน ความหนาแน่น ความหนืด ความจุการดูดซึม ความจวนกลับ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม ( $K_{Ga}$ ) ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ อัตราการคืนสภาพเริ่มต้น และภาระทางความร้อนในการคืนสภาพ ผลการศึกษา พบว่า ปัจจัยที่ส่งผลให้ AMP-PZ-TEA ตกตะกอน ได้แก่ อัตราส่วนความเข้มข้นของเอมีนองค์ประกอบ และ การเพิ่ม  $CO_2$  loading ทั้งนี้ ความเข้มข้น TEA ต่ำสุดที่ไม่เกิดตะกอนในตัวทำละลายผสมความเข้มข้น 5 M คือ 1.5 M การวัดความหนาแน่นและความหนืดของ AMP-PZ-TEA ที่ไม่เกิดตะกอน ในช่วงอุณหภูมิ 303-363 K พบว่า ความหนาแน่นของ AMP-PZ-TEA สูงกว่าตัวทำละลายมาตรฐาน 5 M MEA เล็กน้อย ขณะที่ความหนืดของ AMP-PZ-TEA สูงกว่า 5 M MEA อย่างชัดเจน แต่มีความหนืดอยู่ในช่วงเดียวกับตัวทำละลาย MDEA-PZ ที่ใช้ในอุตสาหกรรม การศึกษาความจุการดูดซึมของ AMP-PZ-TEA ที่อุณหภูมิ 313 K ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 12.2 kPa พบว่า AMP-PZ-TEA ที่อัตราส่วน ความเข้มข้น 1.2:2.3:1.5 1:2.5:1.5 0.9:2.6:1.5 และ 0.7:2.8:1.5 มีความจุการดูดซึมสูงกว่า 5 M MEA ร้อยละ 4-9 ส่วนความจุการดูดซึมของ 0.6:2.4:2 และ 0.5:2.5:2 มีค่าใกล้เคียงกับ 5 M MEA เมื่อพิจารณาความจวนกลับ อัตราการคืนสภาพเริ่มต้น และภาระทางความร้อนในการคืนสภาพ พบว่า AMP-PZ-TEA ตัวทำละลายทั้งหมดมีสมรรถนะสูงกว่า 5 M MEA ร้อยละ 70-79 12-117 และ 25-51 ตามลำดับ แต่มีสองอัตราส่วนความเข้มข้น คือ 0.9:2.6:1.5 และ 0.7:2.8:1.5 ที่มี  $K_{Ga}$  และประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่า 5 M MEA ร้อยละ 2-45 และ 3-5 ตามลำดับ ขณะที่ AMP-PZ-TEA 1.2:2.3:1.5 มี  $K_{Ga}$  และประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ใกล้เคียงกับ 5 M MEA

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6370083623 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORD: Carbon dioxide Amine Absorption Regeneration

Watsawan Theparayangkul : ABSORPTION AND REGENERATION PERFORMANCE OF AMP-PZ-TEA SOLVENT FOR CARBON CAPTURE. Advisor: Asst. Prof. TEERAWAT SEMA, Ph.D.

In this study, absorption and regeneration performance of AMP-PZ-TEA solvent was investigated in terms of precipitation behavior, density, viscosity, CO<sub>2</sub> absorption capacity, cyclic capacity, overall mass transfer coefficient ( $K_{Gav}$ ), CO<sub>2</sub> removal efficiency, initial desorption rate, and regeneration heat duty. The results indicated that a concentration of amine component and an increase of CO<sub>2</sub> loading induced solvent precipitation. The minimum possible concentration of TEA in the solvent was 1.5 M. The unloaded solvent that had no solid formation was measured for its density and viscosity over 303-363 K. Densities of the solvents were close to that of benchmark 5M MEA, whereas their viscosities were much higher than that of 5 M MEA but close to that of conventional MDEA-PZ. Additionally, CO<sub>2</sub> absorption capacity (at 313 K and CO<sub>2</sub> partial pressure of 12.2 kPa) of 1.2:2.3:1.5, 1:2.5:1.5, 0.9:2.6:1.5, and 0.7:2.8:1.5 solvents were 4-9% higher than that of 5 M MEA, while that of 1.2:2.3:1.5 were close to that of 5 M MEA. These six solvents had 70-79%, 12-117%, and 25-51% greater in cyclic capacity, initial desorption rate, and regeneration heat duty than those of the 5 M MEA, respectively. Moreover, there were two solvents (0.9:2.6:1.5 and 0.7:2.8:1.5) that had 2-45%  $K_{Gav}$  and 3-5% CO<sub>2</sub> removal efficiency higher than 5 M MEA, while those of 0.6:2.4:2 and 0.5:2.5:2 were close to those of 5 M MEA.

Field of Study: Chemical Technology

Student's Signature .....

Academic Year: 2021

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง สมรรถนะการดูดซึมและการคืนสภาพตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA สำหรับดักจับคาร์บอน สำเร็จจุล่งไปด้วยดี เนื่องจากผู้วิจัยได้รับความช่วยเหลือและคำแนะนำจากบุคคลหลายท่าน จึงขอขอบพระคุณทุกท่าน ไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ เสมอ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ ความรู้ทางวิชาการ รวมทั้งชี้แนะแนวทาง ช่วยแก้ไขปัญหา และเป็นกำลังใจในการทำงานวิจัย ตลอดจนการตรวจทานและแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อให้งานวิจัยนี้สำเร็จจุล่งไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และดร.สุตคณิง สิงห์โต กรรมการสอบวิทยานิพนธ์จากภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาสละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา จากภาควิชาเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่าน ในภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่มอบความรู้ ความเข้าใจด้านวิชาการตลอดระยะเวลาที่ศึกษา และขอขอบคุณบุคลากรและเจ้าหน้าที่ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำต่าง ๆ และอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณนางสาวสุกัญญา นาครักษ์ นางสาวรัตนภรณ์ อภัยยะกุล และนายพัชรพล นกโพธิ์ รวมทั้งเพื่อน รุ่นพี่ รุ่นน้อง ที่ให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษา คำแนะนำ และเป็นกำลังกำลังใจตลอดระยะเวลาที่ทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่เป็นกำลังใจสำคัญ และสนับสนุนในทุก ๆ สิ่งตลอดมา

วรรษวัน เทพอารยางกุล

## สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1      บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	4
1.7 ลำดับขั้นตอนในการศึกษางานวิจัย.....	5
บทที่ 2      ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 การปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ในภาคอุตสาหกรรม.....	7
2.2 กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์.....	8
2.3 การดูดซึม.....	12
2.4 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์.....	18
2.5 ตัวชี้บอกสมรรถนะ.....	23

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39
บทที่ 3     วิธีดำเนินงานวิจัย.....	43
3.1 ข้อมูลเกี่ยวกับงานวิจัยเบื้องต้น .....	43
3.2 สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	43
3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	45
บทที่ 4     ผลการดำเนินงานวิจัยและการอภิปรายผล .....	54
4.1 การสังเกตพฤติกรรมการตกตะกอนของตัวทำละลายเอมีน .....	54
4.2 ความหนาแน่น .....	59
4.3 ความหนืด.....	63
4.4 ความจุการดูดซึ่มคาร์บอนไดออกไซด์.....	68
4.5 ความจวนกลับ .....	73
4.6 สมรรถนะการถ่ายโอนมวลคาร์บอนไดออกไซด์ภายในหอดูดซึ่ม .....	75
4.7 อัตราการคืนสภาพตัวทำละลายเริ่มต้น.....	77
4.8 ภาระทางความร้อนในการคืนสภาพตัวทำละลาย .....	80
4.9 การประเมินศักยภาพตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA.....	84
บทที่ 5     สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	87
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	87
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	89
ภาคผนวก.....	90
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณ.....	91
ภาคผนวก ข ผลการทดลอง.....	109
บรรณานุกรม.....	111
ประวัติผู้เขียน .....	116



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สไอเสียที่ปล่อยจากอุตสาหกรรมต่าง ๆ .....	7
ตารางที่ 2.2 ข้อดีและข้อด้อยของเทคโนโลยีดักจับคาร์บอนไดออกไซด์.....	11
ตารางที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีและลักษณะเฉพาะของเอมีนดั้งเดิม .....	17
ตารางที่ 2.4 ข้อดีและข้อด้อยของตัวทำละลายเอมีนดั้งเดิม.....	18
ตารางที่ 3.1 ความหนาแน่นของน้ำและตัวทำละลาย MEA ความเข้มข้น 5 M ในช่วงอุณหภูมิ 303–333 K .....	47
ตารางที่ 3.2 ความหนืดของตัวทำละลาย MEA ความเข้มข้น 5 M และตัวทำละลาย MEA บริสุทธิ์ในช่วงอุณหภูมิ 303–333 K.....	48
ตารางที่ 3.3 ความจุการดูดซึมของตัวทำละลาย MEA และ AMP ความเข้มข้น 2 M ที่อุณหภูมิ 313 K .....	50
ตารางที่ 3.4 ภาวะดำเนินการของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ภายในหอดูดซึม .....	51
ตารางที่ 4.1 การสังเกตพฤติกรรมการตกตะกอนของตัวทำละลาย AMP–PZ–TEA ความเข้มข้น 5 M .....	57
ตารางที่ 4.2 การสังเกตพฤติกรรมการตกตะกอนของตัวทำละลาย AMP–PZ–TEA ความเข้มข้นรวม 5.5 M.....	58
ตารางที่ 4.3 การสังเกตพฤติกรรมการตกตะกอนของตัวทำละลาย AMP–PZ–TEA ความเข้มข้นรวม 6 M.....	58
ตารางที่ 4.4 ความหนาแน่นของตัวทำละลาย 5 M MEA และ AMP–PZ–TEA.....	60
ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์คงตัว สำหรับสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นกับอุณหภูมิ ( $A_p$ ).....	62
ตารางที่ 4.6 ความหนืดของตัวทำละลาย 5 M MEA และ AMP–PZ–TEA.....	64
ตารางที่ 4.7 พารามิเตอร์คงตัวสำหรับสัมประสิทธิ์ไรรุ่นอยู่ที่ขึ้นกับอุณหภูมิ ( $G_p$ ).....	67
ตารางที่ 4.8 ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลาย 5 M MEA และ AMP–PZ–TEA ที่อุณหภูมิ 313 K ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 12.2–101.3 kPa .....	70

ตารางที่ 4.9 ความจุการดูดซึมของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่อุณหภูมิ 363 K ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 12.2–101.3 kPa ..... 71

ตารางที่ 4.10 ความจุวนกลับของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 12.2–101.3 kPa..... 74

ตารางที่ 4.11 ค่าคงตัวอัตราปฏิกิริยาอันดับสองของเอมีนต่าง ๆ..... 76

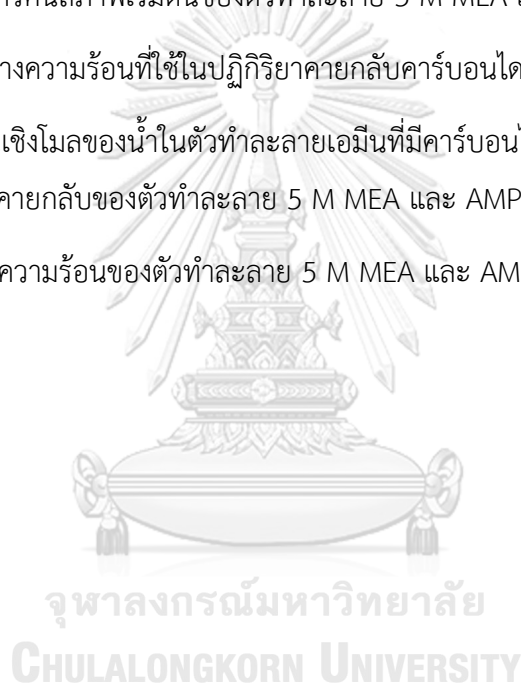
ตารางที่ 4.12 ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลาย 5 M MEA และ AMP-PZ-TEA ในเครื่องคั้นสภาพตลอดระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง ที่อุณหภูมิ 363 K ..... 78

ตารางที่ 4.13 อัตราการคั้นสภาพเริ่มต้นของตัวทำละลาย 5 M MEA และ AMP-PZ-TEA..... 80

ตารางที่ 4.14 ภาระทางความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ ..... 82

ตารางที่ 4.15 สัดส่วนเชิงโมลของน้ำในตัวทำละลายเอมีนที่มีคาร์บอนไดออกไซด์น้อยลงและปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายกลับของตัวทำละลาย 5 M MEA และ AMP-PZ-TEA ..... 82

ตารางที่ 4.16 ความจุความร้อนของตัวทำละลาย 5 M MEA และ AMP-PZ-TEA ..... 83



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ .....	9
รูปที่ 2.2 กระบวนการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ตัวทำละลายเอมีน .....	14
รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของเอมีนปฐมภูมิ เอมีนทุติยภูมิ และเอมีนตติยภูมิ .....	14
รูปที่ 2.4 กลไกสามโมเลกุลสำหรับปฏิกิริยาการเกิดคาร์บาเมต .....	20
รูปที่ 2.5 ความต่างความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊สและของเหลว .....	29
รูปที่ 2.6 ทฤษฎีสองฟิล์มสำหรับการดูดซึมเชิงเคมี .....	32
รูปที่ 2.7 การเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวละลาย A กับสารดูดซึม B ในวัฏภาคของเหลว ที่ส่วนต่อประสานระหว่างสองวัฏภาค .....	33
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊ส ตลอดความสูงของหอดูดซึม .....	35
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง CO <sub>2</sub> loading ของตัวทำละลายในเครื่องคืนสภาพตลอดระยะเวลา ที่ใช้ในการทดลอง .....	36
รูปที่ 3.1 ชุดไทเทรตสำหรับหาความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลาย (Chittick apparatus) .....	46
รูปที่ 3.2 แผนภาพชุดอุปกรณ์ที่ใช้วัดความสามารถในการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ภาวะ สมดุล .....	49
รูปที่ 3.3 แผนภาพชุดอุปกรณ์ที่ใช้ทดลองการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ภายในหอดูดซึม .....	51
รูปที่ 3.4 แผนภาพชุดอุปกรณ์ที่ใช้ทดลองการคืนสภาพตัวทำละลายเอมีน .....	53
รูปที่ 4.1 ความหนาแน่นของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA เปรียบเทียบกับตัวทำละลาย 5 M MEA .....	61
รูปที่ 4.2 ความหนืดของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA เปรียบเทียบกับตัวทำละลาย 5 M MEA และ MDEA-PZ .....	66

รูปที่ 4.3 ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA เปรียบเทียบกับ  
ตัวทำละลาย 5 M MEA ที่อุณหภูมิ 313 K ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 12.2 kPa..... 69

รูปที่ 4.4 ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA เปรียบเทียบกับ  
ตัวทำละลาย 5 M MEA ที่อุณหภูมิ 313 K ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 12.2-101.3 kPa..... 72

รูปที่ 4.5 ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่อุณหภูมิ 363 K  
ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 12.2-101.3 kPa..... 72

รูปที่ 4.6 ความจุวนกลับของทำละลายเอมีน AMP-PZ-TEA เปรียบเทียบกับตัวทำละลาย 5 M MEA  
ที่ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 12.2 kPa ..... 75

รูปที่ 4.7  $K_{Ga}$  และประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ ของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA  
เปรียบเทียบกับตัวทำละลาย 5 M MEA..... 77

รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $CO_2$  loading ของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA เปรียบเทียบกับ  
ตัวทำละลาย 5 M MEA ในเครื่องคั้นสภาพตลอดระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง ที่อุณหภูมิ 363 K... 79

รูปที่ 4.9 ภาระทางความร้อนในการคั้นสภาพตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA เปรียบเทียบกับ  
ตัวทำละลาย 5 M MEA ที่อุณหภูมิ 363 K..... 84

รูปที่ 4.10 สมรรถนะการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์และการคั้นสภาพของตัวทำละลาย  
AMP-PZ-TEA เปรียบเทียบกับตัวทำละลาย 5 M MEA..... 86

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ผลกระทบจากภาวะโลกร้อนและวิกฤตการณ์เปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่ทวีความรุนแรงมากยิ่งขึ้น ไม่ว่าจะเป็นมนุษย์หรือสิ่งแวดลอมต่างได้รับผลกระทบจากปัญหาเหล่านี้ สาเหตุสำคัญมาจากการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญของแก๊สเรือนกระจก คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) เป็นแก๊สเรือนกระจกที่ปล่อยสู่บรรยากาศในสัดส่วนมากที่สุด ทั้งนี้ คาร์บอนไดออกไซด์ถูกปล่อยจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลและกระบวนการทางอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่ [1] ดังนั้น การพัฒนากระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จึงมีความสำคัญอย่างมาก

เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์มีหลายกระบวนการ เช่น การแยกโดยใช้เยื่อเลือกผ่าน การดูดซับ การดูดซึม และการแยกด้วยภาวะเย็นยวดยิ่ง เป็นต้น กระบวนการที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวทำละลายเอมีน เนื่องจากมีประสิทธิภาพการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์สูง มีค่าใช้จ่ายอันสมควร และใช้ในกระบวนการระดับอุตสาหกรรมได้จริง [2] การเปลี่ยนตัวทำละลายเอมีนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์เป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมอย่างมาก เนื่องจากไม่กระทบต่อโครงสร้างกระบวนการของหอดูดซึมที่มีอยู่เดิม เพียงแต่ต้องปรับพารามิเตอร์ดำเนินการให้เหมาะสมเท่านั้น

2-Amino-2-methyl-1-propanol (AMP) เป็นหนึ่งในตัวทำละลายเอมีนที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม ซึ่ง AMP เป็นเอมีนปฐมภูมิที่มีโครงสร้างกีดขวางเนื่องจากขนาด (Primary sterically hindered amine) มีความจุการดูดซึมสูงและสามารถในการคืนสภาพตัวทำละลายปานกลาง แต่มีจลนพลศาสตร์การเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ไม่สูงมากเมื่อเทียบกับตัวทำละลายเอมีนดั้งเดิม Monoethanolamine (MEA) [3] เพื่อปรับปรุงข้อด้อยดังกล่าว จึงมีการผสม Piperazine (PZ) ลงในตัวทำละลาย AMP เนื่องจาก PZ มีจลนพลศาสตร์การเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์สูงมาก [4] ทั้งนี้ เมื่อสัดส่วนความเข้มข้นของ PZ มากขึ้น จลนพลศาสตร์การดูดซึมโดยรวมของตัวทำละลาย AMP-PZ เพิ่มขึ้น [5] แต่การเพิ่มความเข้มข้นของ PZ ในตัวทำละลาย AMP ถูกจำกัดด้วยการตกตะกอนของ AMP และ PZ ที่ความเข้มข้นสูง ทำให้ต้องผสม AMP และ PZ ในอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยความเข้มข้นของ PZ สูงสุดที่สามารถผสมกับ AMP ได้โดยไม่ตกตะกอน คือ 1.5 M ที่ความเข้มข้นเอมีนรวม 4.5-5 M [6] การทบทวนวรรณกรรม ยืนยันว่า สมรรถนะการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น เมื่อใช้ตัวทำละลายเอมีน

ความเข้มข้นสูง เนื่องจากมีเอมีนที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้น [7] เพื่อเพิ่มความเข้มข้นโดยรวมของตัวทำละลายเอมีน จึงมีการผสม MEA ลงในตัวทำละลาย AMP-PZ

เมื่อพิจารณาสมรรถนะการดูดซึมและการคืนสภาพของตัวทำละลายเอมีนผสมสามชนิด AMP-PZ-MEA พบว่า ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ ประสิทธิภาพการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ และสมรรถนะการถ่ายโอนมวลในหอดูดซึมของตัวทำละลาย AMP-PZ-MEA สูงกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA มาก [8, 9] อีกทั้ง มีภาระทางความร้อนในการคืนสภาพต่ำกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA มาก [8] อย่างไรก็ตาม MEA เป็นเอมีนที่มีภาระทางความร้อนในการคืนสภาพสูง การใช้เอมีนที่มีภาระทางความร้อนในการคืนสภาพต่ำ เช่น Triethanolamine (TEA) จะสามารถลดภาระทางความร้อนในการคืนสภาพของสารละลายผสมลงได้อีก [3] เนื่องจากภาระทางความร้อนในการคืนสภาพคิดเป็นร้อยละ 70 ของค่าใช้จ่ายดำเนินการ ดังนั้น การลดภาระทางความร้อนในการคืนสภาพจึงสามารถลดค่าใช้จ่ายดำเนินการได้อย่างมาก [8] งานวิจัยนี้จึงจะศึกษาตัวทำละลายเอมีนผสม AMP-PZ-TEA ในเชิงพฤติกรรมการตกตะกอน ความหนาแน่น ความหนืด ความจุการดูดซึม ความจุวนกลับ สมรรถนะการถ่ายโอนมวลในหอดูดซึม อัตราการคืนสภาพเริ่มต้น และภาระทางความร้อนในการคืนสภาพ เพื่อประเมินศักยภาพการดักจับและการคืนสภาพของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA เปรียบเทียบกับตัวทำละลายดั้งเดิม MEA

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาสมบัติเชิงกายภาพของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA
2. ศึกษาสมรรถนะการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ในเชิงความจุการดูดซึม ความจุวนกลับ และสมรรถนะการถ่ายโอนมวลในหอดูดซึม
3. ศึกษาสมรรถนะการคืนสภาพของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ในเชิงอัตราการคืนสภาพเริ่มต้น และภาระทางความร้อนในการคืนสภาพ

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาพฤติกรรมการตกตะกอนของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ความเข้มข้นรวม 5-6 M ที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ โดยมีอัตราส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมต่อเอมีน หรือ  $\text{CO}_2$  loading ( $\text{mol CO}_2/\text{mol amine}$ ) ดังนี้ (i) ตัวทำละลายที่ไม่ผ่านการดูดซึม ( $0 \text{ mol CO}_2/\text{mol amine}$ ) และ (ii) ตัวทำละลายที่เต็มไปด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ ( $0.6 \text{ mol CO}_2/\text{mol amine}$ ) ดำเนินการที่อุณหภูมิ 303 K
2. วัดความหนาแน่นและความหนืดของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่ไม่ตกตะกอน ดำเนินการที่อุณหภูมิในช่วง 303-333 K

3. ศึกษาความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปของ  $\text{CO}_2$  loading ( $\text{mol CO}_2/\text{mol amine}$ ) ที่ภาวะสมดุล และความจวนกลับ ( $\text{mol CO}_2/\text{L-amine solvent}$ ) ของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ความเข้มข้นรวม 5–6 M โดยเปลี่ยนพารามิเตอร์ดำเนินการ ได้แก่ (i) อัตราส่วนความเข้มข้นของเอมีน (ii) ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วง 12.2–101.3 kPa และ (iii) อุณหภูมิ 313 และ 363 K
4. ศึกษาสมรรถนะการถ่ายโอนมวลคาร์บอนไดออกไซด์ในเชิงสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม ( $K_{Ga}$ ) โดยใช้ตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ภายในหอดูดซึมแบบแพ็คที่ใช้วัสดุบรรจุแบบจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ Sulzer DX ซึ่งหอดูดซึมมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 30 มิลลิเมตร และความสูง 1.6 เมตร ดำเนินการที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิของสารขาเข้า 303 K แก๊สขาเข้ามีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 12 โดยปริมาตร ฟลักซ์ตัวทำละลายขาเข้า  $3.67 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$  ฟลักซ์แก๊สขาเข้า  $509.30 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$   $\text{CO}_2$  loading ของสารละลายขาเข้า  $0.25 \text{ mol CO}_2/\text{mol amine}$  และสัดส่วนความสูงของจุดตั้งตัวอยางต่อความสูงหอดูดซึม ( $h/h_0$ ) 0.25
5. ศึกษาอัตราการคืนสภาพเริ่มต้นของการคืนสภาพตัวทำละลายในเครื่องคืนสภาพตัวทำละลายภายใต้ความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิ 363 K โดยอัตราการคืนสภาพเริ่มต้นคือ อัตราการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงเริ่มต้นของการคืนสภาพตัวทำละลาย
6. ศึกษาภาระทางความร้อนในการคืนสภาพตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA จากปริมาณความร้อนที่ใช้ในการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมล ( $\text{kJ/mol CO}_2$ ) ดำเนินการภายใต้ความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิ 363 K

#### 1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย

การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ การดูดซึม ตัวทำละลายเอมีนผสม พฤติกรรมการตกตะกอน ความหนาแน่น ความหนืด ความจุการดูดซึม ความจวนกลับ สมรรถนะการถ่ายโอนมวลในหอดูดซึม อัตราการคืนสภาพเริ่มต้น และภาระทางความร้อนในการคืนสภาพ

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA มีสมรรถนะการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์และการคืนสภาพตัวทำละลายสูงกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA

## 1.6 วิธีการดำเนินงานวิจัย

1. คำนคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ พฤติกรรม การตกตะกอน สมบัติเชิงกายภาพของตัวทำละลายเอมีน สมรรถนะการดูดซึม คาร์บอนไดออกไซด์ อัตราการคืนสภาพเริ่มต้น และการคืนสภาพตัวทำละลายเอมีน
2. วางแผนและออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรม การตกตะกอน ความหนาแน่น และความหนืด รวมถึงสมรรถนะการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์และการคืนสภาพตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ในเชิงความจุการดูดซึม ความจวนกลับ สมรรถนะการถ่ายโอนมวลในหอดูด ซึม อัตราการคืนสภาพเริ่มต้น และภาระทางความร้อนในการคืนสภาพ
3. เตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับศึกษา ดังนี้ (i) การสังเกตพฤติกรรม การตกตะกอน ประกอบด้วย ขวดแก้วขนาดเล็กสำหรับบรรจุตัวทำละลายเอมีน อุปกรณ์ควบคุมการไหล ของแก๊ส และชุดไทเทรต (Chittick apparatus) (ii) การวัดความหนาแน่น ประกอบด้วย มาตรฐานความหนาแน่น (Pycnometer) อ่างควบคุมอุณหภูมิ และเครื่องชั่งน้ำหนักสารเคมี ส่วนการวัดความหนืดใช้มาตรฐานความหนืดแบบ Ostwald (Ostwald viscometer) (iii) การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ ประกอบด้วย เครื่องปฏิกรณ์การดูดซึมขนาด 125 มิลลิลิตร อ่างควบคุมอุณหภูมิ เครื่องควบคุมแรงดัน ป้อนสำหรับน้ำหล่อเย็น อุปกรณ์ควบคุม การไหลของแก๊ส เครื่องรับรู้ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ เครื่องวัดอุณหภูมิ และ ชุดไทเทรต (iv) การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ภายในหอดูดซึม ประกอบไปด้วยคอลัมน์แก้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 30 มิลลิเมตร ความสูง 1.6 เมตร วัสดุบรรจุแบบจัดเรียงตัว เป็นระเบียบ Sulzer DX แผ่นกระจายตัวทำละลาย ป้อนรูดยงสำหรับตัวทำละลาย ป้อนหมุนเวียนแก๊ส อุปกรณ์ควบคุมการไหลของแก๊ส เครื่องรับรู้ความเข้มข้น คาร์บอนไดออกไซด์ เทอร์มอคัปเปิล และชุดไทเทรต และ (v) การคืนสภาพตัวทำละลาย เอมีน ประกอบด้วย เครื่องคืนสภาพตัวทำละลายขนาด 250 มิลลิลิตร เครื่องกวนสารละลาย ชนิดให้ความร้อน อ่างน้ำมัน เครื่องควบคุมแรงดัน ป้อนหมุนเวียนสำหรับน้ำหล่อเย็น เครื่องวัดอุณหภูมิ และชุดไทเทรต
4. ทดลองการสังเกตพฤติกรรม การตกตะกอนของตัวทำละลายเอมีน โดยเตรียมตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ความเข้มข้นรวม 5-6 M ที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ จากนั้น ผ่านคาร์บอนไดออกไซด์ลงในสารละลายเพื่อเพิ่ม CO<sub>2</sub> loading ของตัวทำละลายให้เป็น 0.6 mol CO<sub>2</sub>/mol amine โดย CO<sub>2</sub> loading ของตัวทำละลาย สามารถวัดได้จากชุดไทเทรต โดยนำตัวอย่างตัวทำละลายไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 M โดยใช้เมทิลออเรนจ์เป็นอินดิเคเตอร์ ตามวิธีมาตรฐานของ The Association of Official Analytical Chemists (AOAC) [10] จากนั้นเก็บตัวทำละลายตัวอย่างทั้งแบบที่มี



และไม่มีคาร์บอนไดออกไซด์ใส่ขวดแก้วขนาดเล็กสำหรับบรรจุสารที่อุณหภูมิห้องแล้วสังเกตการตกตะกอน

5. วัดความหนาแน่นและความหนืดของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่ไม่เกิดตะกอนจากขั้นตอนที่ 4 โดยใช้มาตรการความหนาแน่นและมาตรการความหนืดแบบ Ostwald ตามลำดับดำเนินการที่อุณหภูมิในช่วง 303–333 K ซึ่งควบคุมด้วยอ่างควบคุมอุณหภูมิ
6. ทดลองการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ในเชิงความจุการดูดซึมและความจวนกลับ โดย CO<sub>2</sub> loading ที่ภาวะสมดุลสามารถวัดได้จากชุดไทเทรตที่เวลาต่าง ๆ จนกระทั่ง CO<sub>2</sub> loading คงตัว ซึ่งถือว่าระบบเข้าสู่ภาวะสมดุล จากนั้นเปลี่ยนความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วง 12.2–101.3 kPa ส่วนความจวนกลับของตัวทำละลายเอมีนในหน่วย mol CO<sub>2</sub>/L-amine solvent สามารถคำนวณได้จากผลต่างของ CO<sub>2</sub> loading (mol CO<sub>2</sub>/mol amine) ที่อุณหภูมิ 313 K และ 363 K คูณกับความเข้มข้นโดยรวมของตัวทำละลายเอมีน AMP-PZ-TEA (M)
7. ทดลองการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลายเอมีน AMP-PZ-TEA ในรูปสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม ( $K_{Ga}$ ) ภายในหอดูดซึมแบบแพ็ค โดยทำการวัดอุณหภูมิภายในหอดูดซึมตลอดความสูงของหอดูดซึม จนกระทั่งอุณหภูมิคงตัว ซึ่งถือว่าระบบเข้าสู่ภาวะคงตัว จากนั้นวัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊สตลอดความสูงของหอดูดซึม แล้วนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม ( $K_{Ga}$ )
8. ทดลองการคืนสภาพตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA โดยเตรียมตัวทำละลายเอมีนที่ปรับ CO<sub>2</sub> loading เริ่มต้นให้เท่ากับ CO<sub>2</sub> loading ที่สมดุลกับความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 12.2 kPa ที่ได้จากขั้นตอนที่ 6 จากนั้นนำตัวทำละลายดังกล่าวใส่เครื่องคืนสภาพตัวทำละลายควบคุมอุณหภูมิที่ 363 K แล้วจึงวัด CO<sub>2</sub> loading ของสารละลายตัวอย่างจากเครื่องคืนสภาพตัวทำละลาย ทุก 10 นาที เป็นเวลา 100 นาที และนำข้อมูลที่ได้คำนวณอัตราการคืนสภาพเริ่มต้นและภาระทางความร้อนในการคืนสภาพตัวทำละลาย
9. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการทดลอง และเขียนวิทยานิพนธ์

### 1.7 ลำดับขั้นตอนในการศึกษางานวิจัย

ลำดับขั้นตอนในการนำเสนองานวิจัยประกอบไปด้วยเนื้อหาต่าง ๆ ดังนี้

**บทที่ 1** ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ วิธีดำเนินงานวิจัย และลำดับขั้นตอนการนำเสนองานวิจัย

- บทที่ 2** การปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ในภาคอุตสาหกรรม กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ การดูดซึม กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์ ตัวชี้บอกสมรรถนะ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- บทที่ 3** ข้อมูลเกี่ยวกับงานวิจัยเบื้องต้น สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย วิธีดำเนินงานวิจัย ตัวชี้บอกสมรรถนะที่ศึกษา ขั้นตอนการทดลอง และภาวะดำเนินการที่ใช้ในงานวิจัย
- บทที่ 4** สมรรถนะการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ สมรรถนะการคืนสภาพ และสมบัติเชิงกายภาพ ของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA และการประเมินศักยภาพตัวทำละลายเอมีน AMP-PZ-TEA เทียบกับตัวทำละลายเกณฑ์มาตรฐาน
- บทที่ 5** สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ในภาคอุตสาหกรรม

คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สเรือนกระจกที่ปล่อยสู่บรรยากาศในสัดส่วนมากที่สุด ปัจจุบันการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้คาร์บอนไดออกไซด์ถูกปล่อยจากภาคการผลิตพลังงานไฟฟ้า ภาคอุตสาหกรรม ภาคการขนส่ง และภาคครัวเรือน ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนใหญ่มาจากภาคการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเชื้อเพลิงฟอสซิล และภาคอุตสาหกรรมที่ต้องอาศัยกระบวนการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อทำบริสุทธิ์แก๊ส [1] โดยความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สไอเสียที่ปล่อยจากอุตสาหกรรมขึ้นอยู่กับประเภทของอุตสาหกรรมตามที่แสดงในตารางที่ 2.1

**ตารางที่ 2.1** ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สไอเสียที่ปล่อยจากอุตสาหกรรมต่าง ๆ [11]

แหล่งที่มา	ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ ในแก๊สไอเสีย (ร้อยละโดยปริมาตร)
คาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล	
ประเภทของเชื้อเพลิงฟอสซิล	
ถ่านหิน	12-15
แก๊สธรรมชาติ	7-10
น้ำมันเตา	8
กระบวนการแยกแก๊สธรรมชาติ	2-65
การผลิตปูนซีเมนต์	14-3
โรงกลั่น	3-13
อุตสาหกรรมปิโตรเคมี	
เอทิลีน	12
การผลิตแอมโมเนีย	100
การผลิตไฮโดรเจน	15-20
การผลิตเมทานอล	10
พลังงานชีวภาพ	3-8

## 2.2 กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์

การดักจับ การใช้ประโยชน์ หรือการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon capture utilization or storage: CCU หรือ CCS) เป็นหนึ่งในวิธีลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยสู่บรรยากาศจากโรงไฟฟ้าหรือโรงงานอุตสาหกรรม โดยการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์และนำไปเก็บไว้ใต้ดินหรือใต้มหาสมุทรเพื่อไม่ให้คาร์บอนไดออกไซด์กลับสู่บรรยากาศได้อีก ส่วนการนำคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดักจับได้ไปใช้ประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรมทำได้หลากหลาย เช่น การเพิ่มการนำกลับน้ำมัน (Enhanced oil recovery) และ การผลิตน้ำแข็งแห้ง เมทานอล หรือ แก๊สสังเคราะห์ (Syn gas) เป็นต้น [12] กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์แบ่งได้ 3 ประเภท ดังนี้

### 2.2.1 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ (Pre-combustion CO<sub>2</sub> capture)

การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้เป็นเทคนิคที่ใช้ดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จากเชื้อเพลิงก่อนผ่านกระบวนการเผาไหม้ โดยเชื้อเพลิงจะผ่านกระบวนการแปรสภาพเป็นแก๊ส (Gasification) หรือ กระบวนการออกซิเดชันบางส่วน (Partial oxidation) เกิดเป็นแก๊สสังเคราะห์ที่ประกอบด้วยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และ ไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) จากนั้นทำปฏิกิริยา Water gas shift (WGS) เพื่อเปลี่ยนคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ไอน้ำ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ แก๊สผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน จากนั้นแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาเพื่อนำไปใช้ประโยชน์หรือกักเก็บ แล้วนำไฮโดรเจนผ่านกระบวนการเผาไหม้เพื่อผลิตพลังงาน [11] ตามที่แสดงในรูปที่ 2.1 โดยทั่วไป กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้มักจะใช้ในโรงไฟฟ้าแบบ Integrated gasification combined cycle หรือ IGCC อุตสาหกรรมการผลิตปุ๋ย และการผลิตไฮโดรเจน [13]

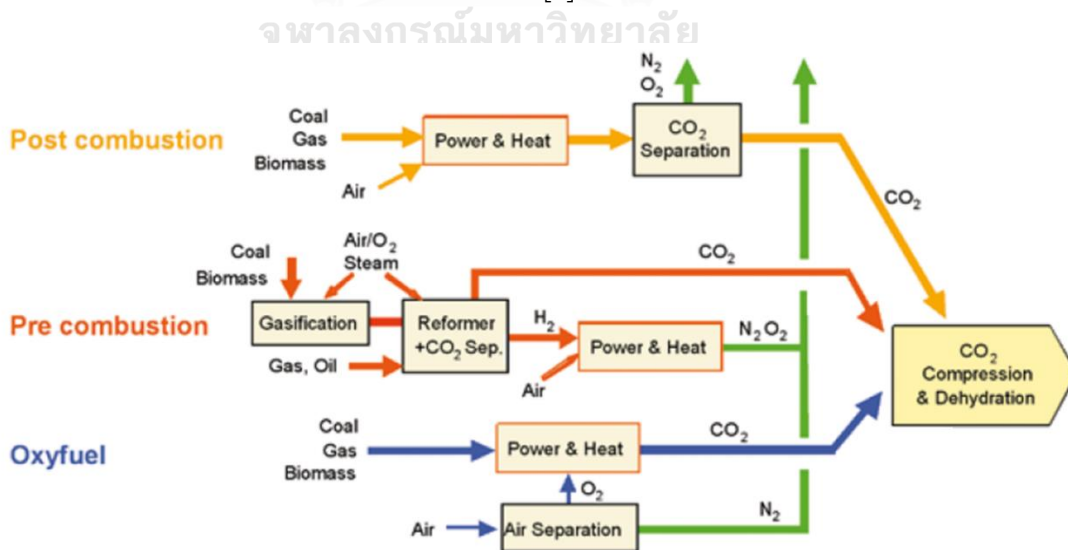
### 2.2.2. การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์ (Oxy-fuel combustion CO<sub>2</sub> capture)

กระบวนการเผาไหม้โดยปกติจะใช้อากาศทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง แต่การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์ใช้ออกซิเจน (O<sub>2</sub>) สำหรับกระบวนการเผาไหม้ ทั้งนี้ กระบวนการที่สำคัญที่สุดสำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยวิธีนี้ คือ การผลิตออกซิเจน เทคโนโลยีแยกออกซิเจนจากอากาศมีหลายวิธี เช่น การแยกที่ภาวะเย็นยวดยิ่ง (Cryogenic separation) ระบบดูดซับแบบสลับความดัน (Adsorption using pressure swing system) และการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่านชนิดพอลิเมอร์ (Polymeric

membrane separation) [11] โดยออกซิเจนที่แยกออกจะนำไปใช้ในกระบวนการเผาไหม้ เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ (Complete combustion) ส่วนการแยกไนโตรเจนออกจาก ระบบ ทำให้ปริมาณไนโตรเจนในแก๊สปล่องไฟ (Flue gas) ลดลง ผลลัพธ์ที่ได้จากการเผาไหม้ จึงมีเพียงคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ จากนั้นทำปฏิกิริยาคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการแยก คาร์บอนไดออกไซด์ออกจากไอน้ำ และนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ทั้งนี้ ข้อดีของการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์ คือ ค่าใช้จ่าย ในการทำให้ออกซิเจนบริสุทธิ์สูง [12]

### 2.2.3. การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ (Post-combustion CO<sub>2</sub> capture)

การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้เป็นหนึ่งในกระบวนการที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ในอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถนำไปติดตั้งต่อจากกระบวนการเผาไหม้ที่มีอยู่เดิม โดยไม่กระทบต่อโครงสร้างกระบวนการ เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลัง การเผาไหม้มีหลายกระบวนการ เช่น การดูดซึม การดูดซับ การแยกด้วยภาวะเย็นยวดยิ่ง และ การแยกโดยใช้เยื่อเลือกผ่าน เป็นต้น การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้เป็นเทคนิค ที่ใช้ดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สปล่องไฟก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 หากเชื้อเพลิงฟอสซิล (เช่น ถ่านหิน หรือ แก๊สธรรมชาติ) มีสิ่งเจือปน จะทำให้แก๊สปล่องไฟ จากกระบวนการเผาไหม้เป็นแก๊สผสมของแก๊สหลายชนิด (เช่น NO<sub>x</sub> SO<sub>x</sub>) ซึ่งส่งผลกระทบต่อ ประสิทธิภาพในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ [2]



รูปที่ 2.1 กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ [14]

