



โครงการ
การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ แผนผังการตกตะกอนของตัวทำละลาย AMP-PZ-MEA ความเข้มข้นสูงสำหรับการ
ดักจับคาร์บอนไดออกไซด์
Precipitation mapping of highly concentrated AMP-PZ-MEA solvent for CO₂ capture

ชื่อนิสิต นางสาวฐิติญา กาญจนกั้ววาพกุล เลขประจำตัว 6032914623
นางสาวปพิชญา พัวพันธุ์ เลขประจำตัว 6032934123

ภาควิชา เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา 2563

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แผนผังการตกตะกอนของตัวทำละลาย AMP-PZ-MEA ความเข้มข้นสูงสำหรับการ
ดักจับคาร์บอนไดออกไซด์

นางสาวฐิติญา กาญจนกังวาลกุล
นางสาวปพิชญา พัวพันธ์

โครงการวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Precipitation mapping of highly concentrated AMP-PZ-MEA solvent for CO₂ capture

Ms. Thitiya Kanchanakungvalkul

Ms. Papitchaya Puapan

A Senior Project in Partial Fulfillment of Requirement for
The Degree of Bachelor of Science Program in Chemical Technology Department
Faculty of Science Chulalongkorn University
Academic Year 2020
Copyright of Chulalongkorn University

บทคัดย่อ

ชื่อโครงการ	แผนผังการตกตะกอนของตัวทำละลาย AMP-PZ-MEA ความเข้มข้นสูง สำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์	
รายชื่อนิสิตร่วมโครงการ	นางสาวฐิติญา กาญจนกัษฐาพกุล	เลขประจำตัวนิสิต 6032914623
	นางสาวปพิชญา พัวพันธ์ุ	เลขประจำตัวนิสิต 6032934123
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ	ดร. ชีรวัดน์ เสมา	

ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2563

โครงการวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาสารละลายเอมีนผสมแบบใหม่ 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP) + piperazine (PZ) + monoethanolamine (MEA) และ จัดทำแผนผังการตกตะกอนของสารละลาย เอมีนผสมแบบใหม่ AMP-PZ-MEA ความเข้มข้นสูง ที่อัตราส่วนความเข้มข้น และ CO₂ loading ต่าง ๆ เพื่อเลือกใช้ความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายเอมีนในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยดำเนินการวิจัยเป็น 5 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนที่ 1 คำนวณและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้เอมีน คุณสมบัติของสารละลายเอมีนแต่ละชนิด การผสมกันของสารละลายเอมีนหลายชนิด ตัวแปรที่ส่งผลต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ วิธีการคำนวณการเตรียมสารละลาย และการคำนวณค่า CO₂ loading ขั้นตอนที่ 2 ทำการทดลองเพื่อศึกษาการตกตะกอนของสารละลายเอมีนผสม AMP-PZ-MEA ที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ความเข้มข้นรวม 6 และ 7 M และ CO₂ loading 0.15 0.25 0.35 และ 0.50 mol CO₂/mol amine (โดยใช้ Chittick apparatus) เพื่อพิจารณาว่าที่สัดส่วนความเข้มข้นใดไม่เกิดการตกตะกอนของเอมีน ขั้นตอนที่ 3 ทำการทดลองเพื่อวัดค่าความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 30 40 50 และ 60°C โดยใช้ pycnometer ขั้นตอนที่ 4 ศึกษาความสามารถในการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลายเอมีนผสม AMP-PZ-MEA ที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ ซึ่งไม่ตกตะกอน ที่อุณหภูมิ 40°C และความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 12 kPa โดยทำการเก็บค่า CO₂ loading ทุก 1 ชั่วโมง จนเข้าสู่สมดุล กล่าวคือ มีค่า CO₂ loading คงที่ และขั้นตอนที่ 5 พิจารณาอัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลายเอมีนผสมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในเชิงการตกตะกอน ความหนาแน่น และความสามารถในการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลายผสม AMP-PZ-MEA

ผลการศึกษาเบื้องต้น พบว่า ตัวทำละลายผสม AMP-PZ-MEA ที่มีความเข้มข้น AMP และ PZ มากที่สุด สามารถทำได้ที่มีความเข้มข้น 0.95 M AMP 3.55 M PZ และ 1.5 M MEA (ความเข้มข้นรวม 6 M) ซึ่งเป็นความเข้มข้นสูงสุดของ AMP และ PZ ที่สารละลายดังกล่าวจะไม่เกิดการตกตะกอนของเอมีนตลอดช่วง CO₂ loading ตั้งแต่ 0.15-0.50 mol CO₂/mol amine ในส่วนการศึกษาเรื่องความหนาแน่นนั้น ผลการสอบเทียบ pycnometer โดยใช้น้ำกลั่นและสารละลาย 5 M MEA ที่อุณหภูมิ 30 40 50 และ 60°C เปรียบเทียบกับผลที่รายงานในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า มีร้อยละความเบี่ยงเบนเฉลี่ยสมบูรณ์ (%AAD) 0.38% และ 0.48% ตามลำดับ จึงกล่าวได้ว่าเครื่องมือและวิธีการที่ใช้ในการทดลองวัดความหนาแน่นมีความถูกต้องแม่นยำ และสามารถวัดความหนาแน่นของเอมีนผสมที่มีความเข้มข้นและอุณหภูมิต่าง ๆ ได้ และส่วนของการวัดความสามารถในการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ ได้ทำการสอบเทียบ เครื่องมือและวิธีการวัด โดยใช้สารละลาย 5 M MEA ที่ความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 12 kPa และ 40°C พบว่า ค่า CO₂ loading 0.58 mol CO₂/mol amine ที่วัดได้ มีค่าใกล้เคียงกับผลที่รายงานในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมี %AAD เท่ากับ 7.8% ดังนั้นเครื่องมือและวิธีการดังกล่าวจึงมีความถูกต้อง แม่นยำ และสามารถวัดความสามารถในการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์

ภาควิชาเคมีเทคนิค

สาขาวิชา เคมีวิศวกรรม

สาขาวิชา เทคโนโลยีเชื้อเพลิง

ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

..... จิณีญา กนกพงษ์พกุล

..... ปณิษฐา พัวพันธ์

..... 

Abstract

Title Precipitation mapping of highly concentrated AMP-PZ-MEA solvent for CO₂ capture

Researcher Ms. Thitiya Kanchanakungvalkul 6032914623

Ms. Papitchaya Puapan 6032934123

Adviser Dr. Teerawat Sema

Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University

Academic year 2020

Objectives of this research are to study a highly concentrated novel blended 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP) + piperazine (PZ) + monoethanolamine (MEA) solvent and develop its precipitation mapping at various concentration ratios and CO₂ loadings. This is to use an appropriate concentration of AMP-PZ-MEA ternary amines solvent for capturing CO₂. The research procedure can be divided into 5 steps. Firstly, reviewing related theories and literatures, properties of amines, effects and characteristics of amine mixtures, parameters affecting CO₂ absorption, amine solvent preparation, and CO₂ loading calculation. Secondly, conducting an experiment to study a precipitation of AMP-PZ-MEA blended solvent. In this step, total amine concentration and CO₂ loading are varied at 6 and 7 M and 0.15, 0.25, 0.35, and 0.50 mol CO₂/mol amine (using Chittick apparatus), respectively. Thirdly, measuring density of blended amine solvents at 30, 40, 50, and 60 °C. Fourthly, experimentally determining a solubility of CO₂ in AMP-PZ-MEA blended solvent at various AMP-PZ-MEA concentration ratios, which do not precipitate, at 40 °C and 12 kPa CO₂ partial pressure. The CO₂ loading is determined every 1 hour until reaching equilibrium (CO₂ loading is constant). Lastly, determining an optimal AMP-PZ-MEA concentration ratio of blended solvent for CO₂ absorption in terms of precipitation, density, and solubility of CO₂ in AMP-PZ-MEA ternary amines solvent.

Preliminary experimental results indicated that the AMP-PZ-MEA blended solvent with maximum possible AMP and PZ concentrations can be achieved at 0.95 M AMP, 3.55 M PZ, and 1.5 M MEA (total concentration of 6 M). At this concentration ratio, there was no precipitation over CO₂ loading range of 0.15-0.50 mol CO₂/mol amine. For density measurement, the validation results of pycnometer using water and 5 M MEA at 30, 40, 50, and 60°C (in comparison with literature data) were found to have average absolute deviation percentage (%AAD) of 0.38% and 0.48%, respectively. Thus, the instruments and methods used in density measurement are accurate and can be used to measure the density of blended amines at different concentrations and temperatures. Finally, the solubility of CO₂ was validated using 5 M MEA at a 12 kPa CO₂ partial pressure and 40°C. The measure CO₂ loading was found to be 0.58 mol CO₂/mol amine, which is in good agreement with that reported in the literature with an %AAD of 7.8%, Therefore, the equipment and methods for measuring solubility of CO₂ are accurate and can be applied for the AMP-PZ-MEA blended solvent.

Department of Chemical Technology

Field of study Chemical Engineering

Field of study Fuel Technology

Academic Year 2020

Student's Signature

Student's Signature

Advisor's Signature

.....Thitiya Kanchanasungvatkul.....

.....Papitchaya Puapan.....

.....T. Sr.....

