

สมรรถนะการถ่ายโอนมวลของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในเอมีนผสมสามชนิด AMP-PZ-MEA



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MASS TRANSFER PERFORMANCE OF CO₂ ABSORPTION INTO AMP-PZ-MEA TERNARY
AMINES



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

Department of Chemical Technology

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมรรถนะการถ่ายโอนมวลของการดูดซึม
	คาร์บอนไดออกไซด์ในเอมีนผสมสามชนิด AMP-PZ-MEA
โดย	น.ส.สุกัญญา นาครักษ์
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ เสมา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

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

สุกัญญา นาครักษ์ : สมรรถนะการถ่ายโอนมวลของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในเอมีนผสมสามชนิด AMP-PZ-MEA. (MASS TRANSFER PERFORMANCE OF CO₂ ABSORPTION INTO AMP-PZ-MEA TERNARY AMINES) อ.ที่ปรึกษาหลัก : อ. ดร. ธีรวัฒน์ เสมมา

งานวิจัยนี้ศึกษาสมรรถนะการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเอมีนผสมสามชนิด AMP-PZ-MEA ในหอดูดซึมบรรจุวัสดุแบบจัดเรียงตัวเป็นระเบียบชนิด Sulzer DX ในเชิงสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม (K_{Ga}) และประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีพารามิเตอร์ที่ศึกษา ได้แก่ ฟลักซ์สารละลายขาเข้า (A) ฟลักซ์แก๊สขาเข้า (B) CO₂ loading ในสารละลายขาเข้า (C) และ h/h_0 (D) โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสามระดับเพื่อศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์และอันตรกิริยาระหว่างพารามิเตอร์ รวมถึงหาภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการ ผลการศึกษา พบว่า K_{Ga} และประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเมื่อฟลักซ์สารละลายขาเข้าและ h/h_0 เพิ่มขึ้น แต่ลดลงเมื่อ CO₂ loading ในสารละลายขาเข้าเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มฟลักซ์แก๊สขาเข้าไม่ส่งผลต่อ K_{Ga} แต่ทำให้ประสิทธิภาพของการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) พบว่าพารามิเตอร์และอันตรกิริยาระหว่างพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อ K_{Ga} ได้แก่ A C D AC CD C² และ D² ส่วนพารามิเตอร์และอันตรกิริยาระหว่างพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ คือ A B C D AC และ CD ทั้งนี้ ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเอมีนผสมสามชนิด AMP-PZ-MEA คือ ฟลักซ์สารละลาย 3.67 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร·ชั่วโมง⁻¹ CO₂ loading ในสารละลายขาเข้า 0.25 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน และ h/h_0 เท่ากับ 0.32 นอกจากนี้ K_{Ga} และ ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ของการถ่ายโอนมวลด้วยเอมีนผสมสามชนิด AMP-PZ-MEA สูงกว่าเอมีนเกณฑ์เปรียบเทียบ 5 โมลาร์ MEA กว่า 1.8 และ 1.4 เท่า ตามลำดับ

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6270164723 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORD: Carbon dioxide capture, Absorption, Ternary amine, Overall mass transfer coefficient, Three-level full factorial design

Sukanya Nakrak : MASS TRANSFER PERFORMANCE OF CO₂ ABSORPTION INTO AMP-PZ-MEA TERNARY AMINES. Advisor: TEERAWAT SEMA, Ph.D.

In this research, mass transfer performance of CO₂ absorption into ternary amines AMP-PZ-MEA was investigated in terms of overall mass transfer coefficient ($K_G a_v$) and CO₂ removal efficiency in packed column with Sulzer DX structural packing. Three-level full factorial design was applied to determine effects of parameters, which are liquid flux (A), gas flux (B), CO₂ loading in lean solvent (C), and h/h_0 (D), on $K_G a_v$ and CO₂ removal efficiency. The results showed that $K_G a_v$ and CO₂ removal efficiency increased as liquid flux and h/h_0 increased but decreased as CO₂ loading increased. However, it was found that an increasing of gas flux did not affect $K_G a_v$ but decreased CO₂ removal efficiency. The significance of main and interaction parameters was analyzed by analysis of variance (ANOVA). It was observed that the main and the interaction parameters (i.e., A, C, D, AC, CD, C², and D²) had significant effect on $K_G a_v$, while those (i.e., A, B, C, D, AC, and CD) had significant effect on CO₂ removal efficiency. Thus, the optimal condition for CO₂ absorption into ternary amines AMP-PZ-MEA in packed column was achieved at liquid flux of 3.67 m³/m²·h, CO₂ loading of 0.25 mol CO₂/mol amine, and h/h_0 of 0.32. Furthermore, $K_G a_v$ and CO₂ removal efficiency of the ternary amines AMP-PZ-MEA were 1.8 and 1.4 times higher than those of the benchmarking 5 M MEA.

Field of Study: Chemical Technology

Student's Signature

Academic Year: 2020

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง สมรรถนะการถ่ายโอนมวลของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในเอมีนผสมสามชนิด AMP-PZ-MEA สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์ ความช่วยเหลือ และคำแนะนำจากบุคคลหลายท่าน จึงขอขอบพระคุณทุกท่าน ไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ เสมอ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และชี้แนะแนวทางในการทำงานวิจัย การวิเคราะห์ข้อมูล ตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อให้งานวิจัยนี้มีความสมบูรณ์ที่สุด อีกทั้งสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการซื้ออุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ เพื่อจัดทำชุดวิจัยที่สามารถทำงานวิจัยได้อย่างสะดวกและสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

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

ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ (PETROMAT) สำหรับเงินทุนสนับสนุนเงินอุดหนุนการศึกษาและเงินทุนสำหรับการทำวิจัย

ขอขอบคุณภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อำนวยความสะดวกในเรื่องของสถานที่ในการทำงานวิจัย รวมทั้งบุคลากรและเจ้าหน้าที่ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำต่าง ๆ จนวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ ดร.ปรารณา นิมมานเทอดวงศ์ และ ดร.ธรรปดิษฐ์ ยุระตา ที่มอบความรู้และคำปรึกษาด้านวิชาการ ตลอดจนคำแนะนำต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานวิจัย และขอขอบคุณสมาชิกทุกคนของห้องปฏิบัติการ Cybernetics รวมทั้งรุ่นพี่ และเพื่อน ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษา และกำลังใจอย่างสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาที่ทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณ ดร.รัชชานนท์ เปี่ยมใจสว่าง และนายสิทธิพัฒน์ เปี่ยมใจสว่าง ที่ให้ความช่วยเหลือด้านคอมพิวเตอร์และโปรแกรม และขอขอบคุณผู้มีพระคุณทุกท่านที่อยู่เบื้องหลัง ที่ให้กำลังใจ ให้คำแนะนำ และให้การสนับสนุนแก่ผู้จัดทำเสมอมา จนสำเร็จการศึกษา

สุกัญญา นาครักษ์

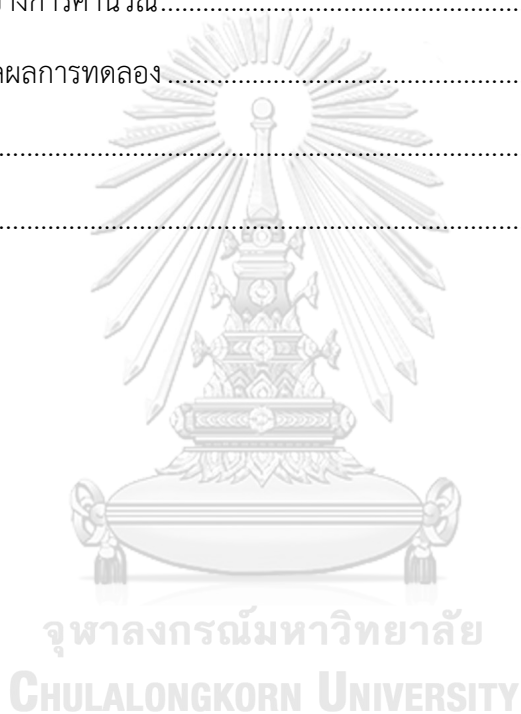
สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	4
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	4
1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.6 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	5
1.7 ลำดับขั้นตอนในการศึกษางานวิจัย.....	7
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์.....	8
2.2 การดูดซึม (Absorption).....	9
2.2.1. เอมีนสำหรับการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์	11
2.2.1.1 สารละลายเอมีนแบบเดี่ยว	13

2.2.1.2 สารละลายเอมีนแบบผสม	14
2.2.2. กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และเอมีน	14
2.3 การถ่ายโอนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ในหอดูดซึม	17
2.3.1. การดูดซึมที่ควบคุมโดยฟิล์มของเหลวและโดยฟิล์มแก๊ส	23
2.3.2. สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม	24
2.4 หอดูดซึมแบบบรรจุ (Packed column).....	26
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	34
3.1 ข้อมูลงานวิจัยเบื้องต้น	34
3.2 สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	35
3.2.1. สารเคมีที่ใช้	35
3.2.2. อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้.....	35
3.3 พารามิเตอร์ที่จะศึกษา	38
3.3.1. ฟลักซ์ของเหลวขาเข้า.....	38
3.3.2. ฟลักซ์แก๊สขาเข้า.....	38
3.3.3. อัตราส่วนเชิงโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเอมีนในสารละลายขาเข้า	38
3.3.4. สัดส่วนความสูงของจุดดิ่งตัวอย่างต่อความสูงของหอดูดซึม	39
3.4 ขั้นตอนการทดลอง	39
3.4.1. การเตรียมสารละลายเอมีน.....	39
3.4.2. การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอมีนในหอดูดซึม.....	39
3.4.3. การคำนวณสมรรถนะการถ่ายโอนมวล	41
3.4.3.1 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม (K_{Ga}).....	42
3.4.3.2 ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์.....	42
3.4.4. อัตราส่วนเชิงโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเอมีน.....	42

3.5 การออกแบบการทดลอง.....	43
3.6 สหสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม	46
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัยและการอภิปรายผล.....	48
4.1 ผลของพารามิเตอร์ต่อสมรรถนะการถ่ายโอนมวลของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์	48
4.1.1. พลิกซ์ของเหลวขาเข้า.....	49
4.1.2. พลิกซ์แก๊สขาเข้า.....	50
4.1.3. อัตราส่วนเชิงโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเอมีนขาเข้า	52
4.1.4. สัดส่วนความสูงของจุดตั้งตัวอย่างต่อความสูงของหอดูดซึม	53
4.1.5. สมรรถนะการถ่ายโอนมวลของการดูดซึมของสารละลาย AMP-PZ-MEA และ MEA	54
4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิติ	56
4.2.1. สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม	57
4.2.1.1 อิทธิพลของพารามิเตอร์หลักต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม.....	58
4.2.1.2 อิทธิพลของอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม ...	59
4.2.2. ประสิทธิภาพของการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์.....	60
4.2.2.1 อิทธิพลของพารามิเตอร์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์.....	60
4.2.2.2 อิทธิพลของอันตรกิริยาระหว่างพารามิเตอร์ต่อประสิทธิภาพของการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์	61
4.2.3. การหาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย AMP-PZ-MEA.....	62
4.3 การทำนายสมรรถนะการถ่ายโอนมวล	64
4.3.1. สหสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วย ANOVA	65
4.3.1.1 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม.....	65
4.3.1.2 ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์.....	66
4.3.1.3 ความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ที่จุดตั้งตัวอย่าง.....	67

4.3.2. สหสัมพันธ์แบบกึ่งเอมพิริคัล.....	68
4.4 สมรรถนะของเอมีนผสมสามชนิด AMP-PZ-MEA.....	72
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	76
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	76
5.2 ข้อเสนอแนะ	78
ภาคผนวก.....	80
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณ.....	81
ภาคผนวก ข ข้อมูลผลการทดลอง	87
บรรณานุกรม.....	100
ประวัติผู้เขียน.....	106



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อด้อยของเทคโนโลยีสำหรับกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์.....	9
ตารางที่ 2.2 ลักษณะของกระบวนการที่ควบคุมโดยฟิล์มของเหลวและโดยฟิล์มแก๊ส	24
ตารางที่ 2.3 ความจุการดูดซึม ความร้อนจากปฏิกิริยาการดูดซึม และค่าคงตัวอัตราปฏิกิริยาอันดับสองของ MEA AMP และ PZ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยมวล	28
ตารางที่ 2.4 สภาพการตกตะกอนของเอมีนผสม AMP-PZ ที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ.....	30
ตารางที่ 3.1 ภาวะดำเนินการของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในหอดูดซึม	40
ตารางที่ 3.2 ช่วงการทดลองและระดับของพารามิเตอร์สำหรับการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย AMP-PZ-MEA.....	44
ตารางที่ 3.3 ชุดการทดลองสำหรับการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย AMP-PZ-MEA ..	45
ตารางที่ 4.1 ระดับของพารามิเตอร์ในการศึกษาการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย AMP-PZ-MEA.....	56
ตารางที่ 4.2 ANOVA ของปัจจัยที่ส่งผลต่อ K_{Ga} สำหรับการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย AMP-PZ-MEA.....	57
ตารางที่ 4.3 ANOVA ของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย AMP-PZ-MEA.....	60

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์	8
รูปที่ 2.2 โครงแบบกระบวนการดูดซึม	11
รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของเอมีนประเภทปฐมภูมิ ทูติยภูมิ และตติยภูมิ.....	12
รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของเอมีนแต่ละชนิดสำหรับการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์	13
รูปที่ 2.5 แบบจำลองทฤษฎีสองฟิล์ม	18
รูปที่ 2.6 แบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาของการดูดซึมทางเคมีในรูปแบบต่าง ๆ	19
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเชิงโมลของตัวละลาย A ตลอดความสูงของหอดูดซึม	26
รูปที่ 2.8 หอดูดซึมแบบบรรจุ.....	27
รูปที่ 2.9 วัสดุบรรจุ (ก) แบบจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ (ข) แบบจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ	27
รูปที่ 3.1 แผนผังอุปกรณ์สำหรับการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์.....	36
รูปที่ 3.2 หอดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์และจุดติดตั้งตัวอย่างสำหรับวัดอุณหภูมิและความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์.....	37
รูปที่ 3.3 วัสดุบรรจุแบบจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ Sulzer DX.....	37
รูปที่ 3.4 แผ่นกระจายสารละลาย	37
รูปที่ 3.5 โปรแกรม LabVEIW สำหรับวัดและจัดเก็บข้อมูลอุณหภูมิในหอดูดซึม	41
รูปที่ 3.6 โปรแกรม Gaslab สำหรับวัดและจัดเก็บข้อมูลความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊สในหอดูดซึม	41
รูปที่ 3.7 ชุดไทเทรต Chittick apparatus สำหรับวัด CO ₂ loading ในสารละลายเอมีน.....	43
รูปที่ 4.1 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับสารละลาย AMP-PZ-MEA และ MEA ที่ฟลักซ์ของเหลวขาเข้าต่าง ๆ.....	50
รูปที่ 4.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและประสิทธิภาพของการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับสารละลาย AMP-PZ-MEA และ MEA ที่ของฟลักซ์แก๊สขาเข้าต่าง ๆ	51

รูปที่ 4.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่ CO₂ loading ต่าง ๆ สำหรับสารละลาย AMP-PZ-MEA และ MEA..... 53

รูปที่ 4.4 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับสารละลาย AMP-PZ-MEA และ MEA ที่ h/h₀ ต่างๆ..... 54

รูปที่ 4.5 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของสารละลาย AMP-PZ-MEA และ MEA 55

รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ของสารละลาย AMP-PZ-MEA และ MEA 55

รูปที่ 4.7 ผลกระทบของพารามิเตอร์หลักที่ส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม 58

รูปที่ 4.8 ผลกระทบของอันตรกิริยาระหว่างพารามิเตอร์ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม..... 59

รูปที่ 4.9 ผลกระทบของพารามิเตอร์หลักต่อประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ 61

รูปที่ 4.10 ผลกระทบของอันตรกิริยาระหว่างพารามิเตอร์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ 62

รูปที่ 4.11 พื้นผิวตอบสนองสามมิติของอันตรกิริยาที่ส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม 64

รูปที่ 4.12 พื้นผิวตอบสนองสามมิติของอันตรกิริยาที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ 64

รูปที่ 4.13 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยสมการ (4.1)..... 66

รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยสมการ (4.2)..... 67

รูปที่ 4.15 ความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ที่จุดตั้งตัวอย่างได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยสมการ (4.3)..... 68

รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{Ga} กับ $L^{0.7}[(\alpha_{eq}-\alpha)C/PCO_2]$ 69

รูปที่ 4.17 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยสมการ (4.5)..... 70

รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{Ga} กับ $L^{0.7}[(\alpha_{eq}-\alpha)C/PCO_2]$ เมื่อใช้สมการ (4.3) ทำนายความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ที่จุดตั้งตัวอย่าง..... 71

รูปที่ 4.19 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยสมการ (4.7).....	71
รูปที่ 4.20 สมรรถนะการถ่ายโอนมวลในเชิงสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ของสารละลายเอมีนผสม AMP-PZ-MEA ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เปรียบเทียบกับสารละลายเกณฑ์เปรียบเทียบ 5 โมลาร์ MEA.....	74
รูปที่ 4.21 สมรรถนะการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของสารละลายผสม AMP-PZ-MEA ที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ เปรียบเทียบกับสารละลายเกณฑ์เปรียบเทียบ 5 โมลาร์ MEA.....	75



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

คาร์บอนไดออกไซด์เป็นหนึ่งในแก๊สเรือนกระจกที่เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อนและสภาพอากาศเปลี่ยนแปลงในทั่วทุกมุมโลก ซึ่งส่งผลกระทบต่อมนุษย์ สัตว์ และพืชเป็นอย่างมาก ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในชั้นบรรยากาศเป็นผลมาจากความต้องการใช้พลังงานสำหรับกิจกรรมในชีวิตประจำวันของมนุษย์ที่สูงขึ้น ทั้งในภาคครัวเรือน ภาคการขนส่ง และภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งโรงไฟฟ้ามีการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาเป็นจำนวนมาก เนื่องจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น แก๊สธรรมชาติ น้ำมันดิบ และถ่านหิน จากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก

กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ (Post-combustion) เป็นหนึ่งในกระบวนการดักจับและกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Capture and Storage: CCS) ซึ่งเป็นที่นิยมสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมหรือโรงไฟฟ้า เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ใช้สำหรับดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สเผาไหม้ก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ อีกทั้ง การติดตั้งกระบวนการนี้ไม่กระทบต่อการดำเนินการของกระบวนการผลิตเดิม เทคโนโลยีที่ใช้สำหรับดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้มีอยู่หลายวิธี เช่น การดูดซึม (Absorption) การดูดซับ (Adsorption) การแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน (Membrane separation) และการแยกที่ภาวะเย็นเยือกยิ่งยวด (Cryogenics separation) [1] งานวิจัยนี้เลือกใช้การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ใช้อย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นกระบวนการแยกที่สามารถดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ในปริมาณมาก และสามารถนำสารละลายที่ผ่านการฟื้นฟูใช้ใหม่ได้ โดยการดูดซึมเชิงเคมี (Chemical absorption) เป็นที่นิยมมากกว่าการดูดซึมเชิงกายภาพ (Physical absorption) เนื่องจากสามารถดำเนินการได้ในภาวะความดันบรรยากาศและมีประสิทธิภาพสูง [2] ซึ่งสารละลายส่วนใหญ่ที่ใช่มักเป็นสารละลายเอมีน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Monoethanolamine (MEA) ที่มีความไวปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ แต่มีข้อจำกัดในด้านความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ (0.5 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน) และต้องใช้ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูสารละลายสูง หนึ่งในวิธีการพัฒนาเทคโนโลยีการดูดซึมให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น คือ การใช้เอมีนที่มีสมรรถนะการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์สูง ทั้งเชิงความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ ภาระทางความร้อน

ในการฟื้นฟูสารละลาย และจลนพลศาสตร์การเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากสารละลายเอมีนแต่ละชนิดมีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกัน จึงนิยมนำใช้สารละลายเอมีนผสมเป็นสารดูดซึม โดยนำข้อดีของเอมีนชนิดหนึ่งมาชดเชยข้อด้อยของเอมีนอีกชนิดหนึ่ง [3] เพื่อพัฒนาเอมีนที่มีสมรรถนะในการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์โดยรวมให้ดียิ่งขึ้น

จากการศึกษาเกี่ยวกับสารละลายเอมีนที่ใช้ในการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ หนึ่งในเอมีนที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ 2-Amino-2-methyl-1-propanol (AMP) ซึ่งสารละลาย AMP เป็นเอมีนที่มีโครงสร้างกีดขวางเนื่องจากขนาด (Sterically hindered amine) มีความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์สูงและใช้ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูสารละลายต่ำ แต่มีข้อด้อยคือ จลนพลศาสตร์การเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับสารละลาย MEA [4] อีกทั้ง ยังเกิดการตกตะกอน (Precipitation) เมื่อใช้สารละลาย AMP ที่ความเข้มข้นสูง Piperazine (PZ) เป็นเอมีนที่มีจลนพลศาสตร์การเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์สูงมาก แต่เกิดการตกตะกอนเมื่อความเข้มข้นของ PZ สูง จึงมีการนำ PZ ผสมลงในสารละลาย AMP เพื่อเพิ่มจลนพลศาสตร์โดยรวมของการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลาย AMP-PZ กับคาร์บอนไดออกไซด์ [5] นอกจากนี้ ยังพบว่าการใช้สารละลายเอมีนผสมสองชนิดเป็นสารดูดซึมสามารถลดภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูสารละลายได้อีกด้วย [6] แต่ข้อดีเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายเอมีนแต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน [7] โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผสมสารละลาย AMP และ PZ ซึ่งหากใช้ในอัตราส่วนความเข้มข้นที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้เกิดการตกตะกอนได้ โดยความเข้มข้นของ PZ สูงสุดที่สามารถนำมาผสมกันโดยไม่เกิดการตกตะกอนคือ 1.5 โมลาร์ และความเข้มข้นของสารละลายรวมเท่ากับ 4.5 โมลาร์ อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองในห้องปฏิบัติการและการดำเนินของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับอุตสาหกรรม ยืนยันว่าสมรรถนะของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์จะมีค่าสูงขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอมีนจากข้อจำกัดเรื่องการตกตะกอนของสารละลาย AMP-PZ ที่ความเข้มข้นรวมมากกว่า 5 M [8] จึงมีแนวคิดในการผสมเอมีนชนิดที่สามลงในสารละลาย AMP-PZ ทั้งนี้ หนึ่งในตัวเลือกที่เหมาะสมคือ MEA เนื่องจากเป็นเอมีนที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย มีสมรรถนะการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ดีและไม่เกิดการตกตะกอนของ MEA ในสารละลายที่ใช้สำหรับดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ โดยสารละลาย AMP-PZ-MEA ที่ความเข้มข้นรวม 6 M เป็นความเข้มข้นสูงสุดของสารละลายผสมดังกล่าวที่ไม่เกิดการตกตะกอนของเอมีน [9]

หลักการสำคัญของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในหอดูดซับ (Absorber) คือ การถ่ายโอนมวลคาร์บอนไดออกไซด์จากวัฏภาคแก๊สไปยังวัฏภาคของเหลว โดยมีความแตกต่างความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแรงขับ (Driving force) ซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับการถ่ายโอนมวล (Mass transfer) ของคาร์บอนไดออกไซด์สู่สารละลายที่ใช้ในการดูดซับ ดังนั้น สมรรถนะของการดูดซับมักแสดงในรูปสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม (Overall mass transfer coefficient) จากการศึกษา พบว่า สารละลาย AMP-PZ-MEA เป็นสารละลายเอมีนที่มีศักยภาพสูงในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ทดแทนสารละลายเกณฑ์เปรียบเทียบกับ 5 โมลาร์ MEA ในเชิงความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และความสามารถในการฟื้นฟูสารละลาย [9] อย่างไรก็ตาม การขึ้นข้อสมรรถนะการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยความจุการดูดซับและความสามารถในการฟื้นฟูสารละลายนั้นไม่เพียงพอ เนื่องจากการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการถ่ายโอนมวล นอกจากนี้ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมยังเป็นข้อมูลสำคัญในการออกแบบความสูงของหอดูดซับอีกด้วย จากเหตุผลข้างต้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องศึกษาสมรรถนะการถ่ายโอนมวลของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลายเอมีนผสมสามชนิด AMP-PZ-MEA โดยใช้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการทดลองการดูดซับในหอดูดซับบรรจุด้วยวัสดุบรรจุแบบจัดเรียงตัวเป็นระเบียบเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการพิจารณาศักยภาพของเอมีนแบบใหม่ AMP-PZ-MEA ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ทดแทนสารละลายเกณฑ์เปรียบเทียบกับ MEA ร่วมกับความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และความสามารถในการฟื้นฟูสารละลาย

การออกแบบการทดลองเป็นวิธีการช่วยพัฒนาให้งานวิจัยมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์เชิงสถิติ เพื่อคัดกรองพารามิเตอร์และอันตรกิริยาระหว่างพารามิเตอร์ (Interaction) ที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนอง (Response) โดยส่วนใหญ่มักใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล เพื่อให้ครอบคลุมผลการทดลองทั้งหมด ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของพารามิเตอร์ ได้แก่ ฟลักซ์ของเหลวขาเข้า (Liquid flux) ฟลักซ์แก๊สขาเข้า (Gas flux) อัตราส่วนเชิงโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเอมีนในสารละลายขาเข้า (CO_2 Loading) และสัดส่วนความสูงของจุดตั้งตัวอย่างต่อความสูงของหอดูดซับ (h/h_0) ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสามระดับ (3^k full factorial design) เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของพารามิเตอร์หลักและอันตรกิริยาระหว่างพารามิเตอร์ต่อสมรรถนะการถ่ายโอนมวลด้วยสารละลาย AMP-PZ-MEA เพื่อหาภาวะ

ที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในหอดูดซับ รวมทั้งสร้างสหสัมพันธ์เพื่อทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมสำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอมีนผสมสามชนิด AMP-PZ-MEA ในหอดูดซับบรรจุด้วยวัสดุบรรจุแบบจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ Sulzer DX

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาสมรรถนะการถ่ายโอนมวลของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในหอดูดซับแบบบรรจุ โดยใช้สารละลายเอมีนผสมสามชนิด AMP-PZ-MEA ในรูปแบบของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม (K_{Ga}) และประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 removal efficiency, %)
2. ศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ต่อสมรรถนะการถ่ายโอนมวลของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในหอดูดซับบรรจุ โดยใช้สารละลายเอมีนผสมสามชนิด AMP-PZ-MEA

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาสมรรถนะการถ่ายโอนมวลของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอมีนในหอดูดซับบรรจุด้วยวัสดุบรรจุแบบจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ Sulzer DX ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 30 มิลลิเมตร และความสูง 1.6 เมตร สารละลายเอมีนที่ใช้ในการศึกษา คือ สารละลาย AMP-PZ-MEA ที่อัตราส่วนความเข้มข้นเชิงโมลาร์ 1.5:1.5:3 โดยจะดำเนินการที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดันบรรยากาศ ซึ่งจะป้อนแก๊สขาเข้า คือ แก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 12 โดยปริมาตร ดุลด้วยไนโตรเจน ทางด้านล่างของหอดูดซับ และป้อนสารละลายจากทางด้านบนของหอดูดซับ โดยมีทิศทางการไหลสวนทางกัน และทำการวัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊สตลอดความสูงของหอดูดซับด้วยอุปกรณ์วัดความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ ทั้งนี้ สมรรถนะการถ่ายโอนมวลสำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอมีนแสดงในรูปแบบของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนโดยมวลรวม และประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งงานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะการถ่ายโอนมวลของสารละลาย AMP-PZ-MEA กับสารละลายเกณฑ์เปรียบเทียบ MEA ความเข้มข้น 5 โมลาร์ ซึ่งเป็นสารละลายเอมีนที่ใช้อย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม อีกทั้ง ศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ต่อสมรรถนะการถ่ายโอนมวล โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสามระดับ เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของพารามิเตอร์หลักและอันตรกิริยาระหว่างพารามิเตอร์และหาภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย AMP-

PZ-MEA โดยพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา ได้แก่ ฟลักซ์ของเหลวขาเข้า (2.11 2.89 และ 3.67 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร·ชั่วโมง⁻¹) ฟลักซ์แก๊สขาเข้า (509.30 594.18 และ 679.06 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร·ชั่วโมง⁻¹) CO₂ loading ของสารละลายขาเข้า (0.25 0.35 และ 0.45 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน) และสัดส่วนความสูงจุดตั้งตัวอย่างต่อความสูงหอดูดซึม (h/h₀) (0.18 0.25 และ 0.32) สำหรับการประเมินศักยภาพของสารละลายเอมีนผสมสามชนิด สารละลายเอมีนที่ดีควรมีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและประสิทธิภาพการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์สูง นอกจากนี้ ยังสร้างสหสัมพันธ์เพื่อทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองสำหรับการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลาย AMP-PZ-MEA ในหอดูดซึมแบบบรรจุด้วย

1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย

การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ การดูดซึม เอมีนผสมสามชนิด สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม และการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสามระดับ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สมรรถนะการถ่ายโอนมวลของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในหอดูดซึมแบบบรรจุโดยใช้สารละลายเอมีนผสมสามชนิด AMP-PZ-MEA ในรูปแบบของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์
2. ภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอมีนผสมสามชนิด AMP-PZ-MEA

1.6 วิธีดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอมีน การผสมกันของสารละลายเอมีนหลายชนิดเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาสมรรถนะของสารละลาย พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบการทดลอง การถ่ายโอนมวลของการดูดซึม รวมทั้งการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม และการสร้างสหสัมพันธ์เพื่อทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม
2. วางแผนและออกแบบการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสามระดับ เพื่อให้ครอบคลุมผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ฟลักซ์ของเหลวขาเข้า ฟลักซ์แก๊สขาเข้า CO₂ loading ของสารละลายขาเข้า และสัดส่วนความสูงของจุดตั้ง

ตัวอย่างต่อความสูงของหอดูดูดซึม (h/h_0) ซึ่งจะแบ่งแต่ละพารามิเตอร์ออกเป็นสามระดับ คือ ค่าต่ำ ค่ากลาง และค่าสูง

3. เตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายเอมีนในหอดูดูดซึมแบบบรรจุ ประกอบด้วย คอลัมน์แก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 30 มิลลิเมตร สูง 1.60 เมตร บรรจุด้วยวัสดุบรรจุแบบจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ Sulzer DX และแผ่นกระจายสารละลาย ปัมป์รีดสายสำหรับสารละลาย ปัมป์หมุนเวียนแก๊ส อุปกรณ์ควบคุมการไหลของแก๊ส อุปกรณ์รับรู้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ เทอร์มอคัปเปิล และชุดไทเทรต
4. เตรียมเอมีนผสมสามชนิด AMP-PZ-MEA ที่มีอัตราส่วนของความเข้มข้นเชิงโมลาร์ 1.5:1.5:3 และสารละลาย MEA ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ โดยใช้ น้ำกลั่นเป็นตัวปรับปริมาตร จากนั้นเติมคาร์บอนไดออกไซด์ลงในสารละลายเพื่อปรับ CO_2 loading ของสารละลายเข้าเท่ากับ 0.25 0.35 และ 0.45 mol CO_2 /mol amine สำหรับสารละลาย AMP-PZ-MEA และ 0.15 0.25 และ 0.35 mol CO_2 /mol amine สำหรับสารละลาย MEA ตามลำดับ ซึ่ง CO_2 loading ของสารละลายสามารถวัดได้จาก Chittick apparatus โดยการไทเทรตตัวอย่างของสารละลายเอมีนกับสารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลาร์ และใช้เมทิลออเรนจ์เป็นอินดิเคเตอร์ ตามวิธีมาตรฐานของ The Association of Official Analytical Chemists (AOAC) [10]
5. ทดลองการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ภายในหอดูดูดซึมแบบบรรจุด้วยสารละลายเอมีน ตามการทดลองที่ออกแบบไว้ โดยทำการวัดอุณหภูมิตลอดความสูงของหอดูดูดซึม จนกระทั่งอุณหภูมิคงที่ ซึ่งถือว่าระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว จากนั้นจึงวัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊สตลอดความสูงของหอดูดูดซึม เพื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเชิงโมลคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊สตลอดความสูงของหอดูดูดซึม แล้วนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม และประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์
6. พิจารณาอิทธิพลของพารามิเตอร์หลักและอันตรกิริยาระหว่างพารามิเตอร์ด้วยการวิเคราะห์เชิงสถิติจากการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในหอดูดูดซึมบรรจุ
7. สร้างสหสัมพันธ์เพื่อทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลาย AMP-PZ-MEA ในหอดูดูดซึมแบบบรรจุวัสดุ จากผลการทดลองที่ได้ โดยใช้การวิเคราะห์ทางสถิติและความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์

แล้วจึงตรวจสอบความแม่นยำของสหสัมพันธ์ด้วยร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสมบูรณ์ (Absolute average deviation percentage, %AAD)

8. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลและเขียนวิทยานิพนธ์

1.7 ลำดับขั้นตอนในการศึกษางานวิจัย

ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอองานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยเนื้อหาต่าง ๆ ดังนี้

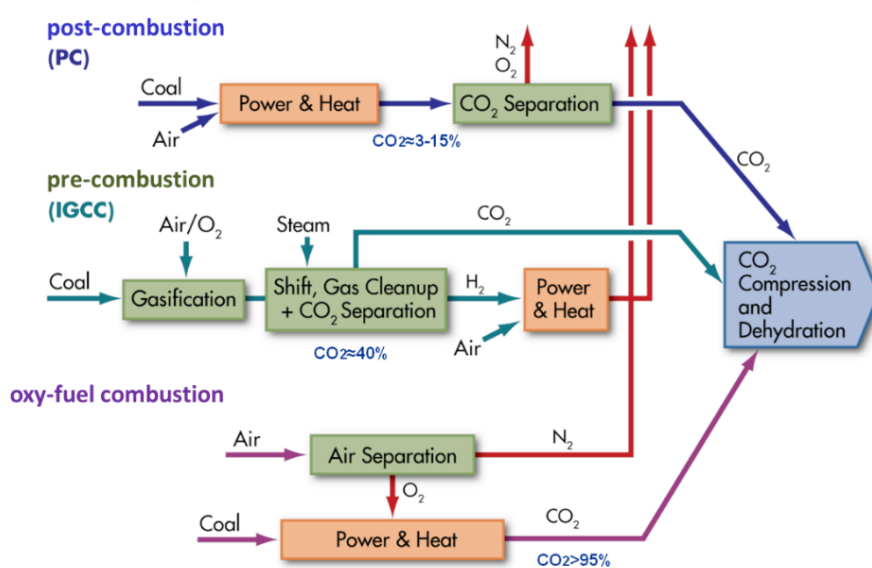
- บทที่ 1** ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ วิธีดำเนินงานวิจัย และลำดับขั้นตอนการนำเสนอองานวิจัย
- บทที่ 2** กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ การดูดซึม การถ่ายโอนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ในหอดูดซึม หอดูดซึมแบบบรรจุ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- บทที่ 3** ข้อมูลงานวิจัยเบื้องต้น สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในงานทดลอง พารามิเตอร์ที่จะศึกษา ขั้นตอนการทดลอง การออกแบบการทดลอง และการสร้างสหสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม
- บทที่ 4** ผลของพารามิเตอร์ต่อสมรรถนะการถ่ายโอนมวลของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ การวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิติ การทำนายสมรรถนะการถ่ายโอนมวลและสมรรถนะของเอมีนผสมสามชนิด AMP-PZ-MEA
- บทที่ 5** สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์

กระบวนการดักจับและกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Capture and Storage: CCS) เป็นหนึ่งในกระบวนการที่ใช้สำหรับลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศและกักเก็บไว้ใต้ดิน และนิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมและโรงไฟฟ้าถ่านหิน กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์แบ่งได้ 3 ประเภท ได้แก่ การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ (Pre-combustion CO₂ capture) การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์ (Oxy-fuel combustion CO₂ capture) และการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ (Post-combustion CO₂ capture) ซึ่งภาพรวมของกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ แสดงดังรูปที่ 2.1 กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้เป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนน้อยที่สุด เนื่องจากเป็นกระบวนการที่สามารถนำไปติดตั้งต่อจากกระบวนการเผาไหม้ที่มีอยู่เดิมได้ โดยไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของเดิม นิยมใช้สำหรับดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในแก๊สเผาไหม้ (Flue gas) [11] โดยเทคโนโลยีที่นำมาใช้สำหรับกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้มีหลายวิธี เช่น การดูดซึม การดูดซับ การแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน และการแยกที่ภาวะเย็นยิ่งยวด ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อด้อยต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1 จากการเปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยของเทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ เห็นได้ว่า การดูดซึมมีประสิทธิภาพดีและนิยมใช้ทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.1 กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ [12]

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อด้อยของเทคโนโลยีสำหรับกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ [13, 14]