### 2.2.3.1. การดูดซึม (Absorption)

การดูดซึมเป็นกระบวนการที่ใช้การถ่ายโอนมวล (Mass transfer) ของคาร์บอนไดออกไซด์ (Absorbate) จากวัฏภาคแก๊สไปยังตัวดูดซึมที่เป็นของเหลว (Liquid absorbent) โดยอาศัยความต่างความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊สและของเหลว (Concentration gradient) เป็นแรงขับ (Driving force) การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวทำละลายเอมีนเป็นหนึ่งในกระบวนการที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เนื่องจากมีประสิทธิภาพการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าร้อยละ 90 ส่วนการคืนสภาพตัวดูดซึมสามารถทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิ หรือ การลดความดัน [12]

### 2.2.3.2. การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นกระบวนการที่โมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ (Adsorbate) ถูกดักจับอยู่บริเวณพื้นผิวของรูพรุนของของแข็ง (Adsorbent) ด้วยพันธะเคมี (Chemical bonding) หรือแรงระหว่างโมเลกุล (Intermolecular force) ทำให้กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานในการคืนสภาพค่อนข้างต่ำ ซึ่งการคืนสภาพตัวดูดซับทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิ หรือ การลดความดัน เนื่องจากการดูดซับเป็นกระบวนการคายความร้อน (Exothermic process) ทั้งนี้ ความจำเพาะของตัวดูดซับ ขนาดและน้ำหนักโมเลกุลของตัวดูดซับ ขนาดและพื้นที่ผิวของรูพรุน และความว่องไวเป็นคุณสมบัติของตัวดูดซับที่สำคัญมาก ตัวดูดซับที่นิยมใช้ในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ เช่น อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) ซิลิกา ( $SiO_2$ ) และไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $TiO_2$ ) เป็นต้น [15]

### 2.2.3.3. การแยกด้วยภาวะเย็นเยือก (Cryogenic separation)

การแยกด้วยภาวะเย็นเยือกเป็นกระบวนการแยกเชิงกายภาพที่อาศัยความต่างของจุดเดือดขององค์ประกอบในแก๊สผสมที่ต้องการแยก ดังนั้น แผนภาพสมดุลวัฏภาค (Equilibrium phase diagram) จึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับชี้ออกวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิและความดันต่าง ๆ [16] ทั้งนี้ กระบวนการนี้เป็นการลดอุณหภูมิและเพิ่มความดันเพื่อให้คาร์บอนไดออกไซด์เปลี่ยนวัฏภาคเป็นของเหลว และองค์ประกอบอื่นของแก๊สผสมยังคงอยู่ในวัฏภาคแก๊ส จากนั้นจึงแยกคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่บริสุทธิ์ออกมา [17]

#### 2.2.3.4. การแยกโดยใช้เยื่อเลือกผ่าน (Membrane separation)

แก๊สปล่อยไฟที่มีคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกป้อนผ่านเยื่อเลือกผ่าน (Membrane) ที่ยอมให้เฉพาะองค์ประกอบที่ต้องการผ่านไปได้ (Permeate) ส่วนองค์ประกอบที่ไม่สามารถผ่านเยื่อเลือกผ่านได้ เรียกว่า Retentate ทั้งนี้ คุณสมบัติของเยื่อเลือกผ่านที่สำคัญ ได้แก่ การยอมให้ผ่านของเยื่อเลือกผ่าน (Membrane permeability) และ สมรรถนะการเลือกของเยื่อเลือกผ่าน (Selectivity) [18] วัสดุที่นิยมใช้ทำเยื่อเลือกผ่าน เช่น เยื่อเลือกผ่านแบบพอลิเมอร์ เยื่อเลือกผ่านแบบซีโอไลต์ และเยื่อเลือกผ่านแบบเซรามิก เป็นต้น [15]

จากกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้น สามารถเปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยของแต่ละเทคโนโลยี ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อดีและข้อด้อยของเทคโนโลยีดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ [15]

เทคโนโลยี	ข้อดี	ข้อด้อย
การดูดซึม	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ประสิทธิภาพการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าร้อยละ 90</li> <li>- สามารถนำไปติดตั้งต่อจากกระบวนการที่มีอยู่เดิมโดยไม่กระทบต่อโครงสร้างกระบวนการ</li> <li>- สามารถคืนสภาพตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ได้</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ภาระทางความร้อนในการคืนสภาพตัวทำละลายค่อนข้างสูง</li> <li>- ตัวทำละลายเสื่อมสภาพ</li> <li>- ตัวทำละลายทำให้อุปกรณ์เกิดการกัดกร่อน</li> </ul>
การดูดซับ	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นเทคโนโลยีที่ไม่ซับซ้อน</li> <li>- สามารถคืนสภาพตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ได้</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ประสิทธิภาพการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ค่อนข้างต่ำ</li> <li>- ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการค่อนข้างสูง</li> </ul>

ตารางที่ 2.2 ข้อดีและข้อด้อยของเทคโนโลยีดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ [15] (ต่อ)

เทคโนโลยี	ข้อดี	ข้อด้อย
การแยกด้วยภาวะเย็นยวดยิ่ง	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เหมาะ สำหรับ ดัก จับ คาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง</li> <li>- ได้คาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นของเหลวและมีความบริสุทธิ์สูง</li> <li>- ไม่มีการใช้สารเคมี</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ใช้พลังงานในการคงอุณหภูมิให้อยู่ในภาวะเย็นยวดยิ่งสูง</li> <li>- ต้นทุนและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง</li> </ul>
การแยกโดยใช้เยื่อเลือกผ่าน	<ul style="list-style-type: none"> <li>- พลังงานสำหรับการแยกต่ำ</li> <li>- ไม่ต้องการพลังงานสำหรับการคืนสภาพ</li> <li>- ไม่มีการใช้สารเคมี</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ความจำเพาะของเยื่อเลือกผ่านค่อนข้างต่ำ</li> <li>- ใช้งานได้ที่อุณหภูมิจำกัด</li> <li>- ต้นทุนสูง</li> </ul>

### 2.3 การดูดซึม

การดูดซึมแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

#### 1. การดูดซึมเชิงกายภาพ (Physical absorption)

การดูดซึมเชิงกายภาพเป็นกระบวนการที่คาร์บอนไดออกไซด์ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีกับตัวทำละลาย ประสิทธิภาพการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$  solubility) ในตัวทำละลาย ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์ถูกดูดซึมได้ดีที่ความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊สสูง ( $\text{CO}_2$  partial pressure) และอุณหภูมิต่ำ ตัวดูดซึมที่นิยมใช้ในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ เช่น ไดเมทิลอีเทอร์ (Dimethylether) โพลีเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol) และโพรพิลีนคาร์บอเนต (Propylene carbonate) เป็นต้น ส่วนการคืนสภาพตัวทำละลายสามารถทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิ หรือ ลดความดัน เนื่องจากกระบวนการนี้ดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีที่ความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊สสูง กระบวนการดูดซึมเชิงกายภาพจึงเหมาะกับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จากอุตสาหกรรมที่มีความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์สูง เช่น อุตสาหกรรมผลิตไฮโดรเจน แอมโมเนีย และเมทานอล เป็นต้น

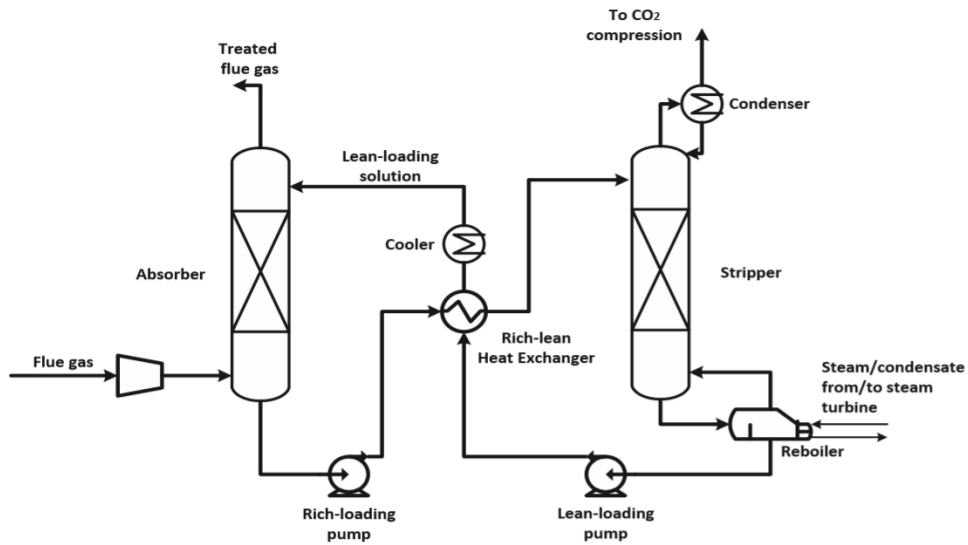


## 2. การดูดซึมเชิงเคมี (Chemical absorption)

การดูดซึมเชิงเคมีเป็นกระบวนการที่คาร์บอนไดออกไซด์เกิดปฏิกิริยาเคมีกับตัวทำละลาย กระบวนการดังกล่าวเป็นหนึ่งในกระบวนการที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากมีประสิทธิภาพการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าร้อยละ 90 สามารถนำไปติดตั้งต่อจากกระบวนการที่มีอยู่เดิมโดยไม่กระทบต่อโครงสร้างกระบวนการ ซึ่งกระบวนการนี้สามารถดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้แม้ความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊สต่ำ โดยตัวทำละลายมีความจำเพาะต่อคาร์บอนไดออกไซด์สูง สามารถคืนสภาพกลับมาใช้ใหม่ได้ และมีค่าใช้จ่ายอันสมควร ตัวดูดซึมที่นิยมใช้ในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ เช่น ตัวทำละลายเอมีน และ แอมโมเนีย เป็นต้น [15]

### 2.3.1 การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ฐานเอมีน (Amine-based CO<sub>2</sub> absorption)

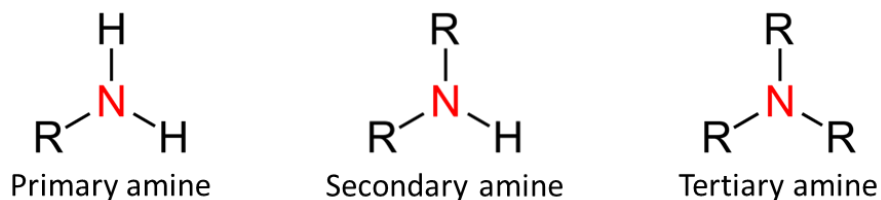
กระบวนการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวทำละลายเอมีนประกอบด้วย 2 ส่วนคือ หอดูดซึม (Absorber) และหอคืนสภาพ (Regenerator) หรือ หอไล่แก๊ส (Stripper) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 แก๊สปล่องไฟที่ปรับสภาพแล้วจะป้อนเข้าสู่ด้านล่างของหอดูดซึม ส่วนตัวทำละลายเอมีนถูกป้อนเข้าสู่ด้านบนของหอดูดซึม ซึ่งเป็นการทำให้ตัวดูดซึมและตัวถูกดูดซึมไหลสวนทางกันภายในหอดูดซึม การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวทำละลายเอมีนมักมีอุณหภูมิภายในหอดูดซึมอยู่ในช่วง 313–333 K แก๊สที่บำบัดแล้วจะมีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง (CO<sub>2</sub>-lean gas) จากนั้นจึงผ่านการล้างด้วยน้ำ (Water wash) แล้วปล่อยออกทางด้านบนของหอดูดซึม ส่วนตัวทำละลายเอมีนที่ผ่านการดูดซึมแล้วจะมีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น (Rich solvent) และถูกป้อนไปยังอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อเพิ่มอุณหภูมิก่อนป้อนเข้าด้านบนของหอคืนสภาพ เนื่องจากการดูดซึมเป็นกระบวนการคายความร้อน การคืนสภาพจึงทำได้โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 363–393 K เพื่อให้ตัวทำละลายเอมีนปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ ตัวทำละลายเอมีนที่มีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง (Lean solvent) จะถูกลดอุณหภูมิโดยแลกเปลี่ยนความร้อนกับตัวทำละลายเอมีนที่ผ่านการดูดซึมแล้ว จากนั้นจึงส่งกลับไปใช้ใหม่ที่หอดูดซึม



รูปที่ 2.2 กระบวนการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ตัวทำละลายเอมีน [19]

### 2.3.2 ตัวทำละลายเอมีนที่ใช้ในการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์

การเลือกเอมีนที่มีประสิทธิภาพการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์สูงเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ปรับปรุงกระบวนการดูดซึมเชิงเคมี เนื่องจากไม่กระทบต่อโครงสร้างกระบวนการของหอดูดซึมที่มีอยู่เดิม เพียงแต่ต้องปรับพารามิเตอร์ดำเนินการให้เหมาะสมเท่านั้น คุณสมบัติของตัวทำละลายเอมีนที่สำคัญ ได้แก่ สภาพละลายได้ในน้ำ สภาพความเป็นเบส เสถียรภาพทางความร้อน การเสื่อมของตัวทำละลาย การกัดกร่อน จลนพลศาสตร์การเกิดปฏิกิริยา ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ ภาระทางความร้อนในการคืนสภาพ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยตัวทำละลายเอมีนที่มีความจุการดูดซึมสูง มีความไวปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์สูง และต้องการพลังงานในการคืนสภาพตัวทำละลายต่ำจะทำให้ประสิทธิภาพการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์สูง [20] โดยเอมีนแบ่งเป็น 3 ประเภท ได้แก่ เอมีนปฐมภูมิ เอมีนทุติยภูมิ และเอมีนตติยภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของเอมีนปฐมภูมิ เอมีนทุติยภูมิ และเอมีนตติยภูมิ

### 1. เอมีนปฐมภูมิ (Primary amine)

เอมีนปฐมภูมิ คือ เอมีนที่มีหมู่แอลคิล (Alkyl group: -R) หรือแอริล (Aryl group) จำนวน 1 หมู่ที่เกิดพันธะกับไนโตรเจน ตัวอย่างเอมีนปฐมภูมิดั้งเดิม เช่น Monoethanolamine (MEA) และ 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP) เป็นต้น MEA เป็นเอมีนที่ใช้สำหรับดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในอุตสาหกรรมเป็นระยะเวลานาน จึงนิยมใช้ MEA ความเข้มข้น 5 M เป็นตัวทำละลายเกณฑ์เปรียบเทียบ ซึ่ง MEA มีความไวปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์สูง แต่ผลิตภัณฑ์ที่เกิด คือ คาร์บาเมต (Carbamate) ที่มีความเสถียร ส่งผลให้ใช้พลังงานในการคืนสภาพตัวทำละลายเอมีนสูง ซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายดำเนินการเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ความจุการดูดซับของ MEA ถูกจำกัดด้วยปริมาณสารสัมพันธ์ (Stoichiometry) ที่  $0.5 \text{ mol CO}_2/\text{mol amine}$  ส่วน AMP เป็นเอมีนปฐมภูมิที่มีโครงสร้างกีดขวางเนื่องจากขนาด (Sterically hindered primary amine) จึงมีความไวปฏิกิริยาไม่สูงมากเมื่อเทียบกับ MEA แต่โครงสร้างที่กีดขวางของ AMP มีส่วนทำให้พลังงานในการคืนสภาพตัวทำละลายต่ำกว่า MEA เนื่องจากคาร์บาเมตของ AMP ไม่เสถียร จึงเกิดการแยกสลายด้วยน้ำ (Hydrolysis) และได้ผลิตภัณฑ์เป็น AMP และ ไบคาร์บอเนต (Bicarbonate:  $\text{HCO}_3^-$ ) ซึ่งความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาการเกิดไบคาร์บอเนตน้อยกว่าการเกิดคาร์บาเมต นอกจากนี้ การแยกสลายด้วยน้ำของคาร์บาเมตของ AMP ทำให้มีเอมีนอิสระที่ดักจับจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้น ส่งผลให้ AMP มีความจุการดูดซับสูงสุดได้ถึง  $1 \text{ mol CO}_2/\text{mol amine}$  อย่างไรก็ตาม AMP มีข้อจำกัดคือ การตกตะกอนที่ความเข้มข้นเอมีนสูง และ  $\text{CO}_2$  loading สูง [8]

### 2. เอมีนทุติยภูมิ (Secondary amine)

เอมีนทุติยภูมิ คือ เอมีนที่มีหมู่แอลคิลหรือแอริล จำนวน 2 หมู่ที่เกิดพันธะกับไนโตรเจน ตัวอย่างเอมีนทุติยภูมิดั้งเดิม เช่น Diethanolamine (DEA) และ Piperazine (PZ) เป็นต้น โดย DEA เป็นเอมีนที่มีความไวปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่า MEA และมีข้อจำกัดเช่นเดียวกับเอมีนปฐมภูมิ คือ ต้องการพลังงานในการคืนสภาพตัวทำละลายสูง และมีความจุการดูดซับทางทฤษฎีจำกัดที่  $0.5 \text{ mol CO}_2/\text{mol amine}$  ส่วน PZ เป็นเอมีนทุติยภูมิแบบวงที่มีเอมีน 2 หมู่ (Cyclical secondary diamine) จากโครงสร้างแบบพิเศษของ PZ ทำให้ PZ มีคุณสมบัติที่แตกต่างจากเอมีนทุติยภูมิแบบทั่วไป คือ PZ มีกลไกการเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์และมีความจุการดูดซับสูงมาก


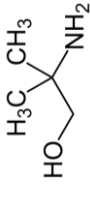
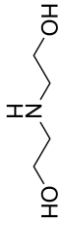
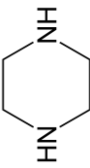
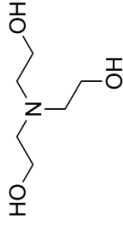
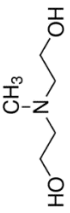
แต่ข้อจำกัดของ PZ คือ ต้องการพลังงานในการคืนสภาพตัวทำละลายสูง อีกทั้งยังตกตะกอนที่ความเข้มข้นเอมีนสูงเนื่องจาก PZ เป็นของแข็งที่มีสภาพการละลายในน้ำต่ำ นอกจากนี้ PZ ยังตกตะกอนเมื่อสารละลายมี CO<sub>2</sub> loading สูง โดยทั่วไปจึงนิยมใช้ PZ ผสมกับเอมีนอื่น ๆ เพื่อเพิ่มจลพลศาสตร์และความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยรวมของตัวทำละลายผสม

### 3. เอมีนตติยภูมิ (Tertiary amine)

เอมีนตติยภูมิ คือ เอมีนที่หมู่อะมิโน (Amino group) เกิดพันธะกับแอลคิลหรือเอริล จำนวน 3 หมู่ ไม่มีพันธะระหว่างไฮโดรเจนและไนโตรเจน ตัวอย่างเอมีนตติยภูมิตั้งเดิม เช่น Triethanolamine (TEA) และ Methyl-diethanolamine (MDEA) ซึ่งเอมีนประเภทนี้มีภาระทางความร้อนในการคืนสภาพต่ำ เนื่องจากเอมีนไม่ได้เกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์โดยตรง แต่ทำหน้าที่เป็นเบสในการเกิดปฏิกิริยาแยกสลายด้วยน้ำของคาร์บอนไดออกไซด์ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไบคาร์บอเนตและเอมีนโปรโตเนต (Protonated amine) ซึ่งคายความร้อนจากปฏิกิริยาน้อยกว่าการเกิดคาร์บาเมต ทำให้เอมีนตติยภูมิใช้พลังงานในการคืนสภาพตัวทำละลายต่ำกว่าเอมีนปฐมภูมิและเอมีนทุติยภูมิ อย่างไรก็ตาม เอมีนตติยภูมิมีความไวปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่าตัวทำละลายเอมีนประเภทอื่น [20]

ตัวทำละลายเอมีนตั้งเดิม (Conventional amine) ที่ใช้สำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ได้แก่ MEA AMP DEA PZ TEA และ MDEA แสดงในตารางที่ 2.3 [21] ซึ่งเอมีนแต่ละชนิดมีข้อดีและข้อด้อยต่างกัน สรุปได้ดังตารางที่ 2.4 ทั้งนี้ ในปัจจุบันนิยมนำเอมีนมาผสมกันเพื่อรวมข้อดีของเอมีนแต่ละชนิดและชดเชยข้อด้อยเอมีนอีกชนิดเพื่อให้ได้ตัวทำละลายเอมีนที่เหมาะสมกับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งในเชิงการดูดซับและการคืนสภาพตัวทำละลาย

ตารางที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีและลักษณะเฉพาะของเอมีนตั้งเดิม

เอมีน	ประเภท	สูตรเคมี	CAS No.	มวลโมเลกุล (g/mol)	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	จุดหลอมเหลว (°C)	จุดเดือด (°C)	โครงสร้างทางเคมี
MEA	เอมีนปฐมภูมิ	C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> NO	141-43-5	61.08	1.012	10.4	171	
AMP	เอมีนปฐมภูมิที่มีโครงสร้าง กิ่งขวางเนื่องจากขนาด	C <sub>4</sub> H <sub>11</sub> NO	124-68-5	89.14	0.934	25	165	
DEA	เอมีนทุติยภูมิ	C <sub>4</sub> H <sub>11</sub> NO <sub>2</sub>	111-42-2	105.14	1.097	28	271.1	
PZ	เอมีนทุติยภูมิแบบวงที่มี เอมีน 2 หมู่	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> N <sub>2</sub>	110-85-0	86.14	1.100	106	146	
TEA	เอมีนตติยภูมิ	C <sub>6</sub> H <sub>15</sub> NO <sub>3</sub>	102-71-6	149.19	1.124	21.6	335.4	
MDEA	เอมีนตติยภูมิ	C <sub>2</sub> H <sub>17</sub> NO <sub>2</sub>	105-59-9	119.16	1.038	-21	274.1	

ตารางที่ 2.4 ข้อดีและข้อด้อยของตัวทำละลายเอมีนดั้งเดิม [3]

เอมีน	ข้อดี	ข้อด้อย
MEA	<ul style="list-style-type: none"> <li>- จลนพลศาสตร์การเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์สูง</li> <li>- ราคาไม่แพง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ภาระทางความร้อนในการคืนสภาพตัวทำละลายสูง</li> <li>- ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จำกัด</li> </ul>
AMP	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูง</li> <li>- ภาระทางความร้อนในการคืนสภาพตัวทำละลายต่ำ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ตกตะกอนที่ความเข้มข้นสูง</li> <li>- จลนพลศาสตร์การเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ปานกลาง</li> </ul>
DEA	<ul style="list-style-type: none"> <li>- จลนพลศาสตร์การเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์สูง</li> <li>- ราคาไม่แพง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ภาระทางความร้อนในการการคืนสภาพตัวทำละลายสูง</li> <li>- ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จำกัด</li> </ul>
PZ	<ul style="list-style-type: none"> <li>- จลนพลศาสตร์การเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์สูงมาก</li> <li>- ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ตกตะกอนที่ความเข้มข้นสูงเกินไป</li> <li>- ภาระทางความร้อนในการการคืนสภาพตัวทำละลายสูง</li> </ul>
TEA	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ภาระทางความร้อนในการการคืนสภาพตัวทำละลายต่ำ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- จลนพลศาสตร์การเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ</li> <li>- ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ</li> </ul>
MDEA	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ภาระทางความร้อนในการการคืนสภาพตัวทำละลายต่ำ</li> <li>- ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- จลนพลศาสตร์การเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ</li> </ul>

## 2.4 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์

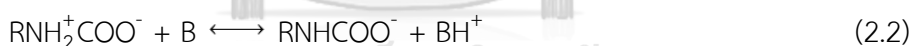
การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวทำละลายเอมีนเป็นการดูดซับเชิงเคมี ซึ่งปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับตัวทำละลายเอมีนเป็นปฏิกิริยากรดเบส เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สกรดและเอมีนเป็นเบส ทั้งนี้ กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเอมีนกับคาร์บอนไดออกไซด์แตกต่างกันไปตามประเภทของเอมีน ดังนี้

### 2.4.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเอมีนปฐมภูมิและเอมีนทุติยภูมิกับคาร์บอนไดออกไซด์

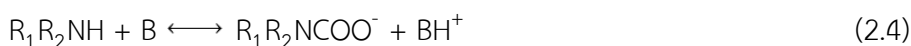
กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเอมีนปฐมภูมิและเอมีนทุติยภูมิกับคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ได้รับการยอมรับ ได้แก่ กลไกสารมัธยันต์ไอออนขั้วคู่ (Zwitterion intermediate mechanism) และ กลไกสามโมเลกุล (Termolecular mechanism)

กลไกสารมัธยันต์ไอออนขั้วคู่ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ในขั้นแรกเป็นปฏิกิริยาระหว่างเอมีนปฐมภูมิหรือเอมีนทุติยภูมิ ( $\text{RNH}_2$  หรือ  $\text{R}_1\text{R}_2\text{NH}$ ) กับคาร์บอนไดออกไซด์ เกิดเป็นสารมัธยันต์ไอออนขั้วคู่ ( $\text{RNH}_2^+\text{COO}^-$  หรือ  $\text{R}_1\text{R}_2\text{NH}^+\text{COO}^-$ ) ดังแสดงในสมการที่ (2.1) และ (2.3) ตามลำดับ ขั้นที่สองเกิดปฏิกิริยาดีโปรตอนชัน (Deprotonation) ของสารมัธยันต์ไอออนขั้วคู่ กล่าวคือ สารมัธยันต์ไอออนขั้วคู่ให้โปรตอน ( $\text{H}^+$ ) กับเบส (B) เกิดผลิตภัณฑ์ คือ คาร์บาเมตของเอมีนปฐมภูมิหรือเอมีนทุติยภูมิ ( $\text{RNHCOO}^-$  หรือ  $\text{R}_1\text{R}_2\text{NCOO}^-$ ) ดังแสดงในสมการที่ (2.2) และ (2.4) ตามลำดับ ทั้งนี้ เบส (B) สามารถเป็นเอมีนปฐมภูมิ ( $\text{RNH}_2$ ) เอมีนทุติยภูมิ ( $\text{R}_1\text{R}_2\text{NH}$ ) ไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) หรือ น้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ได้

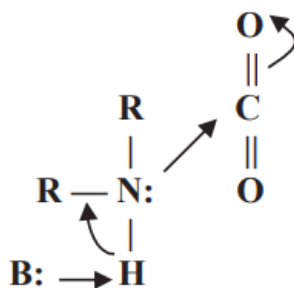
กลไกสารมัธยันต์ไอออนขั้วคู่ของเอมีนปฐมภูมิ



กลไกสารมัธยันต์ไอออนขั้วคู่ของเอมีนทุติยภูมิ



กลไกสามโมเลกุลเป็นปฏิกิริยาการเกิดคาร์บาเมตของเอมีนปฐมภูมิและเอมีนทุติยภูมิ ในขั้นตอนเดียวดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยไม่เกิดสารมัธยันต์ไอออนขั้วคู่ และได้ผลิตภัณฑ์ คือ คาร์บาเมตของเอมีนปฐมภูมิหรือเอมีนทุติยภูมิและโปรตอนของเบส ( $\text{BH}^+$ ) ดังแสดงในสมการที่ (2.5) และ (2.6) ตามลำดับ [21]



รูปที่ 2.4 กลไกสามโมเลกุลสำหรับปฏิกิริยาการเกิดคาร์บาเมต [4]

กลไกสามโมเลกุลสำหรับปฏิกิริยาการเกิดคาร์บาเมตของเอมีนปฐมภูมิ



กลไกสามโมเลกุลสำหรับปฏิกิริยาการเกิดคาร์บาเมตของเอมีนทุติยภูมิ



โปรตอนของเบส (BH<sup>+</sup>) ที่เกิดขึ้นสามารถให้โปรตอนกับเอมีนปฐมภูมิและเอมีนทุติยภูมิ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโปรตอนของเอมีนปฐมภูมิหรือเอมีนทุติยภูมิ (RNH<sub>3</sub><sup>+</sup> หรือ R<sub>1</sub>R<sub>2</sub>NH<sub>2</sub><sup>+</sup>) ดังแสดงในสมการที่ (2.7) และ (2.8) ตามลำดับ

ปฏิกิริยาการเกิดโปรตอนของเอมีนปฐมภูมิ



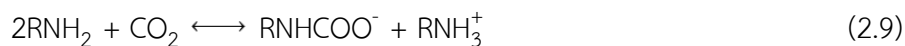
ปฏิกิริยาการเกิดโปรตอนของเอมีนทุติยภูมิ



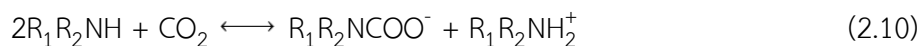
สมการที่ (2.9) และ (2.10) แสดงปฏิกิริยารวม (Overall reaction) ของเอมีนปฐมภูมิหรือเอมีนทุติยภูมิกับคาร์บอนไดออกไซด์ตามลำดับ ซึ่งเกิดจากการรวมสมการกลไกสามโมเลกุลของเอมีนปฐมภูมิหรือเอมีนทุติยภูมิกับสมการปฏิกิริยาการเกิดโปรตอนของเอมีนปฐมภูมิหรือเอมีนทุติยภูมิ จากปริมาณสารสัมพันธ์ (Stoichiometry) ของการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์ จึงใช้เอมีน 2 โมเลกุลสำหรับทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมเลกุล ดังนั้น ความจุการดูดซับของเอมีนปฐมภูมิและเอมีนทุติยภูมิจึงจำกัดที่ 0.5 mol CO<sub>2</sub>/mol amine



ปฏิกิริยารวมของเอมีนปฐมภูมิกับคาร์บอนไดออกไซด์

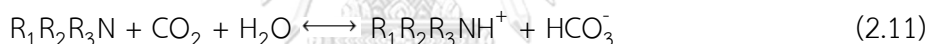


ปฏิกิริยารวมของเอมีนทุติยภูมิกับคาร์บอนไดออกไซด์



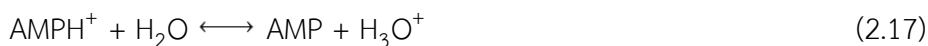
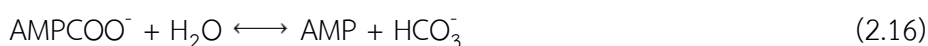
#### 2.4.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเอมีนตติยภูมิกับคาร์บอนไดออกไซด์

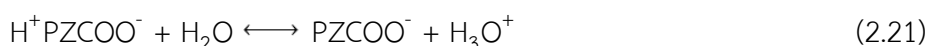
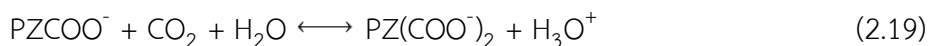
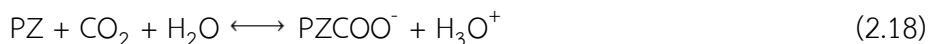
กลไกการแยกสลายด้วยน้ำโดยมีเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Base-catalyzed hydration mechanism) เป็นกลไกที่ใช้สำหรับอธิบายการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเอมีนตติยภูมิกับคาร์บอนไดออกไซด์ ดังแสดงในสมการที่ 2.11 เนื่องจากเอมีนตติยภูมิ ( $\text{R}_1\text{R}_2\text{R}_3\text{N}$ ) ไม่เกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์โดยตรง แต่จะทำหน้าที่เป็นเบสสำหรับเร่งปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยน้ำ เกิดผลิตภัณฑ์เป็นเอมีนโปรโตเนต ( $\text{R}_1\text{R}_2\text{R}_3\text{NH}^+$ ) และไบคาร์บอเนต ( $\text{HCO}_3^-$ ) [4]



#### 2.4.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของตัวทำละลายเอมีนผสม AMP-PZ-TEA กับคาร์บอนไดออกไซด์

กลไกการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมดของเอมีนผสม AMP-PZ-TEA กับคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้





สมการที่ (2.12) ถึง (2.14) เป็นปฏิกิริยาการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization reaction) ของน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ สมการที่ (2.15) เป็นปฏิกิริยาระหว่าง AMP และคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ AMP มีโครงสร้างกีดขวางเนื่องจากขนาด คาร์บาเมตของ AMP ไม่เสถียรจึงมีความเสถียรต่ำและเกิดปฏิกิริยาแยกสลายด้วยน้ำ ดังแสดงในสมการที่ (2.16) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอมีนอิสระและไบคาร์บอเนต ส่งผลให้ AMP มีความจุการดูดซึ่มสูงสุดได้ถึง 1 mol CO<sub>2</sub>/mol amine ซึ่งแตกต่างจากเอมีนปฐมภูมิทั่วไป ทั้งนี้ โพรโตนเนตของ AMP ยังเกิดปฏิกิริยาแยกสลายด้วยน้ำได้ ดังแสดงในสมการที่ (2.17)

ปฏิกิริยาระหว่าง PZ และคาร์บอนไดออกไซด์เกิดผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บาเมตของ PZ ในรูปแบบต่าง ๆ ดังแสดงในสมการที่ (2.18) ถึง (2.21) เนื่องจาก PZ เป็นเอมีนทุติยภูมิแบบวง ที่มีเอมีน 2 หมู่ ทั้งนี้ เบส (B) สามารถเป็นเอมีน (AMP PZ และ TEA) คาร์บาเมตของ PZ (PZCOO<sup>-</sup>) ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH<sup>-</sup>) น้ำ (H<sub>2</sub>O) และโพรโตนเนตของ PZ (PZH<sup>+</sup>) ได้ [8]

ส่วน TEA ที่ซึ่งเป็นเอมีนตติยภูมิ เกิดกลไกการแยกสลายด้วยน้ำโดยมีเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดย TEA ทำหน้าที่เป็นเบสสำหรับช่วยเร่งปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยน้ำ เกิดผลิตภัณฑ์เป็นโพรโตนเนตของ TEA (TEAH<sup>+</sup>) และไบคาร์บอเนต (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) ดังแสดงในสมการที่ (2.24)

## 2.5 ตัวชี้บอกสมรรถนะ

ตัวชี้บอกสมรรถนะ (Performance indicator) ของตัวทำละลายเอมีนที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่ สมบัติเชิงกายภาพในรูปของพฤติกรรมการตกตะกอน ความหนาแน่น และความหนืด ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ความจวนกลับ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม ( $K_{Ga}$ ) และภาระทางความร้อนในการคืนสภาพตัวทำละลาย โดยใช้ตัวชี้บอกสมรรถนะเหล่านี้เพื่อประเมินศักยภาพการดักจับและคืนสภาพของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA เปรียบเทียบกับตัวทำละลายดั้งเดิม MEA

### 2.5.1 สมบัติเชิงกายภาพ (Physical property)

สมบัติเชิงกายภาพของตัวทำละลายเอมีนเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการออกแบบกระบวนการทางวิศวกรรม ทั้งด้านการจำลองกระบวนการ (Process simulation) การดำเนินการในโรงงานต้นแบบ (Pilot plant operation) และการออกแบบโรงงาน (Plant design) ทั้งนี้ กระบวนการดูดซับและการคืนสภาพตัวทำละลายมีอุปกรณ์หลักที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ หอดูดซับ หอคืนสภาพ ป้อนสำหรับควบคุมการไหล และอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งการออกแบบอุปกรณ์เหล่านี้ต้องใช้สมบัติเชิงกายภาพ เช่น ความหนาแน่น และ ความหนืด เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบพารามิเตอร์เชิงอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamics parameter) เช่น อัตราการไหลของแก๊สขาเข้า และ อัตราการไหลของตัวทำละลายเอมีนขาเข้า อีกทั้ง ยังใช้สำหรับการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยา (Reaction kinetics) และการถ่ายโอนมวล (Mass transfer) เช่น อัตราการเกิดปฏิกิริยารวม ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง Enhancement factor และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม เป็นต้น [22]

#### 1. พฤติกรรมการตกตะกอน (Precipitation behavior)

การตกตะกอนของตัวทำละลาย คือ การก่อตัวเป็นของแข็งของเอมีนในสารละลาย ซึ่งหากเกิดตะกอนของตัวทำละลายเอมีนในหอดูดซับจะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง และต้องหยุดดำเนินการเพื่อทำความสะอาดหอดูดซับด้วยไอน้ำ เอมีนที่มีแนวโน้มที่จะตกตะกอน คือ AMP และ PZ โดย AMP เป็นเอมีนที่โครงสร้างกีดขวางเนื่องจากขนาดจุดหลอมเหลวใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้องและมีสภาพละลายในน้ำไม่สูงมาก เมื่อใช้ AMP ที่ความเข้มข้นสูงเกินไปจึงเกิดตะกอนได้ ส่วน PZ เป็นเอมีนของแข็ง มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ ทำให้ PZ ตกตะกอนเมื่อใช้ที่ความเข้มข้นไม่เหมาะสม ทั้งนี้ การผ่านคาร์บอนไดออกไซด์ลงในสารละลายเพื่อเพิ่ม  $\text{CO}_2$  loading เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เอมีนทั้งสองตกตะกอน เนื่องจาก

เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างเอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์ ได้ผลผลิตเป็นคาร์บาเมตของเอมีน จากโครงสร้างทางเคมีและมวลโมเลกุลของ AMP และ PZ (ตารางที่ 2.3) ทำให้เกิดเป็นคาร์บาเมตที่มี แนวนอนในการเกิดตะกอนมากกว่าเอมีนชนิดอื่น ดังนั้น เมื่อสารละลายมี CO<sub>2</sub> loading สูงขึ้น จึงอาจทำให้เกิดตะกอนของเอมีนได้

## 2. ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่น คือ อัตราส่วนของมวลต่อหน่วยปริมาตร ดังแสดงในสมการที่ (2.25) โดยแสดง ถึงความหนาแน่นของโมเลกุลในหนึ่งหน่วยปริมาตร ซึ่งความหนาแน่นเป็นสมบัติพื้นฐานเชิงกายภาพ เฉพาะตัวของสารแต่ละชนิด โดยทั่วไปหน่วยของความหนาแน่นที่นิยมใช้ คือ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์ เมตร (kg/m<sup>3</sup>) และ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm<sup>3</sup>) ทั้งนี้ ความหนาแน่นของตัวทำละลายเอมีน ผสมขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของเอมีนและอุณหภูมิ โดยความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ เอมีนเพิ่มขึ้น และความหนาแน่นลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิทำให้โมเลกุล เกิดการสั่นและอยู่ห่างกันมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาตรเพิ่มขึ้น

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.25)$$

เมื่อ  $\rho$  คือ ความหนาแน่น (kg/m<sup>3</sup> หรือ g/cm<sup>3</sup>)

$m$  คือ มวลของสาร (kg หรือ g)

$V$  คือ ปริมาตรของสาร (m<sup>3</sup> หรือ cm<sup>3</sup>)

สมการที่ (2.26) ถึง (2.30) คือ สมการ Redlich-Kister สำหรับปริมาตรเชิงโมลส่วนเกิน (Excess molar volume) ที่ใช้พัฒนาสหสัมพันธ์เชิงทำนาย (Predictive correlation) เพื่อประมาณ ความหนาแน่นของตัวทำละลายเอมีนผสม AMP-PZ-TEA ซึ่งในสารละลายผสมประกอบด้วย สารองค์ประกอบ 4 ชนิด ได้แก่ AMP (แทนด้วย  $i=1$ ) PZ (แทนด้วย  $i=2$ ) TEA (แทนด้วย  $i=3$ ) และ น้ำ (แทนด้วย  $i=4$ )

$$\rho_m = \frac{(x_1M_1 + x_2M_2 + x_3M_3 + x_4M_4)}{V_m} \quad (2.26)$$

$$V_m = V^E + (x_1V_1^0 + x_2V_2^0 + x_3V_3^0 + x_4V_4^0) \quad (2.27)$$

$$V^E = V_{12}^E + V_{13}^E + V_{14}^E + V_{23}^E + V_{24}^E + V_{34}^E \quad (2.28)$$

$$V_{ij}^E = x_i x_j \sum_{k=0}^2 [(A_k (x_i - x_j)^k)] \quad (2.29)$$

$$A_k = a + b(T) + c(T^2) \quad (2.30)$$

เมื่อ  $\rho_m$  คือ ความหนาแน่นของสารละลายผสม ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$M_i$  คือ มวลโมเลกุลขององค์ประกอบ  $i$  ( $\text{g}/\text{mol}$ )

$V_m$  คือ ปริมาตรเชิงโมลของสารละลายผสม (Molar volume of the mixture:  $\text{cm}^3/\text{mol}$ )

$V^E$  คือ ปริมาตรเชิงโมลส่วนเกิน (Excess molar volume:  $\text{cm}^3/\text{mol}$ )

$V_i^0$  คือ ปริมาตรต่อโมลของสารบริสุทธิ์  $i$  ( $\text{cm}^3/\text{mol}$ )

