โครงการ
การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ ความสามารถในการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีนชนิดใหม่เพื่อการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์
Regeneration ability of new amine solvents for CO2 absorption

ชื่อนิสิต นายปณต หล่อยืนยง **เลขประจำตัว** 5932937623
นายพิพัฒน์ กลิ่นทับ **เลขประจำตัว** 5932946223

ภาควิชา เคมีเทคนิค

ปีการศึกษา 2562

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

เรื่อง

ความสามารถในการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีนชนิดใหม่เพื่อการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์
(Regeneration ability of new amine solvents for CO_2 absorption)

โดย

นายปณต	**หล่อยืนยง**	**รหัสนิสิต 5932937623**
นายพิพัฒน์	**กลิ่นทับ**	**รหัสนิสิต 5932946223**

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ เสมา

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของวิชา 2306499 Senior Project

ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

ชื่อโครงการ ความสามารถในการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีนชนิดใหม่เพื่อการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์
ชื่อนิสิตผู้ทำโครงการ นายปณต หล่อยืนยง
นายพิพัฒน์ กลิ่นทับ
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร. ธีรวัฒน์ เสมา
ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2562

บทคัดย่อ

การลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศนั้นสามารถทำได้หลากหลายวิธีเช่น การใช้เยื่อเลือกผ่าน, การดูดซับและการดูดซึม โดยการดูดซึมทางเคมี (Chemical absorption) นั้นเป็นวิธีที่นิยมและมีประสิทธิภาพดี ซึ่งในภาคอุตสาหกรรมนิยมใช้ตัวทำละลายประเภทเอมีนเพื่อใช้ในการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ ในการเลือกตัวทำละลายเอมีนเพื่อนำมาใช้ในการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์นั้น นอกจากต้องคำนึงถึงจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาและความจุในการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์มาก ยังจำเป็น ต้องพิจารณาความสามารถในการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีนเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อลดปริมาณการใช้สารเคมีและลดค่าใช้จ่ายในทางอุตสาหกรรม ปัจจุบันได้มีการใช้ตัวทำละลายเอมีนหลายชนิดซึ่งมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันตามชนิดและการใช้งาน โครงงานวิจัยนี้จึงศึกษาตัวทำละลายเอมีนชนิดใหม่ที่มี N-Methyl-4-piperidinol (MPDL) เป็นส่วนผสม โดยทำการเปรียบเทียบกับตัวทำละลายเอมีนแบบดั้งเดิม ได้แก่ Methyldiethanolamine (MDEA) และ Monoethanolamine (MEA) ในการทดลองการฟื้นฟูตัวทำละลายนั้น สารละลายเอมีนตัวอย่างที่ค่า CO_2 loading 0.5 mol CO_2/mol amine จะถูกให้ความร้อนผ่าน Stirred-hot plate ที่อุณหภูมิ 90-120°C โดยค่า CO_2 loading ของสารละลายเอมีนหลังการฟื้นฟูจะแสดงถึงความสามารถในการฟื้นฟูตัวทำละลาย ทั้งนี้ค่า CO2 loading จะพิจารณาได้จาก acidification technique ผ่านการไทเทรตสารละลายเอมีนตัวอย่างด้วย 1.0 M HCl นอกจากนี้แล้วจะทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรที่ส่งผลต่อการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีนในเชิงปฏิบัติการ ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา และอัตราส่วนความเข้มข้นของตัวทำละลายเอมีน โดยพิจารณาจากความสามารถในการฟื้นฟูตัวทำละลายจากค่า CO_2 loading ที่อยู่ในตัวทำละลายเอมีนหลังผ่านกระบวนการฟื้นฟูหลังการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์

คำสำคัญ: การฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีน, ความร้อนที่ใช้ในการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีน, MEA, TEA

สาขาวิชา เคมีวิศวกรรม ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษา.....

Title Regeneration ability of new amine solvents for CO_2 absorption

Student name Mr. Panot Loryuenyong

Mr. Phiphat Klintap

Advisor Dr. Teerawat Sema

Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University,

Academic Year 2019

ABSTRACT

There are many solutions for reducing the amount of CO_2 emission that release to the atmosphere such as using selective membrane, adsorption and absorption. The Chemical absorption is the well-known solution and has high efficiency which Amine solvent is commonly used in the industrial sector for CO_2 absorption. When choosing an Amine solvent to be used for CO_2 absorption, it is necessary to consider for kinetics of reaction and CO_2 absorption capacity. In addition, it is also necessary to consider for the regeneration ability of Amine solvent in order to reduce chemical consumption and reduce industrial costs. Nowadays, many types of amines are used, which have their advantages and disadvantages depend on the type and usage. This research studied the New Amine solvent which N-Methyl-4-piperidinol (MPDL) was included. This Amine solvent was studied by comparison with traditional amines solvent which are Methyldiethanolamine (MDEA) and monoethanolamine (MEA). For regeneration of solvent experiment, the sample Amine solution with CO_2 loading 0.5 mol CO_2/mol amine was heated to 90-120°C by using Stirred-hot plate which CO_2 loading value of Amine solution after regeneration showed the regeneration ability of solvent. This CO_2 loading value can be considered from acidification technique by titration of the amine solution with 1.0 M HCl. In addition, the optimum conditions for variables that affect amine solvent regeneration will be studied which are temperature, time and the concentration ratio of the Amine solvent, those mentioned factors will be considered the regeneration ability of solvent from CO_2 loading value in Amine solvent after the regeneration process.

Key word: Amine regeneration, Heat of regeneration, MEA, TEA

Major: Chemical Engineering Advisor's signature .....