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วยความกรุณาจาก อาจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ เสมอ ที่คอยให้ความรู้ คำปรึกษา แนะนำแนวทางในการดำเนินงาน ตลอดจนช่วยเหลือแนวทางแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น ทำให้งานวิจัยฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ผู้ศึกษาจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

คณะผู้วิจัย ขอขอบคุณรุ่นพี่ระดับบัณฑิตศึกษา โดยเฉพาะอย่างยิ่ง นางสาว สุกัญญา นาครักษ์ และ นางสาว รัตนาภรณ์ อภัยยะกุล ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้ความรู้และคำปรึกษามาโดยตลอด

คณะผู้วิจัย ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่กรุณาเปิดห้องปฏิบัติการและให้คำแนะนำในการเครื่องเครื่องมือในห้องปฏิบัติการอย่างถูกต้อง

คณะผู้วิจัย

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ณ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจในการนำเสนอโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัย	2
1.4 วิธีการดำเนินงาน	3
ก. แผนการศึกษา	3
ข. ระยะเวลาการศึกษา	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
1.6 งบประมาณ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการทดลอง	
3.1 สารเคมีและวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	11
3.2 วิธีดำเนินการทดลอง	12
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	
4.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองสังเกตการตกตะกอนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	16
4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองการหาความหนาแน่นของสารละลายที่อุณหภูมิต่าง ๆ	17
4.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองการศึกษาสภาพการละลายของสารละลายเอมีนผสม	18
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	19
5.2 ข้อเสนอแนะ	19

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บรรณานุกรม	20
ภาคผนวก	22

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 4.1 การตกตะกอนที่ความเข้มข้นและค่า CO ₂ loading ต่าง ๆ	16
ตารางที่ A.1 ค่าความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ	22
ตารางที่ A.2 ค่าความหนาแน่นของ 5 M MEA ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	23
ตารางที่ A.3 ค่าความหนาแน่นของสารละลายความเข้มข้น 1.5:1.5:3 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	24
ตารางที่ A.4 ค่าความหนาแน่นของสารละลายความเข้มข้น 0.5:2.5:3 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	25
ตารางที่ A.5 ค่าความหนาแน่นของสารละลายความเข้มข้น 1:2:3 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	26
ตารางที่ A.6 ค่าความหนาแน่นของสารละลายความเข้มข้น 2:2.5:1.5 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	27
ตารางที่ A.7 ค่าความหนาแน่นของสารละลายความเข้มข้น 2.5:2:1.5 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	28
ตารางที่ A.8 ค่าความหนาแน่นของสารละลายความเข้มข้น 3:2:1 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	29
ตารางที่ A.9 ค่าความหนาแน่นของสารละลายความเข้มข้น 2:2:2 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	30
ตารางที่ A.10 ค่าความหนาแน่นของสารละลายความเข้มข้น 1.3:3.2:1.5 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	31
ตารางที่ A.11 ค่าความหนาแน่นของสารละลายความเข้มข้น 0.95:3.55:1.5 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	32
ตารางที่ A.12 สภาพการละลายของ 2 M PZ และ 5 M MEA	33
ตารางที่ A.13 สภาพการละลายของสารละลายความเข้มข้น 2:1:3	33
ตารางที่ A.14 สภาพการละลายของสารละลายความเข้มข้น 0.5:2.5:3	34
ตารางที่ A.15 สภาพการละลายของสารละลายความเข้มข้น 3:2:1	34
ตารางที่ A.16 สภาพการละลายของสารละลายความเข้มข้น 1.5:1.5:3	35
ตารางที่ A.17 สภาพการละลายของสารละลายความเข้มข้น 2:2:2	35
ตารางที่ A.18 สภาพการละลายของสารละลายความเข้มข้น 2.5:2:1.5	36
ตารางที่ A.19 สภาพการละลายของสารละลายความเข้มข้น 2:2.5:1.5	37
ตารางที่ A.20 สภาพการละลายของสารละลายความเข้มข้น 1.3:3.2:1.5	38
ตารางที่ A.21 สภาพการละลายของสารละลายความเข้มข้น 0.95:3.55:1.5	39
ตารางที่ A.22 สภาพการละลายของสารละลายความเข้มข้น 1.3:3.2:2.5	41
ตารางที่ A.23 สภาพการละลายของสารละลายความเข้มข้น 0.95:3.55:2.5	42

สารบัญภาพ

ภาพประกอบที่	หน้า
รูปที่ 1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	12
รูปที่ 2 เครื่องไทเทรต (Chittick apparatus)	13
รูปที่ 3 สารละลายหลังการไทเทรต	13
รูปที่ 4 Vial ขนาด 4 ml	13
รูปที่ 5 เครื่องทำความร้อน	14
รูปที่ 6 Pycnometer	14
รูปที่ 7 เครื่องชั่งน้ำหนัก	14
รูปที่ 8 เครื่องมือในการศึกษาสภาพการละลาย	15
รูปที่ 9 ความหนาแน่นของสารละลายที่อุณหภูมิต่าง ๆ	17
รูปที่ 10 ความจุการดูดซึ่มคาร์บอนไดออกไซด์ของสารละลายเอมีนผสม ที่สัดส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ เทียบกับ 5M MEA	18

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจในการเสนอโครงการ

คาร์บอนไดออกไซด์เป็นหนึ่งในแก๊สที่มีความสำคัญมากที่สุดของโลก หากไม่มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ก็ไม่สามารถดำรงชีวิตได้ [1] อีกทั้งยังเป็นแก๊สที่เราคุ้นเคย แต่ในปัจจุบันมีการเพิ่มขึ้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นอย่างมาก จนทำให้ถึงระดับที่ส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงทางธรรมชาติ ซึ่งสาเหตุของการเพิ่มขึ้นส่วนใหญ่ มาจากการกระทำของมนุษย์ ส่งผลให้เกิดปัญหาภาวะโลกร้อนเป็นเหตุผลให้นิสิตสนใจที่จะนำวิชาความรู้ที่เรียนมาช่วยคิดค้นแนวทางใหม่ที่จะช่วยควบคุมปริมาณการปล่อยแก๊สเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อให้สิ่งมีชีวิตได้รับผลกระทบจากปัญหาเหล่านี้ลดลง จากการศึกษาและค้นคว้าพบว่ากระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นอีกหนึ่งกระบวนการที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก [2] โดยปัจจัยสำคัญขึ้นอยู่กับตัวดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยตัวดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีหลากหลายรูปแบบ เช่น ตัวดูดซึมที่อยู่ในรูปสารละลาย และ ตัวดูดซับในรูปของของแข็ง ซึ่งสารละลายเอมีนเป็นตัวดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้รับความนิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมหลายประเภท เนื่องจากสารละลายเอมีนมีประสิทธิภาพในการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าตัวดูดซึมชนิดอื่น ๆ [3] โดยเฉพาะอย่างยิ่ง monoethanolamine (MEA) ที่สามารถทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างรวดเร็ว แต่มีข้อจำกัดด้านความจุของการดูดซึม และมีภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายสูง [4] อีกทั้ง สารละลายเอมีนมีต้นทุนต่ำ แต่ยังคงเป็นสารที่ระเหยง่าย มีฤทธิ์กัดกร่อน และเป็นพิษสูง เมื่อใช้ในปริมาณมากอาจทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงมีการคิดค้นพัฒนาตัวดูดซึมเอมีนผสมแบบใหม่ขึ้น เนื่องจากเอมีนแต่ละชนิดมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันจึงนิยมนำเอมีนสองชนิดมาผสมกันเพื่อให้ได้สารละลายเอมีนที่มีประสิทธิภาพในการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ให้ดียิ่งขึ้น [5] เป็นอีกทางที่จะช่วยพัฒนาสภาพแวดล้อมและแก้ไขปัญหาภาวะโลกร้อนได้เป็นอย่างดี ทำให้เรามีความสนใจในการพัฒนาตัวดูดซึมแบบใหม่ให้ดีขึ้นกว่าเดิม

สารละลายเอมีนที่นิยมใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์กันอย่างแพร่หลายอีกชนิดคือ 2-amino-2-methyl-1-propanol หรือ AMP เป็นเอมีนประเภท sterically hindered ที่มีความจุของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงและใช้ภาระทางความร้อนในการฟื้นฟูตัวทำละลายต่ำ แต่มีจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาไม่สูงมาก [6] ดังนั้นเราจึงนำ piperazine หรือ PZ ซึ่งเป็นเอมีนที่มีจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาสูงมากมาผสมเพื่อเพิ่มจลนพลศาสตร์โดยรวมของสารละลาย AMP-PZ กับคาร์บอนไดออกไซด์ [7] โดยมีข้อจำกัดคือหากเราผสมสารละลาย AMP และ PZ ในสัดส่วนความเข้มข้นที่สูงจนเกินไปจะทำให้สารละลายตกตะกอน แต่ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ยังความเข้มข้นของสารละลายเอมีนสูงขึ้นไปจะยังสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดียิ่งขึ้นด้วย ดังนั้นจึงมีแนวคิดในการผสมเอมีนชนิดที่สามลงในสารละลายเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเอมีนโดยรวม นั่นคือ MEA เนื่องจากเป็นเอมีนที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย มีสมรรถนะในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ดี และไม่เกิดการตกตะกอนในสารละลายที่ใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ศึกษาความเข้มข้นของสารละลายเอมีนผสมรูปแบบใหม่ 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP) + piperazine (PZ) + monoethanolamine (MEA) ความเข้มข้นสูง ที่อัตราส่วนความเข้มข้น และ CO₂ loading ต่าง ๆ
2. จัดทำแผนทำการตกตะกอนของสารละลายเอมีนผสมรูปแบบใหม่ AMP-PZ-MEA ความเข้มข้นสูง ที่อัตราส่วนความเข้มข้น และ CO₂ loading ต่าง ๆ เพื่อเลือกใช้ความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายเอมีนในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์
3. ศึกษาความหนาแน่นของสารละลายเอมีนผสมรูปแบบใหม่ AMP-PZ-MEA ความเข้มข้นสูง ที่อุณหภูมิ 30 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส
4. ศึกษาความจุของการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของสารละลายเอมีนผสมรูปแบบใหม่ AMP-PZ-MEA ความเข้มข้นสูง

1.3 ตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัย

1. ความเข้มข้นโดยรวมของสารละลายเอมีนผสม
2. อัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลายเอมีนผสม
3. อุณหภูมิ
4. ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์

1.4 วิธีดำเนินงาน

ก. แผนการศึกษา

1. เตรียมสารละลายเอมีนผสมรูปแบบใหม่ AMP-PZ-MEA ความเข้มข้นสูง (6-7 M) ที่สัดส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ เช่น 1.5 M AMP+1.5 M PZ+3 M MEA 2 M AMP+2 M PZ+2 M MEA และ 2.5 M AMP+2.5 M PZ+1 M MEA ณ อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)
2. ทำการเติมคาร์บอนไดออกไซด์ลงในสารละลายเอมีนดังกล่าวจนมีค่า CO_2 loading ที่ 0.15 0.25 0.35 และ 0.5 mol CO_2 /mol amine ตามลำดับ ทั้งนี้ ค่า CO_2 loading จะทำการวัดโดยใช้ acidification technique ด้วย Chittick apparatus
3. เก็บตัวอย่างสารละลายเอมีนผสมที่ความเข้มข้นและ CO_2 loading ต่าง ๆ กัน เพื่อพิจารณาการตกตะกอนของสารละลายเอมีนผสม
4. หาความหนาแน่นของน้ำกลั่น และ 5 M MEA ที่อุณหภูมิ 30 40 50 และ 60°C โดยใช้ pycnometer และนำไปเทียบกับค่าอ้างอิงเพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน และช่วงของความคลาดเคลื่อน เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของ pycnometer จากนั้นหาค่าความหนาแน่นของสารละลายเอมีนผสมที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ไม่ตกตะกอน
5. ทำการทดลองการศึกษาสภาพการละลายของ 5 M MEA และ 2M PZ โดยมีความดันย่อยของ CO_2 12 kPa (12% และ N_2 88%) จากนั้นจึงทำการศึกษาสภาพการละลายของสารละลายเอมีนผสมที่ความเข้มข้น ต่าง ๆ ที่ไม่ตกตะกอน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ก. ในด้านความรู้และประสบการณ์ต่อตัวนิสิตเอง