$x_i$  คือ สัดส่วนเชิงโมลขององค์ประกอบ  $i$  ( $\text{mol}/\text{mol}$ )

$x_j$  คือ สัดส่วนเชิงโมลขององค์ประกอบ  $j$  ( $\text{mol}/\text{mol}$ )

$A_k$  คือ สัมประสิทธิ์ที่ขึ้นกับอุณหภูมิ (Temperature dependent coefficient:  $\text{cm}^3/\text{mol}$ ) ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ดังแสดงในสมการที่ (2.30) โดย  $a$  ( $\text{cm}^3/\text{mol}$ )  $b$  ( $\text{cm}^3/\text{mol}\cdot\text{K}$ ) และ  $c$  ( $\text{cm}^3/\text{mol}\cdot\text{K}^2$ ) เป็นพารามิเตอร์คงตัว

$T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (Kelvin: K)

ความหนาแน่นของสารละลายผสม ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) คำนวณได้จาก อัตราส่วนระหว่างค่าเฉลี่ยเชิงโมลของมวลโมเลกุลแต่ละองค์ประกอบในสารผสม ( $\text{g}/\text{mol}$ ) และปริมาตรเชิงโมลของสารละลายผสม ( $\text{cm}^3/\text{mol}$ ) ดังแสดงในสมการที่ (2.26) ปริมาตรเชิงโมลส่วนเกิน หรือ Excess molar volume ( $V^E$ ) จากสมการที่ (2.27) คือ ความต่างระหว่างปริมาตรเชิงโมลของสารละลายผสมที่ไม่เป็นอุดมคติ กับสารละลายผสมอุดมคติต่อ โมลของสารละลาย ซึ่งบ่งบอกถึงการเบี่ยงเบนพฤติกรรมของสารละลายที่ไม่เป็นอุดมคติไปจากสารละลายอุดมคติ โดยทั่วไป ปริมาตรเชิงโมลส่วนเกินมีค่าเป็นลบ กล่าวคือ ปริมาตรเชิงโมลของสารละลายผสมอุดมคติมากกว่าปริมาตรเชิงโมลของสารละลายผสมที่ไม่เป็นอุดมคติ เนื่องจากสารละลายอุดมคติไม่มีอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างโมเลกุล ส่วนสารละลายที่ไม่เป็นอุดมคติมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรตามความแตกต่างของโครงสร้างและอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุล เมื่อมีอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลจะทำให้โมเลกุลอยู่ใกล้ชิดกันมากขึ้น

ส่งผลให้ปริมาตรเชิงโมลของสารละลายผสมที่ไม่เป็นอุดมคติลดลง [23] ส่วนพารามิเตอร์คงตัว  $a$ ,  $b$  และ  $c$  และ สำหรับสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นกับอุณหภูมิ ( $A_k$ ) สามารถคำนวณได้จากการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear regression analysis)

### 3. ความหนืด (Viscosity)

ความหนืด คือ อัตราส่วนระหว่างความเค้นเฉือน (Shear stress) กับอัตราการผิดรูป (Rate of deformation) ซึ่งอยู่ในรูปการเปลี่ยนแปลงความเร็ว ดังแสดงในสมการที่ (2.30) ทั้งนี้ ความหนืดแสดงถึงความต้านทานการไหลของของไหล ของไหลที่มีความหนืดต่ำจะมีความต้านทานการไหลต่ำ ซึ่งความหนืดของของไหลแบบนิวโตเนียน (Newtonian fluid) ที่อุณหภูมิหนึ่งมีค่าคงตัว

$$\tau = \eta \frac{du}{dy} \quad (2.30)$$

เมื่อ  $\tau$  คือ ความเค้นเฉือน ( $\text{N/m}^2$ )

$\eta$  คือ ความหนืดสัมบูรณ์หรือความหนืดพลวัต (Absolute หรือ dynamic viscosity:  $\text{N}\cdot\text{s/m}^2$ )

$\frac{du}{dy}$  คือ อัตราการผิดรูป ( $1/\text{s}$ )

ส่วนความหนืดจลนศาสตร์ (Kinematic viscosity) คือ ความต้านทานการไหลของของเหลว ภายใต้แรงโน้มถ่วง ซึ่งสามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างความหนืดพลวัตกับความหนาแน่น ดังแสดงในสมการที่ (2.31)

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (2.31)$$

เมื่อ  $\nu$  คือ ความหนืดจลนศาสตร์ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$\eta$  คือ ความหนืดพลวัต ( $\text{N}\cdot\text{s/m}^2$ )

$\rho$  คือ ความหนาแน่น ( $\text{kg/m}^3$ )

โดยทั่วไปความหนืดของตัวทำละลายเอมีนผสมขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของเอมีนและอุณหภูมิ ความหนืดมักลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากแรงระหว่างโมเลกุลอ่อนลง ทั้งนี้ ความหนืดของของเหลวเป็นสมบัติเชิงกายภาพที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดกำลังของปั๊มที่ใช้ควบคุมการไหลภายในท่อ

[24] อีกทั้ง ยังส่งผลต่อการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ คือ เมื่อความหนืดของตัวทำละลายเอมีนมากเกินไป โมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์จะแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยากับเอมีนในวัฏภาคของเหลวได้ยาก ประสิทธิภาพการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จึงลดลง [25] นอกจากนี้ ความหนืดยังส่งผลต่อพื้นที่ผิวสัมผัสในหนึ่งหน่วยปริมาตรระหว่างวัฏภาคของเหลวและแก๊สภายในหอคูดซิมอีกด้วย เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสเกิดขึ้นจากการไหลของของเหลวบนพื้นผิววัสดุบรรจุในหอคูดซิม ตัวทำละลายเอมีนที่มีความหนืดมากทำให้เกิดชั้นของเหลวที่มีความหนา ส่งผลต่อพื้นที่ผิวสัมผัสในหนึ่งหน่วยปริมาตรลดลง [26]

สมการที่ (2.32) และ (2.33) แสดงแบบจำลอง Grunberg–Nissan สำหรับพัฒนาหสัมพันธ์เชิงทำนาย เพื่อประมาณความหนืดของตัวทำละลายเอมีนผสม AMP–PZ–TEA ซึ่งในสารละลายผสมประกอบด้วยองค์ประกอบ 4 ชนิด ได้แก่ AMP (แทนด้วย  $i=1$ ) PZ (แทนด้วย  $i=2$ ) TEA (แทนด้วย  $i=3$ ) และน้ำ (แทนด้วย  $i=4$ )

$$\begin{aligned} \ln(\eta_m) &= \sum_{i=1}^3 \sum_{j>i}^4 x_i x_j G_{ij} \\ &= x_1 x_2 G_{12} + x_1 x_3 G_{13} + x_1 x_4 G_{14} + x_2 x_3 G_{23} + x_2 x_4 G_{24} + x_3 x_4 G_{34} \end{aligned} \quad (2.32)$$

$$G_{ij} = a' + b'(T) + c'(T^2) \quad (2.33)$$

เมื่อ  $\eta_m$  คือ ความหนืดพลวัตของสารละลายผสม (mPa·s)

$G_{ij}$  คือ สัมประสิทธิ์ไร้มิติที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ (Dimensionless temperature dependent coefficient) ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ ดังสมการที่ (2.31) ขณะที่  $a'$  (ตัวแปรไร้มิติ)  $b'$  (1/K) และ  $c'$  (1/K<sup>2</sup>) เป็นพารามิเตอร์คงตัว

ส่วนพารามิเตอร์คงตัว  $a'$   $b'$  และ  $c'$  สำหรับสัมประสิทธิ์ไร้มิติที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ( $G_{ij}$ ) ดังแสดงในสมการที่ (2.33) สามารถคำนวณได้จากการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear regression analysis)

## 2.5.2 ความจุการดูดซิมคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub> absorption capacity)

ความจุการดูดซิมคาร์บอนไดออกไซด์เป็นหนึ่งในตัวชี้บอกสมรรถนะการดูดซิมที่นิยมใช้ประเมินศักยภาพของตัวทำละลายเอมีน และเป็นข้อมูลสำหรับออกแบบและดำเนินการของกระบวนการดูดซิม

โดยความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ หรือ สภาพการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะสมดุล (Equilibrium solubility of CO<sub>2</sub>) มักรายงานในรูปของ CO<sub>2</sub> loading (mol CO<sub>2</sub>/mol amine) ซึ่งหมายถึง โมลคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดที่ดูดซึมด้วยเอมีน 1 โมล ทั้งนี้ การใช้เอมีนที่มีความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์สูง ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการลดลง เนื่องจากสามารถใช้เอมีนที่มีความเข้มข้นน้อยลง หรือ ใช้อัตราการไหลเข้าของเอมีนลดลง โดยพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ ได้แก่ ชนิดของตัวทำละลายเอมีน ความเข้มข้นของเอมีน ความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ และอุณหภูมิ [27]

### 2.5.3 ความจุวนกลับ (Cyclic capacity)

ความจุวนกลับ คือ ความต่างของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดที่ดูดซึมได้ด้วยตัวทำละลายเอมีนที่ภาวะการดูดซึมและการคืนสภาพ โดยความจุวนกลับมักแสดงในหน่วยผลต่างโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหน่วยปริมาตรของตัวทำละลายเอมีน (mol CO<sub>2</sub>/L-amine solution) ดังแสดงในสมการที่ (2.34) ตัวทำละลายเอมีนประสิทธิภาพสูงจะมีค่าความจุวนกลับมาก กล่าวคือ ดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะดูดซึมได้มาก และดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะคายกลับได้ดี (หรือ สามารถคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีที่ภาวะการคายกลับ) [8]

$$\text{Cyclic capacity} = (\alpha_{\text{at absorber}} - \alpha_{\text{at regenerator}}) \times C_{\text{amine}} \quad (2.34)$$

เมื่อ Cyclic capacity คือ ความจุวนกลับ (mol CO<sub>2</sub>/L-amine solution)

$\alpha$  คือ ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ (mol CO<sub>2</sub>/mol amine)

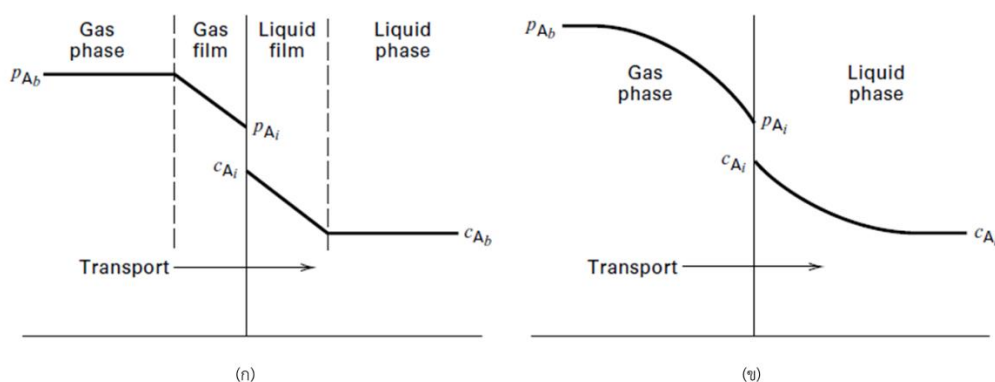
$C_{\text{amine}}$  คือ ความเข้มข้นรวมของตัวทำละลายเอมีน (mol/L)

### 2.5.4 การถ่ายโอนมวลคาร์บอนไดออกไซด์ในหอดูดซึม (Mass transfer performance of CO<sub>2</sub> absorption)

การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวทำละลายเอมีนเป็นกระบวนการที่เกิดการถ่ายโอนมวล (Mass transfer) ของคาร์บอนไดออกไซด์จากวัฏภาคแก๊สไปยังตัวทำละลายเอมีนที่เป็นวัฏภาคของเหลว เนื่องจากความต่างความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแรงขับ (Driving force) โดยคาร์บอนไดออกไซด์จะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า ทั้งนี้ ทฤษฎีสองฟิล์ม (Two-film theory) เป็นแบบจำลองที่ใช้อธิบายกลไกการถ่ายโอนมวลที่เกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์แพร่ผ่านฟิล์มแก๊ส (Gas film) ไปยัง



ส่วนต่อประสานระหว่างสองวัฏภาค (Gas-liquid interface) โดยอาศัยความต่างความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊สเป็นแรงขับ (Gas side driving force) จากนั้นคาร์บอนไดออกไซด์จะแพร่ผ่านส่วนต่อประสานระหว่างสองวัฏภาคไปยังวัฏภาคของเหลว โดยการแพร่ในวัฏภาคของเหลวจะมีความต่างความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแรงขับ (Liquid side driving force)



รูปที่ 2.5 ความต่างความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊สและของเหลว (ก) สำหรับทฤษฎีสองฟิล์ม และ (ข) ตามที่เป็นจริง [18]

กระบวนการดูดซึมแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ การดูดซึมเชิงกายภาพ และการดูดซึมเชิงเคมี ซึ่งการดูดซึมทั้งสองประเภทมีปรากฏการณ์การถ่ายโอนมวลแตกต่างกัน ดังนี้

การดูดซึมเชิงกายภาพ คือ การดูดซึมที่ไม่มีปฏิกิริยาระหว่างตัวละลายกับสารดูดซึม สำหรับการถ่ายโอนมวลด้วยการดูดซึมเชิงกายภาพ พลิกซ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคแก๊สและของเหลวแสดงได้ตามสมการที่ (2.35) และ (2.36) ซึ่งแรงขับในวัฏภาคแก๊ส คือ ความต่างความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊สและบริเวณส่วนต่อประสาน ส่วนแรงขับในวัฏภาคของเหลว คือ ความต่างความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณส่วนต่อประสานและในวัฏภาคของเหลว

$$N_A = k_G (P_{A,G} - P_{A,i}) = k_L (C_{A,i} - C_{A,L}) \quad (2.35)$$

$$N_A = k_G^{\circ} (y_{A,G} - y_{A,i}) = k_L^{\circ} (x_{A,i} - x_{A,L}) \quad (2.36)$$

เมื่อ  $N_A$  คือ พลิกซ์การถ่ายโอนมวลของตัวละลาย A ( $\text{kmol/m}^2\cdot\text{s}$ )

$k_G$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงกายภาพด้านวัฏภาคแก๊ส ( $\text{kmol/m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{kPa}$ )

$P_A$  คือ ความดันย่อยของตัวละลาย A ในวัฏภาคแก๊ส (kPa)

$P_{A,i}$  คือ ความดันย่อยของตัวละลาย A ที่บริเวณส่วนต่อประสาน (kPa)

- $k_L$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงกายภาพด้านวัฏภาคของเหลว (m/s)
- $C_{A,i}$  คือ ความเข้มข้นของตัวละลาย A บริเวณส่วนต่อประสาน ( $\text{kmol/m}^3$ )
- $C_{A,L}$  คือ ความเข้มข้นของตัวละลาย A ในวัฏภาคของเหลว ( $\text{kmol/m}^3$ )
- $k_G^\circ$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงกายภาพด้านวัฏภาคแก๊ส,  $k_G P$  ( $\text{kmol/m}^2 \cdot \text{s}$ )
- $y_{A,G}$  คือ สัดส่วนเชิงโมลของตัวละลาย A ในวัฏภาคแก๊ส ( $\text{kmol/kmol}$ )
- $y_{A,i}$  คือ สัดส่วนเชิงโมลของตัวละลาย A ในวัฏภาคแก๊ส ที่บริเวณส่วนต่อประสาน ( $\text{kmol/kmol}$ )
- $k_L^\circ$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงกายภาพด้านวัฏภาคของเหลว ( $\text{kmol/m}^2 \cdot \text{s}$ )
- $x_{A,i}$  คือ สัดส่วนเชิงโมลของตัวละลาย A ในวัฏภาคของเหลว ที่บริเวณส่วนต่อประสาน ( $\text{kmol/kmol}$ )
- $x_{A,L}$  คือ สัดส่วนเชิงโมลของตัวละลาย A ในวัฏภาคของเหลว ( $\text{kmol/kmol}$ )

เนื่องจากการวัดความดันย่อยและความเข้มข้นของตัวละลาย A ที่บริเวณส่วนต่อประสานระหว่างวัฏภาคแก๊สและของเหลวที่แท้จริงทำได้ยาก เพราะพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสองวัฏภาคภายในหลอดดูดซึมเปลี่ยนแปลงตามอัตราการไหลของสารละลายและอัตราการไหลของแก๊ส จึงมักใช้กฎของเฮนรี (Henry's law) ที่แสดงถึงสมดุลระหว่างวัฏภาคแก๊สและของเหลว ดังแสดงในสมการที่ (2.37) ภายใต้ข้อสมมติว่า เส้นโค้งสมดุล (Equilibrium curve) ระหว่างวัฏภาคแก๊สและของเหลวเป็นเส้นตรง และ สัดส่วนเชิงโมลของตัวละลาย A ในวัฏภาคแก๊สและของเหลวไม่ต่างกันมาก จากนั้นจึงนำสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมด้านวัฏภาคแก๊สและของเหลว (Overall gas side mass transfer coefficient และ Overall liquid side mass transfer coefficient) มาใช้แทนดังแสดงในสมการที่ (2.38) และ (2.39) ตามลำดับ

$$H' = \frac{y_{A,e}}{x_{A,e}} \quad (2.37)$$

เมื่อ  $H'$  คือ ค่าคงตัวของเฮนรี (Henry's constant) หรือ ความชันของเส้นโค้งสมดุล

$y_{A,e}$  คือ สัดส่วนเชิงโมลของตัวละลาย A ในวัฏภาคแก๊สที่สมดุล ( $\text{kmol/kmol}$ )

$x_{A,e}$  คือ สัดส่วนเชิงโมลของตัวละลาย A ในวัฏภาคของเหลวที่สมดุล (kmol/kmol)

$$N_A = K_G P (y_{A,G} - y_{A,e}) = K_L (x_{A,e} - x_{A,L}) \quad (2.38)$$

$$N_A = K_G^o (y_{A,G} - y_{A,e}) = K_L^o (x_{A,e} - x_{A,L}) \quad (2.39)$$

เมื่อ  $K_G$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเชิงกายภาพด้านวัฏภาคแก๊ส (kmol/m<sup>2</sup>·s·kPa)

$K_L$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเชิงกายภาพด้านวัฏภาคของเหลว (m/s)

$K_G^o$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเชิงกายภาพด้านวัฏภาคแก๊ส (kmol/m<sup>2</sup>·s)

$K_L^o$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเชิงกายภาพด้านวัฏภาคของเหลว (m/s)

ตามทฤษฎีสองฟิล์มแล้ว สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมด้านวัฏภาคแก๊สและด้านวัฏภาคของเหลวขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลด้านวัฏภาคแก๊สและวัฏภาคของเหลว ดังสมการ (2.40) และ (2.41) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ ความต้านทานการถ่ายโอนมวลรวมประกอบด้วยความต้านทานการถ่ายโอนมวลด้านวัฏภาคแก๊สและด้านวัฏภาคของเหลว

$$\frac{1}{K_G} = \frac{1}{k_G} + \frac{1}{Hk_L} \quad (2.40)$$

$$\frac{1}{K_L} = \frac{H}{k_G} + \frac{1}{k_L} \quad (2.41)$$

เมื่อ  $H$  คือ ค่าคงตัวของเฮนรี (kmol/m<sup>3</sup>·kPa)

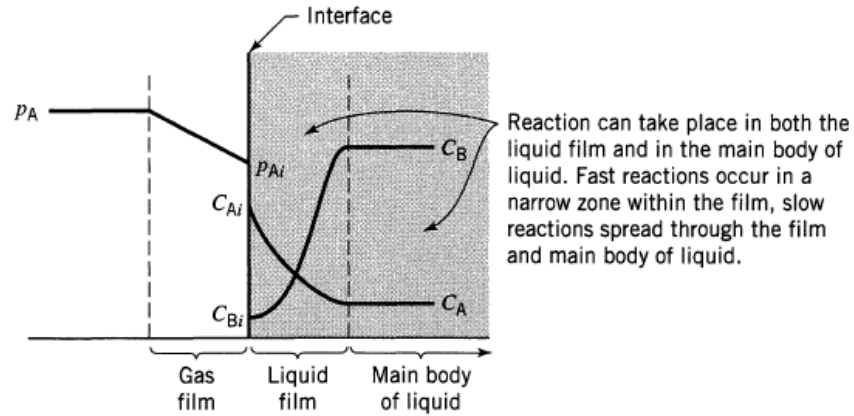
เนื่องจากการวัดพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสองวัฏภาคภายในหอดูดซึมที่แท้จริงทำได้ยาก จึงจำเป็นต้องพิจารณาฟลักซ์การถ่ายโอนมวลในรูปของอัตราการถ่ายโอนมวลต่อหน่วยปริมาตรวัสดุบรรจุ (Volumetric flux) สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเชิงปริมาตรด้านวัฏภาคแก๊ส ( $K_G a_v$ ) และด้านวัฏภาคของเหลว ( $K_L a_v$ ) จึงแสดงได้ ดังสมการที่ (2.42) และ (2.43) ตามลำดับ

$$\frac{1}{K_G a_v} = \frac{1}{k_G a_v} + \frac{1}{Hk_L a_v} \quad (2.42)$$

$$\frac{1}{K_L a_v} = \frac{H}{k_G a_v} + \frac{1}{k_L a_v} \quad (2.43)$$

เมื่อ  $a_v$  คือ พื้นที่ผิววัสดุบรรจุต่อหน่วยปริมาตร (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)

การถ่ายโอนมวลสำหรับการดูดซึมเชิงเคมี ตัวละลาย A จะเกิดปฏิกิริยากับสารดูดซึม B บริเวณฟิล์มของเหลว หรือ ในของเหลว หรือ ทั้งสองบริเวณ ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ทฤษฎีสองฟิล์มสำหรับการดูดซึมเชิงเคมี [28]

การถ่ายโอนมวลสำหรับการดูดซึมเชิงเคมีจำเป็นต้องพิจารณาการเกิดปฏิกิริยาในฟิล์มของเหลว และของเหลวร่วมด้วย ส่งผลให้ฟลักซ์การถ่ายโอนมวลของการดูดซึมเชิงเคมีสูงกว่าการดูดซึมเชิงกายภาพ ทั้งนี้ Enhancement factor นำมาใช้เพื่อแสดงการเพิ่มของฟลักซ์การถ่ายโอนมวลด้านวัฏภาคของเหลวสำหรับการดูดซึมเชิงเคมีเทียบกับการดูดซึมเชิงกายภาพ ดังแสดงในสมการที่ (2.44) โดย Enhancement factor คือ อัตราส่วนระหว่างอัตราการดูดซึมที่มีปฏิกิริยาเคมีกับอัตราการดูดซึมที่ไม่มีปฏิกิริยาเคมี สำหรับการดูดซึมเชิงกายภาพ Enhancement factor จะมีค่าเท่ากับ 1 ส่วนการดูดซึมเชิงเคมี Enhancement factor จะมีค่ามากกว่า 1 ดังนั้น Enhancement factor จึงมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1 เสมอ ดังสมการที่ (2.45)

$$N_A = k_L (C_{A,i} - C_{A,L}) = I k_L^\circ (C_{A,i} - C_{A,L}) \quad (2.44)$$

$$I = \frac{k_L}{k_L^\circ} \geq 1 \quad (2.45)$$

เมื่อ  $I$  คือ Enhancement factor

$k_L^\circ$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงกายภาพด้านวัฏภาคของเหลว (m/s)

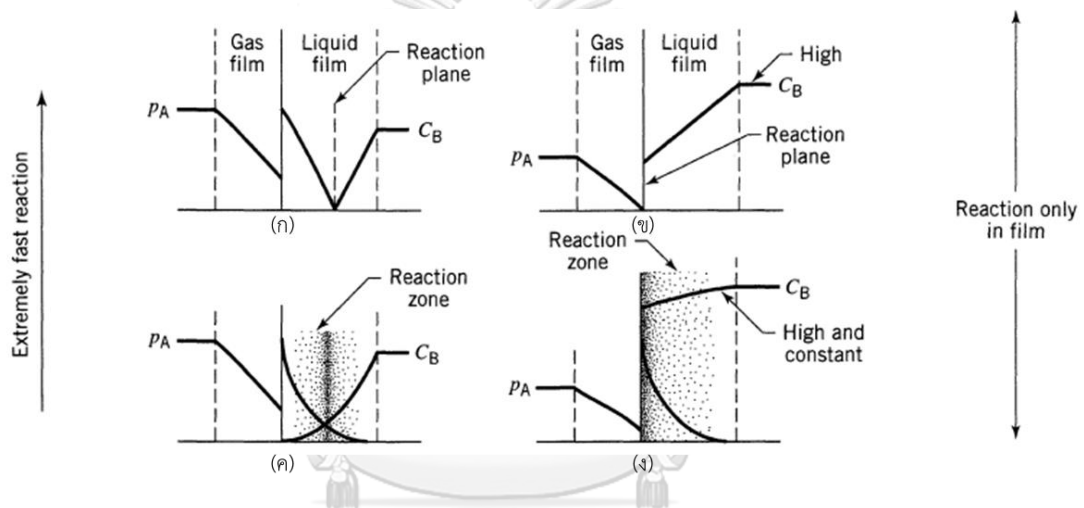
$k_L$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงเคมีด้านวัฏภาคของเหลว (m/s)

เมื่อนำ Enhancement factor มาพิจารณาพร้อมกับสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมด้านวัฏภาคแก๊สและด้านวัฏภาคของเหลว สมการ (2.42) และ (2.43) จึงเขียนได้ ดังสมการที่ (2.46) และ (2.47) ตามลำดับ

$$\frac{1}{K_G a_v} = \frac{1}{k_G a_v} + \frac{1}{H k_L^o a_v} \quad (2.46)$$

$$\frac{1}{K_L a_v} = \frac{H}{k_G a_v} + \frac{1}{k_L^o a_v} \quad (2.47)$$

สำหรับการดูดซึมเชิงเคมี รูปแบบการเกิดปฏิกิริยาเคมีในทฤษฎีสองฟิล์มมีหลายรูปแบบตามความไวปฏิกิริยาและความเข้มข้นของสารดูดซึม B ในวัฏภาคของเหลว ดังแสดงในรูปที่ 2.7



**รูปที่ 2.7** การเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวละลาย A กับสารดูดซึม B ในวัฏภาคของเหลว ที่ส่วนต่อประสานระหว่างสองวัฏภาคสำหรับ (ก) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในบัตตล และมีความเข้มข้นของ B ต่ำ (ข) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในบัตตล และมีความเข้มข้นของ B สูง (ค) ปฏิกิริยาที่มีความไวสูง และมีความเข้มข้นของ B ต่ำ และ (ง) ปฏิกิริยาที่มีความไวสูง และมีความเข้มข้นของ B สูง [28]

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในบัตตลมี ระยะเวลาปฏิกิริยา (Reaction plane) ที่ฟิล์มของเหลว เมื่อความเข้มข้นของสารดูดซึม B ต่ำ ดังรูปที่ 2.7 (ก) และมีระยะเวลาปฏิกิริยาที่ส่วนต่อประสานระหว่างสองวัฏภาคเมื่อความเข้มข้นของสารดูดซึม B สูง ดังรูปที่ 2.7 (ข) ส่วนปฏิกิริยาที่มีความไวสูง จะมีเขตปฏิกิริยา (Reaction zone) ในฟิล์มของเหลว เมื่อความเข้มข้นของสารดูดซึม B ต่ำ ดังรูปที่ 2.7 (ค) และมีเขตปฏิกิริยาใกล้กับส่วนต่อประสานระหว่างสองวัฏภาคเมื่อความเข้มข้นของสารดูดซึม B สูง ดังรูปที่ 2.7 (ง)

สมรรถนะการถ่ายโอนมวลคาร์บอนไดออกไซด์ในเชิงสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม ( $K_{Ga}$ ) แสดงถึงสมรรถนะการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในหอดูดซึมได้ กล่าวคือ การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีสมรรถนะสูงจะมี  $K_{Ga}$  สูงด้วย ทั้งนี้  $K_{Ga}$  เป็นพารามิเตอร์สำคัญสำหรับออกแบบความสูงของหอดูดซึม โดยความสูงของหอดูดซึม คือ ผลคูณระหว่างความสูงของหน่วยการถ่ายโอน (Height of transfer unit, HTU) และจำนวนหน่วยการถ่ายโอน (Number of transfer unit, NTU) [9] ดังแสดงในสมการที่ (2.48) และ (2.49)

$$Z = \text{HTU} \times \text{NTU} \quad (2.48)$$

$$Z = \left( \frac{G_I}{K_{Ga} P} \right) \times \left( \int_{y_{A,\text{in}}}^{y_{A,\text{out}}} \frac{dy_A}{(1-y_A)^2 (y_A - y_A^*)} \right) \quad (2.49)$$

เมื่อ  $Z$  คือ ความสูงของหอดูดซึม (m)

$G_I$  คือ อัตราการไหลของแก๊สเฉื่อย ( $\text{kmol/m}^3 \cdot \text{hr}$ )

$P$  คือ ความดันภายในหอดูดซึม (kPa)

$K_{Ga}$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม ( $\text{kmol/m}^3 \cdot \text{hr} \cdot \text{kPa}$ )

ความสูงหอดูดซึมขนาดเล็กใด ๆ ( $dZ$ ) ที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนสัดส่วนเชิงโมลของตัวละลาย A ในวัฏภาคแก๊ส ( $dy_A$ ) เขียนได้ ดังสมการ (2.50)

$$dZ = \left( \frac{G_I}{K_{Ga} P} \right) \times \left( \frac{dy_A}{(1-y_A)^2 (y_A - y_A^*)} \right) \quad (2.50)$$

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม  $K_{Ga}$  จึงเขียนได้ ดังสมการที่ (2.51)

$$K_{Ga} = \left( \frac{G_I}{P (y_A - y_A^*)} \right) \times \left( \frac{dY_{A,G}}{dZ} \right) \quad (2.51)$$

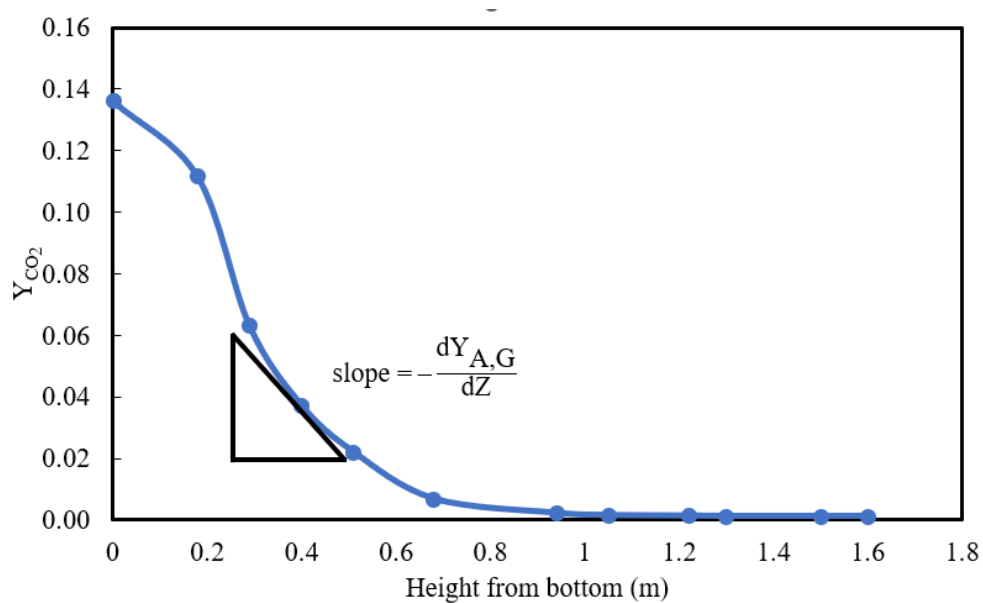
เมื่อ  $Y_{A,G}$  คือ อัตราส่วนเชิงโมลของตัวละลาย A ในวัฏภาคแก๊ส

จากสมการที่ (2.51) สัดส่วนเชิงโมลของตัวละลาย A ในวัฏภาคแก๊สที่บริเวณส่วนต่อประสานที่ภาวะสมดุล ( $y_A^*$ ) ของกระบวนการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวทำละลายเอมีนมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัดส่วนเชิงโมลของตัวละลาย A ในวัฏภาคแก๊ส ( $y_A$ ) และมีค่าเกือบเป็นศูนย์ [29] นอกจากนี้ อัตราการเปลี่ยนอัตราส่วนเชิงโมลของตัวละลาย A ตามความสูงของหอดูดซึม  $\left( \frac{dY_{A,G}}{dZ} \right)$  คือ ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเชิงโมลของตัวละลาย A ในวัฏภาคแก๊ส ( $Y_{A,G}$ )

ตลอดความสูงของหอดูดซึม ซึ่งได้จากการทดลองการดูดซึมในหอดูดซึมดังรูปที่ 2.8 ส่วนอัตราส่วนเชิงโมลของตัวละลาย A คำนวณได้จากความสัมพันธ์กับสัดส่วนเชิงโมลของตัวละลาย A ในวัฏภาคแก๊ส ( $y_A$ ) [9] ดังแสดงในสมการที่ (2.52)

$$Y_A = \frac{y_A}{1 - y_A} \quad (2.52)$$

เมื่อ  $y_A$  คือ สัดส่วนเชิงโมลของตัวละลาย A ในวัฏภาคแก๊ส (kmol/kmol)

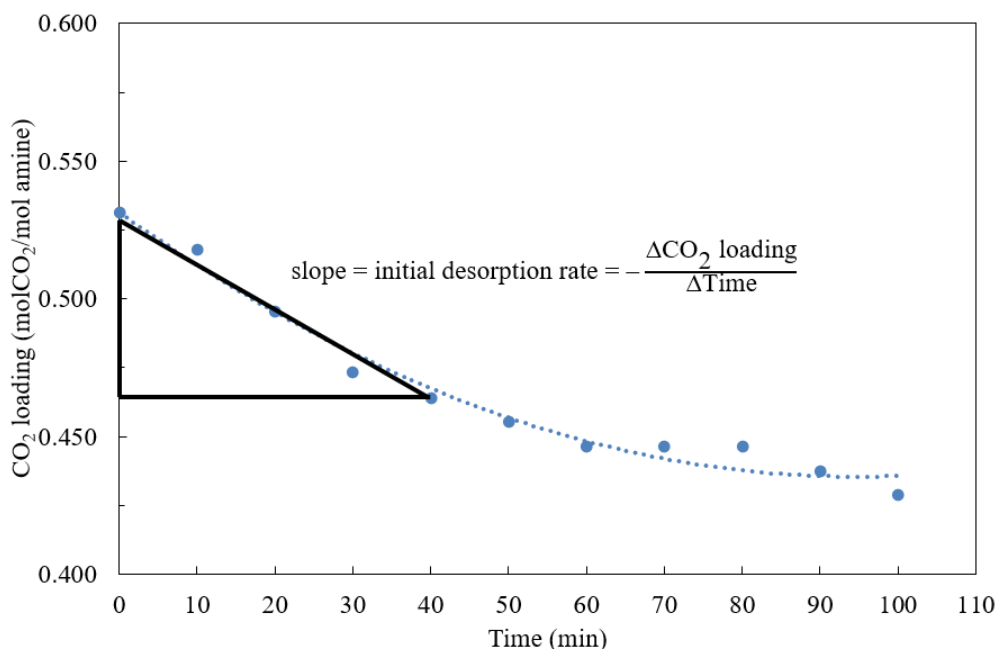


รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊ส

ตลอดความสูงของหอดูดซึม

### 2.5.5 อัตราการคืนสภาพตัวทำละลายเริ่มต้น (Initial desorption rate)

อัตราการคืนสภาพตัวทำละลายเริ่มต้นเป็นหนึ่งในตัวชี้บอกสมรรถนะการคืนสภาพตัวทำละลายเอมีน อัตราการคืนสภาพตัวทำละลายเริ่มต้น คือ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายกลับได้ด้วยตัวทำละลายเอมีนในช่วงเริ่มต้นของการคืนสภาพตัวทำละลาย ซึ่งอัตราการคืนสภาพเริ่มต้น คำนวณได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $CO_2$  loading ของตัวทำละลายเอมีนในเครื่องคืนสภาพในช่วงเริ่มต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยอัตราการคืนสภาพตัวทำละลายเริ่มต้น มักแสดงในหน่วยผลต่างโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหน่วยปริมาตรของตัวทำละลายเอมีนต่อเวลา ( $mol CO_2/L\text{-amine solution}\cdot min$ ) ตัวทำละลายเอมีนที่มีสมรรถนะการคืนสภาพสูงมักมีอัตราการคืนสภาพเริ่มต้นสูง กล่าวคือ คายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ได้มาก ในช่วงระยะเวลาในการคืนสภาพตัวทำละลายเท่ากัน



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง CO<sub>2</sub> loading ของตัวทำละลายในเครื่องคืนสภาพตลอดระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง

### 2.5.6 ภาระทางความร้อนในการคืนสภาพ (Regeneration heat duty)

ภาระทางความร้อนในการคืนสภาพเป็นหนึ่งในตัวชี้บ่งชี้ประสิทธิภาพสำคัญของการคืนสภาพตัวทำละลายเอมีน ภาระทางความร้อนในการคืนสภาพ คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมล มีหน่วยเป็น kJ/mol CO<sub>2</sub> ทั้งนี้ ภาระทางความร้อนในการคืนสภาพคิดเป็นร้อยละ 70–80 ของค่าใช้จ่ายดำเนินการสำหรับกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้น การลดภาระทางความร้อนในการคืนสภาพจึงมีบทบาทสำคัญในการลดค่าใช้จ่ายดำเนินการของกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวทำละลายเอมีน ทั้งนี้ การลดภาระทางความร้อนในการคืนสภาพตัวทำละลายสามารถทำได้โดยใช้ตัวทำละลายเอมีนที่มีภาระทางความร้อนในการคืนสภาพต่ำ หรือ การปรับปรุงเครือข่ายเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat integration) ให้มีประสิทธิภาพสูง โดยทั่วไปการพัฒนาเอมีนให้มีสมรรถนะการคืนสภาพสูงได้รับความนิยมเนื่องจากไม่กระทบต่อโครงสร้างกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีอยู่เดิม และสามารถลดภาระทางความร้อนในการคืนสภาพตัวทำละลายได้มากกว่าการปรับปรุงเครือข่ายเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน [27]



ภาระทางความร้อนในการคืนสภาพตัวทำละลาย ( $Q_{\text{regen}}$ ) ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ภาระทางความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ ( $Q_{\text{des}}$ ) ภาระทางความร้อนในการระเหยของน้ำ ( $Q_{\text{vap}}$ ) และความร้อนสัมผัส ( $Q_{\text{sen}}$ ) ดังแสดงในสมการที่ (2.53)

$$Q_{\text{reg}} = Q_{\text{des}} + Q_{\text{vap}} + Q_{\text{sen}} \quad (2.53)$$

ภาระทางความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ คือ ปริมาณพลังงานที่ใช้สลายผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างเอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์ (คาร์บาเมตไบคาร์บอเนต และคาร์บอเนต) ซึ่งความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์มีปริมาณเท่ากับความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาคูดซิมคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.54)

$$Q_{\text{des}} = \sum \frac{C_i}{C_T} \Delta H_{\text{des}_i} \quad (2.54)$$

เมื่อ  $Q_{\text{des}}$  คือ ภาระทางความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลายเอมีนผสม (kJ/mol  $\text{CO}_2$ )

$C_i$  คือ ความเข้มข้นของเอมีนองค์ประกอบ  $i$  (mol/L)

$C_T$  คือ ความเข้มข้นรวมของตัวทำละลายเอมีนผสม (mol/L)

$\Delta H_{\text{des}_i}$  คือ ความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ของเอมีนองค์ประกอบ  $i$  (kJ/mol  $\text{CO}_2$ )

ภาระทางความร้อนในการระเหยของน้ำ คือ พลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำในกระบวนการคืนสภาพตัวทำละลายเอมีน เนื่องจากจุดเดือดของเอมีนสูงกว่าจุดเดือดของน้ำมาก จึงมักตั้งข้อสมมติว่ามีเพียงน้ำในตัวทำละลายเอมีนเท่านั้นที่ระเหยเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ  $Q_{\text{vap}}$  ดังแสดงในสมการที่ (2.55) ถึง (2.57)

$$Q_{\text{vap}} = \Delta H_{\text{vap}_H_2O} \frac{P_{H_2O}}{P_{CO_2}} \quad (2.55)$$

$$P_{H_2O} = (P^{\text{sat}}) X_{H_2O\_lean} \quad (2.56)$$

$$P_{CO_2} = 101.3 - ((P^{\text{sat}}) X_{H_2O\_lean}) \quad (2.57)$$

เมื่อ $Q_{\text{vap}}$	คือ	ภาระทางความร้อนในการระเหยของน้ำ (kJ/mol $\text{CO}_2$ )
$\Delta H_{\text{vap\_H}_2\text{O}}$	คือ	ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำที่อุณหภูมิในการคืนสภาพ (kJ/mol $\text{H}_2\text{O}$ )
$P_{\text{H}_2\text{O}}$	คือ	ความดันย่อยของไอน้ำ (kPa)
$P_{\text{CO}_2}$	คือ	ความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ (kPa)
$p^{\text{sat}}$	คือ	ความดันอิ่มตัวของน้ำที่อุณหภูมิในการคืนสภาพตัวทำละลาย (kPa)
$X_{\text{H}_2\text{O\_lean}}$	คือ	สัดส่วนเชิงโมลของน้ำในตัวทำละลายเอมีนที่มีคาร์บอนไดออกไซด์น้อยลง (mol/mol)