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ เสมา อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัยที่คอยให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการแก้ปัญหาต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งตลอดระยะเวลาในการทำโครงการวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่และนักวิทยาศาสตร์ทุกท่านที่ให้ความรู้ ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในด้านเครื่องมืออุปกรณ์และสถานที่ตลอดการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณพี่ ๆ ในกลุ่มงานวิจัย Multiphase flow laboratory ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือตลอดระยะเวลาในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกคนที่ให้กำลังใจและความช่วยเหลือจนประสบความสำเร็จ

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัวซึ่งเป็นผู้สนับสนุนผู้วิจัยให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียนตลอดจนคอยให้กำลังใจเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

เรื่อง	**หน้า**
บทคัดย่อ	
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 วิธีการดำเนินการ	2
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 เทคโนโลยีในการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	3
2.2 คุณสมบัติของตัวทำละลายเอมีน	4
2.3 ความร้อนที่ใช้ในการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีน	5
3. วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	7
3.1.1. สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	7
3.1.2. อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	7
3.2 การทดลองเพื่อวัดความสามารถในการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีน	8
เพื่อการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์	
3.3 การหาปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในตัวทำละลายเอมีนที่เวลาต่าง ๆ	9
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	10

4.1 การทดสอบสภาวะที่เหมาะสมสำหรับตัวทำละลาย MEA 11
4.2 การทดสอบสภาวะที่เหมาะสมสำหรับตัวทำละลาย TEA 11
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 12
5.1 สรุปผลการดำเนินการวิจัย 12
5.1.1 ผลของความสามารถในการดูดซึมต่อเวลาที่ใช้ในการฟื้นฟู 12
5.1.2 ผลของชนิดตัวทำละลายเอมีนในการดูดซึมต่อความสามารถในการฟื้นฟู 12
5.1.3 สรุปผลดำเนินการตลอดงานวิจัย 12
5.2 ข้อเสนอแนะในการดำเนินการวิจัย 12
5.2.1 ข้อเสนอแนะในการทำการทดลอง 12
5.2.1 ข้อเสนอแนะต่อชุดเครื่องมือ 13
ภาคผนวก
รูปภาพชุดเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองจริง 15
เอกสารอ้างอิง 16

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ

กระบวนการเชิงอุตสาหกรรมในปัจจุบันนั้นล้วนเป็นสาเหตุของการเกิดและปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศ เช่น การเผาไหม้สารประเภทสารไฮโดรคาร์บอน การผลิตไฮโดรเจน การผลิตแก๊สธรรมชาติ เป็นต้น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกมานั้นได้ส่งผลกระทบต่าง ๆต่อสิ่งแวดล้อมมีนัยสำคัญและเป็นวงกว้าง อาทิ ภาวะโลกร้อน ภาวะเรือนกระจก และการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่ผันผวนและรุนแรง ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกมามีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆจึงต้องมีการจัดการแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อย่างเหมาะสม โดยต้องเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพ ปลอดภัยและมีค่าใช้จ่ายที่เหมาะสม

การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นกระบวนการที่ได้รับความสนใจอย่างมาก ทั้งจากภาคอุตสาหกรรมและงานวิจัย เพื่อลดปริมาณการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และการนำไปใช้ประโยชน์จริงในภาคอุตสาหกรรม กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่นิยมกันใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ การดักจับด้วยน้ำ (water scrubbing) การดูดซับโดยการเปลี่ยนความดัน (pressure swing absorption: PSA) การแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน (membrane separation) การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) และการดูดซึมด้วยสารเคมี (chemical absorption) เป็นต้น โดยในงานวิจัยที่กลุ่มของข้าพเจ้าเลือกศึกษาจะเป็นการใช้เทคนิคการดูดซึมด้วยสารเคมีโดยใช้ตัวทำละลายเอมีน โดยวิธีนี้เป็นที่นิยมเนื่องจากมีราคาต้นทุนที่ต่ำ ตัวละลายเอมีนที่ใช้เป็นสารดูดซึมที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ มีประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงและมีเสถียรภาพทางความร้อน จึงทำให้กลุ่มของข้าพเจ้าสนใจศึกษาการฟื้นฟูสารละลายเอมีนเพื่อนำมาใช้ใหม่เพราะต้องการมีส่วนร่วมในการเพิ่มประสิทธิภาพในการลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยการประยุกต์และวิจัยหาปัจจัยที่ส่งผลต่อการนำตัวทำละลายเอมีนกลับมาใช้ใหม่เพื่อพัฒนาการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นและมีค่าใช้จ่ายในการฟื้นฟูตัวทำละลายเคมีลดลง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาความสามารถในการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีนชนิดใหม่เพื่อการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในแง่ของประสิทธิภาพและการถ่ายเทพลังงานความร้อนที่ใช้ในการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีน

2. เพื่อศึกษาปัจจัยต่าง ๆที่มีผลต่อความสามารถในการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีนชนิดใหม่เพื่อการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ เช่น อุณภูมิ สัดส่วนของสารละลายเอมีนที่ใช้ ชนิดของสารผสม เป็นต้น