1. เรียนรู้วิธีการใช้เครื่องมือต่าง ๆ ในการศึกษาประสิทธิภาพของเอมีนแบบใหม่เพื่อดักจับคาร์บอนไดออกไซด์
2. เรียนรู้เกี่ยวกับวิธีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ รวมถึงประโยชน์หรือข้อเสียของเอมีนแบบดั้งเดิมเพื่อที่จะได้คิดค้นเอมีนแบบใหม่ให้มีประสิทธิภาพในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น
3. เอมีนรูปแบบใหม่ที่มีความสามารถในการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าเอมีนแบบดั้งเดิม
4. ความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดของสารละลายเอมีนผสมแบบใหม่ 3 ชนิด AMP-PZ-MEA
5. ประสิทธิภาพการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของสารละลายเอมีนผสมแบบใหม่ AMP-PZ-MEA ความเข้มข้นสูง

ข. ความรู้ ความเข้าใจที่นำไปสู่การแก้ไขปัญหาของสังคมหรือสภาพแวดล้อม

1. ช่วยลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยสู่บรรยากาศ
2. ช่วยให้สิ่งมีชีวิตและคนในสังคมมีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้น เนื่องจากมลพิษทางอากาศลดลง
3. ช่วยลดภาวะโลกร้อนซึ่งเป็นปัญหาใหญ่ในปัจจุบัน

1.6 งบประมาณ

1. หมวดค่าตอบแทน		–
2. หมวดค่าใช้สอย		–
3. หมวดค่าวัสดุ		
ค่าสารเคมี	1. AMP 1 L.	2500 บาท
	2. PZ 1 kg.	5000 บาท
	3. MEA 1 L.	2500 บาท
	รวม	10,000 บาท
4. สาธารณูปโภค		–

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมากในปัจจุบัน ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของภูมิอากาศโลก การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นอีกวิธีที่หนึ่งซึ่งเป็นประโยชน์ในการช่วยลดและบรรเทาปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกหรือภาวะโลกร้อนได้อย่างมาก หนึ่งในวิธีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คือการใช้เอมีนมาช่วยในการดักจับ เนื่องจากเอมีนมีความสามารถสูงในการดูดซึมและคายแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยสามารถใช้ทั้งตัวทำละลายเอมีนแบบชนิดเดี่ยวและแบบผสมมาช่วยในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แต่การใช้เอมีนแบบชนิดเดี่ยวมีข้อเสียปรากฏอยู่บ้างและมีข้อจำกัดในการใช้งาน การใช้เอมีนแบบผสมจึงเหมาะสมและมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าแต่เนื่องจากเอมีนมีหลากหลายชนิด จึงต้องคิดค้นพัฒนาหาส่วนผสมและชนิดของเอมีนที่เหมาะสม เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จึงมีการคิดค้นและพัฒนาตัวทำละลายเอมีนแบบผสมให้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น มีความสามารถในการเข้าสู่สมดุลดีขึ้น ปรับปรุงความสามารถในการดูดซึมและพิจารณาผลกระทบระหว่างเอมีนต่างชนิดที่ทำปฏิกิริยาร่วมกัน จากการทบทวนวรรณกรรมที่มีการศึกษาเอมีนแบบผสม 6 คู่ คือ monoethanolamine (MEA) + piperazine (PZ) MEA + 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP) MEA + diethanolamine (DEA) PZ+AMP PZ+DEA และ AMP+DEA โดยปฏิกิริยาหลักของการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แบ่งเป็น 2 ขั้นตอนหลัก คือ 1.ปฏิกิริยาการเกิด zwitterion โดยเป็นปฏิกิริยาที่เอมีนทำการแลกเปลี่ยนประจุกับคาร์บอนไดออกไซด์ 2.ปฏิกิริยาของการถ่ายโอนไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล โดยใช้เอมีน 2 ตัว กับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเอมีน 2 ตัวที่ใช้จะเป็นได้ทั้งเอมีนชนิดเดียวกันและเอมีนต่างชนิดกัน [5] Zhang และคณะ [8] พบว่า PZ แสดงผลส่งเสริมต่อ MEA AMP และ DEA เนื่องจากมีพลังงานกระตุ้นที่ต่ำกว่าและเป็นตัวดูดซึมที่ดีที่สุด รับโปรตรอนได้ดี อีกทั้งมีประสิทธิภาพสูงในการดูดซึม แต่มีความหนืดสูง นอกจากนี้ยังพบว่าการผสม MEA และ PZ กับ AMP สามารถช่วยส่งเสริมให้ AMP มีประสิทธิภาพดีขึ้น และ DEA มีประสิทธิภาพเมื่อใช้คู่กับ AMP ดีกว่า MEA จากผลการทดลองดังกล่าว Zhang และคณะ จึงสรุปว่า MEA+AMP เป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดในการดูดและคายแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

2.1.1 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์

คาร์บอนไดออกไซด์มีวิธีดักจับที่หลากหลาย ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ 2 แบบใหญ่ ๆ คือการดักจับก่อนการเผาไหม้ และการดักจับหลังการเผาไหม้

การดักจับก่อนการเผาไหม้ วิธีการนี้ใช้กันมากในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิง ปุ๋ยเคมี และการผลิตไฟฟ้า โดยใช้กระบวนการที่เรียกว่า Gasification เป็นการแยกแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมาและใช้ปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อใช้งานต่อไป

การดักจับหลังการเผาไหม้ วิธีการนี้มักใช้กันในโรงไฟฟ้า ซึ่งมีการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากไอเสียชนิดอื่น ๆ และทำการดักจับที่บริเวณปล่องไฟ นอกเหนือจากนี้ยังมีวิธีที่ใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์เข้าร่วมในการดักจับ เพื่อเปลี่ยนจากคาร์บอนให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งกระบวนการนี้จะมีค่าใช้จ่ายสูงกว่า [9]

การลดปริมาณการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์สูงชั้นบรรยากาศนั้นทำได้โดยการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่นิยมใช้ได้แก่ การฟอกด้วยน้ำ (water scrubbing) การดูดซับโดยการเปลี่ยนความดัน (pressure swing absorption: PSA) การแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน (membrane separation) (Ebner และ Ritter, 2009) การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) และการดูดซับทางเคมี (chemical absorption) เป็นต้น โดยทั่วไปนิยมใช้เทคนิคการดูดซับด้วยสารเคมี โดยใช้สารละลายเอมีน เนื่องจาก มีราคาต้นทุนต่ำ สารละลายที่ใช้เป็นสารดูดซับยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้มีประสิทธิภาพการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์สูงและมีเสถียรภาพทางความร้อน โดยตัวอย่างสารละลายเอมีนที่นิยมใช้ในกระบวนการนี้ ได้แก่ MEA DMA และ methyl diglycolamine (DGA) เป็นต้น [10]

2.1.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

เทคนิคการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สผสมที่ถูกปล่อยออกจากปล่อง ประกอบด้วยหลายเทคนิค โดยในการเลือกใช้ที่เหมาะสมจะพิจารณาจากหลาย ๆ ปัจจัย เช่น ลักษณะของแก๊สผสมที่ถูกปล่อยออกมาจากปล่อง ความดันของแก๊ส ปริมาณความต้องการที่จะแยกคาร์บอนไดออกไซด์ และความไวของสารปนเปื้อน (แก๊สผสมภายในระบบ) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1.2.1 เทคนิคการดูดซับ (absorption) เทคนิคนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี

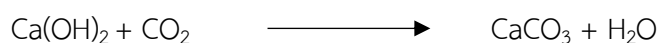
1) การดูดซับทางกายภาพ (physical absorption) เป็นกระบวนการที่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถูกดูดซับในตัวทำละลาย โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง คือ อุณหภูมิและความดัน ซึ่งการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีควรเป็นอุณหภูมิต่ำความดันสูง ตัวดูดซับที่นิยมใช้ เช่น เมทานอลไดเมทิลอีเทอร์ พอลิเอทีลีน และโพรพิลีน-คาร์บอนเนต

2) การดูดซับทางเคมี (chemical absorption) ในกรณีที่มีปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ระดับต่ำ การใช้สารเคมีในการดูดซับจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ ซึ่งสารละลายต้องมีคุณสมบัติเป็นเบส เพราะจะสามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีคุณสมบัติเป็นกรดได้ ตัวดูดซับที่ใช้จะอยู่ในหมู่เอมีน และสารละลายแอมโมเนีย

2.1.2.2 เทคนิคการดูดซับ (adsorption) เป็นกระบวนการที่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถูกดูดซับด้วยปฏิกิริยาระหว่างเฟสแก๊สและเฟสของแข็ง เช่น การดูดซับในรูพรุนของของแข็ง โดยการดูดซับมีกระบวนการทั้งทางกายภาพและทางเคมี

1) ตัวดูดซับแบบสารเคมี (Chemical adsorbers)

1.1 แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) เป็นสารประกอบในรูปของแข็ง เป็นตัวดูดซับที่นิยมใช้มากที่สุดในบรรจุภัณฑ์อาหาร สารประกอบจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการ



1.2 โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) เป็นตัวดูดซับที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ภายใต้สภาวะที่มีความชื้น และได้ผลิตภัณฑ์เป็นโซเดียมไบคาร์บอเนตออกมดังสมการ



2) ตัวดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorbers) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถถูกดูดซับได้โดยตัวดูดซับทางกายภาพ เช่น ซีโอไลต์ (Zeolite) และ ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ปฏิสัมพันธ์ทางกายภาพส่วนใหญ่จะเป็นการตอบสนองในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลงบนตัวดูดซับ ตัวดูดซับทางกายภาพเป็นสิ่งที่สามารถย้อนกลับได้ในธรรมชาติ ซึ่งสมดุลสามารถไปข้างหน้าหรือย้อนกลับได้ ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่มีรูพรุนเล็ก ๆ ของตัวดูดซับทางกายภาพ เป็นสาเหตุให้แก๊สสามารถถูกดูดซับไว้ในรูพรุนนั้นได้ ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับคือ ปริมาตรรูพรุน การกระจายขนาดของรูพรุน และพื้นที่ผิว