ความร้อนสัมผัส คือ ปริมาณความร้อนที่ทำให้อุณหภูมิของสารละลายเอมีนที่เต็มไปด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (Rich solvent) ที่ออกจากหอดูดซึมสูงขึ้นเป็นอุณหภูมิของหอคืนสภาพ โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะของตัวทำละลายเอมีน [30] ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (2.58)

$$Q_{\text{sen}} = \frac{mC_p\Delta T}{(\alpha_{\text{CO}_2\text{-rich}} - \alpha_{\text{CO}_2\text{-lean}})\text{mol}_{\text{amine}}} \quad (2.58)$$

เมื่อ $Q_{\text{sen}}$	คือ	ความร้อนสัมผัส (kJ/mol $\text{CO}_2$ )
$m$	คือ	มวลของตัวทำละลายเอมีนผสมในเครื่องคืนสภาพตัวทำละลาย (g)
$C_p$	คือ	ความจุความร้อนของตัวทำละลายเอมีนผสม (kJ/g·K)
$\Delta T$	คือ	ผลต่างระหว่างอุณหภูมิที่ภาวะดำเนินการการดูดซึมและการคืนสภาพตัวทำละลาย (K)
$\alpha_{\text{CO}_2\text{-rich}}$	คือ	ความจุการดูดซึมของตัวทำละลายเอมีนผสมที่เต็มไปด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (Rich loading)
$\alpha_{\text{CO}_2\text{-lean}}$	คือ	ความจุการดูดซึมของตัวทำละลายเอมีนผสมที่มีคาร์บอนไดออกไซด์น้อยลง (Lean loading)
$\text{mol}_{\text{amine}}$	คือ	โมลของเอมีน (mol amine)

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Hadri และคณะ [3] เปรียบเทียบศักยภาพของตัวทำละลาย AMP MEA และ PZ ในเชิงความจุ การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์และความร้อนที่ใช้ในการคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 313 K และความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 15 โดยปริมาตร จากการศึกษา พบว่า ตัวทำละลาย AMP MEA และ PZ มีความจุการดูดซึม คาร์บอนไดออกไซด์ 0.78 0.59 และ 0.91 ตามลำดับ โดยความร้อนที่ใช้ในการคายกลับ คาร์บอนไดออกไซด์เป็นหนึ่งในความร้อนองค์ประกอบของภาระทางความร้อนในการคืนสภาพ ตัวทำละลาย ทั้งนี้ ตัวทำละลายที่มีความร้อนที่ใช้ในการคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์สูงมีแนวโน้ม ที่ภาระทางความร้อนในการคืนสภาพจะสูงตามไปด้วย ผลการศึกษา พบว่า ตัวทำละลาย AMP MEA และ PZ มีความร้อนที่ใช้ในการคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ 80.91 85.13 และ 80.58 kJ/mol CO<sub>2</sub> ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่า AMP และ PZ มีศักยภาพสูงกว่า MEA ในเชิงความจุการดูดซึม คาร์บอนไดออกไซด์และความร้อนที่ใช้ในการคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์

Sema และคณะ [4] เปรียบเทียบจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในรูป ค่าคงตัวอัตราปฏิกิริยาอันดับสอง ( $k_2$ ) ของตัวทำละลาย AMP MEA และ PZ ที่อุณหภูมิ 298 K ผลการศึกษา พบว่า ตัวทำละลาย AMP MEA และ PZ มีค่าคงตัวอัตราปฏิกิริยาอันดับสอง 570 6,209 และ 65,460 m<sup>3</sup>/kmol·s ตามลำดับ โดย AMP มีจลนพลศาสตร์การดูดซึม คาร์บอนไดออกไซด์ไม่สูงมากเมื่อเทียบกับ MEA ส่วน PZ มีจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาการดูดซึม คาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่า MEA และ AMP มาก

Dubois และคณะ [5] ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปค่าคงตัวอัตรา ปฏิกิริยารวม ( $k_{ov}$ ) ของตัวทำละลาย AMP MEA และ AMP-PZ ความเข้มข้นรวมร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 298 K ผลการศึกษา พบว่า ตัวทำละลาย AMP MEA และ AMP-PZ มีค่าคงตัวอัตราปฏิกิริยารวม 2,260 43,100 และ 143,000 s<sup>-1</sup> ตามลำดับ โดยตัวทำละลาย AMP-PZ มีค่าคงตัวอัตราปฏิกิริยารวมมากกว่าตัวทำละลาย MEA มาก และเมื่ออัตราส่วน ความเข้มข้นเชิงมวลระหว่าง PZ และ AMP เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าคงตัวอัตราปฏิกิริยารวมสูงขึ้น อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจาก PZ มีจลนพลศาสตร์การเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์สูงมาก จึงสรุปได้ว่าการผสม PZ ลงในตัวทำละลาย AMP สามารถเพิ่มจลนพลศาสตร์การดูดซึม คาร์บอนไดออกไซด์ได้

Brüder และคณะ [6] ศึกษาพฤติกรรมการตกตะกอนของตัวทำละลาย AMP-PZ ที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 295 K เพื่อหาความเข้มข้นสูงสุดของตัวทำละลาย AMP-PZ ที่ไม่ตกตะกอน โดยตัวทำละลายเอมีนที่มีความเข้มข้นสูงสามารถดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้มาก เนื่องจากมีเอมีนที่เกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น จากการศึกษา พบว่า ไม่มีตะกอนเกิดขึ้นที่อัตราส่วนความเข้มข้นเชิงโมลาร์ระหว่าง AMP และ PZ เป็น 5:2 แต่พบตะกอนเมื่อผ่านคาร์บอนไดออกไซด์ไปในตัวทำละลายดังกล่าว มีเพียงอัตราส่วนความเข้มข้นเชิงโมลาร์ระหว่าง AMP และ PZ เป็น 4:1 และ 3:1.5 เท่านั้นที่ไม่เกิดตะกอน กล่าวได้ว่า ความเข้มข้นรวมของตัวทำละลาย AMP-PZ สูงที่สุดที่ไม่เกิดการตกตะกอน คือ 5 M และ ความเข้มข้นของ PZ ถูกจำกัดที่ 1.5 M

Sema และคณะ [25] ศึกษาความหนาแน่น ความหนืด และการแพร่เชิงกายภาพของคาร์บอนไดออกไซด์ของสารละลายเอมีนผสม N-Methyl-4-piperidinol (MPDL) และ AMP เปรียบเทียบกับสารละลายเอมีน MEA ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยมวล ที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 303–363 K เพื่อใช้ข้อมูลสำหรับการศึกษาพารามิเตอร์เชิงอุทกพลศาสตร์ของตัวทำละลายเอมีน MPDL-AMP ในหอดูดูดซึม จลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยา และการถ่ายโอนมวลของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ จากการศึกษา พบว่า ความเข้มข้นของเอมีนทั้งสองชนิดและอุณหภูมิส่งผลต่อความหนาแน่นและความหนืดของตัวทำละลายเอมีน MPDL-AMP กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นและความหนืดของสารละลายเอมีน MPDL-AMP ลดลง ทั้งนี้ เมื่อความเข้มข้นของ AMP เพิ่มขึ้น พบว่า สารละลายเอมีน MPDL-AMP มีความหนาแน่นลดลง เนื่องจาก AMP มีความหนาแน่นน้อยกว่า MPDL และความหนืดของตัวทำละลายเอมีน MPDL-AMP เพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของ AMP ในตัวทำละลายเอมีนผสมเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารละลาย AMP มีความหนืดสูงกว่า MPDL นอกจากนี้ ความหนาแน่นและความหนืดของสารละลายเอมีน MPDL-AMP อยู่ในช่วงเดียวกันกับเอมีนแบบดั้งเดิมที่ใช้ในอุตสาหกรรม แสดงว่าสารละลายเอมีน MPDL-AMP สามารถนำมาใช้ในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในเชิงความหนาแน่นและความหนืดได้

Nwaoha และคณะ [8] พบว่า ตัวทำละลายเอมีนแบบผสมสามชนิด AMP-PZ-MEA มีประสิทธิภาพการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าตัวทำละลายเอมีนดั้งเดิม MEA โดยตัวทำละลายผสมดังกล่าวมีความเข้มข้นเอมีนรวม 6 M (ความเข้มข้นของ AMP และ PZ รวม 3 M และความเข้มข้นของ PZ ไม่เกิน 1.5 M) จากการศึกษา พบว่า ตัวทำละลาย AMP-PZ-MEA

ความเข้มข้นสูง มีความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะสมดุลและความจุวนกลับสูงกว่าตัวทำละลาย 5 M MEA ร้อยละ 5.7–15.1 และ ร้อยละ 100–120 ตามลำดับ นอกจากนี้ตัวทำละลาย AMP–PZ–MEA ยังมีภาระทางความร้อนในการคืนสภาพต่ำกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA ร้อยละ 50–54.5 ทั้งนี้ เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นเชิงโมลาร์ระหว่าง PZ และ AMP เพิ่มขึ้น ทำให้ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และภาระทางความร้อนในการคืนสภาพสูงขึ้น แต่ทำให้ค่าความจุวนกลับต่ำลง สรุปได้ว่า ตัวทำละลาย AMP–PZ–MEA สามารถใช้ดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ทดแทนตัวทำละลายเอมีนดั้งเดิมได้

Nakrak และคณะ [9] ศึกษาสมรรถนะการถ่ายโอนมวลของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม ( $K_{Ga}$ ) ของตัวทำละลาย AMP–PZ–MEA ที่ความเข้มข้นรวม 6 M อุณหภูมิ 303 K ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 12 kPa ฟลักซ์ตัวทำละลายขาเข้า 3.67  $m^3/m^2 \cdot h$  ฟลักซ์แก๊สขาเข้า 509.30  $m^3/m^2 \cdot h$   $CO_2$  loading ของสารละลายขาเข้า 0.25 mol  $CO_2/mol$  amine และสัดส่วนความสูงของจุดตั้งตัวอย่างต่อความสูงของหอดูดซับ ( $h/h_0$ ) 0.25 เนื่องจากสมรรถนะการถ่ายโอนมวลขึ้นกับพื้นที่ส่วนต่อประสานระหว่างวัฏภาคแก๊สและวัฏภาคของเหลว ดังนั้น การใช้หอดูดซับที่ใช้วัสดุบรรจุแบบจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ (Structural packing) จึงได้รับความนิยม เนื่องจากมีพื้นที่ส่วนต่อประสานระหว่างสองวัฏภาคมาก จากการศึกษา พบว่า  $K_{Ga}$  และประสิทธิภาพการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลาย AMP–PZ–MEA สูงกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม MEA กว่าร้อยละ 68 และ 14 ตามลำดับ และเมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นเชิงโมลาร์ระหว่าง PZ และ AMP เพิ่มขึ้น ทำให้  $K_{Ga}$  และประสิทธิภาพการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

Nwaoha และคณะ [30] ศึกษาภาระทางความร้อนในการคืนสภาพตัวทำละลายเอมีนผสม AMP–PZ–MEA อุณหภูมิ 363 K โดยภาระทางความร้อนในการคืนสภาพตัวทำละลายประกอบไปด้วย ภาระทางความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาการคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ (มีปริมาณเท่ากับความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์) ภาระทางความร้อนในการระเหยของน้ำ และภาระทางความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิ จากการศึกษา พบว่า ภาระทางความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลายเอมีนผสม AMP–PZ–MEA ต่ำกว่า MEA เพียงเล็กน้อย ส่วนภาระทางความร้อนในการระเหยของตัวทำละลายเอมีน 5 M MEA สูงกว่าตัวทำละลายเอมีนผสม AMP–PZ–MEA และภาระทางความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิของตัวทำละลาย

เอมีนผสม AMP-PZ-MEA ต่ำกว่า MEA อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของ AMP และความเข้มข้นของ PZ ที่ลดลงทำให้ภาระทางความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิลดลง จึงสรุปได้ว่าตัวทำละลายเอมีนแบบผสม AMP-PZ-MEA มีภาระทางความร้อนที่ใช้ในการการคืบสภาพน้อยกว่า MEA ประมาณร้อยละ 40 โดยสารละลายผสมที่มีอัตราส่วนเชิงโมลาร์ของ AMP-PZ-MEA เป็น 2.5:0.5:3 ใช้ภาระทางความร้อนในการคืบสภาพต่ำที่สุด



### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 ข้อมูลเกี่ยวกับงานวิจัยเบื้องต้น

งานวิจัยนี้ศึกษาสมรรถนะการดูดซึ่มและการคืนสภาพตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA สำหรับการดักจับคาร์บอน เพื่อประเมินศักยภาพของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ให้ครอบคลุมทั้งสมบัติเชิงกายภาพของตัวทำละลายเอมีน สมรรถนะการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ และสมรรถนะการคืนสภาพตัวทำละลาย ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ แบ่งการทดลองออกเป็น 5 ส่วนหลัก ได้แก่

1. ทดลองพฤติกรรมการตกตะกอนของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA
2. วัดความหนาแน่นและความหนืดของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่ไม่ตกตะกอน และสร้างสหสัมพันธ์เพื่อทำนายความหนาแน่นและความหนืด
3. ทดลองความจุการดูดซึ่มคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะสมดุลและความจุวนกลับของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่ไม่ตกตะกอน
4. ทดลองสมรรถการถ่ายโอนมวลคาร์บอนไดออกไซด์ภายในหอดูดซึ่ม
5. ทดลองอัตราการคืนสภาพเริ่มต้นและภาระทางความร้อนในการคืนสภาพตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA

#### 3.2 สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

##### 3.2.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 (Sigma-Aldrich, Switzerland)
2. Piperazine (PZ) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 (Sigma-Aldrich, Switzerland)
3. Triethanolamine (TEA) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 (Chemipan Co., Ltd, Thailand)
4. Monoethanolamine (MEA) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 (Merck, Germany)
5. สารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl) ความเข้มข้น 1 M (Kemaus, Australia)
6. เมทิลออเรนจ์ (Methyl orange) ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยมวล (Gammago Co., Ltd, Thailand)
7. น้ำกลั่น (Distilled water)

8. คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 (Thai-Japan Gas Co., Ltd, Thailand)
9. คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ความเข้มข้นร้อยละ 12 โดยปริมาตร ดุลด้วยไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) (Thai-Japan Gas Co., Ltd, Thailand)
10. ไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 (Thai-Japan Gas Co., Ltd, Thailand)

### 3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1. มาตรการความหนาแน่น (Gay-Lussac pycnometer) ปริมาตร 25 มิลลิลิตร (WINTEG Co., Germany)
2. มาตรการความหนืดแบบ Ostwald (Ostwald viscometer) (SCHOTT Instrument, Germany)
3. เครื่องปฏิกรณ์การดูดซึม (Absorption reactor) ขนาด 125 มิลลิลิตร
4. เครื่องคืนสภาพตัวทำละลาย (Desorption reactor) ขนาด 250 มิลลิลิตร
5. หอดูดซึมเป็นคอลัมน์แก้ว เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 30 มิลลิเมตร ความสูง 1.60 เมตร
6. ชุดไทเทรตสำหรับหาความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลาย (Chittick apparatus)
7. อุปกรณ์รับรู้ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub> analyzer) รุ่น SprintIR-6S100% (CO<sub>2</sub> METER, Canada)
8. แผ่นกระจายสารละลาย (Distributor)
9. วัสดุบรรจุแบบจัดเรียงตัวเป็นระเบียบชนิด Sulzer DX ในหอดูดซึม ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 30 มิลลิเมตร และพื้นที่ผิวสัมผัส 900 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร (Sulzer Co. Ltd., Switzerland)
10. อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) รุ่น WD11 (Hangyang Scientific Equipment Co. Ltd., Korea)
11. อ่างน้ำมัน (Oil bath)
12. เครื่องควบแน่น (Condenser)
13. ปั๊มหมุนเวียนสำหรับน้ำหล่อเย็น (Pump)
14. ปั๊มรีดสายยาง (Peristaltic pump)
15. ปั๊มหมุนเวียนแก๊ส



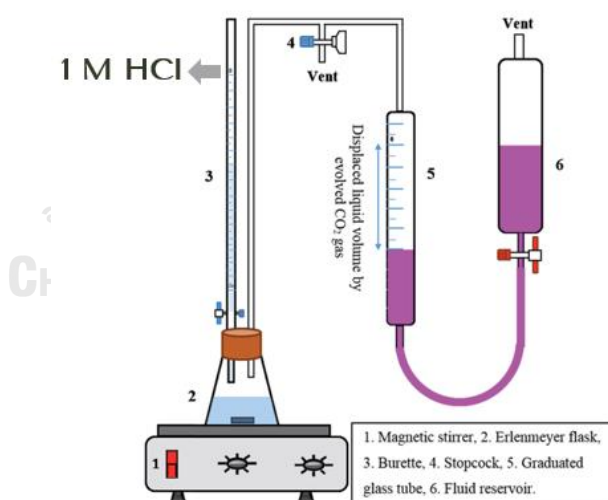
16. เครื่องกวนสารละลายชนิดให้ความร้อนพร้อมชุดควบคุมอุณหภูมิ (Hotplate and magnetic stirrer)
17. อุปกรณ์ควบคุมการไหลของแก๊ส (Gas flow controller)
18. เทอร์มอมิเตอร์ (Thermometer)
19. เทอร์มोकัปเปิล (Thermocouple)
20. ขวดแก้วขนาดเล็กสำหรับบรรจุสาร (Vial)
21. เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล (Shimadzu, Japan)
22. ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask)
23. ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask)
24. ปีกเกอร์ (Beaker)
25. ปีกเกอร์พลาสติก (Plastic beaker)
26. ปิเปต (Graduated pipette)
27. ไมโครปิเปต (Micro pipette)
28. หลอดหยดสาร (Dropper)
29. แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic bar)
30. แท่งแก้วคนสาร
31. ถังเก็บสารละลาย
32. ฉนวนกันความร้อน
33. ขวดน้ำกลั่น
34. ลูกยางปิเปตสามทาง

### 3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.3.1 การสังเกตพฤติกรรมการตกตะกอนของตัวทำละลายเอมีน

เนื่องจากสารละลาย AMP และ PZ เกิดตะกอนได้ที่ความเข้มข้นเอมีนสูง และ/หรือ CO<sub>2</sub> loading สูง การใช้ตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA จึงควรมีสัดส่วนความเข้มข้นของ AMP และ PZ ที่เหมาะสม เพื่อไม่ให้เกิดการตกตะกอนของ AMP และ PZ ระหว่างการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเริ่มจากการสังเกตพฤติกรรมการตกตะกอนของตัวทำละลายเอมีน เพื่อหาอัตราส่วนความเข้มข้นของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่ไม่เกิดตะกอนของเอมีน โดยเตรียมตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ ความเข้มข้นรวม 5-6 M

(ความเข้มข้นทั่วไปที่ใช้ในอุตสาหกรรม) จากนั้นเก็บตัวอย่างตัวทำละลายที่ไม่ผ่านการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ ( $0 \text{ mol CO}_2/\text{mol amine}$ ) และ ตัวทำละลายที่เต็มไปด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ ( $0.6 \text{ mol CO}_2/\text{mol amine}$ ) ในขวดแก้วขนาดเล็กสำหรับบรรจุสารที่อุณหภูมิห้อง ( $303 \text{ K}$ ) แล้วสังเกตตะกอนของเอมีนทั้งแบบที่มีและไม่มีคาร์บอนไดออกไซด์ ทั้งนี้ ตัวทำละลายที่เต็มไปด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เตรียมได้โดยผ่านคาร์บอนไดออกไซด์ลงในสารละลายเพื่อเพิ่ม  $\text{CO}_2$  loading ของตัวทำละลายให้เป็น  $0.6 \text{ mol CO}_2/\text{mol amine}$  ซึ่ง  $\text{CO}_2$  loading ของตัวทำละลายวัดได้จากชุดไทเทรต (Chittick apparatus) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยนำตัวอย่างตัวทำละลายไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น  $1 \text{ M}$  โดยใช้เมทิลออเรนจ์เป็นอินดิเคเตอร์ ตามวิธีมาตรฐานของ The Association of Official Analytical Chemists (AOAC) [10] ทั้งนี้ อัตราส่วนความเข้มข้นของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่ไม่เกิดตะกอนในตัวทำละลายที่ไม่ผ่านการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์จะนำไปวัดความหนาแน่นและความหนืดของตัวทำละลาย ส่วนอัตราส่วนความเข้มข้นของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่ไม่เกิดตะกอนในตัวทำละลายทั้งแบบที่มีและไม่มีคาร์บอนไดออกไซด์จะนำไปศึกษาความจุการดูดซึม ความจวนกลับ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม ( $K_{\text{Gav}}$ ) และภาระทางความร้อนในการคืนสภาพ



รูปที่ 3.1 ชุดไทเทรตสำหรับหาความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลาย (Chittick apparatus) [31]

### 3.3.2 การวัดความหนาแน่น

ความหนาแน่นของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่อุณหภูมิ 303 313 323 และ 333 K วัดได้จากมาตรฐานความหนาแน่น ในงานวิจัยนี้ อุณหภูมิของตัวทำละลายเอมีนถูกควบคุมโดยอ่างควบคุม

อุณหภูมิ เมื่อสารละลายเอมีนมีอุณหภูมิตามต้องการแล้วจึงเทลงในมาตรความหนาแน่นปริมาตร 25.000 มิลลิลิตร จากนั้นวัดมวลของสารละลายดังกล่าวด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล แล้วคำนวณความหนาแน่นเฉลี่ยด้วยสมการที่ (3.1) จากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของสาร ( $\text{g/cm}^3$ )

$m$  คือ มวลของสาร (g)

$V$  คือ ปริมาตรของสาร ( $25.000 \text{ cm}^3$ )

เมื่อตรวจสอบความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของมาตรความหนาแน่นด้วยน้ำและตัวทำละลาย MEA ความเข้มข้น 5 M ช่วงอุณหภูมิ 303–333 K ดังแสดงในตารางที่ 3.1 พบว่า ความหนาแน่นของน้ำและตัวทำละลาย MEA ที่ได้จากงานวิจัยนี้สอดคล้องกับข้อมูลจากวรรณกรรม [24, 32] โดยมีร้อยละความเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Average absolute deviation percentages หรือ AAD) 0.15 และ 0.14 ตามลำดับ จึงกล่าวได้ว่า มาตรความหนาแน่นที่ใช้มีความแม่นยำและเชื่อถือได้

**ตารางที่ 3.1** ความหนาแน่นของน้ำและตัวทำละลาย MEA ความเข้มข้น 5 M ในช่วงอุณหภูมิ 303–333 K

อุณหภูมิ (K)	ความหนาแน่น ( $\text{g/cm}^3$ )			
	น้ำ		5 M MEA	
	แหล่งอ้างอิง [24]	การทดลอง	แหล่งอ้างอิง [32]	การทดลอง
303	0.996	0.993	1.008	1.006
313	0.992	0.990	1.003	1.002
323	0.988	0.987	0.998	0.998
333	0.983	0.984	0.992	0.994

### 3.3.3 การวัดความหนืด

ความหนืดของตัวทำละลาย AMP–PZ–TEA วัดด้วยมาตรความหนืดแบบ Ostwald โดยบรรจุตัวทำละลายเอมีนปริมาตร 5 มิลลิลิตรลงในมาตรความหนืด จากนั้นยึดมาตรวัดความหนืดในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 303 313 323 และ 333 K แล้วแช่ทิ้งไว้ในอ่างควบคุมอุณหภูมิอย่างน้อย 10 นาที เพื่อให้อุณหภูมิของตัวทำละลายเอมีนในมาตรความหนืดมีอุณหภูมิเท่ากับ

น้ำในอ่างควบคุมอุณหภูมิ แล้วใช้ลูกยางดูดสารในมาตรความหนืดและจับเวลาในการไหลของของเหลวในกระเปาะ โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ทั้งนี้ ความหนืดของตัวทำละลายเอมีนคำนวณได้จากสมการที่ (3.2)

$$\eta = K \times t \times \rho \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ  $\eta$  คือ ความหนืดพลวัต (mPa·s)

K คือ ค่าคงตัวของมาตรความหนืดแบบ Ostwald ( $0.000289 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ )

t คือ เวลาในการไหลของของเหลวในกระเปาะ (s)

$\rho$  คือ ความหนาแน่น ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

การตรวจสอบความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของมาตรความหนืดทำได้โดยวัดความหนืดของตัวทำละลาย MEA ความเข้มข้น 5 M และตัวทำละลาย MEA บริสุทธิ์ ช่วงอุณหภูมิ 303–333 K เทียบกับข้อมูลจากวรรณกรรม จากการสอบเทียบ พบว่า ความหนืดของตัวทำละลายทั้งสองสอดคล้องกับวรรณกรรม [33] ดังแสดงในตารางที่ 3.2 โดยมีร้อยละความเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย 1.86 และ 2.08 ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่ามาตรความหนืดที่ใช้มีความแม่นยำและเชื่อถือได้

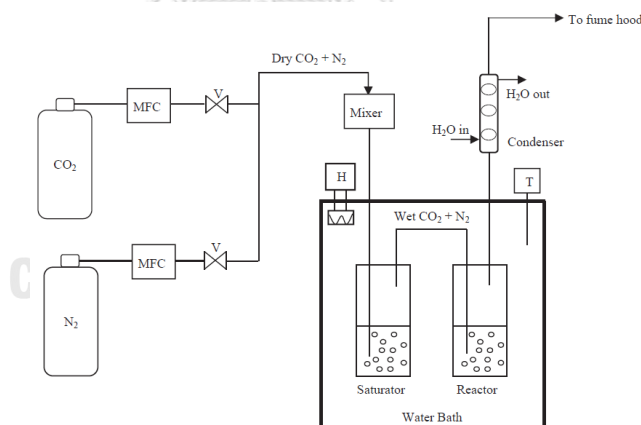
**ตารางที่ 3.2** ความหนืดของตัวทำละลาย MEA ความเข้มข้น 5 M และตัวทำละลาย MEA บริสุทธิ์ ในช่วงอุณหภูมิ 303–333 K

อุณหภูมิ (K)	ความหนืด (mPa·s)			
	5 M MEA		pure MEA	
	แหล่งอ้างอิง [33]	การทดลอง	แหล่งอ้างอิง [33]	การทดลอง
303	2.11	2.09	15.11	14.75
313	1.62	1.58	10.03	9.81
323	1.28	1.24	6.97	6.74
333	1.04	1.05	5.05	5.02

### 3.3.4 ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะสมดุล

รูปที่ 3.2 แสดงแผนภาพชุดอุปกรณ์วัดความสามารถในการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะสมดุล หรือ ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะสมดุล ขั้นตอนแรก บรรจุตัวทำละลายเอมีนปริมาตร 25 มิลลิลิตรในเครื่องปฏิบัติการดูดซับ จากนั้นป้อนแก๊สผสมระหว่าง

คาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจนที่ความดันบรรยากาศ โดยใช้อุปกรณ์ควบคุมการไหลของแก๊ส ควบคุมความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสม เป็น 12.2 30.4 50.7 81.0 และ 101.3 kPa ซึ่งสอดคล้องกับความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สไอเสียที่ปล่อยจากอุตสาหกรรมแต่ละประเภทในช่วงร้อยละ 12–100 โดยปริมาตร ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสม จะยืนยันด้วยอุปกรณ์รับรู้ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านโปรแกรม Gaslab จากนั้นป้อนแก๊สผสมดังกล่าวเข้าสู่อุปกรณ์เพิ่มความชื้น (Saturator) และเครื่องปฏิบัติการการดูดซึมตามลำดับ โดยอุปกรณ์เพิ่มความชื้นและเครื่องปฏิบัติการการดูดซึมจะแช่อยู่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิเพื่อควบคุมอุณหภูมิการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 313 K นอกจากนี้ บริเวณทางออกด้านบนของเครื่องปฏิบัติการการดูดซึมมีการติดตั้งเครื่องควบแน่นสำหรับควบแน่นเอมีนและน้ำที่ระเหยกลับสู่เครื่องปฏิบัติการการดูดซึม เพื่อคงความเข้มข้นของตัวทำละลายเอมีนตลอดการทดลอง หลังจากคาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับตัวทำละลายเอมีนแล้ว จึงดึงตัวอย่างตัวทำละลายเพื่อวัด  $\text{CO}_2$  loading จากชุดไทเทรต จนกระทั่ง  $\text{CO}_2$  loading มีค่าใกล้เคียงกัน กล่าวคือ ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุล โดยรายงาน  $\text{CO}_2$  loading ที่ภาวะสมดุล เป็น ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะสมดุล



รูปที่ 3.2 แผนภาพชุดอุปกรณ์ที่ใช้วัดความสามารถในการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะสมดุล [34]

เพื่อตรวจสอบความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของชุดอุปกรณ์ที่ใช้วัดการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ จึงสอบเทียบชุดอุปกรณ์ด้วยตัวทำละลาย MEA และ AMP ความเข้มข้น 2 M ดำเนินการที่อุณหภูมิ 313 K ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 10.1 30.4 50.7 81.0 และ

101.3 kPa ดังแสดงในตารางที่ 3.3 ผลการสอบเทียบ พบว่า ความจุการดูดซึมที่ได้สอดคล้องกับข้อมูลจากวรรณกรรม [31, 35] โดยมีร้อยละความเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย 1.63 และ 2.79 ตามลำดับ

**ตารางที่ 3.3** ความจุการดูดซึมของตัวทำละลาย MEA และ AMP ความเข้มข้น 2 M ที่อุณหภูมิ 313 K

ความดันย่อย คาร์บอนไดออกไซด์ (kPa)	ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ (mol CO <sub>2</sub> /mol amine)			
	2 M MEA		2 M AMP	
	แหล่งอ้างอิง [31]	การทดลอง	แหล่งอ้างอิง [35]	การทดลอง
10.1	0.556	0.580	0.715	0.747
30.4	0.643	0.636	0.826	0.840
50.7	0.683	0.686	0.877	0.885
81.0	0.72	0.723	0.924	0.953
101.3	0.738	0.752	0.947	0.982

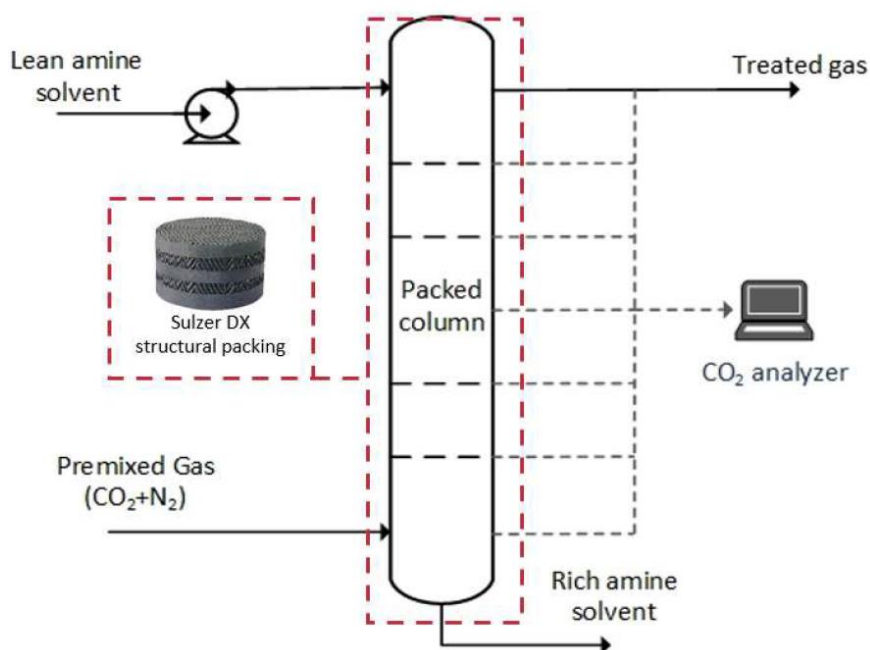
### 3.3.5 ความจวนกลับ

ความจวนกลับพิจารณาจากผลต่างความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะสมดุลต่อหน่วยปริมาตรระหว่างภาวะการดูดซึม (อุณหภูมิ 313 K) และภาวะการคืนสภาพ (อุณหภูมิ 363 K) ในหน่วย mol CO<sub>2</sub>/L-amine solution ดังแสดงในสมการที่ (2.34) ซึ่งการวัดความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 363 K ดำเนินการเช่นเดียวกับการวัดความจุการดูดซึมที่อุณหภูมิ 313 K ดังกล่าวแล้วในหัวข้อ 3.3.4 เพียงแต่ควบคุมอุณหภูมิดำเนินการเป็น 363 K เท่านั้น

### 3.3.6 สมรรถนะการถ่ายโอนมวลคาร์บอนไดออกไซด์ภายในหอดูดซึม

สมรรถนะการถ่ายโอนมวลคาร์บอนไดออกไซด์ทดลองจากการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวทำละลายเอมีนภายในหอดูดซึมที่บรรจุด้วยวัสดุบรรจุแบบจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ Sulzer DX ซึ่งหอดูดซึมมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 30 มิลลิเมตรและความสูง 1.6 เมตร รูปที่ 3.3 แสดงแผนภาพชุดอุปกรณ์ที่ใช้ทดลองการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ภายในหอดูดซึม โดยดำเนินการทดลองด้วยการป้อนตัวทำละลายเอมีนที่มีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ (Lean solvent) เข้าสู่ด้านบนของหอดูดซึมโดยใช้ปั๊มรีดสายยาง และป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 12 โดยปริมาตร จากด้านล่างของหอดูดซึมด้วยอุปกรณ์ควบคุมการไหลของแก๊ส โดยภาวะดำเนินการของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ภายในหอดูดซึมแสดงในตารางที่ 3.4 จากนั้นทำการวัดอุณหภูมิภายในหอดูดซึมตลอดความสูงของหอดูดซึมด้วยเทอร์มอคัปเปิลที่ส่งข้อมูลและแสดงผล

ที่คอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรม LabVIEW การทดลองการดูดซึมในหอดูดซึมจะดำเนินการจนกระทั่งอุณหภูมิคงตัว ซึ่งถือว่าระบบเข้าสู่ภาวะคงตัว จากนั้นวัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊สตลอดความสูงของหอดูดซึม โดยใช้ปั๊มหมุนเวียนแก๊สและอุปกรณ์รับรู้ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 3.3 แผนภาพชุดอุปกรณ์ที่ใช้ทดลองการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ภายในหอดูดซึม [9]

ตารางที่ 3.4 ภาวะดำเนินการของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ภายในหอดูดซึม [9]

พารามิเตอร์	ค่า
ความดัน (kPa)	101.3
อุณหภูมิของสารขาเข้า (K)	303
ฟลักซ์ของเหลวขาเข้า ( $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ )	3.67
ฟลักซ์แก๊สขาเข้า ( $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ )	509.30
Lean $\text{CO}_2$ loading (mol $\text{CO}_2$ /mol amine)	0.25
ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า	12% โดยปริมาตร
สัดส่วนความสูงของจุดตั้งตัวอย่างต่อความสูงหอดูดซึม ( $h/h_0$ )	0.25

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม ( $K_{Ga}$ ) คำนวณได้จากสมการที่ (2.51) โดยวัดการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเชิงโมลของตัวละลาย A (ในงานวิจัยนี้ คือ คาร์บอนไดออกไซด์) ตามความสูงของหอดูดซึม ( $\frac{dY_{A,G}}{dz}$ ) หรือ ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเชิงโมลของตัวละลาย A ในวัฏภาค

แก๊สตลอดความสูงของหอดูดซึม ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub> removal efficiency) คำนวณได้จากสมการที่ (3.3) โดยการวัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊สที่จุดป้อนเข้าและจุดดึงตัวอย่างด้วยอุปกรณ์รับรู้ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนความคลาดเคลื่อนการดุลมวล (Mass balance error) คำนวณจากสมการที่ (3.4) เพื่อใช้สำหรับตรวจสอบความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของการทดลอง จากการผลการทดลอง พบว่า ความคลาดเคลื่อนการดุลมวลเฉลี่ย เท่ากับ 4.93 โดยค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่ยอมรับได้ คือ ไม่เกินร้อยละ 10 [29] แสดงว่าการทดลองมีความแม่นยำและเชื่อถือได้

$$\text{CO}_2 \text{ removal efficiency (\%)} = \left| \frac{y_{\text{CO}_2, \text{inlet}} - y_{\text{CO}_2, \text{outlet}}}{y_{\text{CO}_2, \text{inlet}}} \right| \times 100\% \quad (3.3)$$

เมื่อ  $y_{\text{CO}_2, \text{inlet}}$  คือ สัดส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊สขาเข้า

$y_{\text{CO}_2, \text{outlet}}$  คือ สัดส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊ส ณ จุดดึงตัวอย่าง

$$\% \text{ Mass balance error} = \frac{\text{Absorbed}_{\text{CO}_2} - \text{Removed}_{\text{CO}_2}}{\text{Absorbed}_{\text{CO}_2}} \times 100\% \quad (3.4)$$

เมื่อ  $\text{Absorbed}_{\text{CO}_2}$  คือ อัตราการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคของเหลว (molCO<sub>2</sub>/min)

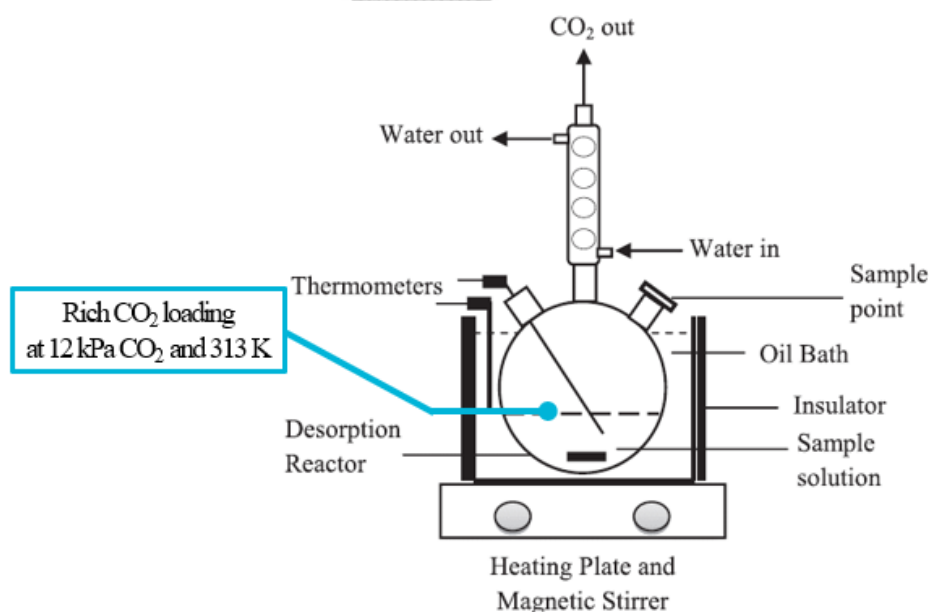
$\text{Removed}_{\text{CO}_2}$  คือ อัตราการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊ส (mol CO<sub>2</sub>/min)

### 3.3.7 อัตราการคืนสภาพเริ่มต้นและภาระทางความร้อนในการคืนสภาพตัวทำละลาย

แผนภาพชุดอุปกรณ์ที่ใช้ทดลองการคืนสภาพตัวทำละลายเอมีน แสดงดังรูปที่ 3.4 โดยเตรียมตัวทำละลายเอมีนปริมาตร 100 มิลลิลิตร อุณหภูมิ 313 K และมี CO<sub>2</sub> loading เริ่มต้นเท่ากับ CO<sub>2</sub> loading ที่สมดุลกับความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 12.2 kPa ที่ได้จากการทดลองความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้นนำตัวทำละลายดังกล่าวใส่เครื่องคืนสภาพตัวทำละลายที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 333 K โดยใช้เครื่องกวนสารละลายชนิดให้ความร้อนพร้อมชุดควบคุมอุณหภูมิให้ความร้อนแก่อ่างน้ำมันที่หุ้มด้วยฉนวนกันความร้อน จากนั้นอ่านอุณหภูมิของตัวทำละลายเอมีนจากเทอร์มอคัปเปิลในเครื่องคืนสภาพตัวทำละลาย และวัด CO<sub>2</sub> loading ของสารละลายตัวอย่างจากเครื่องคืนสภาพตัวทำละลาย ทุก 10 นาที เป็นเวลา 100 นาที



นำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณอัตราการคืนสภาพเริ่มต้นและภาระทางความร้อนในการคืนสภาพตัวทำละลายเอมีน ซึ่งอัตราการคืนสภาพเริ่มต้น คือ ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\text{CO}_2$  loading ของตัวทำละลายเอมีนในเครื่องคืนสภาพในช่วงเริ่มต้นตั้งแต่เริ่มทำการทดลองจนถึง 40 นาที ส่วนภาระทางความร้อนในการคืนสภาพตัวทำละลายเอมีน ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ภาระทางความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ ภาระทางความร้อนในการระเหยของน้ำและความร้อนสัมผัส ดังแสดงในสมการที่ (2.53) ทั้งนี้  $\text{CO}_2$  loading ที่เวลาเริ่มต้น (0 นาที) และที่เวลา 100 นาที จะนำไปใช้คำนวณความร้อนสัมผัสดังสมการที่ (2.58) โดย  $\text{CO}_2$  loading ที่เวลาเริ่มต้น และที่เวลา 100 นาที คือ  $\text{CO}_2$  loading ของตัวทำละลายเอมีนที่เติมไปด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (Rich loading) และ  $\text{CO}_2$  loading ของตัวทำละลายเอมีนที่มีคาร์บอนไดออกไซด์น้อยลง (Lean loading) ตามลำดับ นอกจากนี้ ความจุความร้อนของตัวทำละลายเอมีนที่ใช้ในการคำนวณความร้อนสัมผัสดังสมการที่ (2.58) วิเคราะห์ได้ด้วย Differential scanning calorimeter หรือ DSC (METTLER TOLEDO DSC-822e) ดำเนินการที่อุณหภูมิ 293-363 K เพื่อตรวจสอบความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของเครื่องมือที่ใช้วัดความจุความร้อน จึงสอบเทียบด้วยตัวทำละลาย MEA และ TEA บริสุทธิ์ ดำเนินการที่อุณหภูมิ 293-363 K ผลการสอบเทียบ พบว่า ความจุความร้อนที่ได้สอดคล้องกับข้อมูลจากวรรณกรรม [36] โดยมีร้อยละความเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย 5.35 และ 7.26 ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 แผนภาพชุดอุปกรณ์ที่ใช้ทดลองการคืนสภาพตัวทำละลายเอมีน [8]

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงานวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติเชิงกายภาพ สมรรถนะการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ สมรรถนะการคืนสภาพของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA โดยแบ่งออกเป็น 9 ส่วน ได้แก่ การสังเกตพฤติกรรม การตกตะกอนของตัวทำละลายเอมีน ความหนาแน่น ความหนืด ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ความจวนกลับ สมรรถการถ่ายโอนมวลคาร์บอนไดออกไซด์ภายในหอดูดซับ อัตราการคืนสภาพตัวทำละลายเริ่มต้น ภาระทางความร้อนในการคืนสภาพตัวทำละลาย และการประเมินศักยภาพตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA

#### 4.1 การสังเกตพฤติกรรมการตกตะกอนของตัวทำละลายเอมีน

ดังกล่าวข้างต้นว่าพฤติกรรมการตกตะกอนของเอมีนในตัวทำละลายเอมีนเป็นสมบัติเชิงกายภาพที่สำคัญ ซึ่งส่งผลอย่างมากต่อการดำเนินการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในห้องปฏิบัติการ โรงงานต้นแบบ และการดำเนินการจริงระดับอุตสาหกรรม ทั้งนี้ ตัวทำละลายเอมีนที่เหมาะสมสำหรับดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ต้องไม่เกิดตะกอนระหว่างการดักจับและหลังดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ งานวิจัยนี้สังเกตพฤติกรรมการตกตะกอนของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่อัตราส่วนความเข้มข้นเอมีนต่าง ๆ อุณหภูมิดำเนินการ 303 K และความเข้มข้นเอมีนรวม 5-6 M ดังแสดงในตารางที่ 4.1-4.3

พฤติกรรมการตกตะกอนของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ความเข้มข้นรวม 5 M แสดงดังตารางที่ 4.1 โดยตัวทำละลายดังกล่าวมีการคงความเข้มข้นของ TEA ในตัวทำละลายเอมีนผสมเป็น 1 1.5 และ 2 M ตามลำดับ และเปลี่ยนอัตราส่วนเชิงโมลาร์ PZ/AMP เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของ TEA และ อัตราส่วนเชิงโมลาร์ PZ/AMP ต่อพฤติกรรมการตกตะกอน เมื่อพิจารณาตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่อัตราส่วนความเข้มข้นของ TEA เป็น 1 M พบว่า ตัวทำละลายที่ไม่ผ่านการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนใหญ่ไม่เกิดตะกอนของเอมีน มีเพียงตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ความเข้มข้นเชิงโมลาร์ 1:3:1 และ 0.8:3.2:1 ที่ตกตะกอน ทั้งนี้ เนื่องจาก PZ เป็นเอมีนที่เกิดตะกอนได้ง่ายและมีสภาพการละลายน้ำต่ำ เมื่อผสม PZ ในตัวทำละลายผสมด้วยความเข้มข้นสูงจึงเกิดตะกอนของแข็งขึ้น สำหรับตัวทำละลายที่เติมไปด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ หรือ ตัวทำละลายที่มี  $\text{CO}_2$  loading เป็น 0.6 mol  $\text{CO}_2$ /mol amine พบว่า เกิดตะกอนของแข็งทุกอัตราส่วนความเข้มข้นที่ศึกษา เมื่อคาร์บอนไดออกไซด์เกิดปฏิกิริยากับ AMP และ PZ

จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บาเมตของ AMP และ PZ ตามลำดับ ซึ่งคาร์บาเมตของเอมีนทั้งสองมีมวลโมเลกุลสูงเกินกว่าเอมีนที่ไม่ผ่านการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ จึงทำให้ตกตะกอนของเอมีนได้ง่ายกว่าเอมีนที่ไม่ผ่านการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ จากผลการทดลองดังกล่าว จึงสรุปได้ว่าตัวทำละลายผสม AMP-PZ-TEA ที่มีความเข้มข้นของ TEA เป็น 1 M ไม่เหมาะสำหรับใช้ดักจับคาร์บอนไดออกไซด์

สำหรับตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่มีความเข้มข้นของ TEA เป็น 1.5 และ 2 M นั้น พบว่าตัวทำละลายในสัดส่วนความเข้มข้นที่ศึกษาไม่เกิดตะกอนทุกอัตราส่วนเมื่อไม่ผ่านการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ แต่เมื่อผ่านคาร์บอนไดออกไซด์ลงในตัวทำละลายดังกล่าวจะมี  $\text{CO}_2$  loading เป็น  $0.6 \text{ mol CO}_2/\text{mol amine}$  พบว่า ตัวทำละลายบางส่วนคงสภาพความเป็นของเหลวได้โดยตัวทำละลายที่เกิดตะกอนของแข็งนั้น คือ ตัวทำละลายที่มีอัตราส่วนเชิงโมลาร์ PZ/AMP ต่ำ คือ ประมาณ 0.5-1 ผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การลดอัตราส่วนเชิงโมลาร์ PZ/AMP มากเกินไป หรือ การเพิ่มอัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP ในตัวทำละลายผสมมากเกินไปทำให้เกิดการตกตะกอนของเอมีนได้ ทั้งนี้ กล่าวได้ว่าความเข้มข้นของ TEA ต่ำที่สุดในสารละลายผสมความเข้มข้นรวม 5 M ที่ไม่พบตะกอนของแข็งทั้งในตัวทำละลายที่ไม่ผ่านการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และผ่านการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ คือ 1.5 M

เนื่องจากตัวทำละลายเอมีนความเข้มข้นสูงสามารถดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้มาก เพราะมีเอมีนที่เกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น งานวิจัยนี้จึงศึกษาพฤติกรรมการตกตะกอนของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่ความเข้มข้นเอมีนรวมสูงขึ้น โดยเพิ่มความเข้มข้นของเอมีนแต่ละชนิด 0.5 และ 1 M ในตัวทำละลาย 1:2:2 0.75:2.25:2 และ 0.5:2.5:2 ทำให้มีความเข้มข้นเอมีนรวมเป็น 5.5 และ 6 M ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มความเข้มข้น AMP หรือ PZ หรือ TEA 0.5 และ 1 M ในตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ไม่พบตะกอนของแข็งในสารละลายที่ไม่ผ่านการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ตัวทำละลายที่ศึกษาส่วนใหญ่เกิดการตกตะกอนที่  $\text{CO}_2$  loading เป็น  $0.6 \text{ mol CO}_2/\text{mol amine}$  มีเพียงตัวทำละลายที่มีอัตราส่วนความเข้มข้น 0.5:2.5:2.5 เท่านั้นที่ไม่เกิดตะกอน ซึ่งการเพิ่มความเข้มข้นของ AMP หรือ PZ ในตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ความเข้มข้น 1:2:2 0.75:2.25:2 และ 0.5:2.5:2 ทำให้ได้ตัวทำละลายผสมความเข้มข้น 1.5:2:2 1.25:2.25:2 และ 1:2.5:2 (เพิ่มอัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP 0.5 M) และ 1:2.5:2 0.75:2.75:2 และ 0.5:3:2 (เพิ่มอัตราส่วนความเข้มข้นของ PZ 0.5 M) ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และ 2:2:2 1.75:2.25:2 และ 1.5:2.5:2 (เพิ่มอัตราส่วนความเข้มข้นของ

AMP 1 M) และ 1:3:2 0.75:2.25:2 และ 0.5:3.5:2 (เพิ่มอัตราส่วนความเข้มข้นของ PZ 1 M) ดังแสดงในตารางที่ 4.3 โดยการเพิ่มอัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP หรือ PZ เป็นการเพิ่มความเข้มข้นของเอมีนองค์ประกอบที่ตกตะกอนได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสารละลายที่เต็มไปด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับการเพิ่มความเข้มข้นของเอมีนองค์ประกอบที่ไม่ตกตะกอน คือ TEA ในอัตราส่วนเชิงโมลาร์ 0.5 M และ 1 M ในตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ความเข้มข้น 1:2:2 0.75:2.25:2 และ 0.5:2.5:2 พบว่า ตัวทำละลาย 1:2:2.5 0.75:2.25:2.5 และ 0.5:2.5:2.5 (เพิ่มอัตราส่วนความเข้มข้นของ TEA 0.5 M) ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และ 1:2:2 0.75:2.25:2 และ 0.5:2.5:2 (เพิ่มอัตราส่วนความเข้มข้นของ TEA 1 M) ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ทำให้ตัวทำละลายที่เต็มไปด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ตกตะกอนเช่นเดียวกับการเพิ่มความเข้มข้นของเอมีนองค์ประกอบที่ตกตะกอนได้ คือ AMP หรือ PZ ทั้งนี้ เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนความเข้มข้นของ TEA ในตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA เป็นการลดอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำล้าง ซึ่งคาร์บาเมตของ AMP และ คาร์บาเมตของ PZ มีสภาพการละลายน้ำต่ำ จึงส่งผลให้ตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ในอัตราส่วนที่กล่าวข้างต้นเกิดการตกตะกอนได้

จากการสังเกตพฤติกรรมการตกตะกอนของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA พบว่า ปัจจัยที่ทำให้ตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ตกตะกอน ได้แก่ การเพิ่ม CO<sub>2</sub> loading ในตัวทำละลาย การใช้ตัวทำละลายผสมที่มีอัตราส่วนเชิงโมลาร์ PZ/AMP สูงหรือต่ำเกินไป และการเพิ่มความเข้มข้นของเอมีนรวมจาก 5 M เป็น 5.5 M และ 6 M โดยเพิ่มอัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP หรือ PZ หรือ TEA

ในงานวิจัยนี้ อัตราส่วนความเข้มข้นของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่ไม่เกิดตะกอนของเอมีนในสารละลายที่ไม่ผ่านการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์จะนำไปวัดความหนาแน่นและความหนืดในหัวข้อที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ และ ตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ความเข้มข้นรวม 5 M ที่ไม่เกิดตะกอนทั้งที่ไม่ผ่านและผ่านการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ ได้แก่ 1:2:2.3:1.5 1:2.5:1.5 0.9:2.6:1.5 0.7:2.8:1.5 1:2:2 0.75:2.25:2 0.6:2.4:2 และ 0.5:2.5:2 จะนำไปใช้ศึกษาความจุการดูดซึมต่อไปในหัวข้อที่ 4.4

ตารางที่ 4.1 การสังเกตพฤติกรรมการตกตะกอนของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ความเข้มข้น 5 M

อัตราส่วนความเข้มข้น ตัวทำละลายเอมีน (AMP: PZ: TEA)	ความเข้มข้น รวม (M)	อัตราส่วน เชิงโมลาร์ PZ/AMP	การสังเกตพฤติกรรมการตกตะกอน	
			0 mol CO <sub>2</sub> /mol amine	0.6 mol CO <sub>2</sub> /mol amine
3.3: 0.7: 1		0.21	C	P
2.7: 1.3: 1		0.48	C	P
2: 2: 1		1	C	P
1.3: 2.7: 1		2.08	C	P
1: 3: 1		3	P	P
0.8: 3.2: 1		4	P	P
2.3: 1.2: 1.5		0.52	C	P
1.75: 1.75: 1.5		1	C	P
1.2: 2.3: 1.5		1.92	C	C
1: 2.5: 1.5		2.5	C	C
0.9: 2.6: 1.5		2.89	C	C
0.7: 2.8: 1.5	5	4	C	C
0: 3.5: 1.5		–	C	C
3: 0: 2		0	C	P
2.5: 0.5: 2		0.2	C	P
2: 1: 2		0.5	C	P
1.5: 1.5: 2		1	C	P
1: 2: 2		2	C	C
0.75: 2.25: 2		3	C	C
0.6: 2.4: 2		4	C	C
0.5: 2.5: 2		5	C	C
0: 3: 2		–	C	C

P คือ เกิดตกตะกอน C คือ ไม่เกิดตะกอน

ตารางที่ 4.2 การสังเกตพฤติกรรมการตกตะกอนของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ความเข้มข้นรวม 5.5 M

อัตราส่วนความเข้มข้น ตัวทำละลายเอมีน (AMP: PZ: TEA)	ความเข้มข้น รวม (M)	อัตราส่วน เชิงโมลาร์ PZ/AMP	การสังเกตพฤติกรรมการตกตะกอน	
			0 mol CO <sub>2</sub> /mol amine	0.6 mol CO <sub>2</sub> /mol amine
1.5: 2: 2	5.5	1.33	C	P
1: 2.5: 2		2.5	C	P
1: 2: 2.5		2	C	P
1.25: 2.25: 2		1.8	C	P
0.75: 2.75: 2		3.67	C	P
0.75: 2.25: 2.5		3	C	P
1: 2.5: 2		2.5	C	P
0.5: 3: 2		6	C	P
0.5: 2.5: 2.5		5	C	C

P คือ เกิดตกตะกอน C คือ ไม่เกิดตะกอน

ตารางที่ 4.3 การสังเกตพฤติกรรมการตกตะกอนของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ความเข้มข้นรวม 6 M

อัตราส่วนความเข้มข้น ตัวทำละลายเอมีน (AMP: PZ: TEA)	ความเข้มข้น รวม (M)	อัตราส่วน เชิงโมลาร์ PZ/AMP	การสังเกตพฤติกรรมการตกตะกอน	
			0 mol CO <sub>2</sub> /mol amine	0.6 mol CO <sub>2</sub> /mol amine
2: 2: 2	6	1	C	P
1: 3: 2		3	C	P
1: 2: 3		2	C	P
1.75: 2.25: 2		1.28	C	P
0.75: 3.25: 2		4.33	C	P
0.75: 2.25: 3		3	C	P
1.5: 2.5: 2		1.67	C	P
0.5: 3.5: 2		7	C	P
0.5: 2.5: 3		5	C	P

P คือ เกิดตกตะกอน C คือ ไม่เกิดตะกอน

## 4.2 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ ตามที่กล่าวถึงในหัวข้อ 4.1 จากมาตรความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 303–333 K แสดงดังตารางที่ 4.4 และ รูปที่ 4.1 ผลการศึกษา พบว่า ความหนาแน่นของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการทำให้โมเลกุลเกิดการสั่นและอยู่ห่างกันมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาตรที่โมเลกุลครอบอยู่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาความหนาแน่นของตัวทำละลายผสมที่อัตราส่วนความเข้มข้น TEA ในตัวทำละลายเอมีนผสมเท่ากัน คือ 1 1.5 และ 2 M พบว่า ความหนาแน่นของตัวทำละลายเอมีนผสมสูงขึ้น เมื่ออัตราส่วนเชิงโมลาร์ PZ/AMP เพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และ รูปที่ 4.1 เนื่องจาก PZ มีความหนาแน่นมากกว่า AMP ดังแสดงในตารางที่ 2.3 เมื่อคงอัตราส่วนเชิงโมลาร์ของ TEA ความหนาแน่นของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA จึงสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเชิงโมลาร์ PZ/AMP จากข้อมูลข้างต้นจึงกล่าวได้ว่า ความหนาแน่นของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ขึ้นกับอัตราส่วนความเข้มข้นของแต่ละเอมีนองค์ประกอบและอุณหภูมิ นอกจากนี้ ยังเห็นได้ว่าความหนาแน่นของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA สูงกว่าตัวทำละลายดั้งเดิม 5 M MEA เล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งถือได้ว่าความหนาแน่นของเอมีนทั้งสองอยู่ในช่วงเดียวกัน และ ตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA สามารถใช้ในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในเชิงความหนาแน่นได้

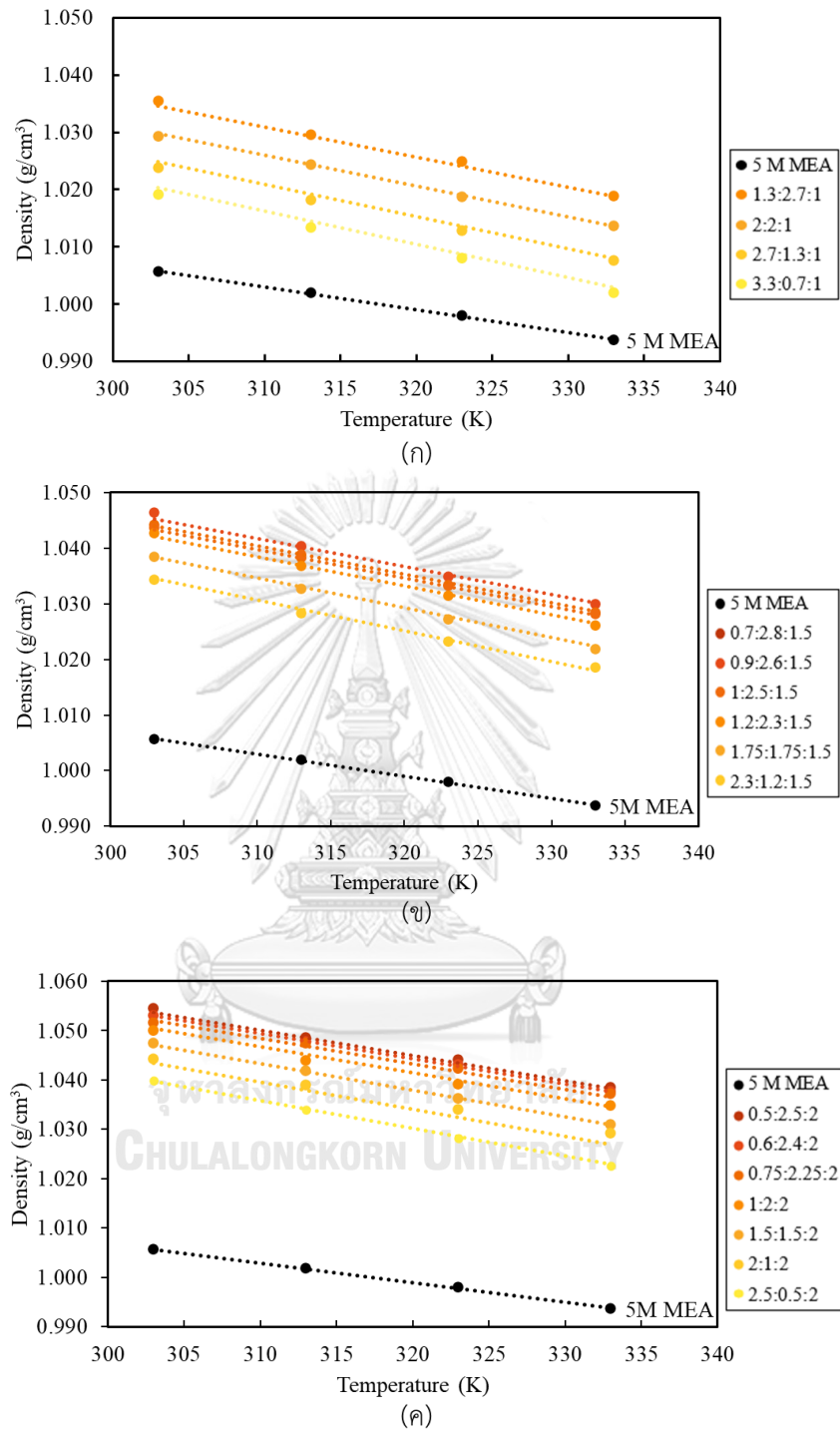
สมการ Redlich-Kister สำหรับปริมาตรเชิงโมลส่วนเกิน ดังแสดงในสมการที่ (2.26) ถึง (2.30) ถูกนำมาใช้พัฒนาสหสัมพันธ์เชิงทำนาย เพื่อประมาณความหนาแน่นของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA โดยใช้ความหนาแน่นของตัวทำละลายผสมที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ ได้แก่ 3.3:0.7:1 2.7:1.3:1 2:2:1 1.3:2.7:1 2.3:1.2:1.5 1.75:1.75:1.5 1.2:2.3:1.5 1:2.5:1.5 0.9:2.6:1.5 0.7:2.8:1.5 2.5:0.5:2 2:1:2 1.5:1.5:2 1:2:2 0.75:2.25:2 0.6:2.4:2 0.5:2.5:2 และ 0.5:2.5:2.5 ในช่วงอุณหภูมิ 303–333 K มาพัฒนาสหสัมพันธ์เชิงทำนาย โดยพารามิเตอร์คงตัว  $a$   $b$  และ  $c$  สำหรับสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นกับอุณหภูมิ ( $A_k$ ) คำนวณได้จากการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งพารามิเตอร์คงตัวทั้งสามแสดงในตารางที่ 4.5 รูปที่ 4.1 แสดงความหนาแน่นของเอมีนผสมที่ได้จากการทดลอง (จุด) และ ความหนาแน่นของเอมีนผสมที่ได้จากสหสัมพันธ์เชิงทำนาย (เส้นประ) เมื่อพิจารณาผลการทำนาย พบว่า ความหนาแน่นของตัวทำละลายเอมีนผสมที่ได้จากการทำนายมีค่าใกล้เคียงกับความหนาแน่นที่ได้จากการทดลองมาก โดยมีร้อยละความเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ยเพียง 0.05 ทั้งนี้ งานวิจัยนี้ยังได้ทดสอบความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของสหสัมพันธ์เชิงทำนายที่พัฒนาขึ้นสำหรับความหนาแน่นของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA โดยใช้สหสัมพันธ์เชิงทำนาย

ดังกล่าวทำนายข้อมูลที่ไม่ได้ใช้สร้างสหสัมพันธ์เชิงทำนาย คือ ความหนาแน่นของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 2.7:1.3:1 2.5:0.5:1.5 0.7:2.8:1.5 และ 1.5:1.5:2 ในช่วงอุณหภูมิ 303–333 K ผลการทดสอบ พบว่า สหสัมพันธ์เชิงทำนายที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายความหนาแน่นของตัวทำละลายผสมที่ใช้ทดสอบได้เป็นอย่างดี โดยมีร้อยละความเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย 0.07 จึงสรุปได้ว่า สหสัมพันธ์เชิงทำนายที่พัฒนาขึ้นสามารถประมาณความหนาแน่นของตัวทำละลายเอมีน AMP-PZ-TEA ในช่วงอุณหภูมิ 303–333 K ได้

**ตารางที่ 4.4** ความหนาแน่นของตัวทำละลาย 5 M MEA และ AMP-PZ-TEA

อุณหภูมิ (K)	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )				
	5 M MEA	อัตราส่วนความเข้มข้นตัวทำละลาย AMP:PZ:TEA			
		3.3:0.7:1	2.7:1.3:1	2:2:1	1.3:2.7:1
303	1.006 ±0.004	1.019 ±0.004	1.024 ±0.004	1.029 ±0.004	1.035 ±0.004
313	1.002 ±0.004	1.013 ±0.004	1.018 ±0.004	1.024 ±0.004	1.029 ±0.004
323	0.998 ±0.004	1.008 ±0.004	1.013 ±0.003	1.019 ±0.004	1.025 ±0.004
333	0.994 ±0.004	1.002 ±0.003	1.008 ±0.004	1.014 ±0.004	1.019 ±0.004
	<b>2.3:1.2:1.5</b>	<b>1.75:1.75:1.5</b>	<b>1.2:2.3:1.5</b>	<b>1:2.5:1.5</b>	<b>0.9:2.6:1.5</b>
303	1.034 ±0.004	1.038 ±0.004	1.043 ±0.004	1.044 ±0.004	1.044 ±0.004
313	1.028 ±0.004	1.033 ±0.003	1.037 ±0.004	1.039 ±0.004	1.038 ±0.004
323	1.023 ±0.004	1.027 ±0.004	1.031 ±0.004	1.033 ±0.004	1.033 ±0.002
333	1.019 ±0.003	1.022 ±0.003	1.026 ±0.004	1.028 ±0.004	1.028 ±0.004
	<b>0.7:2.8:1.5</b>	<b>2.5:0.5:2</b>	<b>2:1:2</b>	<b>1.5:1.5:2</b>	<b>1:2:2</b>
303	1.046 ±0.004	1.040 ±0.004	1.044 ±0.004	1.047 ±0.004	1.048 ±0.004
313	1.040 ±0.004	1.034 ±0.005	1.039 ±0.004	1.042 ±0.004	1.044 ±0.004
323	1.035 ±0.003	1.028 ±0.004	1.034 ±0.004	1.036 ±0.004	1.039 ±0.004
333	1.030 ±0.003	1.023 ±0.005	1.029 ±0.003	1.031 ±0.004	1.035 ±0.004
	<b>0.75:2.25:2</b>	<b>0.6:2.4:2</b>	<b>0.5: 2.5: 2</b>	<b>0.5: 2.5: 2.5</b>	
303	1.052 ±0.004	1.053 ±0.005	1.055 ±0.004	1.064 ±0.005	
313	1.047 ±0.004	1.048 ±0.004	1.049 ±0.003	1.058 ±0.004	
323	1.042 ±0.005	1.043 ±0.003	1.044 ±0.003	1.053 ±0.003	
333	1.037 ±0.005	1.038 ±0.004	1.038 ±0.004	1.047 ±0.004	





**รูปที่ 4.1** ความหนาแน่นของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA เปรียบเทียบกับตัวทำละลาย 5 M MEA ที่มีอัตราส่วนความเข้มข้น TEA ในตัวทำละลายเอมีนผสม (ก) 1 M (ข) 1.5 M และ (ค) 2 M (จุด) แสดงความหนาแน่นที่ได้จากการทดลอง และ (เส้นประ) แสดงความหนาแน่นของเอมีนผสมที่ได้จากสหสัมพันธ์เชิงทำนาย

**ตารางที่ 4.5** พารามิเตอร์คงตัว สำหรับสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นกับอุณหภูมิ ( $A_k$ )

Temperature dependent coefficient ( $A_k$ )	Constant parameter	Binary pair							
		AMP(1) – PZ(2)	AMP(1) – TEA(3)	AMP(1) – Water(4)	PZ(2) – TEA(3)	PZ(2) – Water(4)	TEA(3) – Water(4)		
$A_0$	a	$-1.9803 \times 10^2$	$1.1371 \times 10^2$	$-1.2547 \times 10^3$	$-1.7259 \times 10^2$	$2.1762 \times 10^2$	$4.3385 \times 10^2$		
	b	1.2479	$-7.0220 \times 10^{-1}$	7.8022	1.0539	-1.4455	-2.8112		
	c	$-1.9614 \times 10^{-3}$	$1.0805 \times 10^{-3}$	$-1.2155 \times 10^{-2}$	$-1.5983 \times 10^{-3}$	$2.4169 \times 10^{-3}$	$4.5147 \times 10^{-3}$		
$A_1$	a	$1.3272 \times 10^1$	$-1.1129 \times 10^{-1}$	$-8.0137 \times 10^2$	$3.8111 \times 10^4$	$8.8954 \times 10^2$	$8.4812 \times 10^2$		
	b	$-8.1880 \times 10^{-2}$	$1.1599 \times 10^{-3}$	5.0149	$-2.3539 \times 10^2$	-5.6785	-5.3244		
	c	$1.2583 \times 10^{-4}$	$-2.5675 \times 10^{-6}$	$-7.8046 \times 10^{-3}$	$3.6325 \times 10^1$	$9.0371 \times 10^{-3}$	$8.3573 \times 10^{-3}$		
$A_2$	a	$2.0221 \times 10^{-1}$	1.0419	$4.7362 \times 10^2$	$1.5646 \times 10^{-1}$	$9.7441 \times 10^2$	$1.1647 \times 10^2$		
	b	$-1.3726 \times 10^{-3}$	$-6.6359 \times 10^{-3}$	-2.9149	$-9.5391 \times 10^{-4}$	-6.1935	$-5.9615 \times 10^{-1}$		
	c	$2.3277 \times 10^{-6}$	$1.0559 \times 10^{-5}$	$4.4578 \times 10^{-3}$	$1.4517 \times 10^{-6}$	$9.8249 \times 10^{-3}$	$7.0495 \times 10^{-4}$		

### 4.3 ความหนืด

ความหนืดของตัวทำละลายเอมีนเป็นหนึ่งในสมบัติเชิงกายภาพที่สำคัญสำหรับการออกแบบกระบวนการและการศึกษาอุทกพลศาสตร์ของของไหลในหลอดซีม งานวิจัยนี้จึงวัดความหนืดของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่อุณหภูมิ 303-333 K ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.2 จากข้อมูลดังกล่าว พบว่า ที่อัตราส่วนความเข้มข้น TEA คงตัว ความหนืดของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ของเหลวได้รับพลังงานความร้อนเพิ่มขึ้น จึงทำให้โมเลกุลเกิดการสั่นหรือมีพลังงานจลน์มากขึ้น ของเหลวจึงไหลได้ง่ายขึ้น ดังนั้น ความหนืดซึ่งแสดงถึงความต้านทานการไหลของของเหลวจึงลดลง เมื่อพิจารณารูปที่ 4.2 (ก) ซึ่งแสดงความหนืดของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่อัตราส่วนความเข้มข้น TEA คงตัวที่ 1 M พบว่า ความหนืดของตัวทำละลายเอมีนผสมสูงขึ้น เมื่ออัตราส่วนเชิงโมลาร์ PZ/AMP เพิ่มขึ้นในช่วง 0.21 (3.3:0.7:1) ถึง 2.08 (1.3:2.7:1) ทั้งนี้ เนื่องจากความหนืดของตัวทำละลาย PZ สูงกว่าตัวทำละลาย AMP ที่ความเข้มข้นเดียวกัน [37, 38] นอกจากนี้ยังพบว่า ผลของอัตราส่วนเชิงโมลาร์ PZ/AMP ต่อความหนืดของตัวทำละลายเอมีนผสม AMP-PZ-TEA ที่ความเข้มข้นของ TEA คงตัว เป็น 1.5 และ 2 M มีแนวโน้มเดียวกับกรณีที่ความเข้มข้นของ TEA คงตัว เป็น 1 M ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ข) และ (ค) อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาผลอัตราส่วนความเข้มข้น TEA ต่อความหนืดของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA พบว่า ความหนืดของตัวทำละลายผสมที่มีอัตราส่วนความเข้มข้นของ TEA เป็น 2 M มีค่ามากกว่าความหนืดของตัวทำละลายผสมที่มีความเข้มข้นของ TEA เป็น 1.5 และ 1 M ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ก) (ข) และ (ค) เนื่องจากที่ความเข้มข้นเดียวกัน TEA มีความหนืดสูงกว่า PZ และ AMP [37-39] ข้อความข้างต้นสอดคล้องกับผลการวัดความหนืดของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ซึ่งตัวทำละลาย 0.5:2.5:2 มีความหนืดสูงสุด คือ 16.08-4.56 mPa·s และ ตัวทำละลาย 1.3:2.7:1 มีความหนืดสูงสุด คือ 11.38-3.47 mPa·s ในช่วงอุณหภูมิที่ศึกษา อย่างไรก็ตาม ตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่ทำการศึกษามีความหนืดสูงกว่าตัวทำละลายเกณฑ์เปรียบเทียบ 5 M MEA มาก ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ก) (ข) และ (ค) ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวทำละลายผสมดั้งเดิม เช่น 4.21 M MDEA-1.24 M PZ พบว่า ความหนืดของตัวทำละลายเอมีนผสมทั้งสองชนิดอยู่ในช่วงเดียวกัน จึงอาจกล่าวได้ว่าตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA สามารถใช้ดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในเชิงความหนืดได้

ข้อมูลความหนืดของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่อัตราส่วนความเข้มข้นและอุณหภูมิต่าง ๆ ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถใช้พัฒนาสหสัมพันธ์เชิงทำนายเพื่อประมาณความหนืด

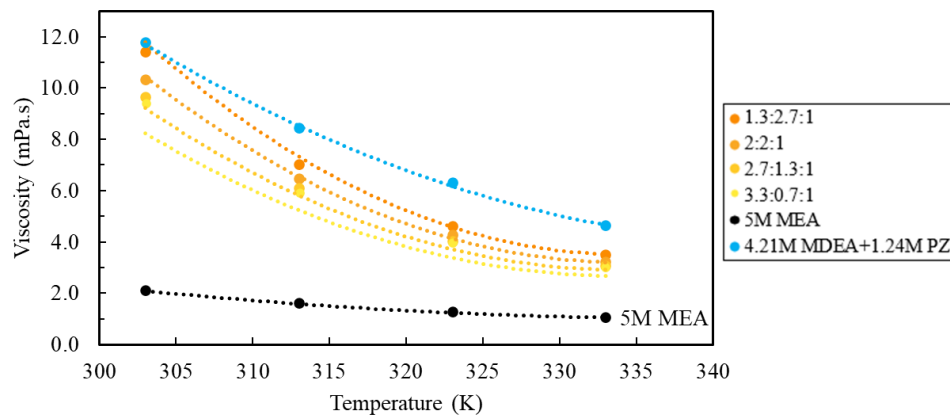
ของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ได้ เนื่องจาก PZ เป็นของแข็ง จึงไม่ทราบความหนืดของ PZ บริสุทธิ์ ดังนั้น สมการ Redlich-Kister จึงไม่เหมาะสำหรับสร้างสหสัมพันธ์เชิงทำนายสำหรับ ความหนืดของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้แบบจำลอง Grunberg-Nissan แทน ดังแสดงในสมการที่ (2.32) และ (2.33) โดยมีการใช้ชุดข้อมูลความหนืดของตัวทำละลายผสม ที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ ในช่วงอุณหภูมิ 303–333 K สำหรับการพัฒนาเช่นเดียวกับชุดข้อมูล ที่ใช้สำหรับพัฒนาสหสัมพันธ์เชิงทำนายสำหรับความหนาแน่นในหัวข้อ 4.2 จากการวิเคราะห์ การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น พารามิเตอร์คงตัว  $a'$ ,  $b'$  และ  $c'$  สำหรับสัมประสิทธิ์ไร้หน่วยที่ขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ ( $G_p$ ) แสดงได้ดังตารางที่ 4.7 โดยความหนืดของตัวทำละลายผสมที่ได้จากการทำนาย แสดงในรูปที่ 4.2 (ก) (ข) และ (ค) ด้วยเส้นประ เมื่อเปรียบเทียบกับความหนืดของตัวทำละลายผสม ที่ได้จากการทดลอง ซึ่งแสดงด้วยจุด พบว่า ความหนืดของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ในช่วงอุณหภูมิ 303–333 K ที่ได้จากแบบจำลอง Grunberg-Nissan มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง โดยมีร้อยละความเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย 3.07 นอกจากนี้ ยังมีการทดสอบความน่าเชื่อถือ ของสหสัมพันธ์เชิงทำนายที่พัฒนาขึ้นที่ด้วยชุดข้อมูลความหนืดที่ไม่ได้ใช้สร้างสหสัมพันธ์เชิงทำนาย (2.7:1.3:1 2.5:0.5:1.5 0.7:2.8:1.5 และ 1.5:1.5:2) ผลการทดสอบ พบว่า ร้อยละความเบี่ยงเบน สัมบูรณ์เฉลี่ยของการทดสอบ คือ ร้อยละ 4.71 ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ คือต่ำกว่าร้อยละ 5 จึงสรุปได้ว่า แบบจำลอง Grunberg-Nissan ที่พัฒนาขึ้นสำหรับสามารถประมาณความหนืด ของตัวทำละลายเอมีน AMP-PZ-TEA ตลอดช่วงอุณหภูมิ 303–333 K ได้

ตารางที่ 4.6 ความหนืดของตัวทำละลาย 5 M MEA และ AMP-PZ-TEA

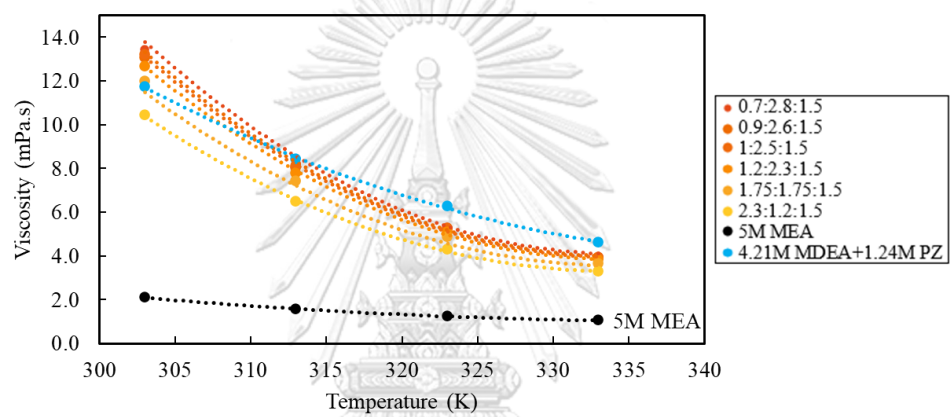
อุณหภูมิ (K)	ความหนืด (mPa·s)				
	5 M MEA	อัตราส่วนความเข้มข้นตัวทำละลาย AMP:PZ:TEA			
		3.3:0.7:1	2.7:1.3:1	2:2:1	1.3:2.7:1
303	2.09 ±0.01	9.40 ±0.02	9.62 ±0.02	10.29 ±0.02	11.38 ±0.01
313	1.58 ±0.01	5.91 ±0.01	6.06 ±0.01	6.44 ±0.01	7.01 ±0.01
323	1.24 ±0.01	3.95 ±0.01	4.00 ±0.01	4.25 ±0.01	4.60 ±0.01
333	1.05 ±0.01	3.01 ±0.01	3.05 ±0.01	3.20 ±0.02	3.47 ±0.01
	<b>2.3:1.2:1.5</b>	<b>1.75:1.75:1.5</b>	<b>1.2:2.3:1.5</b>	<b>1:2.5:1.5</b>	<b>0.9:2.6:1.5</b>
303	10.42 ±0.01	11.97±0.02	12.68 ±0.01	13.19 ±0.01	13.08 ±0.01
313	6.49 ±0.01	7.43 ±0.01	7.79 ±0.01	8.09 ±0.01	8.03 ±0.01
323	4.30 ±0.01	4.87 ±0.02	5.09 ±0.01	5.25 ±0.01	5.24 ±0.01
333	3.28 ±0.01	3.66 ±0.01	3.81 ±0.02	3.93 ±0.02	3.89 ±0.02