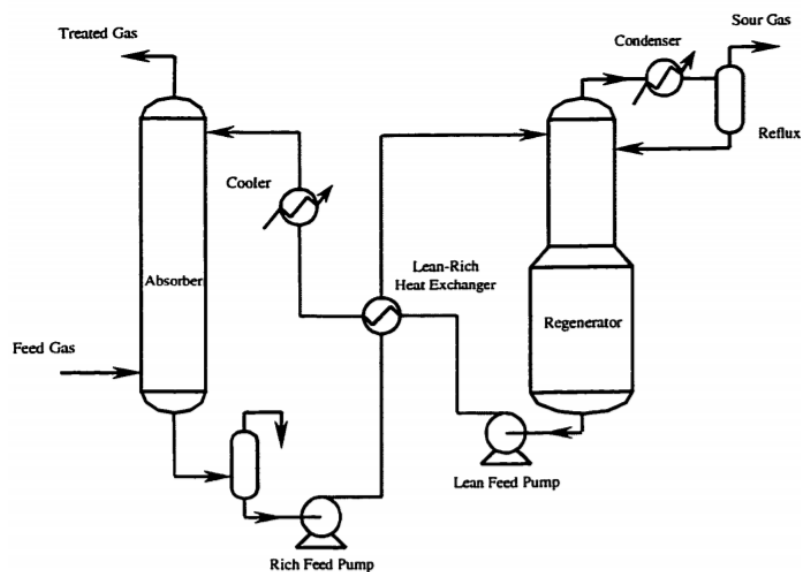
เทคโนโลยี	ข้อดี	ข้อด้อย
การดูดซึม	<ul style="list-style-type: none"> — เป็นเทคโนโลยีที่ง่ายต่อการดำเนินการ ไม่มีความซับซ้อน — สารละลายสามารถวนกลับมาใช้สำหรับดูดซึมได้ใหม่ — ประสิทธิภาพในการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์สูงถึงร้อยละ 90 	<ul style="list-style-type: none"> — ภาระทางร้อนที่ใช้ในการฟื้นฟูสารละลายสูง — สารละลายเอมีนชนิดเดียวมีประสิทธิภาพการดูดซึมต่ำ
การดูดซับ	<ul style="list-style-type: none"> — ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม — ตัวดูดซับสามารถวนกลับมาใช้ได้ใหม่ 	<ul style="list-style-type: none"> — ประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ — ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง
การแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน	<ul style="list-style-type: none"> — ไม่มีการใช้สารเคมี — ใช้พลังงานสำหรับการแยกต่ำ 	<ul style="list-style-type: none"> — ต้นทุนในการผลิตสูง — สามารถเกิดการอุดตันบนผิวเยื่อเลือกผ่าน ทำให้ประสิทธิภาพการแยกต่ำลง
การแยกที่ภาวะเย็นเยือกยิ่ง	<ul style="list-style-type: none"> — ได้คาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์สูง — เป็นผลิตภัณฑ์จากกระบวนการ — ไม่มีการใช้สารเคมี 	<ul style="list-style-type: none"> — ใช้พลังงานสูงในการคงอุณหภูมิให้อยู่ในภาวะเย็นเยือกยิ่ง — ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง

2.2 การดูดซึม (Absorption)

การดูดซึมเป็นหนึ่งในกระบวนการแยกที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เพื่อบำบัดแก๊สปล่อยทิ้งจากกระบวนการทางอุตสาหกรรมให้เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมน้อยลงก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ การดูดซึ่มมักใช้สำหรับดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม อุตสาหกรรมการทำบริสุทธิ์แก๊สธรรมชาติ และอุตสาหกรรมเคมี การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์จะเกิดขึ้นเมื่อวัฏภาคแก๊สสัมผัสกับวัฏภาคของเหลว โมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกดูดซึมไปในสารละลาย โดยมีความต่างของความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ส่วนต่อประสานระหว่างสองวัฏภาค (Concentration gradient) เป็นแรงขับ ประสิทธิภาพการดูดซึมนอกจากจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพการดูดซึม

(Absorbent) แล้ว ยังขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพของสารดูดซึม เช่น สภาพการละลาย ความหนืด และความหนาแน่น เป็นต้น และ ภาวะการดำเนินการ เช่น อัตราการไหลของแก๊ส อัตราการไหลของสารดูดซึม และอุณหภูมิ เป็นต้น การดูดซึมแบ่งออกเป็น การดูดซึมเชิงกายภาพ (Physical absorption) และการดูดซึมเชิงเคมี (Chemical absorption) โดยการดูดซึมเชิงกายภาพสัมพันธ์กับสภาพการละลายของโมเลกุลแก๊สในสารละลายโดยปราศจากปฏิกิริยาเคมี ซึ่งเหมาะกับการทำบริสุทธิ์แก๊สธรรมชาติที่มีความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์สูง แต่การดูดซึมเชิงเคมี จะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างโมเลกุลในวัฏภาคแก๊สและสารละลาย ซึ่งการดูดซึมเชิงเคมีเหมาะกับการบวกรวมที่มีความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิต่ำ เช่น การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จากโรงงานไฟฟ้าถ่านหิน และการทำบริสุทธิ์แก๊สชีวภาพที่ได้จากการหมักโดยไม่ใช้ออกซิเจน เป็นต้น

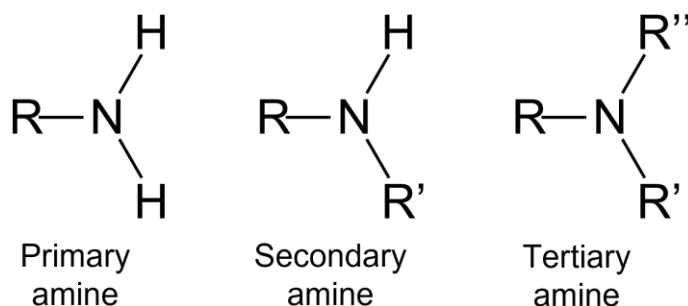
กระบวนการดูดซึมประกอบด้วย การดูดซึมและการฟื้นฟูสารดูดซึม ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยมีหน่วยดำเนินการหลัก คือ หอดูดซึม หอฟื้นฟู อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และปั๊มสำหรับป้อนสารดูดซึมเข้า ซึ่งจะดำเนินการด้วยการให้สารดูดซึมและแก๊สไหลสวนทางกัน โดยเริ่มต้นจากการปั๊มสารดูดซึม (Lean solvent) เข้าสู่ด้านบนหอดูดซึมและป้อนแก๊สที่ต้องการบำบัดเข้าสู่ด้านล่างหอดูดซึม สารดูดซึมที่ผ่านการดูดซึมแล้ว (Rich solvent) จะถูกป้อนสู่หอฟื้นฟู เพื่อฟื้นฟูสารดูดซึมโดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 ถึง 120 องศาเซลเซียส เมื่อทำการฟื้นฟูสารดูดซึมแล้ว สารดูดซึมจะถูกส่งกลับเข้าหอดูดซึมเพื่อวนกลับไปใช้ใหม่ โดยมีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกระแสสารดูดซึมก่อนเข้าหอฟื้นฟูและกระแสสารดูดซึมหลังผ่านการฟื้นฟู เนื่องจากสารดูดซึมที่ผ่านการฟื้นฟูจะมีอุณหภูมิสูง การแลกเปลี่ยนความร้อนดังกล่าว จะช่วยลดภาระทางความร้อนสำหรับการฟื้นฟูสารดูดซึมได้



รูปที่ 2.2 โครงแบบกระบวนการดูดซึม [15]

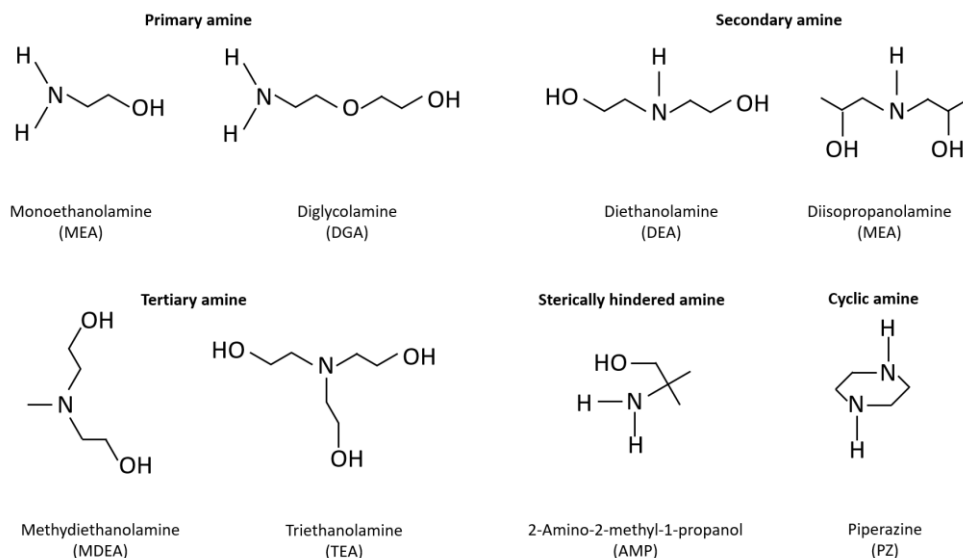
2.2.1. เอมีนสำหรับการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์

การดูดซึมเชิงเคมีมักนิยมใช้กับกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ โดยการดูดซึมเชิงเคมีจะมีความจุการดูดซึมและสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมสูงกว่าการดูดซึมเชิงกายภาพ ทำให้การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์มีประสิทธิภาพสูง ทั้งนี้ การเลือกใช้สารละลายมาเป็นสารดูดซึม (Absorbent) เป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อกระบวนการดูดซึม เนื่องจากสารดูดซึมแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติต่างกัน การเลือกใช้สารดูดซึมเชิงเคมีควรคำนึงถึงสภาพการละลาย ความไวปฏิกิริยา สภาพความเป็นต่าง ความเสถียรของสารดูดซึม และการกัดกร่อน และความเป็นพิษของสารดูดซึม โดยทั่วไปจะเลือกใช้สารดูดซึมสำหรับการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความจุการดูดซึมสูง มีภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูต่ำ และดูดซึมได้เร็ว โดยการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์นิยมใช้สารละลายเอมีน (Amine solution) เป็นสารดูดซึม เนื่องจากสารละลายเอมีนเป็นเบส ส่วนคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สกรด สารละลายเอมีนจะถูกแบ่งตามหมู่แอลคิล (Alkyl, R) ที่เกิดพันธะกับไนโตรเจน โดยเอมีนมี 3 ประเภทหลัก ได้แก่ เอมีนปฐมภูมิ (Primary amine) เอมีนทุติยภูมิ (Secondary amine) และเอมีนตติยภูมิ (Tertiary amine) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของเอมีนประเภทปฐมภูมิ ทุตติยภูมิ และตติยภูมิ

Monoethanolamine (MEA) และ Diglycolamine (DGA) เป็นเอมีนปฐมภูมิ (ดังรูปที่ 2.4) มีความไวปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ในการดูดซึ่มมาก ส่วนเอมีนทุตติยภูมิ เช่น Diaethanolamine (DEA) และ Diisopropanolamine (DIPA) (ดังรูปที่ 2.4) มีความไวปฏิกิริยาน้อยกว่าเอมีนปฐมภูมิ ทั้งเอมีนปฐมภูมิและเอมีนทุตติยภูมิเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ผลผลิตเป็นคาร์บาเมต (Carbamate) ซึ่งมีความร้อนจากปฏิกิริยาการดูดซึ่มสูง ดังนั้น เอมีนทั้งสองประเภทจึงมีภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูสูงตามไปด้วย นอกจากนี้ เอมีนปฐมภูมิและทุตติยภูมิยังมีความจุการดูดซึ่มคาร์บอนไดออกไซด์จำกัดที่ 0.5 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน ส่วนเอมีนตติยภูมิ เช่น Trithanolamine (TEA) และ Methyl-diethanolamine (MDEA) (ดังรูปที่ 2.4) มีความไวปฏิกิริยาดำ เนื่องจากโครงสร้างของเอมีนประเภทนี้เป็นโครงสร้างที่ไม่มีพันธะระหว่างไฮโดรเจนกับไนโตรเจน จึงไม่สามารถเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์โดยตรงได้ ซึ่งผลผลิตที่ได้ไม่ใช่คาร์บาเมต แต่เป็นไบคาร์บอเนต (Bicarbonate: HCO_3^-) โดยความร้อนสำหรับปฏิกิริยาการเกิดไบคาร์บอเนตน้อยกว่าการเกิดคาร์บาเมต ดังนั้น เอมีนตติยภูมิจึงมีภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูต่ำกว่าเอมีนปฐมภูมิและเอมีนทุตติยภูมิ นอกจากนี้ เอมีนตติยภูมิยังมีความจุการดูดซึ่มคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดได้ถึง 1 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน นอกจากเอมีนทั้ง 3 ประเภทดังกล่าวแล้ว ยังมีเอมีนประเภทอื่น ๆ เช่น เอมีนปฐมภูมิที่มีโครงสร้างกีดขวางขนาดใหญ่ (Sterically hindered primary amine) เช่น 2-Amino-2-methyl-1-propanol (AMP) และ เอมีนแบบวง (Cyclical amine) เช่น Piperazine (PZ) เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ทั้งนี้ การเลือกใช้เอมีนที่ความเหมาะสมเป็นสารดูดซึ่ม จะทำให้การดูดซึ่มคาร์บอนไดออกไซด์มีประสิทธิภาพสูงและเกิดความคุ้มค่าในการดำเนินการได้



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของเอมีนแต่ละชนิดสำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

2.2.1.1 สารละลายเอมีนแบบเดี่ยว

กระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในอุตสาหกรรมมักใช้สารดูดซับเป็นเอมีนแบบเดี่ยว เช่น MEA DEA TEA MDEA AMP และ PZ เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง MEA ความเข้มข้น 5 โมลาร์ เนื่องจาก MEA เป็นเอมีนที่เกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ไวและมีราคาถูก แต่มีข้อด้อย คือ ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูสารละลายสูงและกัดกร่อนอุปกรณ์ เนื่องจากภาคอุตสาหกรรมนิยมใช้สารละลาย MEA ความเข้มข้น 5 โมลาร์ จึงมักใช้สารละลายดังกล่าวเป็นสารละลายเกณฑ์เปรียบเทียบ (Benchmarking solution) ส่วน AMP เป็นเอมีนที่มีโครงสร้างกีดขวางเนื่องจากขนาด จึงมีความไวปฏิกิริยาน้อยกว่า MEA แต่โครงสร้างกีดขวางของ AMP ให้ความร้อนในการคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่า MEA [16] นอกจากนี้ คาร์บาเมตที่ไม่เสถียรของ AMP จะเกิดปฏิกิริยาแตกสลายด้วยน้ำและได้ผลผลิตเป็นไบคาร์บอเนตกับเอมีนอิสระ AMP จึงมีความจุการดูดซับสูงสุดได้ถึง 1 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน ทั้งนี้ AMP มักตกตะกอนเป็นของแข็งในสารละลายที่มีความเข้มข้นของ AMP สูง อีกทั้ง AMP เป็นเอมีนโครงสร้างกีดขวางเนื่องจากขนาดคาร์บาเมตของ AMP จึงมีโครงสร้างขนาดใหญ่ และมักตกตะกอนได้เมื่อสารละลายมี CO₂ loading สูง สำหรับ PZ ซึ่งเป็นเอมีนแบบวงที่มีเอมีน 2 หมู่ สามารถเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ทั้งคู่ PZ จึงมีความจุการดูดซับสูง อีกทั้ง PZ ยังเป็นเอมีนที่มีความไวปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์สูงมาก แต่ PZ เป็นของแข็งทำให้สภาพการละลายในน้ำต่ำและอาจเกิดการตกตะกอนที่ความเข้มข้นของ PZ สูง โดยทั่วไปจึงนำ PZ ผสมกับเอมีนชนิดอื่น เช่น AMP และ MDEA เพื่อเพิ่มความจุ

การดูดซึมและอัตราการดูดซึม [17] จากข้อมูลข้างต้น จะเห็นได้ว่า สารละลายเอมีนแบบเดี่ยว แต่ละชนิดมีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกันไป ซึ่งการเลือกเอมีนเพื่อใช้ในการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ ควรพิจารณาจากความจุการดูดซึม ความไวปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ และภาระทางความร้อน ในการฟื้นฟูสารละลาย [18]

2.2.1.2 สารละลายเอมีนแบบผสม

หนึ่งในวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของสารละลายเอมีนที่ใช้ในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ คือ การนำเอมีนมาผสมกันเพื่อรวมจุดเด่นของเอมีนแต่ละชนิดและลดข้อด้อยของเอมีนชนิดหนึ่งลง [3] โดยการเพิ่มอัตราการดูดซึมโดยรวมให้สูงขึ้น ควรเลือกเอมีนที่มีความไวปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์สูง เช่น เอมีนปฐมภูมิหรือเอมีนทุติยภูมิ ส่วนการลดภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูและการเพิ่มความจุการดูดซึม ควรเลือกเอมีนตติยภูมิ ดังนั้น สารละลายเอมีนผสม DEA-MDEA จึงมีความอัตราการดูดซึมโดยรวมสูงกว่าสารละลาย MDEA ซึ่งสัดส่วนความเข้มข้นของเอมีนในสารละลายเอมีนผสมส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซึม โดยการเพิ่มสัดส่วนความเข้มข้นของ DEA จะทำให้จลนพลศาสตร์การดูดซึมของเอมีนผสมสูงขึ้น เนื่องจาก DEA มีความไวปฏิกิริยามากกว่า MDEA [19] นอกจากนี้ การเติม MDEA ลงในสารละลาย MEA ทำให้สารละลายเอมีนผสม MEA-MDEA มีภาระทางร้อนในการฟื้นฟูสารละลายต่ำกว่าสารละลาย MEA และมีความจุการดูดซึมสูงกว่าสารละลาย MEA อีกด้วย [20] การใช้สารละลายเอมีนผสมจึงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ทั้งในเชิงความจุการดูดซึม จลนพลศาสตร์การดูดซึม และ ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูสารละลาย

2.2.2. กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และเอมีน

การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเอมีนเป็นการดูดซึมเชิงเคมี ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างเอมีนกับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยทั่วไปแล้ว เอมีนจะใช้ในรูปของสารละลายในน้ำ ซึ่งปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะได้ผลผลิตเป็นคาร์บาเมตหรือไบคาร์บอเนตขึ้นอยู่กับประเภทของเอมีน ทั้งนี้ กลไกการเกิดปฏิกิริยาสำหรับเอมีนปฐมภูมิและเอมีนทุติยภูมิที่ได้รับการยอมรับ ได้แก่ กลไกสารมัธยันตร์ไอออนชั่วครู่ (Zwitterion intermediate mechanism) และ กลไกสามโมเลกุล (Termolecular mechanism) ส่วนกลไกการแตกสลายด้วยน้ำของคาร์บอนไดออกไซด์จะเป็นกลไกการเกิดปฏิกิริยาสำหรับเอมีนตติยภูมิกับคาร์บอนไดออกไซด์

กลไกสารมัธยันตร์ไอออนขั้วคู่เป็นกลไกที่ประกอบด้วยสองขั้นตอน ในขั้นแรกเป็นปฏิกิริยาระหว่างเอมีนปฐมภูมิหรือเอมีนทุติยภูมิกับคาร์บอนไดออกไซด์ ได้ผลผลิตเป็นสารมัธยันตร์ไอออนขั้วคู่ ($\text{RNH}_2^+\text{COO}^-$ หรือ $\text{R}_1\text{R}_2\text{NH}^+\text{COO}^-$) ดังสมการ (2.1) และ (2.3) ตามลำดับ ขั้นที่สองสารมัธยันตร์ไอออนขั้วคู่จะจ่ายโปรตอนให้เบส (B) ได้ผลผลิตเป็นคาร์บาเมตของเอมีนปฐมภูมิและเอมีนทุติยภูมิ (RNHCOO^- หรือ $\text{R}_1\text{R}_2\text{NHCOO}^-$) ดังสมการ (2.2) และ (2.4) ตามลำดับ [21, 22]



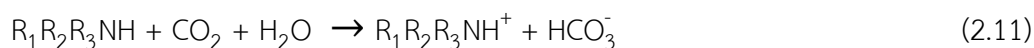
ส่วนกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบสามโมเลกุลนั้น เอมีน คาร์บอนไดออกไซด์ และเบส (B) จะเกิดปฏิกิริยาร่วมกันโดยไม่ผ่านสารมัธยันตร์ ได้ผลผลิตเป็นคาร์บาเมตของเอมีนและโปรตอนเนตของเบสสำหรับเอมีนปฐมภูมิและเอมีนทุติยภูมิ ดังสมการ (2.5) และ (2.6) ตามลำดับ [23]



สำหรับเบส (B) ในสมการ (2.1) ถึง (2.6) สามารถเป็นได้ทั้ง H_2O OH^- HCO_3^- CO_3^{2-} และเอมีนปฐมภูมิหรือเอมีนทุติยภูมิ ซึ่งโปรตอนเนตของเบส (BH^+) ที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับเอมีนได้ ดังสมการ (2.7) และ (2.8) เมื่อรวมสมการของกลไกสารมัธยันตร์ไอออนขั้วคู่หรือกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบสามโมเลกุลกับการเกิดปฏิกิริยาของโปรตอนเนต ดังสมการ (2.9) และ (2.10) ทำให้ผลลัพธ์ของกลไกการเกิดปฏิกิริยาสำหรับเอมีนปฐมภูมิและทุติยภูมินั้นจะต้องใช้เอมีน 2 โมเลกุลต่อคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมเลกุล เอมีนปฐมภูมิและทุติยภูมิจึงมีความจุของการดูดซึมสูงสุดที่ 0.5 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน

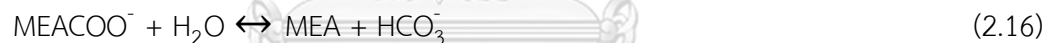


กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเอมีนตติยภูมิและคาร์บอนไดออกไซด์ คือ กลไกการแตกสลายด้วยน้ำ ซึ่งได้ผลิตเป็นไบคาร์บอเนตและโปรตอนเนตของเอมีนตติยภูมิ ดังสมการ (2.11) เนื่องจากเอมีนตติยภูมิไม่สามารถเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ได้โดยตรง จึงทำหน้าที่เป็นเบสสำหรับปฏิกิริยาการแตกสลายด้วยน้ำของคาร์บอนไดออกไซด์ [24]



การเกิดปฏิกิริยาของเอมีนตติยภูมิกับคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำมีสัดส่วนเชิงโมลระหว่างเอมีนตติยภูมิและน้ำ เป็น หนึ่ง กล่าวคือ ความจุการดูดซึมของเอมีนตติยภูมิมีค่าสูงสุดตามทฤษฎีได้ถึง 1 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน

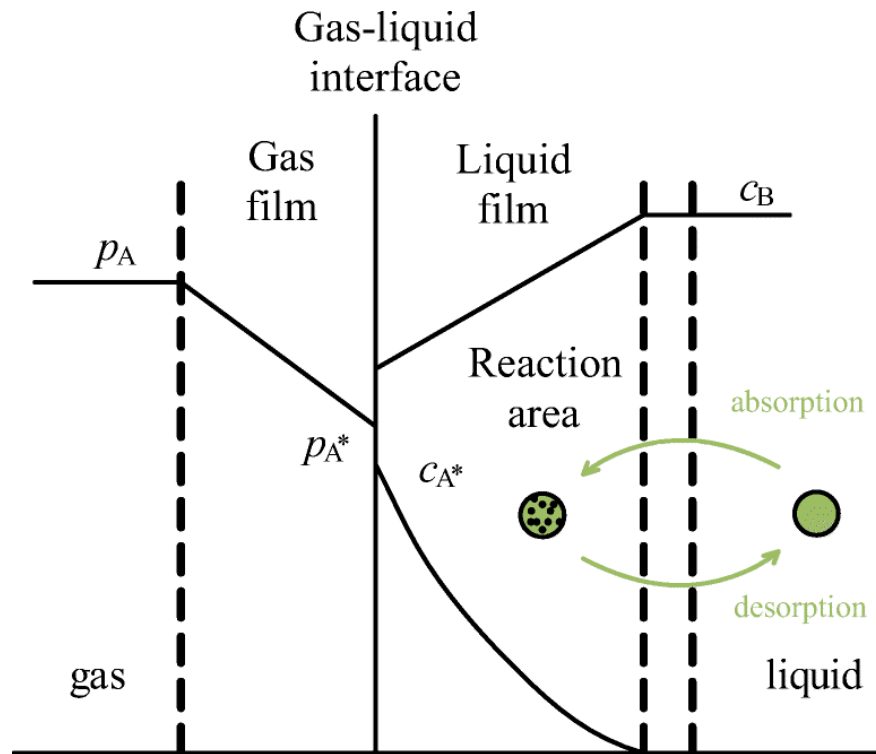
สำหรับกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่ทั้งหมดของเอมีนผสมสามชนิด AMP-PZ-MEA กับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีเบสเกิดขึ้นในปฏิกิริยา เป็นไปดังสมการต่อไปนี้ [9]



โดยสมการ (2.12) ถึง (2.14) เป็นกลไกปฏิกิริยาการละลายของน้ำกับคาร์บอนไดออกไซด์ สมการ (2.15) เป็นกลไกหลักที่เกิดขึ้นของ MEA เนื่องจาก MEA เป็นเอมีนที่เกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์แล้วได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บาเมตที่มีความเสถียร สมการ (2.16) และ (2.17) เป็นปฏิกิริยาการแตกสลายด้วยน้ำจึงมีโอกาสน้อยมากที่จะเกิดขึ้น แต่จะเกิดขึ้นเมื่อระบบมีความดันสูง ทำให้ความจุของการดูดซึมของ MEA มีค่ามากกว่า 0.5 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน สมการ (2.18) ถึง (2.20) เป็นกลไกการเกิดปฏิกิริยาของ AMP และจากโครงสร้างที่ไม่เสถียร จึงทำให้คาร์บาเมตและโปรตอนของ AMP เกิดปฏิกิริยาการแตกสลายด้วยน้ำ ทำให้ความจุการดูดซึมสูงสุดได้ถึง 1 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน ส่วนสมการ (2.21) ถึง (2.26) เป็นกลไกการเกิดปฏิกิริยาของ PZ โดย PZ จะเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์โดยมีสัดส่วนเชิงโมลระหว่างเอมีนกับคาร์บอนไดออกไซด์เป็นหนึ่งในสอง ตามสมการ (2.21) เนื่องจากสามารถเกิดปฏิกิริยาได้กับเอมีนทั้ง 2 หมู่

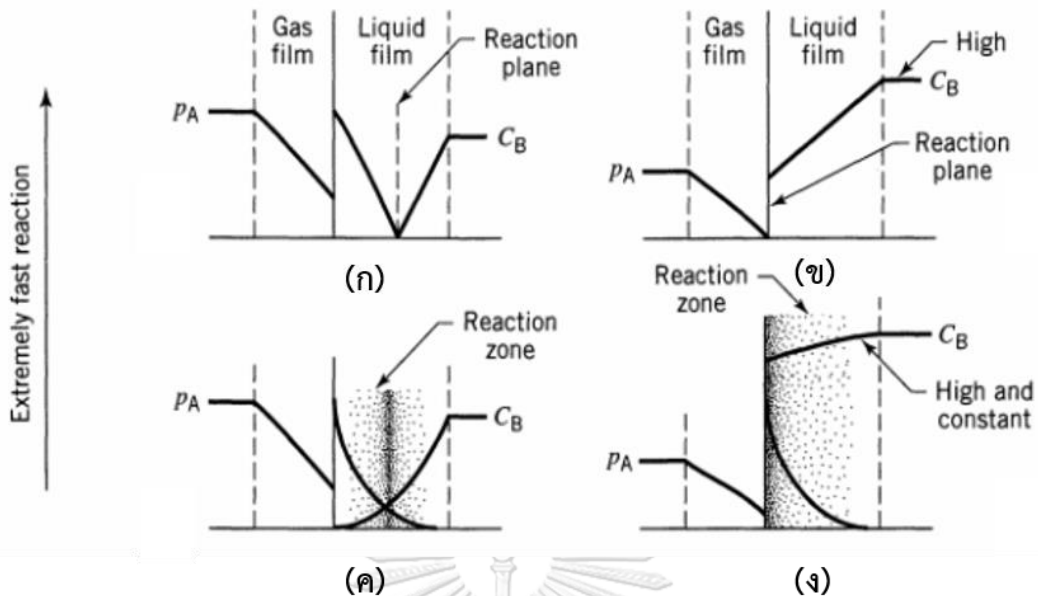
2.3 การถ่ายโอนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ในหลอดซึม

การถ่ายโอนมวลเป็นปรากฏการณ์ที่ใช้อธิบายการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากการดูดซึมเป็นกระบวนการที่มีการถ่ายโอนโมเลกุลจากวัฏภาคแก๊สไปยังวัฏภาคของเหลวผ่านพื้นที่ต่อประสานระหว่างสองวัฏภาค ซึ่งนิยมนำทฤษฎีสองฟิล์ม (Two-film theory) มาเป็นแบบจำลองที่แสดงถึงกลไกการถ่ายโอนมวล โดยพื้นที่ต่อประสานระหว่างสองวัฏภาคแบ่งออกเป็น 2 ส่วนที่ติดกัน ได้แก่ ฟิล์มแก๊ส (Gas film) และ ฟิล์มของเหลว (Liquid film) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยสมมติให้วัฏภาคแก๊สและของเหลวมีการแยกออกจากกันและมีสมดุลมวลทั้งขาเข้าและออกระหว่างพื้นที่ส่วนต่อประสานระหว่างสองวัฏภาค การถ่ายโอนมวลจะเกิดขึ้นเมื่อมีความแตกต่างของความเข้มข้นเป็นแรงขับ (Driving force) โดยจะเกิดการแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์จะเกิดการดูดซึมโมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์โดยเอมีนในวัฏภาคของเหลวผ่านส่วนต่อประสานระหว่างวัฏภาคแก๊สกับของเหลว (Gas-liquid interface) ซึ่งในฟิล์มแก๊สจะเกิดการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์ไปยังส่วนต่อประสานระหว่างวัฏภาค เนื่องจากมีความแตกต่างของความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างวัฏภาคแก๊สกับส่วนต่อประสานระหว่างวัฏภาคเป็นแรงขับ จากนั้นโมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์จะแพร่จากส่วนต่อประสานระหว่างวัฏภาคไปยังวัฏภาคของเหลว ในวัฏภาคของเหลวจะมีความแตกต่างของความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแรงขับให้เกิดการแพร่ (Diffusion)



รูปที่ 2.5 แบบจำลองทฤษฎีสองฟิล์ม [25]

การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอมีนเป็นการดูดซึมเชิงเคมีที่มีปฏิกิริยาเคมีร่วมด้วย โดยปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์กับสารละลายเอมีนจะเกิดขึ้นในฟิล์มของเหลวเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ส่วนในวัฏภาคแก๊ส ปฏิกิริยาการถ่ายโอนจะเหมือนกับการดูดซึมเชิงกายภาพ กล่าวคือ คาร์บอนไดออกไซด์จะแพร่มายังส่วนต่อประสานระหว่างวัฏภาค ซึ่งความไวของการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นตัวกำหนดพื้นที่ของการเกิดปฏิกิริยาในระบบนั้น ๆ หากเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในบัดดล (Instantaneous reaction) พื้นที่ของการเกิดปฏิกิริยาจะอยู่ใกล้กับส่วนต่อประสานระหว่างวัฏภาค ดังแสดงในรูป 2.6 (ก) และ 2.6 (ข) ถ้าเป็นปฏิกิริยาที่มีความไวสูง เช่น ปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับสารละลาย MEA พื้นที่ของการเกิดปฏิกิริยาจะอยู่ในช่วงระหว่างส่วนต่อประสานและขอบของฟิล์มของเหลว ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ค) และ 2.6 (ง) การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอมีนเป็นปฏิกิริยาแบบย้อนกลับได้ สารละลายเอมีนจึงสามารถนำไปฟื้นฟูและวนกลับมาใช้ใหม่ได้ การดูดซึมอาจทำเป็นระบบปิดโดยสมบูรณ์ได้ หากไม่เกิดการสูญเสียของสารละลายเอมีนในกระบวนการ



รูปที่ 2.6 แบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาของการดูดซึมทางเคมีในรูปแบบต่าง ๆ [26]

(ก) การดูดซึมที่ปฏิกิริยาเกิดขึ้นในบัคดล และมีความเข้มข้นขององค์ประกอบ B ต่ำ

(ข) การดูดซึมที่ปฏิกิริยาเกิดขึ้นในบัคดล และมีความเข้มข้นขององค์ประกอบ B สูง

(ค) การดูดซึมที่ปฏิกิริยามีความไวสูง และมีความเข้มข้นขององค์ประกอบ B ต่ำ

(ง) การดูดซึมที่ปฏิกิริยามีความไวสูง และมีความเข้มข้นขององค์ประกอบ B สูง

สำหรับการดูดซึมเชิงกายภาพ อัตราการถ่ายโอนมวลจะขึ้นอยู่กับแรงขับและความต้านทานของการถ่ายโอนมวล ซึ่งอัตราการถ่ายโอนของการดูดซึมจะแสดงในรูปแบบของฟลักซ์การถ่ายโอนมวล สำหรับการถ่ายโอนในวัฏภาคแก๊ส แรงขับของการถ่ายโอนจะเกิดจากความแตกต่างของความดันย่อยของตัวละลายในวัฏภาคแก๊สและในส่วนต่อประสาน สมการ (2.27) แสดงความสัมพันธ์ของการถ่ายโอนมวลของตัวละลาย A จากวัฏภาคแก๊สไปยังส่วนต่อประสานระหว่างสองวัฏภาค

$$N_A = k_G(p_{A,G} - p_{A,I}) \quad (2.27)$$

เมื่อ N_A คือ ฟลักซ์การถ่ายโอนมวลของตัวละลาย A (กิโลโมลต่อตารางเมตร·วินาที⁻¹)

k_G คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคแก๊ส
(กิโลโมลต่อตารางเมตร·วินาที⁻¹·กิโลปาสกาล⁻¹)

$p_{A,G}$ คือ ความดันย่อยของตัวละลาย A ในวัฏภาคแก๊ส (กิโลปาสกาล)

$p_{A,I}$ คือ ความดันย่อยของตัวละลาย A ที่ส่วนต่อประสานระหว่างสองวัฏภาค
(กิโลปาสกาล)

โดยที่ความดันย่อยของตัวละลาย คือ ผลคูณระหว่างความดันรวมของระบบ (P) กับสัดส่วนเชิงโมลของตัวละลายในวัฏภาคแก๊ส (y_A) ดังสมการ (2.28)

$$p_A = y_A P \quad (2.28)$$

เมื่อนำสมการ (2.28) แทนลงในสมการ (2.27) พบว่า การถ่ายโอนมวลของตัวละลาย A จากวัฏภาคแก๊สไปยังส่วนต่อประสาน เขียนได้ ดังสมการ (2.29) หรือ (2.30)

$$N_A = k_G P (y_{A,G} - y_{A,i}) \quad (2.29)$$

$$N_A = k'_G (y_{A,G} - y_{A,i}) \quad (2.30)$$

เมื่อ $y_{A,G}$ คือ สัดส่วนเชิงโมลของตัวละลาย A ในวัฏภาคแก๊ส (กิโลโมลต่อกิโลโมล)

$y_{A,i}$ คือ สัดส่วนเชิงโมลของตัวละลาย A ในวัฏภาคแก๊สที่ส่วนต่อประสานระหว่างสองวัฏภาค (กิโลโมลต่อกิโลโมล)

k'_G คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคแก๊ส, $k_G P$
(กิโลโมลต่อตารางเมตร·วินาที⁻¹)

สำหรับวัฏภาคของเหลว สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลด้านของเหลว (k_L) มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของสารละลาย เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะส่งผลให้สารละลายมีความหนืดลดลง ซึ่งส่งผลให้อัตราการแพร่เพิ่มขึ้น ดังนั้น อุณหภูมิที่เหมาะสมจะช่วยให้การดูดซึมมีประสิทธิภาพดี [27] แรงขับเคลื่อนสำหรับการถ่ายโอนในของวัฏภาคของเหลว คือ ความแตกต่างของความเข้มข้นของตัวละลาย A ในฟิล์มของเหลวที่ส่วนต่อประสานระหว่างสองวัฏภาคและในวัฏภาคของเหลว โดยพลักซ์การถ่ายโอนมวลของตัวละลาย A จากฟิล์มของเหลวไปยังวัฏภาคของเหลว เขียนได้ดังสมการ (2.31) หรือ (2.32) [28]

$$N_A = k_L (c_{A,i} - c_{A,L}) \quad (2.31)$$

$$N_A = k'_L (x_{A,i} - x_{A,L}) \quad (2.32)$$

เมื่อ k_L คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคของเหลว (เมตรต่อวินาที)

$c_{A,i}$ คือ ความเข้มข้นของตัวละลาย A ที่ส่วนต่อประสานระหว่างสองวัฏภาคในวัฏภาคของเหลว (กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร)

$c_{A,L}$ คือ ความเข้มข้นของตัวละลาย A ในวัฏภาคของเหลว
(กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร)

- k'_L คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคของเหลว, k_L
(กิโลโมลต่อตารางเมตร·วินาที⁻¹)
- $x_{A,i}$ คือ สัดส่วนเชิงโมลของของตัวละลาย A ที่ส่วนต่อประสานระหว่างสองวัฏภาค
ในวัฏภาคของเหลว (กิโลโมลต่อกิโลโมล)
- $x_{A,L}$ คือ สัดส่วนเชิงโมลของตัวละลาย A ในวัฏภาคของเหลว (กิโลโมลต่อกิโลโมล)

การวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลทั้งวัฏภาคแก๊สและวัฏภาคของเหลว (k'_G และ k'_L) และ พื้นที่ผิวสัมผัสของส่วนต่อประสานระหว่างวัฏภาคทำได้ยาก เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสองวัฏภาคภายในหอคูดซึมจะเปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลของแก๊สและอัตราการไหลของสารละลาย จึงนำค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมสำหรับวัฏภาคแก๊สและวัฏภาคของเหลว (K_G และ K_L) มาใช้แทนในสมการการถ่ายโอนมวล อีกทั้ง การถ่ายโอนมวลของการดูดซึมระหว่างสองวัฏภาคสมดุลกัน ดังนั้น ฟลักซ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคแก๊สและในวัฏภาคของเหลวแสดงได้ ดังสมการ (2.33) และ (2.34) ตามลำดับ [28]

$$N_A = K_G P(y_{A,G} - y_A^*) = K_L (c_A^* - c_{A,L}) \quad (2.33)$$

$$N_A = K'_G (y_{A,G} - y_A^*) = K'_L (x_A^* - x_{A,L}) \quad (2.34)$$

- เมื่อ K_G คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมในวัฏภาคแก๊ส
(กิโลโมลต่อตารางเมตร·วินาที⁻¹·กิโลปาสกาล⁻¹)
- K_L คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมในวัฏภาคของเหลว (เมตรต่อวินาที)
- K'_G คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมในวัฏภาคแก๊ส
(กิโลโมลต่อตารางเมตร·วินาที⁻¹)
- K'_L คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมในวัฏภาคของเหลว
(กิโลโมลต่อตารางเมตร·วินาที⁻¹)
- y_A^* คือ สัดส่วนเชิงโมลของตัวละลาย A ในวัฏภาคแก๊ส ที่ภาวะสมดุล
(กิโลโมลต่อกิโลโมล)
- c_A^* คือ ความเข้มข้นของตัวละลาย A ในวัฏภาคของเหลว ที่ภาวะสมดุล
(กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร)
- x_A^* คือ สัดส่วนเชิงโมลของตัวละลาย A ในวัฏภาคของเหลว ที่ภาวะสมดุล
(กิโลโมลต่อกิโลโมล)

โดยสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแต่ละวัฏภาคจะขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล ทั้งของวัฏภาคแก๊สและวัฏภาคของเหลว จากทฤษฎีสองฟิล์ม พบว่า ความต้านทานการถ่ายโอนมวล ประกอบด้วยความต้านทานการถ่ายโอนมวลของวัฏภาคแก๊สและวัฏภาคของเหลว ซึ่งความต้านทานการถ่ายโอนมวลรวมของทั้งสองวัฏภาคขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล ของแต่ละวัฏภาคนั้น โดยความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเป็นดังสมการ (2.35) และ (2.36)

$$\frac{1}{K_G a_v} = \frac{1}{k_G a_v} + \frac{1}{H k_L a_v} \quad (2.35)$$

$$\frac{1}{K_L a_v} = \frac{1}{k_G a_v} + \frac{1}{k_L a_v} \quad (2.36)$$

เมื่อ a_v คือ พื้นที่สัมผัสระหว่างสองวัฏภาคต่อหน่วยปริมาตรวัสดุบรรจุ (ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร)

H คือ ค่าคงตัวของเฮนรี (กิโบลต่อลูกบาศก์เมตร-กิโบลปราศาล⁻¹)

เนื่องจากการวัดพื้นที่การถ่ายโอนที่ส่วนต่อประสานระหว่างวัฏภาคที่แท้จริงเป็นไปได้ยาก จึงจำเป็นต้องใช้พื้นที่ผิวสัมผัสของสองวัฏภาคบนวัสดุบรรจุเพื่อคาดคะเนพื้นที่สัมผัสในกระบวนการ ดูดซึม ส่วนกฎของเฮนรีมีความเกี่ยวข้องกับการละลายของตัวละลายจากวัฏภาคแก๊สไปยังวัฏภาค ของเหลว โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการ (2.37) และ (2.38)

$$y_A = H' x_A \quad (2.37)$$

$$H' = \frac{H}{P} \quad (2.38)$$

เมื่อ y_A คือ สัดส่วนเชิงโมลของตัวละลาย A ในวัฏภาคแก๊ส (กิโบลต่อกิโบล)

H' คือ ค่าคงตัวของเฮนรี (ความดันบรรยากาศต่อความดันบรรยากาศ)

x_A คือ สัดส่วนเชิงโมลของตัวละลาย A ในวัฏภาคของเหลว (กิโบลต่อกิโบล)

H คือ ค่าคงตัวของเฮนรี (ความดันบรรยากาศ)

P คือ ความดันรวมของระบบ (ความดันบรรยากาศ)

หลังจากตัวละลาย A ผ่านส่วนประสานระหว่างวัฏภาคไปยังส่วนของฟิล์มของเหลวแล้ว จะทำให้ความเข้มข้นของตัวละลาย A ในวัฏภาคของเหลวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงขับในวัฏภาคของเหลว สำหรับการดูดซึมเชิงกายภาพลดลง แต่สำหรับการดูดซึมเชิงเคมี ตัวละลาย A จะเกิดปฏิกิริยากับสารดูดซึม B ในฟิล์มของเหลว ส่งผลให้ความเข้มข้นของตัวละลาย A ในวัฏภาคของเหลวไม่เพิ่มขึ้น

ดังนั้น แรงขับเคลื่อนของการดูดซึมเชิงเคมีจึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากตอนเริ่มต้น เนื่องจากความเสถียรของแรงขับเคลื่อนดังกล่าว จึงทำให้พลັกซ์การถ่ายโอนมวลของการดูดซึมเชิงเคมีสูงกว่าการดูดซึมเชิงกายภาพ ซึ่งพิจารณาได้จาก Enhancement factor ที่ใช้แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของพลັกซ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคของเหลวสำหรับการดูดซึมทางเคมี โดยสมการ (2.31) สามารถนำมาคำนวณ Enhancement factor จากสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคของเหลวจากการดูดซึมที่เกิดปฏิกิริยาเคมีและไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี ดังสมการ (2.39)

$$N_A = k_L(c_{A,I} - c_{A,L}) = I k_L^o(c_{A,I} - c_{A,L}) \quad (2.39)$$

เมื่อ I คือ Enhancement factor

k_L^o คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคของเหลวสำหรับการดูดซึมเชิงกายภาพ หรือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคของเหลวสำหรับการดูดซึมที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี (เมตรต่อวินาที)

การดูดซึมที่เกิดปฏิกิริยาเคมีจะมีพลັกซ์การถ่ายโอนมวลมากกว่ากระบวนการที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี เมื่อพิจารณาสมการ (2.39) พบว่า Enhancement factor คือ อัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคของเหลวที่เกิดปฏิกิริยาเคมีต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคของเหลวที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี ดังแสดงในสมการ (2.40) ดังนั้น Enhancement factor จึงมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับหนึ่งเสมอ [28, 29]

$$I = \frac{N_A}{k_L^o(c_{A,I} - c_{A,G})} = \frac{k_L}{k_L^o} \geq 1 \quad (2.40)$$

นอกจากนี้ เมื่อนำ Enhancement factor ไปพิจารณาร่วมกับความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม จะได้สมการ (2.41) และ (2.42)

$$\frac{1}{K_G a_v} = \frac{1}{k_G a_v} + \frac{1}{H k_L^o a_v} \quad (2.41)$$

$$\frac{1}{K_L a_v} = \frac{1}{k_G a_v} + \frac{1}{k_L^o a_v} \quad (2.42)$$

2.3.1. การดูดซึมที่ควบคุมโดยฟิล์มของเหลวและโดยฟิล์มแก๊ส

จากทฤษฎีสองฟิล์ม กระบวนการดูดซึมแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ กระบวนการที่ควบคุมโดยฟิล์มของเหลว (Liquid-film controlled process) และ กระบวนการที่ควบคุมโดยฟิล์มแก๊ส (Gas-film controlled process) ซึ่งกระบวนการที่ควบคุมโดยฟิล์มของเหลวจะมีสัมประสิทธิ์

การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคของเหลว (k_L) น้อยกว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคแก๊ส (k_G) กล่าวคือ ความต้านทานการถ่ายโอนในฟิล์มแก๊สมีผลต่อความต้านทานการถ่ายโอนมวลรวมน้อย ส่วนกระบวนการที่ควบคุมโดยฟิล์มแก๊สจะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนในวัฏภาคของเหลว (k_L) สูงกว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนในวัฏภาคแก๊ส (k_G) กล่าวคือ ความต้านทานการถ่ายโอนมวลในฟิล์มแก๊สมีผลต่อความต้านทานการถ่ายโอนมวลรวมมาก [15] โดยลักษณะทั่วไปของทั้งสองกระบวนการแสดงในตารางที่ 2.2 ทั้งนี้ การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอมีนมักเป็นกระบวนการที่ควบคุมโดยฟิล์มของเหลว เนื่องจากอัตราการไหลของเอมีนส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม แต่อัตราการไหลของแก๊สส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมน้อยมาก [30, 31] อย่างไรก็ตาม การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์อาจเป็นกระบวนการควบคุมโดยฟิล์มแก๊สได้ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับภาวะดำเนินการและลักษณะทางกายภาพของสารละลาย [15]

ตารางที่ 2.2 ลักษณะของกระบวนการที่ควบคุมโดยฟิล์มของเหลวและโดยฟิล์มแก๊ส [27]

กระบวนการที่ควบคุมใน ชั้นฟิล์มของเหลว	กระบวนการที่ควบคุมใน ชั้นฟิล์มแก๊ส
— ความสามารถในการละลาย ของตัวละลายต่ำ	— ตัวละลายสามารถละลายได้ดีใน สารละลาย
— ตัวละลายเกิดปฏิกิริยากับ ส่วนประกอบในวัฏภาค ของเหลวช้า	— ตัวละลายเกิดปฏิกิริยากับส่วนประกอบ ในวัฏภาคของเหลวได้อย่างรวดเร็ว
— K_G ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของ สารละลายเท่านั้น	— K_G ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของสารละลาย และอัตราการไหลของแก๊ส
— K_G เพิ่มเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ	— โดยทั่วไปจะมีค่า K_G สูงกว่ากระบวนการ ที่ควบคุมโดยฟิล์มของเหลว

2.3.2. สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม

สมรรถนะการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในหอดูดซับแสดงในรูปของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมในวัฏภาคแก๊ส ($K_G a_v$) เนื่องจากพื้นที่สัมผัสระหว่างสองวัฏภาคไม่สามารถวัดค่าที่แท้จริงได้ ซึ่ง $K_G a_v$ สามารถหาได้จากการทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในหอดูดซับ นอกจากนี้ $K_G a_v$ ยังเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับออกแบบความสูงของหอดูดซับอีกด้วย โดยความสูงของหอดูดซับ คือ

ผลคูณระหว่างความสูงของหน่วยการถ่ายโอน (Height of transfer unit, HTU) และ จำนวนหน่วยของการถ่ายโอน (Number of transfer unit, NTU) ดังสมการ (2.43) และ (2.44) [15]

$$Z = \text{HTU} \times \text{NTU} \quad (2.43)$$

$$Z = \left(\frac{G_I}{K_G a_v P} \right) \times \left(\int_{y_{A,\text{in}}}^{y_{A,\text{out}}} \frac{dy_A}{(1-y_A)^2 (y_A - y_A^*)} \right) \quad (2.44)$$

- เมื่อ Z คือ ความสูงของหอดูดซึม (เมตร)
 G_I คือ อัตราการไหลของแก๊สเฉื่อย (กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร·ชั่วโมง⁻¹)
 P คือ ความดันภายในหอดูดซึม (กิโลปาสคาล)
 $K_G a_v$ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม (กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร·ชั่วโมง⁻¹·กิโลปาสคาล⁻¹)

สำหรับความสูงของหอดูดซึม dZ เขียนได้ ดังสมการ (2.45)

$$dZ = \left(\frac{G_I}{K_G a_v P} \right) \times \left(\frac{dy_A}{(1-y_A)^2 (y_A - y_A^*)} \right) \quad (2.45)$$

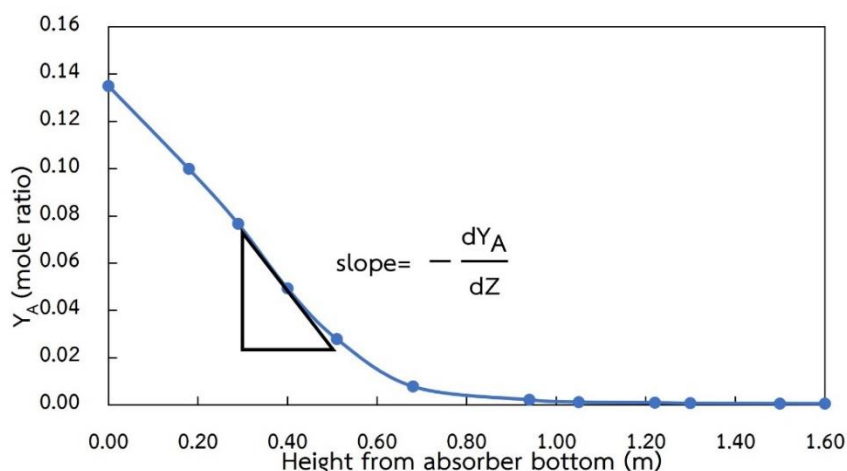
ดังนั้น สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมจึงคำนวณได้ จากสมการ (2.46) [15]

$$K_G a_v = \left(\frac{G_I}{P(y_{A,G} - y_A^*)} \right) \left(\frac{dy_{A,G}}{dZ} \right) \quad (2.46)$$

โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวละลาย A ตามความสูงของหอดูดซึม $\left(\frac{dy_{A,G}}{dZ} \right)$ เป็นข้อมูลที่ได้จากการทดลองการดูดซึมในหอดูดซึม จากนั้นสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเชิงโมลของตัวละลาย A ในวัฏภาคแก๊ส (Y_A) ตลอดความสูงของหอดูดซึม ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งอัตราส่วนเชิงโมลของตัวละลาย A สามารถหาได้จากสัดส่วนเชิงโมลของตัวละลาย A ในวัฏภาคแก๊ส (y_A) ดังสมการ (2.47) สำหรับสัดส่วนเชิงโมลของตัวละลาย A ในวัฏภาคแก๊สที่ส่วนต่อประสานระหว่างวัฏภาค (y_A^*) ของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอมีนจะมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับ y_A และเกือบเป็นศูนย์ [31]

$$y_A = \frac{Y_A}{1+Y_A} \quad (2.47)$$

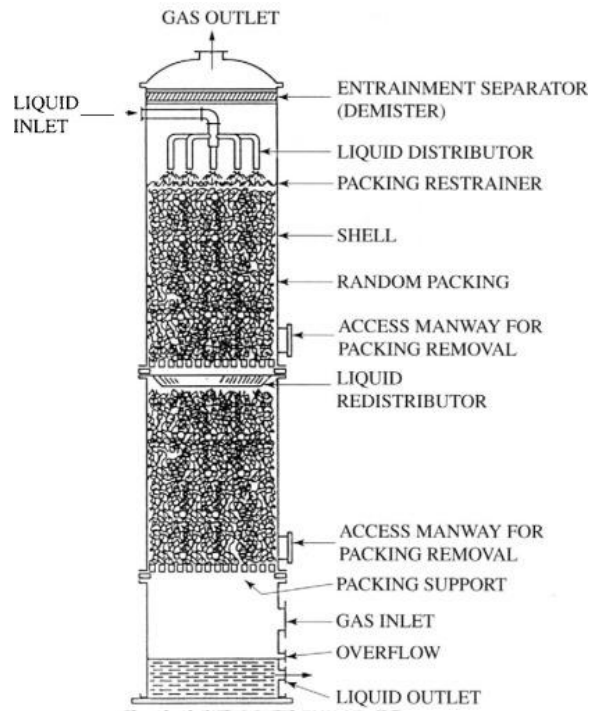
- เมื่อ y_A คือ สัดส่วนเชิงโมลของตัวละลาย A ในวัฏภาคแก๊ส (กิโลโมลต่อกิโลโมล)
 Y_A คือ อัตราส่วนเชิงโมลของตัวละลาย A ในวัฏภาคแก๊ส (กิโลโมลต่อกิโลโมล)



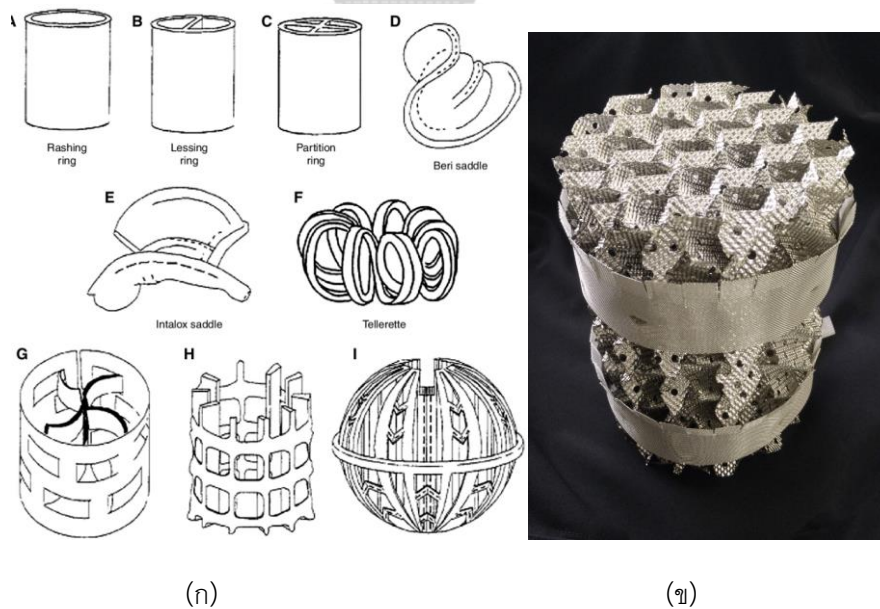
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเชิงโมลของตัวละลาย A ตลอดความสูงของหอดูดซึม

2.4 หอดูดซึมแบบบรรจุ (Packed column)

หนึ่งในตัวแปรที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลสำหรับการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอมีน คือ พื้นที่ส่วนต่อประสานระหว่างวัฏภาคแก๊สและวัฏภาคของเหลว ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการดูดซึม หากพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสองวัฏภาคเพิ่มขึ้นจะทำให้มีการถ่ายโอนมวลดียิ่งขึ้น จึงมีการนำหอดูดซึมแบบบรรจุมาใช้ทดแทนหอดูดซึมแบบถาด เนื่องจากวัสดุบรรจุในหอดูดซึมมีประสิทธิภาพในการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับการดูดซึม โดยวัสดุบรรจุจะช่วยกระจายสารละลายเอมีนที่ไหลมาจากด้านบนของหอดูดซึมไปบนวัสดุบรรจุเพื่อสัมผัสกับแก๊สที่เข้ามาทางด้านล่างหอดูดซึม ดังรูปที่ 2.8 ทำให้คาร์บอนไดออกไซด์ถูกดูดซึมต่อปริมาตรของวัสดุบรรจุสูงขึ้น ซึ่งวัสดุบรรจุที่ดีควรมีพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรสูง เพื่อใช้สำหรับถ่ายโอนมวลของแก๊สไปยังของเหลว ซึ่งวัสดุบรรจุถูกแบ่งตามการจัดเรียงตัวในหอดูดซึมได้ 2 แบบ คือ วัสดุบรรจุแบบจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ (Random packing) และวัสดุบรรจุแบบจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ (Structural packing) โดยวัสดุบรรจุแบบจัดเรียงตัวเป็นระเบียบจะทำให้สมรรถนะการดูดซึมสูงกว่าแบบจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ [15] เนื่องจากวัสดุบรรจุแบบจัดเรียงตัวเป็นระเบียบจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง ทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายโอนมวลสูงขึ้นด้วยรูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่างวัสดุบรรจุแบบต่าง ๆ



รูปที่ 2.8 หอดูดซึมแบบบรรจุ [32]



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.9 วัสดุบรรจุ (ก) แบบจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ (ข) แบบจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ [33, 34]

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Hadri และคณะ [35] ศึกษาศักยภาพของสารละลายเอมีนแบบเดี่ยว (AMP และ PZ) สำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในเชิงความจุการดูดซับและความร้อนจากปฏิกิริยาการดูดซับ เปรียบเทียบกับสารละลายเกณฑ์เปรียบเทียบ MEA ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยมวล ที่ความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 15 โดยปริมาตร และ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ผลการศึกษา แสดงดังตารางที่ 2.3 ซึ่งพบว่า สารละลาย AMP และ PZ ที่ความเข้มข้นเดียวกับ MEA มีความจุการดูดซับใกล้เคียงกันและสูงกว่าสารละลาย MEA กว่าร้อยละ 73 ทั้งนี้ เป็นที่ทราบโดยทั่วไปว่า ปริมาณความร้อนจากปฏิกิริยาการดูดซับเป็นความร้อนที่ใช้สำหรับปฏิกิริยาคายกลับ ซึ่งความร้อนดังกล่าวเป็นหนึ่งในความร้อนองค์ประกอบของภาระทางความร้อนที่ใช้ในการฟื้นฟูสารละลาย โดยเมื่อความร้อนจากปฏิกิริยาการดูดซับสูง จึงต้องใช้ความร้อนสำหรับปฏิกิริยาคายกลับสูงตามไปด้วย ซึ่งอาจส่งผลให้ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูสารละลายสูงขึ้นด้วย ผลการศึกษา พบว่า ความร้อนจากปฏิกิริยาการดูดซับต่อโมลคาร์บอนไดออกไซด์ของ AMP และ PZ มีค่าใกล้เคียงกันและต่ำกว่า MEA ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า AMP และ PZ มีศักยภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดีกว่าสารละลายเกณฑ์เปรียบเทียบ MEA ทั้งในเชิงความจุของการดูดซับและความร้อนที่ใช้สำหรับปฏิกิริยาคายกลับ

ตารางที่ 2.3 ความจุการดูดซับ ความร้อนจากปฏิกิริยาการดูดซับ และค่าคงตัวอัตราปฏิกิริยาอันดับสองของ MEA AMP และ PZ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยมวล [35, 36]

ชนิดเอมีน	ความจุการดูดซับ (โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน)	ความร้อนจากปฏิกิริยาการดูดซับ (กิโลจูลต่อโมลคาร์บอนไดออกไซด์)	ค่าคงตัวอัตราปฏิกิริยาอันดับสอง (ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลโมล·วินาที)
MEA	0.58	85.13	8,653
AMP	0.80	80.91	700
PZ	0.81	80.58	70,162

Dubois และ Thomas [36] เปรียบเทียบจลนพลศาสตร์การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย MEA AMP และ PZ ด้วยค่าคงตัวอัตราปฏิกิริยาอันดับสอง (k_2) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 2.3 และ พบว่า PZ มีจลนพลศาสตร์การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่า MEA และ AMP เป็นอย่างมาก

จากผลการวิจัยทั้งสอง จึงกล่าวได้ว่า ประสิทธิภาพของกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับกระบวนการดูดซึมด้วยสารละลายเอมีนแบบเดี่ยวในเชิงความจุการดูดซึม อัตราการดูดซึมและภาระทางความร้อนสำหรับการฟื้นฟูสารละลาย พบว่า PZ มีประสิทธิภาพดีกว่า MEA ทุกประการ ส่วน AMP มีประสิทธิภาพเชิงความจุการดูดซึมและภาระทางความร้อนสำหรับการฟื้นฟูสารละลายที่ดีกว่า MEA แต่มีจลนพลศาสตร์การดูดซึมต่ำกว่า MEA

Adeosun และคณะ [37] ศึกษาการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเอมีนผสมในเชิงความจุการดูดซึมและอัตราการดูดซึมเปรียบเทียบกับเอมีนแบบเดี่ยว โดยเอมีนที่ใช้ในศึกษาได้แก่ MEA DEA MDEA AMP และ PZ พบว่า เอมีนทุกชนิดที่ผสมกับ PZ ที่ความเข้มข้นรวมร้อยละ 30 โดยมวล มีอัตราการดูดซึมและความจุการดูดซึมสูงกว่า MEA ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยมวล ซึ่งสารละลายผสมร้อยละ 10 โดยมวลของ AMP และ ร้อยละ 20 โดยมวลของ PZ มีอัตราการดูดซึม 1.47 มิลลิโมลต่อโมล-วินาที⁻¹ ซึ่งสูงกว่า สารละลาย MEA ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยมวล ที่มีอัตราการดูดซึม 1.09 มิลลิโมลต่อโมล-วินาที⁻¹ นอกจากนี้ เอมีนผสม AMP-PZ ยังมีความจุการดูดซึมสูงที่สุดเมื่อเทียบกับเอมีนชนิดอื่นที่ผสมกับ PZ โดยเอมีนผสม AMP-PZ มีความจุการดูดซึมมากกว่า สารละลาย MEA ประมาณร้อยละ 98 โดยเอมีนผสมร้อยละ 10 โดยมวลของ AMP และ ร้อยละ 20 โดยมวล PZ มีความจุการดูดซึมเท่ากับ 0.99 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน ส่วนสารละลาย MEA ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยมวล มีความจุการดูดซึม 0.5 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน ดังนั้น การเติม PZ ลงในสารละลาย AMP จึงสามารถเพิ่มศักยภาพของเอมีนสำหรับการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ทั้งในเชิงอัตราการดูดซึมและความจุการดูดซึม

Burder และคณะ [8] ศึกษาสภาพการตกตะกอนของเอมีนผสม AMP-PZ ที่อัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP-PZ ต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ผลการศึกษา พบว่า อัตราส่วนความเข้มข้นเชิงโมลาร์ AMP:PZ เท่ากับ 5:2 เป็นอัตราส่วนความเข้มข้นรวมสูงสุดที่ไม่เกิดการตกตะกอน แต่สารละลายผสมดังกล่าวจะเกิดการตกตะกอนเมื่อเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้น สารละลายผสม AMP-PZ ที่มีอัตราส่วนเชิงโมลาร์เท่ากับ 5:2 จึงไม่สามารถใช้กับการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ได้ มีเพียง 2 อัตราส่วนความเข้มข้นเท่านั้นที่สามารถใช้งานได้โดยไม่เกิดการตกตะกอน ได้แก่ อัตราส่วนความเข้มข้นเชิงโมลาร์ AMP:PZ เท่ากับ 4:1 และ 3:1.5 จึงสรุปได้ว่า ความเข้มข้นรวมสูงสุดของสารละลายผสม AMP-PZ ที่ใช้ดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้โดยไม่เกิดการตกตะกอน คือ สารละลายเอมีนผสม AMP-PZ ที่มีความเข้มข้น AMP 4.5 ถึง 5 โมลาร์ และมีความเข้มข้นของ PZ สูงสุด เป็น 1.5 โมลาร์

ตารางที่ 2.4 สภาพการตกตะกอนของเอมีนผสม AMP-PZ ที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ [8]

ความเข้มข้น (โมลาร์)		สภาพการตกตะกอน
AMP	PZ	
2	3	เกิดการตกตะกอนที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส
3	2	เมื่อมีการกวนจะไม่เกิดการตกตะกอน หากไม่กวนจะเกิดการตกตะกอน หลังการผสม 12-16 ชั่วโมง
2.5	2.5	เกิดการตกตะกอนที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส หากไม่ให้ความร้อน และการกวน
2	3.5	เกิดการตกตะกอนจำนวนมากที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส
4	4	เกิดการตกตะกอนเมื่อไม่มีการกวนและทำปฏิกิริยากับ คาร์บอนไดออกไซด์
5	2	ไม่พบการตกตะกอนที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส แต่เมื่อทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์จะเกิดการตกตะกอน
5	1	เกิดการตกตะกอน
2	5	เกิดการตกตะกอนเมื่อไม่มีการกวนและทำปฏิกิริยากับ คาร์บอนไดออกไซด์ (เมื่อให้ความร้อนตะกอนจะละลาย)
4	1.5	เกิดการตกตะกอน
4	1	ไม่พบการตกตะกอน
3	1.5	ไม่พบการตกตะกอน

Nwaoha และคณะ [9] ศึกษาความสามารถในการดูดซึมและการฟื้นฟูสารละลายเอมีนผสมสามชนิด AMP-PZ-MEA สำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในเชิงความจุการดูดซึมและภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูสภาพสารละลาย โดยมีความเข้มข้นของเอมีนผสมรวม 6 โมลาร์ ได้แก่ สารละลายเอมีนผสม AMP:PZ:MEA ที่มีอัตราส่วนความเข้มข้นเชิงโมลาร์ 2.5:0.5:3 2:1:3 และ 1.5:1.5:3 เปรียบเทียบกับสารละลายเกณฑ์เปรียบเทียบกับ MEA ความเข้มข้น 5 โมลาร์ พบว่า ที่ภาวะสมดุล สารละลายเอมีนผสม AMP-PZ-MEA มีความจุการดูดซึมมากกว่าสารละลาย MEA ร้อยละ 29.1 ถึง 38.1 และเมื่อเปรียบเทียบความจุการดูดซึมของเอมีนผสมที่อัตราส่วน AMP/PZ ต่างกัน พบว่า การลดความเข้มข้นของ AMP และเพิ่มความเข้มข้นของ PZ ส่งผลให้ความจุการดูดซึมเพิ่มขึ้น

โดยสารละลายผสม AMP:PZ:MEA ที่มีอัตราส่วนความเข้มข้นเชิงโมลาร์ 1.5:1.5:3 มีความจุการดูดซับมากที่สุด คือ 3.66 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อลิตรของสารละลาย นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูสารละลาย พบว่า เอมีนผสม AMP-PZ-MEA มีภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูต่ำกว่า สารละลาย MEA ร้อยละ 50.0 ถึง 54.5 ซึ่งการเพิ่มอัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP และ ลดอัตราส่วนความเข้มข้นของ PZ ทำให้สารละลายผสมมีภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูต่ำลง โดยสารละลายเอมีนผสม AMP:PZ:MEA ที่มีอัตราส่วนความเข้มข้นเชิงโมลาร์ 1.5:1.5:3 มีภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูต่ำที่สุด คือ 287.1 กิโลจูลต่อโมลคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า สารละลายเอมีนผสม AMP-PZ-MEA มีสมรรถนะเชิงความจุของการดูดซับและภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูสารละลายที่ดีกว่าสารละลายเกณฑ์เปรียบเทียบ MEA ทุกรูปแบบ Nwaoha และคณะ [9] ยังไม่ได้ศึกษาข้อมูลด้านสมรรถนะการถ่ายโอนมวล ซึ่งมีความสำคัญต่อการประเมินสมรรถนะโดยรวมของเอมีนและใช้ในการออกแบบหอดูดซับได้อีกด้วย

Xu และคณะ [30] ศึกษาสมรรถนะการถ่ายโอนมวลของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย N,N-diethylethanomines (DEEA) ในหอดูดซับแบบบรรจุโดยมีวัสดุบรรจุแบบจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ Sulzer DX ในรูปแบบของ K_{Ga} เปรียบเทียบกับสารละลายเกณฑ์เปรียบเทียบ MEA และ MDEA พบว่า K_{Ga} ของ MEA มีค่าสูงกว่า K_{Ga} ของ DEEA และ MDEA ตามลำดับ เนื่องจาก MEA เป็นเอมีนปฐมภูมิ จึงมีจลนพลศาสตร์ในการเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่า DEEA และ MDEA ซึ่งเป็นเอมีนตติยภูมิ เมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการถ่ายโอนมวลระหว่างสารละลาย DEEA กับ สารละลาย MDEA พบว่า สารละลาย DEEA มี K_{Ga} สูงกว่า สารละลาย MDEA เนื่องจาก DEEA มีค่าคงตัวอัตราเกิดปฏิกิริยาอันดับสองสูงกว่า MDEA นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบชนิดของวัสดุบรรจุ พบว่า หอดูดซับที่ใช้วัสดุบรรจุแบบจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ มี K_{Ga} สูงกว่าหอดูดซับที่ใช้วัสดุบรรจุแบบจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ เนื่องจากวัสดุบรรจุแบบจัดเรียงตัวเป็นระเบียบช่วยให้พื้นผิวสัมผัสระหว่างสารละลายและแก๊สมากกว่าวัสดุบรรจุแบบจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ จึงส่งผลให้การถ่ายโอนมวลในหอดูดซับดีขึ้น ดังนั้น สรุปได้ว่า เอมีนที่มีจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาสูงจะมีสมรรถนะการถ่ายโอนมวลสูง และ วัสดุบรรจุส่งผลต่อสมรรถนะการถ่ายโอนมวลโดยการใช่วัสดุบรรจุแบบจัดเรียงตัวเป็นระเบียบทำให้สมรรถนะการถ่ายโอนมวลสูง

Sheng และคณะ [38] ศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ดำเนินการต่าง ๆ ได้แก่ อัตราการไหลของแก๊สขาเข้า และอัตราการไหลของสารละลายขาเข้า ต่อสมรรถนะการถ่ายโอนมวลของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายผสม Diethylenetriamine (DETA) และ PZ

และสารละลายผสม DETA และ 1-(2-Aminoethyl)-Piperazine (AEPZ) ในหอดูดซึมแบบบรรจุ ในรูปแบบของ K_{CaV} ที่ความดันบรรยากาศ พบว่า อัตราการไหลของแก๊สเข้าส่งผลต่อ K_{CaV} น้อยมาก เนื่องจากการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอมีนเป็นการดูดซึมเชิงเคมี ซึ่งเป็นกระบวนการที่ควบคุมโดยฟิล์มของเหลว การปรับอัตราการไหลในวัฏภาคแก๊สจึงส่งผล ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมน้อย แต่การปรับอัตราการไหลของสารละลายมีผลต่อ K_{CaV} อย่างมีนัยสำคัญ โดยอัตราการไหลของสารละลายแปรผันโดยตรงกับ K_{CaV} เนื่องจากการเพิ่มอัตรา การไหลของสารละลายเป็นการเพิ่มความปั่นป่วนในการไหลของของเหลว ส่งผลให้ความต้านทาน การถ่ายโอนมวลภายในสารละลายลดลง จึงทำให้การถ่ายโอนมวลคาร์บอนไดออกไซด์เกิดได้ดีขึ้น นอกจากนี้ การเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายเป็นการเพิ่มปริมาณของโมเลกุลของเอมีนอิสระ ที่เกิดปฏิกิริยาได้ (Free active amine molecules) ทำให้ความแตกต่างความเข้มข้น คาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคของแก๊สและของเหลวเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มแรงขับให้เกิดการถ่ายโอนมวล

Naami และคณะ [31] ศึกษาผลกระทบของการปรับอัตราส่วนเชิงโมลคาร์บอนไดออกไซด์ ต่อเอมีนในสารละลายขาเข้า ต่อสมรรถนะการถ่ายโอนมวลของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย สารละลาย 4-Diethylamino-2-butanol (DEAB) MDEA และ MEA ในหอดูดซึมแบบบรรจุ พบว่า การเพิ่มอัตราส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเอมีนในสารละลายขาเข้าในช่วง 0.09 ถึง 0.25 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน ส่งผลให้ K_{CaV} ลดลง เนื่องจากการเพิ่ม อัตราส่วนเชิงโมลของ คาร์บอนไดออกไซด์ต่อเอมีนในสารละลายขาเข้าเป็นการลดปริมาณของโมเลกุลของเอมีนอิสระ ที่เกิดปฏิกิริยาได้ในสารละลายขาเข้า ทำให้แรงขับในการถ่ายโอนมวลน้อยลงด้วย ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่า อัตราส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเอมีนในสารละลายขาเข้าส่งผล ต่อสมรรถนะของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอมีน

Hemmat และคณะ [39] ศึกษาผลของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อสภาพนำความร้อน ของของไหลนาโนแมกนีเซียมออกไซด์ในน้ำ ด้วยการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล แบบสามระดับ โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) พบว่า การใช้การออกแบบการทดลอง แบบแฟคทอเรียลแบบสามระดับ สามารถนำมาวิเคราะห์ผลตอบสนองที่มีแนวโน้มไม่ได้เพิ่มหรือลด แบบเป็นเส้นตรงได้ อีกทั้ง ยังสามารถบ่งบอกถึงอิทธิพลของพารามิเตอร์และอันตรกิริยาระหว่าง พารามิเตอร์ได้อย่างครบถ้วนด้วยการวิเคราะห์ผลเชิงสถิติ สามารถนำข้อมูลดังกล่าวมาเปรียบเทียบ กันได้อย่างชัดเจน และสามารถนำมาวิเคราะห์หาภาวะการดำเนินการที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ สภาพนำความร้อนสูงสุดได้

DeMontigny [15] และ Naami [40] ศึกษาผลของพารามิเตอร์ดำเนินการต่อสมรรถนะการถ่ายโอนมวลของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย MEA ในเชิงของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล โดยพารามิเตอร์ดำเนินการที่ศึกษา ได้แก่ อัตราการไหลของสารละลาย อัตราส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อสารละลายเอมีนขาเข้า ผลการศึกษา พบว่า พารามิเตอร์ทั้งสามส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล อย่างไรก็ตาม DeMontigny [15] และ Naami [40] ไม่ได้ใช้การออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลทางสถิติ จึงไม่สามารถวิเคราะห์และศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ดำเนินการและอันตรกิริยาระหว่างพารามิเตอร์ต่อสมรรถนะการถ่ายโอนมวลได้

Gao และคณะ [41] ศึกษาสมรรถนะของการถ่ายโอนมวลและสร้างสหสัมพันธ์ของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายผสม DEEA-MEA ในหอดูดซึมบรรจุแบบจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบเชิงของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม พบว่า เมื่อปรับพารามิเตอร์ดำเนินการที่ศึกษา ได้แก่ อัตราส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเอมีนในสารละลายขาเข้า และอัตราการไหลของสารละลาย มีผลต่อ K_{GaV} แต่อัตราการไหลของแก๊สเฉื่อยเป็นพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อ K_{GaV} น้อยมาก อีกทั้งการสร้างสหสัมพันธ์จากความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ดำเนินการ สามารถนำมาใช้งานได้และมีร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสมบูรณ์จากค่าที่คำนวณได้และข้อมูลที่ได้จากการทดลองต่ำ อย่างไรก็ตาม Gao และคณะ [41] ไม่ได้ใช้การออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลทางสถิติ จึงไม่สามารถวิเคราะห์และศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ดำเนินการและอันตรกิริยาระหว่างพารามิเตอร์ต่อสมรรถนะการถ่ายโอนมวลได้

