

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวสำหรับการหาค่าเหมาะที่สุดของกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์  
ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต



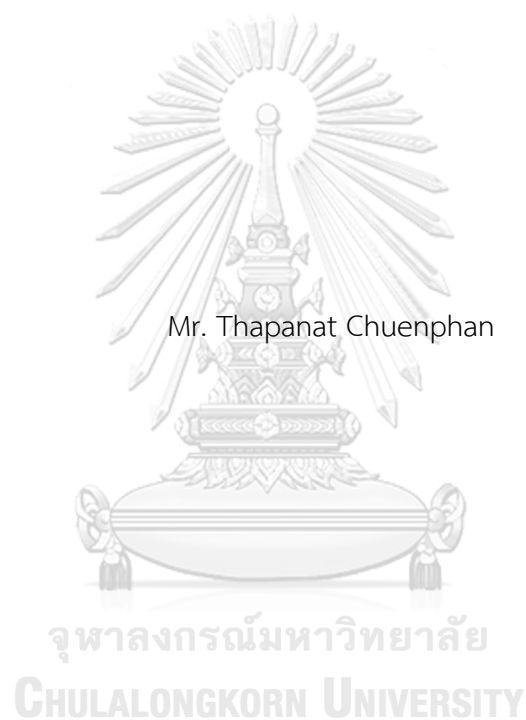
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SENSITIVITY ANALYSIS FOR OPTIMIZATION OF CARBON DIOXIDE CAPTURE PROCESS BY  
POTASSIUM CARBONATE SOLUTION



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Petrochemistry and Polymer Science  
Field of Study of Petrochemistry and Polymer Science

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ความอ่อนไหวสำหรับการหาค่าเหมาะที่สุด ของกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย โพแทสเซียมคาร์บอเนต
โดย	นายฐาปณัฐ ชื่นพันธ์
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ เสมา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวงษ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ภาวี ศรีกุลกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(อาจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ เสมา)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(อาจารย์ ดร.ศศิธร สรรพอคำ)

ฐานปณฺฐู ชึ้นพันธุ์ : การวิเคราะห์ความอ่อนไหวสำหรับการหาค่าเหมาะที่สุดของ  
 กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต. (   
 SENSITIVITY ANALYSIS FOR OPTIMIZATION OF CARBON DIOXIDE CAPTURE  
 PROCESS BY POTASSIUM CARBONATE SOLUTION) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.  
 เบญจพล เณลิมสินสุวรรณ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : อ. ดร.ธีรวัฒน์ เสมา

กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยวิธีการดูดซึมทางเคมีเป็นหนึ่งในวิธีที่ถูก  
 ใช้ในกระบวนการบำบัดแก๊สเสียในระดับภาคอุตสาหกรรมเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม หนึ่งใน  
 วิธีการศึกษาและพัฒนากระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยวิธีการดูดซึมทางเคมีอย่างมี  
 ประสิทธิภาพ คือ การสร้างแบบจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์เนื่องจากช่วยลดค่าใช้จ่ายและ  
 เวลา นอกจากนี้ ยังได้รับการยอมรับในวงการวิศวกรรมเคมี ในงานวิจัยนี้ การวิเคราะห์ความ  
 อ่อนไหวด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลสองระดับของกระบวนการดักจับแก๊ส  
 คาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตถูกจำลองโดยระบบสมดุลภายใน  
 โปรแกรม Aspen Plus โดยแบบจำลองสมบัติเชิงอุณหพลศาสตร์ ENRTL-RK เพื่อหาค่าเหมาะ  
 ที่สุดและเปรียบเทียบผลของสถานการณ์ที่เหมาะสมที่สุดกับผลของกระบวนการดักจับแก๊ส  
 คาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโมโนเอทานอลามีนจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จากการศึกษา  
 พบว่า ประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของสถานการณ์ที่มีค่าเหมาะที่สุดมีค่าร้อยละ  
 87.04 และมีค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยก  
 เท่ากับ 2.17 GJ/T CO<sub>2</sub> อีกทั้งมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของกระบวนการกำจัดแก๊ส  
 คาร์บอนไดออกไซด์ต่อปีเท่ากับ 57.50 USD/T CO<sub>2</sub> ซึ่งมีประสิทธิภาพการดักจับแก๊ส  
 คาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่าและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของกระบวนการดักจับแก๊ส  
 คาร์บอนไดออกไซด์ต่อปีที่ต่ำกว่าผลการจำลองกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย  
 สารละลายโมโนเอทานอลามีนจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีประสิทธิภาพการดักจับแก๊ส  
 คาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 73.35 ค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความ  
 ร้อนของหอแยกเท่ากับ 4.73 GJ/T CO<sub>2</sub> และมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของกระบวนการ  
 กำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปีเท่ากับ 107.50 USD/T CO<sub>2</sub>

สาขาวิชา ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิ ลายมือชื่อนิสิต .....

เมอ์

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 6172402223 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORD: CO<sub>2</sub> capture process, Potassium carbonate, Aspen Plus, Simulation,  
Sensitivity analysis

Thapanat Chuenphan : SENSITIVITY ANALYSIS FOR OPTIMIZATION OF  
CARBON DIOXIDE CAPTURE PROCESS BY POTASSIUM CARBONATE  
SOLUTION. Advisor: Assoc. Prof. Dr. BENJAPON CHALERMSINSUWAN, Ph.D.  
Co-advisor: TEERAWAT SEMA, Ph.D.

Chemical absorption of CO<sub>2</sub> is one of the processes that are widely used in industry to reduce environmental impacts. One of effective methods to study and improve the CO<sub>2</sub> capture by chemical absorption process is simulation using a computer program because it reduces cost and time; moreover, it is also acceptable in chemical engineering field. In this study, sensitivity analysis of the CO<sub>2</sub> capture process using potassium carbonate solution was performed by 2<sup>k</sup> factorial experimental design method by equilibrium model in Aspen Plus with ENRTL-RK thermodynamics property model for optimizing and comparing the optimal case with the results of the CO<sub>2</sub> capture process using monoethanolamine solution from the relevant study. From the experiment, the CO<sub>2</sub> removal efficiency of the optimal case was 87.04% and the specific heat duty at the reboiler was 2.17 GJ/T CO<sub>2</sub>. Moreover, annual operating cost was 57.50 USD/T CO<sub>2</sub>. The CO<sub>2</sub> removal efficiency and the specific heat duty at the reboiler were better than the simulation results from relevant CO<sub>2</sub> capture process using monoethanolamine solution that had 73.35% CO<sub>2</sub> removal efficiency, 73 GJ/T CO<sub>2</sub> of specific heat duty at the reboiler and annual operating cost at 107.50 USD/T CO<sub>2</sub>.

Field of Study: Petrochemistry and  
Polymer Science

Academic Year: 2019

Student's Signature .....

Advisor's Signature .....

Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ทางผู้เขียนวิทยานิพนธ์เรื่อง การวิเคราะห์ความอ่อนไหวสำหรับการหาค่าเหมาะที่สุดของกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต ขอขอบคุณทุกท่านที่แนะนำ ช่วยเหลือ และให้กำลังใจ

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เบญจพล เถลิงสินสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์ ดร. ชีรวัดน์ เสมอ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำในการทำวิจัยตลอดจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ภาวี ศรีกุลกิจ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์ ดร.ศศิธร สรรพอคำ กรรมการภายนอก

ขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร.มะลิ หุ่นสม อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัยในระดับปริญญาตรี และ รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ อาจารย์ที่ปรึกษาในระดับปริญญาตรี ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนให้แนวคิดที่จะศึกษาต่อในระดับมหาบัณฑิต

ขอขอบคุณภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนโปรแกรม Aspen Plus และทรัพยากรในการทำวิทยานิพนธ์ และหลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์ โพลีเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณ บริษัท โครเวสโตร (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา เวลา และทรัพยากรในการเรียนต่อในระดับมหาบัณฑิต

ขอขอบคุณ คุณ Randy S. Garabedian พี่เบ็ต (สมชาย กาญจนสันติศักดิ์) พี่ปู (ณัฐฉัตรศิริ) พี่จอย (พลอยเพชร ปรีศววงศ์) พี่กี้ (ญาณิสสา สงวนศักดิ์) พี่ๆ น้องๆ Operators และทีมงาน Polycarbonate และเพื่อนๆ บริษัทโครเวสโตร ที่ให้การสนับสนุนด้านกำลังใจในการเรียน และรวมถึงช่วยแบ่งเบาภาระจากงานประจำ

ขอบคุณน้องตอง (ธรรดินทร์ บุระตา) พี่พิม (ดร.ปรารธนา นิมมานเทอดวงศ์) พี่ชาติ (สุชาติ กริแสง) และน้องๆ ห้อง Cybernetics ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การช่วยเหลือและเป็นที่ปรึกษาในการสร้างแบบจำลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ Sunny Png อดีตพนักงานบริษัท Bayer Technology Services ประจำประเทศ สิงคโปร์ ที่ช่วยแนะนำการใช้เครื่องมือและการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ขอบคุณ แมกซ์ (ดร.ภูมิเดช พู่ทองคำ) พี่ตฤณ (ดร.ตฤณ เจตสุคนธร) โดนัท (ดร.ณัฐกร บริบูรณ์) นิว (ณัฐสิทธิ เกரியงเกตู) พีช (นทีธร อนันตสานต์) เพชร (ชาคริต จงสีปโชค) อิท (อิทธิป ดันติ

วีรสุต) พี่พันธ์ (ฤชาพงษ์ กวีวุฒท์) พี่ตึก (บุษยา วิลาวรรณ) มีม (ธนิกันต์ ชุนภักดี) กีส (จุฑาภักดิ์ เกษรทอง) น้องคิว (ณิชาบูล ชายหาด) ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้กำลังใจ

ขอขอบพระคุณ พ่อ (สัญญา ชื่นพันธ์) และแม่ (สุมลทิพย์ แสงกุล) พี่ณัฐ (นพ.ณัฐภินันท์ ชื่นพันธ์) พี่มุข พี่นนท์ พี่ปุก ป้าป้อม (อมรา ชื่นพันธ์) คุณป้า(น้อย) ป้าตุ๋ ป้าตัว และสมาชิกในครอบครัวคนอื่นๆ ทุกคนที่ช่วยสนับสนุนให้แนวคิดที่จะศึกษาต่อในระดับมหาบัณฑิตและให้กำลังใจมาตลอด

ขอบคุณคนอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึงในที่นี้ ที่เป็นส่วนให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จด้วยดี

และขอบคุณ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย บ้านหลังที่สอง ที่ไม่ว่ากลับมากี่ครั้งก็อบอุ่นเสมอ

ฐาปณัฐ ชื่นพันธ์



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 การกำหนดขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการดูดซึมทางเคมี .....	4
2.2 ปฏิริยาการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโมโนเอทานอลามีน .....	5
2.3 ปฏิริยาการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต .....	7
2.4 การสร้างแบบจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรม Aspen Plus .....	9
2.4.1 แบบจำลองสมบัติเชิงอุณหพลศาสตร์.....	9
2.4.2 ระบบของหอดูดซึมและหอแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากสารละลายในแบบจำลอง .....	10
2.5 วิธีการคำนวณค่าประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยก.....	11



2.6 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของกระบวนการด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลสองระดับ .....	11
2.7 การกำหนดขอบเขตและการคำนวณเชิงเศรษฐศาสตร์ในงานวิจัย.....	17
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย .....	22
3.1 การสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม Aspen Plus.....	22
3.1.1 การสร้างแบบจำลองกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอทานอลามีน .....	22
3.1.2 การสร้างแบบจำลองกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต .....	27
3.2 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตนั้นด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลสองระดับ .....	29
3.3 การหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต.....	35
3.4 เปรียบเทียบผลการจำลองของกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตกับสารละลายโมโนเอทานอลามีน.....	36
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง .....	37
4.1 การสร้างแบบจำลองกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอทานอลามีน .....	37
4.2 การสร้างแบบจำลองกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต .....	39
4.2.1 ผลของอิทธิพลหลักและอิทธิพลอันตรกิริยาตัวแปร.....	39
4.2.1.1 ผลของอิทธิพลหลักและอิทธิพลอันตรกิริยาของตัวแปรต่อประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	44
4.2.1.2 ผลของอิทธิพลหลักและอิทธิพลอันตรกิริยาของตัวแปรต่อค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยก .....	44

4.2.2 วิเคราะห์อิทธิพลหลัก .....	46
4.2.2.1 อุณหภูมิของสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม .....	47
4.2.2.2 อัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม .....	47
4.2.2.3 ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ว .....	48
4.2.2.4 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลาย .....	48
4.2.2.5 ความดันของหอดูดซึม .....	49
4.2.3 พื้นผิวตอบสนอง .....	50
4.2.3.1 พื้นผิวตอบสนองของประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ .....	51
4.2.3.2 พื้นผิวตอบสนองของค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำ ความร้อนของหอแยก .....	54
4.3 การหาค่าเหมาะที่สุดของกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียม คาร์บอเนต .....	56
4.3.1 พลังงานจำเพาะต่อมวลของทั้งระบบ .....	57
4.3.1.1 พลังงานจำเพาะต่อมวลของพลังงานไฟฟ้ารวมในระบบ .....	58
4.3.1.2 พลังงานจำเพาะต่อมวลที่ใช้ในระบบความเย็น .....	58
4.3.1.3 พลังงานจำเพาะต่อมวลที่ใช้ในระบบน้ำหล่อเย็น .....	58
4.3.2 ปริมาณการใช้สารเริ่มต้นในกระบวนการดักจับดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย สารละลาย .....	59
4.3.3 ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของกระบวนการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปี .....	69
4.3.4 ค่าเหมาะที่สุดของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย โพแทสเซียมคาร์บอเนต .....	75
4.3.5 เปรียบเทียบผลการจำลองของกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย โพแทสเซียมคาร์บอเนตกับสารละลายโมโนเอทานอลามีน .....	77
4.4 แนวทางการดำเนินการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย สารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต .....	78

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	80
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	80
5.1.1 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย โพแทสเซียมคาร์บอเนตนั้นด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลสองระดับ .....	80
5.1.2 ค่าเหมาะที่สุดของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย โพแทสเซียมคาร์บอเนต .....	81
5.1.3 เปรียบเทียบผลการจำลองของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย สารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตกับสารละลายโมโนเอทานอลามีน .....	82
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	83
ภาคผนวก.....	84
สมการการถดถอยของประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ .....	84
สมการการถดถอยของค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอ แยก.....	85
บรรณานุกรม.....	86
ประวัติผู้เขียน.....	92

## สารบัญรูปร่างภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 แผนภาพกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อย่างง่าย .....	5
รูปที่ 3.1 รูปแบบการกำหนดระบบและสมบัติการไหลของแบบจำลอง.....	23
รูปที่ 3.2 สมการเคมีที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย โมโนเอทานอลามีน .....	24
รูปที่ 3.3 แบบจำลองการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโมโนเอทานอลามีนที่สร้างขึ้น ด้วยโปรแกรม Aspen Plus.....	24
รูปที่ 3.4 สมการเคมีที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย โพแทสเซียมคาร์บอเนต.....	28
รูปที่ 3.5 แบบจำลองการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ สร้างขึ้นด้วยโปรแกรม Aspen Plus.....	28
รูปที่ 4.1 การวิเคราะห์อิทธิพลหลักต่อค่าประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ .....	49
รูปที่ 4.2 การวิเคราะห์อิทธิพลหลักต่อค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความ ร้อนของหอแยก.....	50
รูปที่ 4.3 พื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูก ป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (ตัวแปร B) และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ว (ตัวแปร C) ต่อประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่ออุณหภูมิของสารละลายโพแทสเซียม คาร์บอเนตที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (ตัวแปร A) มีค่าที่ระดับกลาง ความเข้มข้นของโพแทสเซียม คาร์บอเนตในสารละลาย (ตัวแปร D) มีค่าที่ระดับสูง และความดันของหอดูดซึม (ตัวแปร E) มีค่าที่ ระดับกลาง .....	52
รูปที่ 4.4 พื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูก ป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (ตัวแปร B) และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ว (ตัวแปร C) ต่อประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่ออุณหภูมิของสารละลายโพแทสเซียม คาร์บอเนตที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (ตัวแปร A) มีค่าที่ระดับกลาง ความเข้มข้นของโพแทสเซียม คาร์บอเนตในสารละลาย (ตัวแปร D) มีค่าที่ระดับสูง และความดันของหอดูดซึม (ตัวแปร E) มีค่าที่ ระดับสูง .....	53

รูปที่ 4.5 พื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูก  
 ป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (ตัวแปร B) และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ว (ตัวแปร C)  
 ต่อประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เมื่ออุณหภูมิของสารละลายโพแทสเซียม  
 คาร์บอเนตที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (ตัวแปร A) มีค่าที่ระดับกลาง ความเข้มข้นของโพแทสเซียม  
 คาร์บอเนตในสารละลาย (ตัวแปร D) มีค่าที่ระดับสูง และความดันของหอดูดซึม (ตัวแปร E) มีค่าที่  
 ระดับต่ำ ..... 54

รูปที่ 4.6 พื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูก  
 ป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (ตัวแปร B) และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ว (ตัวแปร C)  
 ต่อค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยก เมื่ออุณหภูมิของ  
 สารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (ตัวแปร A) มีค่าที่ระดับกลาง ความ  
 เข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลาย (ตัวแปร D) มีค่าที่ระดับสูง และความดันของหอดูด  
 ซึม (ตัวแปร E) มีค่าที่ระดับสูง ..... 55

รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (%) ..... 72

รูปที่ 4.8 ค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลของทั้งระบบ (GJ/T CO<sub>2</sub>) ..... 73

รูปที่ 4.9 ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการดำเนินการของกระบวนการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปี  
 (USD/T CO<sub>2</sub>) ..... 74

## สารบัญตาราง

### หน้า

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่สำหรับการหาค่าคงที่สมดุลปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโมโนเอทานอลามีนที่ใช้ในสมการ 2.6.....	7
ตารางที่ 2.2 ค่าคงที่สำหรับการหาค่าคงที่สมดุลปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ในสมการ 2.6.....	9
ตารางที่ 2.3 การแจกแจงผลรวมสำหรับระบบ 2 ตัวแปร.....	12
ตารางที่ 2.4 ตาราง ANOVA สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	15
ตารางที่ 2.5 การแจกแจงผลรวมสำหรับระบบ 5 ตัวแปร.....	16
ตารางที่ 3.1 รูปแบบหน่วยปฏิบัติการในแบบจำลองเทียบกับกระบวนการจริง.....	25
ตารางที่ 3.2 ค่าข้อมูลจำเพาะที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโมโนเอทานอลามีน.....	27
ตารางที่ 3.3 ค่าระดับสูงและต่ำสำหรับการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลสองระดับ.....	29
ตารางที่ 3.4 ค่าสำหรับการสร้างแบบจำลองในการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลสองระดับ.....	31
ตารางที่ 3.5 อัตราส่วนโดยมวลขององค์ประกอบในแก๊สเปรี๊ว.....	35
ตารางที่ 3.6 อัตราส่วนโดยมวลขององค์ประกอบในสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต.....	35
ตารางที่ 3.7 ค่าสถานการณ์พื้นฐานเริ่มต้นของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต.....	36
ตารางที่ 4.1 ผลการสร้างแบบจำลองจากโรงงานนำร่องในงานวิจัยของ Notz และคณะ.....	38
ตารางที่ 4.2 ผลการจำลองกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต.....	40
ตารางที่ 4.3 ผลของอิทธิพลหลักและอิทธิพลอันตรกิริยาของตัวแปรต่อประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	45

ตารางที่ 4.4 ผลของอิทธิพลหลักและอิทธิพลอันตรกิริยาของตัวแปรต่อค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยก .....	46
ตารางที่ 4.5 ค่าสำหรับการสร้างแบบจำลองในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต .....	60
ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองจากสถานการณ์จากตารางที่ 4.5 เพื่อให้หาค่าที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต.....	63
ตารางที่ 4.7 ปริมาณการใช้สารเริ่มต้นและพลังงานในกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตจากแบบจำลอง.....	66
ตารางที่ 4.8 ราคาต้นทุนของสารเริ่มต้น.....	69
ตารางที่ 4.9 ข้อมูลที่ใช้ในการพิจารณาหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต .....	70



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) เป็นของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมหนัก เช่น ซีเมนต์ เหล็ก ปิโตรเคมี และ การผลิตไฟฟ้าจากน้ำมันดีเซลและถ่านหิน โดยปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศที่เพิ่มขึ้นในปัจจุบันส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นวงกว้างโดยเฉพาะอย่างยิ่งคือการเปลี่ยนแปลงทางสภาพอากาศหรือภาวะโลกร้อน เทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สเสียของกระบวนการผลิตจึงถูกนำมาใช้และพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง เทคโนโลยีที่นิยมในกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ซีเมนต์และภาคการผลิตไฟฟ้า คือ กระบวนการดูดซับด้วยเคมี (Chemical absorption) โดยใช้หอดูดซับ (Absorber) ที่มีสารละลายกลุ่มเอมีน (Amines) เช่น โมโนเอทานอลามีน (Monoethanolamine, MEA) หรือเมทิลไดเอทานอลามีน (Methyl diethanolamine, MDEA) เป็นตัวดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สเสียที่ได้จากกระบวนการผลิต จากนั้น สารละลายกลุ่มเอมีนที่มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับอยู่จะถูกส่งผ่านไปยังหอแยก (Stripper) ที่ทำหน้าที่ในการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากสารละลาย (Regeneration) เพื่อให้สารละลายที่ใช้ในการดูดซับนั้นสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ที่หอดูดซับ จากการศึกษาและการใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรม พบว่า สารละลายกลุ่มเอมีนดังกล่าว แม้ว่าจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีและประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูง อีกทั้งยังสามารถดำเนินการในกระบวนการที่มีสภาวะอุณหภูมิและความดันต่ำ [1, 2] แต่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนของอุปกรณ์ภายในหน่วยดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ [3] อีกทั้งตัวสารละลายกลุ่มเอมีนเองมีการเสื่อมสภาพได้เร็วเนื่องจากออกซิเจนที่เป็นองค์ประกอบภายในแก๊สเสียจากกระบวนการผลิตหรือแก๊สที่ต้องการบำบัด [4] นอกจากนี้ ยังส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย [5] เพื่อที่จะแก้ไขปัญหาดังกล่าวตัวทำละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต (Potassium carbonate, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) จึงถูกนำมาศึกษาและปรับใช้แทนสารละลายกลุ่มเอมีนในกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

การศึกษาความอ่อนไหวของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยวิธีการดูดซับด้วยเคมีโดยทั่วไปนั้น จะทำการเปลี่ยนค่าของตัวแปรเพียงครั้งละหนึ่งตัว และ พิจารณาผลที่มีต่อ ค่าประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub> removal efficiency) และค่า



พลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอยแยก (Reboiler specific heat duty) โดยไม่ได้คำนึงถึงปริมาณการส่งผล (Contribution) ของตัวแปรต่อผลลัพธ์ และผลของอันตรกิริยา (Interaction effect) ของตัวแปรต่างๆ [6-12] งานวิจัยนี้ จึงเลือกใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลสองระดับ ( $2^k$  factorial experimental design) ในการศึกษาความอ่อนไหว (Sensitivity) ของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องจากเป็นวิธีการที่ศึกษาผลของตัวแปรต่อผลลัพธ์ด้วยการพิจารณาค่าของตัวแปรเพียงสองค่าคือค่าระดับสูงและค่าระดับต่ำเท่านั้น [13, 14] ด้วยวิธีดังกล่าวทำให้ทราบตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$  removal efficiency) และ ค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอยแยก (Reboiler specific heat duty) อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งจะถูกพิจารณาเพื่อนำไปใช้ในการหาค่าเหมาะที่สุดในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) พัฒนาแบบจำลองกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต
- 2) วิเคราะห์ความอ่อนไหวสำหรับการหาค่าเหมาะที่สุดของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต

## 1.3 การกำหนดขอบเขตของงานวิจัย

การศึกษาความอ่อนไหว (Sensitivity analysis) ของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตนั้นสามารถทำได้หลากหลายวิธีเช่นการทดลองจริงภายในกระบวนการระดับอุตสาหกรรม (Industrial Scale) การทดลองภายในโรงงานนำร่อง (Pilot plant) หรือการสร้างแบบจำลองภายในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Simulation) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกวิธีการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม Aspen Plus ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้อย่างแพร่หลายและได้รับการยอมรับทั้งในระดับการศึกษาและระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถทำได้ง่าย ต้นทุนต่ำ และไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหากเกิดความผิดพลาดจากการทดลอง อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษากระบวนการด้วยวิธีการสร้างแบบจำลอง (Simulation) นั้นมีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองจริงอยู่บ้างขึ้นอยู่กับวิธีการเลือกรูปแบบการจำลองตัวแปรภายในกระบวนการ หรือสมการเคมีที่เลือกใช้ เป็นต้น ซึ่งทางวิศวกรรมความคลาดเคลื่อนนั้นควรมีค่าไม่เกินร้อยละ 10 เมื่อทำการเปรียบเทียบแบบจำลองกับการทดลองจริง

#### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1) ศึกษาทฤษฎี งานวิจัย ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองกระบวนการดักจับ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายกลุ่มเอมีนชนิดโมโนเอทาโนลามีนและโพแทสเซียมคาร์บอเนต
- 2) พัฒนาแบบจำลองกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโมโนเอทาโนลามีนในโปรแกรม Aspen Plus ของโรงงานนำร่องจากงานวิจัยที่ผ่านมา และ เปรียบเทียบผลที่ได้
- 3) พัฒนาแบบจำลองกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตในโปรแกรม Aspen Plus
- 4) วิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปร (Parametric sensitivity analysis) เพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุดของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต
- 5) เปรียบเทียบผลการจำลองของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตกับสารละลายโมโนเอทาโนลามีน
- 6) วิเคราะห์ สรุปผล และ เขียนวิทยานิพนธ์

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

แบบจำลองกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต และแนวทางการดำเนินการที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต

## บทที่ 2

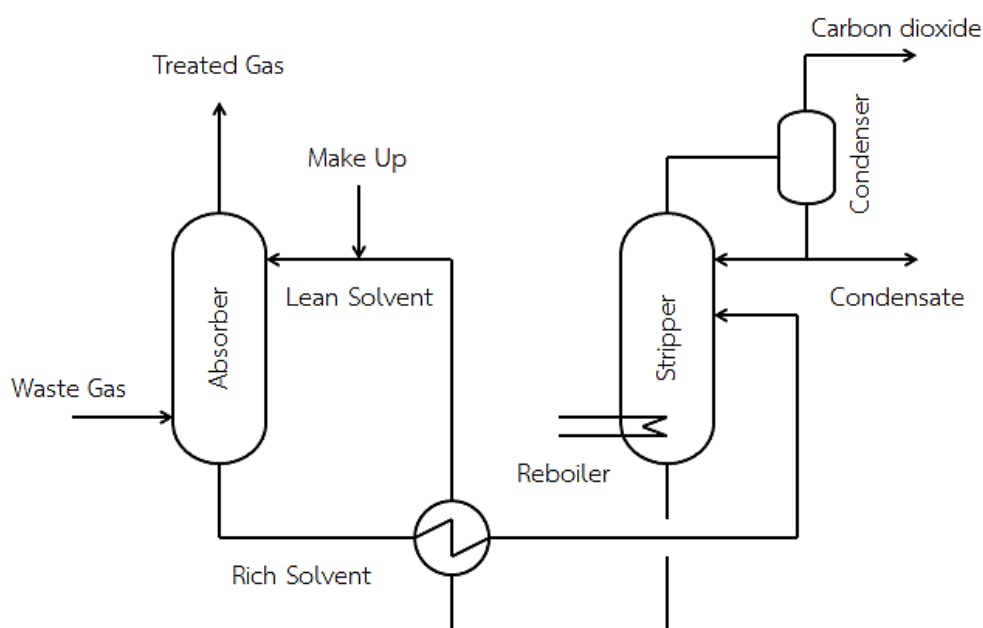
### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการดูดซึมทางเคมี

กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี (Petrochemical plant) โรงกลั่นน้ำมัน (Oil refinery plant) โรงไฟฟ้า (Power plant) หรือโรงงานซีเมนต์ (Cement plant) เป็นกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยวิธีการดูดซึมทางเคมี (Chemical absorption) ซึ่งในหน่วยปฏิบัติการจะประกอบด้วยส่วนหลัก 2 ส่วนคือ หอดูดซึม (Absorber) และหอแยกแก๊สออกจากสารละลาย (Stripper) โดยส่วนใหญ่แล้วจะมีลักษณะเป็น แพคคอลัมน์ (Packed column) ที่มีส่วนช่วยในการเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และสารละลายกลุ่มเอมีน (เอทานอลามีน) หรือ สารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต โดยแก๊สเสียหรือแก๊สเปรี้ยวจากกระบวนการ (Sour gas, waste gas) ที่มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide) เป็นส่วนประกอบจะถูกป้อนเข้าที่ชั้นล่างสุดของหอดูดซึม (Absorber) ในขณะที่สารละลายดูดซึมจะถูกป้อนเข้าสู่หอจากชั้นบนสุด หลังจากนั้นแก๊สเสียที่ผ่านการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการดูดซึมทางเคมีภายในหอดูดซึมแล้วจะถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศได้โดยตรงเนื่องจากองค์ประกอบของแก๊สเสียที่ผ่านการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แล้วจะมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณที่ต่ำ ส่วนสารละลายดูดซึมจะออกจากหอดูดซึมที่ชั้นล่างสุดของหอ ผ่านการเพิ่มอุณหภูมิด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) ที่อาศัยความร้อนจากสารละลายดูดซึมร้อนที่ผ่านการบำบัดด้วยการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกแล้ว หรืออาศัยความร้อนจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในหอดูดซึม จากนั้น จะถูกป้อนเข้าสู่หอแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากสารละลาย (Stripper) ตามลำดับ

ส่วนประกอบหลักที่สองคือหอแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากสารละลาย (Stripper) จะทำหน้าที่แยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากสารละลายดูดซึมด้วยความร้อนจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนก่อนเข้าหอและเครื่องทำความร้อนภายในหอแยก (Reboiler) ที่มีไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานในกรณีของโรงงานนาร่องหรือห้องปฏิบัติการแต่ในส่วนของภาคอุตสาหกรรมนั้นจะใช้พลังงานความร้อนจากไอน้ำความดันสูง (High-pressure steam) ในการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายในหอแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากสารละลาย แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกแยกออกจากสารละลายและออกจากหอที่ชั้นบนสุดของหอแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จาก

สารละลายแก๊สที่แยกออกมานั้นจะผ่านเข้าเครื่องควบแน่น (Condenser) ที่ใช้ความเย็นจากน้ำเย็น (Chilled water) โดยน้ำหรือสารละลายดูดซึมที่ถูกควบแน่นจะถูกป้อนกลับเข้าสู่หอแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ชั้นบนสุดของหอแยกหรือที่งอกจากระบบโดยพิจารณาจากอัตราส่วนรีฟลักซ์ (Reflux ratio) ที่ใช้ในกระบวนการ ส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกป้อนเข้าสู่หน่วยอื่นๆ เพื่อเก็บหรือใช้งานต่อไปตามวัตถุประสงค์ของแต่ละกระบวนการหรือภาคธุรกิจ ในขณะที่สารละลายดูดซึมหลังผ่านการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจะถูกวนกลับมาใช้ในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่หอดูดซึมอีกครั้งโดยอาจมีการเติมน้ำหรือสารละลายเพิ่มเข้าไปเพื่อคงไว้ซึ่งอัตราการไหล (Flow rate) และความเข้มข้น (Concentration) ดังแผนภาพแสดงการทำงานอย่างง่าย (Flow diagram) ของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังรูปที่ 2.1 [4, 9, 15]



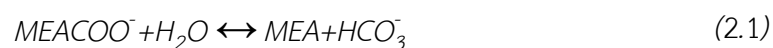
รูปที่ 2.1 แผนภาพกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อย่างง่าย

## 2.2 ปฏิกริยาการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโมโนเอทานอลามีน

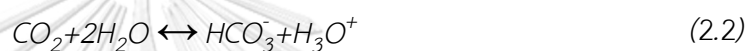
ปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นภายในหน่วยดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโมโนเอทานอลามีนมีด้วยกัน 5 ปฏิกิริยาดังแสดงในสมการ 2.1 - 2.5 ซึ่งการสร้างแบบจำลองด้วยระบบสมมูลนั้น โปรแกรม Aspen Plus จะทำการคำนวณค่าคงที่สมดุล (Equilibrium constant, K)

จากสมการที่ 2.6 เมื่อ T แทนอุณหภูมิของระบบในหน่วยเคลวิน (Kelvin) และ ค่าคงที่ A, B, C และ D ที่ใช้ในการคำนวณได้ถูกจัดเตรียมอย่างอัตโนมัติเมื่อทำการสร้างสมการภายในแบบจำลองด้วยโปรแกรม Aspen Plus และตรงกับค่าทดลองของ Arachchige และคณะ [16] ซึ่งแสดงในตารางที่ 2.1

Hydrolysis reaction



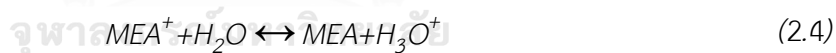
Dissociation of dissolved CO<sub>2</sub>



Dissociation of bicarbonate



Dissociation of protonated MEA



Ionization of water



Equilibrium constant

$$\ln K = A + \frac{B}{T} + C \ln T + DT \quad (2.6)$$

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่สำหรับการหาค่าคงที่สมดุลปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโมโนเอทานอลามีนที่ใช้ในสมการ 2.6

ตัวแปร	สมการที่ 2.1	สมการที่ 2.2	สมการที่ 2.3	สมการที่ 2.4	สมการที่ 2.5
A	-0.52135	231.465	216.05	-3.03833	132.899
B	-2545.53	-12092.1	-12431.7	-7008.36	-13445.9
C	0	-36.7816	-35.4819	0	-22.4773
D	0	0	0	-0.003135	0

### 2.3 ปฏิกิริยาการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต

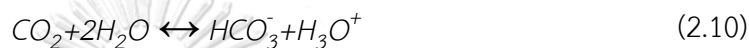
ปฏิกิริยารวม (Overall reaction) ที่เกิดขึ้นภายในระบบการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตนั้นเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตกลายเป็นไบคาร์บอเนต (Bicarbonate) ดังสมการที่ 2.7 ซึ่งเป็นการแสดงในรูปของสมการไอออนิก (Ionic illustration) หากพิจารณากลไกการเกิดปฏิกิริยา (Reaction mechanism) ของสมการ 2.7 แล้วสามารถเกิดกลไกขนาน (Parallel mechanism) ได้สองรูปแบบคือเมื่อ pH ต่ำกว่า 8 และสูงกว่า 8



ที่ pH สูงกว่า 8 ซึ่งเป็นระบบทั่วไปของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตภายในระดับอุตสาหกรรมหรือเชิงพาณิชย์ โดยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ใช้จะอยู่ในรูปของสารละลายเบส ไบคาร์บอเนต ( $HCO_3^-$ ) จะเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) ดังสมการ 2.8 ซึ่งเกิดขึ้นได้รวดเร็วและเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราในกระบวนการ (Rate controlling step) และการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไบคาร์บอเนตและไฮดรอกไซด์ไอออน ดังสมการ 2.9



ที่ pH ต่ำกว่า 8 จะเกิดกลไกการสร้างไบคาร์บอเนต ( $\text{HCO}_3^-$ ) ด้วยปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำดังสมการ 2.10 ซึ่งเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราในกระบวนการ และปฏิกิริยาระหว่างไบคาร์บอเนตและน้ำเพื่อสร้างคาร์บอเนตในสมการที่ 2.11



อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำ (Dissociation of water) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาหลักดังสมการ 2.5 จะถูกนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองเช่นเดียวกับกรณีของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโมโนเอทาโนลามีน

สำหรับการจำลองกระบวนการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตด้วยระบบอัตรา (Rate based) นั้นระบบกลไกปฏิกิริยา (Reaction mechanism) จะต้องถูกนำมาพิจารณาเนื่องจากส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยตรง แต่หากทำการจำลองกระบวนการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตด้วยระบบสมดุล (Equilibrium) นั้นกลไกปฏิกิริยานั้นจะไม่มีผลต่อกระบวนการเนื่องจากระบบสมดุลไม่ได้พิจารณาอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี ในการสร้างแบบจำลองระบบสมดุลในโปรแกรม Aspen Plus สามารถใช้สมการใดก็ได้เนื่องจากไม่คำนึงถึงค่า pH และอัตรา ดังนั้นการสร้างแบบจำลองระบบสมดุลสามารถใช้สมการ 2.5, 2.10, 2.11 ได้ [4, 17] อีกทั้งในการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม Aspen Plus ด้วยระบบสมดุล ทางโปรแกรมได้ทำการสร้างสมการในรูปแบบของกลไก pH ต่ำกว่า 8 ดังสมการ 2.5, 2.10, 2.11 โดยอัตโนมัติ ค่าคงที่ที่ใช้ในการคำนวณค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาได้แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าคงที่สำหรับการหาค่าคงที่สมดุลปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ในสมการ 2.6

ตัวแปร	สมการที่ 2.10	สมการที่ 2.11
A	231.4654	216.0504
B	-12092.1	-12431.7
C	-36.7816	-35.4819
D	0	0

## 2.4 การสร้างแบบจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรม Aspen Plus

โปรแกรม Aspen Plus เป็นโปรแกรมสร้างแบบจำลองกระบวนการอุตสาหกรรมเคมี (Chemical industrial process) ที่ได้รับการยอมรับในวงการวิศวกรรมเคมี (Chemical engineering) และงานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาความอ่อนไหว (Sensitivity analysis) ของกระบวนการและการศึกษาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimizataion) สำหรับการดำเนินกระบวนการ (Process operation) เพราะในภาคอุตสาหกรรมจริงโดยเฉพาะอย่างยิ่งในโรงงานผลิตไฟฟ้า โรงงานปิโตรเคมี หรือโรงกลั่นน้ำมัน ที่มีการดำเนินการกระบวนการแบบต่อเนื่อง (Continuous process) การปรับเปลี่ยนค่าการดำเนินการเช่น อุณหภูมิ (Temperature) ความดัน (Pressure) ความเข้มข้นของสารเคมี (Concentration) หรืออุปกรณ์ (Process equipment) ในกระบวนการจริงนั้นอาจทำให้เกิดความขัดข้องซึ่งนำไปสู่ การหยุดเดินระบบได้ (Process shutdown) ก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายที่สูง การสูญเสียสารตั้งต้น การเปลี่ยนแปลงแผนการผลิตและการส่งสินค้าที่ล่าช้า ซึ่งไม่เป็นผลดีกับโรงงานและบริษัททั้งในเรื่องค่าใช้จ่ายและผลกระทบต่อชื่อเสียง

### 2.4.1 แบบจำลองสมบัติเชิงอุณหพลศาสตร์

ในการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม Aspen Plus นั้นต้องมีการเลือกทฤษฎีที่ใช้ในการทำนายเกี่ยวกับสมดุลของระบบแก๊สและของเหลว (Vapor-liquid equilibrium) เพื่อใช้ในการคำนวณเชิงอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics) พลศาสตร์ของไหล (Fluid dynamics) หรือการถ่ายโอนมวลและพลังงาน (Mass and heat transfer) เป็นต้น เนื่องจากการกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโมโนเอทานอลามีนและโพแทสเซียม



คาร์บอนนั้นมีการเกิดอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ขึ้นดังสมการที่แสดงในหัวข้อ 2.2 และ 2.3 จึงทำให้แบบจำลองสมบัติเชิงอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics property model) ที่เหมาะกับการสร้างแบบจำลองชนิดนี้คือ ENRTL (Electrolyte Non-Random Two Liquid) แต่เนื่องจากแบบจำลองสมบัติเชิงอุณหพลศาสตร์ ENRTL นั้นมีสมมุติฐานที่อ้างอิงกฎของแก๊สแบบอุดมคติ (Ideal gas law) ทำให้เกิดความผิดพลาด (Error) เมื่อเทียบกับผลการทดลองจริงขึ้นหากทำการจำลองระบบที่สภาวะความดันสูงที่มากกว่า 10 บาร์ เพื่อลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้น จึงต้องเลือกใช้สมการสภาวะ (Equation of state) ของ Redlich-Kwong ที่สร้างบนสมมุติฐานแบบแก๊สจริง (Real gas) แทนกฎของแก๊สแบบอุดมคติที่ใช้ในแบบจำลองสมบัติเชิงอุณหพลศาสตร์ชนิด ENRTL ดังนั้นแบบจำลองสมบัติเชิงอุณหพลศาสตร์ ENRTL-RK (Electrolyte Non-Random Two Liquid Redlich-Kwong) นั้นมีความนิยมและใช้ในการสร้างแบบจำลองกระบวนการตกจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย โมโนเอทานอลามีนและโพแทสเซียมคาร์บอเนตเนื่องจากทำให้แบบจำลองที่สร้างขึ้นนั้นสามารถจำลองระบบที่ครอบคลุมสภาวะความดันสูงได้ [18, 19]

#### 2.4.2 ระบบของหอดูดซึมและหอแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากสารละลายในแบบจำลอง

ในการการสร้างแบบจำลองภายในโปรแกรม Aspen Plus หากเกิดปฏิกิริยาเคมี (Chemical reaction) ภายในแบบจำลองจะต้องมีการระบุระบบที่ใช้เป็นสมมุติฐานของการจำลอง ซึ่งมีด้วยกัน 2 ระบบคือระบบสมดุล (Equilibrium) และ ระบบอัตรา (Rate based) โดยทั่วไปแล้วการสร้างแบบจำลองด้วยระบบอัตรานั้นจะมีความแม่นยำสูงกว่าระบบสมดุลเมื่อทำการเทียบกับการทดลองจริง เนื่องจากระบบได้พิจารณาพลวัต (Dynamic) ของมวล (Mass) พลังงาน (Energy) และ จลนศาสตร์ทางเคมี (Chemical kinetics) ในแต่ละช่วงเวลา แต่ระบบสมดุลนั้นพิจารณาที่สภาวะสมดุลของระบบเพียงอย่างเดียวโดยไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลา ทำให้หลายๆ งานวิจัยที่ทำการศึกษาปฏิกิริยา (Reaction) หรือ การควบคุมระบบ (Process control) เลือกใช้แบบจำลองแบบระบบอัตราเพื่อให้ได้ผลที่ใกล้เคียงกับการทดลองจริงมากที่สุด แต่ในการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity analysis) หรือ ผลกระทบของตัวแปร (Response) เพียงอย่างเดียวนั้นการใช้ระบบอัตราที่มีความยุ่งยากและใช้เวลามากกว่าระบบสมดุลในการสร้างแบบจำลองเนื่องจากความซับซ้อนของการคำนวณภายในโปรแกรมที่ต้องการค่าคงที่หรือสมมุติฐานเพิ่มเติม อีกทั้งความผิดพลาด (Error) ของผลการทดลองที่ได้จากแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับผลจากการทดลองจริง และผลจากระบบอัตรา [20-22]

## 2.5 วิธีการคำนวณค่าประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยก

ในการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นั้นจะใช้ค่าประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เชิงมวล (CO<sub>2</sub> removal efficiency) และค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยก (Reboiler specific heat duty at reboiler) ซึ่งแสดงวิธีการคำนวณในสมการที่ 2.12 และ 2.13 [15] มาใช้ในการเปรียบเทียบกระบวนการหรือสถานการณ์ (Case) โดยค่าประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นั้นจะต้องมีค่ามากกว่า 85% และค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกควรมีค่าต่ำ โดยทั่วไปแล้วจะมีค่าอยู่ประมาณ 4.00 GJ/Ton CO<sub>2</sub> [23]

$$\text{ประสิทธิภาพการดักจับ CO}_2 = \frac{\text{มวล CO}_2 \text{ ในแก๊สกรด} - \text{มวล CO}_2 \text{ ที่ถูกดักจับ}}{\text{มวล CO}_2 \text{ ในแก๊สกรด}} \times 100 \quad (2.12)$$

ค่าพลังงานจำเพาะต่อมวล CO<sub>2</sub> ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยก

$$= \frac{\text{พลังงานที่ใช้ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยก}}{\text{มวล CO}_2 \text{ ที่ถูกดักจับ}} \quad (2.13)$$

## 2.6 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของกระบวนการด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลสองระดับ [24]

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลสองระดับ (2<sup>k</sup> factorial experimental design) เป็นวิธีที่ใช้ในการออกแบบการทดลองขั้นต้นเพื่อใช้ในการคัดแยกตัวแปร (Factor screening) ที่ใช้ในการทดลองหรือการหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับกระบวนการ (Process optimization) โดยทำการแยกตัวแปรต้นที่ส่งผลต่อตัวแปรตามหรือการตอบสนอง (Response) อย่างในมีนัยสำคัญออกจากกลุ่มของตัวแปรอื่นที่ไม่ส่งผลต่อตัวแปรตามหรือการตอบสนองเพื่อให้การหาค่าเหมาะที่สุดของกระบวนการนั้นง่ายขึ้นเนื่องจากจำนวนตัวแปรที่ใช้ในการปรับค่า (Tune) ลดลง โดยใช้การวิเคราะห์ค่าเพียง 2 ระดับของแต่ละตัวแปร คือค่าที่ระดับสูง (High level) และค่าที่ระดับต่ำ (Low level) ซึ่งตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้น อาจจะเป็นตัวเชิงปริมาณเช่น อุณหภูมิ (Temperature) ความดัน

(Pressure) ความเข้มข้น (Concentration) หรืออาจเป็นตัวแปรเชิงคุณภาพเช่นจำนวนของเครื่องจักร ก็ได้ สำหรับการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ 2 ระดับ จำนวนข้อมูลการทดลองนั้นจะแปรผันตามจำนวนตัวแปรต้นที่เลือกใช้หรือ “k” โดยแต่ละตัวแปรนั้นจะมีค่าอยู่ 2 ระดับซึ่งคือค่าที่ระดับสูงและค่าที่ระดับต่ำซึ่งครอบคลุมช่วงที่ทำการทดลองทั้งหมด ดังนั้นจำนวนผลการทดลองจะอยู่ในรูปของ  $2^k$  เช่น หากมีจำนวนตัวแปรเพียง 2 ตัวแปรจะมีจำนวนการทดลองเท่ากับ  $2^2 = 4$  การทดลอง เป็นต้น ค่าเฉลี่ยผลการตอบสนอง (Response) ที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงปัจจัยหลักในแต่ละระดับจะถูกนำมาคำนวณค่าคอนทราสต์ (Contrast) โดยค่าดังกล่าวจะเป็นตัวบ่งชี้ว่าผลกระทบหลัก (Main effect) เช่น ตัวแปร A และ B หรืออิทธิพลของอันตรกิริยา (Interaction effect) เช่น AB ส่งผลอย่างไรต่อการตอบสนอง โดยแสดงสัมประสิทธิ์บวกหรือลบ ในตารางที่ 2.3 ได้แจกแจงผลรวม (Combination) สำหรับระบบสองตัวแปร ซึ่งสามารถหาค่าคอนทราสต์ของผลกระทบหลักของตัวแปร A ได้จากค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงผลตอบสนองอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงระดับตัวแปร A ที่เกิดขึ้นในทุกๆระดับดังสมการที่ 2.14 ค่าคอนทราสต์สำหรับผลกระทบหลักของตัวแปร B ดังสมการที่ 2.15 และคอนทราสต์สำหรับอิทธิพลอันตรกิริยาของ AB ดังสมการที่ 2.16

ตารางที่ 2.3 การแจกแจงผลรวมสำหรับระบบ 2 ตัวแปร

ตัวแปร A	ตัวแปร B		ระดับของตัวแปร (Combination)	สัญลักษณ์ (Label)
	-	+		
-	-	-	A low, B low	(1)
+	-	+	A high, B low	a
-	+	-	A low, B high	b
+	+	+	A high, B high	ab

$$A = \frac{1}{2n} \{[ab-b] + [a-(1)]\} \quad (2.14)$$

$$B = \frac{1}{2n} \{[ab-a] + [b-(1)]\} \quad (2.15)$$

$$AB = \frac{1}{2n} \{[ab-b]-[a-(1)]\} \quad (2.16)$$

เมื่อ  $n$  คือจำนวนการทดลองซ้ำหรือเรพลิเคต (Replicate)

ในการหาผลรวมกำลังสอง (Sum of squares) ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่ใช้ในการบอกปริมาณการตอบสนองของตัวแปรต้นนั้นจะคำนวณจากสมการ 2.17 โดยค่าผลรวมกำลังสองของผลกระทบหลักของตัวแปร A B และอิทธิพลอันตรกิริยาของ AB คือสมการที่ 2.18 2.19 และ 2.20 ตามลำดับ

$$SS = \frac{(\text{Contrast})^2}{n2^k} \quad (2.17)$$

$$SS_A = \frac{[ab+a-b-(1)]^2}{n2^k} \quad (2.18)$$

$$SS_B = \frac{[ab+b-a-(1)]^2}{n2^k} \quad (2.19)$$

$$SS_{AB} = \frac{[ab+(1)-a-b]^2}{n2^k} \quad (2.20)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่าผลรวมกำลังสองรวม (Total sum of squares,  $SS_T$ ) สามารถหาได้จากสมการที่ 2.21

$$SS_T = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{4n} \quad (2.21)$$

และค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Error sum of squares,  $SS_E$ ) หาได้จากสมการที่ 2.22