2.1.2.3 เทคนิคการแยกด้วยความเย็นยวดยิ่ง (cryogenics) เป็นเทคนิคที่เหมาะสมในกรณีที่แก๊สผสมมีปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า 50% โดยเทคนิคนี้จะเป็นการลดอุณหภูมิเพื่อให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว เพื่อแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สไนโตรเจนและแก๊สออกซิเจน

2.1.2.4 เทคนิคการเลือกผ่านโดยใช้เยื่อเลือกผ่าน (membrane) เป็นเทคนิคที่ใช้กลไกหลายอย่าง ได้แก่ การละลาย การแพร่ การดูดซับ โดยใช้ทั้งในส่วนวัสดุที่มีรูพรุนและไม่มีรูพรุน แต่ในกรณีที่เหมาะสมจำนวนมาก ขนาดของเมมเบรนต้องปรับตามความเหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ [11]

2.1.3 ข้อดีและข้อเสียของเอมีนแต่ละชนิด

สารละลายเอมีนทั่วไปที่ใช้ คือ primary amine (MEA), secondary amine (DEA), tertiary amine (metildiolanamine, MDEA) และ sterically hindered amines (AMP)

1) MEA เป็น primary amine เนื่องจากมี carbon 1 อะตอม ที่จับกับ nitrogen atom

ข้อดีของ MEA คือ มีค่า absorption rate สูง และราคาถูก

ข้อเสียของ MEA คือ มี absorption capacity ต่ำ และใช้พลังงานในการ regeneration สูง

2) DETA หรือ Diethylenetriamine เป็น primary amine เนื่องจากมีเอมีน 2 หมู่

ข้อดีของ DETA คือ มี absorption capacity สูง และมีความเร็วในการดูดซับสูง

ข้อเสียของ DETA คือ ใช้พลังงานในการ regeneration สูง

3) AMP เป็น primary sterically hindered amine เนื่องจากมี methyl group 2 หมู่ อยู่ในโครงสร้าง จึงทำให้โครงสร้างมีความกะกะมากขึ้น

ข้อดีของ AMP คือ มี absorption capacity สูง ใช้พลังงานในการ regeneration ต่ำ และมีค่า absorption rate ปานกลาง

ข้อเสียของ AMP คือ เกิดการตะกอนที่ความเข้มข้นสูง

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Bruder และคณะ [12] ศึกษาข้อมูลการทดลอง และรูปแบบการปรับสมดุลของเหลวและไอน้ำ (VLE) เพื่อดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในสารละลายของ piperazine (PZ) และ 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP) จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือหาสัดส่วนของ AMP/PZ ที่มีความเข้มข้นสูงสุด ที่สามารถใช้ในอุตสาหกรรมได้โดยไม่ตกตะกอนในอุณหภูมิที่ทำการทดลอง และศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนระหว่าง AMP/PZ และความเข้มข้นรวมของเอมีน โดยระบุอัตราส่วนสูงสุดของ AMP/PZ ที่เป็นไปได้โดยที่ไม่เกิดการตกตะกอนในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 40 °C (40 wt% เอมีน) พิจารณา loading สูงสุดในการทดลองของระบบสารละลาย AMP/PZ (3 + 1.5 M) และ 30 wt% MEA ระบบสารละลาย AMP/PZ มี specific cyclic capacity สูงกว่า 128% เมื่อทำการดำเนินการระหว่าง 40 และ 80 °C และความดันย่อยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 120 °C มีค่าเป็น 2 เท่า เมื่อเทียบกับ MEA

Muthumari และคณะ [13] ศึกษาการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ หลังการเผาไหม้ โดยใช้สารเคมีในการดูดซับ ด้วยสารละลายผสมของ Monoethanolamine (MEA) และของเหลวไอออนิก (IL) ในงานปัจจุบัน มีสารละลายผสมระหว่าง MEA และ TetraButylAmmonium Hydroxide [TBA][OH] ได้ใช้ในระบบการดูดซับและการคายคาร์บอนไดออกไซด์ สภาพการละลายคาร์บอนไดออกไซด์ ถูกวิเคราะห์ด้วยสารละลายผสมสำหรับ CO₂ loading ต่าง ๆ โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ MEA และ [TBA][OH] เป็น 30 wt% 28 wt% 25 wt% 20 wt% และ 0 wt% 2 wt% 5 wt% 10 wt% ตามลำดับ ซึ่งเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มความเข้มข้นของ IL การฟื้นฟูของตัวทำละลาย ได้ทำการศึกษาในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน เพื่อที่จะฟื้นฟูและนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ สำหรับการดูดซับแบบไซคลิก (cyclic absorption) สังเกตได้ว่าสารละลายผสม 20 wt% MEA + 10 wt% [TBA][OH] มีสภาพการละลายคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตาม สารประกอบนี้แสดงให้เห็นถึงอัตราการดูดซับ อัตราการคาย และประสิทธิภาพในการฟื้นฟูมากกว่าสารละลายผสมอื่น ๆ พลังงานการฟื้นฟูของสารละลายผสมนี้ คำนวณได้ 28.6 kJ/mol ของคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็น 32% น้อยกว่า 30 wt% MEA นอกจากนั้น คุณสมบัติทางฟิสิกส์เคมี เช่น ความหนาแน่น ความหนืด และแรงตึงผิว สำหรับสารละลายผสม ได้ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้

Chikezie และคณะ [14] การดูดซับทางเคมีโดยใช้เอมีนสำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) นั้น สามารถจำแนกได้เป็นการดูดซับความร้อน การคายความร้อน และ ความร้อนในการคืนสภาพตัวทำละลาย หรือ Q_{reg} มีหน่วยเป็น kJ/mol CO₂ งานวิจัยนี้ทำการศึกษาระยะทางความร้อนในการคายคาร์บอนไดออกไซด์ของสารผสม 3 ตัว คือ AMP-PZ-MEA และการมีส่วนร่วมของการคายความร้อน ความ

ร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของตัวทำละลาย และ ความร้อนในการกลายเป็นไอต่อความร้อนในการคายคาร์บอนไดออกไซด์ เงื่อนไขการทดลองสำหรับการดูดซึมคือ 15 v/v% CO₂ ที่อุณหภูมิ 40°C และความดันบรรยากาศ ในขณะที่การคายจะดำเนินการที่อุณหภูมิ 90°C และความดันบรรยากาศ ความร้อนในการคายได้รับการทดลองโดยใช้ความแตกต่างของความจุความร้อนจำเพาะ มีหน่วยเป็น kJ/kg°C ระหว่างตัวละลายเอมีนที่ปราศจากคาร์บอนไดออกไซด์ และเอมีนอิมิต์ที่สภาวะการดูดซึมที่ระบุไว้ ผลการศึกษาพบว่าค่าความร้อนที่ใช้ของสารละลายผสมมีค่าต่ำกว่า 5 kmol/m³ MEA อย่างมีนัยสำคัญ และที่น่าสนใจคือสารละลายผสม AMP-PZ-MEA มีการดูดซึมความร้อนที่ต่ำกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ MEA นอกจากนี้ยังมีค่าความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายและความร้อนจากการกลายเป็นไอลดลงเล็กน้อย ดังนั้นสารละลายผสมจึงมีความร้อนในการคายคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำกว่า 5 kmol/m³ MEA อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังมีแบบจำลองที่คล้ายคลึงกับแบบจำลองจลน์ที่กำลังได้รับการพัฒนาและใช้ในการทำนายความจุความร้อนจำเพาะของสารละลายผสม AMP-PZ-MEA ซึ่งแบบจำลองสามารถทำนายผลการทดลองได้อย่างแม่นยำโดยมี AAD 0.59% และผลลัพธ์โดยรวมชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้ AMP-PZ-MEA ผสมผสานสำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์

Chikezie และคณะ [15] ในการศึกษานี้ได้ทำการทดลองผสมตัวทำละลาย 3 ตัว ที่มีความเข้มข้นสูงซึ่งประกอบด้วย 2-amino- 2-methyl-1-propanol (AMP) piperazine (PZ) และ monoethanolamine (MEA) เพื่อหาค่าความสามารถ ในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) โดยทำการปรับความเข้มข้นของ AMP และ PZ และให้ความเข้มข้นรวมไม่เกิน 3 kmol/m³ เพื่อจำกัดความเป็นไปได้ของการตกตะกอน โดยความเข้มข้นของ PZ สูงสุดที่ 1.5 kmol/m³ และความเข้มข้นของสารละลายเอมีนรวมสูงสุดเท่ากับ 6 kmol/m³ ที่สภาวะความดันบรรยากาศ สำหรับกระบวนการดูดซึมดำเนินการที่ 313 K และ 15.1% v/v CO₂ และสำหรับการวิเคราะห์การคายคาร์บอนไดออกไซด์ดำเนินการที่ 363 K ผลการทดลองระบุว่า ส่วนผสมของตัวทำละลายผสม AMP-PZ-MEA มีความสามารถในการหมุนเวียนที่สูงขึ้น อัตราการคายคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้นและความร้อนที่ใช้ในการคายมีค่าต่ำกว่า 50-54.5% เมื่อเทียบกับ MEA มาตรฐาน 5 kmol/m³ สำหรับอัตราการดูดซึมเริ่มต้นมีค่าสูงกว่า 5 kmol/m³ MEA เฉพาะตัวทำละลายผสมที่มีอัตราส่วนโมลาร์ของ AMP/PZ เท่ากับ 1 และ 2 เท่านั้น อีกทั้งยังค้นพบว่าการลดภาระทางความร้อนที่ใช้ในการคายลงครึ่งหนึ่งจะส่งผลต่อโอกาสในการผสมของตัวทำละลาย AMP-PZ-MEA สำหรับการใช้งานในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์

บทที่ 3

วิธีดำเนินการทดลอง

3.1 สารเคมีและวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP)
2. Piperazine (PZ)
3. Monoethanolamine (MEA)
4. แก๊สไนโตรเจน
5. แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องแก้วอื่น ๆ ในห้องปฏิบัติการ
2. เครื่องชั่งความละเอียด 4 ตำแหน่ง
3. เครื่องไทเทรต (Chittick apparatus)
4. เครื่องทำความร้อน
5. เครื่องมือในการศึกษาสภาพการละลาย
6. Pycnometer