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 ข้อมูลงานวิจัยเบื้องต้น

การศึกษาสมรรถนะการถ่ายโอนมวลของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเอมีนผสมสามชนิด AMP-PZ-MEA จะเปรียบเทียบในเชิงของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม ($K_G a_v$) และประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 removal efficiency, %) กับสารละลายเกณฑ์เปรียบเทียบ MEA ในหอดูดซับบรรจุด้วยวัสดุบรรจุแบบจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ Sulzer DX มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่าง ๆ และหาภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการดำเนินการสำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

ในวิทยานิพนธ์นี้ จะแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

1. ทดลองสมรรถนะการถ่ายโอนมวลของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเอมีนในหอดูดซับ
2. วิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์และผลของอันตรกิริยาระหว่างพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อสมรรถนะการถ่ายโอนมวลของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์
3. สร้างสหสัมพันธ์เพื่อทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมสำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

ส่วนที่หนึ่งจะทำการทดลองหาสมรรถนะการถ่ายโอนมวลของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายผสม AMP:PZ:MEA ที่อัตราส่วนความเข้มข้นเชิงโมลาร์ 1.5:1.5:3 และสารละลายเกณฑ์เปรียบเทียบ 5 โมลาร์ MEA ในหอดูดซับที่บรรจุด้วยวัสดุบรรจุแบบจัดเรียงเป็นระเบียบเพื่อศึกษาผลของพารามิเตอร์ ได้แก่ ฟลักซ์ของเหลวขาเข้า ฟลักซ์แก๊สขาเข้า อัตราส่วนเชิงโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเอมีนในสารละลายขาเข้า และสัดส่วนความสูงของจุดดิ่งตัวอย่างต่อความสูงของหอดูดซับ ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสามระดับ อีกทั้ง เปรียบเทียบสมรรถนะการถ่ายโอนมวลระหว่างสารละลายเอมีนทั้งสอง

ส่วนที่สองเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายผสมสามชนิด AMP-PZ-MEA ที่ได้จากส่วนที่หนึ่ง เพื่อศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์และอันตรกิริยาระหว่างพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อสมรรถนะการถ่ายโอนมวล รวมถึงหาภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการดำเนินการของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในหอดูดซับแบบบรรจุ

ส่วนที่สามเป็นการสร้างสหสัมพันธ์เพื่อทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของการดูดซึ่มคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเอมีนผสมสามชนิด AMP-PZ-MEA โดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาใช้สร้างสมการทางคณิตศาสตร์ โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel เพื่อใช้ทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม

3.2 สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

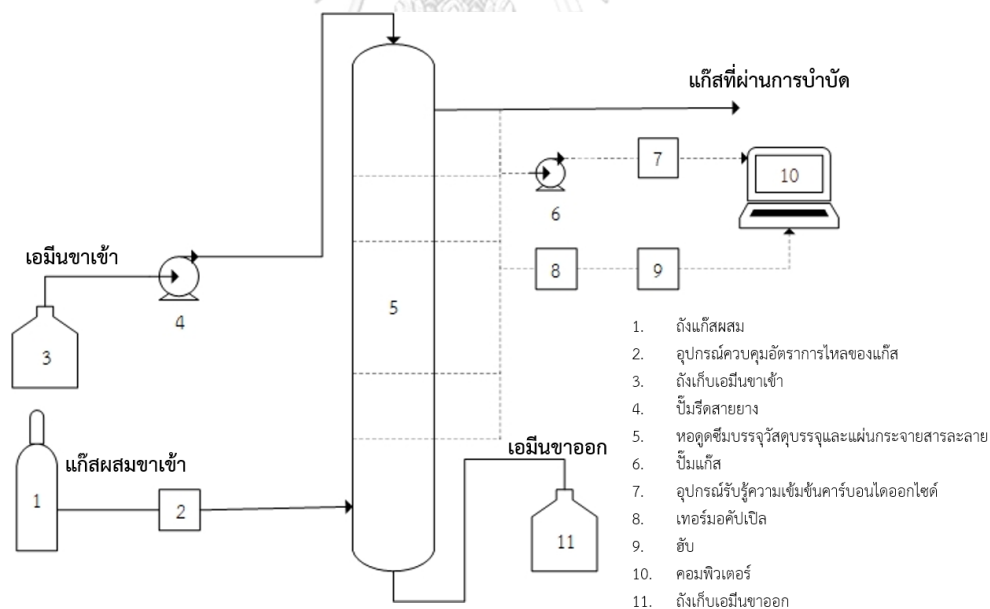
3.2.1. สารเคมีที่ใช้

1. Monoethanolamine (MEA) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 (Chemipan Co., Ltd, Thailand)
2. 2-Amino-2-methyl-1-propanol (AMP) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 (Merck, Germany)
3. Piperazine (PZ) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 (Sigma-Aldrich, Switzerland)
4. น้ำกลั่น
5. สารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 1 โมลาร์ (Kemaus, Australia)
6. สารละลายเมทิลออลเรนจ์ในน้ำ ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยมวล (Gammago Co., Ltd, thailand)
7. คาร์บอนไดออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 12 โดยปริมาตร ในสมดุลไนโตรเจนเฉื่อย (Thai-Japan Gas CO., Ltd, Thailand)

3.2.2. อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้

1. ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask)
2. ปีกเกอร์ (Beaker)
3. ไมโครปิเปต ขนาด 0.1 ถึง 1 มิลลิตร
4. ชุดเครื่องมือในการไทเทรตหาความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลาย (Chittick apparatus)
5. ถังเก็บสารละลายขนาด 10 ลิตร
6. ฉนวนกันความร้อน หุ้มตลอดทั้งหอดูดซึ่มป้องกันการสูญเสียความร้อน เพื่อควบคุมให้อุณหภูมิของหอดูดซึ่มคงที่
7. เทอร์มอคัปเปิล แบบ Type K ยี่ห้อ Phidgets ที่มีช่วงการวัดอุณหภูมิอยู่ในช่วงระหว่าง -40 ถึง 400 องศาเซลเซียส สำหรับวัดอุณหภูมิในหอดูดซึ่ม
8. ฮับ (Hub) ยี่ห้อ Phidgets สำหรับเก็บข้อมูลอุณหภูมิที่วัดได้เป็นสัญญาณดิจิตอล เพื่อส่งข้อมูลไปให้คอมพิวเตอร์

9. ปั๊มรีดสายยาง (Peristaltic pump) รุ่น BT100-2J ยี่ห้อ Longer pump สำหรับควบคุมการไหลของสารละลายที่ป้อนเข้าสู่ด้านบนของหอคูดซิม
10. อุปกรณ์รับรู้ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ รุ่น SprintIR-6S100% ยี่ห้อ CO₂ meter ที่มีช่วงดำเนินการตั้งแต้อยู่ 0 ถึง 100 โดยปริมาตรของคาร์บอนไดออกไซด์
11. บั๊มหมุนเวียนแก๊ส ในช่วงอัตราการไหล 2 ถึง 100 มิลลิลิตรต่อนาที สำหรับนำตัวอย่างแก๊สจากหอคูดซิมมาที่เซนเซอร์วัดความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์
12. อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส ยี่ห้อ Dwyer ช่วงการไหล 1 ถึง 10 ลิตรต่อนาที
13. วัสดุบรรจุแบบจัดเรียงตัวเป็นระเบียบชนิด Sulzer DX ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร พื้นที่ผิวสัมผัส 900 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร
14. แผ่นกระจายสารละลาย (Distributor) ในหอคูดซิม
15. หอคูดซิม ซึ่งเป็นคอลัมน์แก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 30 มิลลิเมตร สูง 1.60 เมตร มีจุดติดตั้งตัวอย่างทั้งหมด 10 จุด ตลอดความสูงของหอคูดซิม เพื่อวัดอุณหภูมิและความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊ส



รูปที่ 3.1 แผนผังอุปกรณ์สำหรับการดูดซิมคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 3.2 หอคูดซึ่มคาร์บอนไดออกไซด์และจุดติดตั้งตัวอย่างสำหรับวัดอุณหภูมิและความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 3.3 วัสดุบรรจุแบบจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ Sulzer DX



รูปที่ 3.4 แผ่นกระจายสารละลาย

3.3 พารามิเตอร์ที่จะศึกษา

3.3.1. ฟลักซ์ของเหลวขาเข้า

ฟลักซ์ของเหลวขาเข้าเป็นพารามิเตอร์ดำเนินการที่แสดงถึงอัตราการป้อนของเหลว (คือ สารละลายเอมีน) ต่อพื้นที่หน้าตัดของหอดูดซึม จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [15, 38, 40] พบว่า อัตราการป้อนของเหลวส่งผลต่อการกระจายตัวและรูปแบบของการไหลของสารละลาย ซึ่งส่งผลต่อสมรรถนะการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย อย่างไรก็ตาม การดำเนินการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จริงในอุตสาหกรรมมีการใช้หอดูดซึมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน กล่าวคือ หอดูดซึมมีพื้นที่หน้าตัดไม่เท่ากัน ดังนั้น ฟลักซ์ของเหลวขาเข้าจึงมักใช้เป็นตัวแทนของพารามิเตอร์ดำเนินการสำหรับของเหลวขาเข้ามากกว่าอัตราการป้อนของเหลวขาเข้า ในงานวิจัยนี้ ฟลักซ์ของเหลวขาเข้าที่จะศึกษา คือ 2.11 2.89 และ 3.67 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร·วินาที¹ สำหรับสารละลายเอมีนผสมสามชนิด AMP-PZ-MEA

3.3.2. ฟลักซ์แก๊สขาเข้า

ฟลักซ์แก๊สขาเข้าเป็นพารามิเตอร์ดำเนินการที่คำนวณจากอัตราการป้อนแก๊สขาเข้าต่อพื้นที่หน้าตัดของหอดูดซึม ทั้งนี้ ฟลักซ์แก๊สขาเข้านิยมใช้เป็นตัวแทนของปริมาณแก๊สขาเข้ามากกว่าอัตราการป้อนแก๊สขาเข้า โดยการเพิ่มฟลักซ์แก๊สขาเข้าส่งผลต่อการเพิ่มให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ป้อนเข้าสู่หอดูดซึม รวมถึงทำให้เวลาที่คงอยู่ของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในหอดูดซึมนลดลงอีกด้วย โดยฟลักซ์แก๊สขาเข้าที่จะทำการศึกษา คือ 509.30 594.18 และ 679.06 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร·วินาที¹

3.3.3. อัตราส่วนเชิงโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเอมีนในสารละลายขาเข้า

อัตราการส่วนเชิงโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเอมีนในสารละลายขาเข้า หรือ CO₂ loading ในสารละลายขาเข้าเป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงจำนวนโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในสารละลายเอมีน (ทั้งในรูปแบบของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ในสารละลาย คาร์บาเมต คาร์บอนเนต และไบคาร์บอนเนต) ต่อโมลเอมีนในสารละลาย ซึ่งพารามิเตอร์ดังกล่าวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับจำนวนโมลของเอมีนที่ทำปฏิกิริยาได้ในสารละลาย กล่าวคือ สารละลายที่มี CO₂ loading สูง จะมีจำนวนโมลของเอมีนที่ทำปฏิกิริยาได้น้อย จากข้อมูลข้างต้น จึงเห็นได้ว่า CO₂ loading ส่งผลโดยตรงต่อสมรรถนะการถ่ายโอนมวลของการดูดซึม นอกจากนี้ CO₂ loading ยังเป็นพารามิเตอร์สำคัญสำหรับการฟื้นฟูสารละลายในหอฟื้นฟูด้วย โดยการฟื้นฟูสารละลายเป็นกระบวนการให้ความร้อนกับสารละลายที่มี CO₂ loading สูง เพื่อให้เกิดการคายกลับของคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นการเพิ่ม

จำนวนโมลของเอมีนที่ทำปฏิกิริยาได้ในสารละลาย หรือ ลด CO_2 loading นั้นเอง อย่างไรก็ตาม การฟื้นฟูสารละลายเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานสูงสำหรับปฏิกิริยาการคายกลับของคาร์บอนไดออกไซด์ จึงไม่นิยมฟื้นฟูสารละลายจน CO_2 loading เป็นศูนย์ หรือ ต่ำมาก ๆ ดังนั้น งานวิจัยนี้ทำการศึกษา CO_2 loading ของสารละลายขาเข้าที่ 0.25 0.35 และ 0.45 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน สำหรับสารละลายเอมีนผสมสามชนิด AMP-PZ-MEA

3.3.4. สัดส่วนความสูงของจุดดิ่งตัวอย่างต่อความสูงของหอดูดซึม

สัดส่วนความสูงของจุดดิ่งตัวอย่างต่อความสูงของหอดูดซึม (h/h_0) เป็นพารามิเตอร์หนึ่ง ที่ส่งผลต่อสมรรถนะการถ่ายโอนมวลของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ กล่าวคือ เมื่อความสูงของจุดดิ่งตัวอย่างต่างกัน จะพบว่า ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊สมีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งจะทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่คำนวณได้ มีค่าต่างกันตามความสูงของจุดดิ่งตัวอย่าง

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1. การเตรียมสารละลายเอมีน

งานวิจัยนี้ใช้สารละลายเอมีนในการศึกษาสมรรถนะของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในหอดูดซึม ซึ่งเป็นสารละลายที่ประกอบด้วยเอมีนผสมสามชนิดที่มีอัตราส่วนความเข้มข้น 1.5 โมลาร์ AMP: 1.5 โมลาร์ PZ: 3 โมลาร์ MEA และสารละลายของเอมีนเกณฑ์เปรียบเทียบกับ MEA ความเข้มข้น 5 โมลาร์ โดยเตรียมสารละลายเอมีนในน้ำด้วยการผสมเอมีนในปริมาณที่ต้องการด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำไปตรวจสอบความเข้มข้นด้วยการไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริก ที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์ โดยใช้เมทิลออเรนจ์เป็นอินดิเคเตอร์ สำหรับการเตรียมสารละลายเอมีนที่ CO_2 loading ตามที่ต้องการศึกษา ทำได้โดยการเติมคาร์บอนไดออกไซด์ลงในสารละลายเอมีน และวัดค่า CO_2 loading ในสารละลายด้วย Chittick apparatus ดังอธิบายในหัวข้อ 3.4.4

3.4.2. การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอมีนในหอดูดซึม

การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอมีนเป็นการดำเนินการแบบต่อเนื่อง ภายในหอดูดซึมบรรจุด้วยวัสดุบรรจุแบบจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ Sulzer DX โดยมีความสูงของวัสดุบรรจุ 1.50 เมตร ตลอดความสูงของหอดูดซึม ที่ภาวะดำเนินการดังแสดงในตารางที่ 3.1 งานวิจัยนี้จะป้อนสารละลายเอมีนและแก๊สผสมในทิศทางไหลสวนทางกัน โดยเริ่มจากป้อนสารละลายเอมีนขาเข้า (Inlet amine solution) หรือ สารละลายเอมีนก่อนการดูดซึม (Lean amine solution)

จากด้านบนของหอดูดซึม โดยใช้ปั๊มรีดสายยาง จนกระทั่งสารละลายไหลลงมาทางด้านล่างของหอดูดซึม จากนั้นจึงป้อนแก๊สผสม (Premixed gas) ทางด้านล่างหอดูดซึม และปรับอัตราการไหลตามที่ต้องการด้วยอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส โดยทำการวัดและบันทึกอุณหภูมิตลอดความสูงของหอดูดซึมตั้งแต่เริ่มต้นการทดลอง ด้วยเทอร์มอคัปเปิลที่จะส่งข้อมูลไปยังฮับแล้วแปลงข้อมูลไปแสดงผลยังคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม LabVIEW ดังรูปที่ 3.5 จนกระทั่งอุณหภูมิตลอดทั้งหอดูดซึมมีค่าคงที่ ซึ่งถือว่าระบบเข้าสู่ภาวะคงตัว จากนั้น จึงทำการวัดและบันทึกค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊สด้วยการดึงตัวอย่างโดยใช้ปั๊มหมุนเวียนแก๊สไปสู่อุปกรณ์รับรู้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ ทีละจุดดึงตัวอย่างตลอดความสูงของหอดูดซึมจนถึงจุดที่แก๊สออกด้านบนของหอดูดซึม โดยใช้โปรแกรม Gaslab ดังรูปที่ 3.6 ส่วนสารละลายเอมีนที่ผ่านการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ (Rich amine solvent) จะถูกปล่อยมาเก็บไว้ทางด้านล่างของหอดูดซึม และนำตัวอย่างสารละลายเอมีนมาทำการวัดค่า CO₂ loading ตามวิธีในหัวข้อ 3.4.4 เพื่อคำนวณ ความคลาดเคลื่อน การตุลมวล (Mass balance error) ตามสมการ (3.1) สำหรับตรวจสอบความแม่นยำของการทดลอง โดยค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่ยอมรับได้ไม่เกินร้อยละ 10 [31]

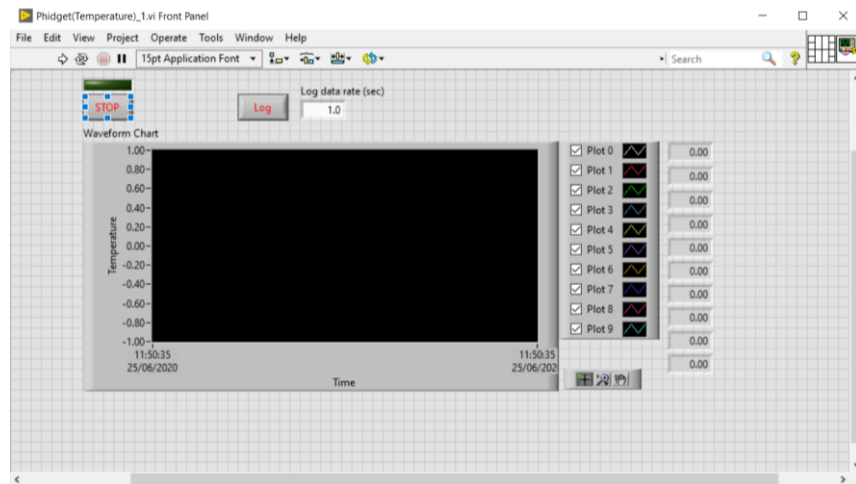
$$\% \text{ Mass balance error} = \frac{\text{Absorbed}_{\text{CO}_2} - \text{Removed}_{\text{CO}_2}}{\text{Absorber}_{\text{CO}_2}} \times 100\% \quad (3.1)$$

เมื่อ Absorbed_{CO₂} คือ อัตราการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคของเหลว (โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อนาที)

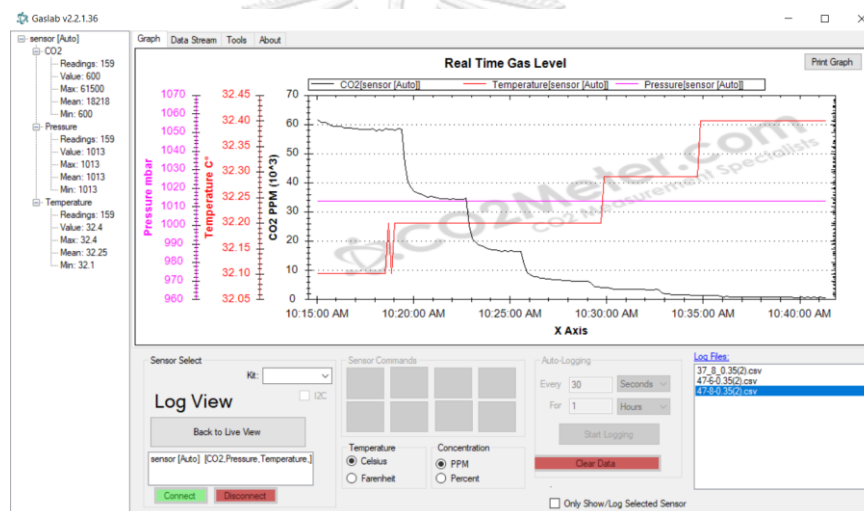
Removed_{CO₂} คือ อัตราการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊ส (โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อนาที)

ตารางที่ 3.1 ภาวะดำเนินการของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในหอดูดซึม

ภาวะการทดลอง	
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	30
ความดัน (กิโลปาสคาล)	101.325
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของหอดูดซึม (มิลลิเมตร)	30
ความสูงของวัสดุบรรจุ (เมตร)	1.50
ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า (%)	12% โดยปริมาตร



รูปที่ 3.5 โปรแกรม LabVIEW สำหรับวัดและจัดเก็บข้อมูลอุณหภูมิในหอดูดซึม



รูปที่ 3.6 โปรแกรม Gaslab สำหรับวัดและจัดเก็บข้อมูลความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊สในหอดูดซึม

3.4.3. การคำนวณสมรรถนะการถ่ายโอนมวล

ในงานวิจัยนี้ สมรรถนะการถ่ายโอนของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์จะแสดงด้วยสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม (K_{Ga}) และ ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 removal efficiency, %) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่บันทึกได้จากอุปกรณ์รับรู้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊ส ดังนี้

3.4.3.1 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม (K_{Ga_v})

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม (K_{Ga_v}) สามารถคำนวณได้จากการทดลองการดูดซึ่มคาร์บอนไดออกไซด์ในหอดูดซึม โดยนำข้อมูลความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ตลอดความสูงของหอดูดซึมที่วัดได้มาสร้างกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ตามความสูงของหอดูดซึม ($\frac{dY_{AG}}{dz}$) (ดังรูปที่ 2.7) เพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมโดยใช้สมการ (2.46)

3.4.3.2 ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์

จากค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊สที่ได้จากการทดลอง สามารถนำมาคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ดังสมการ (3.2) ซึ่งจะคำนวณที่ระยะความสูงเดียวกับ K_{Ga_v}

$$\text{CO}_2 \text{ removal efficiency (\%)} = \left| \frac{y_{\text{CO}_2, \text{inlet}} - y_{\text{CO}_2, \text{outlet}}}{y_{\text{CO}_2, \text{inlet}}} \right| \times 100\% \quad (3.2)$$

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

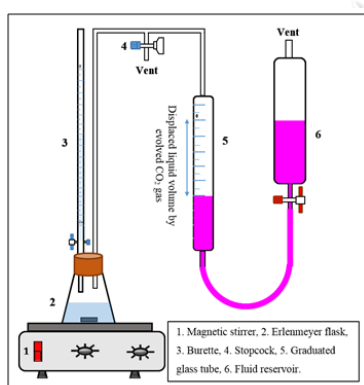
3.4.4. อัตราส่วนเชิงโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเอมีน

อัตราส่วนเชิงโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเอมีน หรือ CO_2 loading ของสารละลายเอมีน ทั้งก่อนและหลังการดูดซึ่มสามารถวัดได้จาก Chittick apparatus ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ตามวิธีมาตรฐานของ The Association of Official Analytical Chemist (AOAC) [10]

การวัด CO_2 loading เริ่มจากปิเปตสารละลายเอมีนตัวอย่างปริมาตร 1 มิลลิลิตร มาไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์ โดยใช้เมทิลออเรนจ์เป็นอินดิเคเตอร์ และชะด้วยน้ำกลั่นภายในขวดรูปชมพู่ โดยการไทเทรตนี้จะเป็นการทำในระบบปิดเพื่อไม่ให้คาร์บอนไดออกไซด์ไหลออกและป้องกันอากาศเข้า โดยทำการไทเทรตจนกระทั่งสารละลายเอมีนตัวอย่างเปลี่ยนเป็นสีชมพูอ่อน ซึ่งเป็นจุดยุติของการไทเทรต บันทึกปริมาตรของกรดที่ใช้และเติมกรดในปริมาตรเกินพอ คือ 1 เท่าตัวของปริมาตรกรดที่ใช้ โดยตลอดการไทเทรตจะมีการกวานสารละลายอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องกวาน รอจนกระทั่งคาร์บอนไดออกไซด์ถูกปล่อยออกจากสารละลายเอมีนจนหมด สังเกตได้จากสารละลายแทนที่ (Displacement solution) ไม่มี

การเปลี่ยนแปลงระดับแล้วจึงหยุดการกวนและปรับระดับของสารละลายแทนที่ เพื่ออ่านค่าปริมาตรสารละลายที่ถูกแทนที่ไปด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ บันทึกผลและนำไปคำนวณหาค่า CO_2 loading

สารละลายแทนที่เตรียมได้จากละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 100 กรัม ในน้ำกลั่น 350 มิลลิลิตร ผสมกับโซเดียมไบคาร์บอเนต 1 กรัม และเมทิลออเรนจ์ 2 มิลลิลิตร แล้วเติมกรดไฮโดรคลอริก ในปริมาณที่มากเกินพอจนกระทั่งสารละลายมีสีชมพู จากนั้นทำการกวนสารละลายต่อจนกระทั่งคาร์บอนไดออกไซด์ถูกปลดปล่อยจนหมด แล้วนำสารละลายไปใส่ใน Chittick apparatus เพื่อใช้สำหรับวัดการแทนที่ของคาร์บอนไดออกไซด์



(1)



(2)

รูปที่ 3.7 ชุดไทเทรต Chittick apparatus สำหรับวัด CO_2 loading ในสารละลายเอมีน

(1) ภาพตัวอย่าง [42] และ (2) ภาพจริง

3.5 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง (Design of experiment, DOE) เป็นวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับหลายพารามิเตอร์ เพื่อคัดกรองหาช่วงการดำเนินการที่เหมาะสมที่สุด โดยจะนำข้อมูลไปวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงสถิติ ในการออกแบบการทดลองจำเป็นต้องกำหนดขอบเขตและระดับที่จะศึกษาเพื่อให้ครอบคลุมการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ ที่ส่งผลต่อผลตอบสนอง (Response) เพื่อพิจารณาอิทธิพลและความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์หลักและอันตรกิริยาระหว่างพารามิเตอร์ (Interaction) ทั้งหมดที่ส่งผลต่อผลตอบสนองในกระบวนการ

งานวิจัยนี้ศึกษาโดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสามระดับ (3^k full factorial design) เนื่องจากเป็นวิธีการที่สามารถอธิบายผลของพารามิเตอร์และอันตรกิริยาระหว่างพารามิเตอร์ได้อย่างครบถ้วน อีกทั้ง สามารถพิจารณาผลของพารามิเตอร์ที่ไม่ได้มีความสัมพันธ์

เป็นแบบเส้นตรงได้อีกด้วย โดยทำการศึกษา 4 พารามิเตอร์หลัก ได้แก่ ฟลักซ์ของเหลวขาเข้า ฟลักซ์ของแก๊สขาเข้า CO_2 loading ของสารละลายเอมีนขาเข้า และ สัดส่วนความสูงของจุดดิ่งตัวอย่างต่อความสูงของหอดูดซึม (h/h_0) ซึ่งแต่ละพารามิเตอร์จำแนกออกเป็นสามระดับ คือ ค่าระดับสูง (+1) ค่าระดับกลาง (0) และค่าระดับต่ำ (-1) ดังแสดงในตารางที่ 3.2 สำหรับการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย AMP-PZ-MEA มีผลตอบสนอง คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม และ ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ จากพารามิเตอร์ทั้งสี่ข้างต้น มี 3 พารามิเตอร์ที่เป็นพารามิเตอร์ดำเนินการ คือ ฟลักซ์ของเหลวขาเข้า ฟลักซ์ของแก๊สขาเข้า และ CO_2 loading ของสารละลายเอมีนขาเข้า ส่วน h/h_0 เป็นพารามิเตอร์ที่เกิดจากการทดลอง เนื่องจากในแต่ละชุดการทดลองจะมีการเก็บข้อมูลในทุกจุดดิ่งตัวอย่างที่ h/h_0 ต่าง ๆ ดังนั้น เมื่อใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสามระดับสำหรับพารามิเตอร์ดำเนินการทั้งสาม จึงได้การทดลองทั้งหมด 27 ชุดการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.3 ซึ่งแต่ละการทดลองจะพิจารณาผลตอบสนองที่ h/h_0 3 ระดับ คือ ค่าระดับสูง (+1; $h/h_0 = 0.32$) ค่าระดับกลาง (0; $h/h_0 = 0.25$) และค่าระดับต่ำ (-1; $h/h_0 = 0.18$) ดังนั้น การศึกษาการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย AMP-PZ-MEA จึงมีข้อมูลการทดลองทั้งสิ้น 81 ข้อมูล จากทั้งสี่พารามิเตอร์ที่ศึกษา สำหรับการวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) เพื่อศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญเชิงสถิติต่อผลตอบสนอง และ หาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อสร้างสมการสหสัมพันธ์ที่ใช้ทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม

ตารางที่ 3.2 ช่วงการทดลองและระดับของพารามิเตอร์สำหรับการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย AMP-PZ-MEA

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	หน่วย	ระดับของพารามิเตอร์		
			-1	0	1
ฟลักซ์ของเหลวขาเข้า	A	ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร-วินาที ⁻¹	2.11	2.89	3.67
ฟลักซ์แก๊สขาเข้า	B	ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร-วินาที ⁻¹	509.30	594.18	679.06
CO_2 loading ของเอมีนขาเข้า	C	โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน	0.25	0.35	0.45
h/h_0	D	เมตรต่อเมตร	0.18	0.25	0.32

ตารางที่ 3.3 ชุดการทดลองสำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย AMP-PZ-MEA

ลำดับ	ฟลักซ์ของเหลวขาเข้า (ลูกบาศก์เมตรต่อ ตารางเมตร·วินาที)	ฟลักซ์แก๊สขาเข้า (ลูกบาศก์เมตรต่อ ตารางเมตร·วินาที)	CO ₂ loading ของ เอมีนขาเข้า (โมลต่อโมล)
1	2.89	509.30	0.15
2	2.89	594.18	0.15
3	2.89	679.06	0.15
4	3.67	509.30	0.15
5	3.67	594.18	0.15
6	3.67	679.06	0.15
7	4.45	509.30	0.15
8	4.45	594.18	0.15
9	4.45	679.06	0.15
10	2.89	509.30	0.25
11	2.89	594.18	0.25
12	2.89	679.06	0.25
13	3.67	509.30	0.25
14	3.67	594.18	0.25
15	3.67	679.06	0.25
16	4.45	509.30	0.25
17	4.45	594.18	0.25
18	4.45	679.06	0.25
19	2.89	509.30	0.35
20	2.89	594.18	0.35
21	2.89	679.06	0.35
22	3.67	509.30	0.35
23	3.67	594.18	0.35
24	3.67	679.06	0.35
25	4.45	509.30	0.35
26	4.45	594.18	0.35
27	4.45	679.06	0.35

3.6 สหสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม

งานวิจัยนี้จะสร้างสหสัมพันธ์เพื่อทำนายค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเอมีนผสมสามชนิด AMP-PZ-MEA โดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และตรวจสอบความแม่นยำระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่คำนวณได้ด้วยร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมบูรณ์ (Absolute average deviation percentage, %AAD) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (3.3)

$$\%AAD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|K_G a_{v, \text{experiment}} - K_G a_{v, \text{predicted}}|}{K_G a_{v, \text{experiment}}} \times 100\% \quad (3.3)$$

เมื่อ N	คือ	จำนวนของชุดการทดลอง
$K_G a_{v, \text{experiment}}$	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมที่ได้จากการทดลอง (กิโกลเมตรต่อลูกบาศก์เมตร-ชั่วโมง ⁻¹ -กิโกลปาสกาล ⁻¹)
$K_G a_{v, \text{predicted}}$	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมที่คำนวณได้จากสหสัมพันธ์ (กิโกลเมตรต่อลูกบาศก์เมตร-ชั่วโมง ⁻¹ -กิโกลปาสกาล ⁻¹)

ในงานวิจัยนี้จะมีการสหสัมพันธ์ทั้งหมด 2 แบบ ได้แก่ สหสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วย ANOVA ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์และอันตรกิริยาระหว่างพารามิเตอร์กับสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม และสหสัมพันธ์แบบกึ่งเอมพิริคัล (Semi-empirical correlation) ซึ่งพัฒนาจากทฤษฎีสองฟิล์มโดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมกับความต้านทานของการถ่ายโอนมวลในฟิล์มของเหลวที่มีการดูดซึมเชิงเคมีและเป็นกระบวนการที่ควบคุมในฟิล์มของเหลว ดังสมการ (3.4) [15]

$$K_G a_v \propto k_L^o \quad (3.4)$$

โดยสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคของเหลวสำหรับการดูดซึมที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี (k_L^o) เป็นฟังก์ชันกับฟลักซ์ของเหลวขาเข้า (ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร-วินาที) ยกกำลัง b โดยที่เลขกำลัง b เป็นค่าคงตัวที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0.3 ถึง 0.7 [43] และ Enhancement factor (I) ดังแสดงในสมการ (3.5) [29]

$$I \approx \frac{(\alpha_{\text{eq}} - \alpha)C}{P_{\text{CO}_2}} \quad (3.5)$$

- เมื่อ α_{eq} คือ CO_2 loading ของสารละลายเอมีนที่สมดุลกับความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า (โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน)
- α คือ CO_2 loading ของสารละลายเอมีนขาเข้า (โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน)
- C คือ ความเข้มข้นของสารละลายเอมีนขาเข้า (กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร)
- P_{CO_2} คือ ความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ในหอดูดซึมที่จุดตั้งตัวอย่าง (กิโลปาสกาล)

เมื่อจัดรูปสมการทั้งหมดในอยู่ในฟังก์ชันของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมจะได้สมการ (3.6) ซึ่งจะนำไปใช้สร้างกราฟในโปรแกรม Microsoft excel เพื่อสร้างสหสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมต่อไป

$$K_G a_v \propto L^b \left[\frac{(\alpha_{eq} - \alpha)C}{P_{\text{CO}_2}} \right] \quad (3.6)$$

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเอมีนภายในหอดูดซึมแบบบรรจุ โดยแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ผลของพารามิเตอร์ต่อสมรรถนะการถ่ายโอนมวลของการดูดซึม คาร์บอนไดออกไซด์ การวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิติ การทำนายสมรรถนะการถ่ายโอนมวล และสมรรถนะของเอมีนผสมสามชนิด AMP-PZ-MEA

4.1 ผลของพารามิเตอร์ต่อสมรรถนะการถ่ายโอนมวลของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์

สมรรถนะการถ่ายโอนมวลในเชิงสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบ หอดูดซึม นอกจากนี้ ผลของพารามิเตอร์ต่อสมรรถนะการถ่ายโอนมวลยังเป็นข้อมูลสำคัญที่ใช้สำหรับการ ดำเนินการของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในหอดูดซึม เพื่อให้เกิดการถ่ายโอนมวล อย่างมีประสิทธิภาพ กล่าวคือ มีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและประสิทธิภาพการกำจัด คาร์บอนไดออกไซด์สูง จากการทดลองทั้งหมด 27 การทดลองด้วยสารละลาย AMP-PZ-MEA ดังแสดง ในตารางที่ 3.5 พบว่า มีร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมบูรณ์ของการดูดมวล ตามสมการ 3.1 เป็น 4.08 และอีก 27 การทดลองด้วยสารละลาย MEA มีร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมบูรณ์ของการดูดมวล ร้อยละ 3.71 ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้สำหรับการศึกษาการถ่ายโอนมวลในหอดูดซึม (น้อยกว่าร้อยละ 10) [31] โดยความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้นอาจมาจากการทดลองหรือการวัดค่าความเข้มข้น คาร์บอนไดออกไซด์ที่คลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง จึงกล่าวได้ว่าข้อมูลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้ มีค่าถูกต้องและน่าเชื่อถือ

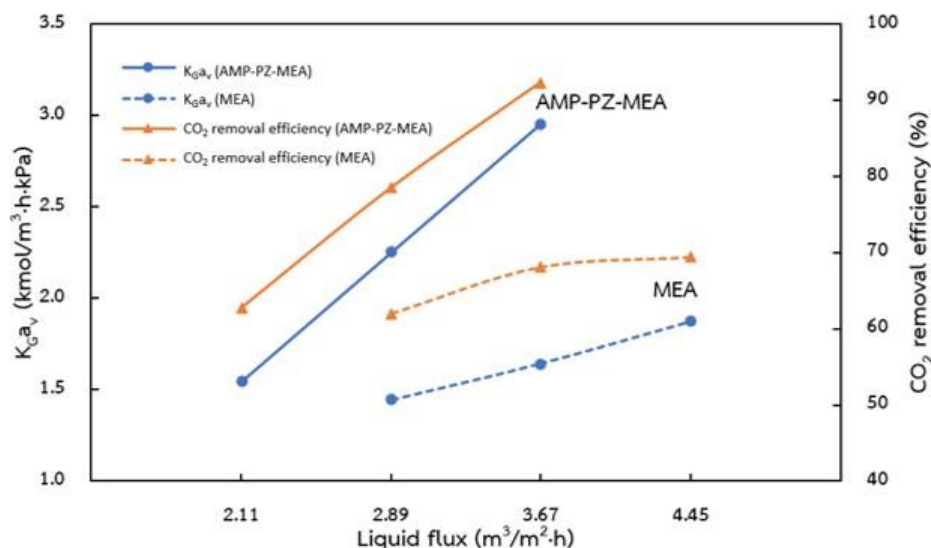
งานวิจัยนี้ศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อสมรรถนะการถ่ายโอนมวลของการดูดซึม คาร์บอนไดออกไซด์ภายในหอดูดซึม โดยพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา ได้แก่ พลิกซ์ของเหลวขาเข้า พลิกซ์แก๊สขาเข้า อัตราส่วนเชิงโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเอมีนในสารละลายขาเข้า และสัดส่วน ความสูงของจุดตั้งตัวอย่างต่อความสูงของหอดูดซึม ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระหว่างระหว่าง สารละลายเอมีนผสมสามชนิดที่มีอัตราส่วนความเข้มข้น 1.5 โมลาร์ AMP: 1.5 โมลาร์ PZ: 3 โมลาร์ MEA และสารละลายเอมีนเกณฑ์เปรียบเทียบ MEA ความเข้มข้น 5 โมลาร์ ในเชิงสัมประสิทธิ์ การถ่ายโอนมวลรวมและประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนี้