ตารางที่ 4.6 ความหนืดของตัวทำละลาย 5 M MEA และ AMP-PZ-TEA (ต่อ)

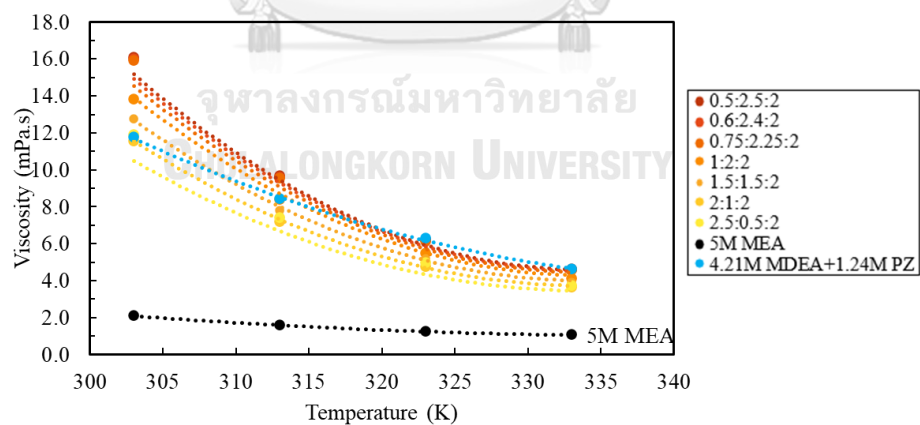
อุณหภูมิ (K)	ความหนืด (mPa·s)				
	อัตราส่วนความเข้มข้นตัวทำละลาย AMP:PZ:TEA				
	0.7:2.8:1.5	2.5:0.5:2	2:1:2	1.5:1.5:2	1:2:2
303	13.45 ±0.01	11.89 ±0.01	11.54 ±0.01	12.76 ±0.01	13.82 ±0.01
313	8.24 ±0.02	7.39 ±0.01	7.20 ±0.01	7.79 ±0.01	8.38 ±0.01
323	5.31 ±0.02	4.96 ±0.01	4.76 ±0.01	5.17±0.01	5.47 ±0.01
333	3.95 ±0.01	3.71 ±0.01	3.62 ±0.01	3.89 ±0.01	4.10 ±0.01
	0.75:2.25:2	0.6:2.4:2	0.5: 2.5: 2	0.5: 2.5: 2.5	
303	15.89 ±0.02	15.98 ±0.02	16.08 ±0.01	23.97 ±0.01	
313	9.56 ±0.01	9.57 ±0.02	9.64 ±0.02	13.99 ±0.01	
323	6.13 ±0.001	6.20 ±0.01	6.18 ±0.01	8.26 ±0.01	
333	4.58 ±0.02	4.60 ±0.01	4.56 ±0.01	6.27 ±0.02	



(ก)



(ข)



(ค)

**รูปที่ 4.2** ความหนืดของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA เปรียบเทียบกับตัวทำละลาย 5 M MEA และ MDEA-PZ ที่มีอัตราส่วนความเข้มข้น TEA ในตัวทำละลายเอมีนผสมเป็น (ก) 1 M (ข) 1.5 M และ (ค) 2 M (จุด) แสดงความหนืดที่ได้จากการทดลอง และ (เส้นประ) แสดงความหนืดของเอมีนผสมที่ได้จากสหสัมพันธ์เชิงทำนาย

**ตารางที่ 4.7** พารามิเตอร์คงตัวสำหรับสมการที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ( $G_{ij}$ )

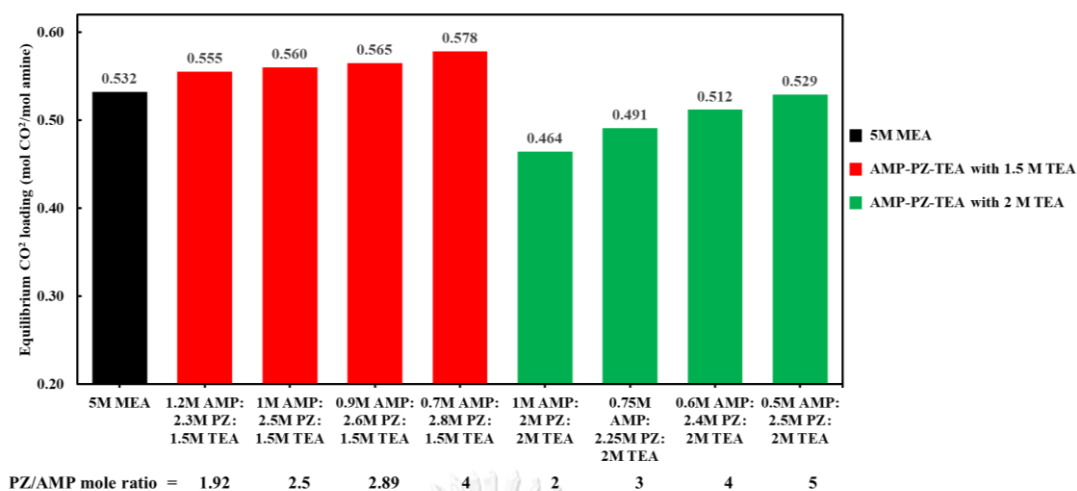
Temperature dependent coefficient ( $G_{ij}$ )	Constant parameter	Binary pair						
		AMP(1) – PZ(2)	AMP(1) – TEA(3)	AMP(1) – Water(4)	PZ(2) – TEA(3)	PZ(2) – Water(4)	TEA(3) – Water(4)	
$a'$	2.5879	5.9396	4.9486 $\times 10^2$	1.1548 $\times 10^1$	5.3226 $\times 10^2$	4.3974 $\times 10^2$		
$b'$	-8.7537 $\times 10^{-3}$	-2.0466 $\times 10^{-2}$	-2.7615	-5.3094 $\times 10^{-2}$	-2.8568	-2.4541		
$c'$	1.2064 $\times 10^{-5}$	6.6201 $\times 10^{-5}$	3.8735 $\times 10^{-3}$	9.4091 $\times 10^{-5}$	3.8788 $\times 10^{-3}$	3.5232 $\times 10^{-3}$		

#### 4.4 ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์

ความจุการดูดซึมเป็นตัวชี้บอสมรรถนะสำคัญสำหรับการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งความจุการดูดซึมแสดงถึงโมลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดูดซึมได้ต่อโมลเอมีน รูปที่ 4.3 แสดงความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ ในรูปของ  $\text{CO}_2$  loading ( $\text{mol CO}_2/\text{mol amine}$ ) ที่อุณหภูมิ 313 K ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 12.2 kPa (ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 12 โดยปริมาตร) ซึ่งสอดคล้องกับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สปล่อยไปจากอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้าด้วยถ่านหิน ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะดำเนินการดังกล่าวเพื่อประเมินศักยภาพตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่ไม่ตกตะกอนทั้งที่ไม่ผ่านและผ่านการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งแปดอัตราส่วนความเข้มข้น ได้แก่ 1.2:2.3:1.5 1:2.5:1.5 0.9:2.6:1.5 0.7:2.8:1.5 1:2:2 0.75:2.25:2 0.6:2.4:2 และ 0.5:2.5:2 โดยเกณฑ์การเลือกอัตราส่วนความเข้มข้นที่จะนำไปศึกษาต่อ คือ ตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่มีความจุการดูดซึมใกล้เคียงกับตัวทำละลายเกณฑ์มาตรฐาน 5 M MEA

ผลการศึกษา พบว่า ตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA อัตราส่วนความเข้มข้น 1.2:2.3:1.5 1:2.5:1.5 0.9:2.6:1.5 และ 0.7:2.8:1.5 มีความจุการดูดซึมสูงกว่าตัวทำละลายเกณฑ์มาตรฐาน 5 M MEA ร้อยละ 4-9 ส่วนตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA อัตราส่วนความเข้มข้น 0.6:2.4:2 และ 0.5:2.5:2 ต่ำกว่าตัวทำละลายเกณฑ์มาตรฐาน 5 M MEA ร้อยละ 4-9 ซึ่งถือได้ว่ามีความจุการดูดซึมใกล้เคียงกับตัวทำละลายเกณฑ์มาตรฐาน 5 M MEA ทั้งนี้ ตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ทั้งหกอัตราส่วนความเข้มข้นดังกล่าวจะนำไปทดสอบการดักจับและการคืนสภาพคาร์บอนไดออกไซด์ในขั้นต่อไป เพื่อประเมินศักยภาพของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA และเสนออัตราส่วนความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับใช้ในกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไป





รูปที่ 4.3 ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA เปรียบเทียบกับตัวทำละลาย 5 M MEA ที่อุณหภูมิ 313 K ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 12.2 kPa

การศึกษาความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ในเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 313 K และความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 12.2 kPa แสดงให้เห็นว่าตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA หกอัตราส่วนความเข้มข้น คือ 1.2:2.3:1.5 1:2.5:1.5 0.9:2.6:1.5 0.7:2.8:1.5 0.6:2.4:2 และ 0.5:2.5:2 มีศักยภาพในการดำเนินการวิจัยต่อ จึงทำการวัดความจุการดูดซึมของตัวทำละลายผสมดังกล่าวที่ความดันคาร์บอนไดออกไซด์ 30.4 50.7 81.0 และ 101.3 kPa เพิ่มเติม เพื่อให้ครอบคลุมความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วง 12.2–101.3 kPa นอกจากนี้ยังทำการวัดความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 313 K และ 363 K ซึ่งเป็นภาวะดำเนินการของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์และการคืนสภาพตัวทำละลายตามลำดับ โดยความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันย่อยต่าง ๆ และที่อุณหภูมิ 313 K และ 363 K แสดงในตารางที่ 4.8 และ 4.9 และ รูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลายที่มีอัตราส่วนความเข้มข้น TEA เป็น 1.5 M (1.2:2.3:1.5 1:2.5:1.5 0.9:2.6:1.5 และ 0.7:2.8:1.5) และ 2 M (0.6:2.4:2 และ 0.5:2.5:2) พบว่า ความจุการดูดซึมของตัวทำละลายที่ศึกษาเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนเชิงโมลาร์ PZ/AMP ในตัวทำละลายผสมเพิ่มขึ้นในทุกความดันย่อยที่ศึกษา ดังตารางที่ 4.8 และ 4.9 และ รูปที่ 4.4 และ 4.5 เนื่องจากความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของ PZ สูงกว่าความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของ AMP มาก [40] อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบความจุการดูดซึมของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่มีความเข้มข้นรวม 5 M และมีอัตราส่วนความเข้มข้นของ TEA

เป็น 1.5 M และ 2 M ตลอดช่วงความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 12.2–101.3 kPa พบว่า ความจุการดูดซึมของตัวทำละลาย 0.6:2.4:2 และ 0.5:2.5:2 มีค่าต่ำกว่าความจุการดูดซึมของตัวทำละลาย 1.2:2.3:1.5 1:2.5:1.5 0.9:2.6:1.5 และ 0.7:2.8:1.5 ทั้งนี้ เนื่องจาก TEA มีความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่า AMP และ PZ มาก นอกจากนี้ยังพบว่าความจุการดูดซึมของตัวทำละลาย AMP–PZ–TEA สูงขึ้น เมื่อความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นด้วย เนื่องจากที่ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์สูงมีความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊สสูงขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้ความต่างความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นแรงขับเคลื่อนการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์จากวัฏภาคแก๊สเข้าสู่วัฏภาคของเหลวมากขึ้น ความจุการดูดซึมจึงสูงขึ้นตามไปด้วย สำหรับผลของอุณหภูมิต่อความจุการดูดซึม พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 313 K และ 363 K ความจุการดูดซึมของตัวทำละลาย AMP–PZ–TEA ลดลงตลอดช่วงความดันย่อยที่ศึกษา เนื่องจากปฏิกิริยาการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 313 K ซึ่งเป็นภาวะการดูดซึมเป็น 363 K ซึ่งเป็นภาวะการคืนสภาพตัวทำละลาย ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยาการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ กล่าวคือ เกิดปฏิกิริยาการคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ความจุการดูดซึมของตัวทำละลายผสมลดลง ทั้งนี้ ตัวทำละลาย AMP–PZ–TEA อัตราส่วนความเข้มข้น 0.7:2.8:1.5 มีความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์สูงที่สุด โดยมีความจุการดูดซึมสูงกว่าตัวทำละลายเกณฑ์มาตรฐาน 5 M MEA ร้อยละ 9

**ตารางที่ 4.8** ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลาย 5 M MEA และ AMP–PZ–TEA ที่อุณหภูมิ 313 K ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 12.2–101.3 kPa

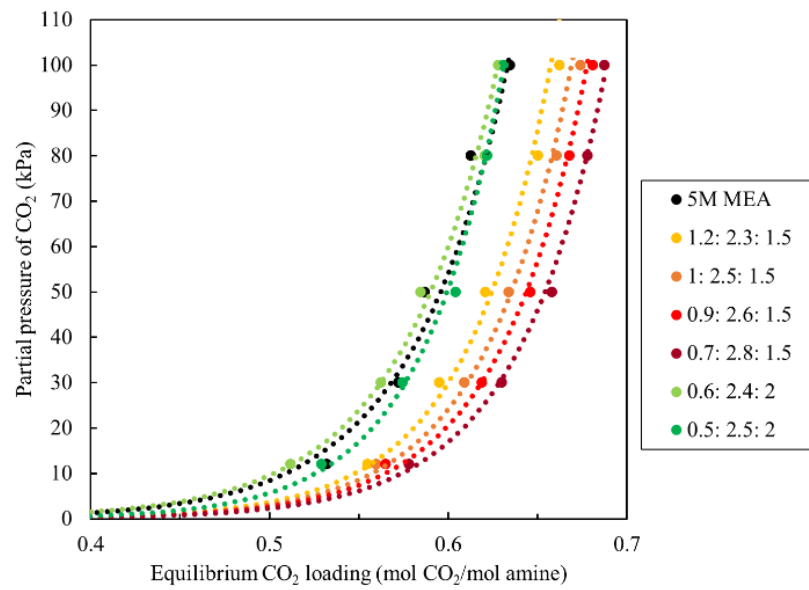
ความดันย่อย คาร์บอนไดออกไซด์ (kPa)	ความจุการดูดซึม ที่ 313 K (mol CO <sub>2</sub> /mol amine)			
	5 M MEA	อัตราส่วนความเข้มข้นตัวทำละลาย AMP:PZ:TEA		
		1.2:2.3:1.5	1:2.5:1.5	0.9:2.6:1.5
12.2	0.532 ±0.004	0.555 ±0.007	0.560 ±0.006	0.565 ±0.004
30.4	0.572 ±0.010	0.595 ±0.007	0.609 ±0.010	0.619 ±0.004
50.7	0.587 ±0.002	0.621 ±0.005	0.634 ±0.004	0.646 ±0.008
81.0	0.613 ±0.004	0.650 ±0.008	0.661 ±0.007	0.668 ±0.006
101.3	0.635 ±0.007	0.662 ±0.003	0.674 ±0.004	0.681 ±0.009

ตารางที่ 4.8 ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลาย 5 M MEA และ AMP-PZ-TEA ที่อุณหภูมิ 313 K ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 12.2–101.3 kPa (ต่อ)

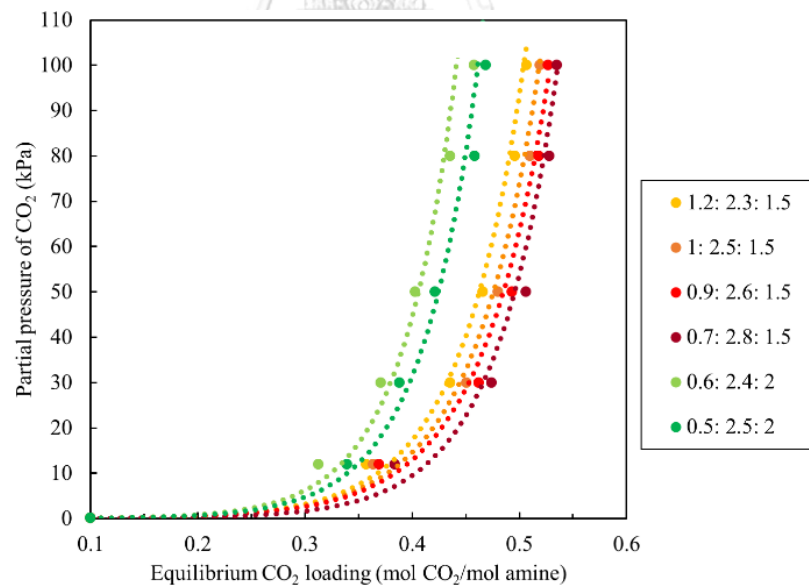
ความดันย่อย คาร์บอนไดออกไซด์ (kPa)	ความจุการดูดซึม ที่ 313 K (mol CO <sub>2</sub> /mol amine)		
	อัตราส่วนความเข้มข้นตัวทำละลาย AMP:PZ:TEA		
	0.7:2.8:1.5	0.6:2.4:2	0.5:2.5:2
12.2	0.578 ±0.004	0.512 ±0.003	0.529 ±0.003
30.4	0.630 ±0.003	0.563 ±0.009	0.574 ±0.009
50.7	0.658 ±0.005	0.585 ±0.004	0.604 ±0.007
81.0	0.678 ±0.009	0.621 ±0.012	0.622 ±0.012
101.3	0.688 ±0.004	0.628 ±0.003	0.631 ±0.003

ตารางที่ 4.9 ความจุการดูดซึมของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่อุณหภูมิ 363 K ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 12.2–101.3 kPa

ความดันย่อย คาร์บอนไดออกไซด์ (kPa)	ความจุการดูดซึม ที่ 363 K (mol CO <sub>2</sub> /mol amine)		
	อัตราส่วนความเข้มข้นตัวทำละลาย AMP:PZ:TEA		
	1.2:2.3:1.5	1:2.5:1.5	0.9:2.6:1.5
12.2	0.357 ±0.013	0.364 ±0.009	0.369 ±0.009
30.4	0.435 ±0.013	0.451 ±0.006	0.462 ±0.008
50.7	0.466 ±0.005	0.480 ±0.006	0.493 ±0.005
81.0	0.496 ±0.012	0.510 ±0.005	0.518 ±0.011
101.3	0.507 ±0.003	0.519 ±0.010	0.527 ±0.008
	0.7:2.8:1.5	0.6:2.4:2	0.5:2.5:2
12.2	0.384 ±0.0013	0.313 ±0.014	0.339 ±0.007
30.4	0.474 ±0.0013	0.371 ±0.012	0.388 ±0.014
50.7	0.506 ±0.008	0.403 ±0.009	0.421 ±0.004
81.0	0.528 ±0.0011	0.435 ±0.013	0.458 ±0.003
101.3	0.535 ±0.006	0.458 ±0.012	0.469 ±0.006



รูปที่ 4.4 ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA เปรียบเทียบกับตัวทำละลาย 5 M MEA ที่อุณหภูมิ 313 K ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 12.2–101.3 kPa



รูปที่ 4.5 ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่อุณหภูมิ 363 K ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 12.2–101.3 kPa

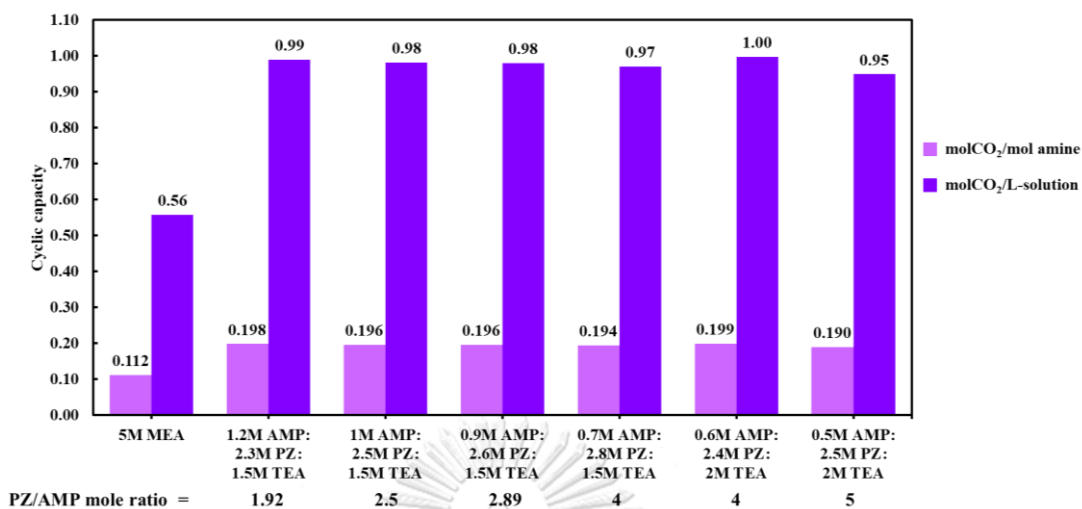
#### 4.5 ความจุวนกลับ

ความจุวนกลับเป็นหนึ่งในตัวชี้บอกสมรรถนะที่สำคัญ ซึ่งความจุวนกลับ คือ ความต่างของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดที่ดูดซึมได้ด้วยตัวทำละลายเอมีนที่ภาวะการดูดซึมและการคืนสภาพ โดยความจุวนกลับมักแสดงในหน่วยผลต่างโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหน่วยปริมาตรของตัวทำละลายเอมีน ( $\text{mol CO}_2/\text{L-amine solution}$ ) ความจุวนกลับของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ช่วง 12.2–101.3 kPa แสดงในตารางที่ 4.10 ส่วนรูปที่ 4.6 แสดงความจุวนกลับของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 12.2 kPa (ซึ่งสอดคล้องกับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สปล่อยไฟจากอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้าด้วยถ่านหิน) จากการศึกษา พบว่า ความจุวนกลับของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA สูงกว่าตัวทำละลายเกณฑ์มาตรฐาน 5 M MEA ร้อยละ 70–79 เนื่องจาก MEA มีความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์จำกัดและคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ยากเพราะเกิดคาร์บาเมตที่เสถียร ส่งผลให้ตัวทำละลาย MEA มีความจุวนกลับต่ำ ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่มีอัตราส่วนความเข้มข้น TEA ในตัวทำละลายผสม 2 M (0.6:2.4:2 และ 0.5:2.5:2) พบว่า เมื่ออัตราส่วนเชิงโมลาร์ PZ/AMP เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความจุวนกลับลดลง เนื่องจาก PZ มีความจุการดูดซึมสูงกว่า AMP ทั้งที่ภาวะการดูดซึมและภาวะการคืนสภาพ เมื่อคงความเข้มข้นของ TEA และเพิ่มอัตราส่วนเชิงโมลาร์ PZ/AMP จาก 4 (0.6:2.4:2) เป็น 5 (0.5:2.5:2) กล่าวคือเพิ่มอัตราส่วนความเข้มข้นของ PZ และ ลดอัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP ซึ่งส่งผลให้ตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ความเข้มข้น 0.5:2.5:2 มีความจุการดูดซึมที่ภาวะการดูดซึมและภาวะการคืนสภาพสูงกว่าตัวทำละลายผสมความเข้มข้น 0.6:2.4:2 แสดงดังตารางที่ 4.9 นอกจากนี้ยังมีผลของ AMP ซึ่งเป็นเอมีนที่คายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ง่ายกว่า PZ หากตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA มีอัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP สูงขึ้นจะทำให้ความจุการดูดซึมที่ภาวะการคืนสภาพลดลงได้ กล่าวคือ ตัวทำละลายผสม 0.6:2.4:2 มีความจุการดูดซึมที่ภาวะการคืนสภาพต่ำกว่าตัวทำละลายผสม 0.5:2.5:2 แสดงดังตารางที่ 4.10 อย่างไรก็ตาม ความต่างของความจุการดูดซึมของตัวทำละลายผสม 0.6:2.4:2 ที่ภาวะการดูดซึมและภาวะการคืนสภาพสูงกว่าความต่างดังกล่าวในกรณีของตัวทำละลายผสม 0.5:2.5:2 จึงส่งผลให้ความจุวนกลับของตัวทำละลายผสม 0.6:2.4:2 สูงกว่าความจุวนกลับของตัวทำละลายผสม 0.5:2.5:2 หรือกล่าวได้ว่า ความจุวนกลับของตัวทำละลายผสมที่คงความเข้มข้นของ TEA จะลดลง เมื่อสัดส่วนเชิงโมลาร์ PZ/AMP สูงขึ้น ทั้งนี้ สำหรับตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่คงความเข้มข้นของ TEA เป็น 1.5 M และเพิ่มสัดส่วนเชิงโมลาร์ PZ/AMP

จาก 1.92 (1.2:2.3:1.5) เป็น 2.5 (1:2.5:1.5) 2.89 (0.9:2.6:1.5) และ 4 (0.7:2.8:1.5) พบว่า ความจุวนกลับของตัวทำละลายผสมมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนเชิงโมลาร์ PZ/AMP เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับกรณีของตัวทำละลายผสมที่คงความเข้มข้น TEA เป็น 1.5 M ตลอดช่วงความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ศึกษา เมื่อเปรียบเทียบความจุวนกลับของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่มีอัตราส่วนความเข้มข้นของ TEA เป็น 1.5 M และ 2 M พบว่า ตัวทำละลายผสมที่มีอัตราส่วนความเข้มข้นของ TEA เป็น 2 M มีความจุวนกลับสูงกว่าตัวทำละลายผสมที่มีอัตราส่วนความเข้มข้น TEA เป็น 1.5 M เนื่องจาก TEA เป็นเอมีนตติยภูมิซึ่งคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ง่ายกว่า AMP และ PZ จึงส่งผลให้ความจุการดูดซึมที่ภาวะการณคินสภาพของตัวทำละลายผสมที่มีอัตราส่วนความเข้มข้น TEA เป็น 2 M จึงต่ำกว่ากรณีที่มีอัตราส่วนความเข้มข้นของ TEA เป็น 1.5 M ทั้งนี้ตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA อัตราส่วนความเข้มข้น 0.6:2.4:2 มีความจุวนกลับสูงสุด

**ตารางที่ 4.10** ความจุวนกลับของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 12.2–101.3 kPa

ความดันย่อย คาร์บอนไดออกไซด์ (kPa)	ความจุวนกลับ					
	อัตราส่วนความเข้มข้นตัวทำละลาย AMP:PZ:TEA					
	1.2:2.3:1.5		1:2.5:1.5		0.9:2.6:1.5	
	mol CO <sub>2</sub> / mol amine	mol CO <sub>2</sub> / L-soln	mol CO <sub>2</sub> / mol amine	mol CO <sub>2</sub> / L-soln	mol CO <sub>2</sub> / mol amine	mol CO <sub>2</sub> / L-soln
12.2	0.198	0.990	0.196	0.981	0.196	0.980
30.4	0.160	0.800	0.158	0.790	0.157	0.785
50.7	0.155	0.775	0.154	0.770	0.153	0.765
81.0	0.154	0.771	0.151	0.754	0.150	0.750
101.3	0.156	0.778	0.155	0.773	0.154	0.770
	0.7:2.8:1.5		0.6:2.4:2		0.5:2.5:2	
	mol CO <sub>2</sub> / mol amine	mol CO <sub>2</sub> / L-soln	mol CO <sub>2</sub> / mol amine	mol CO <sub>2</sub> / L-soln	mol CO <sub>2</sub> / mol amine	mol CO <sub>2</sub> / L-soln
12.2	0.194	0.970	0.199	0.997	0.190	0.949
30.4	0.156	0.780	0.192	0.958	0.186	0.930
50.7	0.152	0.760	0.182	0.909	0.183	0.915
81.0	0.150	0.750	0.185	0.926	0.164	0.818
101.3	0.153	0.763	0.170	0.852	0.162	0.811



รูปที่ 4.6 ความจุวนกลับของทำละลายเอมีน AMP-PZ-TEA เปรียบเทียบกับตัวทำละลาย 5 M MEA ที่ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 12.2 kPa

#### 4.6 สมรรถนะการถ่ายโอนมวลคาร์บอนไดออกไซด์ภายในหอดูดซึม

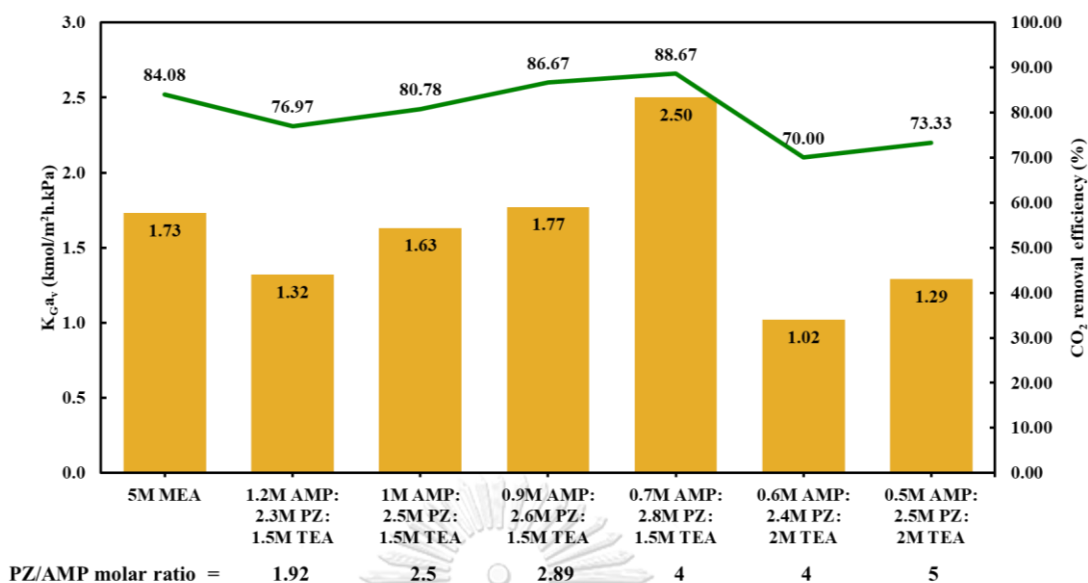
สมรรถนะการถ่ายโอนมวลคาร์บอนไดออกไซด์ในเชิงสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม ( $K_{Ga}$ ) เป็นพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ (Kinetics parameter) ที่แสดงถึงความไวในการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ หรือ อัตราการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ กล่าวคือ การดูดซึมที่มีอัตราการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์สูง จะมี  $K_{Ga}$  และประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูงด้วย รูปที่ 4.7 แสดง  $K_{Ga}$  และประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ ของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ ดำเนินการที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิของสารขาเข้า 303 K แก๊สขาเข้ามีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 12 โดยปริมาตร ฟลักซ์ตัวทำละลายขาเข้า  $3.67 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$  ฟลักซ์แก๊สขาเข้า  $509.30 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$   $\text{CO}_2$  loading ของสารละลายขาเข้า  $0.25 \text{ mol CO}_2/\text{mol amine}$  และสัดส่วนความสูงของจุดตั้งตัวอย่างต่อความสูงหอดูดซึม ( $h/h_0$ ) 0.25 เมื่อเปรียบเทียบตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ทั้งหมดอัตราส่วนความเข้มข้นกับตัวทำละลายเกณฑ์มาตรฐาน 5 M MEA พบว่า ตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA สองอัตราส่วนความเข้มข้น (0.9:2.6:1.5 และ 0.7:2.8:1.5) มี  $K_{Ga}$  สูงกว่าตัวทำละลายเอมีน MEA ร้อยละ 2 และ 45 ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าตัวทำละลาย 5 M MEA ร้อยละ 3 และ 5 ตามลำดับ นอกจากนี้ ตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 1:2.5:1.5 มี  $K_{Ga}$  และประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ใกล้เคียงกับตัวทำละลาย 5 MEA โดยมี  $K_{Ga}$  และประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่า 5 M MEA ร้อยละ 4 และ 6 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่อัตราส่วนความเข้มข้น TEA คงตัวที่ 1.5 M พบว่า  $K_{GaV}$  และประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น เมื่ออัตราส่วนเชิงโมลาร์ PZ/AMP เพิ่มขึ้น เนื่องจาก PZ เป็นเอมีนที่ไวปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์มากเมื่อเทียบกับ AMP และ TEA ดังแสดงในตารางที่ 4.11 นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มอัตราส่วนเชิงโมลาร์ PZ/AMP ในตัวทำละลายผสมที่มีอัตราส่วนความเข้มข้น TEA 2 M ส่งผลเชิงบวกต่อ  $K_{GaV}$  และประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีแนวโน้มเดียวกับตัวทำละลายผสมที่มีอัตราส่วนความเข้มข้น TEA 1.5 M ทั้งนี้ หากเปรียบเทียบตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่มีอัตราส่วนความเข้มข้น TEA เป็น 1.5 M และ 2 M พบว่า สมรรถนะการถ่ายโอนมวลในหอดูดซึมในเชิง  $K_{GaV}$  และประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า ตัวทำละลายผสมที่มีอัตราส่วนความเข้มข้นของ TEA เป็น 1.5 M มีสมรรถนะการถ่ายโอนมวลสูงกว่าตัวทำละลายผสมที่มีอัตราส่วนความเข้มข้นของ TEA เป็น 2 M เนื่องจาก TEA เป็นเอมีนตติยภูมิซึ่งมีความไวปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ จึงส่งผลให้สมรรถนะการถ่ายโอนมวลในหอดูดซึมต่ำลงตามไปด้วย ทั้งนี้ เมื่อประเมินศักยภาพของตัวทำละลายเอมีน AMP-PZ-TEA ในเชิง  $K_{GaV}$  และประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า ตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA 0.7:2.8:1.5 มีศักยภาพดังกล่าวสูงสุด

ตารางที่ 4.11 ค่าคงตัวอัตราปฏิกิริยาอันดับสองของเอมีนต่าง ๆ [4]

ชนิดเอมีน	ค่าคงตัวอัตราปฏิกิริยาอันดับสอง ( $m^3/kmol \cdot s$ )
MEA	6,209
AMP	570
PZ	65,460
TEA	3





**รูปที่ 4.7**  $K_{G,a_v}$  และประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ ของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA เปรียบเทียบกับตัวทำละลาย 5 M MEA ดำเนินการที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิของสารขาเข้า 303 K แก๊สขาเข้ามีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 12 โดยปริมาตร ฟลักซ์ตัวทำละลายขาเข้า  $3.67 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$  ฟลักซ์แก๊สขาเข้า  $509.30 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$  CO<sub>2</sub> loading ของสารละลายขาเข้า  $0.25 \text{ mol CO}_2/\text{mol amine}$  และสัดส่วนความสูงของจุดตั้งตัวอย่างต่อความสูงหอดูดซึม  $(h/h_0) 0.25$

#### 4.7 อัตราการคืนสภาพตัวทำละลายเริ่มต้น

ตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CO<sub>2</sub> loading ของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ในเครื่องคืนสภาพตัวทำละลายตลอดระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองการคืนสภาพตัวทำละลายที่อุณหภูมิ 363 K อัตราการคืนสภาพเริ่มต้นของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่อัตราส่วนเชิงโมล PZ/AMP 1.92–5 แสดงในตารางที่ 4.13 ซึ่งเห็นได้ว่า อัตราการคืนสภาพเริ่มต้นของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ทั้งหมดอัตราส่วนความเข้มข้นสูงกว่าตัวทำละลายเกณฑ์มาตรฐาน 5 M MEA กว่าร้อยละ 12–116 กล่าวคือ ในช่วงระยะเวลาในการคืนสภาพตัวทำละลายเท่ากัน ตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA สามารถคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากกว่า MEA เมื่อพิจารณาตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่มีอัตราส่วนความเข้มข้น TEA ในตัวทำละลายผสม 2 M พบว่าที่อัตราส่วนความเข้มข้น 0.6:2.4:2 มีอัตราการคืนสภาพเริ่มต้นสูงกว่า 0.5:2.5:2 ร้อยละ 45 เนื่องจากตัวทำละลายผสม 0.6:2.4:2 มีสัดส่วนความเข้มข้น AMP ในตัวทำละลายผสมสูงกว่าตัวทำละลายผสม 0.5:2.5:2 ส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายกลับสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลดี

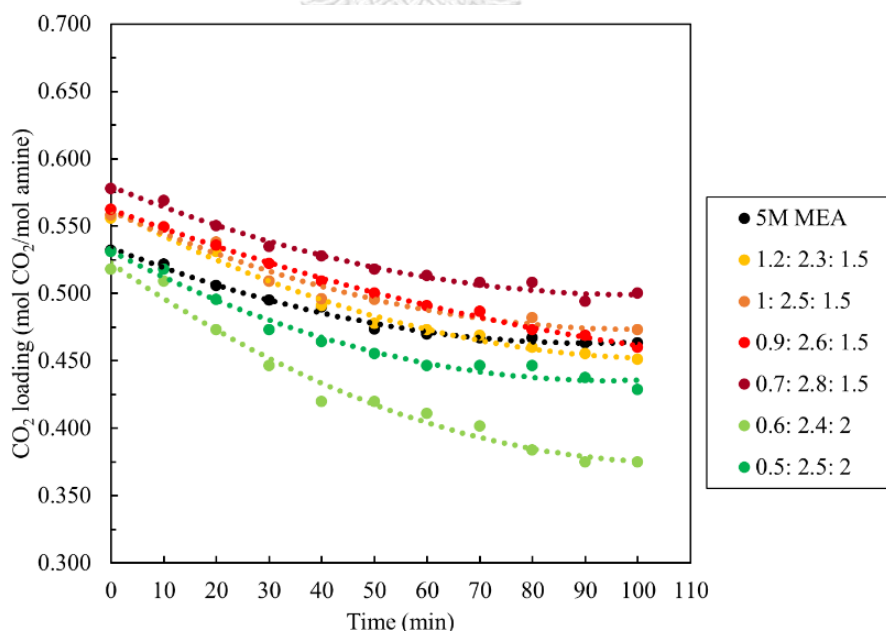
ต่อการคืนสภาพตัวทำละลาย กล่าวคือ สามารถคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ได้มาก ทำให้อัตราการคืนสภาพเริ่มต้นสูง นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราการคืนสภาพเริ่มต้นของตัวทำละลายที่มีอัตราส่วนความเข้มข้น TEA 1.5 M มีแนวโน้มเดียวกับตัวทำละลายผสมที่กล่าวไปข้างต้น กล่าวคือ เมื่ออัตราส่วนเชิงโมลาร์ PZ/AMP เพิ่มขึ้นในช่วง 1.92 ถึง 4 จะส่งผลให้อัตราการคืนสภาพเริ่มต้นลดลง แสดงดังตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.8 ทั้งนี้ ตัวทำละลายเอมีนที่มีสมรรถนะการคืนสภาพสูง มักมีอัตราการคืนสภาพเริ่มต้นสูง หรือกล่าวได้ว่า ตัวทำละลายเอมีนที่มีสมรรถนะการคืนสภาพสูง สามารถคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ได้มาก จากผลการศึกษา พบว่า ตัวทำละลายเอมีนที่มี AMP:PZ:TEA อัตราการคืนสภาพตัวทำละลายเริ่มต้นสูงสุด คือ 1.2:2.3:1.5

**ตารางที่ 4.12** ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลาย 5 M MEA และ AMP-PZ-TEA ในเครื่องคืนสภาพตลอดระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง ที่อุณหภูมิ 363 K

เวลา (min)	ความจุการดูดซึมในเครื่องคืนสภาพ (mol CO <sub>2</sub> /mol amine)			
	5 M MEA	อัตราส่วนความเข้มข้นตัวทำละลาย AMP:PZ:TEA		
		1.2:2.3:1.5	1:2.5:1.5	0.9:2.6:1.5
0	0.532	0.556	0.558	0.560
10	0.522	0.549	0.549	0.549
20	0.506	0.531	0.538	0.531
30	0.495	0.509	0.509	0.513
40	0.490	0.491	0.496	0.500
50	0.473	0.478	0.496	0.491
60	0.470	0.473	0.491	0.482
70	0.467	0.469	0.487	0.474
80	0.467	0.460	0.482	0.469
90	0.463	0.455	0.469	0.465
100	0.463	0.451	0.473	0.460

ตารางที่ 4.12 ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลาย 5 M MEA และ AMP-PZ-TEA ในเครื่องคั้นสภาพตลอดระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง ที่อุณหภูมิ 363 K (ต่อ)

เวลา (min)	ความจุการดูดซึมในเครื่องคั้นสภาพ (mol CO <sub>2</sub> /mol amine)		
	อัตราส่วนความเข้มข้นตัวทำละลาย AMP:PZ:TEA		
	0.7:2.8:1.5	0.6:2.4:2	0.5:2.5:2
0	0.578	0.518	0.531
10	0.569	0.509	0.518
20	0.550	0.473	0.496
30	0.535	0.446	0.473
40	0.528	0.420	0.464
50	0.518	0.420	0.455
60	0.513	0.411	0.446
70	0.508	0.402	0.446
80	0.508	0.384	0.446
90	0.494	0.375	0.438
100	0.500	0.375	0.429