3.2 วิธีดำเนินการทดลอง

1. คำนวณและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายเอมีน คุณสมบัติของสารละลายเอมีนแต่ละชนิด การผสมกันของสารละลายเอมีนหลายชนิด ตัวแปรที่ส่งผลต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ วิธีการคำนวณการเตรียมสารละลายและการคำนวณค่า CO_2 loading
2. เตรียมสารละลายเอมีนผสมรูปแบบใหม่ AMP-PZ-MEA ความเข้มข้นสูง (6-7 M) ที่สัดส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ ณ อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) โดยใช้ น้ำกลั่นเป็นตัวปรับปริมาตร



รูปที่ 1 : สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3. ทำการเติมคาร์บอนไดออกไซด์ลงในสารละลายเอมีนดังกล่าวจนมีค่า CO_2 loading ที่ 0.15, 0.25, 0.35 และ 0.5 mol CO_2 /mol amine ตามลำดับ ทั้งนี้ค่า CO_2 loading จะทำการวัดโดยใช้ Acidification technique ด้วย Chittick apparatus โดยการไทเทรตตัวอย่างของสารละลายเอมีน ผสมกับสารละลายมาตรฐาน 1 M HCl และใช้เมทิลออเรนจ์เป็นอินดิเคเตอร์ จากนั้นจดค่า CO_2 ที่ไทเทรตได้ เพื่อนำไปคำนวณหาค่า CO_2 loading

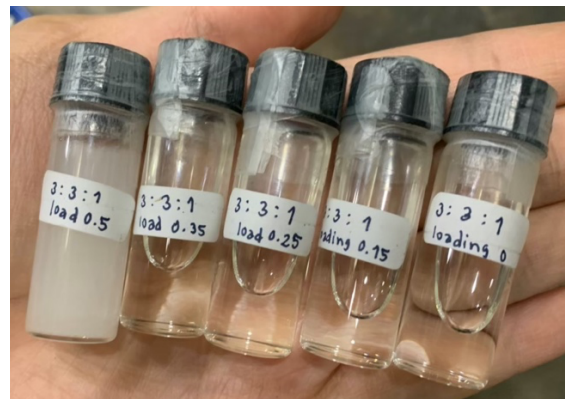


รูปที่ 2 : เครื่องไทเทรต (Chittick apparatus)



รูปที่ 3 : สารละลายหลังการไทเทรต

4. นำสารละลายเอมีนผสมที่ความเข้มข้นและ CO_2 loading ต่าง ๆ ลงใน vial 4 ml เพื่อพิจารณาการตกตะกอนของสารละลายเอมีนผสม



รูปที่ 4 : vial ขนาด 4 ml

5. นำน้ำกลั่น และ 5M MEA ไปหาค่าความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 30 40 50 และ 60°C โดยนำสารละลายไปให้ความร้อนให้ได้อุณหภูมิตามที่ต้องการ จากนั้นนำสารละลายใส่ pycnometer

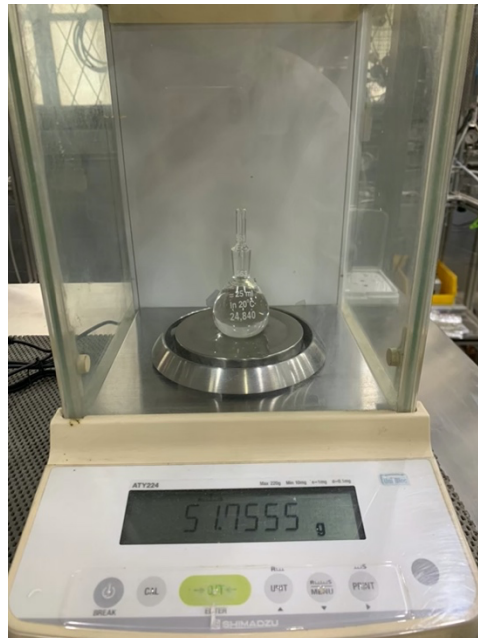


รูปที่ 5 : เครื่องทำความร้อน



รูปที่ 6 : Pycnometer

6. ชั่งน้ำหนักก่อนและหลังใส่สารละลาย และนำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่น โดยทำการทดลอง 3 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย และนำไปเทียบกับค่าอ้างอิงเพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน และช่วงของความคลาดเคลื่อน เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของ pycnometer จากนั้นหาค่าความหนาแน่นของสารละลายเอมีนผสมที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ไม่ตกตะกอน



รูปที่ 7 : เครื่องชั่งน้ำหนัก

7. ทำการทดลองการศึกษาสภาพการละลาย ของสารละลายเอมีนผสมที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ไม่ตกตะกอน โดยการไทเทรตตัวอย่างของสารละลายเอมีนผสมกับสารละลายมาตรฐาน 1 M HCl และใช้เมทิลออเรนจ์เป็นอินดิเคเตอร์ จากนั้นจดค่า CO_2 ที่ไทเทรตได้ เพื่อนำไปคำนวณหาค่า CO_2 loading โดยทำการเก็บค่าทุก ๆ 1 ชั่วโมง จนได้ค่าที่เข้าสู่สมดุล คือมีค่า CO_2 loading คงที่



รูปที่ 8 : เครื่องมือในการศึกษาสภาพการละลาย

8. พิจารณาอัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลายเอมีนผสมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์
9. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการทดลอง และเขียนรูปเล่มงานวิจัย

บทที่ 4
ผลการดำเนินงาน

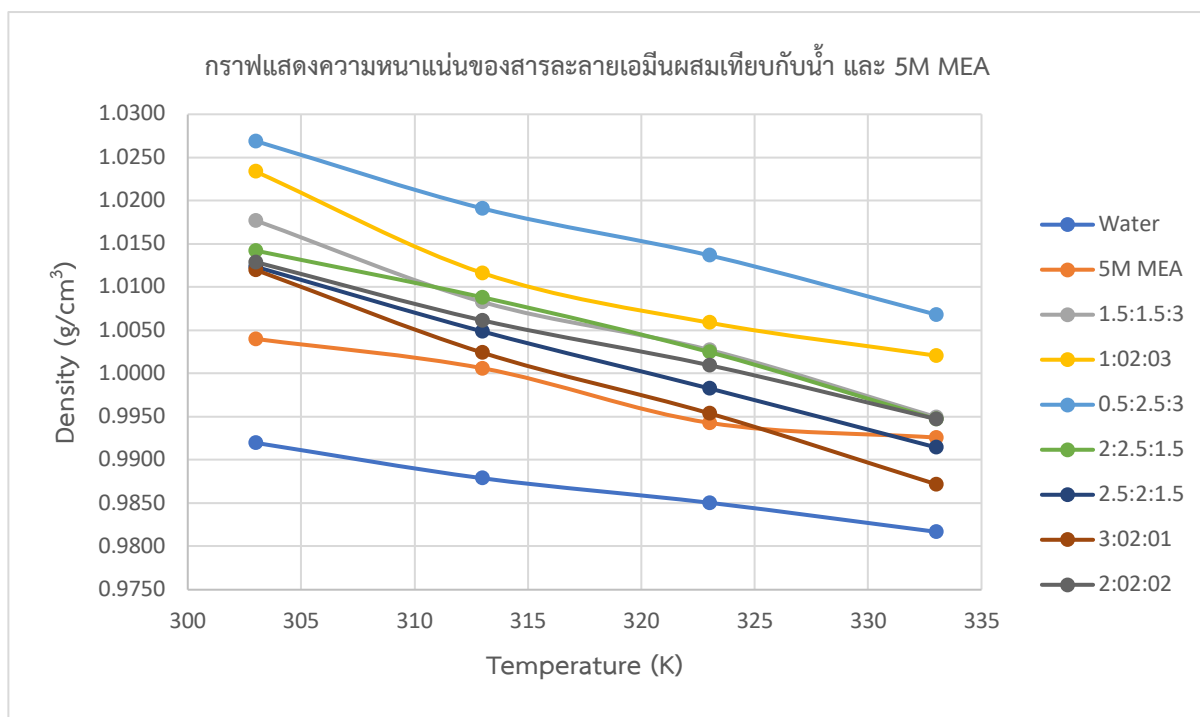
4.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองสังเกตการตกตะกอนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ตารางที่ 4.1 แสดงการตกตะกอนที่ความเข้มข้นและค่า CO₂ loading ต่าง ๆ

	Concentration (AMP:PZ:MEA)	Precipitation						
		CO ₂ loading (molCO ₂ /mol amine)						
		0	0.15	0.25	0.35	0.5	0.55	0.6
1	03:03:00	-	-	-	-	/		
2	2.5:3:0.5	-	-	-	-	/		
3	3:2.5:0.5	-	-	-	-	/		
4	2.5:2.5:1	-	-	-	-	/		
5	03:02:01	-	-	-	-	/		
6	2:2.5:1.5	-	-	-	-	-		
7	2.25:2.25:1.5	-	-	-	-	/		
8	2.5:2:1.5	-	-	-	-	-		
9	02:02:02	-	-	-	-	-		
10	1.5:1.5:3	-	-	-	-	-		
11	1.3:3.2:1.5	-	-	-	-	-	-	-
12	0.95:3.55:1.5	-	-	-	-	-	-	-
13	03:03:01	-	-	-	-	/		
14	3.5:2.5:1	-	-	-	/	/		
15	3:2.5:1.5	-	-	-	/	/		
16	3.5:2:1.5	-	-	-	-	/		
17	04:02:01	-	-	-	-	/		
18	02:04:01	-	-	-	-	/		
19	2.75:2.75:1.5	-	-	-	-	/		
20	2.5:2.5:2	-	-	-	-	/		
21	2.25:2.25:2.5	-	-	-	-	-		
22	02:03:02	-	-	-	-	-		
23	03:02:02	-	-	-	-	/		

ตารางที่ 4.1 แสดงการตกตะกอนที่ความเข้มข้นและค่า CO_2 loading ต่าง ๆ พบว่า เมื่อทำการเพิ่มสัดส่วนของ AMP และ PZ ทำให้เกิดการตกตะกอน เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของ AMP และ PZ มีความกะกะมากเมื่อเทียบกับโครงสร้างของ MEA จึงทำให้ตกตะกอนได้ง่าย ดังนั้นความเข้มข้นสูงสุดที่เป็นไปได้ที่ไม่เกิดการตกตะกอนคือ 0.95:3.55:1.5 โดยมีความเข้มข้นรวม 6 M