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB} \quad (2.22)$$

ความแปรปรวน (Mean square, MS) เป็นค่าที่ใช้บอกความแปรปรวนของข้อมูลการทดลอง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่าผลรวมกำลังสอง (Sum of square) ของตัวแปร (Treatment) หรือ ความคลาดเคลื่อน (Error)หารด้วยองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom, DOF) ของตัวแปร (Treatment) หรือความคลาดเคลื่อน (Error) ดังสมการที่ 2.23 และ 2.24 ตามลำดับ โดยองศาความเป็นอิสระ สามารถหาได้จากสมการที่ 2.25 2.26 และ 2.27

$$MS_{\text{treatment}} = \frac{SS_{\text{treatment}}}{DOF_{\text{treatment}}} \quad (2.23)$$

$$MS_{\text{error}} = \frac{SS_{\text{error}}}{DOF_{\text{error}}} \quad (2.24)$$

องศาความเป็นอิสระ

$$DOF_{\text{treatment}} = a - 1 \quad (2.25)$$

$$DOF_{\text{total}} = N - 1 \quad (2.26)$$

$$DOF_{\text{error}} = DOF_{\text{total}} - DOF_{\text{treatment}} \quad (2.27)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อ  $a$  คือค่าระดับของข้อมูล ซึ่งในการออกแบบการทดลองแบบทดลองเชิงแฟกทอเรียลสองระดับ ( $2^k$  factorial experimental design) นั้นมีค่า 2 ระดับคือ ระดับต่ำและระดับสูง

$N$  คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด ซึ่งในการออกแบบการทดลองแบบทดลองเชิงแฟกทอเรียลสองระดับ นั้นจะอยู่ในรูป  $2^k$  เมื่อ  $k$  แทนจำนวนของตัวแปร

ค่าเอฟสถิติ (F-value) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการบอกความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยของความแตกต่างระหว่างกลุ่มข้อมูลโดยสามารถคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างค่าความแปรปรวน (Mean square, MS) ของตัวแปรหรือ ทรีตเมนต์ (Treatment) และความแปรปรวนคลาดเคลื่อน (Mean square error) ดังสมการที่ 2.28 และค่าเอฟจะถูกนำไปใช้ในการหาค่าพีสถิติ (P-value) ร่วมกับองศาความเป็นอิสระของตัวแปรและองศาความเป็นอิสระของความคลาดเคลื่อนจากรายทางสถิติ

$$F = \frac{MS_{\text{treatment}}}{MS_{\text{error}}} \quad (2.28)$$

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance หรือ ANOVA) นั้นจะถูกแสดงในตารางที่เรียกว่า ตาราง ANOVA โดยการคำนวณค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่ได้สรุปในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ตาราง ANOVA สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวน

อิทธิพลหลัก และอิทธิพล อันตรกิริยา	องศาความ เป็นอิสระ (Degree of freedom)	ผลรวมของความเบี่ยงเบน ยกกำลังสอง (Sum of squares)	ความ แปรปรวน (Mean square)	F-value
A	(a-1)	$SS_A = \frac{(\text{Contrast})^2}{n2^k}$	$MS_A = \frac{SS_A}{DOF_A}$	$F_A = \frac{MS_A}{MS_{\text{error}}}$
B	(b-1)	$SS_B = \frac{[ab+b-a-1]^2}{n2^k}$	$MS_B = \frac{SS_B}{DOF_B}$	$F_B = \frac{MS_B}{MS_{\text{error}}}$
AB	(a-1)(b-1)	$SS_{AB} = \frac{[ab+(1)-a-b]^2}{n2^k}$	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{DOF_{AB}}$	$F_{AB} = \frac{MS_{AB}}{MS_{\text{error}}}$
(N-1)				
ความคลาด เคลื่อน (Error)	(ผลรวมของ องศาความ เป็นอิสระ ของข้อมูล)	$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB}$	$MS_{\text{error}} = \frac{SS_{\text{error}}}{DOF_{\text{errc}}}$	$F_{\text{error}} = \frac{MS_{\text{treatment}}}{MS_{\text{error}}}$
ผลรวม (Total)	N-1	$SS_T = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{4n}$		

ซึ่งสำหรับกรณีการออกแบบการทดลองแบบทดลองเชิงแฟกทอเรียลสองระดับ ( $2^k$  factorial experimental design) ที่มี 5 ตัวแปร สามารถใช้วิธีเดียวกันแต่มีจำนวนของชุดข้อมูล (N) มากกว่า ซึ่งการแจกแจงข้อมูลได้แสดงในตารางที่ 2.5 โดยมีทั้งสิ้น 32 ข้อมูล

ตารางที่ 2.5 การแจกแจงผลรวมสำหรับระบบ 5 ตัวแปร

ตัวแปร					สัญลักษณ์
A	B	C	D	E	(Label)
-	-	-	-	-	(1)
+	-	-	-	-	a
-	+	-	-	-	b
+	+	-	-	-	ab
-	-	+	-	-	c
+	-	+	-	-	ac
-	+	+	-	-	bc
+	+	+	-	-	abc
-	-	-	+	-	d
+	-	-	+	-	ad
-	+	-	+	-	bd
+	+	-	+	-	abd
-	-	+	+	-	cd
+	-	+	+	-	acd
-	+	+	+	-	bcd
+	+	+	+	-	abcd
-	-	-	-	+	e
+	-	-	-	+	ae
-	+	-	-	+	be
+	+	-	-	+	abe
-	-	+	-	+	ce
+	-	+	-	+	ace

ตัวแปร					สัญลักษณ์
A	B	C	D	E	(Label)
-	+	+	-	+	bce
+	+	+	-	+	abce
-	-	-	+	+	de
+	-	-	+	+	ade
-	+	-	+	+	bde
+	+	-	+	+	abde
-	-	+	+	+	cde
+	-	+	+	+	acde
-	+	+	+	+	bcde
+	+	+	+	+	abcde

## 2.7 การกำหนดขอบเขตและการคำนวณเชิงเศรษฐศาสตร์ในงานวิจัย

การคำนวณเชิงเศรษฐศาสตร์ในงานวิจัยนี้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการรายปี (Annual operating cost) จะถูกรายงานในหน่วยดอลลาร์สหรัฐต่อตันของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดักจับได้ (USD/Ton CO<sub>2</sub>) ซึ่งในการคำนวณค่าใช้จ่ายในการดำเนินการรายปีนั้นจะถูกคำนวณจากผลรวมของค่าใช้จ่ายลงทุนสินทรัพย์หรือ CAPEX (Capital expenditures) กับค่าใช้จ่ายในการดำเนินการหรือ OPEX (Operating expense) ต่อปีต่อจำนวนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดักจับได้สมการที่ 2.23 [25]

$$\text{ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการรายปี} = \frac{\text{ค่าใช้จ่ายลงทุนสินทรัพย์รายปี} + \text{ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการรายปี}}{\text{มวล CO}_2 \text{ ที่ดักจับได้รายปี}} \quad (2.23)$$

แต่เนื่องจากหลักเกณฑ์ (Basis) ที่ใช้ในงานวิจัยถือว่าไม่มีการลงทุนสินทรัพย์รายปี (CAPEX) เพิ่ม ดังนั้นค่าใช้จ่ายในการดำเนินการรายปีที่ใช้ในการเปรียบเทียบสถานการณ์และกระบวนการในงานวิจัยนี้จะถูกคำนวณจากสมการที่ 2.24 ซึ่งเป็นการหักค่าใช้จ่ายลงทุนสินทรัพย์ออกจากสมการ



$$\text{ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการรายปี} = \frac{\text{ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการรายปี}}{\text{มวล CO}_2 \text{ ที่ดักจับได้รายปี}} \quad (2.24)$$

การกำหนดขอบเขตในการคำนวณค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโมโนเอทานอลามีนและสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบผลจากสถานการณ์ที่ได้จากแบบจำลองกระบวนการในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาตามหลักเกณฑ์ (Basis) ดังต่อไปนี้

- 1) ไม่นำต้นทุนการติดตั้งอุปกรณ์หรือเปลี่ยนแปลงระบบมาคิดในรายจ่ายการลงทุนหรือ CAPEX (Capital expenditures) เนื่องจากในสภาวะการดำเนินการของทั้งสองระบบมีความใกล้เคียงกัน
- 2) ทุกปีของการดำเนินการจะต้องการเปลี่ยนสารละลายและน้ำในระบบ ต้องมีการคิดมูลค่าของสารละลายและน้ำปราศจากแร่ธาตุ (Demineralized water) ในรายจ่ายการลงทุน
- 3) ไม่คิดค่าเสื่อมสภาพ ค่าบำรุงรักษาอุปกรณ์ ค่าใช้จ่ายแรงงาน และภาษี เนื่องจากเป็นการจำลองกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในห้องปฏิบัติการ (Lab scale) และไม่ใช้ในการดำเนินการเชิงพาณิชย์ (Non-business purposes)
- 4) ค่าการดำเนินการหรือ OPEX (Operating expenditures) เป็นผลรวมของ ค่าไฟฟ้า ค่าน้ำหล่อเย็น (Cooling water) ค่าน้ำเย็น (Chilled water) ค่าน้ำปราศจากแร่ธาตุที่เติมเข้าไป (Make up demineralized water) และ ค่าสารละลายที่เติมเพิ่มเข้าไปชดเชยเนื่องจากการเสื่อมสภาพของโมโนเอทานอลามีนที่อัตรา 1.6 kg/ton CO<sub>2</sub> ที่ถูกดักจับได้ [26]

CHULALONGKORN UNIVERSITY

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Jürgensen และคณะ [27] ทำการศึกษาความเป็นไปได้สำหรับการผลิตแก๊สมีเทน (Methane) ด้วยกระบวนการ Sabatier ที่ใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนจากแหล่งชีวมวลและพลังงานหมุนเวียนเป็นสารตั้งต้นด้วยแบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้นด้วยโปรแกรม Aspen Plus และ Aspen Dynamics โดยพิจารณาสมมูลของอุณหพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นในจากปฏิกิริยาภายใต้เครื่องปฏิกรณ์ นอกจากการศึกษาความเป็นไปได้แล้ว ตัวแปรอื่นๆ เช่น อุณหภูมิ ความดัน ได้ถูกศึกษาเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการทดลอง พบว่า ที่ความดันต่ำ (บรรยากาศ) อุณหภูมิส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลง (Conversion) ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าที่ความดันสูง อีกทั้งเมื่อพิจารณาผลของสัดส่วนปริมาณแก๊สธรรมชาติในแก๊สชีวมวลไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลง (Conversion) ของปฏิกิริยา ซึ่งเมื่อ

ได้ช่วงค่าที่เหมาะสม การทดลองจริงได้ถูกทำขึ้นและเทียบกับผลจากการจำลอง พบว่า แบบจำลองมีความใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง

Qeshta และคณะ [10] ศึกษากระบวนการกำจัดแก๊สที่มีความเป็นกรดออกจากปิโตรเลียมด้วยเมทิลไดเอทานอลามีน (Methyldiethanolamine, MDEA) โดยการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม Aspen Hysys ภายใต้ภาวะคงตัว (Steady state) และ เทียบกับผลจากบริษัท DOW Chemical Company พบว่า ค่าของตัวแปรต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้น จึงเป็นการยืนยันว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นนั้นมีความถูกต้อง จากนั้น แบบจำลองดังกล่าวจึงถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปร (Parametric sensitivity analysis) ด้วยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่างๆ ภายในกระบวนการเช่น อุณหภูมิของปิโตรเลียมเหลว อัตราการป้อนปิโตรเลียมเหลวสู่ตัวแยก และความเข้มข้นของเมทิลไดเอทานอลามีน เป็นต้น เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรที่มีผลต่อการกำจัดแก๊สกรดออกจากปิโตรเลียมเหลว จากการจำลองที่ภาวะคงตัว พบว่า หากต้องการให้ปริมาณของไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) มีค่าเท่ากับ 1 ppm ที่อุณหภูมิของระบบที่ 51.31 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของปิโตรเลียมเหลวควรมีค่า 45 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 13,000 kg/h และ เมทิลไดเอทานอลามีนเข้มข้นร้อยละ 35 ที่อัตราการไหล 4,512 kg/h โดยมีค่าความร้อนที่หม้อต้มซ้ำ (Reboiler) เท่ากับ 381 kW ที่ความดัน 2.85 บาร์ และมีอัตราส่วนรีฟลักซ์ (Reflux ratio) เท่ากับ 33.5

Jassim [9] ศึกษาการแยกแก๊สที่มีความเป็นกรด ( $H_2S$  และ  $CO_2$ ) ออกจากแก๊สด้วยเมทิลไดเอทานอลามีน (Methyldiethanolamine, MDEA) ภายในหอดูดซึม (Absorber) ด้วยวิธี การสร้างแบบจำลองผ่านโปรแกรม Aspen Hysys โดยผลของการจำลองจะถูกนำมาเทียบกับค่าการทดลองจากโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง หลังจากนั้น การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปรจะถูกศึกษาด้วยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรในระบบ เช่น ความเข้มข้นของเมทิลไดเอทานอลามีน อัตราการหมุนเวียนของเมทิลไดเอทานอลามีน (L/G) ความดันภายในหอแยกแก๊สกรดออกจากเมทิลไดเอทานอลามีน อุณหภูมิของเมทิลไดเอทานอลามีน และจำนวนชั้นของหอดูดซึม โดยพิจารณาจากความเหมาะสมของปริมาณแก๊สกรดที่แยกออกมาจากแก๊สที่ต้องการบำบัด และ พลังงานที่ใช้ในการแยกแก๊สกรดออกจากเมทิลไดเอทานอลามีน (Reboiler duty) จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง พบว่า ตัวแปรที่ส่งผลอย่างมากต่อการแยกแก๊สกรดออกจากแก๊สที่ต้องการบำบัด คือ อัตราการหมุนเวียนของ เมทิลไดเอทานอลามีน (L/G) และ ความเข้มข้นของเมทิลไดเอทานอลามีน โดยตัวแปรทั้งสองได้ถูกนำไปใช้ศึกษาต่อในแบบจำลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimum value) พบว่า การใช้เมทิลไดเอทานอลามีนที่มีความเข้มข้นร้อยละ 30 และ อัตราอัตราการหมุนเวียนของเมทิลไดเอทานอลามีน (L/G) 0.83 ระบบจะมีประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยลดพลังงานที่ใช้ในการแยกแก๊สกรดออกจากเมทิลไดเอทานอลามีนลง

ร้อยละ 8.6 ลดอัตราการหมุนเวียนเมทิลไดเอทานอลามีนลงร้อยละ 14.4 ซึ่งลดปริมาณสารละลาย ความเข้มข้นต่ำ (Lean amine) ลงร้อยละ 28.6 เมื่อเทียบกับค่าจากการทดลอง

Gracia และคณะ [2] จำลองกระบวนการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สเสียด้วย โมโนเอทานอลามีน (Monoethanolamine, MEA) ภายในหอดูดซึม (Absorber) ด้วยการสร้างแบบจำลองผ่านโปรแกรม Aspen Plus และ เทียบกับผลการทดลองจริงจากงานวิจัยอื่นๆ ที่ใช้ โมโนเอทานอลามีน เข้มข้นร้อยละ 30 เป็นสารละลายดูดซึม จำนวน 4 งานวิจัย โดยแต่ละงานวิจัยมี คุณสมบัติและตัวแปรต่างๆ ไม่เหมือนกัน เช่น ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในโมโนเอทานอลามีน ( $\text{mol CO}_2/\text{mol MEA}$ ) อุณหภูมิของสารละลายโมโนเอทานอลามีน พลังงานความร้อนที่ใช้ในการแยก แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากสารละลายโมโนเอทานอลามีน โดยพบว่า ค่า %AARD (% Average absolute relative deviation) ของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่แยกออกจากหอ แยกแก๊สจากสารละลายโมโนเอทานอลามีนมีค่าประมาณร้อยละ 9.2 และ ปริมาณแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลายโมโนเอทานอลามีน มีค่าประมาณร้อยละ 4.9 ซึ่งเป็นการยืนยันว่า แบบจำลองที่สร้างขึ้นโดยโปรแกรม Aspen Plus นั้นเหมาะสมสำหรับการทำนายผลการทดลองจาก ทั้ง 4 งานวิจัย เนื่องจากแบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้นในครั้งแรกสามารถใช้จำลองผลการทดลองจาก งานวิจัยอื่นๆ ได้ทั้งหมด ได้โดยไม่ต้องทำการแก้ไขค่าเพื่อให้แบบจำลองนั้นมีความสอดคล้องเฉพาะ การทดลองนั้นๆ

Smith และคณะ [7] ทำการทดลองการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้สารละลาย โพแทสเซียมคาร์บอเนต (Potassium carbonate,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 30 และ ร้อยละ 45 ชนิดตกตะกอน (Precipitating solvent) และ ร้อยละ 45 จากนั้น ทำการสร้างแบบจำลองผ่าน โปรแกรม Aspen Plus และ เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง พบว่า ที่สารละลายชนิดตกตะกอนมี ความเข้มข้นร้อยละ 30 มีอัตราการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ อยู่ที่ประมาณร้อยละ 4-15 ในขณะที่ความเข้มข้นสารละลายร้อยละ 45 ชนิดตกตะกอน สามารถกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ประมาณ 4-21% แต่เกิดการ Flooding ของสารละลายในหอดูดซึมเช่นเดียวกับสารละลายร้อยละ 45 ที่กรดอะมิโนที่มีอัตราการดูดซึมมากกว่าชนิดอื่นๆ ที่ร้อยละ 10-50 นอกจากนี้ ยังพบว่า ตัวแปรที่มี ผลต่อการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ คือ อุณหภูมิของสารละลายความเข้มข้นต่ำ (Lean solvent) และ อัตราส่วนของสารละลายความเข้มข้นต่ำ (Lean solvent) ต่อแก๊สกรด (L/G) เมื่ออุณหภูมิ และ L/G มีค่าสูงจะทำให้การดูดซึมมากขึ้น การสร้างแบบจำลองการทดลองทั้งสามวิธีด้วย ENRTL ของ ระบบ  $\text{K}_2\text{CO}_3\text{-CO}_2\text{-KHCO}_3\text{-H}_2\text{O}$  พบว่า ค่าที่ได้จากการสร้างแบบจำลองนั้นมีความใกล้เคียงกับผล การทดลองจริงโดยค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

Wu และคณะ [20] ทำการจำลองกระบวนการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ด้วยการดูดซึมด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตผ่านโปรแกรม Aspen Custom Modeller (ACM) ด้วยแบบจำลองสมบัติเชิงอุณหพลศาสตร์ชนิด ENRTL ซึ่งเป็นแบบจำลองที่นิยมใช้ในการจำลองกระบวนการดูดซึมด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนต ในการทดลองนั้นได้แบ่งการจำลองออกเป็นสองแบบ คือ การจำลองด้วยภาวะสมดุลการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Equilibrium) และการจำลองด้วยระบบอัตรา (Rate based) เพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ เช่น อัตราการไหลของแก๊สที่ป้อนเข้าหอดูดซึมความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนต และ อัตราการไหลของสารละลายที่มีความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ (Lean solvent flow rate) เป็นต้น และทำการเปรียบเทียบความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สที่ผ่านการบำบัดแล้วและปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลาย ดูดซึมที่ออกจากหอดูดซึม ( $\text{CO}_2$  loading on rich solvent) พบว่า ผลการทดลองด้วยระบบสมดุล และ ระบบอัตราที่มีความใกล้เคียงกันและใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง เมื่อพิจารณาผลของตัวแปร พบว่า อัตราการไหลของแก๊สที่ป้อนเข้าหอดูดซึมและความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลายที่มีความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ (Lean solvent) นั้นมีผลต่อการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ มากกว่าตัวแปรอื่นๆ และ ผลการจำลองด้วยระบบอัตราที่มีความใกล้เคียงกับการทดลองจริงมากกว่าการจำลองด้วยระบบสมดุล เนื่องจากในการสร้างแบบจำลองระบบอัตราได้พิจารณาปรากฏการณ์ถ่ายโอนมวลและพลังงานผ่านตัวกลางและจลนศาสตร์เชิงเคมีภายในหอดูดซึม

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 การสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม Aspen Plus

โปรแกรม Aspen Plus เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์โปรแกรมหนึ่งที่ยอมรับใช้ในการสร้างแบบจำลองกระบวนการผลิตทั้งในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี (Petrochemical) การกลั่นน้ำมัน (Oil refinery) หรือโรงงานไฟฟ้า (Power plant) เป็นต้น และถูกใช้และได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในสายงานวิศวกรรมเคมี (Chemical engineer) โดยในงานวิจัยนี้ ได้รับการสนับสนุนโปรแกรม Aspen Plus V.11 จากภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อใช้ในการศึกษาความอ่อนไหวของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอทานอลามีนและสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต

##### 3.1.1 การสร้างแบบจำลองกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอทานอลามีน

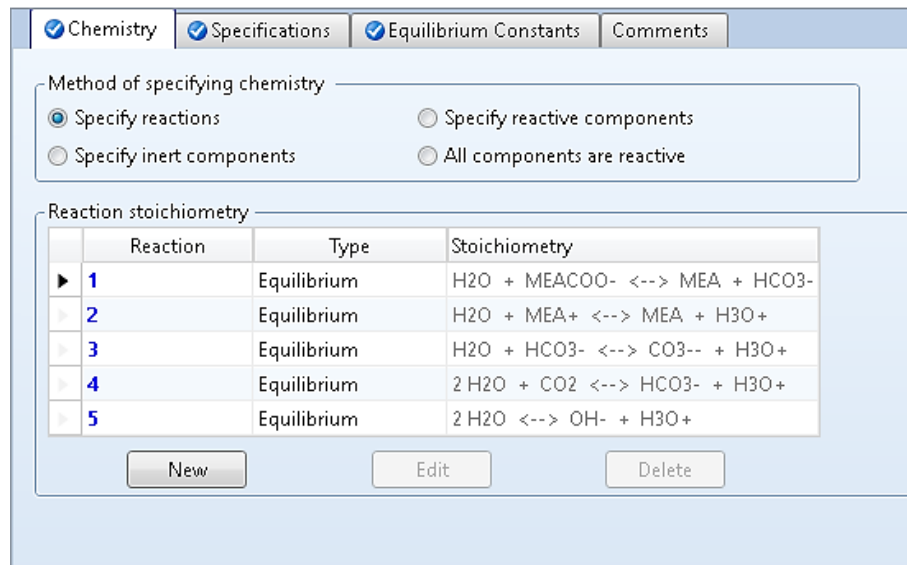
การสร้างแบบจำลองกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในงานวิจัยนี้ได้เริ่มต้นจากการสร้างแบบจำลองกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยวิธีดูดซึมด้วยสารเคมี (Chemical absorption) จากงานวิจัยของ Notz และคณะ [15] ที่ทำการศึกษากระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโมโนเอทานอลามีน (Monoethanolamine) ภายในโรงงานนำร่อง (Pilot Plant) ซึ่งตั้งอยู่ ณ ที่มหาวิทยาลัยไกเซอร์สเลาเทิร์น (University of Kaiserslautern) เมืองไกเซอร์สเลาเทิร์น (Kaiserslautern) ประเทศเยอรมนี เนื่องจากงานวิจัยดังกล่าวมีข้อมูลจำเพาะเช่น อุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหลและอัตราส่วนผสมของแก๊สและสารละลายที่ครบถ้วน แบบจำลองถูกสร้างขึ้นภายในโปรแกรม Aspen Plus V.11 ด้วยระบบสมดุล (Equilibrium) และแบบจำลองเชิงอุณหพลศาสตร์ ENRTL-RK ดังแสดงในรูปที่ 3.1 นอกจากนี้ สมการเคมีที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองนั้นจะถูกเลือกใช้งานโดยอัตโนมัติในโปรแกรม Aspen Plus V.11 เมื่อได้ทำการป้อนสารตั้งต้นหลักในระบบซึ่งได้แก่ โมโนเอทานอลามีน (MEA) คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) น้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) และไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) ลงไป โดยสมการที่ถูกสร้างขึ้นอัตโนมัติที่มีความถูกต้องและครบถ้วนทางทฤษฎีที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.2 ดังแสดงในรูปที่ 3.2 เมื่อทำการกำหนดค่าระบบของการสร้าง