4.1.1. ฟลักซ์ของเหลวขาเข้า

ผลของฟลักซ์ของเหลวขาเข้าต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับสารละลาย AMP-PZ-MEA และสารละลายเกณฑ์เปรียบเทียบ MEA แสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่า ฟลักซ์ของเหลวขาเข้าส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการเพิ่มฟลักซ์ของเหลวขาเข้าส่งผลให้ K_{GaV} และประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นสำหรับสารละลาย AMP-PZ-MEA และ สารละลาย MEA เนื่องจากการเพิ่มฟลักซ์ของเหลวขาเข้าเป็นการเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายเอมีนต่อพื้นที่หน้าตัดของหอดูดซึม จึงทำให้มีโมเลกุลของเอมีนอิสระที่เกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ (Free amine molecules) เพิ่มขึ้น กล่าวคือ มีเอมีนที่ไวปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น จึงส่งผลให้ K_{GaV} และประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นนั่นเอง นอกจากนี้ การเพิ่มฟลักซ์ของเหลวขาเข้าเป็นการเพิ่มความปั่นป่วนของการไหลในวัฏภาคของเหลว [30] ซึ่งส่งผลให้ความต้านทานในฟิล์มของเหลวลดลง จึงทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคของเหลวเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมในกระบวนการที่ควบคุมโดยฟิล์มของเหลว ดังสมการ (2.41) อีกทั้ง การเพิ่มฟลักซ์ของเหลวขาเข้ายังเป็นการเพิ่มการสัมผัสระหว่างสารละลายเอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งทำให้การถ่ายโอนมวลจากวัฏภาคแก๊สเข้าสู่วัฏภาคของเหลวมีมากขึ้น เนื่องจากการกระจายตัวของสารละลายบนพื้นผิวสัมผัสของวัสดุบรรจุเพิ่มขึ้น [31, 44] จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น พบว่า การเพิ่มฟลักซ์ของเหลวขาเข้าทำให้คาร์บอนไดออกไซด์ถูกดูดซึมมากขึ้น ดังนั้น ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์จึงสูงขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.1

จากรูปที่ 4.1 พบว่า สารละลาย AMP-PZ-MEA มี K_{GaV} และประสิทธิภาพของการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าสารละลาย MEA อย่างชัดเจน ทั้งนี้ เป็นที่น่าสนใจว่าลักษณะการเพิ่มขึ้นของ K_{GaV} และประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อฟลักซ์ของเหลวขาเข้าสูงขึ้นสำหรับสารละลาย AMP-PZ-MEA แตกต่างจากสารละลาย MEA กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของ K_{GaV} และประสิทธิภาพของการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ของสารละลาย AMP-PZ-MEA เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงในช่วงฟลักซ์ของเหลวขาเข้า 2.11 ถึง 3.67 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร-ชั่วโมง⁻¹ แต่การเพิ่มขึ้นดังกล่าวของสารละลาย MEA มีแนวโน้มเข้าใกล้ค่าคงตัวค่าหนึ่งในช่วงฟลักซ์ของเหลวขาเข้า 2.89 ถึง 4.45 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร-ชั่วโมง⁻¹ ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องผลการวิจัยที่ปรากฏในวรรณกรรมต่าง ๆ ซึ่งพบว่า การเพิ่มฟลักซ์ของเหลวขาเข้าส่งผลดีต่อสมรรถนะ

การถ่ายโอนมวล แต่เมื่อเพิ่มฟลักซ์ของเหลวขาเข้าถึงจุดหนึ่งซึ่งมีของเหลวมากเกินไปจนความจำเป็น การเพิ่มขึ้นของสมรรถนะการถ่ายโอนมวลจะเริ่มลดลงและมีแนวโน้มเข้าใกล้ค่าคงตัว [15]



รูปที่ 4.1 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับ สารละลาย AMP-PZ-MEA และ MEA ที่ฟลักซ์ของเหลวขาเข้าต่าง ๆ

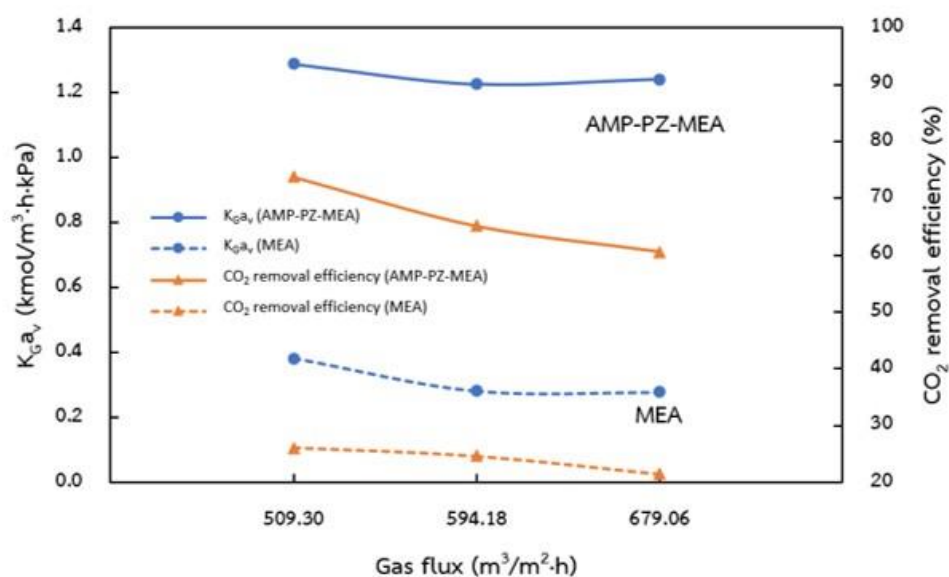
(ภาวะดำเนินการ: ฟลักซ์แก๊สขาเข้า 679.06 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร·ชั่วโมง⁻¹
CO₂ loading 0.25 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน และ h/h_0 เป็น 0.25)

4.1.2. ฟลักซ์แก๊สขาเข้า

รูปที่ 4.2 แสดงผลของฟลักซ์แก๊สขาเข้าต่อ K_{Ga_v} และประสิทธิภาพของการกำจัด คาร์บอนไดออกไซด์ของการดูดซึมด้วยสารละลาย AMP-PZ-MEA และ MEA ผลการทดลอง พบว่า การเปลี่ยนฟลักซ์แก๊สขาเข้าส่งผลต่อ K_{Ga_v} น้อยมาก โดยการเพิ่มฟลักซ์แก๊สขาเข้าจาก 509.30 เป็น 679.06 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร·ชั่วโมง⁻¹ ทำให้ K_{Ga_v} ลดจาก 1.29 เป็น 1.23 กิโลโมล ต่อลูกบาศก์เมตร·ชั่วโมง⁻¹·กิโลปาสกาล⁻¹ สำหรับสารละลาย AMP-PZ-MEA และลดจาก 0.38 เป็น 0.28 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร·ชั่วโมง⁻¹·กิโลปาสกาล⁻¹ สำหรับสารละลาย MEA ซึ่งเป็นการลดลง เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้ เนื่องจากการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเอมีนเป็นกระบวนการ ที่ควบคุมโดยฟิล์มของเหลว ความต้านทานในฟิล์มแก๊สจึงมีผลต่อความต้านทานของการถ่ายโอนมวล น้อยหรือน้อย [45] อย่างไรก็ตาม Gao และคณะ [41] เสนอว่า การเพิ่มฟลักซ์แก๊สขาเข้า เป็นการลดเวลา คงอยู่ของคาร์บอนไดออกไซด์ในหอดูดซึม สำหรับกรณีที่มีการดูดซึมดำเนินการที่ฟลักซ์แก๊สขาเข้า ต่ำมาก จะเห็นอย่างชัดเจนว่าฟลักซ์แก๊สขาเข้าไม่ส่งผลต่อ K_{Ga_v} แต่การดำเนินการที่ฟลักซ์แก๊สขาเข้า

สูงขึ้น จะพบว่า K_{Ga} อาจลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มฟลักซ์แก๊สขาเข้า ซึ่งผลการทดลองจากงานวิจัยนี้สอดคล้องกับข้อเสนอของ Gao และคณะ [41] ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าการเพิ่มฟลักซ์ของแก๊สจึงส่งผลอย่างไม่มีนัยสำคัญต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม

ดังที่กล่าวแล้วว่า การเพิ่มฟลักซ์แก๊สขาเข้า เป็นการลดเวลาคงอยู่ของคาร์บอนไดออกไซด์ในหอดูดซึม คาร์บอนไดออกไซด์จึงมีโอกาสเกิดปฏิกิริยากับเอมีนน้อยลง จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง [41] โดยการเพิ่มฟลักซ์แก๊สขาเข้าจาก 509.30 เป็น 679.06 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร·ชั่วโมง⁻¹ ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจากร้อยละ 73.78 เป็น 60.50 และ จากร้อยละ 26.10 เป็น 21.44 สำหรับสารละลาย AMP-PZ-MEA และ MEA ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.2 เมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการดูดซึมระหว่างสารละลายเอมีนทั้งสอง พบว่า K_{Ga} และประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ของสารละลาย AMP-PZ-MEA มีค่าสูงกว่าสารละลาย MEA

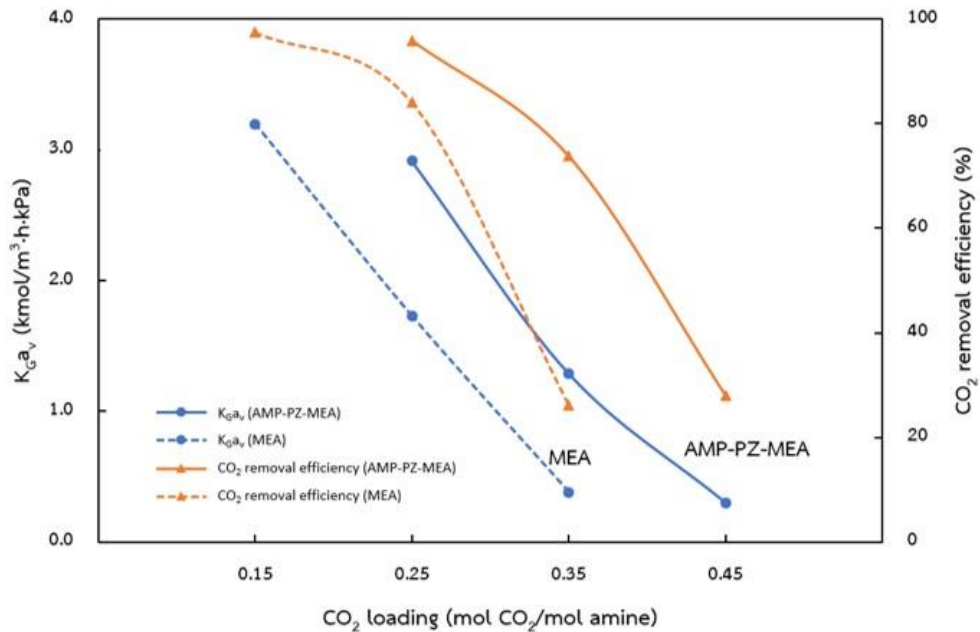


รูปที่ 4.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและประสิทธิภาพของการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับสารละลาย AMP-PZ-MEA และ MEA ที่ของฟลักซ์แก๊สขาเข้าต่าง ๆ (ภาวะดำเนินการ: ฟลักซ์ของเหลวขาเข้า 3.67 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร·ชั่วโมง⁻¹ CO₂ loading 0.35 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน และ h/h_0 เป็น 0.25)

4.1.3. อัตราส่วนเชิงโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเอมีนขาเข้า

ผลของอัตราส่วนเชิงโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเอมีนขาเข้า หรือ CO_2 loading ของสารละลายขาเข้า ต่อสมรรถนะการถ่ายโอนมวลรวมของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย AMP-PZ-MEA และ MEA แสดงดังรูปที่ 4.3 ผลการศึกษา พบว่า การเพิ่ม CO_2 loading ของสารละลายขาเข้าส่งผลให้ K_{Ga} และประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเป็นอย่างมากสำหรับสารละลายเอมีนทั้งสอง เนื่องจากการเพิ่ม CO_2 loading เป็นการลดจำนวนโมเลกุลเอมีนที่เกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ในวัฏภาคของเหลว [40] เป็นผลให้ K_{Ga} และประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์น้อยลงตามไปด้วย

จากรูปที่ 4.3 พบว่า การเพิ่ม CO_2 loading ของสารละลายขาเข้าจาก 0.25 เป็น 0.45 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน สำหรับสารละลาย AMP-PZ-MEA และ จาก 0.15 เป็น 0.35 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน สำหรับสารละลาย MEA ทำให้ K_{Ga} ลดลงร้อยละ 89.69 และ 88.13 ตามลำดับ และ ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงร้อยละ 70.74 และ 73.88 ตามลำดับ ทั้งนี้ ควรสังเกตว่า เอมีนขาเข้าที่มี CO_2 loading สูง (0.45 และ 0.35 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน สำหรับสารละลาย AMP-PZ-MEA และ MEA ตามลำดับ) จะมี K_{Ga} ต่ำมาก (0.30 และ 0.38 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร-ชั่วโมง⁻¹-กิโลปาสกาล⁻¹ สำหรับสารละลาย AMP-PZ-MEA และ MEA ตามลำดับ แสดงค่าดังแสดงในรูปที่ 4.3) เนื่องจาก CO_2 loading ดังกล่าวมีค่าเข้าใกล้ความจุการดูดซึมที่ภาวะสมดุล (0.61 และ 0.53 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน สำหรับสารละลาย AMP-PZ-MEA และ MEA ตามลำดับ) [9] ทำให้การถ่ายโอนมวลเกิดได้น้อยมาก ในทางตรงข้าม การใช้สารละลายขาเข้าที่มี CO_2 loading ต่ำ (0.25 และ 0.15 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน สำหรับสารละลาย AMP-PZ-MEA และ MEA ตามลำดับ) ส่งผลให้มี K_{Ga} และประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูงมาก (ร้อยละ 95.88 และ ร้อยละ 97.42 สำหรับสารละลาย AMP-PZ-MEA และ MEA ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.3) อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์จะลดลงและมีแนวโน้มคงตัวเมื่อลด CO_2 loading ของสารละลายขาเข้า สำหรับทั้งสารละลาย AMP-PZ-MEA และ MEA ดังรูปที่ 4.3 ทั้งนี้ การลด CO_2 loading ของสารละลายขาเข้าให้ต่ำลงมาก ส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูสารละลาย ซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูงขึ้นด้วย



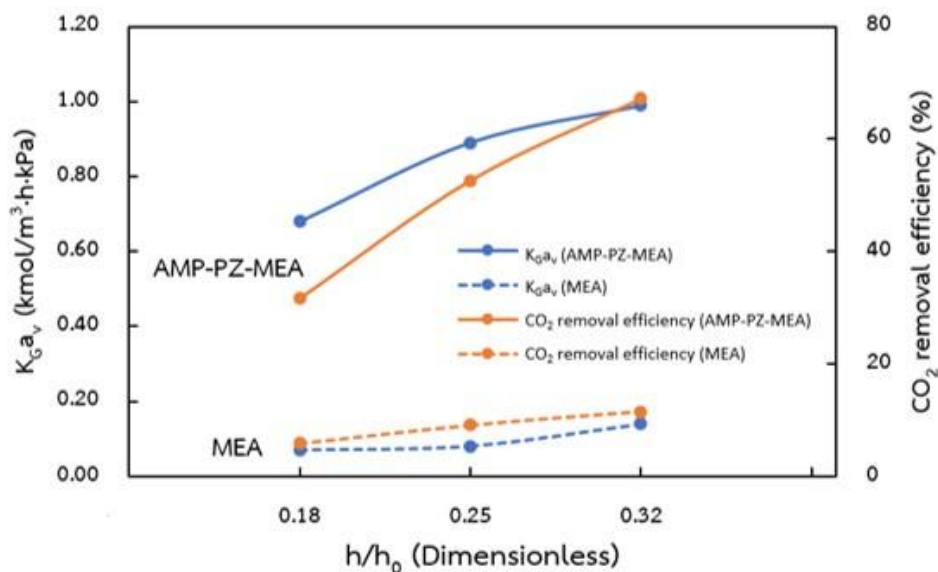
รูปที่ 4.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่ CO₂ loading ต่าง ๆ สำหรับสารละลาย AMP-PZ-MEA และ MEA

(ภาวะดำเนินการ: พลั๊กซ์ของเหลวขาเข้า 3.67 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร-ชั่วโมง⁻¹

พลั๊กซ์แก๊สขาเข้า 509.30 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร-ชั่วโมง⁻¹ และ h/h_0 เป็น 0.25)

4.1.4. สัดส่วนความสูงของจุดดิ่งตัวอย่างต่อความสูงของหอดูดซึม

สัดส่วนความสูงของจุดดิ่งตัวอย่างต่อความสูงของหอดูดซึม หรือ h/h_0 เป็นพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับสัดส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊ส ซึ่งส่งผลต่อ $K_{Ga,v}$ และประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ จากรูปที่ 4.4 พบว่า เมื่อ h/h_0 สูงขึ้น สัดส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊สจะน้อยลง เนื่องจากการดูดซึมในหอดูดซึมเป็นการไหลแบบสวนทาง เมื่อความสูงจากกันหอดูดซึมเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊สจึงลดลง ส่งผลให้ $K_{Ga,v}$ และประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ทั้งสารละลาย AMP-PZ-MEA และ MEA



รูปที่ 4.4 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับสารละลาย AMP-PZ-MEA และ MEA ที่ h/h_0 ต่างๆ

(ภาวะดำเนินการ: ฟลักซ์ของเหลวขาเข้า 2.89 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร·ชั่วโมง⁻¹

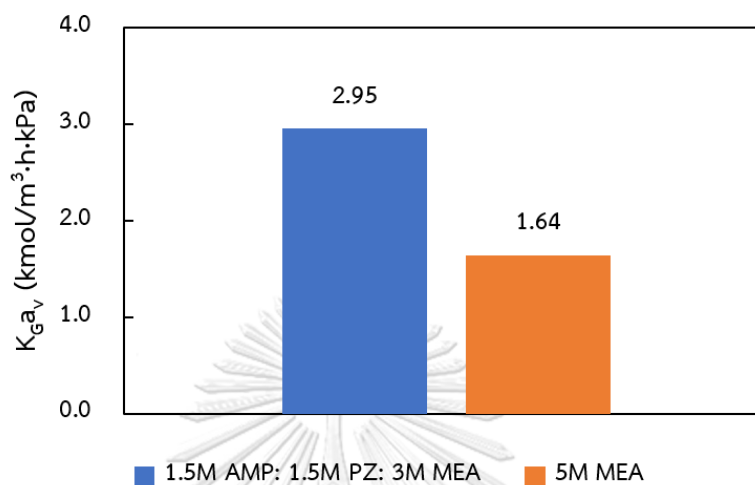
ฟลักซ์แก๊สขาเข้า 594.18 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร·ชั่วโมง⁻¹

และ CO₂ loading 0.35 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน)

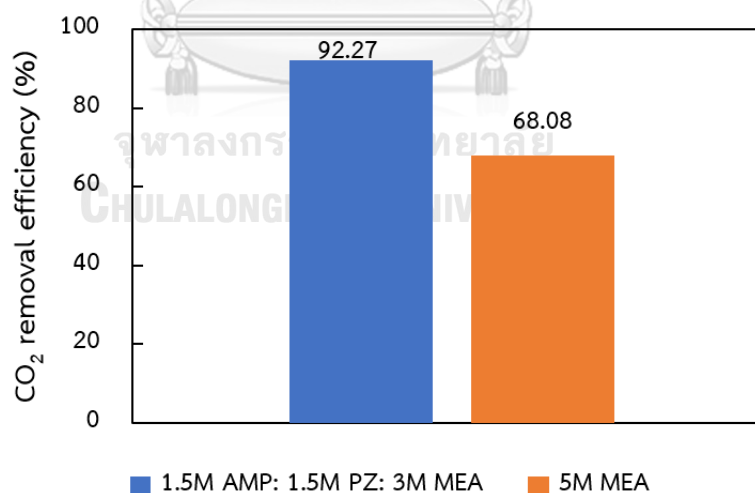
4.1.5. สมรรถนะการถ่ายโอนมวลของการดูดซึมของสารละลาย AMP-PZ-MEA และ MEA

รูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ฟลักซ์ของเหลวขาเข้า 3.67 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร·ชั่วโมง⁻¹ ฟลักซ์แก๊สขาเข้า 509.30 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร·ชั่วโมง⁻¹ CO₂ loading ของสารละลายขาเข้า 0.25 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน และ h/h_0 เป็น 0.25 พบว่า สารละลาย AMP-PZ-MEA มี $K_{Ga,v}$ สูงกว่าสารละลาย MEA 1.8 เท่า และมีประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าสารละลาย MEA 1.4 เท่า ทั้งนี้ เนื่องจากสารละลาย AMP-PZ-MEA เป็นสารละลายเอมีนผสมซึ่งรวมจุดเด่นของเอมีนแต่ละชนิดไว้ด้วยกัน และลดจุดด้อยของเอมีนอีกชนิดหนึ่ง [3] ผลการทดลองในรูปที่ 4.1 ถึง 4.6 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า สารละลาย AMP-PZ-MEA มีสมรรถนะการถ่ายโอนมวลทั้งในเชิงสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าสารละลาย MEA ในทุกการทดลอง เนื่องจากเอมีนองค์ประกอบ PZ มีความไวปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์สูงมากเมื่อเทียบกับ MEA [36] จึงส่งผลให้มีการถ่ายโอนมวล

ของคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลาย AMP-PZ-MEA ได้มากขึ้น ดังนั้น สารละลายเอมีนผสมสามชนิด AMP-PZ-MEA จึงเป็นสารละลายเอมีนที่มีศักยภาพในเชิงสมรรถนะการถ่ายโอนมวลดีกว่าสารละลายเกณฑ์เปรียบเทียบ MEA อย่างมาก



รูปที่ 4.5 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของสารละลาย AMP-PZ-MEA และ MEA (ภาวะดำเนินการ: ฟลักซ์ของเหลวขาเข้า 3.67 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร·ชั่วโมง⁻¹ ฟลักซ์แก๊สขาเข้า 509.30 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร·ชั่วโมง⁻¹ CO₂ loading 0.25 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน และ h/h₀ เท่ากับ 0.25)



รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ของสารละลาย AMP-PZ-MEA และ MEA (ภาวะดำเนินการ: ฟลักซ์ของเหลวขาเข้า 3.67 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร·ชั่วโมง⁻¹ ฟลักซ์แก๊สขาเข้า 509.30 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร·ชั่วโมง⁻¹ CO₂ loading 0.25 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน และ h/h₀ เท่ากับ 0.25)

4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิติ

ผลการทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย AMP-PZ-MEA ที่ได้จากการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบสามระดับ ตามหัวข้อที่ 3.5 ถูกนำมาวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อพิจารณาอิทธิพลของพารามิเตอร์และอันตรกิริยาระหว่างพารามิเตอร์ที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมรรถนะการถ่ายโอนมวลของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ทั้งในเชิงสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีพารามิเตอร์หลักที่ทำการศึกษทั้งหมด 4 พารามิเตอร์ ได้แก่ ฟลักซ์สารละลายขาเข้า (A) ฟลักซ์แก๊สขาเข้า (B) CO₂ loading ของสารละลายขาเข้า (C) และ h/h₀ (D) แต่ละพารามิเตอร์ถูกแบ่งออกเป็น 3 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ระดับของพารามิเตอร์ในการศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย AMP-PZ-MEA

ตัวแปรดำเนินการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ระดับของปัจจัย		
			-1	0	1
ฟลักซ์ของเหลวขาเข้า	A	ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร·วินาที ⁻¹	2.11	2.89	3.67
ฟลักซ์แก๊สขาเข้า	B	ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร·วินาที ⁻¹	509.30	594.18	679.06
CO ₂ loading ของเอมีนขาเข้า	C	โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน	0.25	0.35	0.45
h/h ₀	D	เมตรต่อเมตร	0.18	0.25	0.32

การวิเคราะห์ข้อมูลเป็นการวิเคราะห์เชิงสถิติด้วยวิธี ANOVA ซึ่งพิจารณาผลด้วย P-Value ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 ถึงจะยอมรับผลการทดลองนั้นได้ ดังนั้น พารามิเตอร์ที่มี P-value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่า พารามิเตอร์นั้นส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมรรถนะการถ่ายโอนมวลของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ถ้าหากพารามิเตอร์ใดมี P-value เท่ากับหรือมากกว่า 0.05 แสดงว่า พารามิเตอร์นั้นมีผลต่อสมรรถนะการถ่ายโอนมวลของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์อย่างไม่มีนัยสำคัญ

4.2.1. สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม

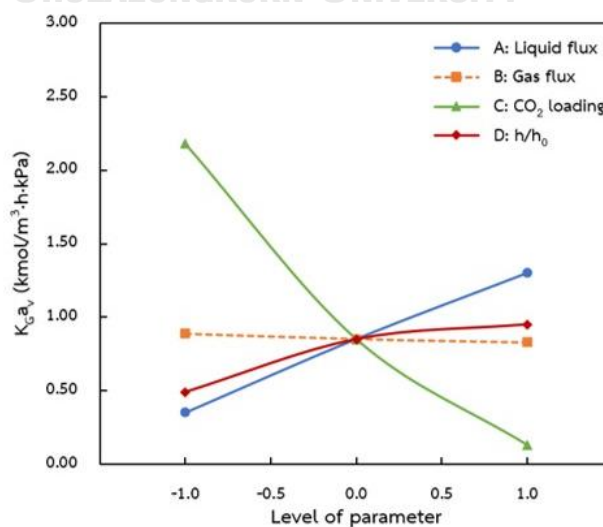
ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม แสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า พารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อ K_{Ga} อย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ พลิกซ์ของเหลวขาเข้า (A) CO_2 loading ของสารละลายขาเข้า (C) h/h_0 (D) อันตรกิริยาระหว่าง พลิกซ์ของเหลวขาเข้ากับ CO_2 loading ของสารละลายขาเข้า (AC) อันตรกิริยาระหว่าง CO_2 loading ของสารละลายขาเข้ากับ h/h_0 (CD) กำลังสองของ CO_2 loading ของสารละลายขาเข้า (C^2) และกำลังสองของ h/h_0 (D^2) นอกจากนี้ ความสำคัญของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อ K_{Ga} เรียงลำดับ จากมากไปน้อยตามร้อยละส่วนร่วม (Contribution percentage) ได้แก่ CO_2 loading ของสารละลายขาเข้า (C) พลิกซ์ของเหลวขาเข้า (A) อันตรกิริยาระหว่างพลิกซ์ของเหลวกับ CO_2 loading ของสารละลายขาเข้า (AC) กำลังสองของ CO_2 loading ของสารละลายขาเข้า (C^2) h/h_0 (D) กำลังสองของ h/h_0 (D^2) และอันตรกิริยาระหว่าง CO_2 loading ของสารละลายขาเข้ากับ h/h_0 (CD)

ตารางที่ 4.2 ANOVA ของปัจจัยที่ส่งผลต่อ K_{Ga} สำหรับการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย สารละลาย AMP-PZ-MEA

Source	Sum of squares	df	Mean square	Contribution percentages	F-value	P-value
Model	59.9340	7	8.5620		128.93	< 0.0001
A-A	7.6596	1	7.6596	12.78	115.34	< 0.0001
C-C	46.4557	1	46.4557	77.51	699.55	< 0.0001
D-D	1.2649	1	1.2649	2.11	19.05	< 0.0001
AC	2.2916	1	2.2916	3.82	34.51	< 0.0001
CD	0.3324	1	0.3324	0.55	5.01	0.0283
C^2	1.5919	1	1.5919	2.66	23.97	< 0.0001
D^2	0.3380	1	0.3380	0.56	5.09	0.0271
Residual	4.8478	73	0.0664			
Total	64.7818	80				

4.2.1.1 อิทธิพลของพารามิเตอร์หลักต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม

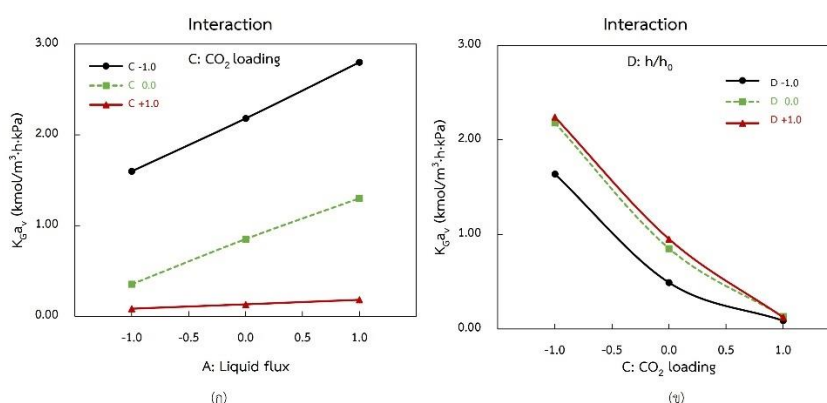
ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์หลักกับ K_{Ga_v} แสดงดังรูปที่ 4.7 ซึ่งพบว่า พลักซ์ของเหลวขาเข้า (A) และ h/h_0 (D) มีอิทธิพลต่อ K_{Ga_v} ในเชิงบวก ในขณะที่ CO_2 loading ของสารละลายขาเข้า (C) มีอิทธิพลในเชิงลบต่อ K_{Ga_v} และ พลักซ์แก๊สขาเข้า (B) ไม่ส่งผลต่อ K_{Ga_v} ซึ่งสอดคล้องกับวิเคราะห์ด้วย ANOVA ในตารางที่ 4.2 โดยพลักซ์ของเหลวขาเข้าที่ระดับสูง (+1) มีค่า K_{Ga_v} สูงกว่าพลักซ์ของเหลวขาเข้าที่ระดับต่ำกว่า และ การเพิ่มพลักซ์ของเหลวขาเข้าทำให้ K_{Ga_v} เพิ่มขึ้น ดังกล่าวแล้วในหัวข้อ 4.1.1 ส่วนการเพิ่ม CO_2 loading ของสารละลายขาเข้าส่งผลในเชิงลบต่อ K_{Ga_v} เป็นอย่างมากดังกล่าวแล้วในหัวข้อ 4.1.3 อย่างไรก็ตาม การลดลงดังกล่าวไม่ได้เป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งเป็นผลจากอิทธิพลของพารามิเตอร์กำลังสองของ CO_2 loading หาก CO_2 loading ของสารละลายขาเข้าอยู่ในระดับต่ำ (-1) K_{Ga_v} จะมีค่าสูงมาก แต่เมื่อ CO_2 loading ของสารละลายขาเข้ามีระดับสูง (+1) ซึ่งค่า CO_2 loading เข้าใกล้ความจุการดูดซึมที่สมดุลของสารละลาย AMP-PZ-MEA (0.61 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน) จึงทำให้ K_{Ga_v} ลดลงเป็นอย่างมาก จนลู่เข้าใกล้ศูนย์ สำหรับอิทธิพลของพารามิเตอร์หลัก h/h_0 ซึ่งมีผลของกำลังสองของ h/h_0 ทำให้การเพิ่มขึ้นของ K_{Ga_v} เมื่อเพิ่ม h/h_0 มีความสัมพันธ์ไม่เป็นเส้นตรง กล่าวคือ h/h_0 ที่ระดับต่ำ (-1) การเพิ่มของ K_{Ga_v} จะมากกว่า h/h_0 ที่ระดับสูง (+1) ดังรูปที่ 4.7 เนื่องจากเมื่อ h/h_0 เพิ่มขึ้น สัดส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊สจะน้อยลง เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์เกิดปฏิกิริยากับสารละลายเอมีน จึงทำให้แรงขับเคลื่อนการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง รวมถึงความชันของความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เทียบกับความสูงของหอดูดซึม ($\frac{dY_{A,G}}{dz}$) ลดลง K_{Ga_v} จึงลดลงตามไปด้วย ดังจะเห็นว่า K_{Ga_v} ที่ h/h_0 ระดับกลาง (0) มีค่าใกล้เคียงกับที่ h/h_0 ระดับสูง (+1)



รูปที่ 4.7 ผลกระทบของพารามิเตอร์หลักที่ส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม

4.2.1.2 อิทธิพลของอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่า อันตรกิริยาระหว่างระหว่างฟลักซ์สารละลายขาเข้า กับ CO_2 loading ของสารละลายขาเข้า (AC) และอันตรกิริยาระหว่าง CO_2 loading ของสารละลายขาเข้า กับ h/h_0 (CD) มีอิทธิพลต่อ K_{Ga_v} ดังแสดงในรูปที่ 4.8 สำหรับผลของอันตรกิริยาระหว่างระหว่างฟลักซ์สารละลายขาเข้ากับ CO_2 loading ของสารละลายขาเข้า (AC) พบว่า การเปลี่ยนระดับของ CO_2 loading ที่ฟลักซ์ของเหลวขาเข้าระดับต่ำ (-1) ส่งผลให้ค่า K_{Ga_v} เปลี่ยนแปลงน้อยกว่าการเปลี่ยนระดับของ CO_2 loading ที่ฟลักซ์ของเหลวขาเข้าระดับสูง (+1) ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ก) เนื่องจากการเพิ่มหรือลด CO_2 loading ส่งผลโดยตรงต่อปริมาณของเอมีนที่เกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ซึ่งการเปลี่ยนระดับของ CO_2 loading ที่การดำเนินการที่ฟลักซ์ของเหลวขาเข้าสูงย่อมส่งผลมากกว่าที่การดำเนินการที่ฟลักซ์ของเหลวขาเข้าต่ำ การดำเนินการที่ฟลักซ์ของเหลวขาเข้าระดับสูง (+1) และ CO_2 loading ของสารละลายขาเข้าระดับต่ำ (-1) ทำให้ K_{Ga_v} มีค่าสูง ดังรูปที่ 4.8 (ก) ส่วนผลของอันตรกิริยาระหว่าง CO_2 loading ของสารละลายขาเข้ากับ h/h_0 (CD) แสดงในรูปที่ 4.8 (ข) ผลการศึกษา พบว่า ที่ CO_2 loading ระดับสูง (+1) การเปลี่ยนระดับของ h/h_0 มีผลต่อ K_{Ga_v} น้อยกว่า ที่ CO_2 loading ระดับต่ำ (-1) เนื่องจากที่ CO_2 loading สูง สารละลายมีเอมีนที่เกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ได้น้อย จึงทำให้ K_{Ga_v} มีค่าต่ำมาก (เข้าใกล้ศูนย์ ดังรูปที่ 4.8(ข)) ดังนั้น การดำเนินการที่ CO_2 loading ของสารละลายขาเข้าระดับต่ำ (-1) และ h/h_0 ระดับสูง (+1) ทำให้ K_{Ga_v} สูง



รูปที่ 4.8 ผลกระทบของอันตรกิริยาระหว่างพารามิเตอร์ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม

(ก) อันตรกิริยาระหว่างฟลักซ์ของเหลวขาเข้ากับ CO_2 loading ของสารละลายขาเข้า (AC)

และ (ข) อันตรกิริยาระหว่าง CO_2 loading ของสารละลายขาเข้ากับ h/h_0 (CD)

4.2.2. ประสิทธิภาพของการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ 4.3 แสดงการวิเคราะห์พารามิเตอร์และอันตรกิริยาระหว่างพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย ANOVA พบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ คือ ฟลักซ์ของเหลวขาเข้า (A) ฟลักซ์แก๊สขาเข้า (B) CO₂ loading ของสารละลายขาเข้า (C) h/h₀ (D) อันตรกิริยาระหว่างฟลักซ์ของเหลวขาเข้ากับ CO₂ loading ของสารละลายขาเข้า (AC) และอันตรกิริยาระหว่าง CO₂ loading ของสารละลายขาเข้ากับ h/h₀ (CD) โดยลำดับความสำคัญของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถเรียงลำดับจากมากไปน้อยตามร้อยละส่วนร่วม คือ CO₂ loading ของสารละลายขาเข้า (C) ฟลักซ์ของเหลวขาเข้า (A) h/h₀ (D) ฟลักซ์แก๊สขาเข้า (B) อันตรกิริยาระหว่าง CO₂ loading ของสารละลายขาเข้ากับ h/h₀ (CD) และอันตรกิริยาระหว่างฟลักซ์ของเหลวกับ CO₂ loading (AC)