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง CO<sub>2</sub> loading ของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA เปรียบเทียบกับตัวทำละลาย 5 M MEA ในเครื่องคั้นสภาพตลอดระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง ที่อุณหภูมิ 363 K

ตารางที่ 4.13 อัตราการคืนสภาพเริ่มต้นของตัวทำละลาย 5 M MEA และ AMP-PZ-TEA

อัตราส่วนความเข้มข้น ตัวทำละลายเอมีน (AMP:PZ:TEA)	อัตราส่วน เชิงโมลาร์ PZ/AMP	อัตราการคืนสภาพตัวทำ ละลายเริ่มต้น (mol CO <sub>2</sub> / mol amine·min)(10 <sup>3</sup> )	อัตราการคืนสภาพตัวทำ ละลายเริ่มต้น (mol CO <sub>2</sub> / L-solution·min)(10 <sup>3</sup> )
5 M MEA	–	1.20	5.98
1.2:2.3:1.5	1.92	1.65	8.26
1:2.5:1.5	2.5	1.56	7.81
0.9:2.6:1.5	2.89	1.52	7.59
0.7:2.8:1.5	4	1.34	6.72
0.6:2.4:2	4	2.59	12.95
0.5:2.5:2	5	1.79	8.93

#### 4.8 ภาวะทางความร้อนในการคืนสภาพตัวทำละลาย

งานวิจัยนี้ศึกษาภาวะทางความร้อนในการคืนสภาพตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่อัตราส่วนความเข้มข้นทั้งหกเปรียบเทียบกับตัวทำละลายเกณฑ์มาตรฐาน 5 M MEA ที่อุณหภูมิ 363 K ดังแสดงในรูปที่ 4.9 โดยภาวะทางความร้อนในการคืนสภาพตัวทำละลายประกอบด้วยความร้อน 3 องค์ประกอบ ได้แก่ ภาวะทางความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ ภาวะทางความร้อนในการระเหยของน้ำ และความร้อนสัมผัส ผลการศึกษาบ่งชี้ว่า ภาวะทางความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ต่ำกว่า MEA เนื่องจากความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาคายกลับของ MEA มีค่าสูงที่สุดและสูงกว่า AMP PZ และ TEA ตามลำดับ เนื่องจาก TEA เป็นเอมีนตติยภูมิจึงมีภาวะทางความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4.14 เมื่อคำนวณภาวะทางความร้อนใช้ในปฏิกิริยาคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ตามสมการที่ (2.54) จึงพบว่าภาวะทางความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่ได้ต่ำกว่า MEA ในช่วงร้อยละ 9-11 ทั้งนี้ภาวะทางความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่อัตราส่วนต่าง ๆ มีค่าไม่ต่างกันมาก เนื่องจากสัดส่วนความเข้มข้นของเอมีนในแต่ละอัตราส่วนความเข้มข้นใกล้เคียงกันมาก

เมื่อพิจารณาภาวะทางความร้อนในการระเหยของน้ำ พบว่า ตัวทำละลาย MEA มีภาวะทางความร้อนในการระเหยของน้ำสูงกว่า AMP-PZ-TEA ร้อยละ 11-12 เนื่องจาก สัดส่วนเชิงโมลของน้ำในตัวทำละลายเอมีนผสมที่มีคาร์บอนไดออกไซด์น้อยลง ( $x_{H_2O\_lean}$ ) ของตัวทำละลาย

MEA สูงกว่ากรณีของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ดังแสดงในตารางที่ 4.15 จึงกล่าวได้ว่า ภาวะทางความร้อนในการระเหยของน้ำขึ้นอยู่กับสัดส่วนเชิงโมลของน้ำในตัวทำละลายที่ผ่านการคืนสภาพ [30] กล่าวคือ เมื่อสัดส่วนเชิงโมลของน้ำในตัวทำละลายเอมีนผสมที่มีคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น ส่งผลให้ความดันย่อยของน้ำเพิ่มขึ้น ภาวะทางความร้อนในการระเหยของน้ำจึงเพิ่มขึ้นด้วย ดังแสดงในสมการที่ (2.55) ถึง (2.57) โดยตัวทำละลายเอมีน AMP-PZ-TEA มีภาวะทางความร้อนในการระเหยของน้ำใกล้เคียงกันทั้งหกอัตราส่วนความเข้มข้น เพราะสัดส่วนเชิงโมลของน้ำในตัวทำละลายที่ผ่านการคืนสภาพแตกต่างกันน้อยมาก

ความร้อนสัมผัส คือ ปริมาณความร้อนที่ทำให้ตัวทำละลายเอมีนมีอุณหภูมิสูงขึ้นจาก 313 K เป็น 363 K ต่อโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยจากการคืนสภาพตัวทำละลาย จากการศึกษ พบว่า ความร้อนสัมผัสของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ต่ำกว่าตัวทำละลายเกณฑ์มาตรฐาน 5 M MEA เนื่องจากปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายกลับของตัวทำละลาย 5 M MEA ต่ำกว่าตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ดังแสดงในตารางที่ 4.15 นอกจากนี้ ความจุความร้อนของตัวทำละลาย 5 M MEA ยังสูงกว่า AMP-PZ-TEA ดังแสดงในตารางที่ 4.16 ส่งผลให้ความร้อนสัมผัสของตัวทำละลาย 5 M MEA สูงกว่าตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนความเข้มข้น TEA ในตัวทำละลายผสมเท่ากัน พบว่า เมื่ออัตราส่วนเชิงโมลาร์ PZ/AMP ลดลง ส่งผลให้ความร้อนสัมผัสของ AMP-PZ-TEA ลดลง ทั้งนี้ การเพิ่มอัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP หรือ ลดอัตราส่วนเชิงโมลาร์ PZ/AMP ส่งผลให้ความจุวนกลับเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.6 กล่าวคือ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายกลับมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ตารางที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่า ความจุความร้อนของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนเชิงโมลาร์ PZ/AMP ลดลง จากข้อมูลความจุความร้อนของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA จึงกล่าวได้ว่า สำหรับตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่มีอัตราส่วนความเข้มข้นของ TEA คงตัว ความร้อนที่ใช้สำหรับเพิ่มอุณหภูมิของตัวทำละลายจาก 313 K เป็น 363 K จะมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนเชิงโมลาร์ PZ/AMP ลดลง แต่ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยจากการคืนสภาพตัวทำละลายจะมากขึ้น จากการคำนวณ ความร้อนสัมผัส ตามสมการที่ (2.58) พบว่า ความร้อนสัมผัสลดลง เมื่ออัตราส่วนเชิงโมลาร์ PZ/AMP ลดลง จึงกล่าวได้ว่าปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยจากการคืนสภาพตัวทำละลายและความจุความร้อนของตัวทำละลายส่งผลต่อความร้อนสัมผัส นอกจากนี้ ความร้อนสัมผัสเป็นภาวะทางความร้อนมีสัดส่วนในภาวะทางความร้อนในการคืนสภาพตัวทำละลายสูงที่สุด คือ ร้อยละ 63-80 ของภาวะทางความร้อนทั้งหมด กล่าวคือ ภาวะทางความร้อนในการคืนสภาพตัวทำละลายส่วนใหญ่เป็นปริมาณความร้อนที่ใช้สำหรับเพิ่มอุณหภูมิตัวทำละลาย จากการศึกษ ยังพบว่าภาวะ

ทางความร้อนในการคืนสภาพตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ต่ำกว่าตัวทำละลายเกณฑ์เปรียบเทียบ 5 M MEA ร้อยละ 25-50 และเมื่อเปรียบเทียบภาระทางความร้อนในการคืนสภาพตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่อัตราส่วนความเข้มข้นทั้งหมด ตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA 0.6:2.4:2 มีภาระทางความร้อนในการคืนสภาพต่ำที่สุด

**ตารางที่ 4.14** ภาระทางความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ [39]

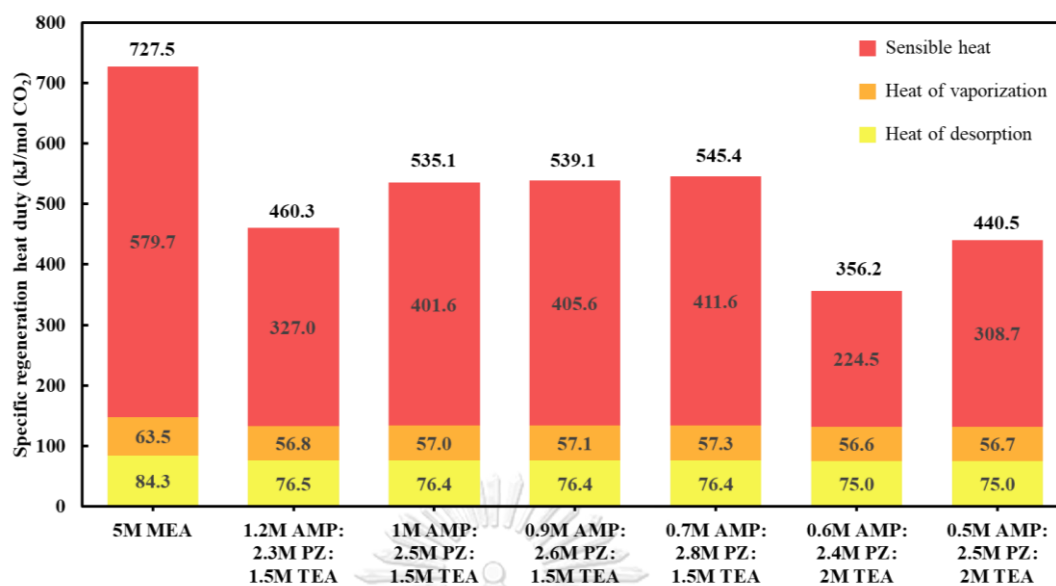
ชนิดเอมีน	ภาระทางความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ (kJ/mol CO <sub>2</sub> )
MEA	84.30
AMP	80.91
PZ	80.58
TEA	66.59

**ตารางที่ 4.15** สัดส่วนเชิงโมลของน้ำในตัวทำละลายเอมีนที่มีคาร์บอนไดออกไซด์น้อยลงและปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายกลับของตัวทำละลาย 5 M MEA และ AMP-PZ-TEA

อัตราส่วนความเข้มข้นตัวทำละลายเอมีน	สัดส่วนเชิงโมลของน้ำในตัวทำละลายเอมีนที่มีคาร์บอนไดออกไซด์น้อยลง ( $x_{H_2O\_lean}$ )	ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายกลับ (mol CO <sub>2</sub> )
5 M MEA	0.877	0.034
1.2: 2.3: 1.5	0.838	0.053
1: 2.5: 1.5	0.840	0.042
0.9: 2.6: 1.5	0.840	0.041
0.7: 2.8: 1.5	0.841	0.039
0.6: 2.4: 2	0.837	0.071
0.5: 2.5: 2	0.838	0.051

ตารางที่ 4.16 ความจุความร้อนของตัวทำละลาย 5 M MEA และ AMP-PZ-TEA

อุณหภูมิ (K)	ความจุความร้อน (J/g.K)			
	5 M MEA	อัตราส่วนความเข้มข้นตัวทำละลาย AMP:PZ:TEA		
		1.2:2.3:1.5	1:2.5:1.5	0.9:2.6:1.5
298	3.605	2.720	2.680	2.663
303	3.697	2.842	2.818	2.814
308	3.575	2.956	2.917	2.904
313	3.805	3.040	3.018	2.973
318	3.842	3.131	3.100	3.019
323	3.871	3.204	3.136	3.025
328	3.909	3.247	3.235	3.150
333	3.943	3.300	3.292	3.221
338	3.920	3.344	3.340	3.224
343	3.936	3.378	3.379	3.260
348	3.952	3.426	3.408	3.289
353	3.967	3.455	3.428	3.310
358	3.982	3.476	3.439	3.325
363	3.998	3.490	3.440	3.332
	<b>0.7:2.8:1.5</b>	<b>0.6:2.4:2</b>	<b>0.5:2.5:2</b>	
298	2.659	2.629	2.609	
303	2.801	2.768	2.742	
308	2.856	2.818	2.779	
313	2.894	2.837	2.827	
318	2.905	2.896	2.878	
323	2.999	2.929	2.925	
328	3.058	2.979	2.974	
333	3.080	3.029	2.976	
338	3.109	3.054	3.044	
343	3.132	3.086	3.055	
348	3.148	3.114	3.056	
353	3.158	3.138	3.105	
358	3.167	3.160	3.112	
363	3.274	3.178	3.113	



รูปที่ 4.9 ภาระทางความร้อนในการคืนสภาพตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA เปรียบเทียบกับตัวทำละลาย 5 M MEA ที่อุณหภูมิ 363 K

#### 4.9 การประเมินศักยภาพตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA

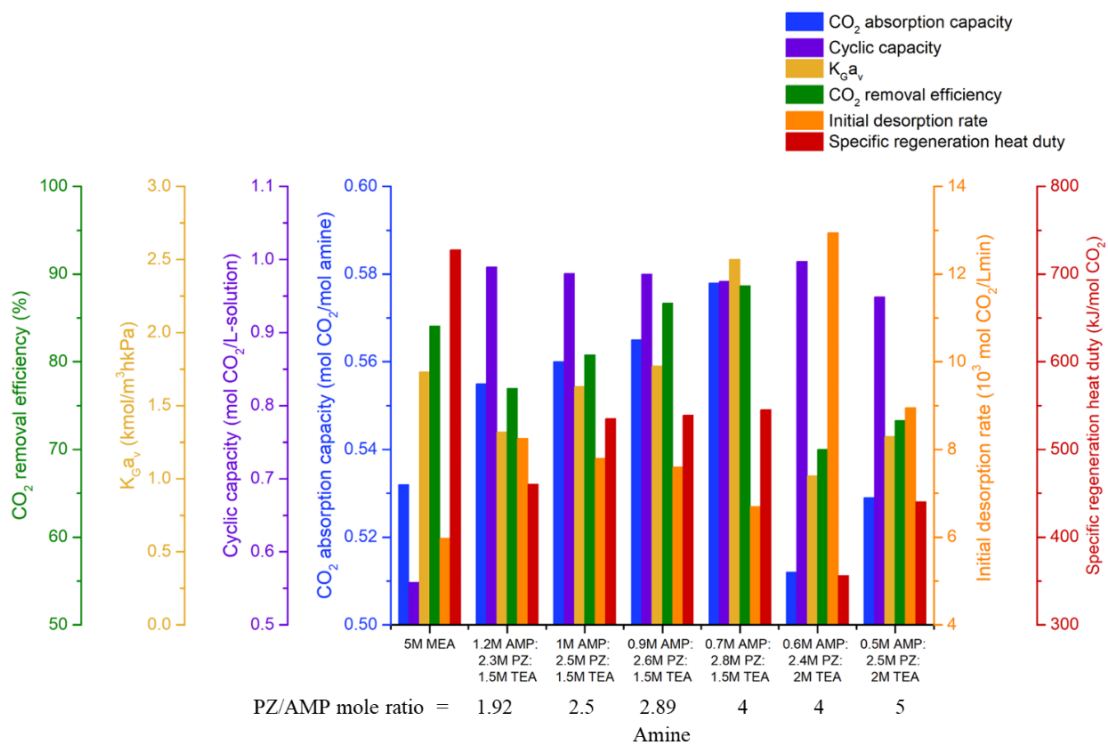
งานวิจัยนี้ เริ่มจากการสังเกตพฤติกรรมการตกตะกอนของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA เพื่อหาอัตราส่วนความเข้มข้นของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่ไม่เกิดตะกอนของเอมีน ผลการศึกษา พบว่า ปัจจัยที่ส่งผลให้ตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ตกตะกอน ได้แก่ (i) ความเข้มข้นของ AMP และ/หรือ PZ สูงเกินไป (ii) อัตราส่วนเชิงโมลาร์ PZ/AMP ต่ำเกินไป (iii) การเพิ่ม CO<sub>2</sub> loading ทั้งนี้ อัตราส่วนความเข้มข้น TEA ต่ำสุดที่ไม่เกิดตะกอนในตัวทำละลายผสมความเข้มข้นรวม 5 M คือ 1.5 M นอกจากนี้ การเพิ่มความเข้มข้นของ AMP หรือ PZ หรือ TEA ในตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA 5 M พบว่า ตัวทำละลายเอมีนส่วนใหญ่ตกตะกอน งานวิจัยนี้จึงศึกษาตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ความเข้มข้นเอมีนรวม 5 M เป็นหลัก ทั้งนี้ อัตราส่วนความเข้มข้นของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่ไม่เกิดตะกอนของเอมีนในสารละลายที่ไม่ผ่านการดูดซับถูกนำไปวัดความหนาแน่นและความหนืดที่ 303–333 K เพื่อประเมินศักยภาพตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ในเชิงความหนาแน่นและความหนืด ผลการศึกษา พบว่า ความหนาแน่นของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA สูงกว่า ตัวทำละลายเอมีนดั้งเดิม 5 M MEA เล็กน้อย ขณะที่ความหนืดของ AMP-PZ-TEA สูงกว่า 5 M MEA อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม ตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA มีความหนืดอยู่ในช่วงเดียวกับตัวทำละลายเอมีนดั้งเดิมที่ใช้ในอุตสาหกรรม คือ MDEA-PZ จึงสรุปได้ว่าตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA สามารถนำมาใช้ในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในเชิงความหนาแน่นและ



ความหนืดได้ จากการศึกษาความจุการดูดซึ่มของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA เบื้องต้น ที่อุณหภูมิ 313 K ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 12.2 kPa เพื่อประเมินศักยภาพการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA พบว่า ตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 1.2:2.3:1.5 1:2.5:1.5 0.9:2.6:1.5 และ 0.7:2.8:1.5 มีความจุการดูดซึ่มสูงกว่าตัวทำละลายเกณฑ์มาตรฐาน 5 M MEA ร้อยละ 4–9 ส่วนความจุการดูดซึ่มของตัวทำละลายผสมความเข้มข้น 0.6:2.4:2 และ 0.5:2.5:2 มีใกล้เคียงกับ 5 M MEA

งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาสมรรถนะการดูดซึ่มและคืนสภาพตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่อัตราส่วนความเข้มข้นทั้งหมดเพิ่มเติม เพื่อให้ครอบคลุมตัวขับเคลื่อนสมรรถนะที่สำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 โดยตัวทำละลายผสม AMP-PZ-TEA ทั้งหมดอัตราส่วนความเข้มข้น มีความจุการดูดซึ่ม ความจุวนกลับ อัตราการคืนสภาพเริ่มต้น สูงกว่าตัวทำละลายเกณฑ์มาตรฐาน 5 M MEA และมีภาระทางความร้อนในการคืนสภาพตัวทำละลายต่ำกว่าตัวทำละลายเกณฑ์มาตรฐาน 5 M MEA มาก เมื่อพิจารณาผลของการเพิ่มอัตราส่วนเชิงโมลาร์ PZ/AMP จาก 1.92 เป็น 4 (สำหรับตัวทำละลายผสมที่คงความเข้มข้น TEA 1.5 M) และ 4 เป็น 5 (สำหรับตัวทำละลายผสมที่คงความเข้มข้น TEA 2 M) พบว่า สมรรถนะการดูดซึ่มสูงขึ้น แต่สมรรถนะการคืนสภาพตัวทำละลายต่ำลง นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาสมรรถนะการถ่ายโอนมวลในรูปของ  $K_G a_v$  และ ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า มีเพียงสองอัตราส่วนความเข้มข้น คือ 0.9:2.6:1.5 และ 0.7:2.8:1.5 ที่มีสมรรถนะการถ่ายโอนมวลในหอดูดซึ่มสูงกว่าตัวทำละลายเกณฑ์มาตรฐาน 5 M MEA ขณะที่ตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ความเข้มข้น 1.2:2.3:1.5 มี  $K_G a_v$  และประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ใกล้เคียงกับตัวทำละลายเกณฑ์มาตรฐาน 5 M MEA ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาตัวขับเคลื่อนสมรรถนะที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ พบว่า ตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA อัตราส่วนความเข้มข้น 1.2:2.3:1.5 0.9:2.6:1.5 และ 0.7:2.8:1.5 มีศักยภาพดีกว่า/ใกล้เคียงกับตัวทำละลายดั้งเดิม MEA โดยมีความจุการดูดซึ่ม ความจุวนกลับ และอัตราการคืนสภาพเริ่มต้นสูงกว่าตัวทำละลายเกณฑ์มาตรฐาน 5 M MEA กว่าร้อยละ 5–9 73–75 และ 12–30 ตามลำดับ และสามารถลดภาระทางความร้อนในการคืนสภาพได้ร้อยละ 25–27 อีกทั้งยังมีสมรรถนะการถ่ายโอนมวลดีกว่า/ใกล้เคียงกับตัวทำละลาย 5 M MEA อีกด้วย รูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ทั้งสามอัตราส่วนความเข้มข้น ได้แก่ 1.2:2.3:1.5 0.9:2.6:1.5 และ 0.7:2.8:1.5 มีความจุวนกลับและภาระทางความร้อนในการคืนสภาพตัวทำละลายใกล้เคียงกันและดีกว่าตัวทำละลายเกณฑ์มาตรฐาน 5 M MEA มาก อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่าตัวทำละลายผสมทั้งสามมีอัตราส่วนเชิงโมลาร์ PZ/AMP

1.92 2.89 และ 4 ตามลำดับ ซึ่งการเพิ่มอัตราส่วนเชิงโมลาร์ส่งผลให้ความจุการดูดซึม  $K_{Ga}$  และประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาทั้งสมรรถนะการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์และสมรรถนะการคืนสภาพตัวทำละลายที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ ตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA อัตราส่วนความเข้มข้น 0.9:2.6:1.5 และ 0.7:2.8:1.5 เป็นอัตราส่วนความเข้มข้นที่มีศักยภาพสูงสำหรับใช้ทดแทนตัวทำละลาย 5 M MEA ในกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์



**รูปที่ 4.10** สมรรถนะการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์และการคืนสภาพของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA เปรียบเทียบกับตัวทำละลาย 5 M MEA เหนือความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ ความจุวนกลับ สมรรถการถ่ายโอนมวลคาร์บอนไดออกไซด์ภายในหอดูดซึม อัตราการคืนสภาพตัวทำละลายเริ่มต้น และภาระทางความร้อนในการคืนสภาพตัวทำละลาย

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาสมรรถนะการดูดซึมและการคืนสภาพตัวทำละลายเอมีน AMP-PZ-TEA เชิงพฤติกรรมการตกตะกอน ความหนาแน่น ความหนืด ความจุการดูดซึม ความจวนกลับ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม ( $K_{Ga}$ ) อัตราการคืนสภาพเริ่มต้น และภาระทางความร้อนในการคืนสภาพ เพื่อประเมินศักยภาพของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA และ เสนออัตราส่วนความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับใช้ในกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ จากผลการวิจัย สามารถสรุปได้ ดังนี้

จากการสังเกตพฤติกรรมการตกตะกอนของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA พบว่า ปัจจัยที่ทำให้ตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ตกตะกอน ได้แก่ การเพิ่ม  $\text{CO}_2$  loading ในตัวทำละลาย การใช้ตัวทำละลายผสมที่มีอัตราส่วนเชิงโมลาร์ PZ/AMP สูงหรือต่ำเกินไป และการเพิ่มความเข้มข้นของเอมีนรวมจาก 5 M เป็น 5.5 M และ 6 M โดยเพิ่มอัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP หรือ PZ หรือ TEA ทั้งนี้ ความเข้มข้นของ TEA ต่ำที่สุดในสารละลายผสมความเข้มข้นรวม 5 M คือ 1.5 M ซึ่งตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่ไม่เกิดตะกอนของเอมีนในสารละลายที่ไม่ผ่านการดูดซึม ถูกนำไปวัดความหนาแน่นและความหนืด ส่วนอัตราส่วนความเข้มข้นของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ความเข้มข้นรวม 5 M ที่ไม่เกิดตะกอนตลอดการสังเกตพฤติกรรมถูกนำไปใช้ศึกษาความจุการดูดซึมเบื้องต้นเพื่อเลือกสัดส่วนความเข้มข้นที่มีศักยภาพสำหรับใช้ดักจับคาร์บอนไดออกไซด์

การวัดความหนาแน่นและความหนืดของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่ไม่เกิดตะกอน ในช่วงอุณหภูมิ 303–333 K พบว่า ความหนาแน่นของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA สูงกว่าตัวทำละลายเกณฑ์มาตรฐาน 5 M MEA เล็กน้อย ขณะที่ความหนืดของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA สูงกว่าตัวทำละลาย 5 M MEA อย่างชัดเจน แต่มีความหนืดอยู่ในช่วงเดียวกับตัวทำละลายเอมีนดั้งเดิมที่ใช้ในอุตสาหกรรม คือ MDEA-PZ จึงสรุปได้ว่าตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA สามารถนำมาใช้ในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในเชิงความหนาแน่นและความหนืดได้ นอกจากนี้ สมการ Redlich-Kister สำหรับปริมาตรเชิงโมลส่วนเกิน และแบบจำลอง Grunberg-Nissan ถูกนำมาใช้พัฒนาสหสัมพันธ์เชิงทำนาย เพื่อประมาณความหนาแน่นและความหนืดของตัวทำละลาย

AMP-PZ-TEA ตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลการทำนาย พบว่า ความหนาแน่นและความหนืดของตัวทำละลายเอมีนผสมที่ได้จากการทำนายมีค่าใกล้เคียงกับที่ได้จากการทดลองมาก โดยมีร้อยละความเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย 0.05 และ 4.71 ตามลำดับ จึงกล่าวได้ว่าสหสัมพันธ์ที่พัฒนาขึ้นสามารถประมาณความหนาแน่นและความหนืดของตัวทำละลายเอมีน AMP-PZ-TEA ตลอดช่วงอุณหภูมิ 303–333 K ได้ ทั้งนี้ สหสัมพันธ์เชิงทำนายที่ได้ สามารถนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ต่อไป

จากการศึกษาความจุการดูดซึมของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA เบื้องต้น ที่อุณหภูมิ 313 K ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 12.2 kPa เพื่อประเมินศักยภาพการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA พบว่า ตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 1.2:2.3:1.5 1:2.5:1.5 0.9:2.6:1.5 และ 0.7:2.8:1.5 มีความจุการดูดซึมสูงกว่าตัวทำละลายเกณฑ์มาตรฐาน 5 M MEA ร้อยละ 4–9 ส่วนความจุการดูดซึมของตัวทำละลายผสมความเข้มข้น 0.6:2.4:2 และ 0.5:2.5:2 มีใกล้เคียงกับ 5 M MEA

เมื่อพิจารณาตัวชี้บอสมรรถนะในด้านความจุวนกลับ อัตราการคืนสภาพเริ่มต้น และภาระทางความร้อนในการคืนสภาพ พบว่า ตัวทำละลายผสม AMP-PZ-TEA ทั้งหมดมีสมรรถนะสูงกว่าตัวทำละลาย 5 M มาก คือ ร้อยละ 70–79 12–116 และ 25–51 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลของการเพิ่มอัตราส่วนเชิงโมลาร์ PZ/AMP ในตัวทำละลายตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA พบว่า สมรรถนะการดูดซึมสูงขึ้น แต่สมรรถนะการคืนสภาพตัวทำละลายต่ำลง นอกจากนี้ ยังพบว่ามีเพียงสองอัตราส่วนความเข้มข้น คือ 0.9:2.6:1.5 และ 0.7:2.8:1.5 ที่มี  $K_{Ga}$  และประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าตัวทำละลาย 5 M MEA คิดเป็นร้อยละ 2–45 และ 2–5 ตามลำดับ ขณะที่ตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA 1.2:2.3:1.5 มี  $K_{Ga}$  และประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ใกล้เคียงกับตัวทำละลาย 5 M MEA

เมื่อพิจารณาตัวชี้บอสมรรถนะที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ พบว่า ตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA อัตราส่วนความเข้มข้น 1.2:2.3:1.5 0.9:2.6:1.5 และ 0.7:2.8:1.5 มีศักยภาพโดยรวมดีกว่า/ใกล้เคียงกับตัวทำละลายดั้งเดิม MEA ทั้งนี้ ตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ทั้งสามอัตราส่วนความเข้มข้นดังกล่าว มีความจุวนกลับและภาระทางความร้อนในการคืนสภาพตัวทำละลายใกล้เคียงกัน และดีกว่าตัวทำละลายเกณฑ์มาตรฐาน 5 M MEA มาก อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่าตัวทำละลายผสมทั้งสามมีอัตราส่วนเชิงโมลาร์ PZ/AMP 1.92 2.89 และ 4 ตามลำดับ ซึ่งการเพิ่มอัตราส่วนเชิงโมลาร์ส่งผลให้

ความจุการดูดซึม  $K_{Ga}$  และประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ทั้งนี้เมื่อพิจารณาทั้งสมรรถนะการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์และสมรรถนะการคืนสภาพตัวทำละลายที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ ตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA อัตราส่วนความเข้มข้น 0.9:2.6:1.5 และ 0.7:2.8:1.5 เป็นอัตราส่วนความเข้มข้นที่มีศักยภาพสูงสำหรับใช้ทดแทนตัวทำละลาย 5 M MEA ในกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาสมบัติเชิงกายภาพและความเสถียรของตัวทำละลายผสมเพิ่มเติม เช่น แรงตึงผิว การเสื่อมสภาพของเอมีน และการกัดกร่อนวัสดุของตัวทำละลาย เป็นต้น
2. ประเมินค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสำหรับกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ และศึกษาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมเพิ่มเติม
3. ประเมินตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA อัตราส่วนความเข้มข้น 0.9:2.6:1.5 และ 0.7:2.8:1.5 เชิงเศรษฐศาสตร์ด้วยโปรแกรม Aspen เพิ่มเติม เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการที่ทำให้เกิดความคุ้มค่าสูงสุด ทั้งในด้านวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์ต่อการดำเนินงานในโรงงานอุตสาหกรรม
4. การลดภาระทางความร้อนในการคืนสภาพตัวทำละลายของตัวทำละลายผสม ทำได้โดยลดอัตราส่วนความเข้มข้นของ PZ และ เพิ่มอัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP และ TEA



ภาคผนวก ก  
ตัวอย่างการคำนวณ

**1. การวัดความหนาแน่นของตัวทำละลายเอมีน**

การวัดความหนาแน่นของตัวทำละลายเอมีนจากมาตรความหนาแน่น สามารถคำนวณได้จากสมการ (ก.1)

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{ก.1})$$

เมื่อ  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของสาร ( $\text{g/cm}^3$ )

$m$  คือ มวลของสาร (g)

$V$  คือ ปริมาตรของสาร ( $25.000 \text{ cm}^3$ )

ตัวอย่างการคำนวณความหนาแน่นของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่มีอัตราส่วนความเข้มข้น 0.5:2.5:2 ที่อุณหภูมิ 313 K

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

มวลของตัวทำละลายเอมีนเฉลี่ย ( $m$ ) = 26.3638 g

ปริมาตรของตัวทำละลายเอมีน ( $V$ ) = 25.000 ml

การคำนวณ

$$\rho = \frac{26.3638 \text{ g}}{25.000 \text{ cm}^3}$$

$$\rho = 1.055 \text{ g/cm}^3$$

ดังนั้น ความหนาแน่นของตัวทำละลายผสม คือ  $1.055 \text{ g/cm}^3$

**2. การคำนวณร้อยละความเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย**

การตรวจสอบความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสามารถทำได้โดยการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองเทียบกับข้อมูลจากรรณกรรม สามารถคำนวณได้จากสมการ (ก.2)

$$\%AADs = \frac{1}{N} \sum \left| \frac{\text{experiment} - \text{reference}}{\text{reference}} \right| \times 100\% \quad (\text{ก.2})$$

เมื่อ N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

experiment คือ ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

reference คือ ข้อมูลจากวรรณกรรม

ตัวอย่างการคำนวณร้อยละความเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ยของการวัดความหนาแน่นด้วยตัวทำละลาย MEA ความเข้มข้น 5 M ช่วงอุณหภูมิ 303–333 K

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

**ตารางที่ ก.1** ความหนาแน่นของตัวทำละลาย MEA ความเข้มข้น 5 M ช่วงอุณหภูมิ 303–333 K

อุณหภูมิ (K)	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	
	5 M MEA	
	แหล่งอ้างอิง [32]	การทดลอง
303	1.008	1.006
313	1.003	1.002
323	0.998	0.998
333	0.992	0.994

การคำนวณ

$$\%AADs = \frac{1}{4} \left[ \left| \frac{1.006 - 1.008}{1.008} \right| + \left| \frac{1.002 - 1.003}{1.003} \right| + \left| \frac{0.998 - 0.998}{0.998} \right| + \left| \frac{0.994 - 0.992}{0.992} \right| \right] \times 100\%$$

$$\%AADs = 0.14$$

ดังนั้น ร้อยละความเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ยของการวัดความหนาแน่นด้วยตัวทำละลาย 5 M MEA คือ 0.14

### 3. การวัดความหนืดของตัวทำละลายเอมีน

การวัดความหนืดของตัวทำละลายเอมีนด้วยมาตรความหนืดแบบ Ostwald สามารถคำนวณได้จากสมการ (ก.3)



$$\eta = K \times t \times \rho \times 100 \quad (\text{ก.3})$$

เมื่อ  $\eta$  คือ ความหนืดพลวัต (mPa·s)

K คือ ค่าคงตัวของมาตรฐานความหนืดแบบ Ostwald ( $0.000289 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ )

t คือ เวลาในการไหลของของเหลวในกระเปาะ (s)

$\rho$  คือ ความหนาแน่น ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

100 คือ ค่าคงตัวของการเปลี่ยนหน่วยความหนืด ( $100 \text{ mPa}\cdot\text{s}/(\text{g}/\text{cm}\cdot\text{s})$ )

ตัวอย่างการคำนวณความหนืดของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่มีอัตราส่วนความเข้มข้น 0.5:2.5:2 ที่อุณหภูมิ 313 K

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

เวลาในการไหลของของเหลวในกระเปาะเฉลี่ย (t) = 527.64 s

ความหนาแน่นของตัวทำละลายเอมีน ( $\rho$ ) =  $1.055 \text{ g}/\text{cm}^3$

การคำนวณ

$$\eta = (0.000289 \text{ cm}^2/\text{s}^2) \times (527.64 \text{ s}) \times (1.055 \text{ g}/\text{cm}^3) \times \left( 100 \frac{\text{mPa}\cdot\text{s}}{\text{g}/\text{cm}\cdot\text{s}} \right)$$

$$\eta = 16.08 \text{ mPa}\cdot\text{s}$$

ดังนั้น ความหนืดของตัวทำละลายผสม คือ 16.08 mPa·s

#### 4. การคำนวณความเข้มข้นของเอมีน

การหาค่าความเข้มข้นของเอมีนสามารถทำได้โดยนำตัวอย่างตัวทำละลายเอมีนไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 M โดยใช้เมทิลออเรนจ์เป็นอินดิเคเตอร์ ซึ่งเป็นสมดุลกรด-เบสระหว่างกรดไฮโดรคลอริกกับจำนวนโมลของไนโตรเจนในเอมีน สามารถคำนวณได้จากสมการ (ก.4)

$$\frac{a}{b} C_1 V_1 = C_2 V_2 \quad (\text{ก.4})$$

- เมื่อ a คือ จำนวนโมลรวมของเอมีน (mol)
- b คือ จำนวนโมลรวมของไนโตรเจนในเอมีน (mol)
- $C_1$  คือ ความเข้มข้นของเอมีน (M)
- $V_1$  คือ ปริมาตรของตัวอย่างตัวทำละลายเอมีนที่นำมาไทเทรต (ml)
- $C_2$  คือ ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (1 M)
- $V_2$  คือ ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกที่จุดยุติ (ml)

ตัวอย่างการคำนวณความเข้มข้นของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่มีอัตราส่วนความเข้มข้น 0.5:2.5:2

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

ปริมาตรของตัวอย่างตัวทำละลายเอมีนที่นำมาไทเทรต ( $V_1$ ) = 1 ml

ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกที่จุดยุติ ( $V_2$ ) = 7.5 ml

จำนวนโมลรวมของเอมีน (a) = 0.5+2.5+2 = 5 mol

จำนวนโมลรวมของไนโตรเจนในเอมีน (b) = 0.5+2(2.5)+2 = 7.5 mol

การคำนวณ

$$C_1 = \frac{(b/a)C_2V_2}{V_1}$$

$$C_1 = \frac{5 \text{ mol}}{7.5 \text{ mol}} (1 \text{ M}) (7.5 \text{ ml})$$

$$C_1 = \frac{5 \text{ mol}}{1 \text{ ml}}$$

$$C_1 = 5 \text{ M}$$

ดังนั้น ความเข้มข้นของเอมีนรวม คือ 5 M

## 5. การคำนวณ CO<sub>2</sub> loading ของตัวทำละลายเอมีน

การวัดค่า CO<sub>2</sub> loading ของตัวทำละลายเอมีนทำได้โดยนำตัวอย่างตัวทำละลายเอมีนไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 M เช่นเดียวกับการหาความเข้มข้นของเอมีน แต่การวัดค่า CO<sub>2</sub> loading ต้องใช้กรดไฮโดรคลอริกในปริมาณที่มากเกินไป เพื่อให้เอมีนปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาจนหมด โดย CO<sub>2</sub> loading ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (ก.5) ถึง (ก.7)

$$\text{CO}_2 \text{ loading} = \frac{\text{mol CO}_2}{\text{mol amine}} \quad (\text{ก.5})$$

$$\text{mol CO}_2 = \frac{V_{\text{CO}_2}}{22,400} \quad (\text{ก.6})$$

$$\text{mol amine} = \frac{C_1 V_1}{1,000} \quad (\text{ก.7})$$

เมื่อ mol CO <sub>2</sub>	คือ	โมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึม (mol)
mol amine	คือ	โมลของเอมีน (mol)
V <sub>CO<sub>2</sub></sub>	คือ	ปริมาตรของคาร์บอนไดออกไซด์ (ml)
22,400	คือ	ปริมาตรของแก๊ส 1 mol ที่ STP (22,400 ml/mol)
C <sub>1</sub>	คือ	ความเข้มข้นของเอมีน (M)
V <sub>1</sub>	คือ	ปริมาตรของตัวอย่างตัวทำละลายเอมีนที่นำมาไทเทรต (ml)
1,000	คือ	ค่าคงตัวของการเปลี่ยนหน่วยปริมาตร (1,000 ml/L)

ตัวอย่างการคำนวณ CO<sub>2</sub> loading ของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่มีอัตราส่วนความเข้มข้น 0.5:2.5:2 ที่อุณหภูมิ 313 K ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 12.2 kPa

### ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

ปริมาตรของตัวอย่างตัวทำละลายเอมีนที่นำมาไทเทรต (V<sub>1</sub>) = 1 ml

ความเข้มข้นของเอมีน (C<sub>1</sub>) = 5 M

ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกทั้งหมด = 15 ml

ปริมาตรของคาร์บอนไดออกไซด์ที่อ่านได้จากชุดไทเทรต = 74 ml

ปริมาตรของคาร์บอนไดออกไซด์ ( $V_{\text{CO}_2}$ ) = 74-15 = 59 ml

#### การคำนวณ

$$\text{mol CO}_2 = \frac{59 \text{ ml}}{22,400 \text{ ml/mol}} = 0.00263 \text{ mol}$$

$$\text{mol amine} = \frac{(5 \text{ M})(1 \text{ ml})}{(1,000 \text{ ml/L})} = 0.005 \text{ mol}$$

$$\text{CO}_2 \text{ loading} = \frac{0.0263 \text{ mol CO}_2}{0.005 \text{ mol amine}} = 0.526$$

ดังนั้น  $\text{CO}_2$  loading ของตัวทำละลายผสม คือ 0.526

#### 6. การคำนวณความจุวนกลับของตัวทำละลายเอมีน

ความจุวนกลับ คือ ความต่างของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดที่ดูดซับได้ด้วยตัวทำละลายเอมีนที่ภาวะการดูดซับ (313 K) และการคืนสภาพ (363 K) โดยความจุวนกลับในหน่วยผลต่างโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลของเอมีน ( $\text{mol CO}_2/\text{mol amine}$ ) และหน่วยผลต่างโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหน่วยปริมาตรของตัวทำละลายเอมีน ( $\text{mol CO}_2/\text{L-amine solution}$ ) แสดงในสมการที่ (ก.8) และ (ก.9) ตามลำดับ

$$\text{Cyclic capacity} = \alpha_{\text{at } 313 \text{ K}} - \alpha_{\text{at } 363 \text{ K}} \quad (\text{ก.8})$$

$$\text{Cyclic capacity} = (\alpha_{\text{at } 313 \text{ K}} - \alpha_{\text{at } 363 \text{ K}}) \times C_{\text{amine}} \quad (\text{ก.9})$$