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อความสามารถฟื้นฟูตัวทำละลายชนิดใหม่โดยมี MPDL เป็นตัวทำละลายที่ผสมอยู่ โดยที่ตัวทำละลายเอมีนมีปริมาณ CO_2 loading (mol CO_2/mol amine) เริ่มต้นเท่ากันที่ 0.5 และตัวแปรเชิงปฏิบัติการที่สนใจ ได้แก่ ความร้อน เวลาในการฟื้นฟู และอัตราส่วนความเข้มข้นของตัวทำละลายเอมีนผสม โดยพิจารณาจากความสามารถในการฟื้นฟูตัวทำละลายจากค่า CO_2 loading (mol CO_2/mol amine) ที่อยู่ในตัวทำละลายเอมีนหลังผ่านกระบวนการฟื้นฟูหลัง ที่ความดันบรรยากาศ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบค่าพลังงานและประสิทธิภาพในการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีนชนิดใหม่เพื่อประกอบการตัดสินใจในการเลือกตัวทำละลายเอมีนต่าง ๆให้เหมาะสมต่อการใช้ในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
2. ได้ตัวทำละลายเอมีนชนิดใหม่ในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสูง และคุ้มค่าต่อการลงทุนในเชิงภาคอุตสาหกรรม
3. เกิดการเผยแพร่องค์ความรู้จากงานวิจัยดังไปสู่สาธารณะเพื่อประกอบการแก้ไขปัญหา สิ่งแวดล้อมในภาคอุตสาหกรรม และสังคม
4. ได้รับความรู้และประสบการณ์ต่อผู้ดำเนินโครงการ

1.5 วิธีการดำเนินการ

1. ศึกษาและกำหนดเครื่องมือและสารที่ใช้วัดความสามารถของการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีน ออกแบบการทดลอง และศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. จัดหาอุปกรณ์เครื่องมือที่จำเป็นต้องใช้ในงานวิจัย
3. กำหนดอัตราส่วนความของเข้มข้นตัวทำละลายเอมีนโดยให้ตัวทำละลายเอมีน N-Methyl-4-Piperidinol (MPDL) เป็นตัวทำละลายหลักแล้วผสมเอมีนชนิดอื่นลงไปให้เป็นตัวทำละลายตัวที่สองในระบบยกตัวอย่างเช่น MPDL-2-Amino-2-Methyl-1-Propanol (AMP), Monoethanolamine (MEA) และ Piperazine (PZ) เป็นต้น
4. ศึกษาผลของชนิดตัวทำละลายต่าง ๆต่อประสิทธิภาพการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีน และค่าการถ่ายเทพลังงานความร้อนในการฟื้นฟูทำละลายเอมีนชนิดใหม่
5. ศึกษาผลของชนิดตัวทำละลายที่สัดส่วนความเข้มข้นต่าง ๆต่อประสิทธิภาพการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีนและค่าการถ่ายเทพลังงานความร้อนในการฟื้นฟูทำละลายเอมีนชนิดใหม่
6. วิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาแนวทางการพัฒนาฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีนชนิดใหม่
7. สรุปผลการทดลอง และเขียนรายงานฉบับสมบูรณ์

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทคโนโลยีในการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ในปัจจุบันนั้นมีเทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ให้เลือกใช้ได้หลายชนิดโดยมีทั้งกระบวนการทางกายภาพ เช่น การใช้เยื่อเลือกผ่าน (membrane) และกระบวนการทางเคมี เช่น การดูดซับ (adsorption) และการดูดซึมด้วยตัวทำลายเอมีน (amine-base absorption) โดยเทคโนโลยีแต่ละชนิดนั้นมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันดังตาราง

ตารางที่ 2.1.1 ตารางแสดงข้อดี และข้อเสียของเทคโนโลยีที่ใช้ในการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

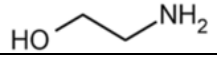
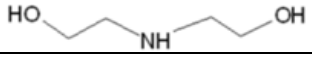
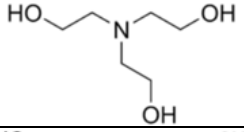
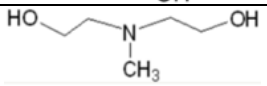
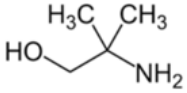
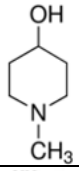
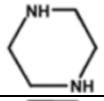
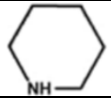
เทคโนโลยี	ข้อดี	ข้อเสีย
การดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวทำละลายเอมีนหลังการเผาไหม้	-เป็นเทคโนโลยีที่มีการพิสูจน์ และยอมรับโดยทั่วไป -สามารถใช้ได้กับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณที่มาก	-ใช้พลังงานสูงในการฟื้นฟูตัวทำละลาย -ตัวทำละลายมีการเสื่อมสภาพ -ตัวทำละลายมีความสามารถในการกัดกร่อน
การดูดซับ	-เป็นเทคโนโลยีที่ไม่ซับซ้อน -มีความต้านทานทางความร้อน และทางเคมีสูง	-มีต้นทุนในการดำเนินการสูง -ประสิทธิภาพต่ำ
การใช้เยื่อเลือกผ่าน	-มีความต้านทานทางความร้อน และทางเคมีสูง -ความสามารถในการแยกแก๊ส และของเหลวได้ดี	-มีต้นทุนในการลงทุนเริ่มต้นที่สูง -ต้องมีการวิจัยและพัฒนาเพิ่มเติม

จากตารางที่ 2.1.1 สามารถสรุปได้ว่าเทคโนโลยีในการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวทำละลายเอมีนหลังการเผาไหม้ได้รับการยอมรับว่าเป็นตัวเลือกที่มีความคุ้มค่าที่สุดเพื่อนำไปใช้ในเชิงอุตสาหกรรม เนื่องจากมีความสามารถในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ในปริมาณที่สูงถึง 1 ล้านตันต่อปี (อ้างอิงจากโรงงานในรัฐแอลเบอร์ตา ประเทศแคนาดา) อีกทั้งมีความปลอดภัยในการดักจับอีกด้วย[1,2]

2.2 คุณสมบัติของตัวทำละลายเอมีน

โดยทั่วไปแล้วสำหรับกระบวนการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวทำละลายเอมีนนั้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน โดยมีตัวทำละลายเอมีนที่เป็นที่ยอมรับและใช้โดยทั่วไปคือ monoethanolamine (MEA), diethanolamine (DEA), triethanolamine (TEA), methyldiethanolamine (MDEA), 2-amino-2-methyl-1-propanol (PZ) และ piperidine (PIP) และเอมีนที่มีศักยภาพสูงในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ N-methyl-4-piperidinol (MPDL)

ตารางที่ 2.2.1 ตารางแสดงคุณสมบัติของตัวทำละลายเอมีนชนิดต่าง ๆ[3,4]

ตัวทำละลายเอมีน	มวลโมเลกุล (กรัม/โมล)	โครงสร้างทางเคมี	ชนิดของตัวทำละลายเอมีน
MEA	61		เอมีนปฐมภูมิ
DEA	105		เอมีนทุติยภูมิ
TEA	149		เอมีนตติยภูมิ
MDEA	119		เอมีนตติยภูมิ
AMP	90		เอมีนปฐมภูมิที่มีความไม่เป็นระเบียบ
MPDL	115		เอมีนตติยภูมิแบบวง
PZ	86		เอมีนตติยภูมิแบบวง
PIP	85		เอมีนตติยภูมิแบบวง

สมการการเกิดคาร์บาเมตของปฏิกิริยาของเอมีนชนิดปฐมภูมิ

$$\boldsymbol{RNH_2 + CO_2 + B \overset{k_T, k_{-T}}{\longleftrightarrow} RNHCOO^- + BH^+} \qquad (2.2.1)$$

สมการการเกิดคาร์บาเมตของปฏิกิริยาของเอมีนชนิดตติยภูมิ

$$\boldsymbol{R_1R_2NH + CO_2 + B \overset{k_T, k_{-T}}{\longleftrightarrow} R_1R_2NCOO^- + BH^+} \qquad (2.2.2)$$

สมการการเกิดไบคาร์บอเนตของปฏิกิริยาของเอมีนชนิดตติยภูมิ

$$R_1R_2R_3N + CO_2 + H_2O \overset{k_{tert}}{\longleftrightarrow} R_1R_2R_3NH^+ + HCO_3^- \quad (2.2.3)$$

โดยตัวทำละลายเอมีนแต่ละชนิดนั้นมีคุณสมบัติในการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่างกันดังนี้ MEA และ DEA ซึ่งเป็นเอมีนปฐมภูมิ และเอมีนทุติยภูมิตามลำดับ สามารถเกิดปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้รวดเร็วกว่า TEA ที่เป็นเอมีนตติยภูมิ แต่มีข้อเสียคือก่อให้เกิดคาร์บาเมต ($RNHCOO^-$) ดังสมการที่ 2.2.1 และ 2.2.2 และก่อให้เกิดความร้อนที่สูงจากการคายความร้อนของปฏิกิริยาการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งทำให้ต้องใช้พลังงานความร้อนที่สูงเพื่อใช้ในการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีนเช่นกัน DEA นั้นมีข้อจำกัดอีกอย่างหนึ่งก็คือความจุของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าอยู่ที่ 0.5 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีน (CO_2 loading) ส่วนเอมีนตติยภูมิเช่น MDEA นั้นไม่สามารถทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้โดยตรง จึงทำให้เกิดกระบวนการไฮโดรไลซิสของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กลายเป็น ไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) ดังสมการที่ 2.2.3 ซึ่งความร้อนที่เกิดจากการก่อให้เกิด HCO_3^- นั้นต่ำกว่าการก่อให้ $RNHCOO^-$ มากดังนั้นจึงมีข้อดีคือใช้พลังงานความร้อนน้อยกว่าในการฟื้นฟูตัวทำละลาย MEA และ DEA อีกทั้งยังมี CO_2 loading ที่สูงกว่าอยู่ที่ค่า 1.0 CO_2 loading[5,6]

ในการทำการวิจัยในครั้งนี้นั้นจึงได้ทำการนำตัวทำละลายเอมีนแต่ละชนิดนั้นนำมาผสมกันเพื่อให้ได้เป็นตัวทำละลายเอมีนชนิดใหม่โดยได้ทำการศึกษาประโยชน์ของเอมีนแต่ละชนิดและนำมาเพื่อใช้ในการชดเชยข้อเสียในด้านต่าง ๆ เพื่อให้ประสิทธิภาพโดยรวมของการดูดซึมและการฟื้นฟูของตัวทำละลายเอมีนชนิดใหม่นั้นดียิ่งขึ้นตามอัตราส่วนในการผสมของตัวทำละลายมีนแต่ละชนิด

2.3 ความร้อนที่ใช้ในการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีน

การฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีนนั้นเป็นการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หลังจากเกิดการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อให้ได้ตัวทำละลายเอมีนที่สามารถนำกลับไปใช้ดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้อีกครั้ง โดยสามารถทำได้โดยการให้ความร้อนแก่ตัวทำละลายเอมีน ดังนั้นเพื่อลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการดูดซึมนั้นทำได้โดยการพัฒนาตัวทำละลายเอมีนชนิดใหม่ที่ใช้พลังงานในการฟื้นฟูที่น้อยลง

โดยมีการวิจัยโดย Liang และคณะ พบว่าตัวทำละลายเอมีนชนิดใหม่นั้นสามารถลดปริมาณพลังความร้อนที่ใช้ได้ถึงเหลือเพียง 2.6 กิโลจูลต่อตันของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึม หรือลดได้ถึง 30% เมื่อเทียบกับการใช้ตัวทำละลายเอมีนที่ใช้ทั่วไปที่ใช้ในปี ค.ศ. 1980 ที่ใช้พลังงาน 4.1 กิโลจูลต่อตันของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึม[7]

ในการตรวจสอบหาปริมาณพลังงานความร้อนที่ใช้หรือพลังงานความร้อนที่ต้องการในการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีนชนิดใหม่นั้น Singto และคณะ พิจารณาจากปริมาณความร้อนป้อนให้ในหน่วย กิโลจูลต่อโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึม ซึ่งสามารถเปรียบเทียบค่าได้จากพลังงานความร้อนที่ใช้ในการปลดปล่อยแก๊ส

คาร์บอนไดออกไซด์จากสารละลายเอมีน โดยในการทดลองนั้นใช้ขวดแก้วทรงกลมที่ถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 ºC และคำนวณได้จากกฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ และอัตราการถ่ายโอนความร้อนดังสมการที่ 2.3.1[8]

$$q = kA(dT/dr) \qquad 2.3.1$$

โดย

q คือ อัตราการถ่ายโอนความร้อน (จูลต่อวินาที)

k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของภาชนะแก้ว (วัตต์ต่อเมตรองศาเซลเซียล) หรือ (จูลต่อวินาทีเมตรองศาเซลเซียล)

A คือ พื้นที่ที่มีการถ่ายโอนความร้อนของภาชนะแก้วทรงกลม (บริเวณที่สารละลายเอมีนได้รับความร้อนจากอ่างน้ำร้อนโดยการนำความร้อน) (ตารางเมตร)

dT คือ ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างสารละลายและน้ำในอ่างน้ำร้อน (องศาเซลเซียล)

dr คือ ความหนาของภาชนะแก้วทรงกลม (เมตร)

ดังนั้นสามารถคำนวณหาความร้อนที่ใช้ในการฟื้นฟูตัวทำละลายได้จากสมการ 2.3.2

$$\mathrm{Q} = \frac{\text{rate of heat transfer (q)}}{\mathrm{CO_2}\ produced\ (mol/s)} \qquad 2.3.2$$

โดยสามารถเปรียบเทียบความสามารถในแง่ของการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีนได้ดังนี้

1.ระยะเวลาที่ใช้ในการฟื้นฟูตัวทำละลาย

2.ความจุในการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นจากปริมาณ CO_2 loading ของตัวทำละลายเอมีนที่ลดลงหลังจากการฟื้นฟู

3.ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีน

และสามารถนำผลความสามารถของตัวทำละลายเอมีนในแต่ละด้านที่ทราบได้หลังจากการทำการฟื้นฟูด้วยการให้ความร้อนนำไปประยุกต์ให้เกิดความเหมาะสม และประโยชน์ต่อกระบวนการที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาเอมีนชนิดใหม่และสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรเชิงปฏิบัติการ ได้แก่ ความร้อน และอัตราส่วนความเข้มข้นของตัวทำละลายเอมีนชนิดใหม่ โดยพิจารณาจากความสามารถในการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีนเพื่อการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1. สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1) โมโนเอทาโนลามีน (Monoethanolamine)
2) เมทิลไดเอทาโนลามีน (Methyldiethanolamine)
3) กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid)
4) น้ำกลั่น (Distilled water)
5) คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide)
6) เมทิลออเรนจ์ (Methyl orange)
7) ซิลิโคนออย (Silicone Oil)
8) สารละลาย Displacement solution

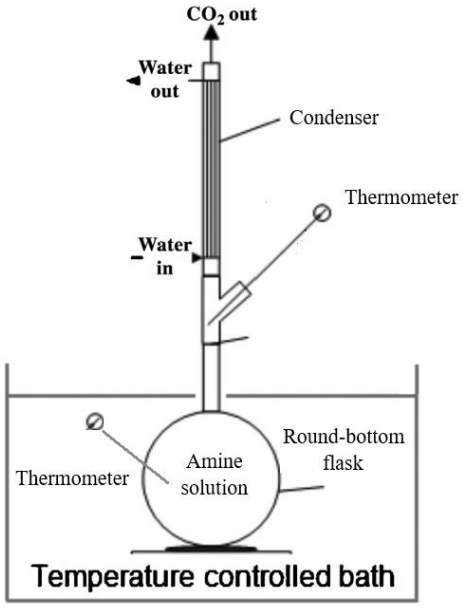
3.1.2. อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1) กระบอกตวง	ขนาด	100	มิลลิลิตร		1	ใบ
2) กระบอกตวง	ขนาด	10	มิลลิลิตร		1	ใบ
3) ขวดรูปชมพู่	ขนาด	250	มิลลิลิตร		2	ใบ
4) ขวดวัดปริมาตร	ขนาด	250	มิลลิลิตร		2	ใบ
5) บีกเกอร์	ขนาด	500	มิลลิลิตร		2	ใบ
6) บิวเรตต์	ขนาด	50	มิลลิลิตร		1	อัน
7) ปิเปตต์	ขนาด	1	มิลลิลิตร		2	อัน
8) หลอดหยดสาร					1	อัน
9) แท่งแก้วคนสาร					1	แท่ง
10) กรวยพลาสติก					1	อัน
11) ขวดน้ำกลั่น					1	ขวด

12) แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic Bar)	2	แท่ง
13) เครื่องกวนสารละลายและให้ความร้อน (Hotplate Stirrer)	1	เครื่อง
14) Chittick apparatus	1	ชุด
15) Desorption column	1	เครื่อง
16) เครื่องควบแน่น (Condenser)	1	เครื่อง
17) ปั๊มน้ำขนาดเล็ก	1	เครื่อง
18) เทอร์โมมิเตอร์	1	เครื่อง

3.2 การทดลองเพื่อวัดความสามารถในการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีนเพื่อการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์