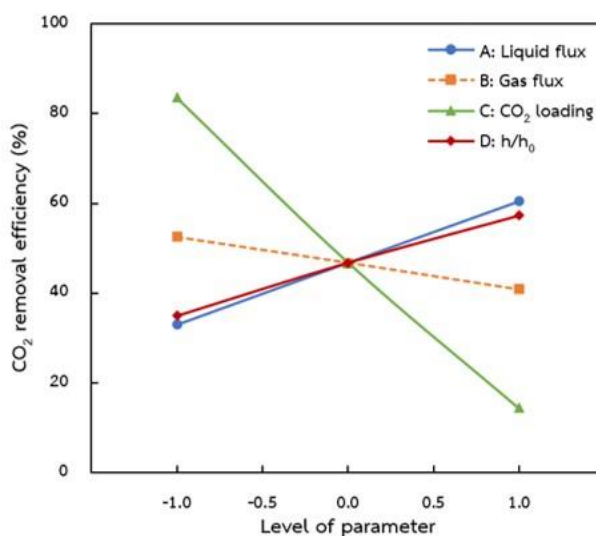
ตารางที่ 4.3 ANOVA ของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย AMP-PZ-MEA

Source	Sum of squares	df	Mean square	Contribution percentages	F-value	P-value
Model	7.54E+04	6	1.26E+04		292.94	< 0.0001
A-A	8.74E+03	1	8.74E+03	11.58	203.59	< 0.0001
B-B	1.43E+03	1	1.43E+03	1.89	33.30	< 0.0001
C-C	5.69E+04	1	5.69E+04	75.41	1325.47	< 0.0001
D-D	7.36E+03	1	7.36E+03	9.76	171.49	< 0.0001
AC	1.95E+02	1	1.95E+02	0.26	4.54	0.0364
CD	8.26E+02	1	8.26E+02	1.10	19.26	< 0.0001
Residual	3.18E+03	74	4.29E+01			
Total	7.86E+04	80				

4.2.2.1 อิทธิพลของพารามิเตอร์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์

รูปที่ 4.9 แสดงอิทธิพลของพารามิเตอร์หลักต่อประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ ผลการศึกษา พบว่า ฟลักซ์ของเหลวขาเข้า (A) และ h/h₀ (D) มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญ แต่ฟลักซ์แก๊สขาเข้า (B) และ CO₂ loading

ของสารละลายขาเข้า (C) มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในเชิงลบอย่างมีนัยสำคัญ โดยการเพิ่มฟลักซ์ของเหลวขาเข้าส่งผลให้ประสิทธิภาพของการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มฟลักซ์ของไหลเป็นการเพิ่มโมเลกุลของเอมีนอิสระที่เกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ จึงส่งผลให้มีการดูดซับดีขึ้น สัดส่วนเชิงโมลคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊สจึงลดลง ซึ่งตรงข้ามกับการเพิ่มระดับของ CO₂ loading ของสารละลายขาเข้า ทำให้ประสิทธิภาพของการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง เนื่องจากโมเลกุลเอมีนอิสระที่เกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเป็นอย่างมาก นอกจากนี้ การเพิ่มฟลักซ์แก๊สขาเข้า ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเช่นกัน เนื่องจากการเพิ่มฟลักซ์แก๊สขาเข้าเป็นการลดเวลาคงอยู่ของคาร์บอนไดออกไซด์ในหอดูดซับ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเอมีนลดลง ดังรูปที่ 4.9 ทั้งนี้ การเพิ่มระดับของ h/h_0 ส่งผลให้ประสิทธิภาพของการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น เนื่องจากที่ระดับความสูงเพิ่มขึ้น ทำให้สัดส่วนเชิงโมลคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊สลดลง เนื่องจากแก๊สผสมจะถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซับจากทางด้านล่าง จึงทำให้ถูกดูดซับด้วยเอมีนจากทางด้านล่าง ก่อนปล่อยแก๊สบำบัดออกทางด้านบนของหอดูดซับ

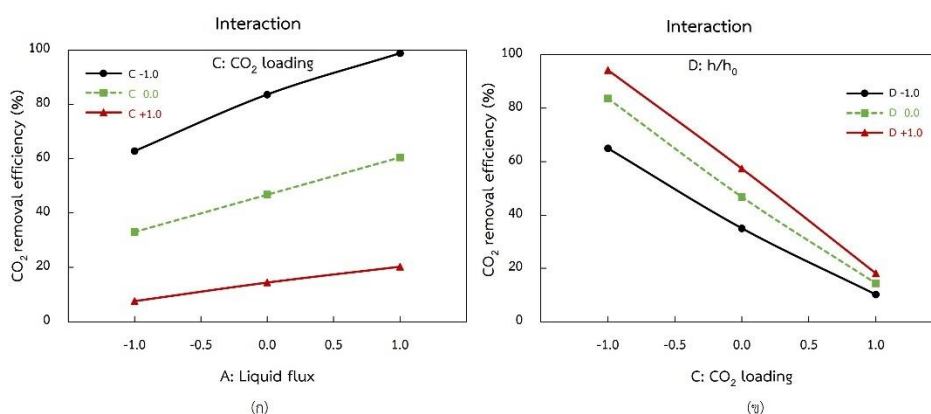


รูปที่ 4.9 ผลกระทบของพารามิเตอร์หลักต่อประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์

4.2.2.2 อิทธิพลของอันตรกิริยาระหว่างพารามิเตอร์ต่อประสิทธิภาพของการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์

อันตรกิริยาระหว่างพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ ได้แก่ อันตรกิริยาระหว่างฟลักซ์ของเหลวขาเข้า กับ CO₂ loading ของเอมีนขาเข้า (AC) และอันตรกิริยา

ระหว่าง CO₂ loading ของสารละลายขาเข้า กับ h/h₀ (CD) ดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่า การเพิ่มพลักซ์ของเหลวขาเข้าพร้อมกับการลด CO₂ loading ของสารละลายขาเข้า ส่งผลให้ประสิทธิภาพของการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ก) เนื่องจากการเพิ่มพลักซ์ของเหลวขาเข้า และการลด CO₂ loading ของสารละลายขาเข้า เป็นการเพิ่มโมเลกุลเอมีนอิสระที่เกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ จึงส่งผลให้การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นนั่นเอง ดังนั้นในการดำเนินการที่สมควรใช้พลักซ์ของเหลวขาเข้าในระดับสูง (+1) และ CO₂ loading ของสารละลายขาเข้าในระดับต่ำ (-1) นอกจากนี้ การเปลี่ยนระดับของ h/h₀ ที่ CO₂ loading ของสารละลายขาเข้าที่ระดับสูง (+1) ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าการเปลี่ยนระดับของ h/h₀ ที่ CO₂ loading ของสารละลายขาเข้าที่ระดับต่ำ (-1) ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ข) ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มหรือลดของโมเลกุลเอมีนที่เกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ตามที่กล่าวถึงแล้ว โดยการดำเนินการที่ CO₂ loading ของสารละลายขาเข้าในระดับต่ำ (-1) และ h/h₀ ในระดับสูง (+1) จะส่งผลให้ได้ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูง



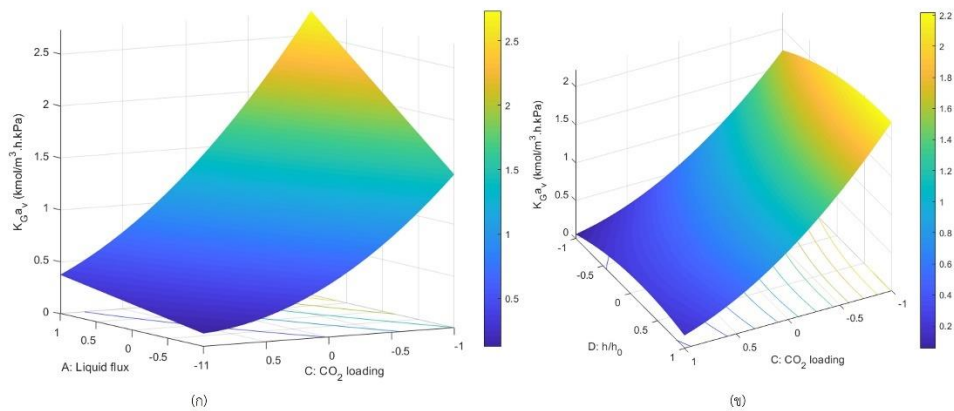
รูปที่ 4.10 ผลกระทบของอันตรกิริยาระหว่างพารามิเตอร์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์
(ก) อันตรกิริยาระหว่างพลักซ์ของเหลวขาเข้า กับ CO₂ loading ของสารละลายขาเข้า (AC) และ
(ข) อันตรกิริยาระหว่าง CO₂ loading ของสารละลายขาเข้า กับ h/h₀ (CD)

4.2.3. การหาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย AMP-PZ-MEA

การหาภาวะที่เหมาะสมที่สุด (Optimal condition) สำหรับกระบวนการ จะช่วยให้การดำเนินการนั้นได้รับผลตอบแทนตรงตามความต้องการ โดยทั่วไปมักจะทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์จากภาพพื้นผิวสามมิติ (3D surface) เพื่อหาระดับของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อผลตอบแทนด้วยการวิเคราะห์สีของคอนทัวร์ (Contour) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์จากภาพพื้นผิว

ของอันตรกิริยาระหว่างพารามิเตอร์ สำหรับภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเอมีนในหอดูดซึมแบบบรรจุในการศึกษานี้ คือ ภาวะที่ทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงที่สุด จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่า อันตรกิริยาระหว่างฟลักซ์ของเหลวขาเข้า กับ CO_2 loading ของสารละลายขาเข้า (AC) และ อันตรกิริยาระหว่าง CO_2 loading ของสารละลายขาเข้า กับ h/h_0 (CD) มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อทั้ง K_{Ga} และประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์

จากรูปที่ 4.11 พบว่า เมื่อพิจารณาร่วมกันทั้งสองอันตรกิริยา คอนทัวร์ของ K_{Ga} จะสูงที่สุดเมื่อฟลักซ์ของเหลวขาเข้าอยู่ในระดับสูง (+1) CO_2 loading ของสารละลายขาเข้าอยู่ในระดับต่ำ (-1) และ h/h_0 อยู่ในระดับสูง (+1) ซึ่งแสดงถึงภาวะที่ส่งผลให้ K_{Ga} มีค่าสูงที่สุด เนื่องจากเป็นภาวะที่ทำให้มีโมเลกุลเอมีนที่เกิดปฏิกิริยาได้มากที่สุด อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาคอนทัวร์ K_{Ga} ในรูปที่ 4.11 (ข) จะพบว่า K_{Ga} ที่ h/h_0 ในระดับกลาง (0) และ ระดับสูง (+1) มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อดำเนินการที่ CO_2 loading ของสารละลายขาเข้าอยู่ในระดับต่ำ (-1) แต่การประเมินสมรรถนะการถ่ายโอนมวลควรพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมด้วย ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบการดำเนินการทั้งสองข้างต้น พบว่า การดำเนินการที่ h/h_0 ระดับกลาง (0) มีประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าการดำเนินการที่ h/h_0 ในระดับสูง (+1) ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (ข) นอกจากนี้ ยังพบว่า คอนทัวร์ของประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์จะสูงที่สุดเมื่อฟลักซ์ของเหลวขาเข้าอยู่ในระดับสูง (+1) CO_2 loading ของสารละลายขาเข้าอยู่ในระดับต่ำ (-1) และ h/h_0 อยู่ในระดับสูง (+1) ดังรูป 4.12 (ก) และ (ข) ซึ่งภาวะดังกล่าวมีประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูงที่สุด และเมื่อพิจารณาร่วมกับพารามิเตอร์หลัก คือ ฟลักซ์แก๊สขาเข้า ในหัวข้อ 4.2.2.1 ซึ่งพบว่า ฟลักซ์แก๊สขาเข้าควรอยู่ในระดับต่ำ (-1) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ โดยจะเห็นได้ว่า ทั้ง K_{Ga} และประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มเดียวกัน ดังนั้น ภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย AMP-PZ-MEA คือ ฟลักซ์ของเหลวขาเข้า 3.67 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร-ชั่วโมง⁻¹ ฟลักซ์แก๊สขาเข้า 509.30 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร-ชั่วโมง⁻¹ CO_2 loading ของสารละลายขาเข้า 0.25 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน และ h/h_0 เป็น 0.32 ที่ทำให้ K_{Ga} และ ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูงที่สุด

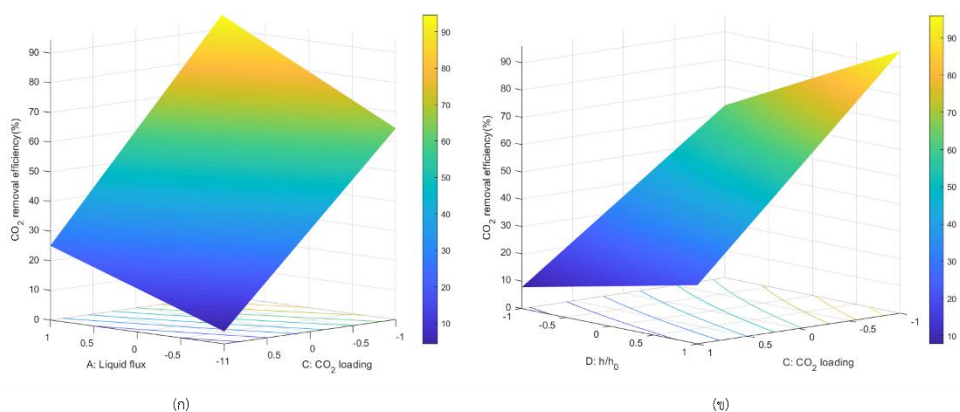


รูปที่ 4.11 พื้นผิวตอบสนองสามมิติของอันตรกิริยาที่ส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม

(ก) อันตรกิริยาระหว่างฟลักซ์ของเหลวขาเข้า กับ CO₂ loading ของสารละลายขาเข้า (AC)

และ (ข) อันตรกิริยาระหว่าง CO₂ loading ของสารละลายขาเข้ากับ h/h_0 (CD)

(ที่ฟลักซ์แก๊สขาเข้า 509.30 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร-ชั่วโมง⁻¹)



รูปที่ 4.12 พื้นผิวตอบสนองสามมิติของอันตรกิริยาที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์

(ก) อันตรกิริยาระหว่างฟลักซ์ของเหลวขาเข้า กับ CO₂ loading ของสารละลายขาเข้า (AC)

และ (ข) อันตรกิริยาระหว่าง CO₂ loading ของสารละลายขาเข้ากับ h/h_0 (CD)

(ที่ฟลักซ์แก๊สขาเข้า 509.30 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร-ชั่วโมง⁻¹)

4.3 การทำนายสมรรถนะการถ่ายโอนมวล

งานวิจัยนี้มีการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในหอดูดซึมแบบบรรจุมาสร้างสหสัมพันธ์เพื่อทำนายสมรรถนะการถ่ายโอนมวล โดยมีสหสัมพันธ์ 2 แบบ ได้แก่ สหสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วย ANOVA และสหสัมพันธ์แบบกึ่งเอมพิริคัล โดยสหสัมพันธ์

ที่ได้จะเป็นสมการที่ใช้ทำนายสมรรถนะการถ่ายโอนมวลของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย AMP-PZ-MEA ในหอดูดซับบรรจุ โดยมีวัสดูบรรจุแบบจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ Sulzer DX เท่านั้น

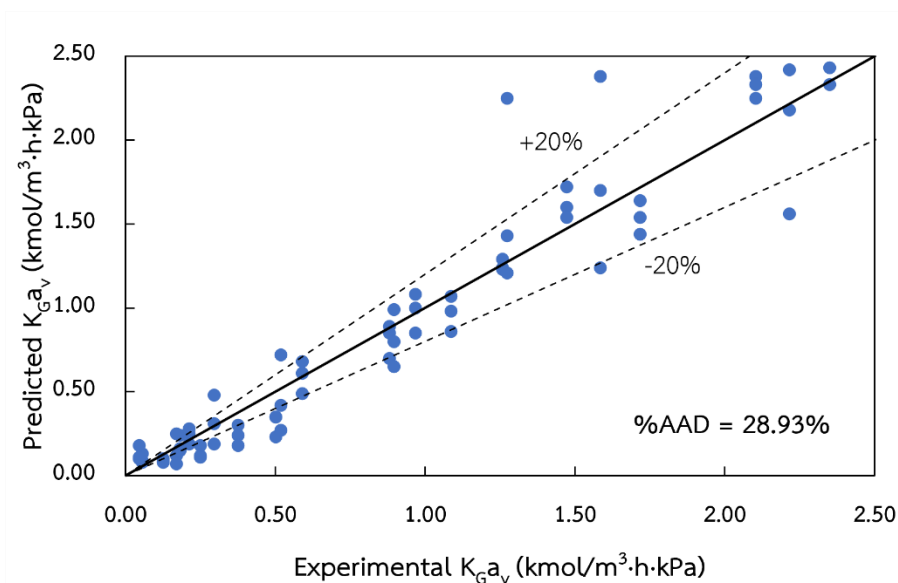
4.3.1. สหสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วย ANOVA

สหสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วย ANOVA เป็นการสร้างสหสัมพันธ์จากพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อสมรรถนะการถ่ายโอนมวลอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งพารามิเตอร์หลักและอันตรกิริยาระหว่างพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อผลตอบสนอง ด้วยการวิเคราะห์ด้วย ANOVA จากการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลสามระดับ

4.3.1.1 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม

จากการวิเคราะห์ด้วย ANOVA ในหัวข้อ 4.2.1 พบว่า พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อ K_{Ga} ได้แก่ พลิกซ์ของเหลวขาเข้า (A) CO_2 loading ของสารละลายขาเข้า (C) h/h_0 (D) อันตรกิริยาระหว่าง พลิกซ์ของเหลวขาเข้า กับ CO_2 loading ของสารละลายขาเข้า (AC) อันตรกิริยาระหว่าง CO_2 loading ของสารละลายขาเข้า กับ h/h_0 (CD) กำลังสองของ CO_2 loading ของสารละลายขาเข้า (C^2) และกำลังสองของ h/h_0 (D^2) เมื่อนำพารามิเตอร์เหล่านี้มาสร้างความสัมพันธ์ จะได้สมการทางคณิตศาสตร์ ดังสมการ (4.1) เพื่อใช้ทำนาย K_{Ga} โดยมีช่วงของพารามิเตอร์หลักทั้งสิ้น ดังตารางที่ 4.1 เมื่อเปรียบเทียบ K_{Ga} ที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณด้วยสมการ (4.1) พบว่า มีร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมบูรณ์ เป็น ร้อยละ 28.93 ดังแสดงในรูปที่ 4.13

$$K_{Ga} = -0.4153 + 1.617A - 17.2673C + 20.9737D - 3.2483AC - 13.7270CD + 29.7382C^2 - 27.9657D^2 \quad (4.1)$$

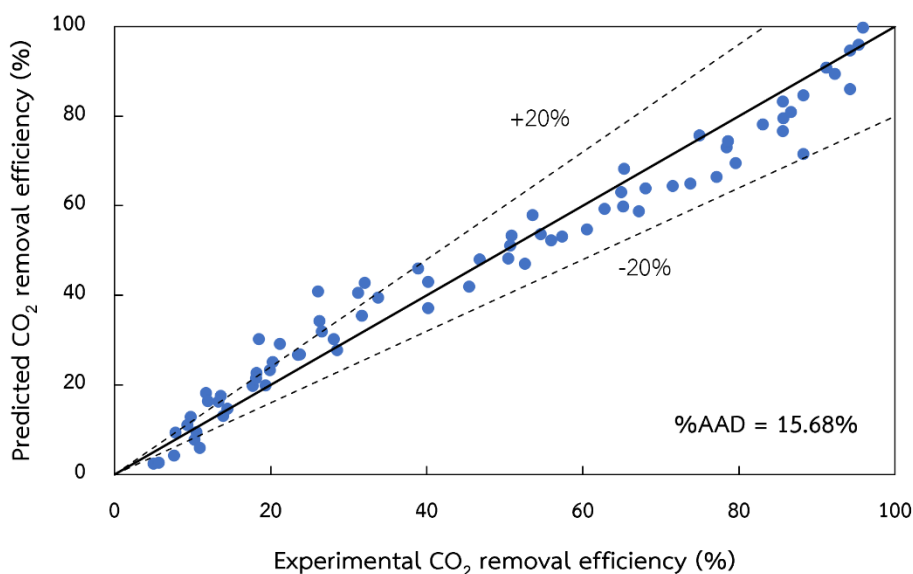


รูปที่ 4.13 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยสมการ (4.1)

4.3.1.2 ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์

ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่กล่าวถึงในงานวิจัยนี้เป็นประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่จุดดึงตัวอย่างตามความสูงของหอดูดูดซึม โดยมี h/h_0 เป็น 0.18 0.25 และ 0.32 ตามลำดับ โดยพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ ได้แก่ ฟลักซ์ของเหลวขาเข้า (A) ฟลักซ์แก๊สขาเข้า (B) CO_2 loading ของสารละลายขาเข้า (C) h/h_0 (D) อันตรกิริยาระหว่างฟลักซ์ของเหลวขาเข้า กับ CO_2 loading ของสารละลายขาเข้า (AC) และ อันตรกิริยาระหว่าง CO_2 loading ของสารละลายขาเข้า กับ h/h_0 (CD) จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วย ANOVA สามารถสร้างสมการทางคณิตศาสตร์จากความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์เหล่านี้ได้ดังสมการ (4.2) สำหรับทำนายประสิทธิภาพของการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีช่วงของพารามิเตอร์หลักทั้งสิ้น ดังตารางที่ 4.1 เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์จากการทดลองและผลการคำนวณด้วยสมการ (4.2) พบว่า สหสัมพันธ์ที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพเป็นที่น่าพอใจ โดยมีความคลื่อนเฉลี่ยสัมบูรณ์ประมาณร้อยละ 15.68 ดังแสดงในรูปที่ 4.14 สมการทางคณิตศาสตร์นี้จึงสามารถนำไปใช้สำหรับทำนายประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในหอดูดูดซึมด้วยเอมีนผสมสามชนิด AMP-PZ-MEA ได้

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 \text{ removal efficiency (\%)} = & 17.4446 + 26.8643A - 0.0606B - 66.7427C + 406.3305D \\ & - 29.9703AC - 684.4890CD \end{aligned} \quad (4.2)$$

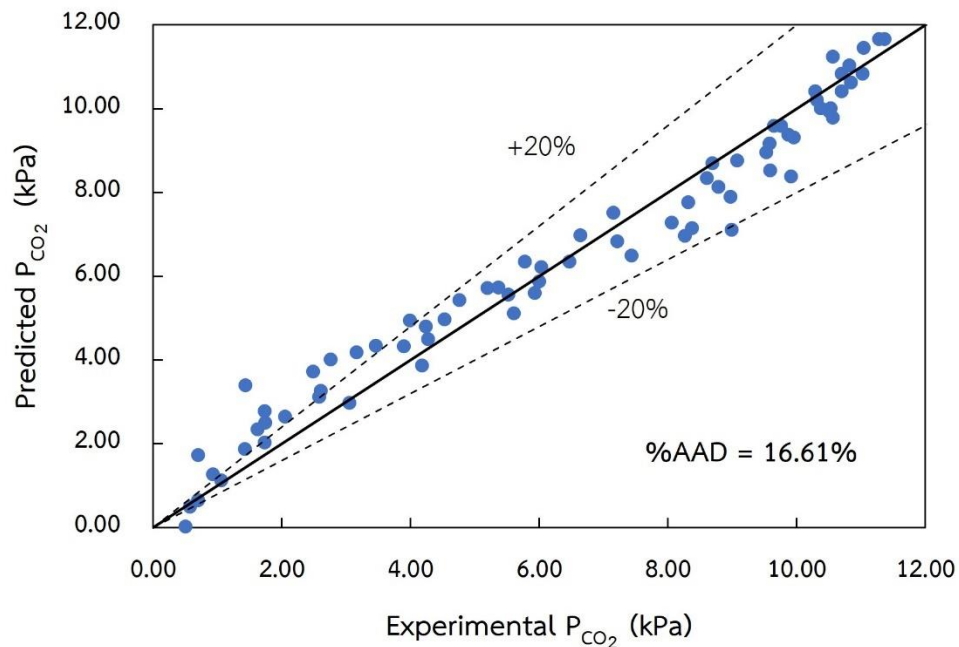


รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยสมการ (4.2)

4.3.1.3 ความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ที่จุดดึงตัวอย่าง

ความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ที่จุดดึงตัวอย่าง (P_{CO_2}) เป็นหนึ่งในผลตอบสนองที่เกิดจากการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในหอดูดซับ ซึ่งความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ที่จุดดึงตัวอย่างจะลดลงตามความสูงของหอดูดซับ ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ จากการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วย ANOVA พบว่า พารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ ได้แก่ ฟลักซ์ของเหลวขาเข้า (A) ฟลักซ์แก๊สขาเข้า (B) CO₂ loading ของสารละลายขาเข้า (C) h/h_0 (D) อันตรกิริยาระหว่างฟลักซ์ของเหลวขาเข้ากับ CO₂ loading ของสารละลายขาเข้า (AC) และอันตรกิริยาระหว่าง CO₂ loading ของสารละลายขาเข้ากับ h/h_0 (CD) เช่นเดียวกับประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อนำพารามิเตอร์มาสร้างความสัมพันธ์จะได้สหสัมพันธ์สำหรับทำนายความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ที่จุดดึงตัวอย่าง ดังสมการ (4.3) เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณและผลการทดลองวัดความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ที่จุดดึงตัวอย่าง พบว่า มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมบูรณ์ร้อยละ 16.61 ดังรูปที่ 4.15 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังนั้น จึงสามารถใช้สมการ (4.3) เพื่อประมาณความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ที่จุดดึงตัวอย่างในหอดูดซับสำหรับดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย AMP-PZ-MEA ได้

$$P_{\text{CO}_2} = 10.5201 + 3.3392A + 0.0073B + 6.5043C - 49.4174D + 3.8697AC + 83.5529CD \quad (4.3)$$



รูปที่ 4.15 ความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ที่จุดติดตั้งตัวอย่างได้จากการทดลอง เปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยสมการ (4.3)

4.3.2. สหสัมพันธ์แบบกึ่งเอมพิริคัล

สหสัมพันธ์แบบกึ่งเอมพิริคัลนิยมใช้เพื่อทำนายค่าสมรรถนะการถ่ายโอนมวลในเชิงสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมโดยเฉพาะ ซึ่งจะสร้างจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมกับสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคของเหลว ดังแสดงในหัวข้อที่ 3.6 โดยได้ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณค่า K_{Ga_v} ดังสมการ (3.6)

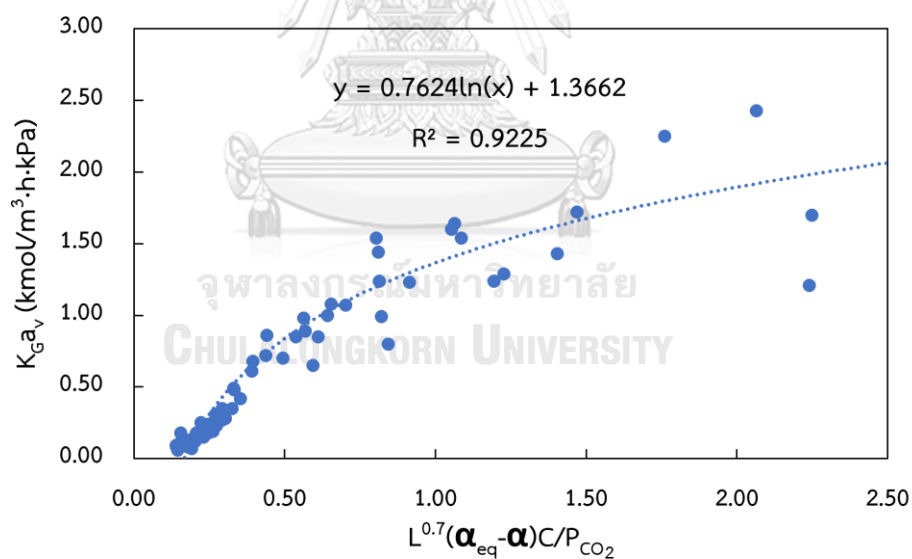
$$K_{Ga_v} \propto L^b \left[\frac{(\alpha_{eq} - \alpha)C}{P_{\text{CO}_2}} \right] \quad (3.6)$$

การวิจัยนี้ได้นำข้อมูล K_{Ga_v} ที่ได้รับการทดลองการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในหอดูดซึม มาใช้กับความสัมพันธ์ดังกล่าวเพื่อสร้างสหสัมพันธ์แบบกึ่งเอมพิริคัล เมื่อพิจารณาสมการ (3.6) พบว่ามีค่าคงตัว b ที่ไม่ทราบค่า สำหรับการพัฒนาสหสัมพันธ์แบบกึ่งเอมพิริคัลทำได้ด้วยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง K_{Ga_v} กับ $L^b [(\alpha_{eq} - \alpha)C / P_{\text{CO}_2}]$ แล้วหาค่า b เพื่อให้สมการที่ใช้ทำนายมีความแม่นยำสูงสุด กล่าวคือ มีร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสมบูรณ์ต่ำที่สุด ซึ่งค่าที่เหมาะสมสำหรับ

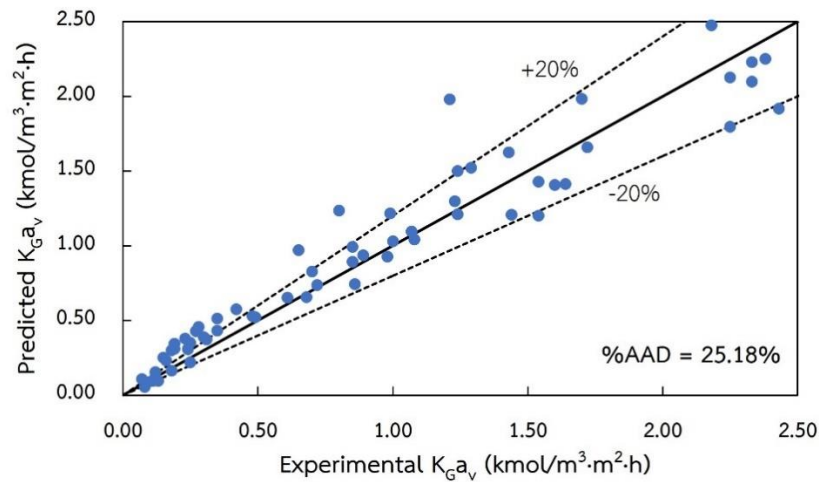
ค่าคงตัว b มักอยู่ในช่วง 0.3-0.7 [43] สำหรับงานวิจัยนี้จะได้ b คือ 0.7 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากทำให้สมการที่ใช้ทำนายมีร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมบูรณ์ต่ำที่สุด จากรูปที่ 4.16 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแกน x และแกน y อยู่ในรูปแบบของสมการลอการิทึม $y=m[\ln(x)] + n$ ซึ่งเป็นรูปแบบที่มีความเข้ากันได้กับข้อมูลผลการทดลองมากที่สุด เนื่องจากมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9225 โดย m และ n เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ ดังนั้น สมการ (3.6) จึงถูกนำมาจัดรูปใหม่ได้เป็นสมการ (4.4) และเมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์มาแทนค่า จะได้สมการ (4.5) ที่ใช้เป็นสหสัมพันธ์ในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมสำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเอมีนผสมสามชนิด AMP-PZ-MEA ซึ่งให้ผลร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมบูรณ์ เท่ากับ 25.18 ดังแสดงในรูปที่ 4.17

$$K_{Ga_v} = m \ln \left(L^b \left[\frac{(\alpha_{eq} - \alpha^C)}{P_{CO_2}} \right] \right) + n \quad (4.4)$$

$$K_{Ga_v} = 0.7624 \ln \left(L^{0.7} \left[\frac{(\alpha_{eq} - \alpha^C)}{P_{CO_2}} \right] \right) + 1.3662 \quad (4.5)$$



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{Ga_v} กับ $L^{0.7}[(\alpha_{eq} - \alpha^C)/P_{CO_2}]$



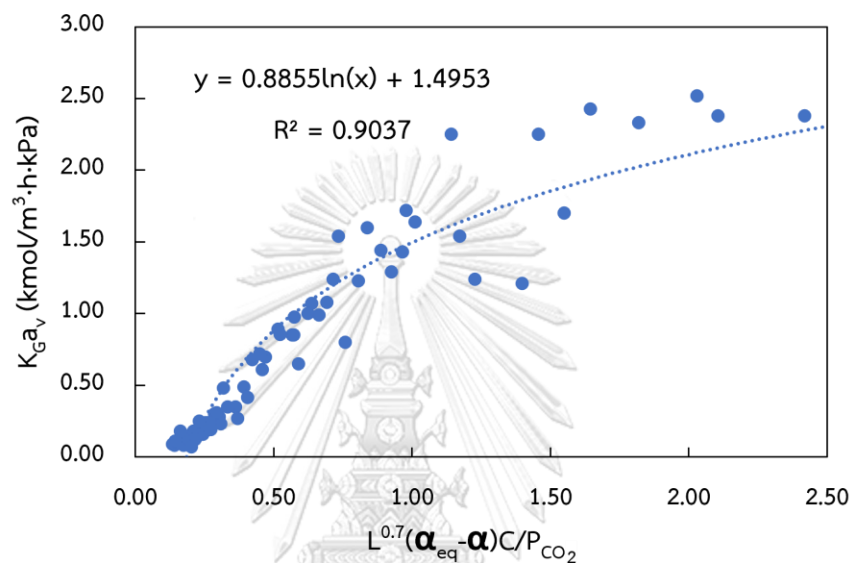
รูปที่ 4.17 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยสมการ (4.5)

เนื่องจากสมการกึ่งเอมพิริคัล ดังแสดงในสมการ (4.4) นั้น มีการนำความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ที่จุดตั้งตัวอย่างมาใช้ในการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม ซึ่งความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ที่จุดตั้งตัวอย่างเป็นหนึ่งในผลตอบสนองจากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วย ANOVA โดยความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ที่จุดตั้งตัวอย่างทำนายได้จากสมการ (4.3) เมื่อแทนสมการ (4.3) ลงในสมการ (4.4) พบว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมสามารถคำนวณได้จากสมการ (4.6) ซึ่งในสมการดังกล่าวสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเป็นฟังก์ชันกับพารามิเตอร์หลักทั้งสี่ที่ใช้ในการทดลองนี้เท่านั้น โดยเมื่อสร้างกราฟตามความสัมพันธ์ในสมการ (3.6) และสุ่มค่า b เพื่อให้สมการที่ใช้ทำนายมีร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมบูรณ์ต่ำที่สุด พบว่าค่าคงตัว b คือ 0.7 และได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.18 เมื่อได้สัมประสิทธิ์ m และ n จากรูปที่ 4.18 แล้ว แทนค่าในสมการ (4.6) จะได้สหสัมพันธ์สำหรับทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย AMP-PZ-MEA ที่เป็นฟังก์ชันของพารามิเตอร์หลักทั้งสี่ที่ใช้ในการทดลอง ดังสมการ (4.7) เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลองวัดสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม พบว่า ร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมบูรณ์ เป็น 29.47 ดังรูปที่ 4.19

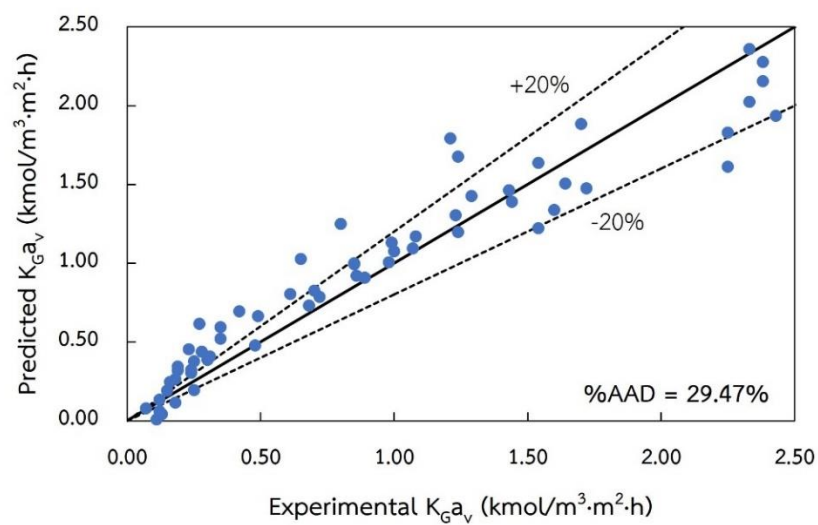
$$K_G a_v = m \ln \left(L^b \left[\frac{(\alpha_{eq} - \alpha)C}{10.5201 + 3.3392L + 0.0073G + 6.5043\alpha - 49.4174H + 3.8697L\alpha + 83.5529\alpha H} \right] \right) + n \quad (4.6)$$

$$K_G a_v = 0.8855 \ln \left(L^{0.7} \left[\frac{(\alpha_{eq} - \alpha)C}{10.5201 + 3.3392L + 0.0073G + 6.5043\alpha - 49.4174H + 3.8697L\alpha + 83.5529\alpha H} \right] \right) + 1.4953 \quad (4.7)$$

- เมื่อ L คือ ฟลักซ์ของสารละลายขาเข้า (ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร·ชั่วโมง⁻¹)
 G คือ ฟลักซ์แก๊สขาเข้า (ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร·ชั่วโมง⁻¹)
 α คือ CO₂ loading ของสารละลายขาเข้า (โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน)
 H คือ สัดส่วนความสูงของจุดติดตั้งตัวอย่างต่อความสูงของหอดูดซึม (h/h₀)



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง $K_G a_v$ กับ $L^{0.7}[(\alpha_{eq} - \alpha)C/P_{CO_2}]$ เมื่อใช้สมการ (4.3) ทำนายความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ที่จุดติดตั้งตัวอย่าง



รูปที่ 4.19 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยสมการ (4.7)