เมื่อ  $\alpha_{\text{at } 313 \text{ K}}$  คือ ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 313 K  
( $\text{mol CO}_2/\text{mol amine}$ )

$\alpha_{\text{at } 363 \text{ K}}$  คือ ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 363 K  
( $\text{mol CO}_2/\text{mol amine}$ )

$C_{\text{amine}}$  คือ ความเข้มข้นรวมของตัวทำละลายเอมีน ( $\text{mol/L}$ )

ตัวอย่างการคำนวณความจุกลับของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่มีอัตราส่วนความเข้มข้น 0.5:2.5:2 ที่ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 12.2 kPa

### ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 313 K ( $\alpha_{\text{at } 313 \text{ K}}$ ) = 0.529

ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 363 K ( $\alpha_{\text{at } 313 \text{ K}}$ ) = 0.339

ความเข้มข้นของเอมีน ( $C_{\text{amine}}$ ) = 5 mol/L

### การคำนวณ

Cyclic capacity = (0.529 mol CO<sub>2</sub>/mol amine) – (0.339 mol CO<sub>2</sub>/mol amine)

Cyclic capacity = 0.190 mol CO<sub>2</sub>/mol amine

Cyclic capacity =  $\left(0.190 \frac{\text{mol CO}_2}{\text{mol amine}}\right) \left(5 \frac{\text{mol amine}}{\text{L-amine solution}}\right)$

Cyclic capacity = 0.950 mol CO<sub>2</sub>/L-amine solution

ดังนั้น ความจุกลับของตัวทำละลายผสม คือ 0.190 mol CO<sub>2</sub>/mol amine และ 0.950 mol CO<sub>2</sub>/L-amine solution

## 7. การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม ( $K_G a_v$ ) คำนวณได้จากสมการที่ (ก.10)

$$K_G a_v = \left( \frac{G_I}{P (y_A - y_A^*)} \right) \times \left( \frac{dY_{A,G}}{dz} \right) \quad (\text{ก.10})$$

เมื่อ  $K_G a_v$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม (kmol/m<sup>3</sup>·hr·kPa)

$G_I$  คือ อัตราการไหลของแก๊สเฉื่อย (kmol/m<sup>3</sup>·hr)

$P$  คือ ความดันภายในหอดูดซึม (kPa)

$y_A$  คือ สัดส่วนเชิงโมลของตัวละลาย A (คาร์บอนไดออกไซด์) ในวัฏภาคแก๊ส (kmol/kmol)

$y_A^*$  คือ สัดส่วนเชิงโมลของตัวละลาย A (คาร์บอนไดออกไซด์) ในวัฏภาคแก๊สที่ภาวะสมดุล (kmol/kmol)

$\frac{dY_{A,G}}{dZ}$  คือ ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเชิงโมลของตัวละลาย A (คาร์บอนไดออกไซด์) ในวัฏภาคแก๊สตลอดความสูงของหอดูดซึม ( $m^{-1}$ )

ตัวอย่างการคำนวณ  $K_{Gv}$  ของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่มีอัตราส่วนความเข้มข้น 0.5:2.5:2

### ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

ความดันภายในหอดูดซึม (P) = 101.325 kPa

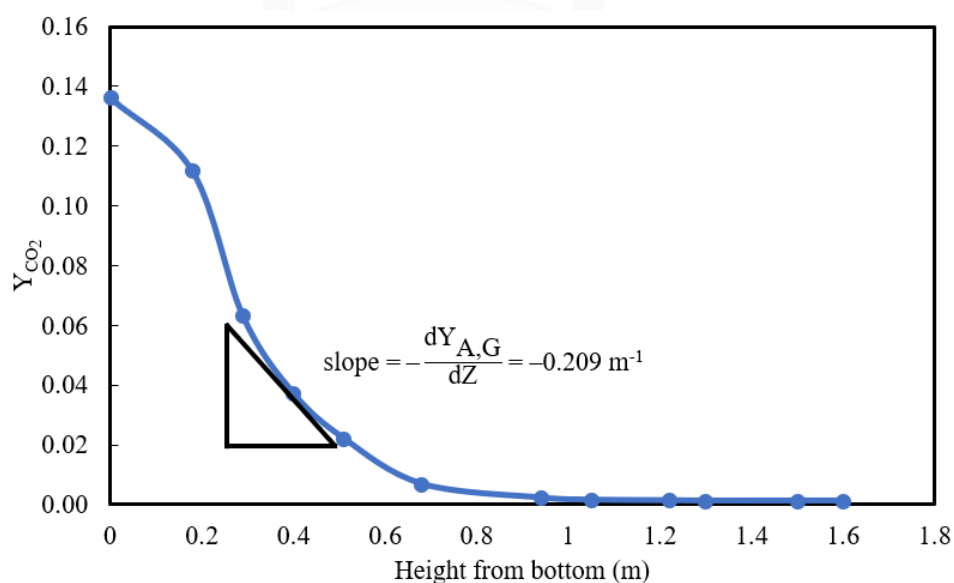
สัดส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊ส ( $y_A$ ) = 0.032

สัดส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊สที่ภาวะสมดุล ( $y_A^*$ ) = 0

ฟลักซ์แก๊สขาเข้า =  $509.30 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-hr}$

ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สขาเข้า = 12 %v/v

ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊สตลอดความสูงของหอดูดซึมแสดงในรูปที่ ก.1  $\left(-\frac{dY_{A,G}}{dZ}\right) = -0.209 \text{ m}^{-1}$



รูปที่ ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊สตลอดความสูงของหอดูดซึม

### การคำนวณ

$$G_1 = (100-12) \times 509.3 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{hr}} \times \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \times \frac{1 \text{ mol}}{22.4 \text{ L}} \times \frac{1 \text{ kmol}}{1000 \text{ mol}}$$

$$G_1 = 20.01 \text{ kmol/m}^3 \cdot \text{hr}$$

$$K_G a_v = \left( \frac{20.01 \text{ kmol/m}^3 \cdot \text{hr}}{(101.325 \text{ kPa}) (0.032 - 0)} \right) \times (0.209 \text{ m}^{-1})$$

$$K_G a_v = 1.29 \text{ kmol/m}^3 \cdot \text{hr} \cdot \text{kPa}$$

ดังนั้น  $K_G a_v$  ของตัวทำละลายผสม คือ  $1.29 \text{ kmol/m}^3 \cdot \text{hr} \cdot \text{kPa}$

### 8. การคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์

ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์เป็นการคำนวณที่จุดตั้งตัวอย่างในระดับความสูงเดียวกับที่ใช้คำนวณ  $K_G a_v$  ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (ก.11)

$$\text{CO}_2 \text{ removal efficiency (\%)} = \left| \frac{y_{\text{CO}_2, \text{inlet}} - y_{\text{CO}_2, \text{outlet}}}{y_{\text{CO}_2, \text{inlet}}} \right| \times 100\% \quad (\text{ก.11})$$

เมื่อ  $y_{\text{CO}_2, \text{inlet}}$  คือ สัดส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊สขาเข้า

$y_{\text{CO}_2, \text{outlet}}$  คือ สัดส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊ส ณ จุดตั้งตัวอย่าง

ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่มีอัตราส่วนความเข้มข้น 0.5:2.5:2

#### ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

สัดส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊สขาเข้า ( $y_{\text{CO}_2, \text{inlet}}$ ) = 0.120

สัดส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊ส ณ จุดตั้งตัวอย่างในระดับความสูงเดียวกับที่ใช้คำนวณ  $K_G a_v$  ( $y_{\text{CO}_2, \text{outlet}}$ ) = 0.032

### การคำนวณ

$$\text{CO}_2 \text{ removal efficiency (\%)} = \left| \frac{0.120 - 0.032}{0.120} \right| \times 100\%$$

$$\text{CO}_2 \text{ removal efficiency} = 73.33\%$$

ดังนั้น ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลายผสมคิดเป็นร้อยละ 73.33

### 9. การคำนวณร้อยละความคลาดเคลื่อนของการตุลมวล

การตรวจสอบความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของการทดลองสมรรถนะการถ่ายโอนมวลคาร์บอนไดออกไซด์ภายในหอดูดซึม ซึ่งการคำนวณร้อยละความคลาดเคลื่อนของการตุลมวลเป็นการเปรียบเทียบปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกกำจัดจากวัฏภาคแก๊สกับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมในวัฏภาคของเหลว สามารถคำนวณได้จากสมการ (ก.12)

$$\% \text{ Mass balance error} = \frac{\text{Absorbed}_{\text{CO}_2} - \text{Removed}_{\text{CO}_2}}{\text{Absorbed}_{\text{CO}_2}} \times 100\% \quad (\text{ก.12})$$

เมื่อ  $\text{Absorbed}_{\text{CO}_2}$  คือ อัตราการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคของเหลว (molCO<sub>2</sub>/min)

$\text{Removed}_{\text{CO}_2}$  คือ อัตราการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊ส (mol CO<sub>2</sub>/min)

#### ด้านวัฏภาคแก๊ส

เนื่องจากการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์จากวัฏภาคแก๊สไปยังของเหลว ดังนั้นอัตราการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊ส สามารถคำนวณได้จากสมการ (ก.13) ถึง (ก.14)

$$\text{Removed CO}_2 = [Y_{\text{CO}_2,\text{inlet}} - Y_{\text{CO}_2,\text{outlet}}]G_1 \quad (\text{ก.13})$$

เมื่อ  $Y_{\text{CO}_2}$  คือ สัดส่วนเชิงโมลคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊ส (mol CO<sub>2</sub>/mol N<sub>2</sub>)

$G_1$  คือ อัตราการไหลของแก๊สเฉื่อยขาเข้า (mol N<sub>2</sub>/min)

$$Y_{\text{CO}_2} = \frac{y_{\text{CO}_2}}{1 - y_{\text{CO}_2}} \quad (\text{ก.14})$$

เมื่อ  $y_{\text{CO}_2}$  คือ สัดส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊ส



### ด้านของเหลว

ส่วนในด้านของเหลวการคำนวณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมได้ ดังสมการ (ก.15) ถึง (ก.17)

$$\text{Absorbed CO}_2 = \text{CO}_{2,\text{outlet}} - \text{CO}_{2,\text{inlet}} \quad (\text{ก.15})$$

$$\text{CO}_{2,\text{inlet}} = C_{\text{inlet}} \alpha_{\text{inlet}} L \quad (\text{ก.16})$$

$$\text{CO}_{2,\text{outlet}} = C_{\text{outlet}} \alpha_{\text{outlet}} L \quad (\text{ก.17})$$

เมื่อ C คือ ความเข้มข้นของเอมีนในตัวทำละลาย (M)

$\alpha$  คือ CO<sub>2</sub> loading ของตัวทำละลายเอมีน (mol CO<sub>2</sub>/mol amine)

L คือ อัตราการไหลของตัวทำละลายเอมีน (L/min)

ตัวอย่างการคำนวณร้อยละความคลาดเคลื่อนของการตุลมวลของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่มีอัตราส่วนความเข้มข้น 0.5:2.5:2

### ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

สัดส่วนเชิงโมลคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สขาเข้า ( $y_{\text{CO}_2,\text{inlet}}$ ) = 0.1200

สัดส่วนเชิงโมลคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สขาออก ( $y_{\text{CO}_2,\text{outlet}}$ ) = 0.0008

อัตราการไหลของแก๊สเฉื่อยขาเข้า ( $G_1$ ) = 0.24 mol N<sub>2</sub>/min

ความเข้มข้นของเอมีนในตัวทำละลายขาเข้า ( $C_{\text{inlet}}$ ) = 4.93 M

ความเข้มข้นของเอมีนในตัวทำละลายขาออก ( $C_{\text{outlet}}$ ) = 5.01 M

CO<sub>2</sub> loading ของตัวทำละลายเอมีนในของเหลวขาเข้า ( $\alpha_{\text{inlet}}$ ) = 0.25

CO<sub>2</sub> loading ของตัวทำละลายเอมีนในของเหลวขาออก ( $\alpha_{\text{outlet}}$ ) = 0.41

อัตราการไหลของตัวทำละลายเอมีน (L) = 0.043 L/min

### การคำนวณ

$$Y_{\text{CO}_2,\text{inlet}} = \frac{0.1200}{1 - 0.1200} = 0.1364 \text{ mol CO}_2/\text{mol N}_2$$

$$Y_{\text{CO}_2,\text{outlet}} = \frac{0.0008}{1 - 0.0008} = 0.0008 \text{ mol CO}_2/\text{mol N}_2$$

$$\text{Removed CO}_2 = \left( 0.1364 - 0.0008 \frac{\text{mol CO}_2}{\text{mol N}_2} \right) \left( 0.24 \frac{\text{mol N}_2}{\text{min}} \right) = 0.032 \text{ mol CO}_2/\text{min}$$

$$\text{CO}_{2,\text{inlet}} = (4.93 \text{ M}) \left( 0.25 \frac{\text{mol CO}_2}{\text{mol amine}} \right) \left( 0.043 \frac{\text{L}}{\text{min}} \right) = 0.053 \text{ mol CO}_2/\text{min}$$

$$\text{CO}_{2,\text{outlet}} = (5.01 \text{ M}) \left( 0.41 \frac{\text{mol CO}_2}{\text{mol amine}} \right) \left( 0.043 \frac{\text{L}}{\text{min}} \right) = 0.088 \text{ mol CO}_2/\text{min}$$

$$\text{Absorbed CO}_2 = 0.088 - 0.053 = 0.035 \text{ mol CO}_2/\text{min}$$

$$\% \text{ Mass balance error} = \frac{0.035 - 0.032}{0.035} \times 100\% = 8.57$$

ดังนั้น ร้อยละความคลาดเคลื่อนของการควบคุมมวลของตัวทำละลายผสมคิดเป็นร้อยละ 8.57

#### 10. การคำนวณอัตราการคืนสภาพตัวทำละลายเริ่มต้น

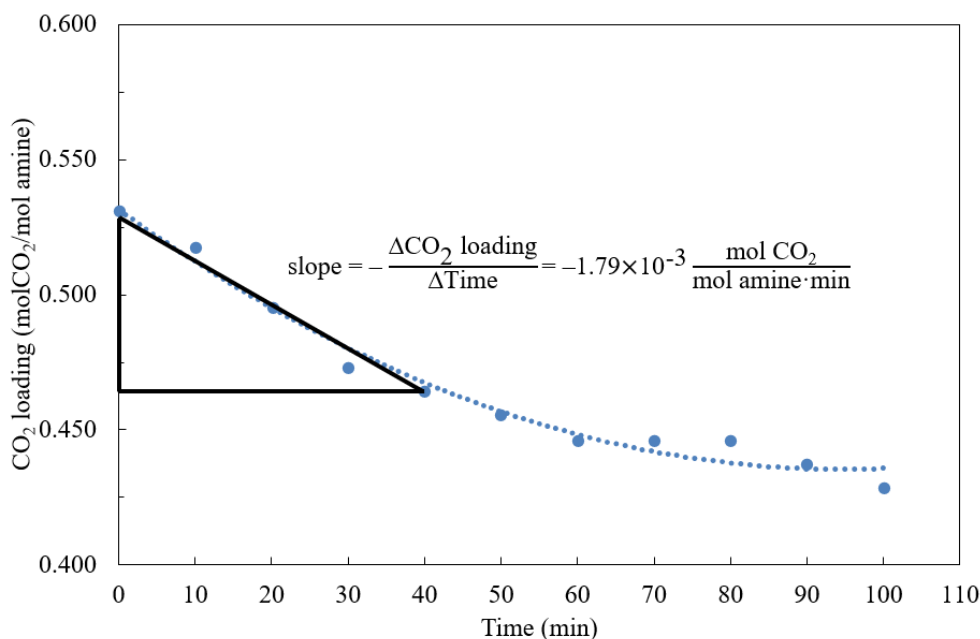
อัตราการคืนสภาพตัวทำละลายเริ่มต้นคำนวณได้จากความชันของความสัมพัทธ์ระหว่างค่า CO<sub>2</sub> loading ของตัวทำละลายเอมีนในเครื่องคืนสภาพในช่วงเริ่มทำการทดลองจนถึง 40 นาที โดยอัตราการคืนสภาพตัวทำละลายเริ่มต้นที่ได้แสดงในหน่วย mol CO<sub>2</sub>/mol amine·min ส่วนอัตราการคืนสภาพตัวทำละลายเริ่มต้นในหน่วย mol CO<sub>2</sub>/L-amine solution·min คำนวณได้จากผลคูณระหว่างอัตราการคืนสภาพตัวทำละลายเริ่มต้นที่ได้จากความสัมพัทธ์และความเข้มข้นของตัวทำละลายเอมีน

ตัวอย่างการคำนวณอัตราการคืนสภาพตัวทำละลายเริ่มต้นของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่มีอัตราส่วนความเข้มข้น 0.5:2.5:2

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{ความเข้มข้นของเอมีน} = 5 \text{ M}$$

ความชันของกราฟระหว่าง CO<sub>2</sub> loading ของตัวทำละลายในเครื่องคืนสภาพตลอดระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองแสดงในรูปที่ ก.2 =  $1.79 \times 10^{-3}$  mol CO<sub>2</sub>/mol amine·min



รูปที่ ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง CO<sub>2</sub> loading ของตัวทำละลายในเครื่องคืนสภาพตลอดระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง

#### การคำนวณ

$$\text{Initial desorption rate} = \left( 1.79 \times 10^{-3} \frac{\text{mol CO}_2}{\text{mol amine} \cdot \text{min}} \right) \left( 5 \frac{\text{mol amine}}{\text{L-amine solution}} \right)$$

$$\text{Initial desorption rate} = 8.93 \times 10^{-3} \text{ mol CO}_2/\text{L-amine solution} \cdot \text{min}$$

ดังนั้น อัตราการคืนสภาพตัวทำละลายเริ่มต้นของตัวทำละลายผสม คือ  $1.79 \times 10^{-3} \text{ mol CO}_2/\text{mol amine} \cdot \text{min}$  และ  $8.93 \times 10^{-3} \text{ mol CO}_2/\text{L-amine solution} \cdot \text{min}$

#### 11. การคำนวณภาระทางความร้อนในการคืนสภาพตัวทำละลาย

ภาระทางความร้อนในการคืนสภาพ คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมล มีหน่วยเป็น kJ/mol CO<sub>2</sub> ทั้งนี้ภาระทางความร้อนในการคืนสภาพตัวทำละลาย ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ภาระทางความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ ( $Q_{\text{des}}$ ) ภาระทางความร้อนในการระเหยของน้ำ ( $Q_{\text{vap}}$ ) และความร้อนสัมผัส ( $Q_{\text{sen}}$ )

##### ภาระทางความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์

ภาระทางความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (ก.18)

$$Q_{des} = \sum \frac{C_i}{C_T} \Delta H_{des_i} \quad (ก.18)$$

เมื่อ  $Q_{des}$  คือ ภาระทางความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลายเอมีนผสม (kJ/mol CO<sub>2</sub>)

$C_i$  คือ ความเข้มข้นของเอมีนองค์ประกอบ  $i$  (mol/L)

$C_T$  คือ ความเข้มข้นรวมของตัวทำละลายเอมีนผสม (mol/L)

$\Delta H_{des_i}$  คือ ความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ของเอมีนองค์ประกอบ  $i$  (kJ/mol CO<sub>2</sub>)

ตัวอย่างการคำนวณภาระทางความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่มีอัตราส่วนความเข้มข้น 0.5:2.5:2

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

ความเข้มข้นของ AMP ( $C_{AMP}$ ) = 0.5 M

ความเข้มข้นของ PZ ( $C_{PZ}$ ) = 2.5 M

ความเข้มข้นของ TEA ( $C_{TEA}$ ) = 2 M

ความเข้มข้นรวมของตัวทำละลายเอมีนผสม ( $C_T$ ) = 5 M

ตารางที่ ก.2 ภาระทางความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์

ชนิดเอมีน	ภาระทางความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ (kJ/mol CO <sub>2</sub> )
AMP	80.91
PZ	80.58
TEA	66.59

### การคำนวณ

$$Q_{\text{des}} = \left( \frac{0.5 \text{ M}}{5 \text{ M}} \times 80.91 \text{ kJ/mol CO}_2 \right) + \left( \frac{2.5 \text{ M}}{5 \text{ M}} \times 80.58 \text{ kJ/mol CO}_2 \right) + \left( \frac{2 \text{ M}}{5 \text{ M}} \times 66.59 \text{ kJ/mol CO}_2 \right)$$

$$Q_{\text{des}} = 75.0 \text{ kJ/mol CO}_2$$

ดังนั้น ภาระทางความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวทำละลายผสม คือ 75.0 kJ/mol CO<sub>2</sub>

### ภาระทางความร้อนในการระเหยของน้ำ

ภาระทางความร้อนในการระเหยของน้ำสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (ก.19) ถึง (ก.21)

$$Q_{\text{vap}} = \Delta H_{\text{vap\_H}_2\text{O}} \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{P_{\text{CO}_2}} \quad (\text{ก.19})$$

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = (P^{\text{sat}}) X_{\text{H}_2\text{O\_lean}} \quad (\text{ก.20})$$

$$P_{\text{CO}_2} = 101.3 - ((P^{\text{sat}}) X_{\text{H}_2\text{O\_lean}}) \quad (\text{ก.21})$$

เมื่อ  $Q_{\text{vap}}$  คือ ภาระทางความร้อนในการระเหยของน้ำ (kJ/mol CO<sub>2</sub>)

$\Delta H_{\text{vap\_H}_2\text{O}}$  คือ ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำที่อุณหภูมิในการคืนสภาพ (kJ/mol H<sub>2</sub>O)

$P_{\text{H}_2\text{O}}$  คือ ความดันย่อยของไอน้ำ (kPa)

$P_{\text{CO}_2}$  คือ ความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ (kPa)

$p^{\text{sat}}$  คือ ความดันอิ่มตัวของน้ำที่อุณหภูมิในการคืนสภาพตัวทำละลาย (kPa)

$X_{\text{H}_2\text{O\_lean}}$  คือ สัดส่วนเชิงโมลของน้ำในตัวทำละลายเอมีนที่มีคาร์บอนไดออกไซด์น้อยลง (mol/mol)

ตัวอย่างการคำนวณภาระทางความร้อนในการระเหยของน้ำของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่มีอัตราส่วนความเข้มข้น 0.5:2.5:2

### ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำที่อุณหภูมิในการคืนสภาพตัวทำละลาย ( $\Delta H_{\text{vap}_H_2O}$ ) = 41 kJ/mol H<sub>2</sub>O

ความดันอิ่มตัวของน้ำที่อุณหภูมิ 363 K ( $P^{\text{sat}}$ ) = 70.182 kPa

สัดส่วนเชิงโมลของน้ำในตัวทำละลายเอมีนที่มีคาร์บอนไดออกไซด์น้อยลงที่เวลา 100 นาที ( $X_{H_2O\_lean}$ ) = 0.838

### การคำนวณ

$$P_{H_2O} = (70.182 \text{ kPa}) (0.838) = 58.81 \text{ kPa}$$

$$P_{CO_2} = 101.3 \text{ kPa} - 58.81 \text{ kPa} = 42.49 \text{ kPa}$$

$$Q_{\text{vap}} = (41 \text{ kJ/mol } H_2O) \left( \frac{58.81 \text{ kPa}}{42.49 \text{ kPa}} \right)$$

$$Q_{\text{vap}} = 56.7 \text{ kJ/mol } CO_2$$

ดังนั้น ภาระทางความร้อนในการระเหยของน้ำของตัวทำละลายผสม คือ 56.7 kJ/mol CO<sub>2</sub>

### **ความร้อนสัมผัส**

ความร้อนสัมผัสสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (ก.22)

$$Q_{\text{sen}} = \frac{mC_p\Delta T}{(\alpha_{CO_2\_rich} - \alpha_{CO_2\_lean})\text{mol}_{\text{amine}}} \quad (\text{ก.22})$$

เมื่อ  $Q_{\text{sen}}$  คือ ความร้อนสัมผัส (kJ/mol CO<sub>2</sub>)

$m$  คือ มวลของตัวทำละลายเอมีนผสมในเครื่องคืนสภาพตัวทำละลาย (g)

$C_p$  คือ ความจุความร้อนของตัวทำละลายเอมีนผสม (kJ/g·K)

$\Delta T$	คือ	ผลต่างระหว่างอุณหภูมิที่ภาวะดำเนินการการดูดซึมและการคืนสภาพตัวทำละลาย (K)
$\alpha_{\text{CO}_2\text{-rich}}$	คือ	ความจุการดูดซึมของตัวทำละลายเอมีนผสมที่เต็มไปด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (Rich loading)
$\alpha_{\text{CO}_2\text{-lean}}$	คือ	ความจุการดูดซึมของตัวทำละลายเอมีนผสมที่มีคาร์บอนไดออกไซด์น้อยลง (Lean loading)
$\text{mol}_{\text{amine}}$	คือ	โมลของเอมีน (mol amine)

ตัวอย่างการคำนวณความร้อนสัมผัสของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ที่มีอัตราส่วนความเข้มข้น 0.5:2.5:2

#### ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

มวลของตัวทำละลายเอมีนผสมในเครื่องคืนสภาพตัวทำละลาย (m) = 104.96 g

ผลคูณระหว่างความจุความร้อนของตัวทำละลายเอมีนผสมและผลต่างระหว่างอุณหภูมิที่ภาวะดำเนินการการดูดซึมและการคืนสภาพตัวทำละลาย ( $C_p\Delta T$ ) = 0.151 kJ/g

ความจุการดูดซึมของตัวทำละลายเอมีนผสมที่เต็มไปด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\alpha_{\text{CO}_2\text{-rich}}$ ) = 0.531

ความจุการดูดซึมของตัวทำละลายเอมีนผสมที่มีคาร์บอนไดออกไซด์น้อยลง ( $\alpha_{\text{CO}_2\text{-lean}}$ ) = 0.429

ปริมาตรของตัวทำละลายเอมีนผสมในเครื่องคืนสภาพตัวทำละลาย = 100 ml

ความเข้มข้นของเอมีน = 5 M

#### การคำนวณ

$$\text{mol}_{\text{amine}} = \frac{(5 \text{ M})(100 \text{ ml})}{(1,000 \text{ ml/L})} = 0.5 \text{ mol}$$

$$Q_{\text{sen}} = \frac{(104.96 \text{ g})(0.151 \text{ kJ/g})}{\left( (0.531 - 0.429) \frac{\text{mol CO}_2}{\text{mol amine}} \right) (0.5 \text{ mol amine})}$$

$$Q_{\text{sen}} = 308.7 \text{ kJ/mol CO}_2$$

ดังนั้น ความร้อนสัมผัสของตัวทำละลายผสม คือ 308.7 kJ/mol CO<sub>2</sub>

ภาระทางความร้อนในการคืนสภาพตัวทำละลาย คือ ผลรวมของภาระทางความร้อนทั้ง 3 ส่วน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (ก.23)

$$Q_{\text{reg}} = Q_{\text{des}} + Q_{\text{vap}} + Q_{\text{sen}} \quad (\text{ก.23})$$

การคำนวณ

$$Q_{\text{reg}} = 75.0 + 56.7 + 308.7 \text{ kJ/mol CO}_2$$

$$Q_{\text{reg}} = 440.5 \text{ kJ/mol CO}_2$$

ดังนั้น ภาระทางความร้อนในการคืนสภาพของตัวทำละลายผสม 0.5:2.5:2 คือ 440.5 kJ/mol CO<sub>2</sub>



## ภาคผนวก ข

## ผลการทดลอง

ตาราง ข.1 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวทำละลาย AMP:PZ:TEA ในหอดูดซับ

AMP:PZ:TEA	1.2:2.3:1.5	1:2.5:1.5	0.9:2.6:1.5	0.7:2.8:1.5	0.6:2.4:2	0.5:2.5:2
Feed temperature (°C)	30	30	30	30	30	30
Pressure (kPa)	101.3	101.3	101.3	101.3	101.3	101.3
Liquid flux (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> -h)	3.67	3.67	3.67	3.67	3.67	3.67
Gas flux (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> -h)	509.30	509.30	509.30	509.30	509.30	509.30
Inert gas flux (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> -h)	448.69	448.69	450.22	448.18	448.18	448.18
Amine concentration (M)	5.00	5.14	5.13	5.07	5.13	5.01
Lean amine CO <sub>2</sub> loading (mol CO <sub>2</sub> /mol amine)	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.25
Rich amine CO <sub>2</sub> loading (mol CO <sub>2</sub> /mol amine)	0.39	0.41	0.40	0.41	0.39	0.41
Mass balance error (%)	3.56	3.28	0.07	7.95	3.78	8.57
Gas phase CO <sub>2</sub> Concentration (%)						
	0.00	12.00	11.90	11.60	12.00	12.00
	0.18	8.31	7.80	9.09	7.15	7.77
	0.29	4.25	5.33	5.16	3.62	4.23
	0.40	1.91	2.74	2.23	1.60	1.36
	0.51	0.75	1.58	1.40	0.60	0.63
Height from bottom (m)	0.68	0.18	0.34	0.22	0.17	0.10
	0.94	0.14	0.12	0.14	0.10	0.07
	1.05	0.11	0.10	0.12	0.09	0.06
	1.22	0.10	0.09	0.11	0.09	0.06
	1.30	0.10	0.07	0.11	0.08	0.06
	1.50	0.09	0.07	0.10	0.08	0.06
	1.60	0.08	0.07	0.10	0.08	0.05
System temperature (°C)						
	0.18	41.08	51.55	55.67	57.19	53.99
Height from bottom (m)	0.29	40.80	46.01	52.91	51.42	46.31
	0.40	31.61	40.09	48.87	47.52	39.33
	0.51	29.19	35.12	41.28	39.82	36.18
	0.68	26.98	33.90	38.69	38.21	35.40
	0.94	26.81	32.51	37.55	38.03	35.06
	1.05	26.74	32.56	37.67	37.92	35.07
	1.22	26.92	32.41	37.73	37.64	34.99
	1.30	26.79	32.46	37.42	37.41	34.88
	1.50	26.50	32.47	37.38	37.12	34.86

ตาราง ข.2 ความจุการดูดซับและอุณหภูมิของตัวทำละลาย AMP-PZ-TEA ในเครื่องคืนสภาพ ตลอดระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง

AMP:PZ:TEA	1.2:2.3:1.5	1:2.5:1.5	0.9:2.6:1.5	0.7:2.8:1.5	0.6:2.4:2	0.5:2.5:2	
CO <sub>2</sub> loading (mol CO <sub>2</sub> /mol amine)							
Time (min)	0	0.556	0.558	0.560	0.578	0.518	0.531
	10	0.549	0.549	0.549	0.569	0.509	0.518
	20	0.531	0.538	0.531	0.550	0.473	0.496
	30	0.509	0.509	0.513	0.535	0.446	0.473
	40	0.491	0.496	0.500	0.528	0.420	0.464
	50	0.478	0.496	0.491	0.518	0.420	0.455
	60	0.473	0.491	0.482	0.513	0.411	0.446
	70	0.469	0.487	0.474	0.508	0.402	0.446
	80	0.460	0.482	0.469	0.508	0.384	0.446
	90	0.455	0.469	0.465	0.494	0.375	0.438
	100	0.451	0.473	0.460	0.500	0.375	0.429
AMP:PZ:TEA	1.2:2.3:1.5	1:2.5:1.5	0.9:2.6:1.5	0.7:2.8:1.5	0.6:2.4:2	0.5:2.5:2	
Temperature (°C)							
Time (min)	0	46.2	46.6	47.4	45	46.5	46.5
	10	76.6	77.2	77.8	76.4	77.1	77.8
	20	83.2	83.4	84.7	82.9	84.1	84.2
	30	85.9	86	87	85.7	86.3	86.7
	40	87.3	87.2	88.4	87	87.7	88.5
	50	88.1	88	89.4	88.2	88.5	89.7
	60	88.9	87.8	89.6	88.4	89.3	89.9
	70	89.1	88.4	90.3	88.5	89.5	89.6
	80	89.4	88.7	90.5	89.3	89.7	90.4
	90	89.3	88.9	90.6	88.9	89.9	90.4
	100	89.6	89.2	90.4	89	90	90.4

### บรรณานุกรม

1. Olivier, J.G.J. and J.A.H.W. Peters, Trends in global CO<sub>2</sub> and total greenhouse gas emissions: 2020 Report. 2020: Available at [https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2020-trends-in-global-co2-and\\_total-greenhouse-gas-emissions-2020-report\\_4331.pdf](https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2020-trends-in-global-co2-and_total-greenhouse-gas-emissions-2020-report_4331.pdf).
2. Nwaoha, C., et al., Advancement and new perspectives of using formulated reactive amine blends for post-combustion carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) capture technologies. Petroleum, 2017. 3(1): p. 10-36.
3. El Hadri, N., et al., Aqueous amine solution characterization for post-combustion CO<sub>2</sub> capture process. Applied Energy, 2017. 185: p. 1433-1449.
4. Sema, T., et al., Part 5b: Solvent chemistry: reaction kinetics of CO<sub>2</sub> absorption into reactive amine solutions. Carbon Management, 2014. 3(2): p. 201-220.
5. Dubois, L. and D. Thomas, Screening of Aqueous Amine-Based Solvents for Postcombustion CO<sub>2</sub> Capture by Chemical Absorption. Chemical Engineering & Technology, 2012. 35(3): p. 513-524.
6. Brúder, P., et al., CO<sub>2</sub> capture into aqueous solutions of piperazine activated 2-amino-2-methyl-1-propanol. Chemical Engineering Science, 2011. 66(23): p. 6193-6198.
7. Demontigny, D., P. Tontiwachwuthikul, and A. Chakma, Parametric studies of carbon dioxide absorption into highly concentrated monoethanolamine solutions. The Canadian journal of chemical engineering, 2001. 79(1): p. 137-142.
8. Nwaoha, C., et al., Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) 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.
9. Nakrak, S., et al. Preliminary Mass Transfer Performance of CO<sub>2</sub> absorption into AMP-PZ-MEA ternary amines. Available at SSRN 3821405, 2021.
10. Horwitz, W. Association of Official Analytical Chemists (AOAC) methods. 12th Edition; George Banta: Menasha, WI, 1975.

11. Metz, B., et al., IPCC special report on carbon dioxide capture and storage. 2005: Cambridge: Cambridge University Press.
12. Ahmed, R., et al., Recent advances in carbon-based renewable adsorbent for selective carbon dioxide capture and separation-A review. *Journal of Cleaner Production*, 2020. 242: p. 118409.
13. Babu, P., R. Kumar, and P. Linga, A new porous material to enhance the kinetics of clathrate process: application to precombustion carbon dioxide capture. *Environmental science & technology*, 2013. 47(22): p. 13191-13198.
14. Nouredine, T., Technological Hazards of CO<sub>2</sub> Sequestration Activity State of the Art and Experience Feedback at Krechba (In Salah) Pilot Site Hakima Hamida, Aziz Belkhatir<sup>2</sup> and Nouredine Tchouar<sup>1</sup>. 2015.
15. Badiei, M., et al., Overview of carbon dioxide separation technology. *Power and Energy Systems and Applications*. Las Vegas, USA.[doi: 10.2316/P. 2012.788-067], 2012.
16. Font-Palma, C., D. Cann, and C. Udemu, Review of cryogenic carbon capture innovations and their potential applications. *C*, 2021. 7(3): p. 58.
17. Aaron, D. and C. Tsouris, Separation of CO<sub>2</sub> from flue gas: a review. *Separation science and technology*, 2005. 40(1-3): p. 321-348.
18. Seader, J.D., Henley, E.J., *Separation Process Principles*. 3<sup>rd</sup> edition. 2011, John Wiley & Sons, Inc. .
19. Wang, Y., et al. An Investigation of Hybrid Membrane/Chemical Absorption CO<sub>2</sub> Capture Processes in Coal-fired Power Plant. in 14<sup>th</sup> Greenhouse Gas Control Technologies Conference Melbourne. 2018.
20. Borhani, T.N. and M. Wang, Role of solvents in CO<sub>2</sub> capture processes: The review of selection and design methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019. 114: p. 109299.
21. Kim, S., H. Shi, and J.Y. Lee, CO<sub>2</sub> absorption mechanism in amine solvents and enhancement of CO<sub>2</sub> capture capability in blended amine solvent. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2016. 45: p. 181-188.
22. Karunarathne, S.S., D.A. Eimer, and L.E. Øi, Physical properties of MEA+ Water+ CO<sub>2</sub> mixtures in postcombustion CO<sub>2</sub> Capture: A review of correlations and

- experimental studies. *Journal of Engineering*, 2020. 2020.
23. Daubert, T.E., *Chemical engineering thermodynamics*. 1985: McGraw-Hill Companies.
  24. Yunus, A.C., *Fluid Mechanics: Fundamentals And Applications (Si Units)*. 2010: Tata McGraw Hill Education Private Limited.
  25. Sema, T., et al., Density, viscosity, and physical CO<sub>2</sub> diffusivity of novel formulated solvent N-methyl-4-piperidinol and 2-amino-2-methyl-1-propanol for carbon capture. *Int J Environ Sci Dev*, 2020. 11(10): p. 483-487.
  26. Shariff, A. and M. Shaikh, Energy efficient solvents for CO<sub>2</sub> capture by gas-liquid absorption, Aqueous amino acid salts and their blends as efficient absorbents for CO<sub>2</sub> capture. 2017, Springer.
  27. Liang, Z.H., et al., Recent progress and new developments in post-combustion carbon-capture technology with amine based solvents. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015. 40: p. 26-54.
  28. Levenspiel, O., *Chemical reaction engineering*. 1998: John wiley & sons.
  29. Naami, A., et al., Mass transfer performance of CO<sub>2</sub> absorption into aqueous solutions of 4-diethylamino-2-butanol, monoethanolamine, and N-methyldiethanolamine. *Industrial & engineering chemistry research*, 2012. 51(18): p. 6470-6479.
  30. 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 (CO<sub>2</sub>) capture. *Chemical Engineering Science*, 2017. 170: p. 26-35.
  31. Norouzbahari, S., S. Shahhosseini, and A. Ghaemi, Chemical absorption of CO<sub>2</sub> into an aqueous piperazine (PZ) solution: development and validation of a rigorous dynamic rate-based model. *RSC advances*, 2016. 6(46): p. 40017-40032.
  32. Li, M.H. and K.P. Shen, Densities and solubilities of solutions of carbon dioxide in water+ monoethanolamine+ N-methyldiethanolamine. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 1992. 37(3): p. 288-290.
  33. Li, M.-H. and Y.-C. Lie, Densities and viscosities of solutions of monoethanolamine+ N-methyldiethanolamine+ water and

- monoethanolamine+ 2-amino-2-methyl-1-propanol+ water. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 1994. 39(3): p. 444-447.
34. 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 CO<sub>2</sub> capture. *Separation and Purification Technology*, 2018. 194: p. 89-95.
  35. Tontiwachwuthikul, P., A. Meisen, and C.J. Lim, Solubility of carbon dioxide in 2-amino-2-methyl-1-propanol solutions. *Journal of chemical and engineering data*, 1991. 36(1): p. 130-133.
  36. Chiu, L.-F., H.-F. Liu, and M.-H. Li, Heat capacity of alkanolamines by differential scanning calorimetry. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 1999. 44(3): p. 631-636.
  37. Ghulam, M., et al., Volumetric properties, viscosities and refractive indices of aqueous solutions of 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP). *Res. J. Chem. Environ*, 2013. 17(9): p. 22-31.
  38. Murshid, G., et al., Physical Properties of Aqueous Solutions of Piperazine and (2-Amino-2-methyl-1-propanol+ Piperazine) from (298.15 to 333.15) K. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2011. 56(5): p. 2660-2663.
  39. Li, X.-X., et al., Density and viscosity for binary mixtures of diethylene glycol monobutyl ether with monoethanolamine, diethanolamine, and triethanolamine from (293.15 to 333.15) K. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2013. 58(5): p. 1229-1235.
  40. El Hadri, N., et al., Aqueous amine solution characterization for post-combustion CO<sub>2</sub> capture process. *Applied Energy*, 2017. 185: p. 1433-1449.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	วรรณวัน เทพอารยางกุล
วัน เดือน ปี เกิด	27 กันยายน 2540
สถานที่เกิด	จังหวัดชลบุรี ประเทศไทย
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	77/109 ซอยนารณมนตเสวี4/5 ถนนพระยาสุรเสวี หมู่ 3 ตำบลเสม็ด อำเภอเมืองชลบุรี จังหวัดชลบุรี 20000



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY