

การจำลองการดูซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายโมโนเอธาโนลามีนในน้ำ



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

/ สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2541

เลขที่.....
เลขทะเบียน..... 33986
วัน, เดือน, ปี 27 ก.ย. 2542

A Simulation of Carbon Dioxide Absorption in Aqueous Solution of Monoethanolamine



A Report Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

For the Degree of Bachelor of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 1998 อย่างไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การจำลองการดูดซึมก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์โดยใช้สารละลายโมโนเอทาโนลามีนในน้ำ

โดย นางสาวปิยสุดา เรืองทรัพย์ รหัสประจำตัว 38014295

นางสาวพนารัตน์ โทมณี รหัสประจำตัว 38014319

นางสาวอุษา ตั้งพิทักษ์เสมอ รหัสประจำตัว 38014657

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

อาจารย์ที่ปรึกษา นายสันติ วัฒนานุสรณ์


อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.ประกอบ กิจไชยา

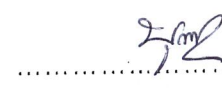
ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์


.....กรรมการ
(นายสันติ วัฒนานุสรณ์)


.....กรรมการ
(ดร. ประกอบ กิจไชยา)


.....กรรมการ
(ดร.ไพศาล นาคพิพัฒน์)


.....กรรมการ
(นายบุญชัย โชติวิริยวณิชย์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรื่อง การจำลองการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายโมโนเอชานอลามีนในน้ำ
 โดย นางสาวปิยสุดา เรืองทรัพย์ รหัสประจำตัว 38014295
 นางสาวพนารัตน์ โทมณี รหัสประจำตัว 38014319
 นางสาวอุษา ตั้งพิทักษ์เสมอ รหัสประจำตัว 38014657
 อาจารย์ที่ปรึกษา นายสันติ วัฒนานุสรณ์
 อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.ประกอบ กิจไชยา
 ปรินญาณิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี
 ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

ปรินญาณิพนธ์ฉบับนี้เป็นการหาสเกลของกระบวนการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้สารละลายโมโนเอชานอลามีนในหอดูดซึมแบบแผ่นแบบ วิธีการทำได้โดยการสร้างแบบจำลองการดูดซึมให้เป็นแบบต่าง ๆ ได้แก่ การดูดซึมแบบไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น การดูดซึมแบบที่มีปฏิกิริยาเคมีอันดับหนึ่งไม่ผันกลับ ปฏิกิริยาเคมีอันดับสองไม่ผันกลับ และปฏิกิริยาเคมีอันดับสองผันกลับเกิดขึ้น จากทฤษฎีการคำนวณหาอัตราการดูดซึมในแบบจำลองแต่ละแบบจะได้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปของความดันที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของหอดูดซึม นำค่าความดันที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับค่าความดันจากการทดลองการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโมโนเอชานอลามีนที่มีผู้ทำการทดลองไว้แล้ว

ผลการคำนวณและการเปรียบเทียบค่าความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์พบว่า เมื่อกำหนดว่าอุณหภูมิภายในหอดูดซึมคงที่ สเกลการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบบที่มีปฏิกิริยาเคมีอันดับสองผันกลับเกิดขึ้นให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองที่สุด สรุปได้ว่าการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในการทดลองที่นำมาศึกษานี้เป็นการดูดซึมที่มีปฏิกิริยาเคมีอันดับสองแบบผันกลับเกิดขึ้น

เมื่อคำนวณอัตราการดูดซึมโดยคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในหอดูดซึมด้วยแล้วพบว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในหอดูดซึมของการทดลองนี้มีค่าน้อย และไม่มีผลต่อการคำนวณหาอัตราการดูดซึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title A Simulation of Carbon Dioxide Absorption in Aqueous Solution of
Monoethanolamine

By Ms.Piyasuda Reungsub ID.38014295
 Ms.Panarat Tomanee ID.38014319
 Ms.Usa Tangpitaksamer ID.38014657

Advisor Mr.Santi Wattananusorn

Co-Advisor Dr.Prakob Kitchaiya

Report for Bachelor Degree of Chemical Engineering
 Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

For simulating the absorption of carbon dioxide in aqueous solution of monoethanolamine, various models of this process; physical absorption and chemisorption with irreversible first-order reaction, irreversible second-order reaction and reversible second-order reaction, are established. From the theory and calculating method of each model, the concentrations of gaseous carbon dioxide, in term of pressure, at any height of absorption tower are acquired.

By comparing the result from each model with the existence experiment, the model that is in vicinity with the experiment, at constant temperature, is the chemisorption with reversible second-order reaction. This model, afterward, is used to simulate the absorption of carbon dioxide with vary temperature in absorption tower. The results show that the temperature variation in the tower is of no effect with the absorption rate.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้มีรายนามต่อไปนี้ที่ช่วยให้โครงการนี้สำเร็จได้ด้วยดี

1. อาจารย์สุชาติณี แก้วพวงงาม ช่วยในการก่อตั้งโครงการ วางแนวทางรวมทั้งให้คำแนะนำในตอนแรกเริ่มของการทำงาน
2. อาจารย์สันติ วัฒนานุสรณ์ ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับวิธีการทำงาน และตรวจสอบความถูกต้องเรียบร้อยของรายงาน
3. ดร.ประกอบ กิจไชยา ให้คำปรึกษาในส่วนการคำนวณ และคำแนะนำในการหาหนังสืออ้างอิง
4. ดร.ไพศาล นาคพิพัฒน์ และอาจารย์บุญชัย โชติวิริยาณิษฐ์ ให้คำแนะนำในเรื่องความถูกต้องและความเป็นระเบียบเรียบร้อยของรายงาน
5. พี่ ๆ ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ช่วยในการหาหนังสืออ้างอิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	จ
สารบัญภาพ.....	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ฉ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. ทฤษฎีพื้นฐาน.....	4
3. การดูดซึมที่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น.....	17
4. การดูดซึมในของเหลวที่มีการเคลื่อนที่.....	23
5. ข้อมูลการทดลองสำหรับใช้อ้างอิง.....	39
6. ผลการคำนวณ.....	52
7. สรุปผล.....	80
เอกสารอ้างอิง.....	81
ภาคผนวก	
ก. วิธีการคำนวณ.....	83
ข. ลักษณะทางกายภาพของแพคกิ้ง.....	97
ค. ความดันไอ ปริมาตรจำเพาะ และเอนทัลปีของน้ำ.....	99
ง. ความหนืดของก๊าซและของเหลวที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	100
จ. ค่าการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลาย.....	101
โมโนเอธาโนลามีน	
ฉ. ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับสอง.....	102
ช. ค่าตัวประกอบรูปร่างของอนุภาค.....	103
ซ. ค่าคงที่สมดุล.....	104

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติทั่วไปของคาร์บอน ไดออกไซด์	7
ตารางที่ 2.2 ข้อมูลทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับการเกิดหรือการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์	9
ตารางที่ 2.3 ความดันไอ ความหนาแน่น และข้อมูลทางความร้อนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อิ่มตัว	10
ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังสองของเอนทาลปีเอนทัลปีแฟกเตอร์ (E^2) กับ M	29
ตารางที่ 5.1 องค์ประกอบของก๊าซขาเข้าและขาออกจากหอดูดซึมของการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 3-4	43
ตารางที่ 5.2 องค์ประกอบของก๊าซขาเข้าและขาออกจากหอดูดซึมของการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 4-6	43
ตารางที่ 5.3 องค์ประกอบของก๊าซขาเข้าและขาออกจากหอดูดซึมของการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 10-12	44
ตารางที่ 5.4 องค์ประกอบของก๊าซขาเข้าและขาออกจากหอดูดซึมของการทดลองครั้งที่ 2 ช่วงชั่วโมงที่ 6-9	44
ตารางที่ 5.5 ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของหอดูดซึม ในการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 3-4	45
ตารางที่ 5.6 ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของหอดูดซึม ในการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 4-6	46
ตารางที่ 5.7 ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของหอดูดซึม ในการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 10-12	47
ตารางที่ 5.8 ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของหอดูดซึม ใน การทดลองครั้งที่ 2 ช่วงชั่วโมงที่ 6-9	48
ตารางที่ 5.9 อุณหภูมิของสารละลายโมโนเอทานอลามีนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของหอดูดซึม ในการทดลองครั้งที่ 1	49
ตารางที่ 5.10 อุณหภูมิของสารละลายโมโนเอทานอลามีนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของ	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส หอดูดซึม ในการทดลองครั้งที่ 2 ชั่วโมงที่ 6-9 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.1	ความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความสูงต่าง ๆ ของหอดูดซึม เมื่อคิดว่าเป็นการดูดซึมแบบ ไม่มีปฏิกิริยาเคมี	52
ตารางที่ 6.2	ความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามความสูงของหอดูดซึม เมื่อคิดว่าเป็นการดูดซึมแบบที่มีปฏิกิริยาเคมีอันดับหนึ่งแบบ ไม่ผันกลับ	53
ตารางที่ 6.3	ความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามความสูงของหอดูดซึม เมื่อคิดว่าเป็นการดูดซึมแบบที่มีปฏิกิริยาเคมีอันดับสองที่ไม่ผันกลับ	54
ตารางที่ 6.4	ความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามความสูงของหอดูดซึม เมื่อคิดว่าเป็นการดูดซึมแบบที่มีปฏิกิริยาเคมีอันดับสองที่ผันกลับ	55
ตารางที่ 6.5	การเปรียบเทียบค่าความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คำนวณได้ เปรียบเทียบกับผลการทดลอง สำหรับการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงเวลาที่ 3-4	56
ตารางที่ 6.6	การเปรียบเทียบค่าความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คำนวณได้ กับผลการทดลอง สำหรับการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงเวลาที่ 4-6	58
ตารางที่ 6.7	การเปรียบเทียบค่าความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คำนวณได้ กับผลการทดลอง สำหรับการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงเวลาที่ 10-12	60
ตารางที่ 6.8	การเปรียบเทียบค่าความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คำนวณได้ กับผลการทดลอง สำหรับการทดลองครั้งที่ 2 ช่วงเวลาที่ 6-9	62
ตารางที่ 6.9	การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายโมโนเอธาโนลามีน แบบ ไม่มีปฏิกิริยา เมื่อคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของหอดูดซึม ในการทดลองที่ 1 ช่วงเวลาที่ 3-4	64
ตารางที่ 6.10	การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายโมโนเอธาโนลามีน แบบ ไม่มีปฏิกิริยา เมื่อคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของหอดูดซึม ในการ ทดลองที่ 1 ช่วงเวลาที่ 4-6	66
ตารางที่ 6.11	การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายโมโนเอธาโนลามีน แบบ ไม่มีปฏิกิริยา เมื่อคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของหอดูดซึม ในการทดลองที่ 1 ช่วงเวลาที่ 10-12	68
ตารางที่ 6.12	การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายโมโนเอธาโนลามีน แบบ ไม่มีปฏิกิริยา เมื่อคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของหอดูดซึม ในการทดลองที่ 2 ช่วงเวลาที่ 6-9	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
ตารางที่ 6.13 การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายโมโนเอธาโนลามีนแบบที่มีปฏิกิริยาอันดับสองผันกลับ เมื่อคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของหอดูดซึม ในการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 3-4	72
ตารางที่ 6.14 การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายโมโนเอธาโนลามีนแบบที่มีปฏิกิริยาอันดับสองผันกลับ เมื่อคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของหอดูดซึม ในการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 4-6	74
ตารางที่ 6.15 การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายโมโนเอธาโนลามีนแบบที่มีปฏิกิริยาอันดับสองผันกลับ เมื่อคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของหอดูดซึม ในการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 10-12	76
ตารางที่ 6.16 การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายโมโนเอธาโนลามีนแบบที่มีปฏิกิริยาอันดับสองแบบผันกลับ เมื่อคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของหอดูดซึม ในการทดลองครั้งที่ 2 ช่วงชั่วโมงที่ 6-9	78
ตาราง ก.1 สมการสำหรับคำนวณค่าความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความสูงต่าง ๆ ของหอดูดซึมแบบไม่มีปฏิกิริยา ในการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 3-4	95
ตาราง ก.2 สมการสำหรับคำนวณค่าความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความสูงต่าง ๆ ของหอดูดซึมแบบปฏิกิริยาอันดับสองผันกลับ ในการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 3-4	96
ตาราง ข.1 ลักษณะทางกายภาพของแพคกิ้ง	98
ตาราง ค.1 ค่าความดันไอ ปริมาตรจำเพาะ และเอนทัลปีของน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ	99
ตาราง ง.1 ความหนืดของก๊าซและของเหลวต่างๆ ที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิ ณ ความดันคงที่ 1 บรรยากาศ	100
ตาราง ฉ.1 ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับโมโนเอธาโนลามีนที่อุณหภูมิต่างๆ	102
ตาราง ช.1 ค่าตัวประกอบรูปร่างของอนุภาคสำหรับการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล	103
ตาราง ซ.1 ค่า pK ของสารประกอบเอมีนชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง	105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 เฟสไดอะแกรมของคาร์บอนไดออกไซด์	6
รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเอนทัลปี-อุณหภูมิ-เอนโทรปี ของคาร์บอนไดออกไซด์	8
รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะกับอุณหภูมิของสารละลายโมโนเอธาโนลามีน	12
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืด ไคเนเมติกกับอุณหภูมิของสารละลายโมโนเอธาโนลามีนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	13
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุความร้อนของสารละลายโมโนเอธาโนลามีนกับอุณหภูมิ	14
รูปที่ 2.6 การกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ Girbotol Amine Process	15
รูปที่ 3.1 การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยสารละลายโมโนเอธาโนลามีนในหอดูดซึมแบบแพค	17
รูปที่ 3.2 การทำสมดุลมวลสารย่อยรอบหอดูดซึม	18
รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะการถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคก๊าซ	19
รูปที่ 4.1 แสดงโปรไฟล์ความเข้มข้นของสาร A เมื่อปฏิกิริยาเป็นแบบอันดับหนึ่งไม่ผันกลับ	25
รูปที่ 4.2 แสดงโปรไฟล์ความเข้มข้นของสาร A เมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว	27
รูปที่ 4.3 แสดงโปรไฟล์ความเข้มข้นของสาร A เมื่อปฏิกิริยาเป็นแบบอันดับสองไม่ผันกลับ	31
รูปที่ 4.4 ค่า Enhancement Factor สำหรับปฏิกิริยาอันดับสอง ซึ่งได้จากสมการ	32

$$E = \frac{\sqrt{\left(M \frac{E_i - E}{E_i - 1}\right)}}{\tanh \sqrt{\left(M \frac{E_i - E}{E_i - 1}\right)}}$$

เมื่อใช้ค่า E_i เป็นพารามิเตอร์

รูปที่ 4.5 ค่า Enhancement Factor สำหรับปฏิกิริยาอันดับสอง ซึ่งได้จากสมการ	33
--	----

$$E = \frac{\sqrt{\left(M \frac{E_i - E}{E_i - 1}\right)}}{\tanh \sqrt{\left(M \frac{E_i - E}{E_i - 1}\right)}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นทำหนังสือขออนุญาตและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.1 ตัวอย่างข้อมูลการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 3-4	40
รูปที่ 5.2 ตัวอย่างข้อมูลการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 3-4 หลังการทำสมมูลมวลสาร	41
รูปที่ 5.3 ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของหอดูดซึม ในการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 3-4	45
รูปที่ 5.4 ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของหอดูดซึม ในการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 4-6	46
รูปที่ 5.5 ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของหอดูดซึม ในการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 10-12	47
รูปที่ 5.6 ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของหอดูดซึม ในการทดลองครั้งที่ 2 ช่วงชั่วโมงที่ 6-9	48
รูปที่ 5.7 ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของหอดูดซึม ในการทดลองครั้งที่ 1	49
รูปที่ 5.8 ความเข้มข้นของก๊าซตำแหน่งต่าง ๆ ของหอดูดซึม ในการทดลองครั้งที่ 2	50
รูปที่ 6.1 กราฟเปรียบเทียบผลการคำนวณของการดูดซึมที่มีกลไกแบบต่าง ๆ กับผลการทดลอง สำหรับการทดลองที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 3-4	57
รูปที่ 6.2 กราฟเปรียบเทียบผลการคำนวณของการดูดซึมที่มีกลไกแบบต่าง ๆ กับผลการทดลอง สำหรับการทดลองที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 4-6	59
รูปที่ 6.3 กราฟเปรียบเทียบผลการคำนวณของการดูดซึมที่มีกลไกแบบต่าง ๆ กับผลการทดลอง สำหรับการทดลองที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 10-12	61
รูปที่ 6.4 กราฟเปรียบเทียบผลการคำนวณของการดูดซึมที่มีกลไกแบบต่าง ๆ กับผลการทดลอง สำหรับการทดลองที่ 2 ช่วงชั่วโมงที่ 6-9	63
รูปที่ 6.5 กราฟเปรียบเทียบผลการคำนวณของการดูดซึมแบบไม่มีปฏิกิริยา แบบที่คิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับแบบที่ไม่คิดการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิภายในหอดูดซึม สำหรับการทดลองที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 3-4	65
รูปที่ 6.6 กราฟเปรียบเทียบผลการคำนวณของการดูดซึมแบบไม่มีปฏิกิริยา แบบที่คิด การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับแบบที่ไม่คิดการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิภายในหอดูดซึม สำหรับการทดลองที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 4-6	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของโรงเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.7	กราฟเปรียบเทียบผลการคำนวณของการดูดซึมแบบ ไม่มีปฏิกิริยา แบบคิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับแบบ ไม่คิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ภายในหอดูดซึม สำหรับการทดลองที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 10-12	69
รูปที่ 6.8	กราฟเปรียบเทียบผลการคำนวณของการดูดซึมแบบ ไม่มีปฏิกิริยา แบบคิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับแบบ ไม่คิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ภายในหอดูดซึม สำหรับการทดลองที่ 2 ช่วงชั่วโมงที่ 6-9	71
รูปที่ 6.9	กราฟเปรียบเทียบผลการคำนวณของการดูดซึมแบบมีปฏิกิริยาอันดับสองผกกลับ แบบคิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับแบบ ไม่คิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ภายในหอดูดซึม สำหรับการทดลองที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 3-4	73
รูปที่ 6.10	กราฟเปรียบเทียบผลการคำนวณของการดูดซึมแบบ ไม่มีปฏิกิริยา แบบคิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับแบบ ไม่คิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ภายในหอดูดซึม สำหรับการทดลองที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 4-6	75
รูปที่ 6.11	กราฟเปรียบเทียบผลการคำนวณของการดูดซึมแบบมีปฏิกิริยาอันดับสองผกกลับ แบบคิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับแบบ ไม่คิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ภายในหอดูดซึม สำหรับการทดลองที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 10-12	77
รูปที่ 6.12	กราฟเปรียบเทียบผลการคำนวณของการดูดซึมแบบมีปฏิกิริยาอันดับสองผกกลับ แบบคิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับแบบ ไม่คิดการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิ ภายในหอดูดซึม สำหรับการทดลองที่ 2 ช่วงชั่วโมงที่ 6-9	79
รูป ก.1	ส่วนย่อยสำหรับทำสมมูลมวลสารเพื่อใช้คำนวณค่า C_A	91
รูป ข.1	แพคกิ้งแบบวงแหวนเรซซิก (Rashig ring)	97
รูป จ.1	ความสามารถในการละลายของก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ในน้ำ ที่ความดันต่าง ๆ	101
รูป ซ.1	ค่าคงที่การแตกตัวเป็นไอออนขั้นแรก (First Ionization Constant) ของคาร์บอน ไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	106
รูป ซ.2	ค่าคงที่ความไม่เสถียรของคาร์บาเมต (Carbamate Instability Constant) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบายสัญลักษณ์

A	พื้นที่หน้าตัดของหลอดซีม (ตารางเมตร)
A_x	พื้นที่ผิวสัมผัสที่มีผลการถ่ายเทมวล (ตารางเมตร)
a	พื้นที่ผิวที่เปียกของเหลวของแพคกิ้งต่อปริมาตรของเบด (เมตร ² /เมตร ³)
a_v	พื้นที่ผิวของวัสดุที่เป็นแพคกิ้งต่อปริมาตรของแพคกิ้ง
C_{Ai}	ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมในสารละลายโมโนเอธาโนลามีน (โมล/ลิตร)
C_{Ab}	ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในเนื้อของเหลว (โมล/ลิตร)
C_{Bo}	ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการดูดซึม
CR_B	อัตราส่วนการจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่กั้นหลอดซีม
D_A	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
E	ตัวห้อย <i>air</i> คือ ในอากาศ ตัวห้อย <i>MEA</i> คือ ในสารละลายโมโนเอธาโนลามีน
E	แฟกเตอร์กระตุ้น (Enhancement Factor) (ไม่มีหน่วย)
g	ค่าความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก
H	ค่าคงที่ของเฮนรี่
k_1	ค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง
k_2	ค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับสอง
k_G	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเฉพาะที่ในวัฏภาคก๊าซ (โมล/ตารางเมตร.บาร.วินาที)
k_L	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเฉพาะที่ในวัฏภาคของเหลว เมื่อไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นในระหว่างการดูดซึม (เมตร/วินาที)
K	ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา
L	อัตราการไหลเชิงโมลของวัฏภาคของเหลว (โมล/วินาที)
M_A	น้ำหนักโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
M_{air}	น้ำหนักโมเลกุลของอากาศ
n	จำนวนโมลของโมโนเอธาโนลามีนที่เข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์
P	ความดันรวมของระบบ
P_A	ความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (บาร)
P_{Ai}	ความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผิวต่อ (interface) ของของเหลวกับก๊าซ (บาร)

เอกสารนี้ P_T เอกส ความดันรวม (บาร) การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R_A	อัตราการถ่ายเทมวลจากวัฏภาคก๊าซไปยังวัฏภาคของเหลว (โมล/วินาที)
u_L	ค่าอัตราการไหลต่อพื้นที่หน้าตัดของวัฏภาคของเหลว
T	อุณหภูมิเฉลี่ยของหอดูดซึม
V_{solub}	ปริมาตรต่อ โมลของตัวถูกละลาย
V	อัตราการไหลเชิง โมลของวัฏภาคก๊าซ (โมล/วินาที)
V'	อัตราการไหลเชิง โมลของวัฏภาคก๊าซเมื่อไม่รวมก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ (โมล/วินาที)
x_A	เศษส่วนโมลของก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ที่อยู่ในวัฏภาคของเหลว (ไม่มีหน่วย)
X_{AO}	เศษส่วนโมลเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์
y_A	เศษส่วนโมลของก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ที่อยู่ในวัฏภาคก๊าซ (ไม่มีหน่วย)
z	ความสูงของหอด (เมตร)
ρ_L	ความหนาแน่นของวัฏภาคของเหลว
σ_L	ค่าแรงตึงผิวของของเหลว
H_L	ความหนืดของวัฏภาคของเหลว
\mathcal{G}	ค่า association factor ของสารละลาย
δ	ความหนาของชั้นฟิล์ม
ε	ค่า void fraction ของเบดของแพคกิ้ง
ψ	ค่าตัวประกอบรูปร่างของอนุภาค (Particle shape factor) สำหรับใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

มูลเหตุจูงใจ

ถึงแม้ว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide) จะมีความสำคัญในอุตสาหกรรมบางประเภท เช่น อุตสาหกรรมการผลิตน้ำอัดลม อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องดับเพลิง และการทำแผ่นเทียม เป็นต้น แต่สำหรับอุตสาหกรรมบางประเภทแล้ว การกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากกระบวนการในอุตสาหกรรมนั้นถือเป็นเรื่องสำคัญอย่างยิ่ง ตัวอย่างเช่น การแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซธรรมชาติ ก่อนที่จะส่งเข้าสู่กระบวนการกลั่นแยก เพื่อป้องกันปัญหาการอุดตันของระบบท่อและวาล์วเนื่องจากการตกผลึกของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซสังเคราะห์ที่ผลิตได้ เป็นต้น ในอุตสาหกรรมลักษณะเช่นนี้ย่อมต้องการให้มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ปะปนอยู่ในกระบวนการผลิตน้อยที่สุด ด้วยเหตุนี้วิธีการสำหรับแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากกระบวนการจึงเป็นจุดสำคัญจุดหนึ่งที่คุณสมบัติให้มีความสนใจ เพื่อให้สามารถแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นวิธีการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากกระแสก๊าซอีกวิธีหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเคมีทั่วไป ประสิทธิภาพการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของกระบวนการดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายอย่าง เช่น สารที่ใช้เป็นตัวดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สภาวะที่ใช้ในการดูดซึม รวมทั้งลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ดูดซึม เป็นต้น ด้วยเหตุนี้จึงเกิดความสนใจที่จะศึกษากระบวนการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และการสร้างแบบจำลองของกระบวนการนี้ รวมถึงใช้แบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้ในการทดสอบหาแนวทางเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการดูดซึมเพื่อแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซผสมด้วย

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทั้งในส่วนของทฤษฎีพื้นฐาน ปฏิกริยาที่เกิดขึ้น ตลอดจนปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการนี้
2. เพื่อสร้างแบบจำลองของกระบวนการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และใช้แบบจำลองนี้ในการทดสอบหาผลที่ได้จากกระบวนการดูดซึมเมื่อกำหนดสภาวะของกระบวนการต่าง ๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เพื่อสรุปผลการทดลองที่ได้สำหรับใช้เป็นแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไป

ขอบเขตการศึกษา

โครงการวิจัยนี้ จะนำข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโมโนเอธาโนลามีนในหอดูดซึ่มแบบแห้งที่มีผู้ทำการทดลองไว้แล้วมาสร้างเป็นแบบจำลองของกระบวนการ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นี้

หลังจากได้แบบจำลองกระบวนการดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการแล้วจะใช้แบบจำลองนี้ทดลองหาผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงตัวแปรพื้นฐานที่สนใจต่อไป

ขั้นตอนการทำงาน

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายโมโนเอธาโนลามีนในน้ำ ทั้งในส่วนของทฤษฎีพื้นฐาน วิธีการคำนวณหาพื้นที่ และวิธีการคำนวณหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ในระบบ
2. คำนวณหาความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ ณ ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ ภายในหอดูดซึ่มโดยการสมมติว่าการดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแบบไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี (Physical absorption) และเป็นแบบเกิดปฏิกิริยาเคมี (Chemisorption) สำหรับการดูดซึ่มแบบเกิดปฏิกิริยาเคมีนั้น ได้สมมติว่ากลไกการเกิดปฏิกิริยาเป็นแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง และปฏิกิริยาอันดับสอง ทั้งแบบผันกลับและไม่ผันกลับ
3. นำผลการคำนวณที่ได้จากข้อ 2. มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองการดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้สารละลายโมโนเอธาโนลามีนในน้ำที่มีผู้ทำการทดลองไว้แล้ว เพื่อเปรียบเทียบ และสรุปผลถึงกลไกของ การดูดซึ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจในส่วนของกระบวนการดูซึม และในส่วนของวิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สามารถวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างดำเนินโครงการได้
2. ทราบถึงวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการดูซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อันจะเป็นแนวทางแก้อุตสาหกรรมที่ต้องการใช้กระบวนการนี้กำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากกระบวนการผลิตได้
3. เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้กระบวนการดูซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในงานด้านอื่น เช่น การกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อลดมลพิษทางอากาศ เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐาน

กระบวนการดูดซึมเป็นกระบวนการที่ก๊าซผสมถูกทำให้สัมผัสกับของเหลวที่ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซึม (absorbent หรือ absorbing medium) จุดประสงค์คือการทำให้องค์ประกอบที่ต้องการแยกออกจากก๊าซผสมละลายเข้าไปในของเหลว เกิดเป็นสารละลายขององค์ประกอบนั้นขึ้นมา กระบวนการนี้เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้หลักการถ่ายเทมวลสาร (mass transfer) จากวัฏภาคก๊าซไปยังวัฏภาคของเหลว ส่งผลให้เกิดการแยกองค์ประกอบในก๊าซผสม วิธีการที่ใช้ได้แก่การผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้ไหลสวนทาง (countercurrent) กับสารละลายที่ใช้เป็นตัวดูดซึม ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกดูดซึมแยกออกจากก๊าซผสมได้ [1]

กระบวนการดูดซึมที่ใช้สำหรับแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซผสมมีอยู่หลายแบบ ความแตกต่างของกระบวนการเหล่านี้ขึ้นอยู่กับสารละลายที่ใช้เป็นตัวดูดซึม การเลือกสารละลายที่จะนำมาใช้เป็นตัวดูดซึมนั้น มีปัจจัยที่ควรพิจารณาดังต่อไปนี้ [1]

1. ความสามารถในการละลายของก๊าซในสารละลาย (Gas Solubility)

ควรเลือกสารละลายที่มีค่าการละลายของก๊าซสูง ซึ่งโดยปกติสารละลายที่มีลักษณะทางเคมีใกล้เคียงกับก๊าซจะมีคุณสมบัติดังกล่าว การที่ก๊าซสามารถละลายแทรกเข้าไปในเนื้อสารละลายได้มากจะเป็นการเพิ่มอัตราการดูดซึม และเป็นการลดปริมาณสารละลายที่ต้องการใช้ในการดูดซึมลงด้วย

ปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารละลายและก๊าซ เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่จะทำให้ก๊าซสามารถละลายเข้าไปในสารละลายมากขึ้น อย่างไรก็ตาม หากต้องการแยกก๊าซออกจากสารละลายเพื่อนำสารละลายกลับไปใช้ในกระบวนการดูดซึมใหม่แล้ว ปฏิกิริยาเคมีดังกล่าวต้องเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้

2. ความสามารถในการระเหยของสารละลาย (Volatility)

สารละลายที่ใช้ควรมีความดันไอต่ำหรือเป็นสารที่ระเหยได้ยาก เพื่อที่ว่าจะไม่เกิดการสูญเสียสารละลายออกไปพร้อมกับก๊าซในขั้นตอนของการทำให้ก๊าซระเหยแยกออกจากสารละลาย

3. การกัดกร่อนของสารละลาย (Corrosiveness)

สารละลายที่มีฤทธิ์กัดกร่อนทำให้อาจต้องใช้อุปกรณ์แบบพิเศษที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อนได้ซึ่งย่อมมีราคาแพง ส่งผลให้ต้นทุนของกระบวนการเพิ่มสูงขึ้น

4. ต้นทุน (Cost)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น สารละลายที่จะนำมาใช้งานควรมีราคาไม่แพงและหาได้ง่าย เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ความหนืดของสารละลาย (Viscosity)

สารละลายที่มีความหนืดต่ำจะมีข้อดีคือมีอัตราการดูดซึมสูง ลดการเกิดการท่วม (flooding) ในหลุมดูดซึม นอกจากนี้ยังมีค่าการถ่ายเทความร้อนที่ดีอีกด้วย

6. ปัจจัยอื่นๆ

หากเป็นไปได้ควรเลือกใช้สารละลายที่ไม่มีพิษ ไม่ติดไฟ มีความเสถียรทางเคมี และมีจุดเยือกแข็งต่ำ

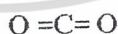
กระบวนการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้กันมากคือกระบวนการที่ใช้สารละลายคาร์บอนเนตหรือใช้สารละลายเอมีน เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถละลายเข้าไปในสารละลายเหล่านี้ได้ดี ทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซึมค่อนข้างสูง [2]

2.1 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide ; CO₂)

เป็นก๊าซกรดที่พบได้ในก๊าซธรรมชาติที่ผลิตได้จากหลุมก๊าซในบรรยากาศทั่วไป หรือแม้แต่มหาไฮโดรเจนออกซิจนและสัตว์ ประโยชน์ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ปัจจุบันคือ ใช้ในการผลิตเครื่องดื่ม การถนอมอาหาร หรือใช้เป็นสารดับเพลิง เป็นต้น

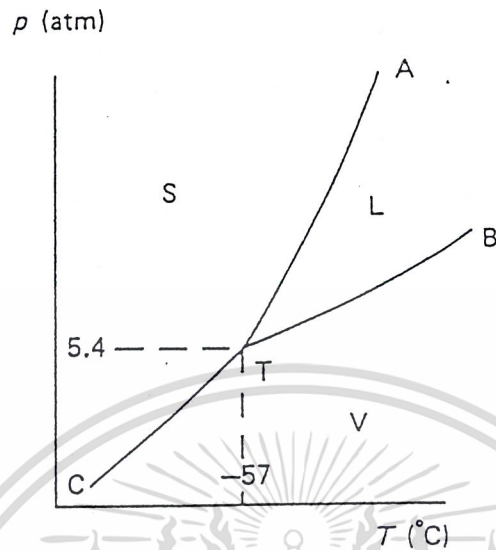
2.1.1 สมบัติทางกายภาพ

คาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิปกติเป็นก๊าซไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และไม่ติดไฟ มีความเป็นกรดเล็กน้อย สูตรเคมีคือ CO₂ และมีสูตรโครงสร้างดังแสดง



คาร์บอนไดออกไซด์สามารถทำให้อยู่ได้ทั้งสามสถานะ คือ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ข้อมูลสมมูลระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งสามสถานะได้จากเฟสไดอะแกรมของคาร์บอนไดออกไซด์ที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 เฟสไดอะแกรมของคาร์บอนไดออกไซด์ [20]

จากรูปที่ 2.1 จะเห็นว่าสถานะของจุดทริปเปิ้ล (Triple point) ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือจุดที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ทั้งสามสถานะคือ ที่อุณหภูมิ -57 องศาเซลเซียส และความดัน 5.4 บรรยากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

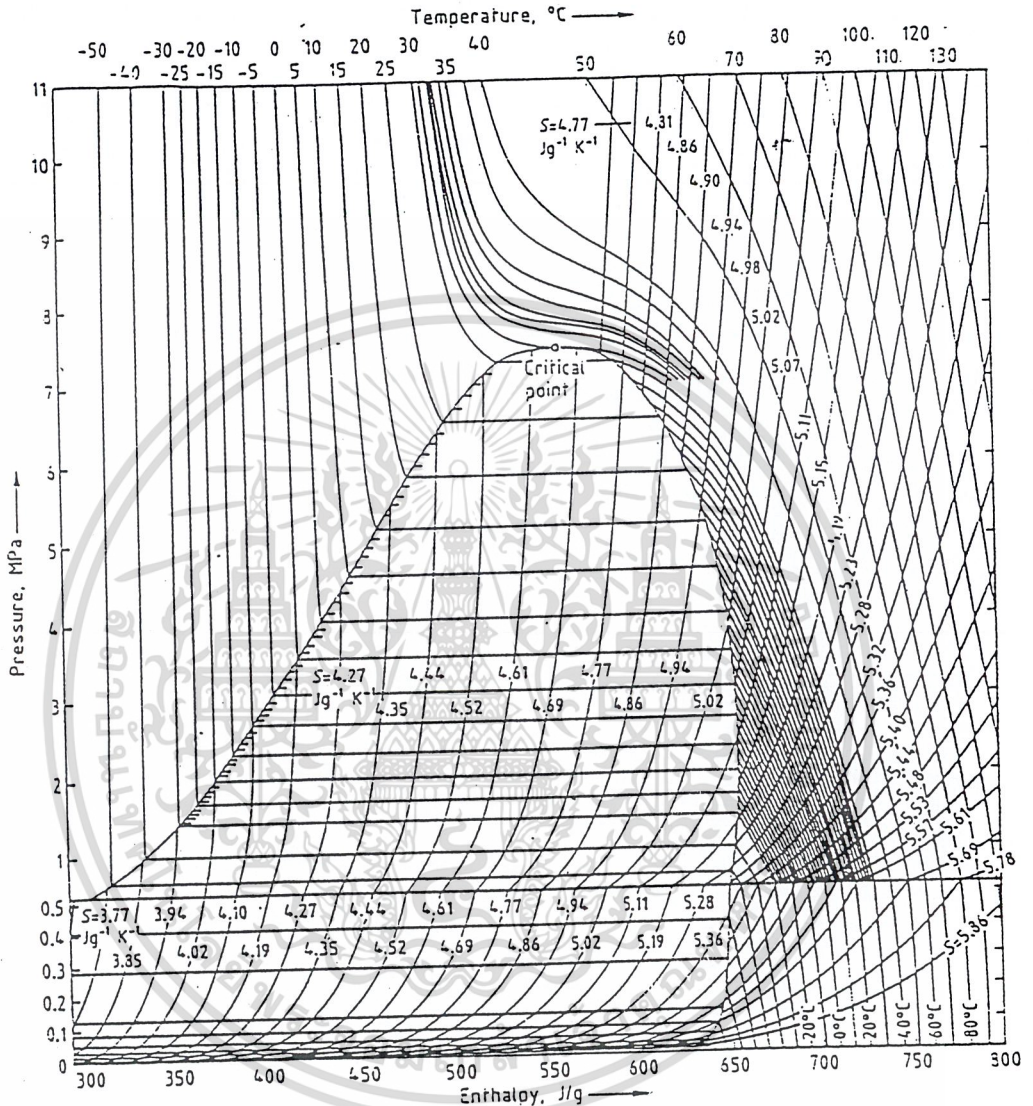
สำหรับสมบัติทั่วไปของคาร์บอนไดออกไซด์เป็นไปดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 [13]

ตารางที่ 2.1 สมบัติทั่วไปของคาร์บอนไดออกไซด์

Gas density (0°C, 0.1 MPa)	1.977 kg/m ³ (STP)	Isothermal throttling effect (at 30°C and 243 kPa)	
Specific density (compared with air)	1.5291	$\epsilon = \left(\frac{\delta H}{\delta p}\right) T$	-9.04 cm ³ /g
Molar heat c_p at 25°C	37.13 J mol ⁻¹ K ⁻¹	Adiabatic throttling effect (Joule-Thomson effect) at 101.3 kPa	
Entropy S_0	213 J mol ⁻¹ K ⁻¹	$\mu = \left(\frac{\delta T}{\delta p}\right) H = \frac{-\epsilon}{c_p}$	
Heat of formation ΔH	-393.51 kJ/mol	at -50°C	24.130°C MPa ⁻¹
Free energy of formation ΔG_0	-394.2 kJ/mol	at -25°C	16.500°C MPa ⁻¹
Specific heat c_p (gas, 0.1 MPa)		at 0°C	12.900°C MPa ⁻¹
at 0°C	0.3277 J g ⁻¹ K ⁻¹	at +50°C	8.950°C MPa ⁻¹
at 20°C	0.3459 J g ⁻¹ K ⁻¹	Adiabatic throttling effect at 20°C	
at 60°C	0.3833 J g ⁻¹ K ⁻¹	at 0.1013 MPa	11.050°C MPa ⁻¹
Specific heat c_p (gas, 20°C)		at 2.026 MPa	11.355°C MPa ⁻¹
at 1 MPa	0.9225 J g ⁻¹ K ⁻¹	at 6.078 MPa	1.435°C MPa ⁻¹ (condensation)
at 4 MPa	1.473 J g ⁻¹ K ⁻¹	Thermal expansion coefficient γ	
Molar heat (under saturated vapor)		gas, at 0°C, 98.1 kPa	375.1 × 10 ⁻⁵ K ⁻¹
solid, at -123°C	40.1 J mol ⁻¹ K ⁻¹	20°C, 98.1 kPa	374.2 × 10 ⁻⁵ K ⁻¹
at -63°C	53.6 J mol ⁻¹ K ⁻¹	liquid, -50 to 0°C	495 × 10 ⁻⁵ K ⁻¹
liquid, at -43°C	82.0 J mol ⁻¹ K ⁻¹	solid at triple point	185.5 × 10 ⁻⁵ K ⁻¹
at -13°C	90.0 J mol ⁻¹ K ⁻¹	Thermal conductivity at 25°C, 0.1 MPa	1.64 × 10 ⁻⁴ W cm ⁻¹ K ⁻¹
at +17°C	130.2 J mol ⁻¹ K ⁻¹	Viscosity (constants in the Sutherland formula) at equilibrium	
Critical data		liquid-gas at 20°C	
Temperature	31.04°C	gas	20.3 × 10 ⁻⁶ Pa s
Pressure	7.383 MPa	liquid	70.1 × 10 ⁻⁶ Pa s
Density	468 kg/m ³	Dielectric constant ϵ	
Triple point		liquid -5°C	1.60
Temperature	-56.57°C	liquid 0°C	1.58
Pressure	518 kPa	$\epsilon - 1$ (gas, 0°C, 0.1 MPa)	989 × 10 ⁻⁶
Heat of vaporization	347.86 J/g	CO ₂ diffusion	
Heat of fusion	195.82 J/g	in air at 0°C	0.1420 cm ² s ⁻¹
Sublimation point		40°C	0.1772 cm ² s ⁻¹
Temperature	-78.92°C	in H ₂ at 27°C	0.806 cm ² s ⁻¹
Pressure	97.07 kPa	127°C	1.272 cm ² s ⁻¹
Heat of sublimation	573.02 J/g	277°C	2.09 cm ² s ⁻¹
Gas constant R	8.48 J K ⁻¹ mol ⁻¹		
Correction factor λ_0 for the ideal gas equation	-9.2 × 10 ⁻⁶		
Van der Waals' constants for molar volume			
a	3.648 × 10 ⁻⁷ MPa cm ⁶ mol ⁻²		
b	42.672 cm ³ /mol		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างเอนทาลปี (Enthalpy; H) อุณหภูมิ (Temperature; T) และ เอนโทรปี (Entropy; S) ของคาร์บอนไดออกไซด์แสดงไว้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเอนทาลปี-อุณหภูมิ-เอนโทรปี ของ คาร์บอนไดออกไซด์ [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 สมบัติทางเคมี

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ตัวสุดท้ายที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reaction) ของคาร์บอน คาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิปกติจะอยู่ในสถานะก๊าซและไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยามากนัก โมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ค่อนข้างเสถียร ไม่สามารถทำให้สลายตัวไปเป็นสารประกอบอื่นได้ง่าย การสลายตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิสูง ที่มีแสงอัลตราไวโอเล็ต หรือที่มีประจุไฟฟ้า ปฏิกิริยาการสลายตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นไปดังสมการ (2.1)



ข้อมูลทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับการเกิดหรือการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ แสดงไว้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับการเกิดหรือการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ [13]

Temperature K	Per mole CO ₂ in the ideal gas state				Equilibrium constant K _p for formation of CO ₂ from graphite and CO			
	Specific heat c _p	Enthalpy function $\frac{h - h_0}{T}$	Entropy S	Free enthalpy function $\frac{G - G_0}{T}$	$-R \ln K_p = \frac{\Delta I_0}{T} + \sum v_i \frac{G - I_0}{T}$		$\text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2 - \text{CO}_2$	
	$p_{\text{CO}_2} = 0$ JK ⁻¹ mol ⁻¹	$p_{\text{CO}_2} = 0$ JK ⁻¹ mol ⁻¹	$p_{\text{CO}_2} = 101.3 \text{ kPa}$ JK ⁻¹ mol ⁻¹	$p_{\text{CO}_2} = 0$ JK ⁻¹ mol ⁻¹	$\Delta I_0 = -393.45 \text{ kJ/mol}$ log K _p	K _p	$\Delta I_0 = -279.54 \text{ kJ/mol}$ log K _p	K _p
0	0	0	0	0				
298.15	37.154	31.423	-182.356	213.782	69.0915	1.234×10^{69}	45.0437	1.106×10^{45}
300	37.237	31.465	-182.549	214.012	68.6680	4.656×10^{68}	44.7397	5.492×10^{44}
400	41.328	33.440	-191.873	225.313	51.5365	3.439×10^{51}	32.4096	2.568×10^{32}
500	44.640	35.360	-199.572	234.934	41.2582	1.812×10^{41}	25.0054	1.013×10^{25}
600	47.357	37.140	-206.150	243.291	34.4011	2.518×10^{34}	20.0649	1.161×10^{20}
800	51.498	40.242	-217.274	257.518	25.8266	6.709×10^{25}	13.8948	7.848×10^{13}
1000	54.407	42.797	-226.544	269.341	20.6768	4.751×10^{20}	10.1992	1.582×10^{10}
1500	58.573	47.461	-244.765	292.310	13.7986	6.290×10^{13}	5.2944	1.970×10^5
2000	60.709	50.555	-258.954	309.488	10.3258	2.117×10^{10}	2.8633	7.299×10^3
3000	62.802	54.345	-280.976	335.321	6.8437	6.977×10^6	0.5065	3.210

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับตารางที่ 2.3 เป็นข้อมูลเกี่ยวกับความดันไอ ความหนาแน่น และข้อมูลทางความร้อนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อิมตัว

ตารางที่ 2.3 ความดันไอ ความหนาแน่น และข้อมูลทางความร้อนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อิมตัว [13]

Temperature, °C	Pressure, kPa	Density, kg·m ⁻³		Enthalpy, J/g		Entropy, J g ⁻¹ K ⁻¹	
		Condensed phase	Gaseous phase	Condensed phase	Gaseous phase	Condensed phase	Gaseous phase
-100	13.97	1595	0.4298	45.636	630.951	2.5104	5.8908
- 90	37.27	1582	1.0902	56.940	637.231	2.5749	5.7435
- 80	89.62	1525	2.515	68.664	642.674	2.6373	5.6095
- 78.92	98.07			70.045	643.176	2.6435	5.5948
- 70	198.1	1545	5.386	82.061	646.861	2.7043	5.4860
- 60	409.7	1522	10.962	99.227	649.236	2.7863	5.3671
- 56.57	517.9	1513	13.797	105.507	649.373	2.8156	5.3273
- 56.57	517.9	1177.8	13.797	301.450	649.373	3.7200	5.3273
- 50	683.1	1152.6	18.03	314.052	651.340	3.7765	5.2883
- 40	1005.1	1113.6	26.21	333.227	653.853	3.8594	5.2348
- 30	1428.1	1072.7	37.04	352.487	655.485	3.9389	5.1854
- 20	1969.1	1029.3	51.33	372.322	656.407	4.0168	5.1380
- 10	2646.6	981.9	70.33	393.936	655.653	4.0976	5.0924
0	3481.7	928.5	96.25	418.680	653.685	4.1868	5.0472
10	4498.8	864.2	134.59	445.894	647.237	4.2781	4.9894
20	5728.9	777.7	193.90	477.295	632.625	4.3827	4.9128
31.04	7383.4	468.0	468.0	558.938	558.938	4.6465	4.6465

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 โมโนเอทานอลามีน (Monoethanolamine ; MEA)

เป็นสารประกอบเอมีนชนิดหนึ่ง ผลิตได้จากปฏิกิริยาระหว่างแอมโมเนียและเอทิลีนออกไซด์ (ethylene oxide) โมโนเอทานอลามีนเป็นสารละลายที่นิยมใช้ในการกำจัดก๊าซกรด เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ความดันต่ำ โดยเฉพาะเมื่อต้องการกำจัดก๊าซทั้งสองชนิดออกให้ได้ปริมาณมากที่สุด โมโนเอทานอลามีน มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และมีความเป็นด่าง (alkalinity) สูง จึงมีประสิทธิภาพในการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี นอกจากนี้ยังสามารถแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกและนำสารละลายกลับไปใช้ใหม่ได้ง่าย อีกประการหนึ่งคือโมโนเอทานอลามีนมีราคาต่อหน่วยน้ำหนักถูกกว่าสารละลายเอมีนอื่น ๆ จึงเป็นสารประกอบที่ได้รับความนิยมในการใช้งานมาก

ข้อเสียของโมโนเอทานอลามีนคือ ถ้าในก๊าซผสมมีสารประกอบคาร์บอนิลซัลไฟด์ (carbonyl sulfide, COS) และคาร์บอนไดซัลไฟด์ (carbon disulfide, CS₂) โมโนเอทานอลามีนจะทำปฏิกิริยาแบบไม่ผันกลับกับสารประกอบเหล่านี้ ทำให้เกิดการสูญเสียปริมาณโมโนเอทานอลามีนที่เป็นตัวดูดซึมไป นอกจากนี้สารละลายโมโนเอทานอลามีนยังมีความกัดกร่อนมากกว่าสารละลายเอมีนชนิดอื่น โดยเฉพาะถ้าความเข้มข้นของสารละลายมากกว่า 20% โดยน้ำหนัก และก๊าซกรดในก๊าซผสมมีปริมาณสูง

2.2.1 สมบัติทางกายภาพ

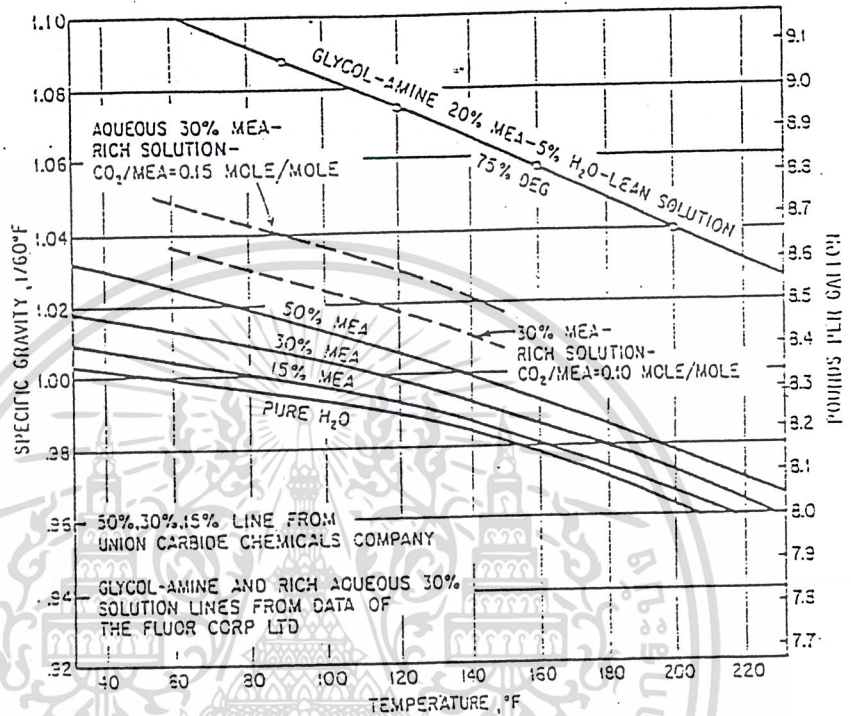
โมโนเอทานอลามีนที่อุณหภูมิห้องมีลักษณะเป็นของเหลวที่มีลักษณะใส ไม่มีสี สูตรโมเลกุลคือ C₂H₇NO มีชื่อทางเคมี (chemical abstract name) ว่า 2-aminoethanol สมบัติของโมโนเอทานอลามีนเป็นดังต่อไปนี้

สูตรโครงสร้าง	HO-CH ₂ CH ₂ -NH ₂
น้ำหนักโมเลกุล	61.08
จุดหลอมเหลว	10.53 °C
จุดเดือดที่ 101.3 kPa	170.3 °C
ความหนาแน่นที่ 20 °C	1.0157 g cm ⁻³
ค่าความร้อนในการระเหย (heat of vaporization) ที่ 101.3 kPa	848.1 kJ kg ⁻¹
ค่าความหนืด (viscosity) ที่ 20 °C	23.2 cP
แรงตึงผิว (surface tension) ที่ 20 °C	0.049 N m ⁻¹

จุดวาบไฟ (flash point) 94.5 °C ขนด้านการค้า

อุณหภูมิที่จุดระเบิดได้ (ignition temperature) 410 °C การนำไปใช้

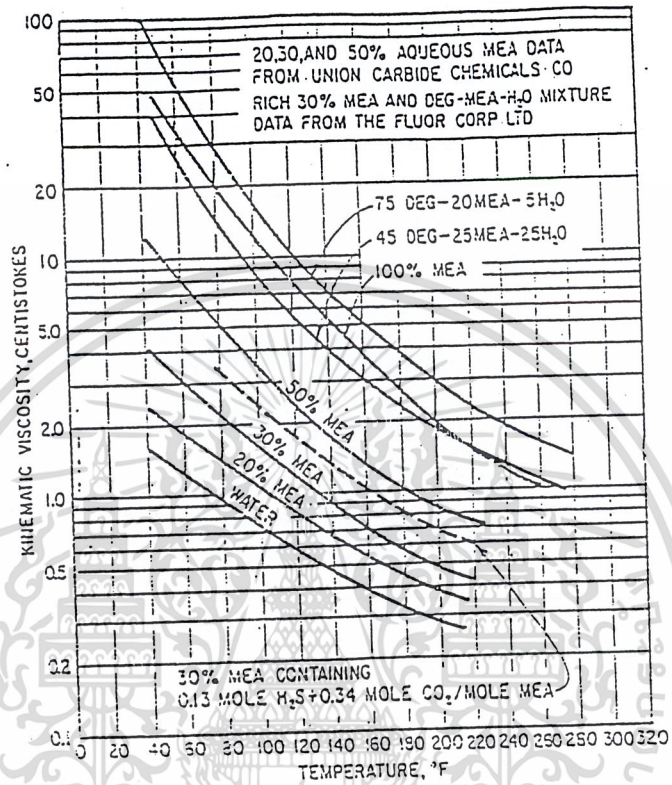
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) กับอุณหภูมิของสารละลาย
 โมนอเอทาโนลามีน แสดงดังในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะกับอุณหภูมิของสารละลายโมนอเอทาโนลามีน [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

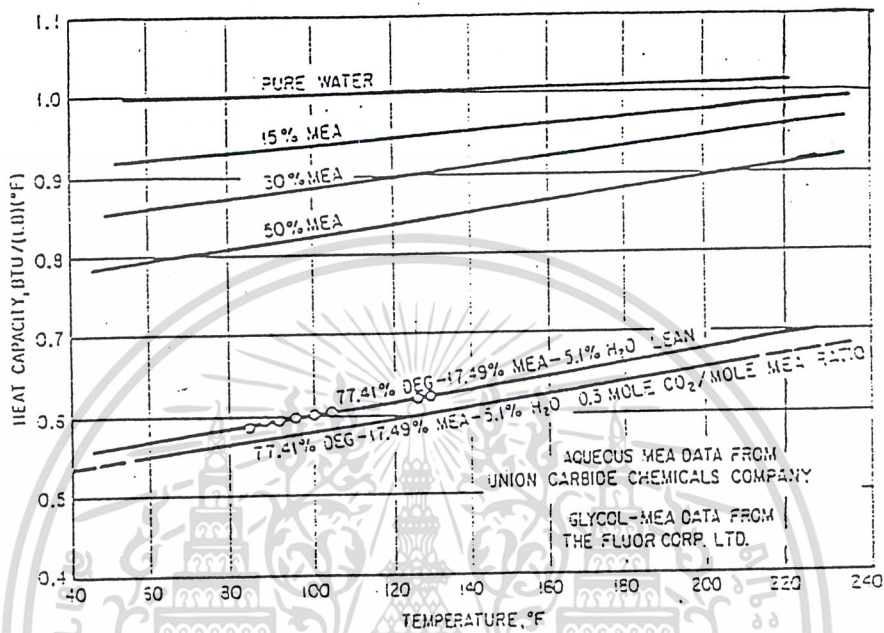
สำหรับรูปที่ 2.4 เป็นการแสดงค่าความหนืดไคเนเมติก (kinematic viscosity) ของสารละลายโมโนเอทานอลามีนความเข้มข้นต่าง ๆ ณ อุณหภูมิต่าง ๆ กัน



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดไคเนเมติกกับอุณหภูมิของสารละลายโมโนเอทานอลามีนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุความร้อนของสารละลายโมโนเอทาโนลามีนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ซึ่งสัมพันธ์กับอุณหภูมิแสดงไว้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุความร้อนของสารละลายโมโนเอทาโนลามีนกับอุณหภูมิ [2]

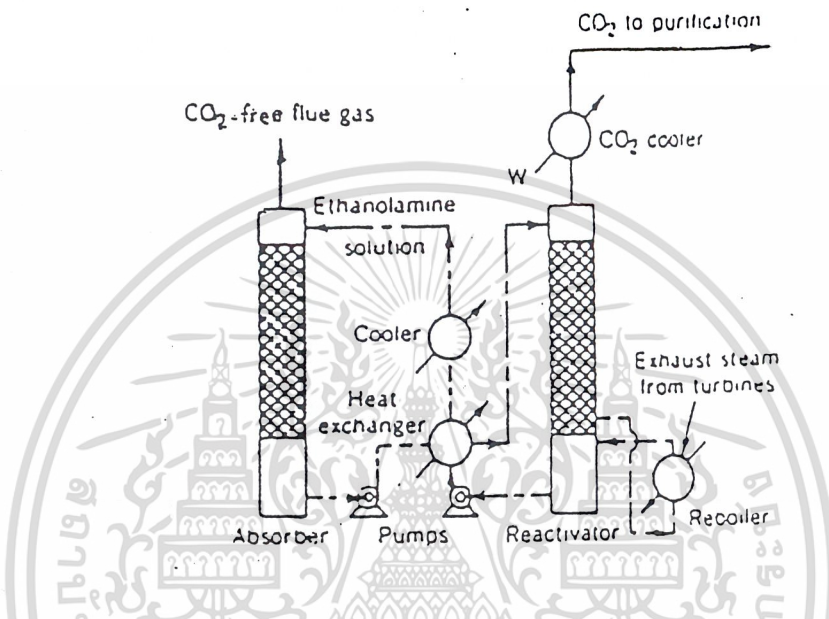
2.2.2 สมบัติทางเคมี

เนื่องจากมีทั้งหมู่ไฮดรอกซิลและอะตอมของไนโตรเจนอยู่ในโมเลกุล โมโนเอทาโนลามีนจึงมีสมบัติทางเคมีคล้ายกับทั้งสารประกอบเอมีนและแอลกอฮอล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายเอทานอลามีน

กระบวนการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายเอทานอลามีนมักมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ Girbotol Amine Process [10]

จากรูปที่ 2.6 กระแสของก๊าซผสมที่ต้องการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจะถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซับทางด้านล่าง และไหลสวนทางกับสารละลายเอทานอลามีนที่ใช้เป็นตัวดูดซับซึ่งไหลลงมาทางด้านบนของหอ กระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นในหอดูดซับนี้

สารละลายที่ออกทางด้านล่างของหอดูดซับซึ่งเป็นสารละลายที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ปนอยู่ในปริมาณมาก (Rich solution) จะรับความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกับสารละลายที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่น้อย (Lean solution) ซึ่งออกมาจากหอแยกสารละลายกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Reactivator หรือ Stripper) เมื่อรับความร้อนแล้วก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะระเหยแยกออกจากสารละลายเอทานอลามีน

สารละลายที่ออกทางด้านล่างของหอแยกจะมีอุณหภูมิสูง และถูกใช้เป็นตัวให้ความร้อนแก่สารละลายที่ออกจากหอดูดซับ จากนั้นจึงถูกทำให้เย็นและนำกลับไปใช้ในกระบวนการดูดซับใหม่ววนเวียนอยู่เช่นนี้ตลอดกระบวนการ

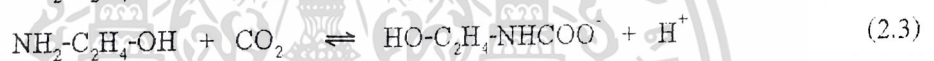
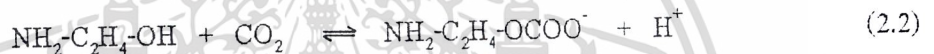
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกแยกออกจากสารละลายเอทานอลามีนนั้น เมื่อออกจากหม้อแยกแล้วจะถูกทำให้เย็นลงเพื่อให้ไอน้ำกลั่นตัวแยกออกจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก่อนที่จะถูกนำไปทำให้บริสุทธิ์หรือนำไปสู่ส่วนอื่นตามวัตถุประสงค์การใช้งานต่อไป

ความสามารถในการละลาย (solubility) ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลายโมโนเอทานอลามีนนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารละลาย และความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

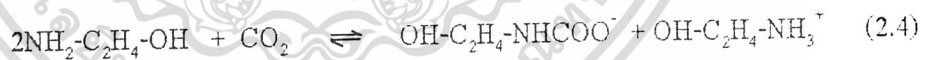
2.3.1 ปฏิกริยาระหว่างโมโนเอทานอลามีนกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ [16, 17]

เนื่องจากโมโนเอทานอลามีนมีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่ ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ทั้ง 2 หมู่ฟังก์ชัน ปฏิกิริยาเคมีระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับโมโนเอทานอลามีนจึงเป็นไปดังสมการ (2.2) และ (2.3)



ปฏิกิริยา (2.2) เกิดขึ้นเฉพาะในสารละลายด่างที่มีค่า pH มากกว่า 11 ดังนั้นอาจถือได้ว่าปฏิกิริยานี้ไม่เกิดขึ้นในกรณีที่สารละลายเป็นคาร์บอนเตเล็กน้อย

เมื่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกดูดซึมเข้าไปในสารละลายโมโนเอทานอลามีนจะเกิดปฏิกิริยาขึ้นดังนี้ [16]



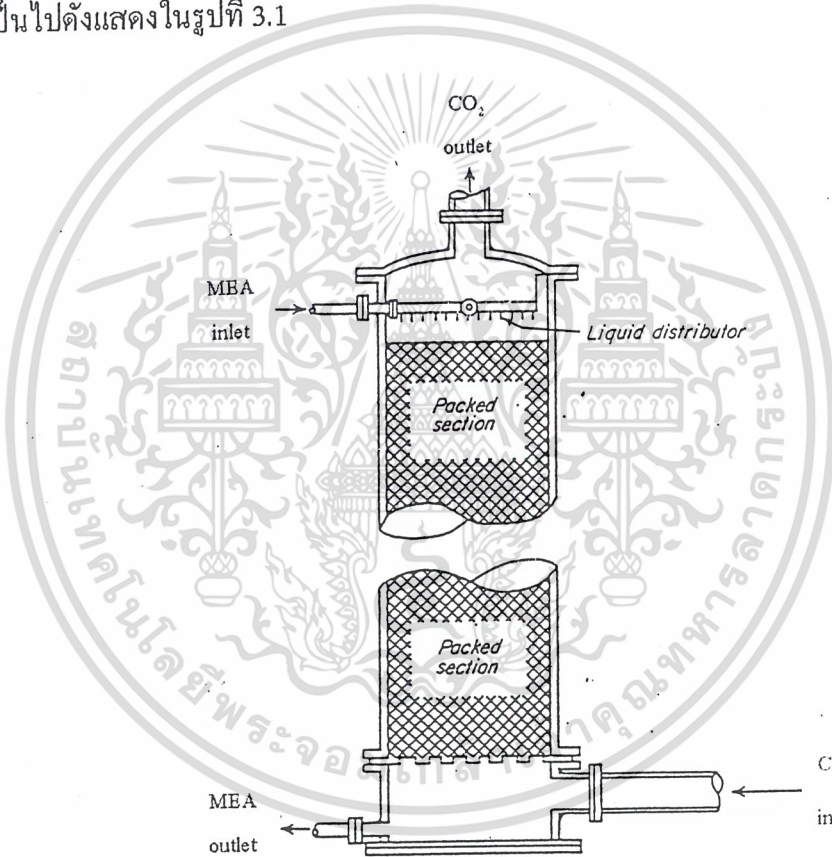
ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาผันกลับที่เกิดได้คือที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นเมื่อนำเกลือที่ได้ไปให้ความร้อนจะทำให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลายโมโนเอทานอลามีนออกมาเช่นเดิม ปฏิกิริยานี้ใช้กันอย่างแพร่หลายในกระบวนการอุตสาหกรรม เช่น การกำจัดก๊าซกรดออกจากก๊าซธรรมชาติ หรือที่เรียกว่า กระบวนการ sweetening เป็นต้น

บทที่ 3

การดูดซึมที่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น

จากการศึกษาพบว่า การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายโมโนเอธาโนลามีน เป็นกระบวนการดูดซึมที่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นด้วย [1, 2,14] โดยปฏิกิริยาระหว่างโมโนเอธาโนลามีน กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นไปดังที่แสดงไว้ในบทที่ 2

การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายโมโนเอธาโนลามีน ในหอดูดซึมแบบแพคเป็นไปดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยสารละลายโมโนเอธาโนลามีนในหอดูดซึมแบบแพค [15]

ขณะที่ของไหลไหลผ่านหอดูดซึม ของไหลทั้งสองวัฏภาคจะสัมผัสกันตลอดความสูงของหอ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคก๊าซจะถ่ายเทเข้าไปยังวัฏภาคของเหลว ส่งผลให้อัตราการดูดซึมของของไหลและความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในทั้งสองวัฏภาคเปลี่ยนแปลงตามความสูงของหอ

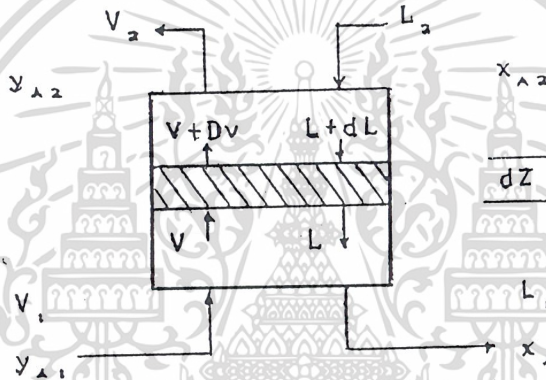
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสูงของหอดูดซึม ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาค ก๊าซกับความสูง ของหอดูดซึมหาได้จากการทำสมดุลมวลสารรอบหอดูดซึม

สมมติฐานสำหรับการทำสมดุลมวลสารรอบหอดูดซึม

- 1) สภาพของหอไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (steady-state condition)
- 2) ปฏิกริยาระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับโมโนเอทานอลามีนเกิดในเนื้อของเหลวเท่านั้นไม่เกิดขึ้นในระหว่างที่มีการถ่ายเทมวลจากวัฏภาคก๊าซไปยังวัฏภาคของเหลว

เมื่อแบ่งหอดูดซึมตามความสูงออกเป็นส่วนเล็ก ๆ และทำสมดุลมวลสารย่อยรอบส่วนเล็กๆ นี้จะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การทำสมดุลมวลสารย่อยรอบหอดูดซึม

เมื่อกำหนดให้

- V = อัตราการไหลเชิงโมลของวัฏภาคก๊าซ
- L = อัตราการไหลเชิงโมลของวัฏภาคของเหลว
- y_A = เศษส่วนโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในวัฏภาคก๊าซ
- x_A = เศษส่วนโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในวัฏภาคของเหลว
- z = ความสูงของหอ

ตัวห้อย 1 หมายถึงส่วนก้นหอดูดซึม

ตัวห้อย 2 หมายถึงส่วนยอดหอดูดซึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการมวลสารรอบส่วนย่อยของหลอดเข็มเขียนได้เป็น

อัตราสะสมของสาร = อัตราไหลเข้าสู่สุทธิของสาร + อัตราการผลิตสารขึ้นใหม่

ในระบบนี้ถือว่าไม่มีการสะสมของสาร และไม่มีการผลิตสารขึ้นใหม่ดังนั้นอัตราไหลเข้าสู่สุทธิของสารรอบส่วนย่อยนี้เป็นศูนย์ หรือกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่า อัตราการไหลเข้าของสารเท่ากับอัตราการไหลออกของสาร

$$V + (L+dL) = L + (V+dV) \tag{3.1}$$

$$dL = dV \tag{3.2}$$

สำหรับสมการมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รอบส่วนย่อยนี้เขียนได้เป็น

$$Vy_A + (L+dL)(x_A+dx_A) - Lx_A - (V+dV)(y_A+dy_A) = 0 \tag{3.3}$$

$$Vy_A + (Lx_A + x_A dL + Ldx_A + dLdx_A) - Lx_A - (Vy_A + y_A dV + Vdy_A + dVdy_A) = 0 \tag{3.4}$$

$dLdx_A$ และ $dVdy_A$ เป็นผลคูณของค่าที่น้อย จึงมีค่าที่น้อยมาก สามารถตัดทิ้งได้ ดังนั้นสามารถจัดสมการ (3.4) ใหม่ได้เป็น

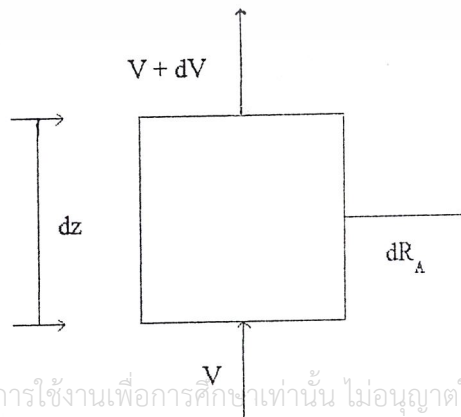
$$d(Lx_A) = d(Vy_A) \tag{3.5}$$

พิจารณาและทำสมการมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉพาะรอบวัฏภาคก๊าซในส่วนย่อยดังกล่าว โดยกำหนดให้ dR_A เป็นอัตราการถ่ายเทมวลย่อยจากวัฏภาคก๊าซไปยังวัฏภาคของเหลว จะได้ว่า

$$Vy_A - (V+dV)(y_A+dy_A) - dR_A = 0 \tag{3.6}$$

$$d(Vy_A) = dR_A \tag{3.7}$$

อัตราการถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังกล่าวมีทิศทางแสดงดังรูปที่ 3.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะการถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคก๊าซ

และสามารถคำนวณค่าอัตราการถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้จาก

$$\text{วิฤภาคก๊าซ : } dR_A = k_G (P_A - P_{A'}) dA_x \tag{3.8}$$

$$\text{วิฤภาคของเหลว : } dR_A = k_L^\circ (C_{Ai} - C_{Ab}) dA_x \tag{3.9}$$

โดย dA_x เป็นพื้นที่ผิวสัมผัสที่มีการถ่ายเทมวลภายในส่วนย่อยที่กำลังพิจารณา การถ่ายเทมวลจะมีทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่ผิวนี้ ดังนั้น dA_x สามารถเขียนแยกออกเป็น

$$dA_x = aAdz \tag{3.10}$$

เมื่อ a = พื้นที่ที่มีการถ่ายเทมวลผ่าน ต่อปริมาตรของส่วนย่อยที่กำลังพิจารณา
 A = พื้นที่ตัดขวางของหอคอยดูดซึม
 dz = ส่วนสูงของส่วนย่อยที่กำลังพิจารณา

แทนค่า dA_x ลงในสมการ (3.8) และ (3.9) จะได้

$$\text{วิฤภาคก๊าซ : } dR_A = k_G (P_A - P_{A'}) aAdz \tag{3.11}$$

$$\text{วิฤภาคของเหลว : } dR_A = k_L^\circ (C_{Ai} - C_{Ab}) aAdz \tag{3.12}$$

แทนค่า จากสมการ (3.7) ลงในสมการ (3.11) และ (3.12) จะได้

$$\text{วิฤภาคก๊าซ : } d(Vy_A) = k_G (P_A - P_{A'}) aAdz \tag{3.13}$$

$$\text{วิฤภาคของเหลว : } d(Vy_A) = k_L^\circ (C_{Ai} - C_{Ab}) aAdz \tag{3.14}$$

การคำนวณขั้นต่อไปจะแยกออกเป็น 2 กรณี คือ

1. เมื่อกำหนดให้อัตราการไหลเชิงโมลของวิฤภาคก๊าซ (V) มีค่าคงที่ตลอดความสูงของหอคอยดูดซึม

$$y_A = \frac{P_A}{P_T} \tag{3.15}$$

โดย P_T คือ ความดันรวมของระบบ

สมการ (3.14) จะเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงบนสื่อออนไลน์ของสงขลานครินทร์

$$\frac{dP_A}{dz} = \frac{-k_L^\circ (C_{Ai} - C_{Ab}) aAP_T}{V} \tag{3.16}$$

สมการ (3.16) แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปของความดันกับความสูงของหอคอยดูดซึม เมื่อกำหนดให้อัตราการไหลของก๊าซมีค่าคงที่ เมื่ออินทิเกรตทั้งสองข้างของสมการการถ่ายเทมวล (3.8) และ (3.9) จะได้

$$R_A = k_G (P_A - P_{A_i}) A_x \quad (3.17)$$

$$R_A = k_L^o (C_{A_i} - C_{A_b}) A_x \quad (3.18)$$

ซึ่งสามารถจัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{R_A}{A_x} = N_A = k_L^o (C_{A_i} - C_{A_b}) = k_G (P_A - P_{A_i}) \quad (3.19)$$

จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคก๊าซ (P_A) กับความสูงของหอคอยดูดซึม (z) ดังสมการที่ (3.20)

$$\frac{dP_A}{dz} = -\frac{N_A a A P_T}{V} \quad (3.20)$$

2. เมื่อคิดว่าอัตราการไหลเชิงโมลของตัวทำละลายคงที่ตลอดความสูงของหอคอยดูดซึม

เมื่อไม่คิดรวมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ค่าอัตราการไหลของทั้งสองวัฏภาคจะคงที่ตลอดความสูงของหอ

กำหนดให้ V' คืออัตราการไหลของวัฏภาคก๊าซที่ไม่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จะได้ว่า

$$V' = \frac{V(1-y_A)}{1-y_A} \quad (3.21)$$

$$V y_A = \frac{V' y_A}{1-y_A} \quad (3.22)$$

$$d(V y_A) = V' d \frac{y_A}{1-y_A} \quad (3.23)$$

$$d(V y_A) = V' d \frac{P_A}{P_T - P_A} \quad (3.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารสมการ (3.14) จะเป็นการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิ $\frac{dP_A}{dz} = -\frac{N_A a A (P_T - P_A)}{V'}$ แปลงเนื้อหาคณิตศาสตร์ของเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ (3.25)

แทนค่าสมการ (3.19) ลงในสมการ (3.25) จะได้สมการ (3.26)

$$\frac{dP_A}{dz} = -\frac{k_L^\circ(C_{Ai} - C_{Ab})aA(P_T - P_A)}{V'} \quad (3.26)$$

สมการ (3.26) แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคก๊าซในรูปความดันกับความสูงของหอคูดซิม เมื่อคิดว่าอัตราการไหลของทั้งสองวัฏภาคคงที่ ในงานวิจัยนี้ถือว่ากระแสก๊าซที่นำมาคูดซิมมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณไม่มาก และไม่ก่อให้เกิดอัตราการไหลของวัฏภาคของเหลวเกิดการเปลี่ยนแปลง ด้วยเหตุนี้จึงสร้างแบบจำลองการคูดซิมที่มีสมมุติฐานว่าอัตราการไหลของวัฏภาคก๊าซคงที่เท่านั้น

สำหรับการคูดซิมแบบที่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นนั้น อัตราการถ่ายเทมวลจะสูงขึ้นกว่าการคูดซิมที่ไม่มีปฏิกิริยาเคมี อิทธิพลของปฏิกิริยาเคมีต่ออัตราการคูดซิมก๊าซสามารถแสดงด้วยทอมของเอนฮานซ์เมนต์แฟกเตอร์(Enhancement Factor; E) สำหรับวิธีการคำนวณค่าเอนฮานซ์เมนต์แฟกเตอร์สำหรับปฏิกิริยาแต่ละชนิดจะต่างกันออกไปตามกลไกของปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การดูดซึมในของเหลวที่มีการเคลื่อนที่

4.1 การดูดซึมทางกายภาพ

ก๊าซที่ถูกดูดซึม โดยของเหลวจะไม่ทำปฏิกิริยากับสารที่ละลายอยู่ในของเหลว อัตราเร็วในการดูดซึมของก๊าซเป็นไปตามสมการ (4.1)

$$Ra = k_L a (C_{Ai} - C_{Ao}) \quad (4.1)$$

โดย C_{Ai} คือ ความเข้มข้นของก๊าซที่อยู่ในสมดุลกับของเหลวที่สถานะความดันหนึ่งๆ
 a คือ พื้นที่ผิวที่เปียกของเหลวของแพคเกจต่อปริมาตรของเบค (ตารางเมตร/ลูกบาศก์เมตร)
 k_L คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลทางกายภาพ
 R คือ อัตราเร็วเฉลี่ยในการถ่ายเทมวลของก๊าซต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่
 C_{Ao} คือ ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของก๊าซในของเหลว

ทฤษฎีฟิล์ม

ทฤษฎีนี้กล่าวไว้ว่ารอยต่อระหว่างผิวของของไหล 2 ภูมิภาคมีลักษณะเป็นฟิล์มบางๆ และการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกละลายในฟิล์มนี้อยู่ในสถานะคงตัว (Steady state)

ทฤษฎีนี้นำไปสู่สมการ

$$\bar{R} = \frac{D_A (C_{Ai} - C_{Ao})}{\delta} \quad (4.2)$$

เมื่อ $k_L = \frac{D_A}{\delta}$

โดย δ คือ ความหนาของชั้นฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การดูดซึมทางเคมี

4.2.1 ปฏิริยาผันกลับไม่ได้อันดับหนึ่ง

ในกรณีนี้ก๊าซที่ถูกดูดซึมโดยของเหลวจะทำปฏิริยากับสารที่ละลายอยู่ในของเหลวโดยที่ปฏิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิริยาผันกลับไม่ได้อันดับหนึ่ง อัตราเร็วของปฏิริยาต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรคือ

$$r = k_1 a \quad (4.3)$$

โดย k_1 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิริยาอันดับหนึ่ง
 a คือ ความเข้มข้นของก๊าซที่ตำแหน่งใดๆในของเหลว
 สมการการแพร่ในกรณีนี้คือ

$$D_A = \frac{d^2 a}{dx^2} = k_1 a \quad (4.4)$$

โดยที่ $x = 0, a = C_{Ai}$
 $x = \delta, a = C_{Ao}$

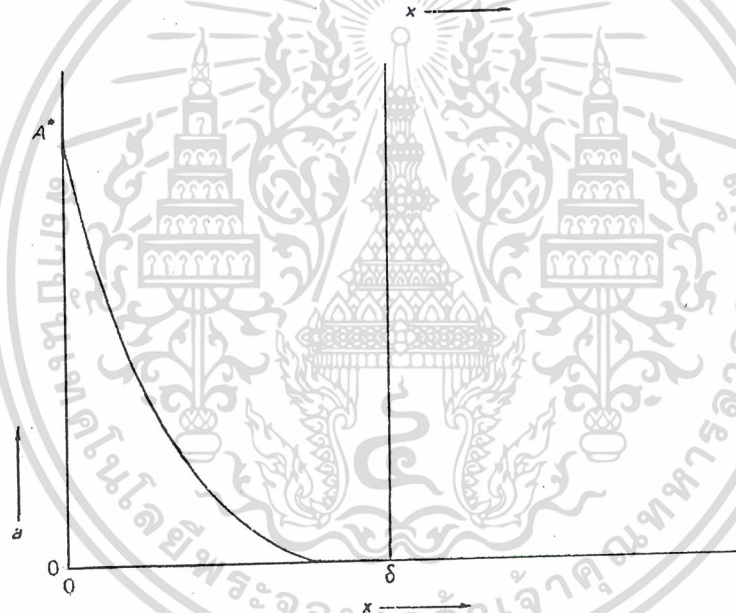
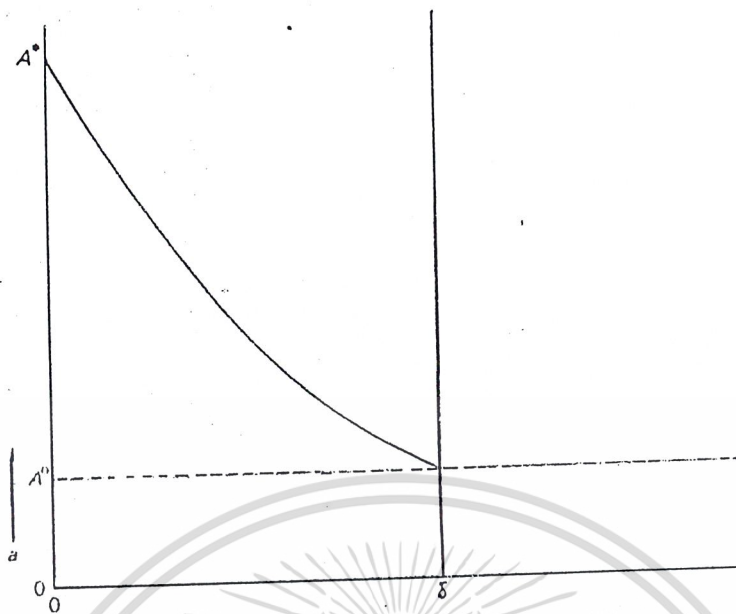
เมื่อ $\delta = \frac{D_A}{k_L}$

ทำการแก้สมการแล้วจะได้ว่า

$$a = \frac{1}{\sinh \sqrt{M}} \left[A^0 \sinh x \sqrt{\frac{k_1}{D_A}} + A^* \sinh \left(\frac{D_A}{k_L} - x \right) \sqrt{\frac{k_1}{D_A}} \right] \quad (4.5)$$

เมื่อ $M = \frac{D_A k_1}{k_L^2}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 แสดงโปรไฟล์ความเข้มข้นของดาว A เมื่อปฏิบัติริยาเป็นแบบอันดับหนึ่งไม่ผันกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราเร็วในการดูดซึมคือ

$$\bar{R} = -D_A \left(\frac{da}{dx} \right)_{x=0} = k_L \left(C_{Ai} - \frac{C_{Ao}}{\cosh \sqrt{M}} \right) \frac{\sqrt{M}}{\tanh \sqrt{M}} \quad (4.6)$$

เมื่อ $\sqrt{M} \gg 1$, $C_{Ao} \rightarrow 0$ จากสมการ (4.2) จะได้ว่า

$$\bar{R} = C_{Ai} \sqrt{(D_A k_1)} \quad (4.7)$$

จาก $E = \frac{R_{Chem}}{R_{Phy}} \quad (4.8)$

โดย R_{Chem} คือ อัตราการดูดซึมเมื่อมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น
 R_{Phy} คือ อัตราการดูดซึมที่ไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น

ดังนั้นในกรณีนี้

$$E_{ii} = \sqrt{(D_A k_1) / k_L} = \sqrt{M} \quad (4.9)$$

เมื่อ

$$\sqrt{M} \gg 1$$

ก๊าซทั้งหมดจะทำปฏิกิริยาภายในชั้นฟิล์มและ ไม่มีก๊าซแพร่ไปยังส่วนอื่นๆ ของเหลว

4.2.2 ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและผันกลับไม่ได้

1 โมล ของก๊าซ A จะทำปฏิกิริยากับ n โมล ของ B ให้ผลิตภัณฑ์เป็น y โมล ของ P โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาผันกลับไม่ได้และเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว



ก๊าซและสารตั้งต้นจะแพร่ไปยังระนาบที่เกิด ปฏิกิริยาโดยระนาบนี้จะอยู่ห่างจากผิวรอยต่อเป็น ระยะทาง δ' สาร B จะต้องแพร่ไปยังระนาบ นี้ด้วยอัตราเร็วที่มากกว่าก๊าซ A z เท่า

$$z \frac{D_A C_{Ai}}{\delta'} = \frac{D_B C_{Bb}}{\delta} \quad (4.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าการ และ สาร P จะต้องแพร่ออกจากกระนาบด้วยอัตราเร็วมากกว่าสาร A y เท่าเช่นเดียวกัน

$$y \frac{D_A C_{Ai}}{\delta^0} = \frac{D_P P^*}{\delta - \delta^0} \quad (4.12)$$

จากสภาวะเช่นนี้ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \bar{R} &= \frac{D_A C_{Ai}}{\delta^0} = \frac{D_A C_{Ai}}{\delta} \left(1 + \frac{D_B C_{Bb}}{n D_A C_{Ai}} \right) \\ &= k_L C_{Ai}^* \left(1 + \frac{D_B C_{Bb}}{n D_A C_{Ai}} \right) \\ &= k_L C_{Ai} E_i \end{aligned} \quad (4.13)$$

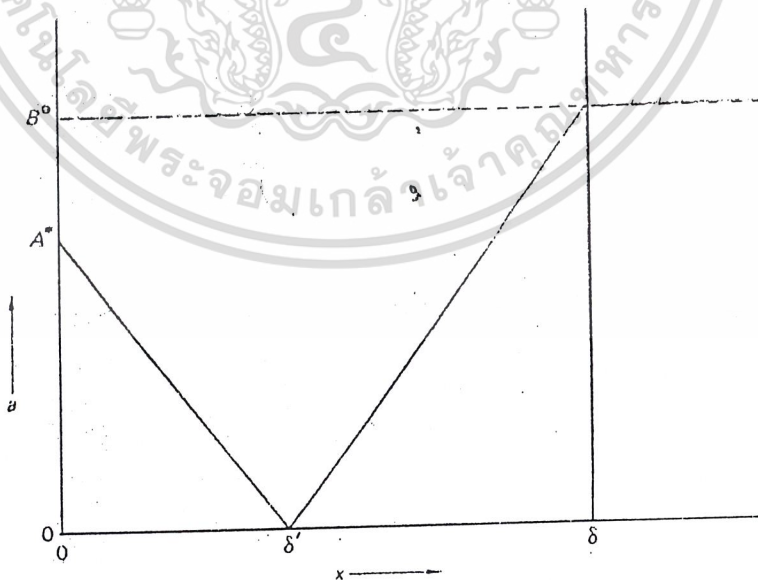
และ

$$P^* = C_{Bb} \frac{y D_B}{n D_P} \quad (4.14)$$

ในกรณีที่ $n D_A C_{Ai} \ll D_B C_{Bb}$ (ในทางปฏิบัติเมื่อ $C_{Ai} \ll C_{Bb}$) อัตราเร็วในการดูดซึมคือ

$$\bar{R} \approx k_L \frac{D_B C_{Bb}}{n D_A} \quad (4.15)$$

อัตราเร็วในการดูดซึมไม่ขึ้นอยู่กับ C_{Ai} แต่จะขึ้นอยู่กับอัตราเร็วในการแพร่ของสาร B ไปยังระนาบ



รูปที่ 4.2 แสดงโปรไฟล์ความเข้มข้นของสาร A เมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ปฏิกริยาอันดับ m ไม่ผันกลับ

ถ้าอัตราเร็วของปฏิกริยาของก๊าซเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของมันยกกำลัง m

$$r = k_m a^m \quad (4.16)$$

สมการสำหรับการแพร่และปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในชั้นฟิล์ม (ในกรณีที่มีความเข้มข้นของก๊าซ A ในตัวของเหลวมีค่าเป็น 0) คือ

$$D_A \frac{d^2 a}{dx^2} - k_m a^m = 0 \quad (4.17)$$

เมื่อ

$$x = 0, \quad a = C_{Ai}$$

$$x = \delta, \quad a = 0$$

ซึ่งสามารถแก้สมการหาค่า $\frac{da}{dx}$ ได้

$$\frac{da}{dx} = -\sqrt{\left(\frac{2k_m a^{m+1}}{(m+1)D_A} + C\right)} \quad (4.18)$$

ค่าคงที่จากการอินทิเกรต, C , สามารถหาได้โดยใช้สภาวะดังนี้

$$-D_A \frac{da}{dx} \Big|_{x=0} = \bar{R} \text{ (the rate of absorption)} \quad (4.19)$$

และ

$$a = C_{Ai}$$

ดังนั้น

$$C = \left(\frac{\bar{R}}{D_A}\right)^2 - \frac{2k_m (C_{Ai})^{m+1}}{(m+1)D_A} \quad (4.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (4.17) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\frac{d\varepsilon}{d\xi} = -\sqrt{M} \sqrt{\left(\varepsilon^{m+1}\right) + \frac{E^2}{M} - 1} \quad (4.21)$$

เมื่อ

$$\varepsilon = \frac{a}{C_{Ai}}$$

$$\xi = \frac{x}{\delta} = \frac{xk_L}{D_A}$$

$$E = \frac{\bar{R}}{k_L C_{Ai}}$$

และ

$$M = \frac{1}{k_L^2} \left[\frac{2D_A k_m (C_{Ai})^{m-1}}{(m+1)} \right] \quad (4.22)$$

ทำการอินทิเกรตจาก $\xi = 0, \varepsilon = 1$ จนถึง $\xi = 1, \varepsilon = 0$

$$\int_0^1 \frac{d\varepsilon}{\sqrt{\left(\varepsilon^{m+1} + \frac{E^2}{M} - 1\right)}} = \sqrt{M} \quad (4.23)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังสองของแอนฮาร์โมนิคเมนต์แฟกเตอร์ (E^2) กับ ค่า M แสดงไว้
ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังสองของแอนฮาร์โมนิคเมนต์แฟกเตอร์ (E^2) กับ M

\sqrt{M}	.1	.2	.5	1.0	2.0	5.0	10	20	50	100
$m = 1$	.995	.980	.879	.563	0	0	0	0	0	0
$= 2$	.997	.987	.921	.724	.304	.005	0	0	0	0
$= 3$	.998	.990	.941	.798	.478	.104	.017	.002	0	0
$= 5$	.999	.994	.967	.889	.715	.415	.238	.128	.054	.027
$= 10$	.999	.997	.981	.936	.836	.643	.496	.376	.254	.188

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่ $m = 1$ (เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง) และ C_{AC} เท่ากับ 0 จากสมการ (4.23) จะได้ว่า

$$E = \frac{\sqrt{M}}{\tanh \sqrt{M}} \quad (4.24)$$

ซึ่งสามารถใช้ได้กับกรณีที่ $m = 0, 2$ และ 3 ซึ่งจะมีค่าความผิดพลาดประมาณ 6% สมการ

$$E = \sqrt{(1+M)} \quad (4.25)$$

จะมีค่าความผิดพลาดประมาณ 8% ในกรณีที่ $m > 1$

ในกรณีที่ $\sqrt{M} \gg 1$ จะได้ว่า

$$E = \sqrt{M} \quad (4.26)$$

หรือ

$$\bar{R} = \sqrt{\frac{2DAk_m(C_{Ai})^{m+1}}{m+1}} \quad (4.27)$$

4.2.4 ปฏิกิริยาอันดับสองไม่ผันกลับ

จากทฤษฎีฟิล์ม ถ้าก๊าซ A ทำปฏิกิริยากับสาร B ซึ่งละลายอยู่ในของเหลวโดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาอันดับสองไม่ผันกลับดังปฏิกิริยาในสมการ (4.28)



อัตราเร็วของปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ k_2ab โมลของ A ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรในหนึ่งหน่วยเวลา สมการการแพร่ในกรณีนี้คือ

$$D_A \frac{d^2 a}{dx^2} - k_2 ab = 0 \quad (4.29)$$

$$D_B \frac{d^2 b}{dx^2} - zk_2 ab = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$$\begin{aligned} x = 0, & \quad a = C_{Ai} \\ x = \delta, & \quad a = C_{AO} \\ x = \delta, & \quad b = C_{Bb} \\ x = 0, & \quad \frac{db}{dx} = 0 \end{aligned}$$

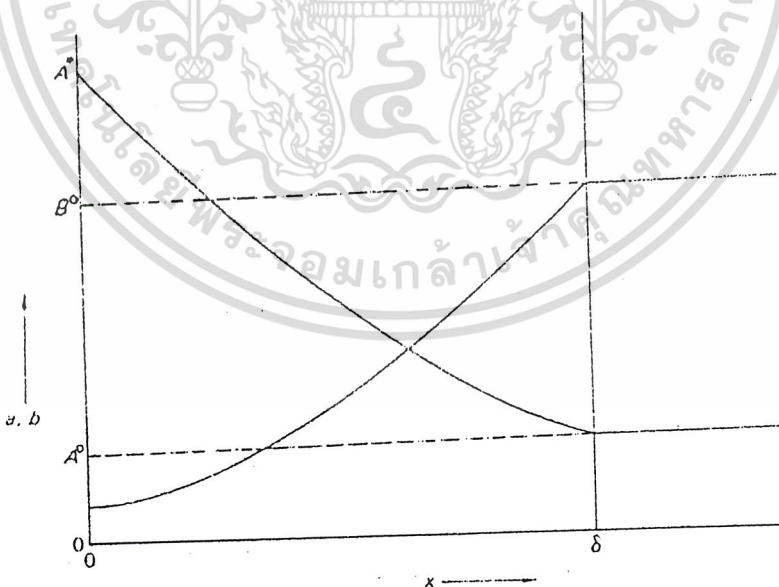
เมื่อทำการแก้สมการ (4.29) ในกรณีนี้ที่ $C_{AO} = 0$ จะได้ว่า

$$\frac{\bar{R}}{k_L A^*} = E = \frac{\sqrt{\left(M \frac{E_i - E}{E_i - 1} \right)}}{\tanh \sqrt{\left(M \frac{E_i - E}{E_i - 1} \right)}} \tag{4.30}$$