ในงานวิจัยนี้ใช้ชุดเครื่องมือเพื่อหาความสามารถฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีนเพื่อการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2.1



รูปที่ 3.2.1 แผนภาพชุดอุปกรณ์ที่ใช้วัดฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีนเพื่อการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์[9]

จากรูปที่ 1 แสดงให้เห็นถึงชุดอุปกรณ์เพื่อการศึกษาฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีนเพื่อการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งจะประกอบไปด้วย Desorption column ที่จะถูกทำการควบควบคุมอุณหภูมิของสารภายในโดยอ่างควบคุมอุณหภูมิ และประกอบเข้ากับเครื่องควบแน่นทางด้านบนเพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงของความเข้าข้นตัวทำละลายระหว่างการทดลอง

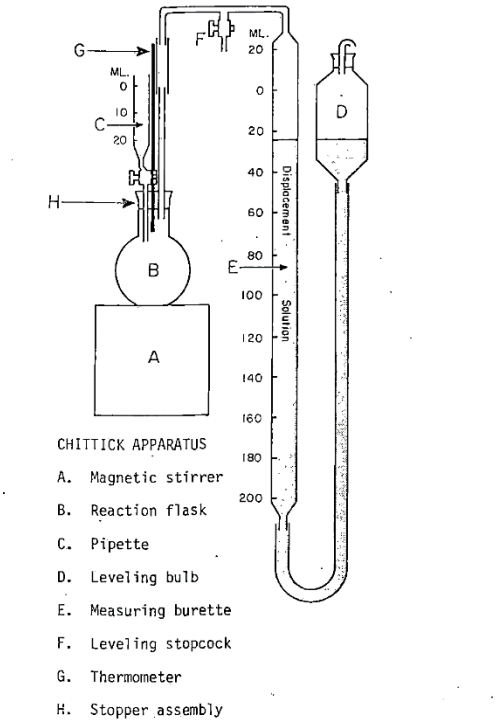
ในการทดลองเพื่อวัดความสามารถในการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีนเพื่อการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์นั้น เริ่มจากทำการเตรียมตัวทำละลายเอมีนความเข้าข้น 5 M ที่มีปริมาณ CO_2 loading อยู่ที่ 0.5 mol CO_2/mol

amine ปริมาตร 250 mL จากนั้นทำการบรรจุตัวทำละลายที่เตรียมไว้เข้าสู่ Desorption column ที่มีการควบคุมอุณหภูมิของสารภายในโดยอ่างควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 90°C และทำการเก็บตัวอย่างตัวทำละลายที่ได้ระหว่างการทดลองเป็นปริมาตร 1 mL ทุก ๆ 10 นาทีจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุล

3.3 การหาปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในตัวทำละลายเอมีนที่เวลาต่าง ๆ

ทั้งนี้การวิเคราะห์หาปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์จะอยู่ในรูปของค่า CO_2 loading (mol CO_2/mol amine) สามารถทำได้โดยวิธี Acidification technique โดยทำการไทเทรตกับกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 M ภายในชุดเครื่องมือ Chittick apparatus ดังแสดงในรูปที่ 3.2.2

โดยตัวอย่างที่นำมาหาปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในตัวทำละลายเอมีนที่เวลาต่างๆ นั้นนำมากจากการเก็บตัวอย่างระหว่างทำการทดลอง ปริมาร 1 mL ทุก ๆ 10 นาทีโดย ทั้งนี้ได้ใช้เมทิลออเรนจ์เป็นอินดิเคเตอร์ คาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ภายในตัวทำละลายเอมีนจะถูกปล่อยออกมาและเข้าไปดันแทนที่ปริมาตรของ Displacement solution (ประกอบไปด้วยกรดไฮโดรคลอริก, เมทิลออเรนจ์, โซเดียมคลอไรด์ และโซเดียมไบคาร์บอเนต) ทำให้ทราบปริมาตรคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ภายในตัวทำละลายเอมีน จากนั้นจากปริมาตรของคาร์บอนไดออกไซด์สามารถทำการคำนวนเทียบบัญญัติไตรยางค์หาจำนวนโมลขอคาร์บอนไดออกไซด์ ได้จากกกฎของแก๊สอุดมคติ (Ideal gas law) โดยแก๊สอุดมคติ 1 โมล ที่สภาวะมาตรฐาน ความดันเท่ากับ 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 273 K จะมีปริมาตรเท่ากับ 22.4 ลิตร