แบบจำลองแล้ว ได้ทำการสร้างแบบจำลองขึ้นให้มีความใกล้เคียงกับโรงงานนำร่องที่ใช้ในงานวิจัยของ Notz และคณะ [15] มากที่สุด โดยอาศัยข้อเสนอแนะเพิ่มเติมจากงานวิจัยของ Li และคณะ [28] ที่เสนอให้แยกส่วนล้างด้วยน้ำ (Water washer) ออกจากหอดูดซึม (Absorber) เพื่อความสะดวกและความง่ายในการปรับค่าในการสร้างแบบจำลองซึ่งแบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้นนั้นแสดงในรูปที่ 3.3 รูปแบบหน่วยปฏิบัติการในแบบจำลองเทียบกับกระบวนการจริงได้แสดงในตารางที่ 3.1 และค่าเอกลักษณ์ (Characteristic) ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองนั้นได้แสดงในตารางที่ 3.2 จากนั้น ทำการเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองที่สร้างขึ้นกับผลการทดลองจริงของ Notz และคณะ [15] โดยประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$  removal efficiency) และค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยก (Reboiler specific heat duty) ควรมีความแตกต่างกันไม่เกิน 10%

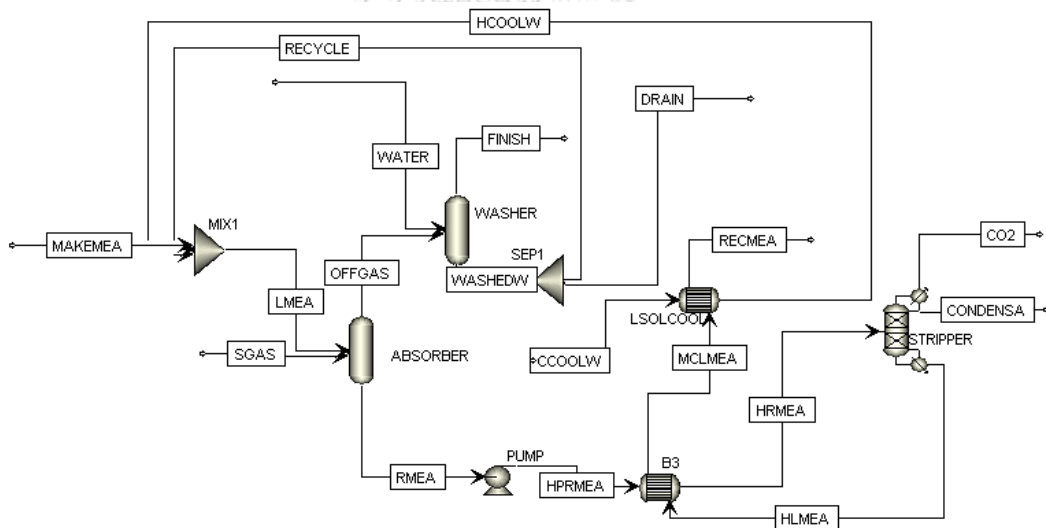
The image shows a screenshot of the Aspen Plus software interface, specifically the 'Property methods & options' dialog box. The dialog is divided into several sections:

- Property methods & options:**
  - Method filter: COMMON
  - Base method: ENRTL-RK
  - Henry components: GLOBAL
- Petroleum calculation options:**
  - Free-water method: STEAM-TA
  - Water solubility: 3
- Electrolyte calculation options:**
  - Chemistry ID: GLOBAL
  - Use true components
- Method name:** ENRTL-RK
- Modify section:**
  - Modify
  - Vapor EOS: ESRK
  - Data set: 1
  - Liquid gamma: GMENRTLQ
  - Data set: 1
  - Liquid molar enthalpy: HLMX0Q
  - Liquid molar volume: VLMX0Q
  - Heat of mixing
  - Poynting correction
  - Use liquid reference state enthalpy

รูปที่ 3.1 รูปแบบการกำหนดระบบและสมบัติการไหลของแบบจำลอง



รูปที่ 3.2 สมการเคมีที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย  
โมโนเอทาโนลามีน



รูปที่ 3.3 แบบจำลองการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโมโนเอทาโนลามีนที่สร้างขึ้น  
ด้วยโปรแกรม Aspen Plus

ตารางที่ 3.1 รูปแบบหน่วยปฏิบัติการในแบบจำลองเทียบกับกระบวนการจริง

หน่วยปฏิบัติการจริง	ชื่อหน่วยปฏิบัติการ ในแบบจำลอง	รูปแบบหน่วย ปฏิบัติการใน แบบจำลอง	หน้าที่
Absorber	ABSORBER	RadFrac	ทำหน้าที่ในการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ยะด้วยสารละลายดูดซึม
	WASHER	RadFrac	แยกสารละลายที่ปนไปกับแก๊สด้วยน้ำ เป็นส่วนหนึ่งของหอดูดซึม (Absorber)
Rich solvent pump	PUMP	Pump	สำหรับระบบสารละลายโมโนเอทานอลามีนเครื่องเพิ่มแรงดันของเหลว (Pump) จะทำหน้าที่เพิ่มความดันให้กับสารละลายดูดซึมที่ออกจากหอดูดซึม แต่สำหรับระบบสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่หอดูดซึมมีความดันสูง เครื่องเพิ่มแรงดันของเหลวนี้ไม่มีความจำเป็น
Solvent heat exchanger	B3	HeatX	แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารละลายที่ออกจากหอดูดซึม (Absorber) และสารละลายจากหอแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Stripper)



Stripper	STRIPPER	RadFrac	ใช้ทำหน้าที่แยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากสารละลายดูดซึม
Solvent cooler	LSOLCOOL	HeatX	ลดอุณหภูมิของสารละลายดูดซึมด้วยน้ำหล่อเย็น
	SEP1	FSplit	แยกน้ำบางส่วนที่ออกจากส่วนล่างของหอดูดซึม (Washer) เพื่อน้ำกลับไปผสมกับสารละลายเริ่มต้น
	MIX1	MIXER	ผสมสารละลายที่วนกลับมาจากเครื่องแลกเปลี่ยนอุณหภูมิของสารละลาย (Solvent cooler) น้ำจาก SEP1 และ โมโนเอทานอลามีนบริสุทธิ์

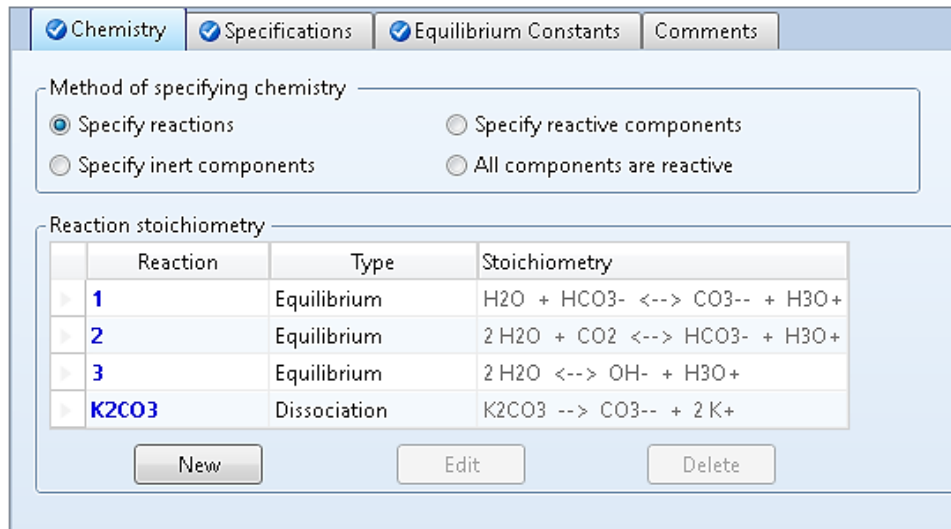
ตารางที่ 3.2 ค่าข้อมูลจำเพาะที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโมโนเอทานอลามีน

อุปกรณ์	Absorber	Stripper
ความดัน (mbar)	1000	2000
จำนวนชั้นขอล	5 + 1 washer	3 + 1 washer
สารป้อนเข้า	Sour gas	Lean MEA Solvent
อัตราการไหล (kg/h)	72	200.1
อุณหภูมิ (°C)	48.01	40.03
ความดัน (mbar)	1004.49	2000
อัตราส่วนมวล		
CO <sub>2</sub>	0.085	0.052
H <sub>2</sub> O	0.071	0.673
N <sub>2</sub>	0.743	-
O <sub>2</sub>	0.101	-
MEA	-	0.275
mol CO <sub>2</sub> /mol MEA	-	0.265

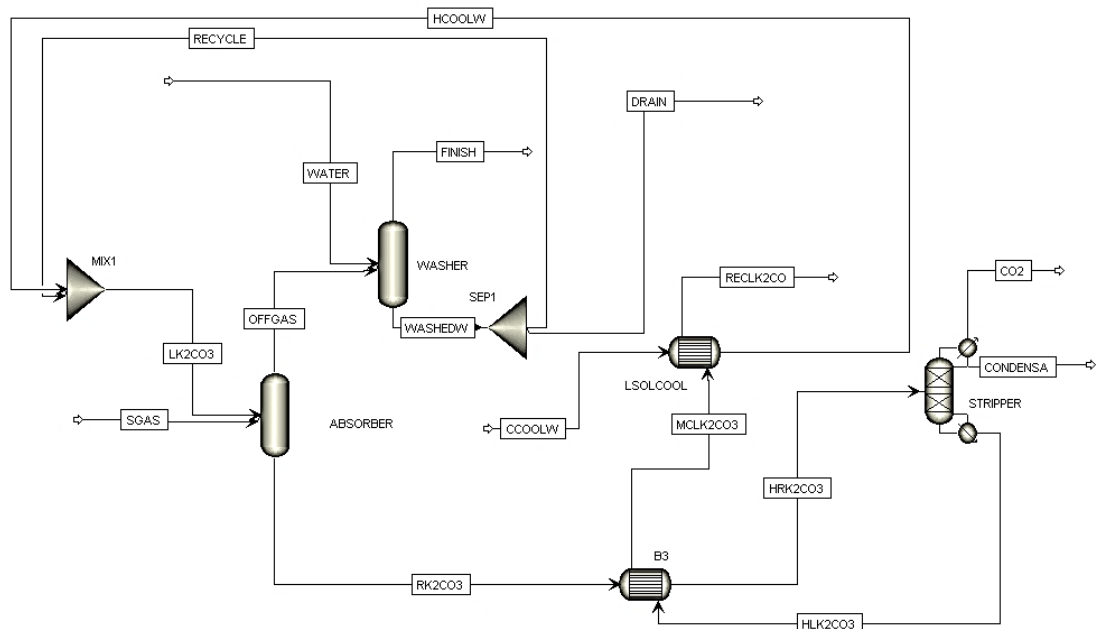
### 3.1.2 การสร้างแบบจำลองกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต

แบบจำลองการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโมโนเอทานอลามีนที่ให้ผลประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub> removal efficiency) และค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอกลิ้น (Reboiler specific heat duty) ใกล้เคียงกับโรงงานนำร่องจากงานวิจัยของ Notz และคณะ [15] จะถูกนำมาปรับใช้ในการสร้างแบบจำลองกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต โดยเปลี่ยนสารตั้งต้นโพแทสเซียมคาร์บอเนต (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) แทนโมโนเอทานอลามีน (MEA) ในแบบจำลอง โปรแกรมจะทำการสร้างสมการอัตราโนมิติและพบว่าสมการและค่าคงที่สมดุล (Equilibrium constant) ที่ถูกสร้างขึ้นอัตราโนมิติด้วยโปรแกรม Aspen Plus มีความถูกต้องกับสมการที่ 2.5 2.10 และ 2.11 ดังแสดงในรูปที่ 3.4 จากนั้นแผนผังกระบวนการ

สำหรับกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตได้ถูกจำลองขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 สมการเคมีที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต



รูปที่ 3.5 แบบจำลองการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรม Aspen Plus

### 3.2 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตนั้นด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลสองระดับ

การศึกษาความอ่อนไหวของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตนั้นด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลสองระดับ ( $2^k$  factorial experimental design) ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาตัวแปร 5 ตัวคือ อุณหภูมิของสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (Lean  $K_2CO_3$  solvent temperature) อัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (L/G mass ratio) ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี้ยว ( $CO_2$  concentration in sour gas) ความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลาย ( $K_2CO_3$  concentration in lean solvent) และความดันของหอดูดซึม (Absorber pressure) โดยค่าที่ระดับสูงและต่ำที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อหาประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$  removal efficiency) และค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยก (Reboiler specific heat duty) ได้รวบรวมจากงานวิจัยอื่นๆ [4, 17, 29-34] โดยเลือกค่าที่ใกล้เคียงกับกระบวนการเดิมในงานวิจัยของ Notz และคณะ [15] เพื่อใช้เป็นช่วงในการศึกษาได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าระดับสูงและต่ำสำหรับการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลสองระดับ

	ค่าระดับต่ำ (-)	ค่าระดับสูง (+)
อุณหภูมิของสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (องศาเซลเซียส)	50	100
อัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (มวลของสารละลาย/มวลของแก๊ส)	2	10
ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี้ยว (%)	10	30
ความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลาย (%)	20	40
ความดันของหอดูดซึม (บาร์)	1	10

เมื่อนำจำนวนตัวแปรมาสร้างสถานการณ์ (Case) ในการสร้างแบบจำลองเพื่อหาค่าประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$  removal efficiency) และค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยก (Reboiler specific heat duty) จะต้องใช้แบบจำลองในการสร้างสถานการณ์ในการศึกษาความอ่อนไหวทั้งสิ้น 32 สถานการณ์ดังแสดงในตารางที่ 3.4 และ อัตราส่วนโดยมวลขององค์ประกอบในแก๊สเปรี๊ยะวในตารางที่ 3.5 โดยทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ยะวและรักษาอัตราส่วนระหว่างแก๊สไนโตรเจนและออกซิเจนในแก๊สเปรี๊ยะวให้มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของ Notz และสำหรับสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตถูกแสดงในตารางที่ 3.6 โดยในตารางที่ 3.6 ได้ทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลายในสถานการณ์ต่างๆ โดยมีอัตราส่วนโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลายดูดซิมที่ออกจากหอแยกเท่ากับ 0.20 ซึ่งเป็นค่าจากสถานการณ์พื้นฐานในการทดลอง [35] โดยมีการเพิ่มกรณีที่ความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลายที่ 40% ที่มีอัตราส่วนโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลายดูดซิมที่ออกจากหอแยกเท่ากับ 0.26 เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับผลการจำลองจากการทดลองของ Notz และคณะ [15]

ตารางที่ 3.4 ค่าสำหรับการสร้างแบบจำลองในการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของกระบวนการกำกับดูแลการดำเนินงานที่ได้ออกไปโดยสายธารละลาย  
 โฟแทสเซียมคาร์บอเนตด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลสองระดับ

สถานการณ์	คุณสมบัติของสารละลาย โฟแทสเซียม คาร์บอเนตที่ผูก ป้อนเข้าสู่หอดูดูดซิม (องศาเซลเซียส)	อัตราส่วนการไหล ของสารละลายต่อ แก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่ หอดูดูดซิม (มวลของ สารละลาย/มวล ของแก๊ส)	ความเข้มข้นของ คาร์บอนไดออกไซด์ ในแก๊สเปรี๊ว (%)	ความเข้มข้นของ โพแทสเซียม คาร์บอเนตใน สารละลาย (%)	ความดันของหอดูดูดซิม (บาร์)
1	50	2	10	20	1
2	100	2	10	20	1
3	50	10	10	20	1
4	100	10	10	20	1
5	50	2	30	20	1
6	100	2	30	20	1
7	50	10	30	20	1
8	100	10	30	20	1

ตารางที่ 3.4 (ต่อ) ค่าสำหรับการสร้างแบบจำลองในการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของกระบวนการที่จับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลสองระดับ

สถานการณ์	อุณหภูมิของสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดูดซิม (องศาเซลเซียส)	อัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดูดซิม (มวลของสารละลาย/มวลของแก๊ส)	ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ว (%)	ความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลาย (%)	ความเข้มข้นของความดันของหอดูดูดซิม (บาร์)
9	50	2	10	40	1
10	100	2	10	40	1
11	50	10	10	40	1
12	100	10	10	40	1
13	50	2	30	40	1
14	100	2	30	40	1
15	50	10	30	40	1
16	100	10	30	40	1

ตารางที่ 3.4 (ต่อ) คำสำหรับการสร้างแบบจำลองในการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของกระบวนการที่จับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลสองระดับ

สถานการณ์	อุณหภูมิของสารละลาย โพแทสเซียม คาร์บอเนตที่ถูก ป้อนเข้าสู่หอดูดูดซิม (องศาเซลเซียส)	อัตราส่วนการไหล ของสารละลายต่อ แก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่ หอดูดูดซิม (มวลของ สารละลาย/มวล ของแก๊ส)	ความเข้มข้นของ คาร์บอนไดออกไซด์ ในแก๊สเปรี๊ว (%)	ความเข้มข้นของ โพแทสเซียม คาร์บอเนตใน สารละลาย (%)	ความดันของหอดูดูดซิม (บาร์)
17	50	2	10	20	10
18	100	2	10	20	10
19	50	10	10	20	10
20	100	10	10	20	10
21	50	2	30	20	10
22	100	2	30	20	10
23	50	10	30	20	10
24	100	10	30	20	10



ตารางที่ 3.4 (ต่อ) คำสำหรับการสร้างแบบจำลองในการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของกระบวนการกำกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย  
สารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลสองระดับ

สถานการณ์	อุณหภูมิของสารละลาย โพแทสเซียม คาร์บอเนตที่ถูก ป้อนเข้าสู่หอดูดูดซิม (องศาเซลเซียส)	อัตราส่วนการไหล ของสารละลายต่อ แก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่ หอดูดูดซิม (มวลของ สารละลาย/มวล ของแก๊ส)	ความเข้มข้นของ คาร์บอนไดออกไซด์ ในแก๊สเปรีวยว (%)	ความเข้มข้นของ โพแทสเซียม คาร์บอเนตใน สารละลาย (%)	ความดันของหอดูดูดซิม (บาร์)
25	50	2	10	40	10
26	100	2	10	40	10
27	50	10	10	40	10
28	100	10	10	40	10
29	50	2	30	40	10
30	100	2	30	40	10
31	50	10	30	40	10
32	100	10	30	40	10

ตารางที่ 3.5 อัตราส่วนโดยมวลขององค์ประกอบในแก๊สเปรี๊ยะ

องค์ประกอบ	10% CO <sub>2</sub>	20% CO <sub>2</sub>	30% CO <sub>2</sub>
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> )	0.100	0.200	0.300
น้ำ (H <sub>2</sub> O)	0.050	0.050	0.050
ออกซิเจน (O <sub>2</sub> )	0.120	0.107	0.093
ไนโตรเจน (N <sub>2</sub> )	0.730	0.643	0.557

ตารางที่ 3.6 อัตราส่วนโดยมวลขององค์ประกอบในสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต

องค์ประกอบ	20% K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	30% K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	40% K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (1)	40% K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (2)
โพแทสเซียมคาร์บอเนต (K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	0.200	0.300	0.400	0.400
น้ำ (H <sub>2</sub> O)	0.787	0.680	0.574	0.567
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> )	0.013	0.020	0.026	0.033
mol CO <sub>2</sub> /mol K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.209	0.204	0.204	0.259

### 3.3 การหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต

หลังจากได้ทำการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของกระบวนการ (Sensitivity analysis) ด้วยวิธี 2<sup>k</sup> factorial experimental design แล้ว ตัวแปรและผลของอันตรกิริยาระหว่างตัวแปร (Interaction effect) ที่มีส่งผลสูงต่อค่าประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกอย่างมีนัยสำคัญจะถูกเลือกออกมาเพื่อใช้ในการปรับปรุงค่าของตัวแปรที่ใช้ในการปรับปรุงสถานการณ์พื้นฐาน (Base case) ที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.7 เพื่อให้ได้ค่าเหมาะที่สุดในกระบวนการ (Optimization) โดยเงื่อนไขของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการนั้นจะพิจารณาเงื่อนไขดังนี้

- 1) กระบวนการมีค่าประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่าร้อยละ 85 หรือใกล้เคียง [23]
- 2) ค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกต้องต่ำกว่าสถานการณ์พื้นฐานหรือใกล้เคียงกับค่าจากกระบวนการทั่วไปที่ 4 GJ/Ton CO<sub>2</sub> [23]
- 3) พลังงานจำเพาะต่อมวลของทั้งระบบมีค่าต่ำกว่าผลที่ได้จากการจำลองจากการทดลองจริงของ Notz และคณะ [15] และสถานการณ์พื้นฐาน
- 4) ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่อปี (Annual operating cost) ภายใต้เงื่อนไขและขอบเขตที่สำหรับการเปรียบเทียบในงานวิจัยนี้ที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.7

ตารางที่ 3.7 ค่าสถานการณ์พื้นฐานเริ่มต้นของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต

	ค่าพื้นฐาน
อุณหภูมิของสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซิม (องศาเซลเซียส)	75
อัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซิม	6
ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ว (%)	20
ความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลาย (%)	30
ความดันของหอดูดซิม (บาร์)	5.5

### 3.4 เปรียบเทียบผลการจำลองของกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตกับสารละลายโมโนเอทาโนลามีน

หลังจากได้ทำการหาค่าเหมาะที่สุดของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตแล้ว จึงทำการเปรียบเทียบกระบวนการมีค่าประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยก และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่อปี กับกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย โมโนเอทาโนลามีนจากงานวิจัยของ Notz และคณะ [15]

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 การสร้างแบบจำลองกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอทานอลามีน

จากการสร้างแบบจำลองกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอทานอลามีนด้วยโปรแกรม Aspen Plus จากงานวิจัยของ Notz และคณะ [15] ที่ทำการศึกษากระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโมโนเอทานอลามีนในโรงงานนําร่อง และทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นโดย Li และคณะ [28] และ Choi และคณะ [36] ที่ใช้งานวิจัยของ Notz และคณะ [15] เป็นตัวอย่างในการสร้างแบบจำลองซึ่งแสดงผลการสร้างแบบจำลองในตารางที่ 4.1 พบว่าประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีค่าเท่ากับร้อยละ 73.35 ซึ่งมีความใกล้เคียงกับผลการทดลองโดยมี ความคลาดเคลื่อนเท่ากับร้อยละ 3.38 เมื่อทำการเปรียบเทียบการงานวิจัยของ Li และคณะ [28] และ Choi และคณะ [36] พบว่ามี ความคลาดเคลื่อนที่ใกล้เคียงกันและอยู่ในช่วงที่ต่ำกว่าร้อยละ 5 เมื่อพิจารณาค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยก พบว่า ผลจากการสร้างแบบจำลองมีค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกเท่ากับ 4.78 GJ/T CO<sub>2</sub> ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนจากการทดลองจริงร้อยละ 4.61 ซึ่งมีความใกล้เคียงกับผลจากงานวิจัยโดย Li และคณะ [28] และ Choi และคณะ [36] ทำให้เชื่อมั่นได้ว่าแบบจำลองกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอทานอลามีนที่สร้างขึ้นในโปรแกรม Aspen Plus มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองจริงและสามารถนำไปวิเคราะห์กระบวนการในส่วนถัดไปของการศึกษานี้ได้ ซึ่งความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการสร้างแบบจำลองนั้นอาจเกิดได้จากการการเลือกใช้แบบจำลองสมบัติเชิงอุณหพลศาสตร์ชนิด การเลือกระบบในการสร้างแบบจำลองเช่นระบบสมดุล (Equilibrium) หรือระบบอัตรา (Rate-based) หรืออาจเกิดจากตัวแปรอื่นๆ ที่ส่งผลต่อผลลัพธ์เพียงเล็กน้อยหลายๆ ตัวประกอบกันเช่น ความดันลด (Pressure drop) การถ่ายโอนความร้อนออกจากระบบสู่สิ่งแวดล้อม หรือ อุปกรณ์วัดคุม (Controllers) และอุปกรณ์วิเคราะห์ (Analyzers) เป็นต้น

ตารางที่ 4.1 ผลการสร้างแบบจำลองจากโรงงานนำร่องในงานวิจัยของ Notz และคณะ

	Notz และคณะ	Li และคณะ	Choi และคณะ	แบบจำลองที่สร้างขึ้น
	[15]	[28]	[36]	
โปรแกรม	การทดลองจริง	Aspen Plus ระบบอัตรา	Unisim ระบบสมดุล	Aspen Plus ระบบสมดุล
แบบจำลองสมบัติเชิง อุณหพลศาสตร์	-	ENRTL-RK ความคลาดเคลื่อน	Amine Property ค่า ความคลาดเคลื่อน	ENRTL-RK ค่า ความคลาดเคลื่อน
ประสิทธิภาพการดักจับแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ (%)	75.91	79.08	78.6	73.35
ค่าพลังงานจำเพาะต่อมวล คาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่อง ทำความร้อนของหอแยก (GJ/T CO <sub>2</sub> )	5.01	5.22	5.03	4.78
		4.19	0.40	4.61

## 4.2 การสร้างแบบจำลองกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต

หลังจากที่ได้แบบจำลองที่มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองจากงานวิจัยของ Notz และคณะ จึงทำการเปลี่ยนสารในระบบจากโมโนเอทานอลามีนเป็นสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตและทำการศึกษาความอ่อนไหวของกระบวนการโดยปรับเปลี่ยนสภาวะของการดำเนินการของระบบเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรที่ศึกษา 5 ตัวแปรได้แก่ อุณหภูมิของสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (ตัวแปร A) อัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (ตัวแปร B) ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ว (ตัวแปร C) ความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลาย (ตัวแปร D) และความดันของหอดูดซึม (ตัวแปร E) ตามที่แสดงในตารางที่ 3.3 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยก ซึ่งผลการทดลองจากแบบจำลองได้แสดงในตารางที่ 4.2

### 4.2.1 ผลของอิทธิพลหลักและอิทธิพลอันตรกิริยาตัวแปร

ผลของการทดลองจากแบบจำลองได้ถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance หรือ ANOVA) เพื่อหาผลของอิทธิพลหลัก (Main effect) และอิทธิพลอันตรกิริยาของตัวแปร (Interaction effect of parameters) ในการวิเคราะห์ผลของอิทธิพลหลักและอิทธิพลอันตรกิริยาของตัวแปรนั้นจะพิจารณาจากผลรวมของความเบี่ยงเบนยกกำลังสอง (Sum of squares) และค่า P (P-value) โดยผลรวมของความเบี่ยงเบนยกกำลังสองจะแสดงถึงส่วนร่วมของอิทธิพล (Contribution) ต่อผลประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หรือค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยก และ ค่า P จะแสดงนัยสำคัญของอิทธิพลซึ่งค่า P ที่มีค่าน้อยกว่า 0.05 (ที่ค่าความเชื่อมั่นร้อยละ 95) หมายความว่าอิทธิพลนั้นส่งผลต่อผลลัพธ์อย่างมีนัยสำคัญ แต่ถ้าหากมีค่ามากกว่า 0.05 (ที่ค่าความเชื่อมั่นร้อยละ 95) จะหมายความว่าอิทธิพลนั้นไม่มีนัยสำคัญต่อผลลัพธ์ ดังนั้นในการเลือกอิทธิพลหลักหรืออิทธิพลอันตรกิริยาของตัวแปรเพื่อทำการศึกษาค่าที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการต้องพิจารณาอิทธิพลหลักหรืออิทธิพลอันตรกิริยาของตัวแปรที่มีค่า P น้อยกว่า 0.05 ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีที่ใช้ในการเลือก (Screening) ตัวแปรที่ศึกษาเพื่อเลือกตัวแปรที่มีนัยสำคัญต่อผลลัพธ์มากที่สุด [13]

ตารางที่ 4.2 ผลการจำลองกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต

สถานการณ์	อุณหภูมิของสารละลาย	อัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (A) (องศาเซลเซียส)	ป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (B)	ป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (C)	คาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ว (%)	โพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลาย (D) (%)	ความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในแก๊สเปรี๊ว (%)	ความเข้มข้นของหอดูดซึม (E)	ประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (%)	ค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยก (GJ/T CO <sub>2</sub> )
1	50	2	10	20	1	52.70	10.89			
2	100	2	10	20	1	50.45	8.77			
3	50	10	10	20	1	96.06	24.93			
4	100	10	10	20	1	79.50	25.84			
5	50	2	30	20	1	24.82	8.27			
6	100	2	30	20	1	24.16	7.68			
7	50	10	30	20	1	98.88	10.00			
8	100	10	30	20	1	85.34	10.20			

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ผลการจำลองกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต

สถานการณ์	อุณหภูมิของสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (A) (องศาเซลเซียส)	อัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (B)	ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สปรีว (C) (%)	ความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลาย (D) (%)	ความดันของหอดูดซึม (E) (บาร์)	ประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (%)	ค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยก (GJ/T CO <sub>2</sub> )
9	50	2	10	40	1	67.31	5.37
10	100	2	10	40	1	63.34	5.28
11	50	10	10	40	1	94.30	13.71
12	100	10	10	40	1	77.65	16.22
13	50	2	30	40	1	36.37	3.84
14	100	2	30	40	1	35.03	3.65
15	50	10	30	40	1	91.20	6.15
16	100	10	30	40	1	85.41	5.96



ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ผลการจำลองกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต

สถานการณ์	อุณหภูมิของ สารละลาย	อัตราส่วนการไหล ของสารละลาย	ความเข้มข้นของ คาร์บอนไดออกไซด์ ในแก๊สปรีว (C)	ความเข้มข้น ของโพแทสเซียม คาร์บอเนตใน สารละลาย (D) (%)	ความเข้มข้น ของโพแทสเซียม คาร์บอเนตใน (บาร์)	ประสิทธิภาพการดัก จับแก๊ส	ค่าพลังงานจำเพาะ ต่อมวล
	โพแทสเซียม	ต่อแก๊สที่ถูก	(%)	คาร์บอนไดออกไซด์	ซีม (E)	คาร์บอนไดออกไซด์	คาร์บอนไดออกไซด์
	คาร์บอนเนตที่ถูก	ป้อนเข้าสู่หอดูด		คาร์บอนไดออกไซด์	(บาร์)	(%)	ที่เครื่องทำความ
	ป้อนเข้าสู่หอดูด	ซีม (B)		สารละลาย			ร้อนของหอแยก
	ซีม (A)			(D) (%)			(GJ/T CO <sub>2</sub> )
	(องศา						
	เซลเซียส)						
17	50	2	10	20	10	86.52	7.06
18	100	2	10	20	10	71.15	7.87
19	50	10	10	20	10	99.64	23.72
20	100	10	10	20	10	98.00	21.35
21	50	2	30	20	10	38.08	5.28
22	100	2	30	20	10	35.09	5.38
23	50	10	30	20	10	99.91	9.62
24	100	10	30	20	10	99.49	8.65

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ผลการจำลองกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต

สถานการณ์	อุณหภูมิของ สารละลาย	อัตราส่วนการไหล ของสารละลาย	ความเข้มข้นของ คาร์บอนไดออกไซด์ ในแก๊สปรีว (C)	ความเข้มข้น ของโพแทสเซียม คาร์บอเนตใน สารละลาย (D) (%)	ความเข้มข้น ของซีม (E)	ประสิทธิภาพการดัก จับแก๊ส	ค่าพลังงานจำเพาะ ต่อมวล
	โพแทสเซียม คาร์บอเนตที่ถูก ป้อนเข้าสู่หอดูด ซีม (B)	ป้อนเข้าสู่หอดูด ซีม (B)	(%)	คาร์บอนไดออกไซด์ ที่เครื่องทำความ ร้อนของหอแยก (GJT CO <sub>2</sub> )	ซีม (บาร์)	คาร์บอนไดออกไซด์	คาร์บอนไดออกไซด์
25	50	2	10	40	10	98.34	4.09
26	100	2	10	40	10	88.40	4.19
27	50	10	10	40	10	99.49	13.39
28	100	10	10	40	10	97.92	11.66
29	50	2	30	40	10	55.07	2.72
30	100	2	30	40	10	49.67	2.76
31	50	10	30	40	10	99.53	5.28
32	100	10	30	40	10	98.88	5.07

#### 4.2.1.1 ผลของอิทธิพลหลักและอิทธิพลอันตรกิริยาของตัวแปรต่อประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน หรือ ANOVA ของอิทธิพลหลักและอิทธิพลอันตรกิริยาของตัวแปรต่อประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จาก 5 ตัวแปรได้แก่ อุณหภูมิของสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (ตัวแปร A) อัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (ตัวแปร B) ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ว (ตัวแปร C) ความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลาย (ตัวแปร D) และความดันของหอดูดซึม (ตัวแปร E) ได้แสดงในตารางที่ 4.3 จากการวิเคราะห์ผลรวมของความเบี่ยงเบนยกกำลังสองของพบว่าอิทธิพลหลักและอิทธิพลอันตรกิริยาของตัวแปร 8 อันดับแรกส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถึงร้อยละ 97.61 เมื่อเรียงลำดับจากมากไปน้อยจะได้ผลดังต่อไปนี้  $B > BC > C > E > BD > A > D > BE$  พบว่าอิทธิพลหลัก B ซึ่งคืออัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึมส่งผลต่อประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อย่างมีนัยสำคัญถึงร้อยละ 58.40 ในขณะที่อันดับที่ 2 คืออิทธิพลอันตรกิริยาของตัวแปร BC ซึ่งส่งผลร้อยละ 13.11 อิทธิพลหลัก C และ E ส่งผลใกล้เคียงกันคือร้อยละ 10.42 และ 9.55 ตามลำดับ และอิทธิพลอันตรกิริยาของ BD อิทธิพลหลัก A อิทธิพลหลัก D และอิทธิพลอันตรกิริยาของ BE ส่งผลเพียงเล็กน้อยอย่างมีนัยสำคัญร้อยละ 2.26 1.46 1.44 1.05 และ 0.61 ตามลำดับ โดยผลการวิเคราะห์แบบจำลองของอิทธิพลหลักและอิทธิพลอันตรกิริยาของตัวแปรต่อประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นี้มีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ ( $R^2$ ) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้อธิบายว่าแบบจำลองของอิทธิพลหลักและอิทธิพลอันตรกิริยาของตัวแปรสอดคล้องแม่นยำกับข้อมูลถึงร้อยละ 97.69 หรือค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9769

#### 4.2.1.2 ผลของอิทธิพลหลักและอิทธิพลอันตรกิริยาของตัวแปรต่อค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยก

จากผลการทดลองด้วยแบบจำลองที่แสดงในตารางที่ 4.4 แสดงผลของอิทธิพลหลักและอิทธิพลอันตรกิริยาของตัวแปรต่อค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยก อิทธิพลหลักและอิทธิพล

อันตรกิริยาของตัวแปร 9 อันดับแรกส่งผลต่อค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกถึงร้อยละ 98.86 เมื่อเรียงลำดับจากมากไปน้อยจะได้ผลดังต่อไปนี้  $B > C > D > BC > E > BD > CD > BCD$  ซึ่งอิทธิพลหลักและอิทธิพลอันตรกิริยาของตัวแปร 8 อันดับแรกทั้งหมดส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ โดยอิทธิพลหลัก B ส่งผลถึงร้อยละ 34.00 อิทธิพลหลัก C ส่งผลถึงร้อยละ 26.05 อิทธิพลหลัก D ส่งผลถึงร้อยละ 17.94 อิทธิพลอันตรกิริยาของตัวแปร BC ส่งผลร้อยละ 13.93 ในขณะที่ อิทธิพลหลัก E และ อิทธิพลอันตรกิริยาของตัวแปร BD CD และ BCD ส่งผลต่อค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกใกล้เคียงกันที่ร้อยละ 1.98 1.84 1.74 และ 1.26 ตามลำดับ โดยมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9874

ตารางที่ 4.3 ผลของอิทธิพลหลักและอิทธิพลอันตรกิริยาของตัวแปรต่อประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

อิทธิพลหลักและ อิทธิพลอันตรกิริยา	ผลรวมของความ เบี่ยงเบนยกกำลังสอง (Sum of squares)	ร้อยละของส่วน ร่วมของอิทธิพล (Contribution Percentage)	F-value	P-value
ผลรวมรูปแบบ (Overall Model)	20399.46	97.69	121.41	$5.90 \times 10^{-17}$
A-A	304.63	1.46	14.5	$9.04 \times 10^{-4}$
B-B	12195.22	58.40	580.63	$8.04 \times 10^{-18}$
C-C	2175.38	10.42	103.57	$5.49 \times 10^{-10}$
D-D	300.65	1.44	14.31	$9.62 \times 10^{-4}$
E-E	1994.52	9.55	94.96	$1.24 \times 10^{-9}$
BC	2737.91	13.11	130.36	$5.93 \times 10^{-11}$
BD	472.61	2.26	22.5	$8.82 \times 10^{-5}$
BE	218.54	1.05	10.4	$3.74 \times 10^{-3}$
Residual	483.08	2.31		
Total	20882.54			

ตารางที่ 4.4 ผลของอิทธิพลหลักและอิทธิพลอันตรกิริยาของตัวแปรต่อค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยก

อิทธิพลหลักและ อิทธิพลอันตรกิริยา	ผลรวมของความ เบี่ยงเบนยกกำลังสอง (Sum of squares)	ร้อยละของส่วน ร่วมของอิทธิพล (Contribution Percentage)	F-value	P-value
ผลรวมรูปแบบ (Overall Model)	1278.96	98.86	225.36	$5.60 \times 10^{-20}$
B-B	439.91	34.00	620.88	$3.82 \times 10^{-18}$
C-C	336.99	26.05	475.62	$7.27 \times 10^{-17}$
D-D	232.09	17.94	327.57	$4.22 \times 10^{-15}$
E-E	25.61	1.98	36.15	$3.94 \times 10^{-6}$
BC	180.18	13.93	254.31	$6.30 \times 10^{-14}$
BD	23.75	1.84	33.52	$6.73 \times 10^{-6}$
CD	22.56	1.74	31.85	$9.60 \times 10^{-6}$
BCD	16.29	1.26	22.99	$7.77 \times 10^{-5}$
Residual	14.73	1.14		
Total	1293.69			

#### 4.2.2 วิเคราะห์อิทธิพลหลัก

การวิเคราะห์อิทธิพลหลัก (Main effect) ซึ่งเป็นการศึกษาความอ่อนไหว (Sensitivity) ของผลลัพธ์อันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปร สามารถทำได้โดยพิจารณาค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกอันเกิดจากผลของอิทธิพลหลักที่ค่าที่ระดับสูง และค่าที่ระดับต่ำของแต่ละตัวแปรทั้ง 5 ตัวแปรที่ทำการศึกษาซึ่งได้แก่ อุณหภูมิของสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (ตัวแปร A) อัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (ตัวแปร B) ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ใน

แก๊สเปรี๊ยะว (ตัวแปร C) ความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลาย (ตัวแปร D) และความดันของหอดูดซึม (ตัวแปร E) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2

#### 4.2.2.1 อุณหภูมิของสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม

จากรูปที่ 4.1 เมื่ออุณหภูมิของสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (A) เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง เนื่องจากความสามารถในการละลายแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตลดลง [10] ทั้งนี้ เพราะว่า ปฏิกิริยาการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction) เมื่ออุณหภูมิของระบบสูงขึ้นทำให้สมดุลของปฏิกิริยาเกิดการเปลี่ยนแปลงในทางตรงข้าม (Chemical shift) คือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แยกออกจากสารละลาย หากพิจารณารูปที่ 4.2 จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิของสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึมเพิ่มขึ้น ค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกจะลดลงเพราะในสารละลายมีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่น้อยทำให้ใช้พลังงานในการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกลดลงอีกทั้งสารละลายมีอุณหภูมิที่สูงอยู่แล้ว

#### 4.2.2.2 อัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม

จากรูป 4.1 และ 4.2 พบว่าอัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (L/G) ส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกอย่างมีนัยสำคัญอย่างมาก เมื่ออัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึมมากขึ้นทำให้ค่าประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากปริมาณของสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ทำหน้าที่ดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่หอดูดซึมมากขึ้น [9] ทำให้โอกาสที่สารละลายจะทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณพื้นที่ผิวการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแก๊สและสารละลาย (Gas-liquid interfacial area) เพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่ออัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึมเพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณความร้อนที่ต้องการในการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากสารละลายดูดซึมเพิ่มมากขึ้น

ส่งผลให้พลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกเพิ่มมากขึ้น

#### 4.2.2.3 ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ยะ

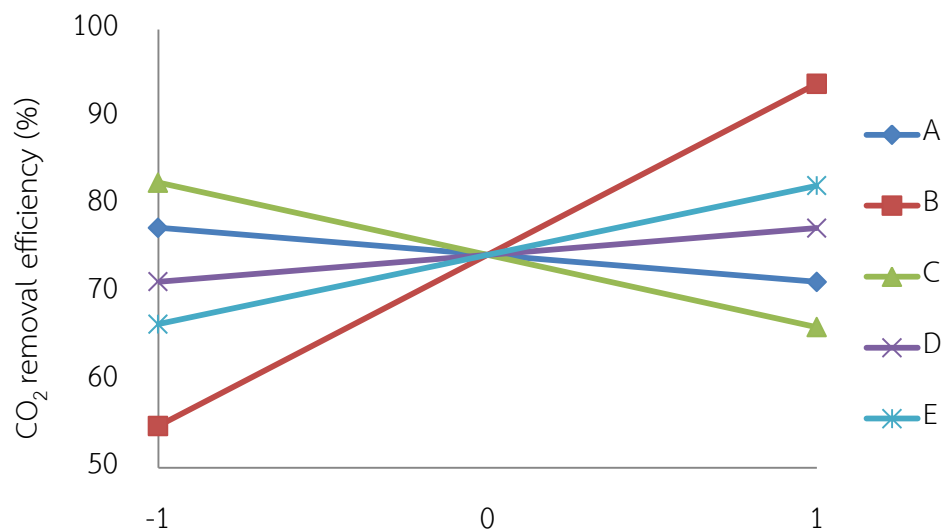
ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ยะที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงดังรูปที่ 4.1 เช่นเดียวกับค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกที่จะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ยะเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.2 เนื่องจากปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ภายในสารละลายดูดซึม ( $\text{CO}_2$  loading on rich solvent) มีค่าน้อยและสารละลายดูดซึมมีปริมาณมากเกินไปทำให้ต้องใช้พลังงานความร้อนที่มากขึ้นในการอุ่นสารละลายดูดซึมให้มีอุณหภูมิมากพอเพื่อที่จะแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากสารละลายดูดซึมที่หอแยก อย่างไรก็ตาม ในระดับอุตสาหกรรม ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ยะเป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมในกระบวนการได้ (Non manipulated variable) เนื่องจากขึ้นอยู่กับแต่ละรูปแบบอุตสาหกรรมและกระบวนการเผาไหม้ที่ทำให้เกิดแก๊สเปรี๊ยะขึ้น

#### 4.2.2.4 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลาย

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 เมื่อความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลายที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น และค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกลดลง เนื่องจากเมื่อปริมาณความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลายเพิ่มมากขึ้น ปริมาณคาร์บอเนต ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) อิสระในระบบจะมากขึ้นและทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้นในขณะที่มวลสารละลายในระบบเท่าเดิม ทำให้พลังงานจำเพาะต่อมวลที่ใส่เข้าไปเพื่อใช้ในการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง ซึ่งการเพิ่มความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลายส่งผลดีต่อกระบวนการอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มความเข้มข้นที่มากเกินไปทำให้เกิดการตกตะกอนของโพแทสเซียมคาร์บอเนตและอาจนำไปสู่การอุดตันภายในระบบโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่หอดูดซึมทำให้เกิดการท่วม (Flooding) ของสารละลายได้ [7]

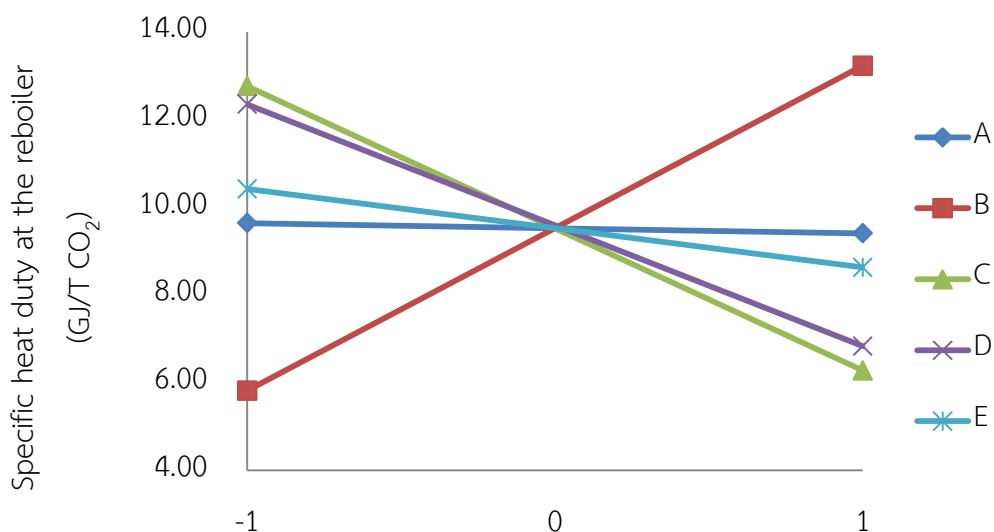
#### 4.2.2.5 ความดันของหอดูดซึม

การเพิ่มความดันที่หอดูดซึมนั้นทำให้ค่าประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.1 และด้วยเหตุผลนี้เอง ทำให้ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมในสารละลายเพิ่มมากขึ้นในขณะที่ใช้ปริมาณสารละลายเท่าเดิม ค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกจึงลดลง อย่างไรก็ตาม หากกระบวนการมีประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงอยู่แล้ว เช่นใกล้เคียงกับร้อยละ 100 การเพิ่มความดันของหอดูดซึมทำให้สิ้นเปลืองพลังงานเนื่องจากต้องใช้พลังงานเพิ่มในการอัดแก๊สให้มีความดันสูงแต่ประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยหรือไม่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.1 การวิเคราะห์อิทธิพลหลักต่อค่าประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์





รูปที่ 4.2 การวิเคราะห์อิทธิพลหลักต่อค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยก

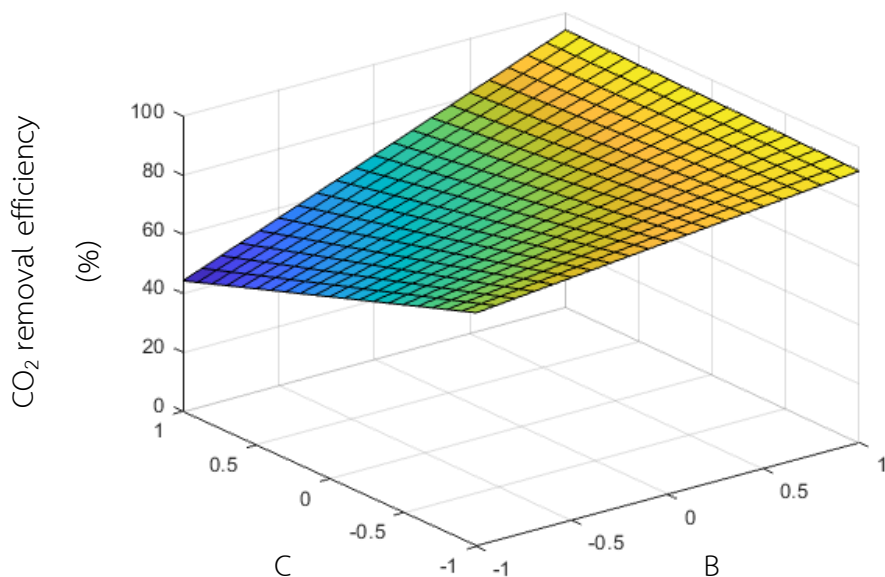
#### 4.2.3 พื้นผิวตอบสนอง

จากการวิเคราะห์อิทธิพลหลักพบว่าอัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (ตัวแปร B) ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ว (ตัวแปร C) ส่งผลต่อการตอบสนองอย่างตรงข้ามกันกล่าวคือเมื่ออัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึมเพิ่มมากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้นแต่มีค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกที่สูงขึ้นด้วย ในขณะที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ว (ตัวแปร C) ที่เพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง และช่วยลดค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกที่สูงขึ้นด้วย และตัวแปรทั้งสองนั้นเป็นอิทธิพลหลักสองอันดับแรกที่ส่งผลต่อการตอบสนองทั้งสองมากที่สุด อีกทั้งจากการวิเคราะห์อิทธิพลหลัก พบว่าอุณหภูมิของสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (ตัวแปร A) ควรมีค่าที่ระดับกลาง ความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลาย (ตัวแปร D) ควรมีค่าที่ระดับสูง และความดันของหอดูดซึม (ตัวแปร E) ควรมีค่าที่ระดับสูง เพื่อให้มีประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงและมีค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกที่สูงต่ำ ดังนั้นในการหาพื้นผิวตอบสนองจึงพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าระดับของอัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่

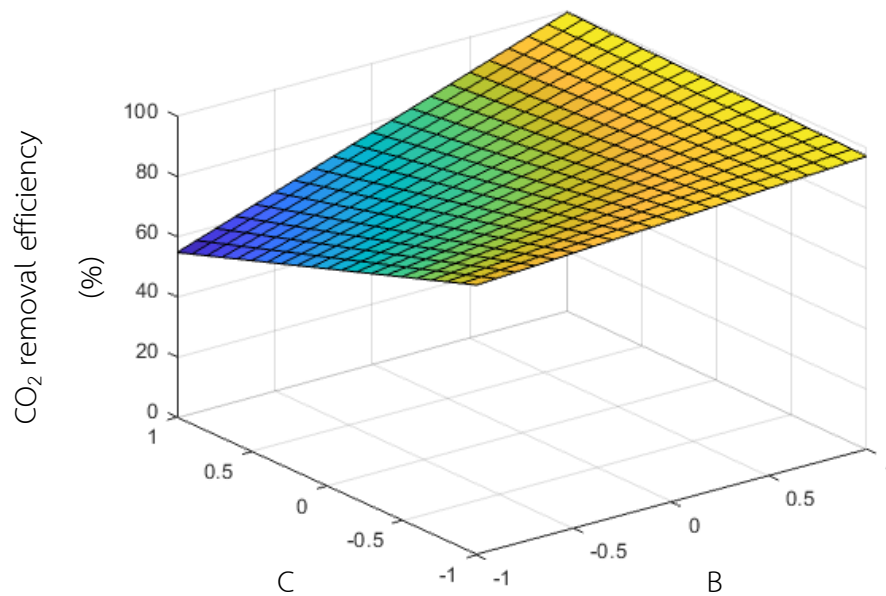
ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดูดซึม (ตัวแปร B) ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ยว (ตัวแปร C) และคงค่าอุณหภูมิของสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดูดซึม (ตัวแปร A) ที่ระดับกลาง ความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลาย (ตัวแปร D) ที่ระดับสูง และความดันของหอดูดูดซึม (ตัวแปร E) ที่ระดับสูง แต่เนื่องจากในกรณีของพื้นผิวตอบสนองของประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ความดันของหอดูดูดซึม (ตัวแปร E) มีการส่งผลต่อประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใกล้เคียงกับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ยว (ตัวแปร C) จึงทำการเปลี่ยนแปลงค่าระดับเพื่อศึกษาผลการตอบสนองต่อประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เช่นกัน

#### 4.2.3.1 พื้นผิวตอบสนองของประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

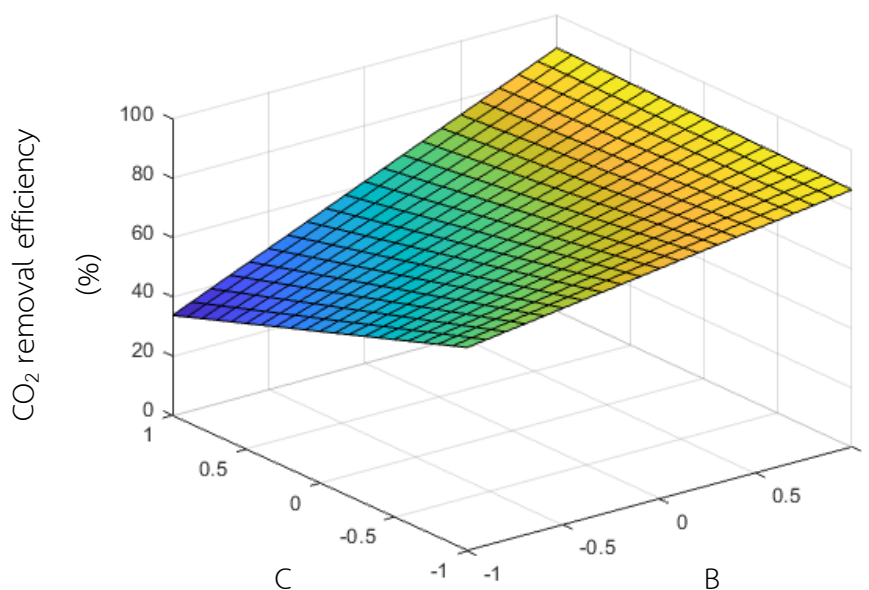
จากการวิเคราะห์อิทธิพลหลักสองอันดับแรกที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุดจากตารางที่ 4.3 พบว่าอัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดูดซึม (ตัวแปร B) ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ยว (ตัวแปร C) เมื่ออัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดูดซึมและความดันของหอดูดูดซึมเพิ่มมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้นดังแสดงในรูปแบบของพื้นผิวตอบสนอง (Response surface) ในรูปที่ 4.3 เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุดต้องทำการเพิ่มอัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดูดซึม และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ยว ที่ค่าระดับสูง (High level, 1) ของทั้งสองอิทธิพลหลัก จากตารางที่ 4.3 พบว่าอิทธิพลหลัก E หรือความดันของหอดูดูดซึมส่งผลต่อประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ใกล้เคียงกับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ยว และเมื่อความดันของหอดูดูดซึมมีค่าที่ระดับสูงจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น และเมื่อความดันของหอดูดูดซึมมีค่าที่ระดับต่ำทำให้ประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5



รูปที่ 4.3 พื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (ตัวแปร B) และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ยว (ตัวแปร C) ต่อประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่ออุณหภูมิของสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (ตัวแปร A) มีค่าที่ระดับกลาง ความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลาย (ตัวแปร D) มีค่าที่ระดับสูง และความดันของหอดูดซึม (ตัวแปร E) มีค่าที่ระดับกลาง



รูปที่ 4.4 พื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (ตัวแปร B) และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ยะว (ตัวแปร C) ต่อประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่ออุณหภูมิของสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (ตัวแปร A) มีค่าที่ระดับกลาง ความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลาย (ตัวแปร D) มีค่าที่ระดับสูง และความดันของหอดูดซึม (ตัวแปร E) มีค่าที่ระดับสูง

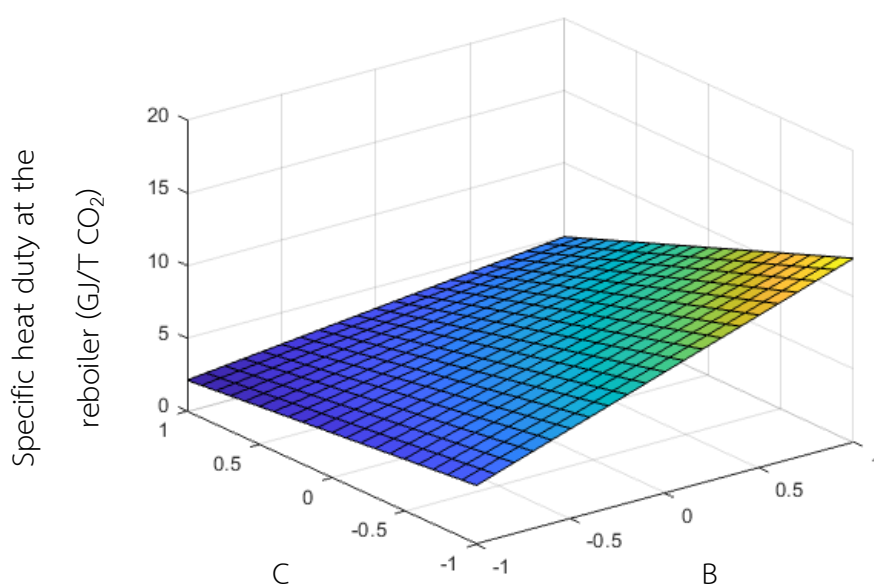


รูปที่ 4.5 พื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (ตัวแปร B) และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ว (ตัวแปร C) ต่อประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เมื่ออุณหภูมิของสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (ตัวแปร A) มีค่าที่ระดับกลาง ความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลาย (ตัวแปร D) มีค่าที่ระดับสูง และความดันของหอดูดซึม (ตัวแปร E) มีค่าที่ระดับต่ำ

#### 4.2.3.2 พื้นผิวตอบสนองของค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยก

จากตารางที่ 4.4 อิทธิพลหลักสองอันดับแรกที่ส่งผลต่อค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกคืออัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (ตัวแปร B) และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ว (ตัวแปร C) เมื่อทำการสร้างพื้นผิวตอบสนองของอิทธิพลหลักทั้งสองต่อค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกพบว่าค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกจะมีค่าต่ำที่สุดเมื่อความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊วมีค่าที่ระดับสูง (High level, 1) และอัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึมที่ระดับต่ำ (Low level, -1) แต่อย่างไรก็ตาม อัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึมที่ระดับต่ำนี้

อาจส่งผลให้ประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง หากทำการพิจารณาค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกที่ค่าระดับสูงของความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ว พบว่า การเปลี่ยนแปลงค่าระดับของอัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึมส่งผลต่อค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกน้อยมากกล่าวคืออยู่ในช่วงประมาณ 2-5 GJ/T CO<sub>2</sub> ซึ่งเป็นช่วงที่แคบกว่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊วที่ระดับต่ำ (Low level, -1) ที่อยู่ในช่วงประมาณ 3-12 GJ/T CO<sub>2</sub> ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 พื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (ตัวแปร B) และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ว (ตัวแปร C) ต่อค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยก เมื่ออุณหภูมิของสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (ตัวแปร A) มีค่าที่ระดับกลาง ความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลาย (ตัวแปร D) มีค่าที่ระดับสูง และความดันของหอดูดซึม (ตัวแปร E) มีค่าที่ระดับสูง

#### 4.3 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต

จากการวิเคราะห์ตารางที่ 4.3 และ 4.4 และรูปที่ 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 และ 4.6 พบว่าอิทธิพลหลักที่ส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยก คือ อัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (ตัวแปร B) ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ว (ตัวแปร C) ความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลาย (ตัวแปร D) และความดันของหอดูดซึม (ตัวแปร E) ในขณะที่อุณหภูมิของสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (ตัวแปร A) ส่งผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้นต่อค่าประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจะพิจารณาจากเงื่อนไขที่กล่าวในหัวข้อ 3.3 คือ

- 1) กระบวนการมีค่าประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่าร้อยละ 85 หรือใกล้เคียง
- 2) ค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกต้องต่ำกว่าสถานการณ์พื้นฐานหรือใกล้เคียงกับค่าจากกระบวนการทั่วไปที่ 4 GJ/Ton CO<sub>2</sub>
- 3) พลังงานจำเพาะต่อมวลของทั้งระบบมีค่าต่ำกว่าผลที่ได้จากการจำลองจากการทดลองจริงของ Notz และคณะ และสถานการณ์พื้นฐาน
- 4) ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่อปี (Annual operating cost) ภายใต้เงื่อนไขและขอบเขตที่สำหรับการเปรียบเทียบในงานวิจัยนี้ที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.7

เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดคือสถานการณ์ที่มีประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่าร้อยละ 85 และมีพลังงานจำเพาะต่อมวลของทั้งระบบมีค่าที่ต่ำ อุณหภูมิของสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (ตัวแปร A) อัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (ตัวแปร B) และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ว (ตัวแปร C) ควรมีค่าที่ระดับกลาง (Middle level, 0) ความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลาย (ตัวแปร D) และความดันของหอดูดซึม (ตัวแปร E) ควรมีค่าที่ระดับสูง ซึ่งในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดนั้น จะทำการปรับค่าจากสถานการณ์พื้นฐาน (Base case) ในตารางที่ 3.6 โดยใช้ค่าที่ระดับสูง (High level) หรือค่าที่ระดับต่ำ (Low level) ของตัวแปรทั้ง 5 ตัวแปรตามที่ได้ทำการวิเคราะห์ผลของอิทธิพลหลักและอิทธิพลอันตรกิริยาของตัวแปร ซึ่งสถานการณ์ทั้งหมดที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียม

คาร์บอนไดออกไซด์แสดงในตารางที่ 4.5 โดยใช้ค่าอุณหภูมิของสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (ตัวแปร A) ที่ค่าที่ระดับกลางแทนที่ระดับกลางซึ่งเท่ากับ 75 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลาย (ตัวแปร D) ที่ค่าที่ระดับสูงซึ่งเท่ากับร้อยละ 40 และความดันของหอดูดซึม (ตัวแปร E) ค่าที่ระดับสูงซึ่งเท่ากับ 10 บาร์ จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงค่าของอัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (ตัวแปร B) ในช่วงค่าที่ระดับต่ำถึงค่าที่ระดับกลางซึ่งคือ 2 4 และ 6 เนื่องจากในช่วงที่ค่าระดับต่ำถึงกลางนั้นระบบจะใช้พลังงานต่อมวลที่ต่ำกว่าช่วงค่าที่ระดับกลางถึงสูง และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ว (ตัวแปร C) ช่วงระดับต่ำ ระดับค่ากลางและระดับสูงซึ่ง คือ ความเข้มข้นร้อยละ 10 20 และ 30 เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากตัวแปรทั้งสองส่งผลต่อประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกในทางตรงข้ามกันอีกทั้งเป็นอิทธิพลหลัก 2 ลำดับแรกที่ส่งผลต่อผลตอบแทนมากกว่าตัวแปรอื่นๆ โดยผลการทดลองปริมาณการใช้สารเริ่มต้น และ พลังงานในกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต และ สารละลายโมโนเอทานอลามีนจากงานวิจัยของ Notz และคณะ [15] (สัญลักษณ์ MEA Notz) จากแบบจำลองภายในโปรแกรมได้ถูกแสดงในตารางที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ โดยค่าจากผลการจำลองดังกล่าวจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต และเปรียบเทียบกับกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโมโนเอทานอลามีนจากงานวิจัยของ Notz และคณะ [15] ที่จำลองขึ้นจากแบบจำลองเดียวกัน

#### 4.3.1 พลังงานจำเพาะต่อมวลของทั้งระบบ

ค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลของทั้งระบบที่แสดงในตารางที่ 4.6 คือผลรวมของพลังงานจำเพาะต่อมวลของค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลพลังงานไฟฟ้ารวมในระบบ (Total specific electric energy) ค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลพลังงานที่ใช้ในระบบความเย็น (Specific refrigerant energy) และค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลพลังงานที่ใช้ในระบบน้ำหล่อเย็น (Specific cooling water energy) ดังแสดงในสมการที่ 4.1 ซึ่งในการพิจารณาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต จะพิจารณาจากระบบที่มีค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลของทั้งระบบที่ต่ำเนื่องจากค่าพลังงานที่ต่ำนั้นจะส่งผลต่อราคาต้นทุนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์



พลังงานจำเพาะต่อมวลของทั้งระบบ =

$$\begin{aligned} & \text{พลังงานจำเพาะต่อมวลของพลังงานไฟฟ้ารวมในระบบ} + \\ & \text{พลังงานจำเพาะต่อมวลที่ใช้ในระบบความเย็น} + \\ & \text{พลังงานจำเพาะต่อมวลที่ใช้ในระบบน้ำหล่อเย็น} \end{aligned} \quad (4.1)$$

#### 4.3.1.1 พลังงานจำเพาะต่อมวลของพลังงานไฟฟ้ารวมในระบบ

พลังงานจำเพาะต่อมวลของพลังงานไฟฟ้ารวมในระบบ (Total specific electric energy) เป็นผลรวมของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบทั้งหมดต่อมวลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดักจับได้ โดยพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในแบบจำลองนั้นจะถูกคิดจากอุปกรณ์หลักเพียงอย่างเดียวได้แก่ เครื่องทำความร้อนของหอแยก (Stripper Reboiler) เครื่องสูบของเหลว (Pump) และเครื่องอัดความดันแก๊ส (Compressor)

#### 4.3.1.2 พลังงานจำเพาะต่อมวลที่ใช้ในระบบความเย็น

พลังงานจำเพาะต่อมวลที่ใช้ในระบบความเย็น (Specific refrigerant energy) เป็นการคิดพลังงานที่ใช้ในการควบแน่นของเหลวจากแก๊สขาออกจากหอแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากสารละลายที่เครื่องควบแน่น (Condenser) ต่อมวลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดักจับได้

#### 4.3.1.3 พลังงานจำเพาะต่อมวลที่ใช้ในระบบน้ำหล่อเย็น

พลังงานจำเพาะต่อมวลที่ใช้ในระบบน้ำหล่อเย็น (Specific cooling water energy) ได้แก่พลังงานที่ใช้ในการลดอุณหภูมิของแก๊สและสารละลายก่อนเข้ากลับสู่หอดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

#### 4.3.2 ปริมาณการใช้สารเริ่มต้นในกระบวนการดักจับดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย

สารเริ่มต้นที่สำคัญซึ่งได้แก่โมโนเอทานอลามีน (Monoethanolamine) โพแทสเซียมคาร์บอเนต (Potassium carbonate) และน้ำปราศจากแร่ธาตุ (Demineralized water) จากผลจำลองจากการทดลองของ Notz และคณะ [15] และการสร้างแบบจำลองภายในงานวิจัยนี้ จะถูกนำมาใช้ในการคำนวณราคาต้นทุนการผลิตเช่นเดียวกับพลังงานที่ใช้ในกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.7



ตารางที่ 4.5 ค่าสำหรับการสร้างแบบจำลองในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต

สถานการณ์	อุณหภูมิของ สารละลาย โพแทสเซียม คาร์บอเนตที่ถูก ป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (องศาเซลเซียส)	อัตราส่วนการไหล ของสารละลายต่อ แก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่ หอดูดซึม (มวลของ สารละลาย/มวล ของแก๊ส)	ความเข้มข้นของ คาร์บอนไดออกไซด์ ในแก๊สป้อน (%)	ความเข้มข้นของ โพแทสเซียม คาร์บอเนตใน สารละลาย (%)	ความดันของหอ ดูดซึม (บาร์)	อัตราส่วนโมล คาร์บอนไดออกไซด์ ต่อโพแทสเซียม คาร์บอเนต (mol CO <sub>2</sub> /mol K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )
Base case	75	6	20	30	5.5	0.20
33	50	6	20	30	5.5	0.20
34	75	10	20	30	5.5	0.20
35	75	6	10	30	5.5	0.20
36	75	6	20	40	5.5	0.20
37	75	6	20	30	10	0.20
38	75	2	10	40	10	0.2
39	75	2	10	40	10	0.26
40	75	2	20	40	10	0.2
41	75	2	20	40	10	0.26

ตารางที่ 4.5 (ต่อ) ค่าสำหรับการสร้างแบบจำลองในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายลาอูโพแทสเซียมคาร์บอเนต

สถานการณ์	อุณหภูมิของสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (องศาเซลเซียส)	อัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (มวลของสารละลาย/มวลของแก๊ส)	ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ยะว (%)	ความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลาย (%)	ความดันของหอดูดซึม (บาร์)	อัตราส่วนโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโพแทสเซียมคาร์บอเนต (mol CO <sub>2</sub> /mol K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )
42	75	2	30	40	10	0.2
43	75	2	30	40	10	0.26
44	75	4	10	40	10	0.2
45	75	4	10	40	10	0.26
46	75	4	20	40	10	0.2
47	75	4	20	40	10	0.26
48	75	4	30	40	10	0.2
49	75	4	30	40	10	0.26
50	75	6	10	40	10	0.2

ตารางที่ 4.5 (ต่อ) ค่าสำหรับการสร้างแบบจำลองในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต

สถานการณ์	อุณหภูมิของสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (องศาเซลเซียส)	อัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (มวลของสารละลาย/มวลของแก๊ส)	ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ยะว (%)	ความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลาย (%)	ความดันของหอดูดซึม (บาร์)	อัตราส่วนโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโพแทสเซียมคาร์บอเนต (mol CO <sub>2</sub> /mol K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )
51	75	6	10	40	10	0.26
52	75	6	20	40	10	0.2
53	75	6	20	40	10	0.26
54	75	6	30	40	10	0.2
55	75	6	30	40	10	0.26

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองจากสถานการณ์การตั้งราคาที่ 4.5 เพื่อให้ค่าที่เหมาะสมที่สุดในการคำนวณการตั้งราคาโดยที่ผู้ใช้ได้กำไรภายใต้ด้วยสารละลาย  
โพลีเอทิลีนคาร์บอเนต

สถานการณ์	ประสิทธิภาพการตั้ง จับแก๊ส	ค่าพลังงานจำเพาะ		ค่าพลังงาน ต่อมวลพลังงาน	ค่าพลังงานจำเพาะ		ค่าพลังงานจำเพาะ ต่อมวลของทั้ง ระบบ (GJ/T CO <sub>2</sub> )
		ต่อมวล	ต่อมวลพลังงาน		ต่อมวลพลังงานที่ ใช้ในระบบนำหล่อ เย็น	ต่อมวลพลังงานที่ ใช้ในระบบนำหล่อ เย็น	
	คาร์บอนไดออกไซด์ (%)	คาร์บอนไดออกไซด์ ที่เครื่องทำความ ร้อนของหอแยก (GJ/T CO <sub>2</sub> )	ไฟฟ้ารวมในระบบ (GJ/T CO <sub>2</sub> )	เฉพาะต่อมวลที่ ใช้ในระบบความ เย็น (GJ/T CO <sub>2</sub> )	เฉพาะต่อมวลที่ ใช้ในระบบนำหล่อ เย็น (GJ/T CO <sub>2</sub> )	เฉพาะต่อมวลที่ ใช้ในระบบนำหล่อ เย็น (GJ/T CO <sub>2</sub> )	
MEA	73.35	4.78	4.78	1.71	2.93	9.41	
Base case	98.91	6.88	7.62	5.03	2.80	15.44	
33	99.64	7.14	7.88	4.41	3.88	16.17	
34	98.92	10.03	11.27	7.31	4.44	23.03	
35	97.55	11.75	13.26	8.35	5.18	26.79	
36	98.41	5.18	5.93	3.36	2.70	11.99	
37	99.47	6.76	7.94	4.94	3.20	16.07	
38	93.36	4.11	4.95	2.25	2.06	9.26	
39	83.62	3.27	4.20	1.13	2.28	7.61	
40	66.98	3.12	3.70	1.48	1.45	6.63	

ตารางที่ 4.6 (ต่อ) ผลการทดลองจากสถานการณ์จากตารางที่ 4.5 เพื่อให้หาค่าที่เหมาะสมที่สุดได้ในกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย  
โพแทสเซียมคาร์บอเนต

สถานการณ์	ประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (%)	ค่าพลังงานจำเพาะ		ค่าพลังงานจำเพาะ		ค่าพลังงานจำเพาะ		ค่าพลังงานจำเพาะ	
		ต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยก (GJ/T CO <sub>2</sub> )	ต่อมวลพลังงานไฟฟ้ารวมในระบบ (GJ/T CO <sub>2</sub> )	ต่อมวลพลังงานจำเพาะต่อมวลที่จำเป็นในระบบความเย็น (GJ/T CO <sub>2</sub> )	ต่อมวลพลังงานจำเพาะต่อมวลพลังงานที่จำเป็นในระบบนำหล่อเย็น (GJ/T CO <sub>2</sub> )	ต่อมวลพลังงานจำเพาะต่อมวลพลังงานที่จำเป็นในระบบนำหล่อเย็น (GJ/T CO <sub>2</sub> )	ต่อมวลพลังงานจำเพาะต่อมวลของทั้งระบบ (GJ/T CO <sub>2</sub> )		
41	63.57	2.41	3.03	0.73	1.60	5.35			
42	53.94	2.66	3.14	1.19	1.23	5.56			
43	53.79	2.31	2.79	0.86	1.28	4.93			
44	98.29	6.52	8.11	4.20	3.88	16.19			
45	96.84	4.54	6.17	2.00	4.08	12.25			
46	95.93	3.73	4.52	2.30	2.22	9.04			
47	93.72	2.76	3.58	1.12	2.27	6.97			
48	93.45	2.80	3.36	1.63	1.59	6.58			
49	87.04	2.17	2.77	0.84	1.73	5.34			

ตารางที่ 4.6 (ต่อ) ผลการทดลองจากสถานการณ์จากตารางที่ 4.5 เพื่อให้หาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการรวบรวมการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต

สถานการณ์	ประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (%)	ค่าพลังงานจำเพาะ		ค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลพลังงานไฟฟ้ารวมในระบบ (GJ/T CO <sub>2</sub> )		ค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลพลังงานที่ใช้ในระบบนำหลอเย็น (GJ/T CO <sub>2</sub> )	
		ค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของท่อแยก (GJ/T CO <sub>2</sub> )	ค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลพลังงานไฟฟ้ารวมในระบบ (GJ/T CO <sub>2</sub> )	ค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลพลังงานที่ใช้ในระบบนำหลอเย็น (GJ/T CO <sub>2</sub> )	ค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลพลังงานที่ใช้ในระบบนำหลอเย็น (GJ/T CO <sub>2</sub> )		
50	99.73	8.75	11.12	5.70	5.58	22.40	
51	99.42	6.00	8.36	2.69	5.72	16.78	
52	99.63	5.15	6.33	3.35	3.07	12.75	
53	99.60	3.57	4.75	1.62	3.19	9.57	
54	99.61	3.69	4.47	2.34	2.22	9.02	
55	99.40	2.60	3.38	1.18	2.26	6.82	



ตารางที่ 4.7 ปริมาณการใช้สารเริ่มต้นและพลังงานในกระบวนการตกจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายไอพอสเฟอไรต์แบบจำลอง

สถานการณ์	ปริมาณสารเริ่มต้น (โมโนเอทานอลามีน หรือ โฟสเฟอไรต์)	ปริมาณน้ำปราศจาก แร่ธาตุเริ่มต้น (kg)	กำลังไฟฟ้ารวม (W)	กำลังที่ใช้ระบบ สารหล่อเย็น (W)	กำลังที่ใช้ระบบน้ำ หล่อเย็น (W)	ปริมาณน้ำในระบบ นำหล่อเย็น (kg/h)
MEA Notz	55	145	6183.00	2212	3789.79	215.64
Base case	58	142	14096.99	9297	5169.93	294.16
33	60	140	14378.17	8039	7071.93	402.39
34	60	140	12400.99	8047	4887.93	234.48
35	60	140	11965.99	7533	4672.93	225.30
36	80	120	10828.99	6128	4920.93	235.89
37	60	140	14664.25	9122	5907.00	287.33
38	80	120	12787.25	5818	5321.00	262.32
39	80	120	9745.25	2626	5296.00	261.25
40	80	120	13760.25	5520	5377.00	264.71
41	80	120	10681.25	2574	5630.00	275.50

ตารางที่ 4.7 (ต่อ) ปริมาณการใช้สารเริ่มต้นและพลังงานในกระบวนการตากกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายไฮโปคลอไรต์ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์จากแบบจำลอง

สถานการณ์	ปริมาณสารเริ่มต้น (โมโนเอทานอลามีน หรือ โปแทสเซียม คาร์บอเนต) (kg)	ปริมาณน้ำปราศจาก แร่ธาตุเริ่มต้น (kg)	กำลังไฟรวม (W)	กำลังที่ใช้ระบบ สารละลายเย็น (W)	กำลังที่ใช้ระบบน้ำ หล่อเย็น (W)	ปริมาณน้ำในระบบ นำหล่อเย็น (kg/h)
42	80	120	14044.25	5318	5497.00	269.83
43	80	120	12571.25	3857	5757.00	280.92
44	80	120	11030.25	5713	5279.00	260.53
45	80	120	8209.25	2657	5435.00	267.18
46	80	120	12405.25	6332	6089.00	295.09
47	80	120	9517.25	2990	6029.00	292.53
48	80	120	13063.25	6352	6167.00	298.42
49	80	120	10017.25	3025	6259.00	302.35
50	80	120	10170.25	5216	5099.00	252.84
51	80	120	7650.25	2466	5237.00	258.73

ตารางที่ 4.7 (ต่อ) ปริมาณการใช้สารเริ่มต้นและพลังงานในกระบวนการสกัดกั้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายไอพอสเฟอไรต์คาร์บอนเนตจากแบบจำลอง

สถานการณ์	ปริมาณสารเริ่มต้น (โมโนเอทาโนลามีน หรือ โฟสเฟอไรต์ คาร์บอนเนต) (kg)	ปริมาณน้ำปราศจาก แร่ธาตุเริ่มต้น (kg)	กำลังไฟฟ้ารวม (W)	กำลังที่ใช้ระบบ สารหล่อเย็น (W)	กำลังที่ใช้ระบบน้ำ หล่อเย็น (W)	ปริมาณน้ำในระบบ นำหล่อเย็น (kg/h)
52	80	120	11622.25	6161	5640.00	275.93
53	80	120	8699.25	2973	5830.00	284.04
54	80	120	12378.25	6466	6132.00	296.93
55	80	120	9333.25	3257	6238.00	301.45

#### 4.3.3 ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของกระบวนการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปี

ในการหาค่าเหมาะที่สุดนอกจากประสิทธิภาพในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แล้ว ราคาต้นทุนการดำเนินการนั้นเป็นอีกส่วนที่สำคัญ โดยราคาต้นทุนของสารเริ่มต้นและพลังงานได้แสดงในตารางที่ 4.8 จะถูกนำมาใช้ในการคำนวณค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของกระบวนการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปี (Annual operating cost) ในหน่วย ดอลลาร์สหรัฐต่อตันของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดักจับได้ (USD/T CO<sub>2</sub>) ร่วมกับปริมาณสารเริ่มต้นและพลังงานที่ใช้ในกระบวนการจากตารางที่ 4.7 โดยใช้สมการ 2.24 และ 4.1 ซึ่งผลการคำนวณค่าใช้จ่ายต่อปีและข้อมูลที่จะถูกนำมาใช้ในการพิจารณาตามเงื่อนไขที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3 ได้ถูกแสดงในตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.7 4.8 และ 4.9

ตารางที่ 4.8 ราคาต้นทุนของสารเริ่มต้น

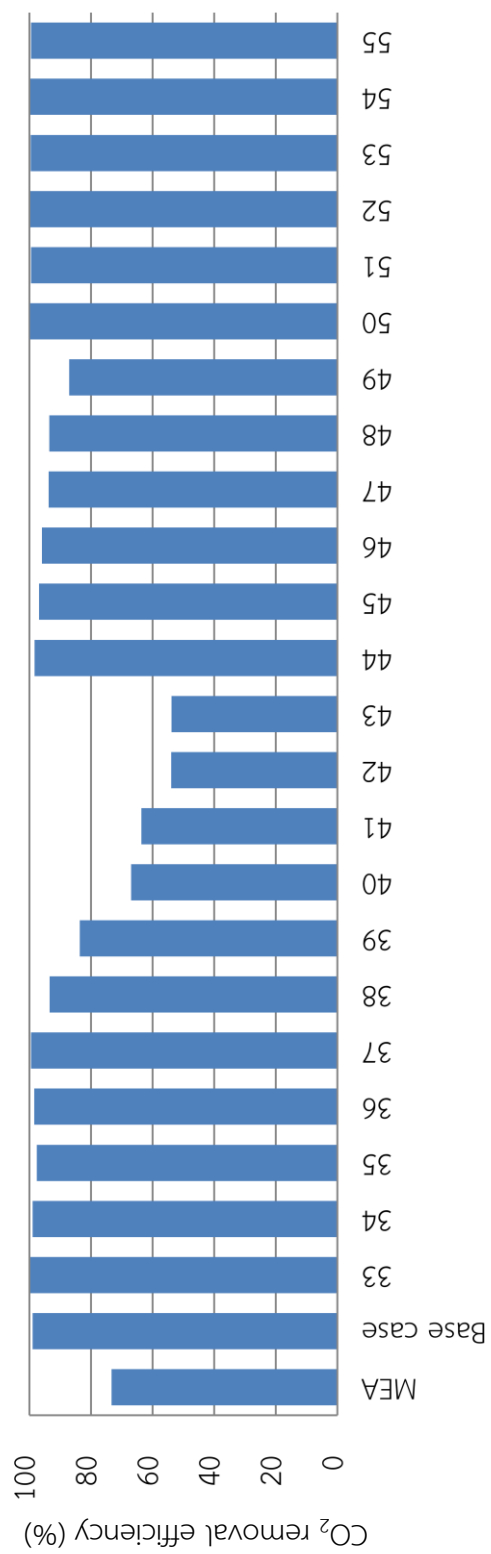
รายการ	ราคาต่อหน่วย
โมโนเอทานอลามีน [37]	2200 USD/Ton
โพแทสเซียมคาร์บอเนต [38]	1300 USD/Ton
น้ำปราศจากแร่ธาตุ [37]	1.13 USD/Ton
น้ำหล่อเย็น [37]	0.013 USD/Ton
พลังงานไฟฟ้า [37]	13.28 USD/GJ
สารหล่อเย็น [39]	4.43 USD/GJ

ตารางที่ 4.9 ข้อมูลที่ใช้ในการพิจารณาค่าเหมาะที่สุดของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต

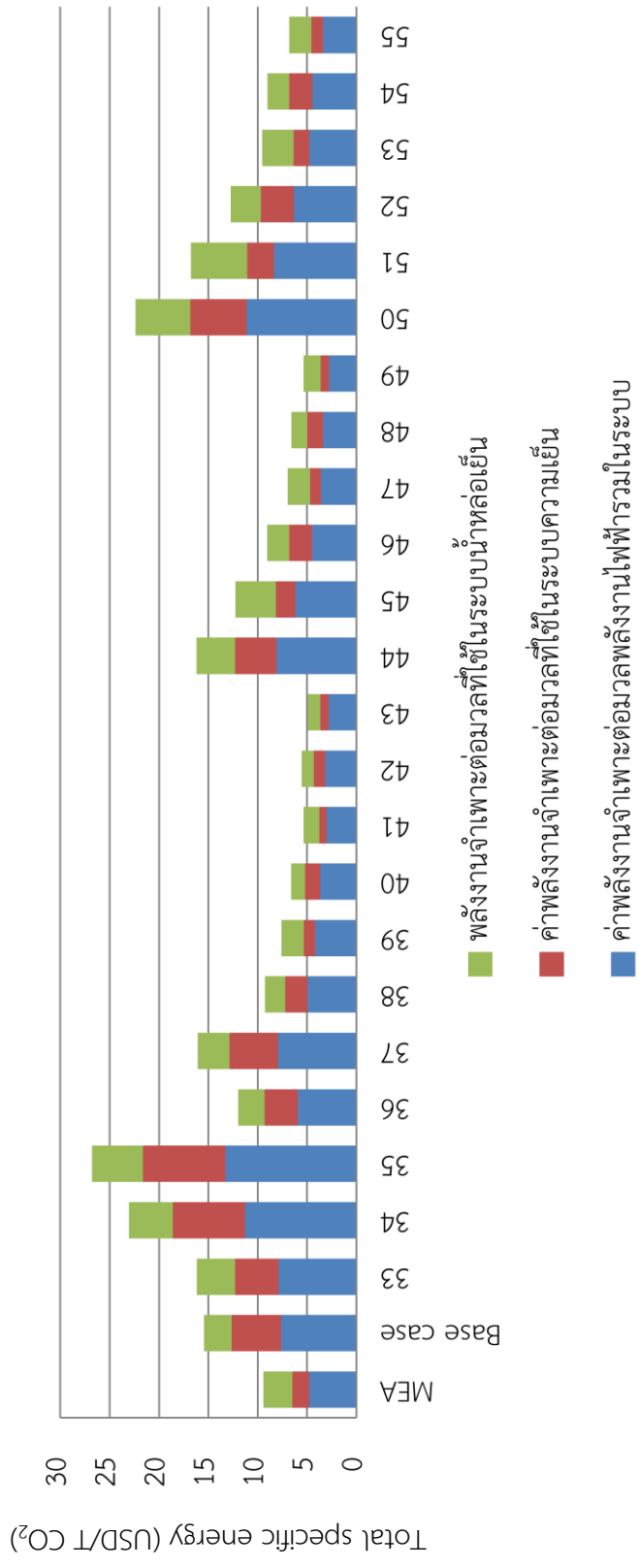
สถานการณ์	ประสิทธิภาพการ ดักจับแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ (%)	ค่าพลังงานจำเพาะ ต่อมวล คาร์บอนไดออกไซด์ที่ เครื่องทำความร้อน ของหอแยก (GJ/T CO <sub>2</sub> )	ค่าพลังงาน จำเพาะต่อ มวลของทั้ง ระบบ (GJ/T CO <sub>2</sub> )	ค่าใช้จ่ายในการใน การดำเนินการของ กระบวนการกำจัด แก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ ต่อปี (USD/T CO <sub>2</sub> )
MEA Notz	73.35	4.78	9.41	107.50
Base case	98.91	6.88	15.44	172.61
33	99.64	7.14	16.17	174.04
34	98.92	10.03	23.03	254.92
35	97.55	11.75	26.79	298.49
36	98.41	5.18	11.99	132.11
37	99.47	6.76	16.07	177.84
38	93.36	4.11	9.26	106.50
39	83.62	3.27	7.61	86.18
40	66.98	3.12	6.63	78.30
41	63.57	2.41	5.35	61.50
42	53.94	2.66	5.56	66.02
43	53.79	2.31	4.93	57.58
44	98.29	6.52	16.19	178.18
45	96.84	4.54	12.25	129.39
46	95.93	3.73	9.04	98.82
47	93.72	2.76	6.97	74.54
48	93.45	2.80	6.58	72.94
49	87.04	2.17	5.34	57.50
50	99.73	8.75	22.40	244.48

ตารางที่ 4.9 (ต่อ) ข้อมูลที่ใช้ในการพิจารณาค่าเหมาะที่สุดของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต

สถานการณ์	ประสิทธิภาพการ ดักจับแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ (%)	ค่าพลังงานจำเพาะ ต่อมวล คาร์บอนไดออกไซด์ที่ เครื่องทำความร้อน ของหอแยก (GJ/T CO <sub>2</sub> )	ค่าพลังงาน จำเพาะต่อ มวลของทั้ง ระบบ (GJ/T CO <sub>2</sub> )	ค่าใช้จ่ายในการใน การดำเนินการของ กระบวนการกำจัด แก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ ต่อปี (USD/T CO <sub>2</sub> )
51	99.42	6.00	16.78	175.69
52	99.63	5.15	12.75	139.36
53	99.60	3.57	9.57	100.11
54	99.61	3.69	9.02	98.21
55	99.40	2.60	6.82	71.22

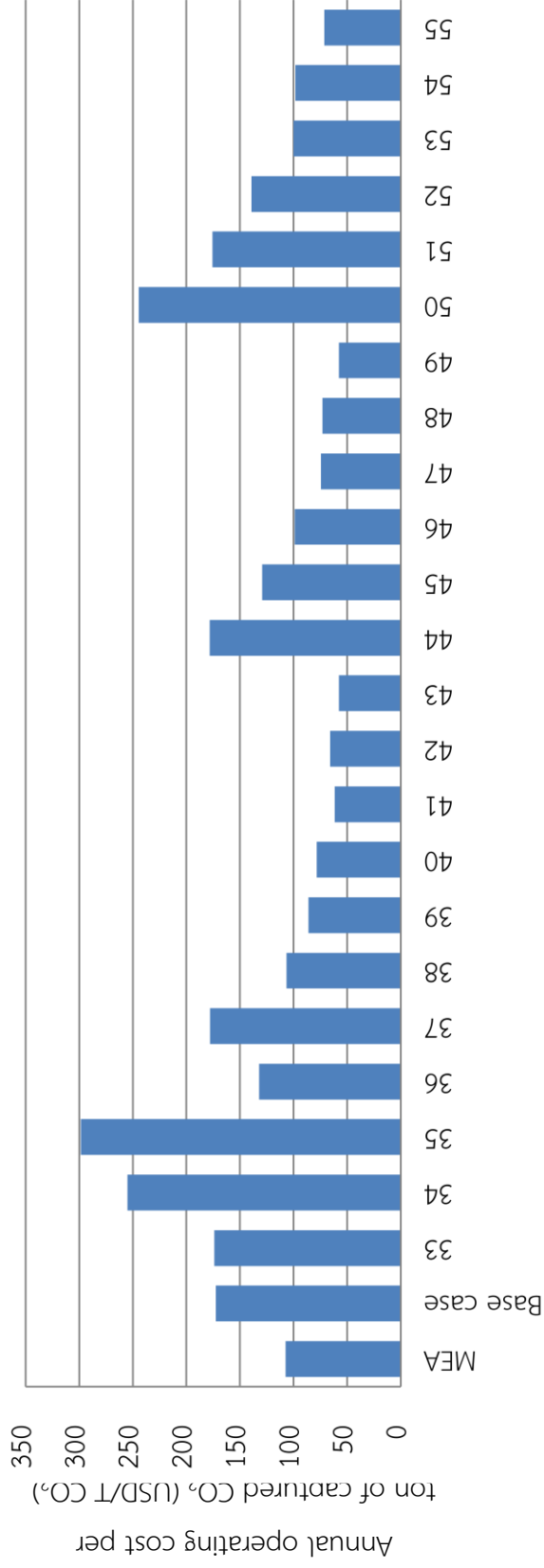


รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (%)



รูปที่ 4.8 ค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลของทั้งระบบ (GJ/T CO<sub>2</sub>)





รูปที่ 4.9 ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของกระบวนการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปี (USD/T CO<sub>2</sub>)

#### 4.3.4 ค่าเหมาะที่สุดของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต

การจากทดลองภายใต้การสร้างแบบจำลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรที่ศึกษาเพียงตัวใดตัวหนึ่งจากสถานการณ์พื้นฐาน (Base case) ในสถานการณ์ที่ 33 34 35 36 และ 37 ไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ดังแสดงในรูปที่ 4.5 เนื่องจากค่าตัวแปรที่ใช้ในสถานการณ์พื้นฐานมีความเหมาะสมสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตอยู่แล้ว แต่หากทำการพิจารณาค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลของทั้งระบบและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่อปีที่แสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7 พบว่าสถานการณ์ที่ 36 หรือสถานการณ์ที่ปรับให้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลายมีค่าเท่ากับร้อยละ 40 จะมีค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลของทั้งระบบและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่อปีเท่ากับ 11.99 GJ/T CO<sub>2</sub> และ 132.11 USD/T CO<sub>2</sub> ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าสถานการณ์พื้นฐานที่มีค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลของทั้งระบบและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่อปีเท่ากับ 15.44 GJ/T CO<sub>2</sub> และ 172.61 USD/T CO<sub>2</sub> ตามลำดับ ซึ่งตรงกับผลจากการศึกษาอิทธิพลหลัก กล่าวคือการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลายส่งผลให้ค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกลดลง

สถานการณ์ที่ 38 ถึง 55 เป็นสถานการณ์ที่ถูกเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรสองตัวแปรซึ่งคืออัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (ตัวแปร B) ในช่วงค่าที่ระดับต่ำถึงค่าที่ระดับกลางซึ่งคือ 2 4 และ 6 และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ยว (ตัวแปร C) ช่วงระดับต่ำ ระดับค่ากลางและระดับสูงซึ่งคือความเข้มข้นร้อยละ 10 20 และ 30 เพื่ออาศัยผลของอิทธิพลอันตรกิริยาของตัวแปรในการหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับกระบวนการ พบว่า สถานการณ์ที่ 50 ที่มีอัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึมเท่ากับ 6 และมีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ยวร้อยละ 10 และอัตราส่วนโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโพแทสเซียมคาร์บอเนต (mol CO<sub>2</sub>/mol K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) เท่ากับ 0.20 มีประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 99.73 ซึ่งมากกว่าข้อเสนอแนะของ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ที่ร้อยละ 85 [23] ตามเงื่อนไขที่กำหนดในหัวข้อ 3.3 แต่มีค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกเท่ากับ 8.75 GJ/T CO<sub>2</sub> ซึ่งสูงกว่าข้อเสนอแนะของ IPCC นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเชิงพลังงานและเศรษฐศาสตร์พบว่ามีการใช้ค่าพลังงานจำเพาะต่อ

มวลของทั้งระบบและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่อปีที่สูงซึ่งเท่ากับ 22.40 GJ/T CO<sub>2</sub> และ 244.48 USD/T CO<sub>2</sub> ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณสารละลายที่ใช้ในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หรืออัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซับมีปริมาณที่มากเกินไปทำให้ต้องสูญเสียพลังงานในการอุ่นสารละลายเพื่อแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมีปริมาณที่น้อยเนื่องจากความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ยวต่ำ

เมื่อพิจารณาสถานการณ์ที่ 49 ที่มีอัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซับเท่ากับ 4 และมีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ยวร้อยละ 30 และอัตราส่วนโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโพแทสเซียมคาร์บอเนต (mol CO<sub>2</sub>/mol K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) เท่ากับ 0.26 มีประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุดเท่ากับร้อยละ 87.04 ซึ่งสูงกว่าข้อเสนอแนะของ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ที่ร้อยละ 85 [23] และมีค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกเท่ากับ 2.17 GJ/T CO<sub>2</sub> ซึ่งดีกว่าข้อเสนอแนะของ IPCC อีกทั้งเมื่อพิจารณาเชิงพลังงานและเศรษฐศาสตร์พบว่าสถานการณ์ที่ 49 มีการใช้ค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลของทั้งระบบและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่อปีเท่ากับ 5.34 GJ/T CO<sub>2</sub> และ 57.50 USD/T CO<sub>2</sub> ตามลำดับ ซึ่งเป็นสถานการณ์ที่มีประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าร้อยละ 85 มีค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกและค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลทั้งระบบต่ำกว่าสถานการณ์พื้นฐานและการจำลองจากผลการทดลองจริงของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโมโนเอทานอลามีนของ Notz และคณะ [15] และมีค่าดำเนินการต่อปีต่ำที่สุดในสถานการณ์จำลองทั้งหมดในงานวิจัยนี้ ซึ่งตรงกับเงื่อนไขที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3 ทั้งหมด โดยสถานการณ์ที่ 49 เป็นสถานการณ์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตในแบบจำลองและงานวิจัยนี้

สำหรับสถานการณ์ที่ 48 ซึ่งเป็นสถานการณ์ที่มีสภาวะการดำเนินการเหมือนกับสถานการณ์ที่ 49 แต่มีอัตราส่วนโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโพแทสเซียมคาร์บอเนตเท่ากับ 0.20 เป็นสถานการณ์ที่มีประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 93.45 มีค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกเท่ากับ 2.80 GJ/T CO<sub>2</sub> และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่อปีเท่ากับ 72.94 USD/T CO<sub>2</sub> ถึงแม้ว่าสถานการณ์ที่ 48 จะมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่อปีที่สูงกว่าสถานการณ์ที่ 49 แต่มีค่าประสิทธิภาพที่มากกว่า ดังนั้นสถานการณ์ดังกล่าวอาจเป็นหนึ่งในตัวเลือกสำหรับกระบวนการที่มีความไม่สม่ำเสมอ เช่น ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ยวมีการ

เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เพื่อป้องกันความผันผวนของกระบวนการและให้ประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของกระบวนการนั้นมีค่ามากกว่าร้อยละ 85 ตามข้อแนะนำของ IPCC ตลอดการดำเนินการ

#### 4.3.5 เปรียบเทียบผลการจำลองของกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตกับสารละลายโมโนเอทานอลามีน

จากการสร้างแบบจำลองกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอทานอลามีนด้วยโปรแกรม Aspen Plus จากงานวิจัยของ Notz และคณะ [15] ด้วยระบบสมดุล (Equilibrium) แบบจำลองสมบัติเชิงอุณหพลศาสตร์ชนิด ENRTL-RK พบว่าประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเท่ากับร้อยละ 73.35 ค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกมีค่าเท่ากับ 4.78 GJ/T CO<sub>2</sub> พลังงานจำเพาะต่อมวลของทั้งระบบและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่อปีต่ำที่สุดในกลุ่มและมีค่าเท่ากับ 9.41 GJ/T CO<sub>2</sub> และ 107.50 USD/T CO<sub>2</sub> ตามลำดับ ในขณะที่สถานการณ์ 49 ที่ถูกจำลองด้วยโปรแกรม ระบบ และแบบจำลองสมบัติเชิงอุณหพลศาสตร์ชนิดเดียวกันเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตในงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเท่ากับร้อยละ 87.04 ค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกมีค่าเท่ากับ 2.17 GJ/T CO<sub>2</sub> พลังงานจำเพาะต่อมวลของทั้งระบบและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่อปีต่ำที่สุดในกลุ่มและมีค่าเท่ากับ 5.34 GJ/T CO<sub>2</sub> และ 57.50 USD/T CO<sub>2</sub> ตามลำดับ หากพิจารณาจากข้อมูลการทดลองจากแบบจำลองในงานวิจัยแล้วสามารถสรุปได้ว่ากระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่มีสถานะการดำเนินการที่ใช้ค่าเหมาะสมที่สุดจากการทดลองมีประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่าและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่อปีต่ำกว่ากระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอทานอลามีนที่จำลองด้วยโปรแกรม Aspen Plus จากงานวิจัยของ Notz และคณะ [15] ซึ่งทั้งสองสถานการณ์มีอัตราส่วนโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโพแทสเซียมคาร์บอเนตใกล้เคียงกันที่ประมาณ 0.26 เนื่องจากสถานการณ์ที่ 49 มีอัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึมเท่ากับ 4 และมีความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊วเท่ากับร้อยละ 30 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมกัน ทำให้ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากสารละลายดูดซึมที่หอแยกใกล้เคียงกับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมมาจึงไม่เกิดการสูญเสีย

พลังงานไปในการอุ่นสารละลายเพียงอย่างเดียว และความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลายที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 40 ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และช่วยลดค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยก [40, 41]

#### 4.4 แนวทางการดำเนินการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต

ในงานวิจัยนี้พบว่าตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกมากที่สุดคือ อัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (L/G) ซึ่งส่งผลตรงข้ามกับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ยะ ในขณะที่ความดันของหอดูดซึมจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลาย ซึ่งในทางกลับกัน ความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลายส่งผลต่อค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกมากกว่าความดันของหอดูดซึม และอุณหภูมิของสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึมส่งผลน้อยมากต่อผลลัพธ์ทั้งสอง แต่อย่างไรก็ตามหากอุณหภูมิของสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึมต่ำเกินไปจะทำให้สารละลายตกตะกอนและเกิดการอุดตันในอุปกรณ์และระบบ ซึ่งสำหรับแนวทางการดำเนินการ (Operating guideline) ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการทดลองนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) หากค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกมีค่าเริ่มสูงขึ้นในขณะที่ประสิทธิภาพในดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าใกล้เคียงร้อยละ 85 และไม่สามารถเพิ่มอัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (L/G) ได้อีกเนื่องจากข้อจำกัดของกระบวนการเช่น ขนาดของระบบท่อไม่เพียงพอในการเพิ่มอัตราการไหล หรืออุปกรณ์จ่ายของเหลวเช่นปั๊ม (Pump) มีขนาดไม่ใหญ่พอ ให้ทำการเพิ่มความดันที่หอดูดซึมขึ้นได้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยห้ามเพิ่มความดันให้สูงกว่าค่าความดันสูงสุดในการดำเนินการที่อุปกรณ์สามารถทนได้ (Maximum allowable working pressure, MAWP) และบันทึกค่าความดันที่ทำให้ประสิทธิภาพในดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่ามากกว่าร้อยละ 85 ไว้ในแนวทางการดำเนินการมาตรฐาน (Standard operating procedure, SOP) ได้เพื่อความสะดวกในการดำเนินการต่อไป

- 2) ให้เริ่มทำการปรับอัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (L/G) ให้มีความเหมาะสมกับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ยะซึ่งส่วนใหญ่ในกระบวนการอุตสาหกรรมจะเป็นค่าที่ไม่สามารถควบคุมจากการสั่งการโดยผู้ควบคุมได้ก่อน โดยพิจารณาประสิทธิภาพในดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นหลัก หากค่าประสิทธิภาพในดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่ามากกว่าร้อยละ 85 แล้วสามารถลดอัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (L/G) ลงเพื่อลดค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยก โดยจากการทดลอง อัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (L/G) ที่เหมาะสมกับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ยะที่ร้อยละ 10 และ 30 คือ 2 และ 4 ตามลำดับ สำหรับกรณีที่มีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ยะที่ร้อยละ 20 นั้นค่า อัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (L/G) ควรมีค่าระหว่าง 2 และ 4
- 3) การใช้กระบวนการที่มีความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลายสูงประมาณร้อยละ 40 จะทำให้กระบวนการมีค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกมีค่าต่ำกว่ากระบวนการที่มีความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลายต่ำกว่า แต่ควรเลือกใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลายให้เหมาะสมกับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ยะเนื่องจากการสิ้นเปลืองสารตั้งต้น
- 4) อุณหภูมิของสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึมควรมีค่าที่ไม่ต่ำจนเกินไป เช่น ต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส สำหรับของสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 40 [4, 32] เพราะอาจเกิดการตกตะกอน และในกระบวนการที่ใช้สารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้นสูง ควรควบคุมอุณหภูมิให้ใกล้เคียงกับสารละลายที่ผ่านการปรับปรุงหลังจากออกจากหอแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากสารละลายเพื่อลดปริมาณน้ำหล่อเย็นที่ใช้ในการลดอุณหภูมิ

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้เริ่มต้นจากการสร้างแบบจำลองกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอทานอลามีนด้วยโปรแกรม Aspen Plus จากงานวิจัยของ Notz และคณะ [15] ด้วยระบบสมดุล (Equilibrium) แบบจำลองสมบัติเชิงอุณหพลศาสตร์ชนิด ENRTL-RK และเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง พบว่าประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีค่าเท่ากับร้อยละ 73.35 ซึ่งความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองจริงร้อยละ 3.38 และค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกมีค่าเท่ากับ 4.78 GJ/T CO<sub>2</sub> คลาดเคลื่อนจากผลการทดลองจริงร้อยละ 4.61 ซึ่งความคลาดเคลื่อนทั้งสองอยู่ช่วงที่เหมาะสมสำหรับการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม Aspen Plus แบบจำลองดังกล่าวจึงถูกใช้ในการสร้างแบบจำลองสำหรับกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต จากนั้นแบบจำลองดังกล่าวได้ถูกใช้ในการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity analysis) ของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตนั้นด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลสองระดับจากสถานการณ์ 32 สถานการณ์ และนำผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวมาใช้ในการหาค่าเหมาะที่สุดของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต

##### 5.1.1 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตนั้นด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลสองระดับ

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity analysis) ของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตนั้นด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลสองระดับของอุณหภูมิของสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (ตัวแปร A) อัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (ตัวแปร B) ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเป่า (ตัวแปร C) ความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลาย (ตัวแปร D) และความดันของหอดูดซึม (ตัวแปร E) ต่อการตอบสนอง 2 ผลลัพธ์ คือ ประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และค่าพลังงานจำเพาะ

ต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยก ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน หรือ ANOVA ของอิทธิพลหลักและอิทธิพลอันตรกิริยาของตัวแปรต่อประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าอิทธิพลหลักและอิทธิพลอันตรกิริยาของตัวแปร 8 อันดับแรกส่งผลต่อค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกถึงร้อยละ 97.69 ซึ่งคืออิทธิพลหลัก B อิทธิพลอันตรกิริยาของตัวแปร BC อิทธิพลหลัก C อิทธิพลหลัก E อิทธิพลอันตรกิริยาของ BD อิทธิพลหลัก D อิทธิพลหลัก A และ อิทธิพลอันตรกิริยาของ BE ตามลำดับ โดยอิทธิพลหลัก B หรืออัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึมส่งผลต่อประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุดถึงร้อยละ 58.40

ในกรณีของค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยก พบว่าแยกอิทธิพลหลักและอิทธิพลอันตรกิริยาของตัวแปร 7 อันดับแรกส่งผลต่อค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกถึงร้อยละ 98.86 โดยสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ อิทธิพลหลัก B อิทธิพลหลัก C อิทธิพลหลัก D อิทธิพลอันตรกิริยาของตัวแปร อิทธิพลหลัก E อิทธิพลอันตรกิริยาของตัวแปร BD CD และ BCD โดยอิทธิพลหลัก B หรืออัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึมส่งผลต่อค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกมากที่สุดถึงร้อยละ 34.00

5.1.2 ค่าเหมาะที่สุดของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต

จากการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตนั้นด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลสองระดับเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดคือสถานการณ์ที่มีประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่าร้อยละ 85 และมีพลังงานจำเพาะต่อมวลของทั้งระบบมีค่าต่ำที่ต่ำ อุณหภูมิของสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (ตัวแปร A) อัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (ตัวแปร B) และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ว (ตัวแปร C) ควรมีค่าที่ระดับกลาง (Middle level, 0) ความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลาย (ตัวแปร D) และความดันของหอดูดซึม (ตัวแปร E) ควรมีค่าที่ระดับสูง (High level, 1) แต่เนื่องจากอิทธิพลหลักอัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึม (ตัวแปร B) และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ว (ตัวแปร C) ให้ผลในทางตรงข้ามกันและส่งผลมากต่อ



การตอบสนอง เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของสองอิทธิพลหลักจึงถูกนำมาใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต เพื่อนำสถานการณ์ที่ดีที่สุดมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Notz และคณะ [15] จากแบบจำลองเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโมโนเอทานอลามีน

จากการสร้างแบบจำลองพบว่าสถานการณ์ที่ 49 ที่มีประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถึงร้อยละ 87.04 และมีค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกที่ต่ำซึ่งเท่ากับ  $2.17 \text{ GJ/T CO}_2$  ซึ่งเป็นไปตามข้อแนะนำของ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) อีกทั้งมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการดำเนินการของกระบวนการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปีเท่ากับ  $57.50 \text{ USD/T CO}_2$  ซึ่งเป็นการดำเนินการกระบวนการที่สภาวะอุณหภูมิของสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึมเท่ากับ 75 องศาเซลเซียส อัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซึมเท่ากับ 4 ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ยะเท่ากับร้อยละ 30 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลายเท่ากับร้อยละ 40 ความดันของหอดูดซึมเท่ากับ 10 บาร์ และอัตราส่วนโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลายดูดซึมที่ออกจากหอแยก ( $\text{mol CO}_2/\text{mol K}_2\text{CO}_3$ ) เท่ากับ 0.26 เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตในงานวิจัยนี้

5.1.3 เปรียบเทียบผลการจำลองของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตกับสารละลายโมโนเอทานอลามีน

สถานการณ์ที่ 49 ในงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถึงร้อยละ 87.04 และมีค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกที่ต่ำซึ่งเท่ากับ  $2.17 \text{ GJ/T CO}_2$  อีกทั้งมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการดำเนินการของกระบวนการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปีเท่ากับ  $57.50 \text{ USD/T CO}_2$  มีประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่าและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปีต่ำกว่าผลการจำลองจากงานวิจัยของ Notz และคณะ [15] ที่เป็นกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโมโนเอทานอลามีน ซึ่งมีประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 73.35 และมีค่าพลังงานจำเพาะต่อมวล

คาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกเท่ากับ 4.73 GJ/T CO<sub>2</sub> อีกทั้งมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการดำเนินการของกระบวนการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปีเท่ากับ 107.50 USD/T CO<sub>2</sub> นอกจากนี้ถึงแม้กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโมโนเอทานอลามีนจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ดีกว่ากระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตแต่มีผลเสียต่ออุปกรณ์กล่าวคือการกัดกร่อนของอุปกรณ์และระบบท่อในกระบวนการโดยจะเกิดเป็นค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมในการซ่อมบำรุงและโมโนเอทานอลามีนยังส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมเช่นเดียวกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หากเกิดการรั่วไหลออกนอกระบบ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) การสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษากระบวนการด้วยระบบอัตรา (Rate based) ถึงแม้จะมีความแม่นยำในการทำนายผลมากกว่าระบบสมดุลแต่มีความซับซ้อนมากกว่าระบบสมดุล (Equilibrium) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ อย่างไรก็ตาม จากผลทดลองพบว่าระบบสมดุลมีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองจริงในช่วงที่ยอมรับได้ (น้อยกว่าร้อยละ 5) ซึ่งมีความเพียงพอในการใช้วิเคราะห์ความอ่อนไหวและหาค่าเหมาะที่สุดของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยวิธีการดูดซับทางเคมี
- 2) การเพิ่มอัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซับ (L/G) ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้นแต่ในขณะเดียวกันทำให้ค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ดังนั้นในการดำเนินการระบบความปรับอัตราส่วนการไหลของสารละลายต่อแก๊สที่ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซับ (L/G) ให้มีความเหมาะสมกับความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเปรี๊ยะ
- 3) ความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลายทำให้ประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้นและช่วยลดพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยก แต่อย่างไรก็ตามหากใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในสารละลายมากเกินไป โพแทสเซียมคาร์บอเนตอาจตกตะกอนและอุดตันภายในกระบวนการ

## ภาคผนวก

### สมการการถดถอยของประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

สมการการถดถอย (Regression model) ของประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์คือ

$$\text{ประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์} = 74.303 - 3.08538 \times A + 19.5218 \times B - 8.24504 \times C + 3.0652 \times D + 7.89485 \times E + 9.24985 \times B \times C - 3.84307 \times B \times D - 2.6133 \times B \times E$$

เมื่อ A B C D และ E คือ ค่าระดับ (-1 ถึง 1) ของตัวแปรแต่ละตัว

โดยสมการที่ใช้ในการสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนองในโปรแกรม MATLAB คือ

เมื่อค่าตัวแปร E เท่ากับ 1

```
>> [B,C]=meshgrid(-1:0.1:1,-1:0.1:1);
>> A=0;
>> D=1;
>> E=1;
>> Z=74.303 -3.08538 .* A + 19.5218 .* B -8.24504 .* C + 3.0652 .* D + 7.89485 .* E +
9.24985 .* B.*C -3.84307 .* B.*D + -2.6133 .* B.*E;
>> surf(B,C,Z)
>> zlim([0 100])
```

เมื่อค่าตัวแปร E เท่ากับ 0

```
>> [B,C]=meshgrid(-1:0.1:1,-1:0.1:1);
>> A=0;
>> D=1;
>> E=0;
>> Z=74.303 -3.08538 .* A + 19.5218 .* B -8.24504 .* C + 3.0652 .* D + 7.89485 .* E +
9.24985 .* B.*C -3.84307 .* B.*D + -2.6133 .* B.*E;
>> surf(B,C,Z)
>> zlim([0 100])
```

เมื่อค่าตัวแปร E เท่ากับ -1

```
>> [B,C]=meshgrid(-1:0.1:1,-1:0.1:1);
>> A=0;
>> D=1;
>> E=-1;
>> Z=74.303 -3.08538 .* A + 19.5218 .* B -8.24504 .* C + 3.0652 .* D + 7.89485 .* E +
9.24985 .* B.*C -3.84307 .* B.*D + -2.6133 .* B.*E;
>> surf(B,C,Z)
>> zlim([0 100])
```

**สมการการถดถอยของค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยก**

สมการการถดถอย (Regression model) ของค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยกคือ

ค่าพลังงานจำเพาะต่อมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องทำความร้อนของหอแยก =  $9.5263 + 3.70772 \times B - 3.24513 \times C - 2.69312 \times D - 0.894668 \times E - 2.37293 \times B \times C - 0.861519 \times B \times D + 0.839726 \times C \times D + 0.713462 \times B \times C \times D$

เมื่อ A B C D และ E คือ ค่าระดับ (-1 ถึง 1) ของตัวแปรแต่ละตัว

โดยสมการที่ใช้ในการสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนองในโปรแกรม MATLAB คือ

```
>> [B,C]=meshgrid(-1:0.1:1,-1:0.1:1);
>> A=0;
>> D=1;
>> E=1;
>> Z=9.5263 + 3.70772 .* B -3.24513 .* C -2.69312 .* D -0.894668 .* E -2.37293 .* B.*C
-0.861519 .* B.*D + 0.839726 .* C.*D + 0.713462 .* B.*C.*D;
>> surf(B,C,Z)
>> zlim([0 20])
```

## บรรณานุกรม

1. Isa F., Zabiri H., Ng N.K.S., and Shariff A.M., *CO<sub>2</sub> removal via promoted potassium carbonate: A review on modeling and simulation techniques*. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2018. 76: p. 236-265.
2. Garcia M., Knuutila H.K., and Gu S., *ASPEN PLUS simulation model for CO<sub>2</sub> removal with MEA: Validation of desorption model with experimental data*. Journal of environmental chemical engineering, 2017. 5(5): p. 4693-4701.
3. Kittel J., Idem R., Gelowitz D., Tontiwachwuthikul P., Parrain G., and Bonneau A., *Corrosion in MEA units for CO<sub>2</sub> capture: pilot plant studies*. Energy Procedia 00, 2009. 1(1): p. 791-797.
4. Borhani T.N.G., Azarpour A., Akbari V., Alwi S.R.W., and Manan Z.A., *CO<sub>2</sub> capture with potassium carbonate solutions: A state-of-the-art review*. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2015. 41: p. 142-162.
5. Grant T., Anderson C., and Hooper B., *Comparative life cycle assessment of potassium carbonate and monoethanolamine solvents for CO<sub>2</sub> capture from post combustion flue gases*. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2014. 28: p. 35-44.
6. Vega F., Cano M., Gallego L.M., Camino S., Camino J.A., and Navarrete B., *Evaluation of MEA 5 M performance at different CO<sub>2</sub> concentrations of flue gas tested at a CO<sub>2</sub> capture lab-scale plant*. Energy Procedia, 2017. 114: p. 6222-6228.
7. Smith K.H., Harkin T., Mumford K., Kentish S., Qader A., Anderson C., Hooper B., and Stevens G.W., *Outcomes from pilot plant trials of precipitating potassium carbonate solvent absorption for CO<sub>2</sub> capture from a brown coal fired power station in Australia*. Fuel Processing Technology, 2017. 155: p. 252-260.
8. Oh S.-Y., Binns M., Cho H., and Kim J.-K., *Energy minimization of MEA-based CO<sub>2</sub> capture process*. Applied Energy, 2016. 169: p. 353-362.
9. Jassim M.S., *Sensitivity analyses and optimization of a gas sweetening plant for hydrogen sulfide and carbon dioxide capture using methyldiethanolamine solutions*. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016. 36: p. 175-183.

10. Qeshta H.J., Abuyahya S., Pal P., and Banat F., *Sweetening liquefied petroleum gas (LPG): Parametric sensitivity analysis using Aspen HYSYS*. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015. 26: p. 1011-1017.
11. Ghanbarabadi H. and Gohari F.K.Z., *Optimization of MDEA concentration in flow of input solvent to the absorption tower and its effect on the performance of other processing facilities of gas treatment unit in Sarakhs refinery*. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2014. 20: p. 208-213.
12. Øi L.E. *Aspen HYSYS simulation of CO<sub>2</sub> removal by amine absorption from a gas based power plant*. in *The 48<sup>th</sup> Scandinavian Conference on Simulation and Modeling (SIMS 2007)*; 30-31 October; 2007; Göteborg (Särö). 2007. Linköping University Electronic Press.
13. Yurata T., Piumsomboon P., and Chalermssinsuwan B., *Effect of contact force modeling parameters on the system hydrodynamics of spouted bed using CFD-DEM simulation and 2<sup>k</sup> factorial experimental design*. Chemical Engineering Research and Design, 2020. 153: p. 401-418.
14. Phuakpunk K., Chalermssinsuwan B., Putivisutisak S., and Assabumrungrat S., *Factorial design analysis of parameters for the sorption-enhanced steam reforming of ethanol in a circulating fluidized bed riser using CFD*. RSC advances, 2018. 8(43): p. 24209-24230.
15. Notz R., Mangalapally H.P., and Hasse H., *Post combustion CO<sub>2</sub> capture by reactive absorption: Pilot plant description and results of systematic studies with MEA*. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2012. 6: p. 84-112.
16. Arachchige U.S.P. and Melaaen M.C., *Aspen plus simulation of CO<sub>2</sub> removal from coal and gas fired power plants*. Energy Procedia, 2012. 23: p. 391-399.
17. Kothandaraman A., *Carbon dioxide capture by chemical absorption: a solvent comparison study*, in *Department of Chemical Engineering*. 2010, Massachusetts Institute of Technology: Cambridge, Massachusetts, USA.
18. Cozma P., Wukovits W., Mămăliță I., Friedl A., and Gavrilăscu M., *Analysis and modelling of the solubility of biogas components in water for physical absorption processes*. Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ), 2013. 12(1).

19. AspenTech, *Aspen physical property system - Physical property methods*. 2013.
20. Wu Y., Wu F., Hu G., Mirza N.R., Stevens G.W., and Mumford K.A., *Modelling of a post-combustion carbon dioxide capture absorber using potassium carbonate solvent in Aspen Custom Modeller*. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2018. 26(11): p. 2327-2336.
21. Duan L., Zhao M., and Yang Y., *Integration and optimization study on the coal-fired power plant with CO<sub>2</sub> capture using MEA*. Energy, 2012. 45(1): p. 107-116.
22. Peng J., Lextrait S., Edgar T.F., and Eldridge R.B., *A comparison of steady-state equilibrium and rate-based models for packed reactive distillation columns*. Industrial & engineering chemistry research, 2002. 41(11): p. 2735-2744.
23. Metz B., Davidson O., De Coninck H., Loos M., and Meyer L., *Intergovernmental panel on climate change, in IPCC special report on carbon dioxide capture and storage*. 2005: New York, USA.
24. Douglas C.M., *Design and analysis of experiments (5th edition)*. 2001, New York, USA: John Willy & Sons.
25. Ali H., Eldrup N.H., Normann F., Skagestad R., and Øi L.E., *Cost estimation of CO<sub>2</sub> absorption plants for CO<sub>2</sub> mitigation—method and assumptions*. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2019. 88: p. 10-23.
26. Singh D., Croiset E., Douglas P.L., and Douglas M.A., *Techno-economic study of CO<sub>2</sub> capture from an existing coal-fired power plant: MEA scrubbing vs. O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> recycle combustion*. Energy conversion and Management, 2003. 44(19): p. 3073-3091.
27. Jürgensen L., Ehimen E.A., Born J., and Holm-Nielsen J.B., *Dynamic biogas upgrading based on the Sabatier process: Thermodynamic and dynamic process simulation*. Bioresource technology, 2015. 178: p. 323-329.
28. Li B.-H., Zhang N., and Smith R., *Simulation and analysis of CO<sub>2</sub> capture process with aqueous monoethanolamine solution*. Applied Energy, 2016. 161: p. 707-717.
29. Ayithey F.K., Obek C.A., Saptorio A., Perumal K., and Wong M.K., *Process modifications for a hot potassium carbonate-based CO<sub>2</sub> capture system: a comparative study*. Greenhouse Gases: Science and Technology, 2020. 10(1): p. 130-146.

30. Smith K., Lee A., Mumford K., Li S., Thanumurthy N., Temple N., Anderson C., Hooper B., Kentish S., and Stevens G., *Pilot plant results for a precipitating potassium carbonate solvent absorption process promoted with glycine for enhanced CO<sub>2</sub> capture*. Fuel Processing Technology, 2015. 135: p. 60-65.
31. Borhani T.N.G., Akbari V., Hamid M.K.A., and Manan Z.A., *Rate-based simulation and comparison of various promoters for CO<sub>2</sub> capture in industrial DEA-promoted potassium carbonate absorption unit*. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2015. 22: p. 306-316.
32. Smith K., Xiao G., Mumford K., Gouw J., Indrawan I., Thanumurthy N., Quyn D., Cuthbertson R., Rayer A., and Nicholas N., *Demonstration of a concentrated potassium carbonate process for CO<sub>2</sub> capture*. Energy & fuels, 2014. 28(1): p. 299-306.
33. Devries N., *CO<sub>2</sub> absorption into concentrated carbonate solutions with promoters at elevated temperatures*, in Graduate College. 2014, University of Illinois at Urbana-Champaign: Urbana, Illinois, USA.
34. Quyn D., Rayer A.V., Gouw J., Indrawan I., Mumford K.A., Anderson C.J., Hooper B., and Stevens G.W., *Results from a pilot plant using un-promoted potassium carbonate for carbon capture*. Energy Procedia, 2013. 37: p. 448-454.
35. Rochelle G.T., Chen E., Oyenekan B., Sexton A., Davis J., Hilliard M., and Veawab A., *CO<sub>2</sub> capture by absorption with potassium carbonate third quarterly report 2006*, in Department of Chemical Engineering. 2006, University of Texas at Austin: Austin, Texas, USA.
36. Choi J., Cho H., Yun S., Jang M.G., Oh S.Y., Binns M., and Kim J.K., *Process design and optimization of MEA-based CO<sub>2</sub> capture processes for non-power industries*. Energy, 2019. 185: p. 971-980.
37. Nwaoha C., Beaulieu M., Tontiwachwuthikul P., and Gibson M.D., *Techno-economic analysis of CO<sub>2</sub> capture from a 1.2 million MTPA cement plant using AMP-PZ-MEA blend*. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2018. 78: p. 400-412.
38. Alibaba. *Potassium Carbonate 99% Min, Technical Grade*. 2020 [15.01.2020]; Available from: <https://www.alibaba.com/product-detail/Potassium-Carbonate->



[99-Min-Technical-](#)

[Grade\\_60743809207.html?spm=a2700.7724857.normalList.152.4a737ea8Ekogt5.](#)

39. Turton R., Bailie R.C., Whiting W.B., Shaeiwitz J.A., and Bhattacharyya D., *Analysis, synthesis and design of chemical processes*. 4<sup>th</sup> ed. 2013, USA: Pearson Education.
40. Zhang X., Fu K., Liang Z., Yang Z., Rongwong W., and Na Y., *Experimental studies of regeneration heat duty for CO<sub>2</sub> desorption from aqueous DETA solution in a randomly packed column*. Energy Procedia, 2014. 63: p. 1497-1503.
41. Artanto Y., Jansen J., Pearson P., Puxty G., Cottrell A., Meuleman E., and Feron P., *Pilot-scale evaluation of AMP/PZ to capture CO<sub>2</sub> from flue gas of an Australian brown coal-fired power station*. International journal of Greenhouse Gas control, 2014. 20: p. 189-195.





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ฐาปนัฐ ชื่นพันธ์
วัน เดือน ปี เกิด	17 ตุลาคม 2534
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย
วุฒิการศึกษา	วท.บ. (เคมีวิศวกรรม) เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	10 หมู่ 1 ตำบลเกาะเกร็ด อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี 11120
รางวัลที่ได้รับ	Best paper award: Chuenphan, T., Yurata, T., Sema, T., and Chalermssinsuwan, B. Sensitivity analysis by the 2k factorial experimental design of CO <sub>2</sub> capture with amine gas treating process using Aspen Plus®. The 29th TIChE Conference, Virtual, Thailand (2020). Best oral presentation award: Chuenphan, T., Yurata, T., Sema, T., and Chalermssinsuwan, B. Sensitivity analysis by the 2k factorial experimental design of CO <sub>2</sub> capture with amine gas treating process using Aspen Plus®. The 29th TIChE Conference, Virtual, Thailand (2020).