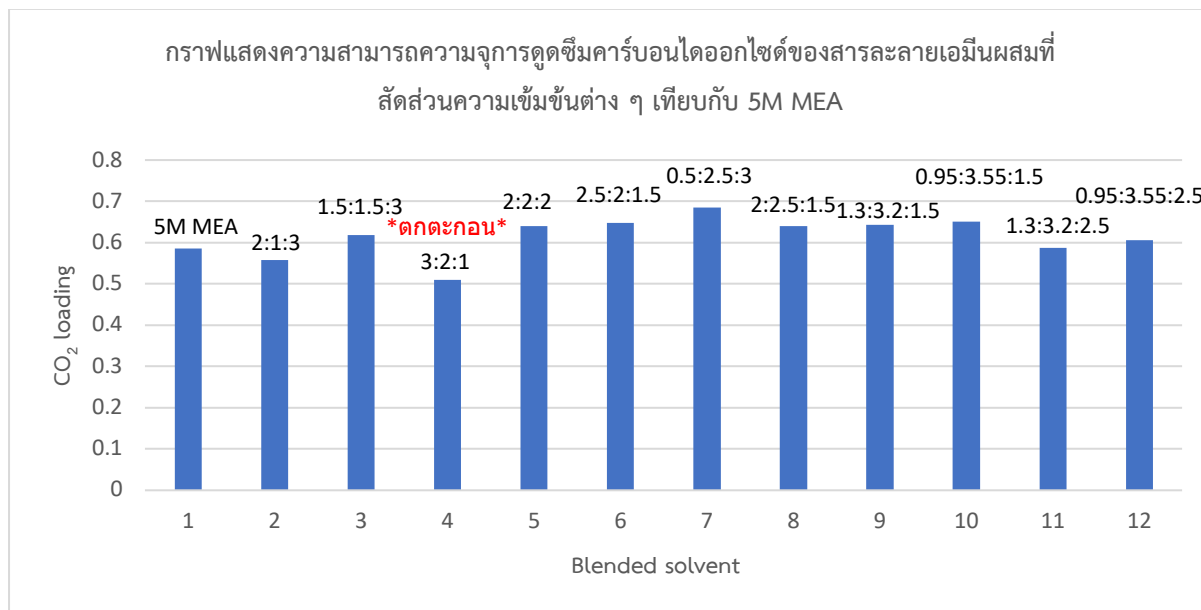
4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองการหาความหนาแน่นของสารละลายที่อุณหภูมิ 30 40 50 60 °C ปริมาตร 25 ml



รูปที่ 9 : ความหนาแน่นของสารละลายที่อุณหภูมิ 30 40 50 60 °C

รูปที่ 9 แสดงความหนาแน่นของสารละลายที่อุณหภูมิ 30 40 50 60 °C พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความหนาแน่นลดลงแบบเชิงเส้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลาย จะทำให้ปริมาตรของสารละลายเพิ่มขึ้น จึงทำให้ความหนาแน่นลดลง และเมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นระหว่างสารละลายเอมีนผสมที่สัดส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่า เมื่อทำการเพิ่มสัดส่วนความเข้มข้นของ PZ จะทำให้ความหนาแน่นของสารละลายเพิ่มขึ้น เนื่องจาก PZ มีความหนาแน่นสูงสุด รองลงมาคือ MEA และ AMP ตามลำดับ

4.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองการศึกษาศักยภาพการละลายของสารละลายเอมีนผสม



รูปที่ 10 : ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสารละลายเอมีนผสมที่สัดส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ เทียบกับ 5M MEA

รูปที่ 10 แสดงความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสารละลายเอมีนผสมที่สัดส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ เทียบกับ 5M MEA พบว่า ความสามารถความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสารละลายผสม AMP:PZ:MEA มีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับ 5 M MEA เนื่องจาก PZ และ AMP มีความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่า MEA เมื่อทำการเพิ่มสัดส่วนความเข้มข้นของ PZ และ AMP จึงทำให้มีค่า solubility ที่สูงขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างสารละลายเอมีนผสม พบว่า เมื่อทำการเพิ่มสัดส่วนความเข้มข้นของ PZ ทำให้ CO₂ loading เพิ่มขึ้น เนื่องจาก PZ มีความจุการดูดซับที่สูงกว่า AMP แต่เนื่องจาก PZ มีโครงสร้างทางเคมีที่เกาะก่จึงทำให้ตกตะกอนง่ายเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ ศึกษาการตกตะกอนของสารละลายเอมีนผสมแบบใหม่ AMP-PZ-MEA ความเข้มข้นสูง ที่อัตราส่วนความเข้มข้น และ CO₂ loading ต่าง ๆ เพื่อเลือกใช้ความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายเอมีนในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ ผลการศึกษา พบว่า สารละลายผสม AMP-PZ-MEA ที่มีความเข้มข้น AMP และ PZ มากที่สุด สามารถทำได้ที่มีความเข้มข้น 0.95 M AMP 3.55 M PZ และ 1.5 M MEA (ความเข้มข้นรวม 6 M) ซึ่งเป็นความเข้มข้นสูงสุดของ AMP และ PZ ที่สารละลายดังกล่าวจะไม่เกิดการตกตะกอนของเอมีนตลอดช่วง CO₂ loading ตั้งแต่ 0.15-0.50 mol CO₂/mol amine นอกจากนี้ การศึกษาความหนาแน่นของสารละลายเอมีนผสม AMP-PZ-MEA พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความหนาแน่นของสารละลายผสมจะลดลงแบบเชิงเส้น และเมื่อเพิ่มสัดส่วนความเข้มข้นของ PZ ความหนาแน่นของสารละลายเอมีนผสมจะเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ ความหนาแน่นของสารละลายเอมีนผสม AMP-PZ-MEA ความเข้มข้นสูงมีค่าไม่แตกต่างจากน้ำและสารละลายเอมีนดั้งเดิม MEA ทั้งนี้ เมื่อศึกษาความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสารละลายผสม AMP-PZ-MEA ที่ไม่ตกตะกอน พบว่า ความจุการดูดซับของสารละลายผสม AMP-PZ-MEA ความเข้มข้นสูงที่พัฒนาขึ้นมีความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าสารละลายแบบดั้งเดิม MEA จากผลการศึกษาข้างต้น จึงสรุปได้ว่า สารละลายเอมีนผสม AMP-PZ-MEA ความเข้มข้นสูง มีศักยภาพในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ทดแทนสารละลายเอมีนดั้งเดิมได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาหาค่าความหนาแน่น และการศึกษาสภาพการละลายของสารละลายเอมีนผสม
2. การเตรียมสารละลายเอมีนผสมต้องทำให้ความร้อนในการละลาย piperazine เนื่องจากเป็นสารละลายที่ตกตะกอนได้ง่ายเมื่อเตรียมที่ความเข้มข้นสูง
3. การศึกษาสภาพการละลายของสารละลายเอมีนผสม ต้องทำการเก็บผลทุก ๆ ครึ่งชั่วโมง หรือ 1 ชั่วโมง เพื่อหาจุดสมดุลของสารละลายเอมีนผสมที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ ที่สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้โดยไม่ทำให้เกิดการตกตะกอน และเพื่อไม่ให้สารละลายเอมีนผสมดักจับคาร์บอนไดออกไซด์เกินจุดสมดุล

บรรณานุกรม

- [1] ภิเชก ทศนะนาคะจิตต์.//(2562).//คาร์บอนไดออกไซด์ไม่มีประโยชน์เลยหรือ.//สืบค้นเมื่อ 16 กุมภาพันธ์ 2563/จาก <https://www.scimath.org/article-physics/item/9827-2019-02-21-08-51-20>
- [2] วาสนา คำโสภาส.//(ไม่ระบุ).//การปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพด้วยเทคนิคดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอมีน (MEA).//สืบค้นเมื่อ 15 กุมภาพันธ์ 2563,/จาก https://stri.cmu.ac.th/article_detail.php?id=20
- [3] จารุวรรณ เจริญชัยเพชร , พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ และ เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ.//(2561).//การปรับปรุงความสามารถในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนแกมมา-อลูมินาที่เตรียมด้วยวิธีอิมเพกนชันในสภาวะเบส.//สืบค้นเมื่อ 15 กุมภาพันธ์ 2563,/จาก <http://www.buuconference.buu.ac.th/tiche2018/reg/getfile.php?name=paper140&file=file/TICHE2018/paper140.pdf>
- [4] T. Chakravarty, U.K. Phukan, R.H. Weiland, “Reaction of acid gases with mixtures of amines,” Chemical Engineering Progress, vol. 81, pp. 32–36, 1985.
- [5] ณัฐยาน์ พงศ์สถาปติ และคณะ.//(2558).//การเลือกดักจับแก๊สเรือนกระจกคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สผสมกระแสไฮโดรเจนเข้มข้นบนตัวดูดซับของแข็งชนิดดินที่ดัดแปรหมู่ฟังก์ชันพื้นผิวด้วยเอมีน.//สืบค้นเมื่อ 15 กุมภาพันธ์ 2563,/จาก https://cuir.car.chula.ac.th/dspace/bitstream/123456789/60382/1/Nutaya%20P_Res_2558.pdf
- [6] B.P. Mandal, S.S. Bandyopadhyay, “Absorption of carbon dioxide into aqueous blends of 2-amino-2-methyl-1-propanol and monoethanolamine,” Chemical Engineering Science, vol. 58, pp. 4137–4144, 2003.
- [7] A. Samanta, S.S. Bandyopadhyay, “Absorption of carbon dioxide into aqueous solutions of piperazine active 2-amino-2-methyl-1-propanol,” Chemical Engineering Science, vol. 64, pp. 1185–1194, 2009.

- [8] Tingting Zhang, Yunsong Yu, and Zaoxiao Zhang, An interactive chemical enhancement of CO₂ capture in the MEA/PZ/AMP/DEA binary solutions. *Journal of Greenhouse Gas Control* Volume, 2018. p. 119-129.
- [9] Carbon Storage ดักจับและกักเก็บคาร์บอนเพื่อสร้างพลังงานใหม่อีกครั้ง [สื่ออิเล็กทรอนิกส์]. สืบค้นจาก: <https://blog.pttexpresso.com/carbon-storage-for-energy/>
- [10] Amaraporn K, Sirinya T, Attasak J, 2016. Carbon dioxide capture using monoethanolamine in a microchannel. *The Journal of Applied Science*, Vol. 15 No. 1: 1-12.
- [11] Siriphat Sirikunpitak. (2559). Planning for Geological Carbon Storage from Chana Power Plant In Songkhla Petroleum Reservoir. สืบค้นเมื่อ 22 มีนาคม 2564. เข้าถึงได้จาก <https://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2016/11231/1/413410.pdf>
- [12] Bruder P, Grimstvedt A, Mejdell T, Svendsen HF. CO₂ capture into aqueous solutions of piperazine activated 2-amino-2-methyl-1-propanol. *Chem Eng Sci* 2011;66:6193–6198.
- [13] Muthumari Perumal, Dhanalakshmi Jayaraman, Ambedkar Balraj. Experimental studies on CO₂ absorption and solvent recovery in aqueous blends of monoethanolamine and tetrabutylammonium hydroxide. *Chemosphere* 2021; 130159.
- [14] Chikezie N, Raphael I, Teeradet S, Chintana S, Paitoon T, Wichitpan R, Mohammed J.A, Abdelbaki B, 2017. Heat duty, heat of absorption, sensible heat and heat of vaporization of 2-Amino-2-Methyl-1-Propanol (AMP), Piperazine (PZ) and Monoethanolamine (MEA) tri-solvent blend for carbon dioxide (CO₂) capture. *Chemical Engineering Science*. 170, 26–35.
- [15] Chikezie N, Chintana S, Paitoon T, Teeradet S, Wichitpan R, Raphael I, Mohammed J.A, Abdelbaki B, 2016. 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*. 33, 742-750.

ภาคผนวก

ตอนที่ 1 ผลการทดลองการหาความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 30 40 50 60 °C ปริมาตร 25 ml

ตาราง A. 1 ค่าความหนาแน่นของน้ำ

30 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	น้ำ	Density
504	26.1276	50.7545	24.6269	0.985076
493	25.5430	50.5498	25.0068	1.000272
563	26.8614	51.6266	24.7652	0.990608

Density avg.	0.991985
Ref.	0.9957
Error (%)	0.373071
SD	0.007691

40 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	น้ำ	Density
504	26.1276	50.6322	24.5046	0.980184
493	25.5430	50.4876	24.9446	0.997784
563	26.8614	51.5041	24.6427	0.985708

Density avg.	0.987892
Ref.	0.9922
Error (%)	0.434187
SD	0.009001

50 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	น้ำ	Density
504	26.1276	50.4291	24.3015	0.97206
493	25.5430	50.5509	25.0079	1.000316
563	26.8614	51.4312	24.5698	0.982792

Density avg.	0.985056
Ref.	0.9880
Error (%)	0.297976
SD	0.014263

60 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	น้ำ	Density
504	26.1276	50.4366	24.309	0.97236
493	25.5430	50.4169	24.8739	0.994956
563	26.8614	51.3054	24.4440	0.97776

Density avg.	0.981692
Ref.	0.9778
Error (%)	0.398036
SD	0.0118

ตารางที่ A. 2 ค่าความหนาแน่นของ 5 M MEA

30 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	น้ำ	Density
504	26.1276	51.0302	24.9026	0.996104
493	25.5430	50.9054	25.3624	1.014496
563	26.8614	51.8972	25.0358	1.001432

Density avg.	1004.011	kg/m ³
Ref.	1009.2	-
Error (%)	0.514203	-
SD	0.009463	-

40 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	น้ำ	Density
504	26.1276	50.9227	24.7951	0.991804
493	25.5430	50.8924	25.3494	1.013976
563	26.8614	51.7633	24.9019	0.996076

Density avg.	1000.619	kg/m ³
Ref.	1003.2	-
Error (%)	0.25731	-
SD	0.011763	-

50 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	น้ำ	Density
504	26.1276	50.6713	24.5437	0.981748
493	25.5430	50.7833	25.2403	1.009612
563	26.8614	51.6501	24.7887	0.991548

Density avg.	994.3027	kg/m ³
Ref.	997.76	-
Error (%)	0.34651	-
SD	0.014135	-

60 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	น้ำ	Density
504	26.1276	50.7104	24.5828	0.983312
493	25.5430	50.6980	25.1550	1.0062
563	26.8614	51.5682	24.7068	0.988272

Density avg.	992.5947	kg/m ³
Ref.	984.7	-
Error (%)	0.801733	-
SD	0.012041	-

ตารางที่ A. 3 ค่าความหนาแน่นของสารละลายความเข้มข้น 1.5:1.5:3 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

30 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	น้ำ	Density	Density avg (g/cm ³)	1.01770
570	27.6830	53.0094	25.3264	1.013056		
493	25.5418	51.2754	25.7336	1.029344		
563	26.8600	52.1278	25.2678	1.010712		

40 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	น้ำ	Density	Density avg (g/cm ³)	1.00828
570	27.6830	52.8201	25.1371	1.005484		
493	25.5418	51.0119	25.4701	1.018804		
563	26.8600	51.8738	25.0138	1.000552		

50 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	น้ำ	Density	Density avg (g/cm ³)	1.00273
570	27.6830	52.6842	25.0012	1.000048		
493	25.5418	50.8739	25.3321	1.013284		
563	26.8600	51.7314	24.8714	0.994856		

60 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	น้ำ	Density	Density avg (g/cm ³)	0.99496
570	27.6942	52.5334	24.8392	0.993568		
493	25.5526	50.6022	25.0496	1.001984		
563	26.8666	51.6000	24.7334	0.989336		

ตารางที่ A. 4 ค่าความหนาแน่นของสารละลายความเข้มข้น 0.5:2.5:3 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

30 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	Solution	Density	Density avg (g/cm ³)	1.02689
570	27.6820	53.2914	25.6094	1.024376		
493	25.5427	51.4805	25.9378	1.037512		
563	26.8602	52.3303	25.4701	1.018804		

40 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	Solution	Density	Density avg (g/cm ³)	1.01910
570	27.6818	53.0715	25.3897	1.015588		
493	25.5419	51.2998	25.7579	1.030316		
563	26.8600	52.1452	25.2852	1.011408		

50 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	Solution	Density	Density avg (g/cm ³)	1.01367
570	27.6838	52.9712	25.2874	1.011496		
493	25.5535	51.1312	25.5777	1.023108		
563	26.8603	52.0206	25.1603	1.006412		

60 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	Solution	Density	Density avg (g/cm ³)	1.00680
570	27.6885	52.7996	25.1111	1.004444		
493	25.5608	50.9621	25.4013	1.016052		
563	26.8729	51.8719	24.9990	0.999960		

ตารางที่ A. 5 ค่าความหนาแน่นของสารละลายความเข้มข้น 1:2:3 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

30 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	Solution	Density	Density avg (g/cm ³)	1.02337
570	27.6856	53.1986	25.5130	1.020520		
493	25.5450	51.4039	25.8589	1.034356		
563	26.8655	52.2459	25.3804	1.015216		

40 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	Solution	Density	Density avg (g/cm ³)	1.01163
570	27.6813	52.9045	25.2232	1.008928		
493	25.5415	51.0927	25.5512	1.022048		
563	26.8591	51.9568	25.0977	1.003908		

50 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	Solution	Density	Density avg (g/cm ³)	1.00589
570	27.6823	52.7692	25.0869	1.003476		
493	25.5546	50.8835	25.3289	1.013156		
563	26.8589	51.8843	25.0254	1.001016		

60 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	Solution	Density	Density avg (g/cm ³)	1.00207
570	27.6882	52.6711	24.9829	0.999316		
493	25.5458	50.8642	25.3184	1.012736		
563	26.8795	51.7331	24.8536	0.994144		

ตารางที่ A. 6 ค่าความหนาแน่นของสารละลายความเข้มข้น 2:2.5:1.5 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

30 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	Solution	Density	Density avg (g/cm ³)	1.01422
570	27.6823	52.9613	25.2790	1.011160		
493	25.5417	51.1671	25.6254	1.025016		
563	26.8600	52.0222	25.1622	1.006488		

40 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	Solution	Density	Density avg (g/cm ³)	1.00882
570	27.6822	52.8510	25.1688	1.006752		
493	25.5416	51.0124	25.4708	1.018832		
563	26.8590	51.8810	25.0220	1.000880		

50 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	Solution	Density	Density avg (g/cm ³)	1.00248
570	27.6821	52.6941	25.0120	1.000480		
493	25.5415	50.8723	25.3308	1.013232		
563	26.8602	51.7036	24.8434	0.993736		

60 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	Solution	Density	Density avg (g/cm ³)	0.99471
570	27.6810	52.4865	24.8055	0.992220		
493	25.5426	50.6801	25.1375	1.005500		
563	26.8592	51.5195	24.6603	0.986412		

ตารางที่ A. 7 ค่าความหนาแน่นของสารละลายความเข้มข้น 2.5:2:1.5 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

30 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	Solution	Density	Density avg (g/cm ³)	1.01235
570	27.6823	52.9075	25.2252	1.009008		
493	25.5377	51.1143	25.5766	1.023064		
563	26.8598	51.9845	25.1247	1.004988		

40 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	Solution	Density	Density avg (g/cm ³)	1.00487
570	27.6847	52.7521	25.0674	1.002696		
493	25.5447	50.9217	25.3770	1.015080		
563	26.8624	51.7832	24.9208	0.996832		

50 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	Solution	Density	Density avg (g/cm ³)	0.99828
570	27.6835	52.5578	24.8743	0.994972		
493	25.5419	50.7625	25.2206	1.008824		
563	26.8616	51.6377	24.7761	0.991044		

60 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	Solution	Density	Density avg (g/cm ³)	0.99145
570	27.6816	52.4146	24.7330	0.989320		
493	25.5426	50.5737	25.0311	1.001244		
563	26.8595	51.4543	24.5948	0.983792		

ตารางที่ A. 8 ค่าความหนาแน่นของสารละลายความเข้มข้น 3:2:1 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

30 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	Solution	Density	Density avg (g/cm ³)	1.01199
570	27.6819	52.9066	25.2247	1.008988		
493	25.5432	51.1066	25.5634	1.022536		
563	26.8596	51.9709	25.1113	1.004452		

40 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	Solution	Density	Density avg (g/cm ³)	1.00241
570	27.6816	52.6623	24.9807	0.999228		
493	25.5419	50.8513	25.3094	1.012376		
563	26.8614	51.7524	24.8910	0.99564		

50 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	Solution	Density	Density avg (g/cm ³)	0.99539
570	27.6823	52.5079	24.8256	0.993024		
493	25.5413	50.6802	25.1389	1.005556		
563	26.8591	51.5492	24.6901	0.987604		

60 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	Solution	Density	Density avg (g/cm ³)	0.98719
570	27.6828	52.2758	24.5930	0.983720		
493	25.5414	50.4876	24.9462	0.997848		
563	26.8592	51.3592	24.5000	0.980000		