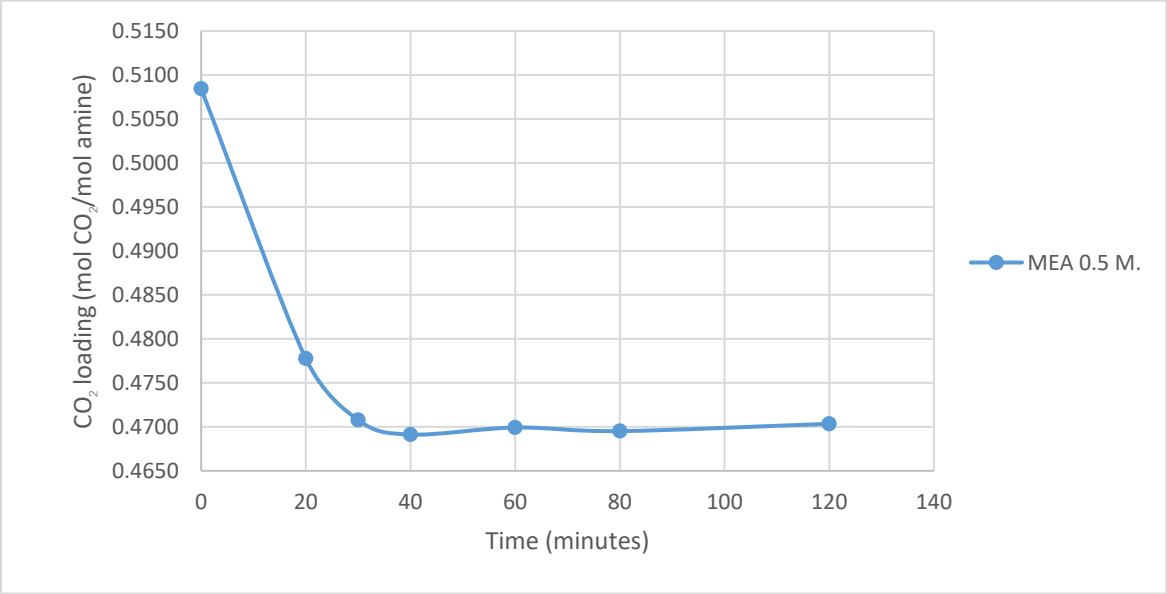


รูปที่ 3.2.2 แผนภาพชุดอุปกรณ์ Chittick apparatus[10]

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวิจัยในครั้งนี้ได้ศึกษาผลของสัดส่วนความเข้มข้นของตัวทำละลายเอมีนแต่ละชนิด และอุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีนในช่วง 90-120 °C และความดันบรรยากาศในระยะเวลาที่ทำให้ CO_2 loading ของตัวทำละลายถึงสภาวะคงที่ อีกทั้งได้ทำการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการทำการทดสอบในครั้งนี้อีกด้วย

4.1 การทดสอบสภาวะที่เหมาะสมสำหรับตัวทำละลาย MEA



รูปที่ 4.1.1 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา และ CO_2 loading ของตัวทำละลาย MEA 0.5 M. อุณหภูมิ 90 °C

จากการทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับตัวทำละลาย MEA ในการทดสอบนั้นได้ทำการจัดชุดการทดลองและได้ทำการทดสอบความสามารถในการฟื้นฟูตัวทำละลาย MEA โดยการนำสารละลาย MEA มาทำการโหลด CO_2 จนกระทั่งมี CO_2 loading เริ่มต้น 0.5 และทำการทดสอบค่าของ CO_2 loading เทียบจากความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย MEA ที่ 0.5 โมลาร์ โดยชุดเครื่องมือ Chittick apparatus และสภาวะในการฟื้นฟูสารละลาย MEA เมื่ออุณหภูมิของสารละลายมีค่า 90 °C พบว่า MEA มีการฟื้นฟูเกิดขึ้นและความสามารถในการฟื้นฟูทำให้มีความจุเพิ่มขึ้นประมาณ 0.03 CO_2 loading ที่ระยะเวลาประมาณ 40-60 นาทีเพื่อเข้าสู่สภาวะคงที่

4.2 การทดสอบสภาวะที่เหมาะสมสำหรับตัวทำละลาย TEA

จากการทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับตัวทำละลาย TEA ในการทดสอบได้จัดชุดการทดลองและทำทดลองและได้ทำการทดสอบความสามารถในการฟื้นฟูตัวทำละลาย TEA โดยการนำสารละลาย MEA มาทำการโหลด CO_2 จนกระทั่งมี CO_2 loading เริ่มต้น 0.3 โมลาร์ และทำการทดสอบค่าของ CO_2 loading เทียบจากความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย TEA ที่ 0.3 โมลาร์ โดยชุดเครื่องมือ Chittick apparatus และสภาวะในการฟื้นฟูสารละลาย MEA เมื่ออุณหภูมิของสารละลายมีค่า 90 °C เช่นเดียวกับสารละลาย MEA แต่ในการทำการทดสอบในครั้งนี้พบว่า TEA เกิดการฟื้นฟูไปก่อนที่จะเริ่มทำการทดสอบเนื่องจาก TEA นั้นมีความสามารถในการฟื้นฟูได้รวดเร็วเนื่องจากเป็นเอมีนชนิดตติยภูมิและเนื่องจากทางผู้วิจัยได้ทำการเริ่มการทดสอบเมื่ออุณหภูมิถึงสภาวะที่ทำการวิจัยที่ 90 °C ทำให้ TEA เกิดการฟื้นฟูและทำให้ต้องทำการปรับเปลี่ยนการทดสอบโดยเริ่มการทดสอบตั้งแต่เริ่มทำการให้ความร้อนแก่สารละลายเอมีน และทำการบันทึกค่า CO_2 loading เพื่อให้สามารถหาช่วงที่สารละลายเอมีนนั้นเริ่มการฟื้นฟูได้

บทที่ 5
สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของสภาวะต่าง ๆต่อความสามารถในการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีนเพื่อการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์

5.1 สรุปผลการดำเนินการวิจัย

5.1.1 ผลของความสามารถในการดูดซึมต่อเวลาที่ใช้ในการฟื้นฟู

เมื่อพิจารณาจากการทดสอบการทดลองเห็นได้ชัดว่าเมื่อเวลาในการฟื้นฟูผ่านไปจะทำให้มีความสามารถในการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีนนั้นสูงขึ้น (CO_2 loading ลดน้อยลง) และเมื่อเวลาในการฟื้นฟูผ่านไปค่า CO_2 loading จะลู่เข้าสู่ที่สภาวะสมดุล ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี

5.1.2 ผลของชนิดตัวทำละลายเอมีนในการดูดซึมต่อความสามารถในการฟื้นฟู

เมื่อพิจารณาผลของผลของการเปลี่ยนแปลงชนิดของตัวทำละลายจาก MEA ไปเป็น TEA นั้นสามารถสังเกตุได้อย่างชัดเจนในความรวดเร็วของการฟื้นฟูตัวทำละลายซึ่ง TEA มีปริมาณอัตราในการฟื้นฟูที่เร็วกว่าทั้งนี้สืบเนื่องมาจากโครงสร้างของเอมีนที่แตกต่างกัน