เมื่อเปรียบเทียบสหสัมพันธ์สำหรับคำนวณ K_{Ga} ของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเอมีนผสมสามชนิด AMP-PZ-MEA ในหอดูดซึมบรรจุด้วยวัสดุบรรจุแบบจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ Sulzer DX ทั้งสามสหสัมพันธ์ ได้แก่ สหสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วย ANOVA ตามสมการ (4.1) สหสัมพันธ์แบบกึ่งเอมพิริคัล ตามสมการ (4.5) และ สหสัมพันธ์แบบกึ่งเอมพิริคัล ตามสมการ (4.7) พบว่า มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมบูรณ์อยู่ในช่วงร้อยละ 25 ถึง 29 ซึ่งใกล้เคียงกับการทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมสำหรับการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย MDEA-MEA ในหอดูดซึมแบบบรรจุ ซึ่งมีร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมบูรณ์ คือ 21.80 [46] ซึ่งเป็นช่วงความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ สำหรับการประมาณสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของเอมีนผสม ทั้งนี้ ควรสังเกตว่า สารละลายเอมีนผสมสามชนิดมีความซับซ้อนกว่าสารละลายเอมีนผสมสองชนิด เนื่องจากอาจเกิดอันตรกิริยาระหว่างเอมีนทั้งสามในการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้น ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมบูรณ์ของสารละลายเอมีนผสมสามชนิดจึงมากกว่าสารละลายเอมีนผสมสองชนิด แม้ว่าสหสัมพันธ์แบบกึ่งเอมพิริคัล ตามสมการ (4.5) มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมบูรณ์น้อยที่สุด คือ ร้อยละ 25.18 แต่ไม่สามารถใช้ทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมได้ หากไม่ทราบความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ สหสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วย ANOVA ตามสมการ (4.1) และ สหสัมพันธ์แบบกึ่งเอมพิริคัล ตามสมการ (4.7) มีร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมบูรณ์เป็น ร้อยละ 28.93 และ 29.47 ซึ่งมีค่าไม่ต่างกัน โดยสหสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วย ANOVA ตามสมการ (4.1) สามารถนำไปใช้ทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมได้ง่าย เพราะมีเพียง 3 พารามิเตอร์เท่านั้นในสมการ แต่สหสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วย ANOVA เป็นการสร้างจากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง จึงอาจมีข้อจำกัดในเรื่องการใช้งานในระบบอื่น ๆ ส่วนสหสัมพันธ์แบบกึ่งเอมพิริคัล ตามสมการ (4.5) สร้างมาจากความสัมพันธ์ของทฤษฎีสองฟิล์ม จึงอาจนำไปใช้กับระบบทั่วไปได้มากกว่า แต่มีข้อด้อยคือ ต้องใช้ข้อมูลถึง 6 พารามิเตอร์ ทั้งนี้ สหสัมพันธ์แบบกึ่งเอมพิริคัล ตามสมการ (4.5) มีความเหมาะสมที่นำไปใช้ทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมที่สุด เนื่องจากสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมที่คำนวณได้มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตามการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แก๊สขาเข้า ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองจริง

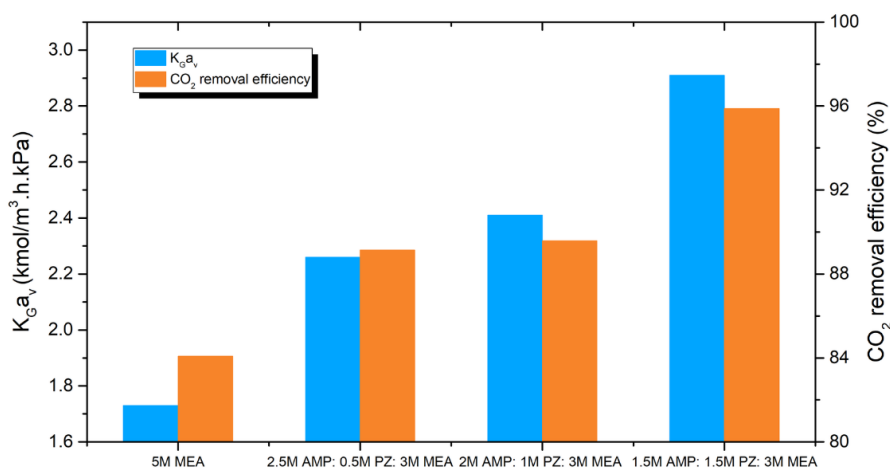
4.4 สมรรถนะของเอมีนผสมสามชนิด AMP-PZ-MEA

หนึ่งในแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพของการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ คือ การใช้สารละลายเอมีนที่มีสมรรถนะสูง โดยสารละลายเอมีนสมรรถนะสูงที่นิยมใช้ในปัจจุบันมักเป็นเอมีน

ผสม ทั้งนี้ การใช้อัตราส่วนความเข้มข้นที่เหมาะสมส่งผลอย่างมากต่อสมรรถนะการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยสมรรถนะการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอมีนอาจพิจารณาได้จากความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ภาระทางร้อนสำหรับพื้นที่ฟูสารละลาย และสมรรถนะของการถ่ายโอนมวลในหอดูดซับ งานวิจัยนี้ศึกษาสมรรถนะการถ่ายโอนมวลของสารละลาย AMP-PZ-MEA เพื่อประเมินศักยภาพของสารละลายเอมีนดังกล่าวสำหรับดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ ดังที่กล่าวข้างต้นว่า อัตราส่วนความเข้มข้นของเอมีนในสารละลายผสมส่งผลต่อสมรรถนะการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ งานวิจัยนี้จึงทำการทดลองด้วยสารละลาย AMP-PZ-MEA ที่อัตราส่วนความเข้มข้นอีกสองอัตราส่วนความเข้มข้น รวมเป็นสามอัตราส่วนความเข้มข้นเชิงโมล ได้แก่ 2.5:0.5:3 2:1:3 และ 1.5:1.5:3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการคงความเข้มข้นของ MEA ที่ 3 โมลาร์ MEA และเปลี่ยนอัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP ต่อ PZ เป็น 5 2 และ 1 ตามลำดับ ทั้งนี้ การทดลองดังกล่าวใช้ภาวะดำเนินการ ดังนี้ ฟลักซ์ของเหลวขาเข้า 3.67 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร-ชั่วโมง⁻¹ ฟลักซ์แก๊สขาเข้า 509.30 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร-ชั่วโมง⁻¹ CO₂ loading ของสารละลายขาเข้า 0.25 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน และสัดส่วนความสูงของจุดดิ่งตัวอย่างต่อความสูงของหอดูดซับเป็น 0.25 ผลการศึกษาในเชิงสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ แสดงดังรูปที่ 4.20 ซึ่งพบว่า สารละลาย AMP-PZ-MEA ทั้งสามอัตราส่วนความเข้มข้นมีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าสารละลายเกณฑ์เปรียบเทียบกับ 5 โมลาร์ MEA มาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม นอกจากนี้ ยังพบว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของ AMP ต่อ PZ ลดลง เนื่องจาก PZ เป็นเอมีนที่ไวปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์มาก [35, 36] การเพิ่มอัตราส่วนความเข้มข้นของ PZ จึงส่งผลให้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม การเพิ่มความเข้มข้นของ PZ มักถูกจำกัดโดยการตกตะกอนของ PZ เมื่อใช้ที่ความเข้มข้นสูง ทั้งนี้ ไม่พบการตกตะกอนของสารละลาย AMP-PZ-MEA ทั้งสามความเข้มข้นที่ทำการศึกษา

การประเมินศักยภาพของสารละลายเอมีนสำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสมรรถนะการถ่ายโอนมวลเพียงด้านเดียวอาจไม่ครอบคลุมสมรรถนะสำคัญที่ชี้บอกสมรรถนะโดยรวมของการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงพิจารณาสมรรถนะการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในเชิงความจุการดูดซับและภาระทางความร้อนสำหรับพื้นที่ฟูสารละลายร่วมด้วย

โดย Nwaoha และคณะ [9] ได้รายงานผลความจุการดูดซึมและภาระทางความร้อนสำหรับพื้นฟูสารละลายของสารละลาย AMP-PZ-MEA ทั้งสามอัตราส่วนความเข้มข้นดังกล่าวข้างต้น และ สารละลายเกณฑ์เปรียบเทียบ 5 โมลาร์ MEA เมื่อพิจารณาสมรรถนะทั้งสามส่วน ได้แก่ สมรรถนะการถ่ายโอนมวล ความจุการดูดซึม และภาระทางความร้อนสำหรับพื้นฟูสารละลาย พบว่า สารละลาย AMP-PZ-MEA มีสมรรถนะทั้งสามด้านดีกว่าสารละลายเกณฑ์เปรียบเทียบ MEA อย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ และภาระทางความร้อนสำหรับพื้นฟูสารละลาย ทั้งนี้ สารละลาย AMP-PZ-MEA ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 1.5 โมลาร์ AMP: 1.5 โมลาร์ PZ: 3 โมลาร์ MEA มีศักยภาพสูงที่สุดเมื่อพิจารณาสมรรถนะทั้งสามด้าน โดยสารละลาย 1.5 โมลาร์ AMP: 1.5 โมลาร์ PZ: 3 โมลาร์ MEA มีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล ประสิทธิภาพการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ และความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ สูงกว่าสารละลายเกณฑ์เปรียบเทียบ 5 โมลาร์ MEA ร้อยละ 68.21 ร้อยละ 14.03 และ ร้อยละ 15.09 ตามลำดับ และมีภาระทางความร้อนสำหรับพื้นฟูสารละลายต่ำกว่าสารละลายเกณฑ์เปรียบเทียบ 5 โมลาร์ MEA ร้อยละ 50.00 จากข้อมูลข้างต้น จึงสรุปได้ว่า สารละลาย 1.5 โมลาร์ AMP: 1.5 โมลาร์ PZ: 3 โมลาร์ MEA มีศักยภาพสูงมากสำหรับดักจับคาร์บอนไดออกไซด์

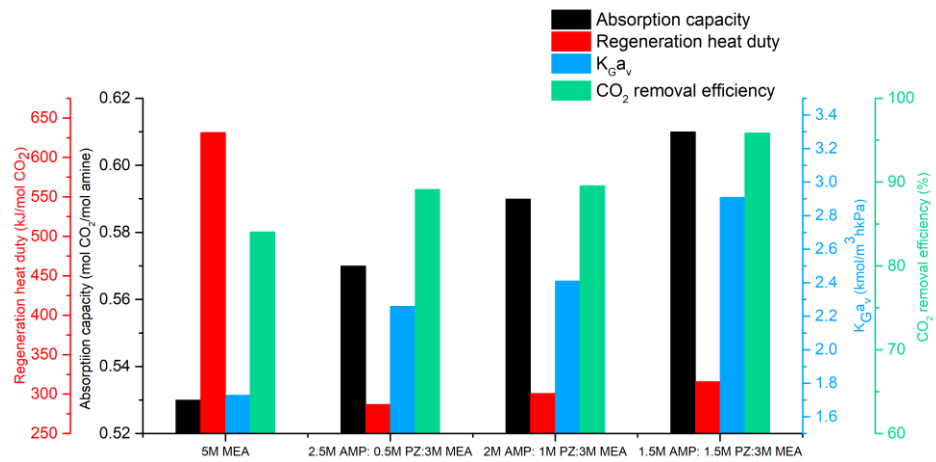


รูปที่ 4.20 สมรรถนะการถ่ายโอนมวลในเชิงสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ของสารละลายเอมีนผสม AMP-PZ-MEA ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เปรียบเทียบกับสารละลายเกณฑ์เปรียบเทียบ 5 โมลาร์ MEA

(ภาวะดำเนินการ: ฟลักซ์ของเหลวขาเข้า 3.67 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร·ชั่วโมง⁻¹

ฟลักซ์แก๊สขาเข้า 509.30 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร·ชั่วโมง⁻¹

CO₂ loading 0.25 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน และ h/h_0 เป็น 0.25)



รูปที่ 4.21 สมรรถนะการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสารละลายผสม AMP-PZ-MEA ที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ เปรียบเทียบกับสารละลายเกณฑ์เปรียบเทียบ 5 โมลาร์ MEA [9]

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาสมรรถนะการถ่ายโอนมวลสำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอมีนผสมสามชนิดที่อัตราส่วนความเข้มข้น 1.5 โมลาร์ AMP: 1.5 โมลาร์ PZ: 3 โมลาร์ MEA ในหอดูดซับบรรจุด้วยวัสดุบรรจุแบบจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ Sulzer DX เปรียบเทียบกับสารละลายเกณฑ์เปรียบเทียบ MEA ความเข้มข้น 5 โมลาร์ ในเชิงของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม ($K_G a_v$) และ ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนี้ ยังศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ฟลักซ์ของเหลวขาเข้า (A) ฟลักซ์แก๊สขาเข้า (B) อัตราส่วนเชิงโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเอมีนในสารละลายขาเข้า (C) และสัดส่วนความสูงของจุดดิ่งตัวอย่างต่อความสูงของหอดูดซับ (D) ต่อสมรรถนะการถ่ายโอนมวล เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และ สร้างสหสัมพันธ์เพื่อทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย AMP-PZ-MEA ในหอดูดซับแบบบรรจุ จากผลการดำเนินงานวิจัย สรุปได้ ดังนี้

การศึกษากลกระทบของพารามิเตอร์ พบว่า ฟลักซ์ของเหลวขาเข้า อัตราส่วนเชิงโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเอมีนในสารละลายขาเข้า และสัดส่วนความสูงของจุดดิ่งตัวอย่างต่อความสูงของหอดูดซับ ส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม โดยสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มฟลักซ์ของเหลวขาเข้าและสัดส่วนความสูงของจุดดิ่งตัวอย่างต่อความสูงของหอดูดซับ แต่สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมลดลง เมื่อเพิ่มอัตราส่วนเชิงโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเอมีนในสารละลายขาเข้า อย่างไรก็ตาม ฟลักซ์แก๊สขาเข้าส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมน้อยมาก

สำหรับผลกระทบของพารามิเตอร์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า พารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ คือ ฟลักซ์ของเหลวขาเข้า ฟลักซ์แก๊สขาเข้า อัตราส่วนเชิงโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเอมีนในสารละลายขาเข้า และสัดส่วนความสูงของจุดดิ่งตัวอย่างต่อความสูงของหอดูดซับ โดยการเพิ่มฟลักซ์ของเหลวขาเข้าและสัดส่วนความสูงของจุดดิ่งตัวอย่างต่อความสูงของหอดูดซับ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มฟลักซ์แก๊สขาเข้าและอัตราส่วนเชิงโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเอมีนในสารละลายขาเข้า ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง

การศึกษาสมรรถนะการถ่ายโอนมวลของสารละลาย AMP-PZ-MEA และ สารละลายเกณฑ์เปรียบเทียบกับ MEA พบว่า สารละลาย AMP-PZ-MEA เป็นสารละลายเอมีนที่มีศักยภาพในเชิงสมรรถนะการถ่ายโอนมวล ทั้งในเชิงสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ โดยสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ของสารละลาย AMP-PZ-MEA สูงกว่าสารละลายเกณฑ์เปรียบเทียบกับ 1.8 เท่า และ 1.4 เท่า ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบที่ฟลักซ์ของเหลวขาเข้า 3.67 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร·ชั่วโมง⁻¹ ฟลักซ์แก๊สขาเข้า 509.30 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร·ชั่วโมง⁻¹ อัตราส่วนเชิงโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเอมีนในสารละลายขาเข้า 0.25 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน และสัดส่วนความสูงของจุดดิ่งตัวอย่างต่อความสูงของหอดูดซึมเป็น 0.25

การวิเคราะห์เชิงสถิติด้วย ANOVA เพื่อศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์และอันตรกิริยาระหว่างพารามิเตอร์ต่อสมรรถนะการถ่ายโอนมวลของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย AMP-PZ-MEA พบว่า พารามิเตอร์และอันตรกิริยาที่ส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมอย่างมีนัยสำคัญ คือ ฟลักซ์ของเหลวขาเข้า (A) อัตราส่วนเชิงโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเอมีนในสารละลายขาเข้า (C) สัดส่วนความสูงของจุดดิ่งตัวอย่างต่อความสูงของหอดูดซึม (D) อันตรกิริยาระหว่างฟลักซ์ของเหลวขาเข้ากับอัตราส่วนเชิงโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเอมีนในสารละลายขาเข้า (AC) อันตรกิริยาระหว่างอัตราส่วนเชิงโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเอมีนในสารละลายขาเข้ากับสัดส่วนความสูงของจุดดิ่งตัวอย่างต่อความสูงของหอดูดซึม (CD) กำลังสองของอัตราส่วนเชิงโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเอมีนในสารละลายขาเข้า (C²) และกำลังสองของพารามิเตอร์สัดส่วนความสูงของจุดดิ่งตัวอย่างต่อความสูงของหอดูดซึม (D²) ส่วนพารามิเตอร์และอันตรกิริยาระหว่างพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์อย่างมีนัยสำคัญ คือ ฟลักซ์ของเหลวขาเข้า (A) ฟลักซ์แก๊สขาเข้า (B) อัตราส่วนเชิงโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเอมีนในสารละลายขาเข้า (C) สัดส่วนความสูงของจุดดิ่งตัวอย่างต่อความสูงของหอดูดซึม (D) อันตรกิริยาระหว่างฟลักซ์ของเหลวขาเข้ากับอัตราส่วนเชิงโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเอมีนในสารละลายขาเข้า (AC) และอันตรกิริยาระหว่างอัตราส่วนเชิงโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเอมีนในสารละลายขาเข้ากับสัดส่วนความสูงของจุดดิ่งตัวอย่างต่อความสูงของหอดูดซึม (CD)

การหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย AMP-PZ-MEA ในหอดูดซึมแบบบรรจุ ด้วยการวิเคราะห์จากภาพพื้นผิวสามมิติของอันตรกิริยาระหว่างพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อสมรรถนะการถ่ายโอนมวล พบว่า ภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม

และประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด คือ คือ ฟลักซ์ของเหลวขาเข้า 3.67 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร·ชั่วโมง⁻¹ ฟลักซ์แก๊สขาเข้า 509.30 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร·ชั่วโมง⁻¹ อัตราส่วนเชิงโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเอมีนในสารละลายขาเข้า 0.25 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน และสัดส่วนความสูงของจุดดิ่งตัวอย่างต่อความสูงของหอดูดซึมเป็น 0.32 โดยที่ภาวะดังกล่าว สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ เป็น 1.99 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร·ชั่วโมง⁻¹·กิโลปาสกาล⁻¹ และ ร้อยละ 98.74 ตามลำดับ

การสร้างสหสัมพันธ์เพื่อทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย AMP-PZ-MEA ในหอดูดซึมแบบบรรจุ พบว่า สหสัมพันธ์แบบกึ่งเอมพิริคัล ตามสมการ (4.7) มีความเหมาะสมที่สุด ซึ่งความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมบูรณ์ คือ ร้อยละ 29.47 ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาสมรรถนะการถ่ายโอนมวลของสารละลาย AMP-PZ-MEA สามอัตราส่วนความเข้มข้น ในเชิงสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ ร่วมกับความจุการดูดซึมและภาระทางความร้อนสำหรับพื้นฟูสารละลาย พบว่า สารละลาย AMP-PZ-MEA ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 1.5 โมลาร์ AMP: 1.5 โมลาร์ PZ: 3 โมลาร์ MEA มีศักยภาพสูงสุด โดยสารละลายที่อัตราส่วนความเข้มข้นดังกล่าวมีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล ประสิทธิภาพการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ และความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ สูงกว่าสารละลายเกณฑ์เปรียบเทียบกับ 5 โมลาร์ MEA ร้อยละ 68.21 ร้อยละ 14.03 และ ร้อยละ 15.09 ตามลำดับ และมีภาระทางความร้อนสำหรับพื้นฟูสารละลายต่ำกว่าสารละลายเกณฑ์เปรียบเทียบกับ 5 โมลาร์ MEA ร้อยละ 50.00

5.2 ข้อเสนอแนะ

- นำอัตราส่วนความเข้มข้นของเอมีนผสมสามชนิด AMP-PZ-MEA มาเป็นหนึ่งในพารามิเตอร์สำหรับการศึกษาสมรรถนะของการถ่ายโอนมวลด้วยการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (3^k full factorial design) เพื่อศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนอัตราส่วนความเข้มข้นต่อสมรรถนะการถ่ายโอนมวล
- ประเมินความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์และเทคนิคด้วยโปรแกรม Aspen เพิ่มเติมเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการที่ทำให้เกิดความคุ้มค่าสูงสุด ทั้งในด้านวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์ต่อการดำเนินงานในโรงงานอุตสาหกรรม

3. ศึกษาการถ่ายโอนมวลของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ภายในหลอดซีมด้วยโปรแกรม Ansys Fluent เพิ่มเติม เพื่อศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายโอนโมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างวัฏภาคและการถ่ายโอนความร้อนของหลอดซีม





ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณ

ก.1 การคำนวณความเข้มข้นของเอมีน

การวัดค่าความเข้มข้นของเอมีนสามารถทำได้โดยการไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลาร์ ที่ทราบปริมาตรของสารละลาย โดยใช้เมทิลออเรนจ์เป็นอินดิเคเตอร์ ซึ่งเป็นสมดุกรด-เบสระหว่างกรดไฮโดรคลอริกกับจำนวนโมลของไนโตรเจนในเอมีน สามารถคำนวณได้จากสมการ (ก.1)

$$a/bC_1V_1 = C_2V_2 \quad (ก.1)$$

- เมื่อ a คือ จำนวนโมลรวมของเอมีน (โมล)
 b คือ จำนวนโมลรวมของไนโตรเจนในเอมีน (โมล)
 C_1 คือ ความเข้มข้นของเอมีน (โมลาร์)
 V_1 คือ ปริมาตรของตัวอย่างเอมีนที่นำมาไทเทรต (มิลลิลิตร)
 C_2 คือ ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (1 โมลาร์)
 V_2 คือ ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไทเทรต

สมมติต้องการวัดความเข้มข้นของตัวอย่างเอมีนผสมสามชนิด 1.5 โมลาร์ AMP: 1.5 โมลาร์ PZ: 3 โมลาร์ MEA ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ที่จุดยุติจากการไทเทรตจะต้องใช้กรดไฮโดรคลอริกปริมาตร 7.5 มิลลิลิตร โดยจำนวนโมลรวมของเอมีน จะเท่ากับ $1.5+1.5+3 = 6$ โมล ในขณะที่จำนวนโมลรวมของไนโตรเจนในเอมีน เท่ากับ $1.5+2(1.5)+3 = 7.5$ โมล เนื่องจาก PZ เป็นไดเอมีนที่มีไนโตรเจนสองหมู่เอมีนใน 1 โมเลกุล ดังนั้น

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

$$C_1 = \frac{(6 \text{ โมล}/7.5 \text{ โมล})(1 \text{ โมลาร์})(7.5 \text{ มิลลิลิตร})}{1 \text{ มิลลิลิตร}} = 6 \text{ โมลาร์}$$

ดังนั้น ความเข้มข้นของเอมีนรวม คือ 6 โมลาร์

ก.2 การคำนวณ CO₂ loading ในสารละลายเอมีน

การวัดค่า CO₂ loading ในสารละลายเอมีนจะเชื่อมโยงกับการวัดค่าความเข้มข้นของเอมีน เนื่องจากทำได้จากการไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริกเช่นเดียวกัน เพื่อทำปฏิกิริยา

กับผลพลอยได้จากปฏิกิริยาระหว่างเอมีนกับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยจะได้โมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊สมาจัดเก็บและวัดปริมาตรในบิวเรตที่บรรจุ Displacement solution แต่การวัดค่า CO₂ loading ในสารละลายเอมีน ต้องใช้กรดไฮโดรคลอริกที่มากเกินไปเพื่อให้คาร์บอนไดออกไซด์ถูกปล่อยออกมาจากเอมีนจนหมด ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (ก.2)

$$\alpha = \frac{\left[\frac{V_{CO_2}}{AB} \right]}{\left[\frac{CV_1}{B} \right]} = \frac{V_{CO_2}}{CV_1 A} \quad (\text{ก.2})$$

- เมื่อ α คือ CO₂ loading ของเอมีน (โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน)
 V_{CO_2} คือ ปริมาตรของคาร์บอนไดออกไซด์ (มิลลิลิตร)
 A คือ ค่าคงตัวของการเปลี่ยนหน่วยปริมาตรแก๊ส (22.4 ลิตรต่อโมล)
 B คือ ค่าคงตัวของการเปลี่ยนหน่วยปริมาตร (1000 ลิตรต่อลูกบาศก์เมตร)
 V_1 คือ ปริมาตรของสารละลายเอมีนตัวอย่างที่นำมาไทเทรต (มิลลิลิตร)
 C คือ ความเข้มข้นของสารละลายเอมีน (โมลาร์)

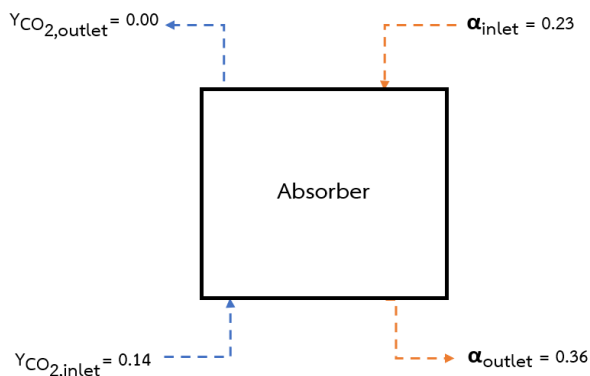
สมมติให้นำสารละลายเอมีนมีความเข้มข้นรวม เท่ากับ 6 โมลาร์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร มาทำการไทเทรตเพื่อวัด CO₂ loading โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกทั้งหมด 15 มิลลิลิตร และปริมาตรคาร์บอนไดออกไซด์ที่อ่านได้ คือ 79 มิลลิลิตร แต่ปริมาตรที่อ่านได้นั้นจะรวมปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกเข้าไปด้วย จึงต้องหักลบกันเพื่อคำนวณปริมาตรคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกมาอย่างแท้จริง ซึ่งจะเป็น $62-15 = 47$ มิลลิลิตร ดังนั้น

$$\alpha = \frac{47 \text{ มิลลิลิตร}}{(6 \text{ โมลาร์})(1 \text{ มิลลิลิตร})(22.4 \text{ ลิตรต่อโมล})} = 0.35 \text{ โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน}$$

ดังนั้น CO₂ loading ของเอมีนนี้ คือ 0.35 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน

ก.3 การคำนวณความคลาดเคลื่อนของการตุลมวล

ในแต่ละการทดลองจำเป็นต้องมีการคำนวณร้อยละความคลาดเคลื่อนของการตุลมวลรอบหอดูดซึม เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของการทดลองและการยอมรับได้ของผลการทดลอง ซึ่งการคำนวณตุลมวลเป็นการเปรียบเทียบปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้าและขาออกจากระบบในวัฏภาคแก๊สกับปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้าและขาออกจากระบบในวัฏภาคของเหลว ดังแสดงในรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 การดุลมวลรอบหอดูดซึม

1. ด้านวัฏภาคแก๊ส

เนื่องจากการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์จากวัฏภาคแก๊สไปยังของเหลว ดังนั้นในวัฏภาคแก๊สจะคำนวณจากอัตราของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกกำจัดออกได้ ดังสมการ (ก.3)

$$\text{Removed CO}_2 = [Y_{\text{CO}_2,\text{inlet}} - Y_{\text{CO}_2,\text{outlet}}]G_1 \quad (\text{ก.3})$$

เมื่อ Y_{CO_2} คือ สัดส่วนเชิงโมลคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊ส
(โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลไนโตรเจน)

G_1 คือ อัตราการไหลของแก๊สเฉื่อยขาเข้า (โมลไนโตรเจนต่อนาที)

สมมติให้แก๊สขาเข้ามีอัตราการไหล เป็น 6 ลิตรต่อนาที ซึ่งเป็นแก๊สผสมร้อยละ 12 คาร์บอนไดออกไซด์คูลกับไนโตรเจน ซึ่งคำนวณอัตราการไหลของแก๊สเฉื่อยเท่ากับ 0.24 โมลไนโตรเจนต่อนาที ดังนั้น

$$\text{Removed CO}_2 = [0.14 - 0.00]0.24 = 0.032 \text{ โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อนาที}$$

2. ด้านของเหลว

ส่วนด้านของเหลวจะคำนวณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมได้ ดังสมการ (ก.4) ถึง (ก.6)

$$\text{Absorbed CO}_2 = \text{CO}_{2,\text{outlet}} - \text{CO}_{2,\text{inlet}} \quad (\text{ก.4})$$

$$\text{CO}_{2,\text{inlet}} = C\alpha_{\text{inlet}}L \quad (\text{ก.5})$$

$$\text{CO}_{2,\text{outlet}} = C\alpha_{\text{outlet}}L \quad (\text{ก.6})$$

เมื่อ C คือ ความเข้มข้นของเอมีนในสารละลาย (โมลาร์)

α คือ CO_2 loading ของสารละลายเอมีน (โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน)

L คือ อัตราการไหลของสารละลายเอมีน (ลิตรต่อนาที)

สมมติให้ อัตราการไหลของสารละลายเอมีน เป็น 0.043 ลิตรต่อนาที ด้วยสารละลายเอมีนผสมที่มีความเข้มข้นรวมเท่ากับ 6 โมลาร์ ดังนั้น

$$\text{CO}_{2,\text{inlet}} = (6)(0.23)(0.043) = 0.060 \text{ โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อนาที}$$

$$\text{CO}_{2,\text{outlet}} = (6)(0.36)(0.043) = 0.093 \text{ โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อนาที}$$

$$\text{Absorbed CO}_2 = 0.093 - 0.060 = 0.033 \text{ โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อนาที}$$

3. ร้อยละความคลาดเคลื่อนของการตุลมวล

ความคลาดเคลื่อนของการตุลมวล จะคำนวณจากอัตราการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊สและอัตราการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคของเหลว จากหัวข้อ 1. และ 2. ซึ่งสามารถคำนวณได้ ดังสมการ (3.1)

$$\% \text{ mass balance error} = \left| \frac{\text{Absorbed CO}_2 - \text{Removed CO}_2}{\text{Absorbed CO}_2} \right| \times 100\% \quad (3.1)$$

เมื่อ $\text{Absorbed}_{\text{CO}_2}$ คือ อัตราการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคของเหลว (โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อนาที)

$\text{Removed}_{\text{CO}_2}$ คือ อัตราการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊ส (โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อนาที)

จะได้ว่า

$$\% \text{ mass balance error} = \left| \frac{0.033 - 0.032}{0.033} \right| \times 100\% = 3.03\%$$

ดังนั้น ร้อยละความคลาดเคลื่อนของการตุลมวล คือ 3.03

ก.4 การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม ($K_G a_v$) สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.46)

$$K_G a_v = \left(\frac{G_I}{P(y_{A,G} - y_A^*)} \right) \left(\frac{dy_{A,G}}{dz} \right) \quad (2.46)$$

เมื่อ $K_G a_v$ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม (กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร·ชั่วโมง⁻¹·กิโลปาสกาล⁻¹)

G_I คือ อัตราการไหลของแก๊สเฉื่อย (กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร·ชั่วโมง⁻¹)

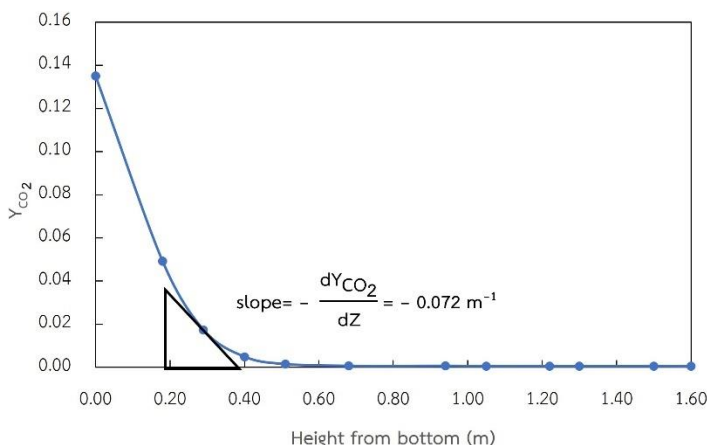
P คือ ความดันภายในหอดูดซึม (กิโลปาสกาล)

y_A	คือ	สัดส่วนเชิงโมลของตัวละลาย A (คาร์บอนไดออกไซด์) ในวัฏภาคแก๊ส (กิโลโมลต่อกิโลโมล)
y_A^*	คือ	สัดส่วนเชิงโมลของตัวละลาย A (คาร์บอนไดออกไซด์) ในวัฏภาคแก๊ส ที่ภาวะสมดุล (กิโลโมลต่อกิโลโมล)
$\frac{dy_{A,G}}{dz}$	คือ	ความชันของความเข้มข้นของตัวละลาย A (คาร์บอนไดออกไซด์) เทียบกับความสูงของหอคูดซิม(เมตร ⁻¹)

สมมติต้องการคำนวณ K_{GaV} ของการทดลองการดูดซิมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอมีนผสมสามชนิด AMP-PZ-MEA ที่ภาวะการดำเนินงาน ดังแสดงในตารางที่ ก.1 ซึ่งมีค่า G_1 เท่ากับ 448.69 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร·ชั่วโมง⁻¹ y_{CO_2} เท่ากับ 0.0049 และ $y_{CO_2}^*$ เท่ากับ 0 โดยนำข้อมูลความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊สที่บันทึกค่าไว้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์เทียบกับความสูงจากกันหอคูดซิม ดังแสดงในรูปที่ ก.2 จะได้ค่าความชัน หรือ $\frac{-dy_{A,G}}{dz}$ เท่ากับ -0.072 เมตร⁻¹

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม

ภาวะการทดลอง	
ความดัน (กิโลปาสคาล)	101.325
ฟลักซ์ของเหลวขาเข้า (ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตรชั่วโมง ⁻¹)	3.67
ฟลักซ์แก๊สขาเข้า (ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตรชั่วโมง ⁻¹)	509.30
CO ₂ loading ของเอมีน (โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน)	0.25
h/h_0	0.25



รูปที่ ก.2 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ตลอดความสูงของหอดูดูดซึม

เมื่อนำข้อมูลทั้งหมดมาแทนค่าในสมการ จะได้ว่า

$$K_G a_v = \left(\frac{509.30 \text{ ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตรชั่วโมง}^{-1}}{(101.325 \text{ กิโลปาสกาล})(0.049 - 0)} \right) (0.072 \text{ เมตร}^{-1})$$

$$K_G a_v = 2.91 \text{ กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร-ชั่วโมง}^{-1} \cdot \text{กิโลปาสกาล}^{-1}$$

ก.5 การคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์

ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกคำนวณเป็นร้อยละ ซึ่งเป็นการคำนวณที่จุดตั้งตัวอย่างในระดับความสูงเดียวกับที่ใช้คำนวณ $K_G a_v$ ไม่ใช่ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์จากความสูงทั้งหมดของหอดูดูดซึม ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.2)

$$CO_2 \text{ removal efficiency (\%)} = \left| \frac{y_{CO_2, \text{inlet}} - y_{CO_2, \text{outlet}}}{y_{CO_2, \text{inlet}}} \right| \times 100\% \quad (3.2)$$

เมื่อ $y_{CO_2, \text{inlet}}$ คือ สัดส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊สขาเข้า
 $y_{CO_2, \text{outlet}}$ คือ สัดส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊สที่จุดตั้งตัวอย่าง

สมมติต้องการคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับความสูงเดียวกับที่ใช้คำนวณ $K_G a_v$ ดังแสดงในตารางที่ ก.1 ซึ่งจะมี $y_{CO_2, \text{inlet}}$ เท่ากับ 0.1190 และ $y_{CO_2, \text{outlet}}$ เท่ากับ 0.0049 เมื่อแทนค่าในสมการ จะได้ว่า

$$CO_2 \text{ removal efficiency (\%)} = \left| \frac{0.1190 - 0.0049}{0.1190} \right| \times 100\% = 95.88 \%$$

ดังนั้น ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ คือ ร้อยละ 95.88

ภาคผนวก ข

ข้อมูลผลการทดลอง

ข้อมูลภาวะในการดำเนินการและผลการทดลองที่บันทึกค่าไว้ สำหรับการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเอมีนในหอดูดซึมบรรจุด้วยวัสดุแบบจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ ชนิด Sulzer DX โดยประกอบด้วย

- ตารางที่ ข.1 การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย 5 โมลาร์ MEA
- ตารางที่ ข.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับสารละลาย 5 โมลาร์ MEA
- ตารางที่ ข.3 การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเอมีนผสมสามชนิดที่อัตราส่วนความเข้มข้น 1.5 โมลาร์ AMP: 1.5 โมลาร์ PZ: 3 โมลาร์ MEA
- ตารางที่ ข.4 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับเอมีนผสมสามชนิดที่อัตราส่วนความเข้มข้น 1.5 โมลาร์ AMP: 1.5 โมลาร์ PZ: 3 โมลาร์ MEA
- ตารางที่ ข.5 การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเอมีนผสมสามชนิด AMP-PZ-MEA ที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่างกัน
- ตารางที่ ข.6 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับเอมีนผสมสามชนิด AMP-PZ-MEA ที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่างกัน