ตารางที่ A. 9 ค่าความหนาแน่นของสารละลายความเข้มข้น 2:2:2 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

30 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	Solution	Density	Density avg (g/cm ³)	1.01290
570	27.6835	52.9266	25.2431	1.009724		
493	25.5410	51.1288	25.5878	1.023512		
563	26.8593	51.9960	25.1367	1.005468		

40 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	Solution	Density	Density avg (g/cm ³)	1.00615
570	27.6808	52.7784	25.0976	1.003904		
493	25.5415	50.9496	25.4081	1.016324		
563	26.8589	51.8146	24.9557	0.998228		

50 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	Solution	Density	Density avg (g/cm ³)	1.00096
570	27.6815	52.6300	24.9485	0.99794		
493	25.5414	50.8417	25.3003	1.012012		
563	26.8586	51.6821	24.8235	0.992940		

60 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	Solution	Density	Density avg (g/cm ³)	0.99474
570	27.6825	52.4559	24.7734	0.990936		
493	25.5410	50.6812	25.1402	1.005608		
563	26.8600	51.5516	24.6916	0.987664		

ตารางที่ A. 10 ค่าความหนาแน่นของสารละลายความเข้มข้น 1.3:3.2:1.5 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

30 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	Solution	Density	Density avg (g/cm ³)	1.02455
570	27.6814	53.2264	25.5450	1.021800		
493	25.5421	51.4173	25.8752	0.982328		
563	26.8591	52.2804	25.4213	1.016852		

40 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	Solution	Density	Density avg (g/cm ³)	1.01434
570	27.6833	52.9697	25.2864	1.011456		
493	25.5418	51.1615	25.6197	1.024788		
563	26.8603	52.0297	25.1694	1.006776		

50 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	Solution	Density	Density avg (g/cm ³)	1.00865
570	27.6819	52.8245	25.1426	1.005704		
493	25.5434	51.0274	25.4840	1.019360		
563	26.8605	51.8828	25.0223	1.000892		

60 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	Solution	Density	Density avg (g/cm ³)	1.00210
570	27.6814	52.6734	24.9920	0.999680		
493	25.5418	50.8375	25.2957	1.011828		
563	26.8597	51.7298	24.8701	0.994804		

ตารางที่ A. 11 ค่าความหนาแน่นของสารละลายความเข้มข้น 0.95:3.55:1.5 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

30 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	Solution	Density	Density avg (g/cm ³)	1.02213
570	27.6837	53.0844	25.4007	1.016028		
493	25.5431	51.4947	25.9619	0.985344		
563	26.8611	52.1682	25.3071	1.012284		

40 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	Solution	Density	Density avg (g/cm ³)	1.01670
570	27.6831	53.0288	25.3457	1.013828		
493	25.5441	51.2317	25.6876	1.027504		
563	26.8600	52.0790	25.2190	1.008760		

50 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	Solution	Density	Density avg (g/cm ³)	1.01102
570	27.6828	52.8726	25.1898	1.007592		
493	25.5444	51.0853	25.5409	1.021636		
563	26.8610	51.9567	25.0957	1.003828		

60 °C

Pycnometer	ขวดเปล่า	ขวด+น้ำ	Solution	Density	Density avg (g/cm ³)	1.00639
570	27.6820	52.7538	25.0718	1.002872		
493	25.5425	50.9826	25.4401	1.017604		
563	26.8607	51.8278	24.9671	0.998684		

ตารางที่ A. 12 สภาพการละลายของ 2 M PZ และ 5 M MEA

สารละลาย	Partial pressure		จุดเยือก	ปริมาณ CO ₂	CO ₂ loading (mol CO ₂ /mol amine)	Ref
	CO ₂	N ₂				
MEA 5M	10	90	4.5	68	0.066176471	0.538
PZ 2M	12	88	4	47	0.085106383	0.805

ตารางที่ A. 13 สภาพการละลายของสารละลายความเข้มข้น 2:1:3

ที่เวลา 13:10

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.0029	79	14
Mol amine	0.006		
CO ₂ loading	0.484		

ที่เวลา 14:10

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00304	82	14
Mol amine	0.006		
CO ₂ loading	0.506		

ที่เวลา 15:10

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00335	89	14
Mol amine	0.006		
CO ₂ loading	0.558		

ที่เวลา 15:34

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00335	89	14
Mol amine	0.006		
CO ₂ loading	0.558		

ตารางที่ A. 14 สภาพการละลายของสารละลายความเข้มข้น 0.5:2.5:3

ที่เวลา 15:33

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00375	102	18
Mol amine	0.006		
CO ₂ loading	0.625		

ที่เวลา 16:33

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00402	108	18
Mol amine	0.006		
CO ₂ loading	0.669		

ที่เวลา 17:33

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00411	110	18
Mol amine	0.006		
CO ₂ loading	0.685		

ตารางที่ A. 15 สภาพการละลายของสารละลายความเข้มข้น 3:2:1

ที่เวลา 12:10

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00306	84.5	16
Mol amine	0.006		
CO ₂ loading	0.510		

ที่เวลา 13:10 ****ตกตะกอน****

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	-	-	-
Mol amine	0.006		
CO ₂ loading	-		

ตารางที่ A. 16 สภาพการละลายของสารละลายความเข้มข้น 1.5:1.5:3

ที่เวลา 13:10

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00353	94	15
Mol amine	0.006		
CO ₂ loading	0.588		

ที่เวลา 14:10

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00344	92	15
Mol amine	0.006		
CO ₂ loading	0.573		

ที่เวลา 15:10

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00397	104	15
Mol amine	0.006		
CO ₂ loading	0.662		

ที่เวลา 15:34

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00371	98	15
Mol amine	0.006		
CO ₂ loading	0.618		

ตารางที่ A. 17 สภาพการละลายของสารละลายความเข้มข้น 2:2:2

ที่เวลา 13:23

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00326	89	16
Mol amine	0.006		
CO ₂ loading	0.543		

ที่เวลา 14:23

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00342	92.5	16
Mol amine	0.006		
CO ₂ loading	0.569		

ที่เวลา 15:23

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00339	92	16
Mol amine	0.006		
CO ₂ loading	0.565		

ที่เวลา 15:23

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00384	102	16
Mol amine	0.006		
CO ₂ loading	0.640		

ตารางที่ A. 18 สภาพการละลายของสารละลายความเข้มข้น 2.5:2:1.5

ที่เวลา 12:15

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00129	45	16
Mol amine	0.006		
CO ₂ loading	0.216		

ที่เวลา 12:45

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00321	88	16
Mol amine	0.006		
CO ₂ loading	0.536		

ที่เวลา 13:15

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00371	99	16
Mol amine	0.006		
CO ₂ loading	0.618		

ที่เวลา 13:45

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00388	103	16
Mol amine	0.006		
CO ₂ loading	0.647		

ที่เวลา 14:15 ****ตกตะกอน****

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	-	-	-
Mol amine	0.006		
CO ₂ loading	-		

ตารางที่ A. 19 สภาพการละลายของสารละลายความเข้มข้น 2:2.5:1.5

ที่เวลา 12:15

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00357	97	17
Mol amine	0.006		
CO ₂ loading	0.595		

ที่เวลา 12:45

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00388	104	17
Mol amine	0.006		
CO ₂ loading	0.647		

ที่เวลา 13:15

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00375	101	17
Mol amine	0.006		
CO ₂ loading	0.625		

ที่เวลา 13:45

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00384	103	17
Mol amine	0.006		
CO ₂ loading	0.640		

ที่เวลา 14:15

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00384	103	17
Mol amine	0.006		
CO ₂ loading	0.640		

ตารางที่ A. 20 สภาพการละลายของสารละลายความเข้มข้น 1.3:3.2:1.5

ที่เวลา 11:00

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00210	66	19
Mol amine	0.006		
CO ₂ loading	0.618		

ที่เวลา 12:00

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00371	102	19
Mol amine	0.006		
CO ₂ loading	0.618		

ที่เวลา 13:00

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00353	98	19
Mol amine	0.006		
CO ₂ loading	0.588		

ที่เวลา 14:00

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00368	101.5	19
Mol amine	0.006		
CO ₂ loading	0.614		

ที่เวลา 15:00

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00386	105.5	19
Mol amine	0.006		
CO ₂ loading	0.644		

ที่เวลา 16:00

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00386	105.5	19
Mol amine	0.006		
CO ₂ loading	0.644		

ตารางที่ A. 21 สภาพการละลายของสารละลายความเข้มข้น 0.95:3.55:1.5

ที่เวลา 11:00

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00321	92	20
Mol amine	0.006		
CO ₂ loading	0.536		

ที่เวลา 12:00

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00368	102.5	20
Mol amine	0.006		
CO ₂ loading	0.614		

ที่เวลา 13:00

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00364	101.5	20
Mol amine	0.006		
CO ₂ loading	0.606		

ที่เวลา 14:00

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00364	101.5	20
Mol amine	0.006		
CO ₂ loading	0.606		

ที่เวลา 15:00

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00391	107.5	20
Mol amine	0.006		
CO ₂ loading	0.651		

ที่เวลา 16:00

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00391	107.5	20
Mol amine	0.006		
CO ₂ loading	0.651		

ตารางที่ A. 22 สภาพการละลายของสารละลายความเข้มข้น 1.3:3.2:2.5

ที่เวลา 12:00

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00223	71	21
Mol amine	0.007		
CO ₂ loading	0.319		

ที่เวลา 13:00

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00393	109	21
Mol amine	0.007		
CO ₂ loading	0.561		

ที่เวลา 14:00

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00714	181	21
Mol amine	0.007		
CO ₂ loading	1.02		

ที่เวลา 15:00

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00406	112	21
Mol amine	0.007		
CO ₂ loading	0.580		

ที่เวลา 16:00

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00411	113	21
Mol amine	0.007		
CO ₂ loading	0.587		

ตารางที่ A. 23 สภาพการละลายของสารละลายความเข้มข้น 0.95:3.55:2.5

ที่เวลา 12:00

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00404	112.5	22
Mol amine	0.007		
CO ₂ loading	0.577		

ที่เวลา 13:00

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00411	114	22
Mol amine	0.007		
CO ₂ loading	0.587		

ที่เวลา 14:00

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00424	116	22
Mol amine	0.007		
CO ₂ loading	0.606		

ที่เวลา 15:00

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00406	113	22
Mol amine	0.007		
CO ₂ loading	0.580		

ที่เวลา 16:00

		ปริมาณ CO ₂	ปริมาณ HCl
Mol CO ₂	0.00424	117	22
Mol amine	0.007		
CO ₂ loading	0.606		