5.1.3 สรุปผลดำเนินการตลอดงานวิจัย

สืบเนื่องจากสถานการณ์การแพร่ระบาดของโรค COVID-19 งานวิจัยนี้จึงไม่สามารถแล้วเสร็จได้ตามกำหนดการที่วางไว้ โดยแล้วเสร็จเพียงชุดเครื่องมือการทดลอง และทำการทดสอบชุดเครื่องมือการทดลองเพียงบางส่วน แต่ก็สามารถทำให้ทราบถึงผลของสภาวะบางปัจจัยที่เป็นปัจจัยต่อความสามารถในการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีนได้

5.2 ข้อเสนอแนะในการดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้มีการพบปัญหาบางส่วนระหว่างการดำเนินงานจึงหยิบยกปัญหาและวิธีทางแก้ต่าง ๆเพื่อเป็นข้อเสนอแนะของงานวิจัยนี้

5.2.1 ข้อเสนอแนะในการทำการทดลอง

ในการทดลองตอนแรกได้มีการวางแผนการดำเนินการทดลองไว้ด้วยการเริ่มจากการเตรียมตัวทำละลายเอมีนที่มีการบรรจุ CO_2 ไว้แล้ว จึงค่อยนำเข้าสู่ชุดเครื่องมือและจึงค่อยให้ความร้อนแก่ระบบ ปัญหาที่พบคือการทดลองนี้ส่งผลให้ตัวทำละลายเอมีนที่สามารถถูกทำการฟื้นฟูได้ง่ายเช่น TEA นั้นเกิดการฟื้นฟูไปก่อนจะถึงอุณหภูมิที่ได้มีการกำหนดไว้ทำให้ค่า CO_2 loading นั้นลดน้อยลงอย่างมาก

ข้อเสนอแนะของการดำเนินการกทดลองนี้คือการบรรจุ CO_2 หลังจากการให้ความร้อนตัวทำละลายเอมีนถึงอุณภูมิที่ควบคุมแล้ว

5.2.1 ข้อเสนอแนะต่อชุดเครื่องมือ

ในการทดลองนี้ได้มีการใช้เครื่องควบแน่น (Condenser) ซึ่งระหว่างทำการทดลองได้เกิดการควบแน่นของน้ำในอากาศบริเวณผิวของเครื่องควบแน่นและได้ไหลลงหยดสู่เครื่องมือ และอ่างควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งทั้งนี้อาจเกิดการไหลซึมลงสู่ตัวทำละลายเอมีนที่ได้จัดเตรียมเอาไว้และจะส่งผลต่อความเข้มข้นของตัวทำละลายเอมีน หรือหยดลงสู่อ่างควบคุมอุณหภูมิที่มีซิลิโคนออยล์บรรจุอยู่ และเมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิสูงน้ำที่หยดลงไปเกิดการระเหยและทำให้มีการกระเด็นของซิลิโคนออยล์เกิดขึ้นซึ่งอาจทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ทำการทดลองหรือทรัพย์สินได้

ข้อเสนอแนะนี้คือการหุ้มฉนวนให้โดยรอบของเครื่องควบแน่น เพื่อป้องกันการควบแน่นของน้ำในอากาศบริเวณผิวของเครื่องควบแน่น

ภาคผนวก

รูปภาพชุดเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองจริง

1.รูปชุดเครื่องมือในการฟื้นฟูตัวทำละลายเอมีน

2.รูปชุดเครื่องมือ Chittick apparatus

เอกสารอ้างอิง

[1] Cotton, A., L. Gray, and W. Maas, Learnings from the Shell Peterhead CCS project front end engineering design. Energy Procedia, 2017. 114: p. 5663-5670.

[2] Stéphenne, K., Start-up of world's first commercial post-combustion coal fired CCS project: contribution of Shell Cansolv to SaskPower Boundary Dam ICCS project. Energy Procedia, 2014. 63: p. 6106-6110.

[3] Wang, Y., et al., A Review of post-combustion CO_2 capture technologies from coal-fired power plants. Energy Procedia, 2017. 114: p. 650-665.

[4] Vitillo, J.G., B. Smit, and L. Gagliardi, Introduction: carbon capture and separation. Chemical Reviews, 2017. 117(14): p. 9521-9523.

[5] Nwaoha, C., et al., Heat duty, heat of absorption, sensible heat and heat of vaporization of 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP), piperazine (PZ) and monoethanolamine (MEA) tri–solvent blend for carbon dioxide (CO_2) capture. Chemical Engineering Science, 2017. 170: p. 26-35.

[6] Osagie, E., et al., Techno-economic evaluation of the 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP) process for CO_2 capture from natural gas combined cycle power plant. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2018. 70: p. 45-56.

[7] Liang, Z., et al., Review on current advances, future challenges and consideration issues for post-combustion CO2 capture using amine-based absorbents. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2016. 24(2): p. 278-288.

[8] Singto, S., et al., Synthesis of new amines for enhanced carbon dioxide (CO2) capture performance: The effect of chemical structure on equilibrium solubility, cyclic capacity, kinetics of absorption and regeneration, and heats of absorption and regeneration. Separation and Purification Technology, 2016. 167: p. 97-107.

[9] Sema T., et al., *Correlations for equilibrium solubility of carbon dioxide in aqueous 4-*(diethylamino)-2-butanol solutions. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2011. 50(24): p. 14008-14015.

[10] Walter N., Characteristics and genesis of gypsiferous soils of northwestern Iowa, 1980: p. 126