ตารางที่ ข.1 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย 5 โมลาร์ MEA

Run		1	2	3	4	5	6	7
Room temperature (°C)		30	30	30	30	30	30	30
Room Pressure (kPa)		101.325	101.325	101.325	101.325	101.325	101.325	101.325
Liquid flux (m ³ /m ² ·h)		2.89	2.89	2.89	3.67	3.67	3.67	4.45
Gas flux (m ³ /m ² ·h)		509.30	594.18	679.06	509.30	594.18	679.06	509.30
Inert gas flux (m ³ /m ² ·h)		449.71	524.66	599.61	449.71	524.66	599.61	449.71
Amine concentration (M)		5.4	5.20	5.20	5.40	4.90	4.90	5.40
Lean amine CO ₂ loading (mol CO ₂ /mol amine)		0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
Rich amine CO ₂ loading (mol CO ₂ /mol amine)		0.33	0.37	0.38	0.30	0.30	0.33	0.27
Mass balance error (%)		2.41	4.29	1.73	2.32	4.93	7.84	5.31
Gas phase CO ₂ Concentration (%)								
	0.00	11.70	11.70	11.70	12.00	11.70	11.70	12.00
	0.18	4.57	6.13	6.91	3.78	4.73	4.31	4.03
	0.29	1.51	2.35	2.86	1.20	1.85	1.94	1.20
	0.40	0.41	0.75	1.02	0.31	0.59	0.69	0.29
	0.51	0.14	0.21	0.31	0.11	0.10	0.11	0.11
Height from bottom (m)	0.68	0.09	0.08	0.07	0.07	0.06	0.08	0.07
	0.94	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.07	0.06
	1.05	0.07	0.06	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06
	1.22	0.07	0.06	0.05	0.06	0.05	0.06	0.06
	1.30	0.06	0.06	0.05	0.06	0.05	0.06	0.06
	1.50	0.06	0.05	0.04	0.06	0.05	0.06	0.06
	1.60	0.06	0.05	0.04	0.05	0.05	0.06	0.05
System temperature (°C)								
	0.18	49.49	58.35	51.04	40.19	53.60	50.59	38.18
	0.29	35.24	51.70	44.86	34.43	40.15	41.70	34.27
	0.40	31.61	37.17	38.18	31.32	34.05	34.22	30.97
	0.51	30.30	31.78	33.97	30.47	33.42	33.89	30.40
Height from bottom (m)	0.68	30.04	30.71	31.37	30.27	33.13	32.97	30.28
	0.94	29.96	30.42	31.05	30.09	33.07	32.86	30.23
	1.05	29.58	30.50	31.09	30.03	32.68	32.64	29.97
	1.22	29.73	30.47	30.94	30.00	32.72	32.71	30.10
	1.30	29.63	30.35	31.02	30.00	32.77	32.70	30.20
	1.50	29.54	30.28	30.81	29.92	32.71	32.68	29.96

ตารางที่ ข.1 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย 5 โมลาร์ MEA [ต่อ]

Run		8	9	10	11	12	13	14
Room temperature (°C)		30	30	30	30	30	30	30
Room Pressure (kPa)		101.325	101.325	101.325	101.325	101.325	101.325	101.325
Liquid flux (m ³ /m ² ·h)		4.45	4.45	2.89	2.89	2.89	3.67	3.67
Gas flux (m ³ /m ² ·h)		594.18	679.06	509.30	594.18	679.06	509.30	594.18
Inert gas flux (m ³ /m ² ·h)		524.66	599.61	449.71	524.66	599.61	449.71	524.66
Amine concentration (M)		5.30	5.30	5.20	5.20	5.20	5.00	5.00
Lean amine CO ₂ loading (mol CO ₂ /mol amine)		0.15	0.15	0.25	0.25	0.26	0.24	0.24
Rich amine CO ₂ loading (mol CO ₂ /mol amine)		0.27	0.33	0.44	0.46	0.51	0.39	0.41
Mass balance error (%)		2.05	1.41	6.17	2.46	2.61	3.56	7.39
Gas phase CO ₂ Concentration (%)								
	0.00	12.50	12.00	12.00	12.00	11.80	12.00	12.00
	0.18	5.21	4.80	7.99	8.86	9.09	8.31	7.76
	0.29	2.14	2.02	4.54	6.28	6.97	4.25	4.76
	0.40	0.61	0.61	2.30	3.45	4.49	1.91	2.33
	0.51	0.19	0.28	0.81	1.72	2.04	0.75	1.21
Height from bottom (m)	0.68	0.08	0.09	0.10	0.17	0.79	0.18	0.35
	0.94	0.06	0.06	0.07	0.09	0.40	0.14	0.17
	1.05	0.05	0.06	0.07	0.09	0.24	0.11	0.11
	1.22	0.05	0.06	0.07	0.09	0.20	0.10	0.10
	1.30	0.05	0.05	0.06	0.09	0.20	0.10	0.09
	1.50	0.05	0.05	0.06	0.08	0.20	0.09	0.09
	1.60	0.04	0.05	0.06	0.08	0.20	0.08	0.08
System temperature (°C)								
	0.18	43.52	50.16	52.20	60.35	58.58	41.08	46.34
	0.29	38.58	44.63	49.43	61.97	60.23	40.80	42.91
	0.40	32.70	35.66	40.62	57.86	60.98	31.61	36.81
	0.51	32.34	35.57	34.43	48.47	59.97	29.19	32.00
Height from bottom (m)	0.68	31.92	34.09	30.10	33.77	36.98	26.98	27.92
	0.94	31.76	33.98	29.78	32.09	29.62	26.81	27.49
	1.05	31.51	33.89	29.61	32.08	29.86	26.74	27.32
	1.22	31.53	33.93	29.54	31.78	28.32	26.92	27.09
	1.30	31.54	33.84	29.53	31.75	28.19	26.79	27.24
	1.50	31.78	34.07	29.40	32.03	28.70	26.50	27.33

ตารางที่ ข.1 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย 5 โมลาร์ MEA [ต่อ]

Run	15	16	17	18	19	20	21	
Room temperature (°C)	30	30	30	30	30	30	30	
Room Pressure (kPa)	101.325	101.325	101.325	101.325	101.325	101.325	101.325	
Liquid flux (m ³ /m ² ·h)	3.67	4.45	4.45	4.45	2.89	2.89	2.89	
Gas flux (m ³ /m ² ·h)	679.06	509.30	594.18	679.06	509.30	594.18	679.06	
Inert gas flux (m ³ /m ² ·h)	599.61	449.71	524.66	599.61	449.71	524.66	599.61	
Amine concentration (M)	5.00	4.80	4.80	4.80	5.40	5.40	5.40	
Lean amine CO ₂ loading (mol CO ₂ /mol amine)	0.24	0.25	0.25	0.25	0.34	0.34	0.34	
Rich amine CO ₂ loading (mol CO ₂ /mol amine)	0.43	0.37	0.38	0.41	0.53	0.52	0.51	
Mass balance error (%)	10.38	5.23	5.54	1.03	3.10	3.02	5.76	
Gas phase CO ₂ Concentration (%)								
	0.00	12.00	12.00	12.00	12.00	11.80	11.80	11.80
	0.18	9.92	7.33	8.06	9.33	11.40	11.31	11.41
	0.29	6.97	3.25	4.59	6.83	11.08	11.11	11.22
	0.40	3.83	1.35	2.13	3.67	10.45	10.72	10.87
	0.51	2.19	0.43	0.92	1.56	10.06	10.45	10.64
Height from bottom (m)	0.68	0.62	0.10	0.21	0.42	7.07	9.28	9.82
	0.94	0.20	0.09	0.17	0.22	5.89	8.66	9.32
	1.05	0.15	0.07	0.12	0.15	5.19	8.33	9.05
	1.22	0.12	0.07	0.10	0.12	2.58	5.52	7.41
	1.30	0.11	0.06	0.09	0.11	1.35	3.21	4.62
	1.50	0.10	0.06	0.09	0.11	0.86	2.22	3.32
	1.60	0.09	0.06	0.08	0.10	0.75	1.96	3.06
System temperature (°C)								
	0.18	52.69	40.24	43.00	45.98	45.22	46.61	44.62
	0.29	51.80	39.71	43.67	46.17	44.10	47.05	45.59
	0.40	44.92	32.39	34.87	37.46	46.80	48.46	47.31
	0.51	37.88	30.66	33.02	34.59	48.16	49.87	49.14
Height from bottom (m)	0.68	29.34	30.11	30.17	29.42	49.00	51.47	51.86
	0.94	28.06	30.21	29.94	28.72	46.97	53.26	54.59
	1.05	27.93	29.98	29.57	28.60	46.07	52.88	54.23
	1.22	27.73	30.01	29.55	28.49	35.74	45.82	51.59
	1.30	27.77	29.96	29.46	28.53	33.48	39.87	44.68
	1.50	27.82	29.49	29.33	28.14	32.13	37.66	39.68

ตารางที่ ข.1 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย 5 โมลาร์ MEA [ต่อ]

Run	22	23	24	25	26	27
Room temperature (°C)	30	30	30	30	30	30
Room Pressure (kPa)	101.325	101.325	101.325	101.325	101.325	101.325
Liquid flux (m ³ /m ² -h)	3.67	3.67	3.67	4.45	4.45	4.45
Gas flux (m ³ /m ² -h)	509.3	594.18	679.06	509.3	594.18	679.06
Inert gas flux (m ³ /m ² -h)	449.71	524.66	599.61	449.71	524.66	599.61
Amine concentration (M)	5.10	5.10	5.10	4.70	4.70	4.70
Lean amine CO ₂ loading (mol CO ₂ /mol amine)	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
Rich amine CO ₂ loading (mol CO ₂ /mol amine)	0.48	0.52	0.52	0.47	0.49	0.49
Mass balance error (%)	1.74	3.44	0.34	2.37	2.81	0.82
Gas phase CO ₂ Concentration (%)						
	0.00	11.80	11.80	11.80	11.80	11.80
	0.18	10.19	10.59	10.88	9.97	10.56
	0.29	9.00	9.72	10.59	8.35	10.06
	0.40	8.72	8.89	9.27	7.19	8.24
	0.51	5.83	7.73	8.84	4.57	7.32
Height from	0.68	3.72	4.15	6.87	1.90	4.22
bottom (m)	0.94	0.56	2.06	6.18	0.66	1.58
	1.05	0.28	1.38	3.65	0.43	1.19
	1.22	0.20	0.61	2.66	0.24	0.68
	1.30	0.11	0.52	1.92	0.16	0.32
	1.50	0.10	0.41	1.32	0.12	0.98
	1.60	0.09	0.35	1.14	0.10	0.85
System temperature (°c)						
	0.18	47.85	51.26	48.70	43.92	45.62
	0.29	45.13	51.71	49.58	42.75	44.92
	0.40	43.10	51.10	50.66	38.27	43.21
	0.51	40.76	50.55	52.47	36.92	43.25
Height from	0.68	33.88	44.83	52.34	32.80	36.63
bottom (m)	0.94	31.66	39.21	50.26	30.78	33.60
	1.05	31.59	39.53	49.63	30.71	33.73
	1.22	31.13	33.73	39.11	29.88	29.91
	1.30	31.14	33.52	37.46	29.79	29.81
	1.50	31.21	33.46	35.31	29.56	29.70

ตารางที่ ข.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและประสิทธิภาพของการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์
สำหรับสารละลาย 5 โมลาร์ MEA

Run	h/h ₀					
	K _G a _v (kmol/m ³ ·h·kPa)			CO ₂ removal efficiency (%)		
	0.18	0.25	0.32	0.18	0.25	0.32
1	2.61	3.06	1.63	87.09	96.50	98.80
2	2.58	3.08	2.66	79.91	93.59	98.21
3	2.68	3.10	2.92	75.56	91.28	97.35
4	2.71	3.20	1.54	90.00	97.42	99.08
5	2.48	3.18	4.40	84.19	94.96	99.15
6	2.36	3.25	5.27	83.42	94.10	99.06
7	2.92	3.42	1.42	90.00	97.58	99.08
8	2.38	3.41	2.30	82.88	95.12	98.48
9	2.62	3.49	1.76	83.17	94.92	97.67
10	1.25	1.54	1.96	62.17	80.83	93.25
11	1.03	1.50	1.63	47.67	71.25	85.67
12	0.91	1.45	1.80	40.93	61.95	82.71
13	1.50	1.73	1.66	64.58	84.08	93.75
14	1.33	1.70	1.38	60.33	80.58	89.92
15	1.21	1.64	1.44	41.92	68.08	81.75
16	1.81	1.95	2.08	72.92	88.75	96.42
17	1.50	1.91	1.76	61.75	82.25	92.33
18	1.14	1.87	2.04	43.08	69.42	87.00
19	0.10	0.11	0.29	6.10	11.44	14.75
20	0.07	0.08	0.14	5.85	9.15	11.44
21	0.07	0.08	0.12	4.92	7.88	7.88
22	0.18	0.38	0.69	23.73	26.10	26.10
23	0.23	0.28	0.58	17.63	24.66	24.66
24	0.23	0.28	0.30	10.25	21.44	21.44
25	0.36	0.54	0.90	29.24	39.07	39.07
26	0.29	0.42	0.52	14.75	30.17	30.17
27	0.27	0.43	0.43	14.66	26.69	26.69

ตารางที่ ข.3 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอมีนผสมสามชนิดที่อัตราส่วน
ความเข้มข้นเท่ากับ 1.5 โมลาร์ AMP: 1.5 โมลาร์ PZ: 3 โมลาร์ MEA

Run	1	2	3	4	5	6	7
Room temperature (°C)	30	30	30	30	30	30	30
Room Pressure (kPa)	101.325	101.325	101.325	101.325	101.325	101.325	101.325
Liquid flux (m ³ /m ² ·h)	2.11	2.11	2.11	2.89	2.89	2.89	3.67
Gas flux (m ³ /m ² ·h)	509.30	594.18	679.06	509.30	594.18	679.06	509.30
Inert gas flux (m ³ /m ² ·h)	448.69	522.88	598.25	448.69	522.88	598.25	448.69
Amine concentration (M)	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	6.00
Lean amine CO ₂ loading (mol CO ₂ /mol amine)	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.23
Rich amine CO ₂ loading (mol CO ₂ /mol amine)	0.46	0.50	0.53	0.40	0.42	0.46	0.36
Mass balance error (%)	0.73	4.11	0.94	4.23	2.19	4.16	3.14
Gas phase CO₂ Concentration (%)							
	0.00	12.00	12.00	12.00	11.90	12.00	11.90
	0.18	7.91	8.67	9.51	7.84	7.69	8.46
	0.29	5.12	6.39	8.15	4.13	4.21	5.53
	0.40	2.45	3.41	4.47	1.40	1.72	2.55
	0.51	0.69	1.60	3.01	0.60	0.56	1.05
Height from bottom (m)	0.68	0.18	0.22	0.71	0.09	0.10	0.18
	0.94	0.08	0.10	0.23	0.07	0.07	0.08
	1.05	0.07	0.09	0.15	0.07	0.07	0.07
	1.22	0.07	0.08	0.09	0.07	0.07	0.07
	1.30	0.06	0.07	0.08	0.07	0.07	0.07
	1.50	0.06	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06
	1.60	0.06	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06
System temperature (°c)							
	0.18	61.02	64.82	55.48	51.1	55.54	64.80
	0.29	61.02	65.62	58.64	42.19	50.04	65.48
	0.40	56.53	68.76	64.26	30.72	41.73	60.80
	0.51	31.71	64.98	68.00	27.34	29.65	44.64
Height from bottom (m)	0.68	25.62	47.21	66.85	26.38	27.49	30.18
	0.94	25.17	26.17	46.16	26.19	26.86	28.34
	1.05	24.72	25.63	40.65	25.83	26.57	28.47
	1.22	24.61	25.48	28.92	25.82	26.47	28.47
	1.30	24.73	25.52	28.57	25.89	26.70	28.20
	1.50	24.78	25.71	28.89	25.85	26.79	28.59

ตารางที่ ข.3 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอมีนผสมสามชนิดที่อัตราส่วน
ความเข้มข้นเท่ากับ 1.5 โมลาร์ AMP: 1.5 โมลาร์ PZ: 3 โมลาร์ MEA [ต่อ]

Run	8	9	10	11	12	13	14
Room temperature (°C)	30	30	30	30	30	30	30
Room Pressure (kPa)	101.325	101.325	101.325	101.325	101.325	101.325	101.325
Liquid flux (m ³ /m ² ·h)	3.67	3.67	2.11	2.11	2.11	2.89	2.89
Gas flux (m ³ /m ² ·h)	594.18	679.06	509.30	594.18	679.06	509.30	594.18
Inert gas flux (m ³ /m ² ·h)	522.88	598.25	448.69	522.88	598.25	448.69	522.88
Amine concentration (M)	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	5.84	5.92
Lean amine CO ₂ loading (mol CO ₂ /mol amine)	0.23	0.23	0.35	0.35	0.35	0.36	0.35
Rich amine CO ₂ loading (mol CO ₂ /mol amine)	0.38	0.39	0.55	0.58	0.60	0.52	0.52
Mass balance error (%)	1.11	0.20	6.39	4.18	1.91	0.27	2.11
Gas phase CO₂ Concentration (%)							
	0.00	11.90	11.90	12.00	12.00	12.00	12.00
	0.18	5.25	5.79	10.13	10.79	10.76	10.09
	0.29	2.02	2.57	8.58	9.82	10.37	8.26
	0.40	0.69	0.92	7.95	8.85	9.46	5.29
	0.51	0.15	0.37	5.92	7.33	8.87	3.84
Height from bottom (m)	0.68	0.09	0.07	2.49	5.67	7.32	1.19
	0.94	0.07	0.07	0.74	3.25	6.64	0.45
	1.05	0.06	0.06	0.44	2.54	5.90	0.22
	1.22	0.06	0.06	0.17	1.06	4.03	0.17
	1.30	0.06	0.06	0.12	0.36	2.57	0.14
	1.50	0.06	0.05	0.10	0.21	1.32	0.13
	1.60	0.05	0.05	0.09	0.16	1.01	0.11
System temperature (°c)							
	0.18	44.50	55.14	57.40	50.84	45.73	51.06
	0.29	38.02	45.34	57.45	52.24	47.24	50.02
	0.40	35.35	35.69	60.03	55.07	50.43	45.93
	0.51	30.59	32.63	61.32	59.42	53.81	40.59
Height from bottom (m)	0.68	30.27	31.85	56.25	63.03	56.96	34.32
	0.94	30.27	31.64	35.43	65.25	61.93	31.29
	1.05	30.16	31.38	34.41	64.82	62.16	30.80
	1.22	30.08	31.41	30.44	42.84	66.80	30.10
	1.30	30.04	31.47	30.48	32.19	62.90	30.02
	1.50	30.17	31.52	30.55	32.22	56.68	29.72

ตารางที่ ข.3 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอมีนผสมสามชนิดที่อัตราส่วน
ความเข้มข้นเท่ากับ 1.5 โมลาร์ AMP: 1.5 โมลาร์ PZ: 3 โมลาร์ MEA [ต่อ]

Run	15	16	17	18	19	20	21	
Room temperature (°C)	30	30	30	30	30	30	30	
Room Pressure (kPa)	101.325	101.325	101.325	101.325	101.325	101.325	101.325	
Liquid flux (m ³ /m ² ·h)	2.89	3.67	3.67	3.67	2.11	2.11	2.11	
Gas flux (m ³ /m ² ·h)	679.06	509.30	594.18	679.06	509.30	594.18	679.06	
Inert gas flux (m ³ /m ² ·h)	598.25	448.69	522.88	598.25	448.69	522.88	598.25	
Amine concentration (M)	5.92	6.08	6.08	6.08	5.92	5.92	5.92	
Lean amine CO ₂ loading (mol CO ₂ /mol amine)	0.35	0.35	0.35	0.35	0.42	0.42	0.42	
Rich amine CO ₂ loading (mol CO ₂ /mol amine)	0.54	0.46	0.48	0.51	0.60	0.61	0.61	
Mass balance error (%)	19.45	2.76	3.28	0.28	0.71	5.06	2.19	
Gas phase CO₂ Concentration (%)								
	0.00	12.00	11.90	12.00	11.90	11.80	11.80	11.70
	0.18	10.97	9.31	9.11	9.08	11.63	11.63	11.39
	0.29	9.78	5.85	5.95	7.12	11.21	11.37	11.05
	0.40	6.55	3.12	4.18	4.70	10.88	10.90	10.97
	0.51	5.45	1.71	1.41	2.72	10.23	10.70	10.42
Height from bottom (m)	0.68	1.94	0.29	0.51	0.78	8.73	9.87	10.01
	0.94	1.16	0.14	0.13	0.22	8.39	9.23	9.04
	1.05	0.77	0.10	0.10	0.13	8.00	8.67	8.84
	1.22	0.27	0.08	0.08	0.10	5.75	7.44	7.76
	1.30	0.15	0.08	0.07	0.08	3.75	5.41	5.80
	1.50	0.13	0.07	0.07	0.07	2.49	3.75	4.52
	1.60	0.11	0.07	0.07	0.06	2.12	3.31	4.11
System temperature (°c)								
	0.18	56.88	46.01	51.37	59.16	43.79	43.78	38.78
	0.29	58.18	45.00	48.29	58.02	44.46	43.37	39.82
	0.40	61.77	41.10	40.69	56.05	46.62	46.13	39.90
	0.51	62.51	32.58	34.86	47.00	48.86	47.84	41.60
Height from bottom (m)	0.68	57.56	30.55	31.27	36.25	49.98	50.18	40.68
	0.94	35.35	29.15	29.82	32.86	52.17	53.25	43.37
	1.05	34.17	28.98	29.85	32.68	51.69	52.87	43.88
	1.22	30.89	28.93	29.78	32.15	45.87	51.58	41.40
	1.30	30.57	28.90	29.89	31.92	37.62	48.28	37.70
	1.50	30.48	28.84	30.21	32.27	35.69	41.16	35.45

ตารางที่ ข.3 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอมีนผสมสามชนิดที่อัตราส่วน
ความเข้มข้นเท่ากับ 1.5 โมลาร์ AMP: 1.5 โมลาร์ PZ: 3 โมลาร์ MEA [ต่อ]

Run	22	23	24	25	26	27
Room temperature (°C)	30	30	30	30	30	30
Room Pressure (kPa)	101.325	101.325	101.325	101.325	101.325	101.325
Liquid flux (m ³ /m ² ·h)	2.89	2.89	2.89	3.67	3.67	3.67
Gas flux (m ³ /m ² ·h)	509.30	594.18	679.06	509.30	594.18	679.06
Inert gas flux (m ³ /m ² ·h)	448.69	522.88	598.25	448.69	522.88	598.25
Amine concentration (M)	5.92	5.92	5.84	6.32	6.32	6.32
Lean amine CO ₂ loading (mol CO ₂ /mol amine)	0.45	0.45	0.45	0.44	0.44	0.44
Rich amine CO ₂ loading (mol CO ₂ /mol amine)	0.59	0.60	0.59	0.59	0.58	0.59
Mass balance error (%)	10.20	1.80	2.66	7.95	8.33	9.87
Gas phase CO ₂ Concentration (%)						
	0.00	11.70	11.90	11.80	11.80	11.80
	0.18	10.90	10.90	11.18	10.52	10.73
	0.29	10.56	10.68	11.13	9.45	10.42
	0.40	9.63	10.18	10.56	8.49	9.41
	0.51	8.95	9.74	10.39	7.06	8.67
Height from bottom (m)	0.68	6.96	8.99	9.96	4.27	6.67
	0.94	4.19	7.56	8.72	1.95	4.01
	1.05	3.42	6.88	8.20	1.39	3.34
	1.22	1.73	4.82	6.46	0.65	1.88
	1.30	0.76	2.65	4.65	0.31	0.95
	1.50	0.52	1.81	3.35	0.20	0.59
	1.60	0.41	1.55	2.94	0.16	0.49
System temperature (°c)						
	0.18	46.98	0.00	47.21	46.23	47.72
	0.29	45.75	0.00	46.53	44.87	47.18
	0.40	46.96	0.00	49.12	44.3	47.47
	0.51	47.08	0.00	49.98	42.8	46.83
Height from bottom (m)	0.68	44.27	0.00	51.41	37.62	44.64
	0.94	38.35	0.00	51.9	33.52	38.60
	1.05	38.67	0.00	51.81	34.26	39.54
	1.22	31.50	0.00	46.07	31.12	33.22
	1.30	30.42	0.00	38.26	30.48	32.00
	1.50	29.91	0.00	36.75	30.46	31.56

ตารางที่ ข.4 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับ
 สารละลายเอมีนผสมสามชนิดที่อัตราส่วนความเข้มข้นเท่ากับ 1.5 โมลาร์ AMP: 1.5
 โมลาร์ PZ: 3 โมลาร์ MEA

Run	h/h ₀					
	K _G a _v (kmol/m ³ ·h·kPa)			CO ₂ removal efficiency (%)		
	0.18	0.25	0.32	0.18	0.25	0.32
1	1.07	1.72	2.38	57.33	79.58	94.25
2	0.98	1.60	1.70	46.75	71.58	86.67
3	0.86	1.54	1.24	32.08	62.75	74.92
4	1.54	2.38	1.56	65.29	88.24	94.96
5	1.64	2.33	2.42	64.92	85.67	95.33
6	1.44	2.25	2.18	53.53	78.57	91.18
7	2.33	2.91	1.99	85.63	95.88	98.74
8	2.52	2.90	3.32	83.03	94.20	98.74
9	2.43	2.95	2.18	78.40	92.27	96.89
10	0.28	0.35	0.72	28.50	33.75	50.67
11	0.25	0.35	0.42	18.17	26.25	38.92
12	0.19	0.23	0.27	13.58	21.17	26.08
13	0.61	0.85	0.80	31.17	55.92	68.00
14	0.68	0.89	0.99	31.67	52.58	67.17
15	0.49	0.70	0.65	18.50	45.42	54.58
16	1.08	1.29	1.21	50.84	73.78	85.63
17	1.00	1.23	2.25	50.42	65.17	88.25
18	0.85	1.24	1.43	40.17	60.50	77.14
19	0.08	0.10	0.18	5.00	7.80	13.31
20	0.09	0.08	0.10	3.64	7.63	9.32
21	0.06	0.09	0.11	5.56	6.24	10.94
22	0.13	0.18	0.25	9.74	17.69	23.50
23	0.09	0.12	0.12	10.25	14.45	18.15
24	0.08	0.11	0.07	5.68	10.51	11.95
25	0.24	0.30	0.48	19.92	28.05	40.17
26	0.16	0.24	0.31	11.69	20.25	26.53
27	0.15	0.18	0.19	13.90	19.32	23.73

ตารางที่ ข.5 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอมีนผสมสามชนิด AMP-PZ-MEA ที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่างกัน

Amine	2 M AMP: 0.5 M PZ: 3 M MEA	2 M AMP: 1 M PZ: 3 M MEA
Room temperature (°C)	30	30
Room Pressure (kPa)	101.325	101.325
Liquid flux (m ³ /m ² ·h)	3.67	3.67
Gas flux (m ³ /m ² ·h)	509.30	509.3
Inert gas flux (m ³ /m ² ·h)	448.69	448.6896
Amine concentration (M)	6.092308	5.914286
Lean amine CO ₂ loading (mol CO ₂ /mol amine)	0.26	0.26
Rich amine CO ₂ loading (mol CO ₂ /mol amine)	0.38	0.39
Mass balance error (%)	2.73	8.45
Gas phase CO ₂ Concentration (%)		
	0.00	11.60
	0.18	6.94
	0.29	3.54
	0.40	1.26
	0.51	0.51
Height from	0.68	0.14
bottom (m)	0.94	0.07
	1.05	0.06
	1.22	0.05
	1.30	0.05
	1.50	0.05
	1.60	0.05
System temperature (°c)		
	0.18	31.25
	0.29	31.25
	0.40	31.01
	0.51	31.06
Height from	0.68	31.43
bottom (m)	0.94	31.69
	1.05	32.23
	1.22	35.36
	1.30	38.54
	1.50	45.77

ตารางที่ ข.6 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับ
สารละลายเอมีนผสมสามชนิด AMP-PZ-MEA ที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่างกัน

Amine	h/h ₀					
	K _G a _v (kmol/m ³ ·h·kPa)			CO ₂ removal efficiency (%)		
	0.18	0.25	0.32	0.18	0.25	0.32
2 M AMP:						
0.5 M PZ:	1.57	2.26	1.58	69.48	89.14	95.60
3 M MEA						
2 M AMP:						
1 M PZ:	1.71	2.41	4.15	89.58	98.32	99.33
3 M MEA						



บรรณานุกรม

1. Pires, J.C.M., et al., Recent developments on carbon capture and storage: An overview. *Chemical Engineering Research and Design*, 2011. 89(9): p. 1446-1460.
2. Yu, C.H., Huang, C.H., and Tan C.S., A Review of CO₂ Capture by Absorption and Adsorption. *Aerosol and Air Quality Research*, 2012. 12(5): p. 745-769.
3. Chakravarty, T., Phukan, U., and Weiland, R., Reaction of acid gases with mixtures of amines. *Chemical Engineering Progress*, 1985. 81(4).
4. Mandal, B.P. and Bandyopadhyay, S.S., Absorption of carbon dioxide into aqueous blends of 2-amino-2-methyl-1-propanol and monoethanolamine. *Chemical Engineering Science*, 2006. 61(16): p. 5440-5447.
5. Samanta, A. and Bandyopadhyay, S.S., Absorption of carbon dioxide into aqueous solutions of piperazine activated 2-amino-2-methyl-1-propanol. *Chemical Engineering Science*, 2009. 64: p. 1185-1194.
6. Seo, D.J. and Hong, W.H., Solubilities of Carbon Dioxide in Aqueous Mixtures of Diethanolamine and 2-Amino-2-methyl-1-Propanol. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 1996. 41(2): p. 258-260.
7. Sakwattanapong, R., Aroonwilas, A., and Veawab, A., Behavior of Reboiler Heat Duty for CO₂ Capture Plants Using Regenerable Single and Blended Alkanolamines. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2005. 44(12): p. 4465-4473.
8. Brúder, P., et al., CO₂ capture into aqueous solutions of piperazine activated 2-amino-2-methyl-1-propanol. *Chemical Engineering Science*, 2011. 66(23): p. 6193-6198.
9. Nwaoha, C., et al., Carbon dioxide (CO₂) capture: Absorption-desorption capabilities of 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP), piperazine (PZ) and monoethanolamine (MEA) tri-solvent blends. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016. 33: p. 742-750.
10. Horwitz, W., Association of Official Analytical Chemists (AOAC) methods. 12th ed. 1975, Menasha, WI: George Banta.

11. Kanniche, M., et al., Pre-combustion, post-combustion and oxy-combustion in thermal power plant for CO₂ capture. *Applied Thermal Engineering*, 2010. 30(1): p. 53-62.
12. Bernardo L., et al., Greenhouse Gas Emissions – Carbon Capture, Storage and Utilisation, 2016; Available from: <https://www.intechopen.com/books/greenhouse-gases/greenhouse-gas-emissions-carbon-capture-storage-and-utilisation>.
13. Bhowan, A.S. and Freeman, B.C., Analysis and Status of Post-Combustion Carbon Dioxide Capture Technologies. *Environmental Science & Technology*, 2011. 45(20): p. 8624-8632.
14. Aaron, D. and C. Tsouris, Separation of CO₂ from Flue Gas: A Review. *Separation Science and Technology*, 2005. 40(1-3): p. 321-348.
15. DeMontigny, D., Carbon dioxide absorption studies using ultra-highly concentrated monoethanolamine solutions, 1999: University of Regina.
16. Pakzad, P., et al., Chapter 3 - CO₂ absorption by common solvents, in *Advances in Carbon Capture*, 2020, Woodhead Publishing. p. 51-87.
17. Freeman, S.A., et al., Carbon dioxide capture with concentrated, aqueous piperazine. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2010. 4(2): p. 119-124.
18. Bougie, F. and Iliuta, M.C., Sterically Hindered Amine-Based Absorbents for the Removal of CO₂ from Gas Streams. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2012. 57(3): p. 635-669.
19. Rinker, E.B., Ashour, S.S., and Sandall, A., Absorption of Carbon Dioxide into Aqueous Blends of Diethanolamine and Methyldiethanolamine. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2000. 39(11): p. 4346-4356.
20. Aroonwilas, A. and Veawab, A., Integration of CO₂ capture unit using single- and blended-amines into supercritical coal-fired power plants: Implications for emission and energy management. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2007. 1(2): p. 143-150.
21. Caplow, M., Kinetics of carbamate formation and breakdown. *Journal of the American Chemical Society*, 1968. 90(24): p. 6795-6803.

22. Danckwerts, P.V. and Lannus, A, Gas-liquid reactions. Journal of The Electrochemical Society, 1970. 117(10): p. 369C.
23. Crooks, J.E. and Donnellan, J.P., Kinetics and mechanism of the reaction between carbon dioxide and amines in aqueous solution. Journal of the Chemical Society, Perkin Transactions 2, 1989(4): p. 331-333.
24. Donaldson, T.L. and Nguyen, Y.N., Carbon dioxide reaction kinetics and transport in aqueous amine membranes. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 1980. 19(3): p. 260-266.
25. Jiang, J.-Z., et al., Review of gas-liquid mass transfer enhancement by nanoparticles from macro to microscopic. Heat and Mass Transfer, 2019. 55(8): p. 2061-2072.
26. Levenspiel, O., Chemical reaction engineering. 3rd ed. 1999: Wiley.
27. Strigle, R.F., Random Packings and Packed Towers: Design and Applications, 1987, Gulf Publishing Company: Houston, TX.
28. Geankoplis, C.J., Transport Processes and Separation Process Principles 4th ed. 2003, Prentice Hall: NJ.
29. Astaria, G., Savage, D.W., Bisio, A., Gas treating with chemical solvents, 1983, New York: John Wiley.
30. Xu, B., et al., Mass transfer performance of CO₂ absorption into aqueous DEEA in packed columns. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2016. 51: p. 11-17.
31. Naami, A., et al., Mass Transfer Performance of CO₂ Absorption into Aqueous Solutions of 4-Diethylamino-2-butanol, Monoethanolamine, and N-Methyldiethanolamine. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012. 51(18): p. 6470-6479.
32. Woodard and Curran I., 8 - Treatment of Air Discharges from Industry, in Industrial Waste Treatment Handbook (Second Edition), 2006, Butterworth-Heinemann: Burlington. p. 335-361.
33. Mohammed Evuti, A., et al., Application of a packed column air stripper in the removal of volatile organic compounds from wastewater. Reviews in Chemical Engineering, 2014. 30.

34. Isoz, M., CFD Study of Gas Flow Through Structured Separation Columns Packings Mellapak 250.X and Mellapak 250.Y, 2017. 171-184.
35. El Hadri, N., et al., Aqueous amine solution characterization for post-combustion CO₂ capture process. *Applied Energy*, 2017. 185: p. 1433-1449.
36. Dubois, L. and Thomas, D., Carbon dioxide absorption into aqueous amine based solvents: Modeling and absorption tests. *Energy Procedia*, 2011. 4: p. 1353-1360.
37. Adeosun, A., et al., Absorption of CO₂ by Amine Blends Solution: An Experimental Evaluation. *International Journal of Engineering and Science*, 2013. 3(9): p. 12-23.
38. Sheng, M., et al., Mass-Transfer Performance of CO₂ Absorption with Aqueous Diethylenetriamine-Based Solutions in a Packed Column with Dixon Rings. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2016. 55(40): p. 10788-10793.
39. Hemmat Esfe, M., et al., Application of three-level general factorial design approach for thermal conductivity of MgO/water nanofluids. *Applied Thermal Engineering*, 2017. 127: p. 1194-1199.
40. Naami, A., Mass Transfer Studies of Carbon Dioxide Absorption into Aqueous Solutions of 4-(Diethylamine)-2-Butanol, Blended Monoethanolamine with 4-(Diethylamine)-2-Butanol, and Blended Monoethanolamine with Methyl-diethanolamine, 2012, University of Regina: Regina, Saskatchewan.
41. Gao, H., et al., Mass transfer performance and correlations for CO₂ absorption into aqueous blended of DEEA/MEA in a random packed column. *American Institute of Chemical Engineers Journal*, 2017. 63(7): p. 3048-3057.
42. Norouzbahari, S., Shahhosseini, S., and Ghaemi, A., Chemical absorption of CO₂ into aqueous piperazine (PZ) solution: development and validation of a rigorous dynamic rate-based model. *RSC Advances*, 2016. 6.
43. Perry, R.H., Green, D.W., *Perry's Chemical Engineer's Handbook*. 8th ed. 2008, New York: McGraw-Hill.
44. Maneeintr, K., et al., Comparative Mass Transfer Performance Studies of CO₂ Absorption into Aqueous Solutions of DEAB and MEA. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2010. 49(6): p. 2857-2863.

45. Fu, K., et al., Investigation of mass-transfer performance for CO₂ absorption into diethylenetriamine (DETA) in a randomly packed column. *Industrial & engineering chemistry research*, 2012. 51(37): p. 12058-12064.
46. Naami, A., et al., Analysis and predictive correlation of mass transfer coefficient $K_{G,v}$ of blended MDEA-MEA for use in post-combustion CO₂ capture. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2013. 19: p. 3-12.





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	สุกัญญา นาครักษ์
วัน เดือน ปี เกิด	24 กรกฎาคม 2539
สถานที่เกิด	ประเทศไทย
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรม เกียรตินิยมอันดับสอง คณะ วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	1187 หมู่ 6 ซอยเจริญใจ ถนนเทพารักษ์ ตำบลเทพารักษ์ อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ 10270
ผลงานตีพิมพ์	1) Proceeding: The 15th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-15) Nakrak, S., Yurata, T., Chalermnsinsuwan, B., Tontiwachwuthikul, P., and Sema, T. Preliminary Mass Transfer Performance of CO ₂ Absorption into AMP-PZ-MEA Ternary Amines. 2) Proceeding: The 27th PPC Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Polymers and the 12th Research Symposium on Petrochemical and Materials Technology (PPC & PETROMAT Symposium 2021) Nakrak, S., Yurata, T., Chalermnsinsuwan, B., Tontiwachwuthikul, P., and Sema, T. Mass Transfer Performance of CO ₂ Absorption into AMP-PZ-MEA Ternary Amines Solvent.