เมื่อ

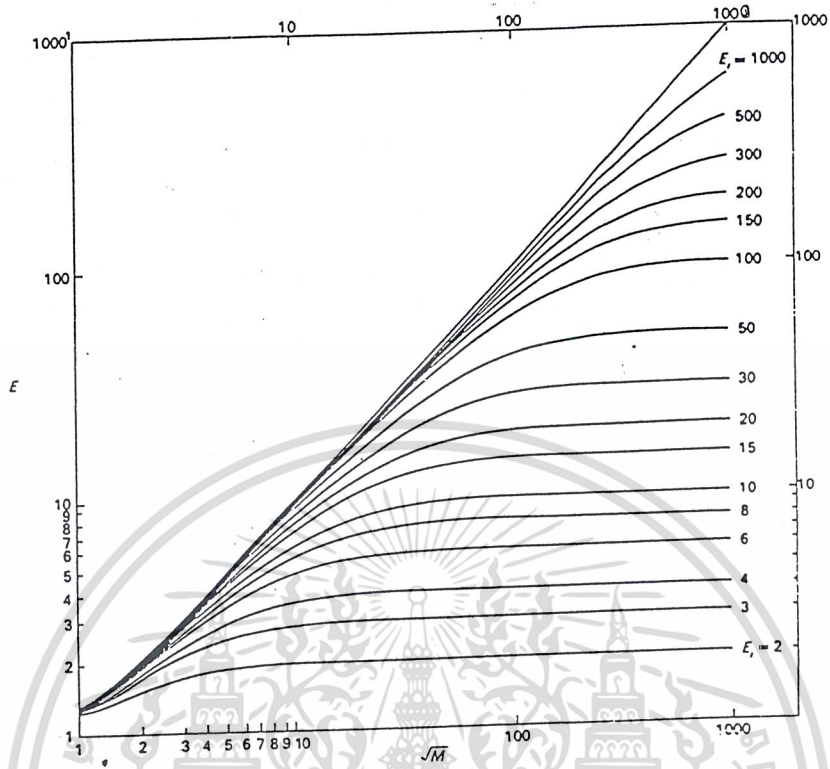
$$M = \frac{D_A k_2 C_{Bb}}{k_L^2}; \quad E_i = \left(1 + \frac{D_B C_{Bb}}{n D_A C_{Ai}} \right); \quad E = \frac{\bar{R}}{k_L C_{Ai}}$$

โดยสมการนี้จะมีค่าความผิดพลาดประมาณ 10%



รูปที่ 4.3 โปรไฟล์ความเข้มข้นของสาร A เมื่อปฏิกิริยาเป็นแบบอันดับสองไม่ผันกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

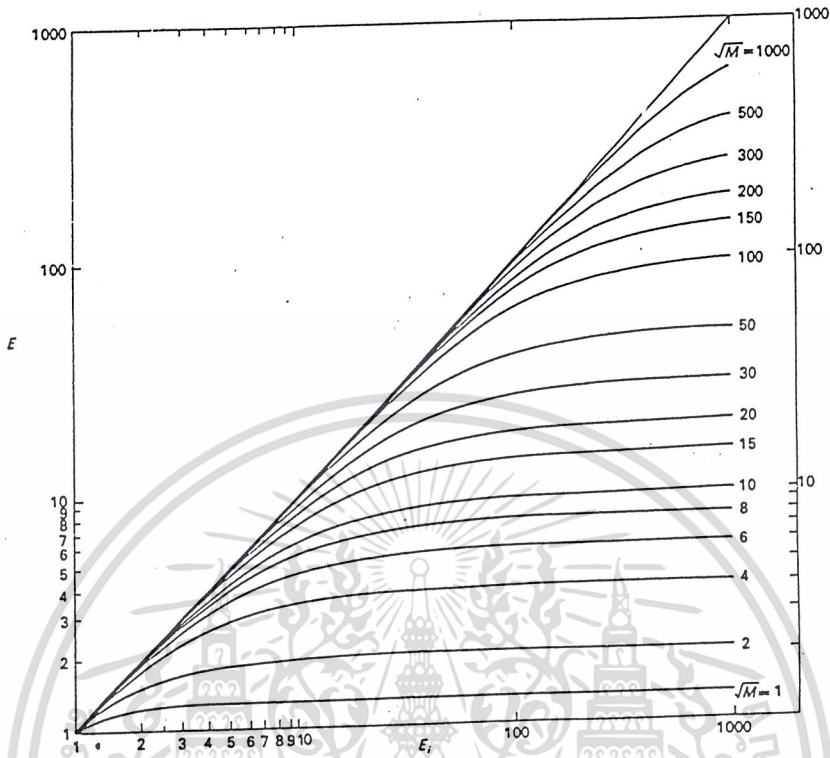


รูปที่ 4.4 ค่า Enhancement Factor สำหรับปฏิกิริยาอันดับสอง ซึ่งได้จากสมการ

$$E = \frac{\sqrt{\left(M \frac{E_i - E}{E_i - 1} \right)}}{\tanh \sqrt{\left(M \frac{E_i - E}{E_i - 1} \right)}}$$

เมื่อใช้ค่า E_i เป็นพารามิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ค่า Enhancement Factor สำหรับปฏิกิริยาอันดับสอง ซึ่งได้จากสมการ

$$E = \frac{\sqrt{\left(M \frac{E_i - E}{E_i - 1} \right)}}{\tanh \sqrt{\left(M \frac{E_i - E}{E_i - 1} \right)}}$$

เมื่อใช้ค่า \sqrt{M} เป็นพารามิเตอร์

รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า E กับค่า \sqrt{M} ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (4.30) โดยมี E_i เป็นพารามิเตอร์ ส่วนรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า E กับค่า E_i โดยมี \sqrt{M} เป็นพารามิเตอร์ ที่ E_i ค่าหนึ่งๆ นั้น เมื่อ \sqrt{M} มีค่ามากขึ้น E จะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย จนกระทั่งถึงค่าจำกัดค่าหนึ่งซึ่งก็คือที่ $E = E_i$ จะเห็นได้จากรูปที่ 4.4 ว่าสามารถนำสมการที่ใช้ในการคำนวณหาอัตราเร็วในการดูดซึมในกรณีที่เกิดปฏิกิริยาที่เร็วขึ้นเป็นปฏิกิริยาที่รวดเร็ว มาใช้ในการคำนวณหาอัตราเร็วในการดูดซึมในกรณีนี้ได้ ถ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ $\sqrt{M} > 10E_i$ เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (4.31)
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นคือ ถ้า

$$\sqrt{(D_A k_2 C_{Bb})} > 10k_L \left(1 + \frac{D_B C_{Bb}}{nD_A C_{Ai}} \right) \quad (4.32)$$

หรือถ้าค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยามีค่าสูงหรือค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีค่าน้อยกว่าของก๊าซมากหรือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลทางกายภาพมีค่าต่ำ ในทางกลับกันถ้า

$$\sqrt{M} < \frac{1}{2}E_i \quad (4.33)$$

นั่นคือ ถ้า

$$\sqrt{(D_A k_2 C_{Bb})} < \frac{1}{2}k_L \left(1 + \frac{D_B C_{Bb}}{zD_A C_{Ai}} \right) \quad (4.34)$$

ค่า Enhancement factor ในรูปที่ 4.4 จะอยู่ใกล้เส้นทแยงที่ลากจากด้านบนขวาไปยังด้านล่างซ้าย สถานะเช่นนี้คือสถานะที่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม และค่า Enhancement factor สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ(4.12) โดยแทน $C_{AO} = 0$ และแทน $k_2 C_{Bb}$ ด้วย k_1 โดยทั่วไปแล้วสถานการณ์นี้ก็คือการที่ปฏิกิริยาเกิดขึ้นช้า หรือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล มีค่าสูง ดังนั้น ค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นจึงมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก(เกือบคงที่)

ถ้าสถานะเป็นไปดังเงื่อนไขในสมการ (4.33) รวมทั้ง

$$\sqrt{M} > 3 \quad (4.35)$$

เช่น

$$\sqrt{(D_A k_1 C_{Bb})} > 3k_L \quad (4.36)$$

จะเห็นได้จากรูปที่ 4.4 ว่า

$$E = \sqrt{M} \quad (4.37)$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$R = A^* \sqrt{(D_A k_2 C_{Bb})} \quad (4.38)$$

ซึ่งสอดคล้องกับการดูคิมแบบที่มีปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมเกิดขึ้น(สมการที่ 4.19) ที่แทนค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 k_1 ด้วย $k_2 C_{Bb}$
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณค่าเอนฮานซ์เมนต์แฟกเตอร์สำหรับปฏิกิริยาเคมีอันดับสอง ไม่ผันกลับอาจคำนวณได้จากสมการ (4.39) [22]

$$E = -\frac{M}{2(E_i - 1)} + \sqrt{\left[\frac{M^2}{4(E_i - 1)^2} + \frac{E_i M}{(E_i - 1)} + 1 \right]} \quad (4.39)$$

4.2.5 ปฏิกิริยาเคมีผันกลับได้

4.2.5.1 ปฏิกิริยาผันกลับได้อันดับหนึ่ง

จากทฤษฎีฟิล์ม ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



โดย k_1 คือค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาไปข้างหน้า และ k_{-1} คือค่าคงที่อัตราเร็วอัตราเร็วของปฏิกิริยาย้อนกลับ ที่สมดุล อัตราเร็วของปฏิกิริยาไปข้างหน้ากับอัตราเร็วของปฏิกิริยาย้อนกลับมีค่าเท่ากัน ดังนั้น

$$\left(\frac{p}{a} \right)_e = \frac{k_1}{k_{-1}} = K \quad (4.41)$$

โดยทั่วไป $k_{-1}p = \frac{k_1 p}{K}$ และค่าอัตราเร็วของปฏิกิริยาของ A จะมีค่าเท่ากับ

$$(k_1 a - k_{-1} p) = k_1 \left(a - \frac{p}{K} \right)$$

สมการการแพร่ในกรณีนี้คือ

$$\begin{aligned} D_A \frac{d^2 a}{dx^2} - k_1 \left(a - \frac{p}{K} \right) &= 0 \\ D_P \frac{d^2 p}{dx^2} + k_1 \left(a - \frac{p}{K} \right) &= 0 \end{aligned} \quad (4.42)$$

เมื่อ

$$x = 0, \quad a = C_{A_i}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ $x = \delta$, รับค่า $a = C_{A_0}$ เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้ง $x = 0$, มิให้ $\frac{dp}{dx} = 0$ เนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$x = \delta, \quad p = KC_{A_0}$$

ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลมีค่าเท่ากัน อัตราเร็วในการดูดซึมจะมีค่า

$$\bar{R} = \frac{k_L(C_{Ai} - C_{AO})(1+K)}{1 + \left\{ K \tanh \sqrt{\frac{D_A k_1(1+K)}{k_L^2 K}} \right\} / \left\{ \sqrt{\frac{D_A k_1(1+K)}{k_L^2 K}} \right\}} \quad (4.43)$$

เมื่อ $K \rightarrow \infty, A \rightarrow 0$ จากสมการที่ (4.43)

$$\bar{R} = C_{Ai} \frac{\sqrt{(D_A k_1)/k_L}}{\tanh \sqrt{(D_A k_1)/k_L}} \quad (4.44)$$

ซึ่งเหมือนกับสมการที่ใช้ในกรณีปฏิกิริยาอันดับหนึ่งไม่ผันกลับ (สมการที่(4.19) เมื่อ $C_{AO} = 0$)

ในกรณีปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการ (4.45)



และอัตราเร็วของปฏิกิริยาเป็นไปตามสมการ (4.46)

$$r = k_{mf} a^m b^n - k_{rE} p^x q^y \quad (4.46)$$

4.2.5.2 กรณีปฏิกิริยาผันกลับได้ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว

จากทฤษฎีฟิล์มเมื่อพิจารณาปฏิกิริยา



ซึ่งในปฏิกิริยานี้ 1 โมลของ A ทำปฏิกิริยากับ n_1 โมลของ B ให้ผลิตภัณฑ์เป็น y_1 โมลของ P ความเข้มข้นที่ผิวรอยต่อคือ C_{Ai}, B_1^*, P_1^* เป็นต้น และความเข้มข้นในโนบล์คือ C_{AO}, B_1^0, P_1^0 เป็นต้น ดังนั้น จะได้ว่า

$$K = \frac{(P_1^*)^{y_1} (P_2^*)^{y_2} \dots}{A^* (B_1^*)^{n_1} \dots} \quad (4.48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ส่วนตัวเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการแพร่ในกรณีนี้คือ

$$\begin{aligned} D_A \frac{d^2 a}{dx^2} + \frac{D_{P_1}}{y_1} \frac{d^2 P_1}{dx^2} &= 0 \\ D_A \frac{d^2 a}{dx^2} - \frac{D_{B_1}}{n_1} \frac{d^2 b_1}{dx^2} &= 0 \end{aligned} \quad (4.49)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} x=0, \quad a &= C_{Ai} \\ x=0, \quad b_1 &= B_1^* \\ x=0, \quad p_1 &= P_1^* \\ x=\delta, \quad a &= C_{AO} \\ x=\delta, \quad b_1 &= B_1^0 \\ x=\delta, \quad p_1 &= P_1^0 \end{aligned}$$

จะได้ว่า

$$D_A C_{Ai} + D_{P_1} p_1 / y_1 = C_1 x + C_2 \quad (4.50)$$

เมื่อ C_1 และ C_2 เป็นค่าคงที่ที่ได้จากการอินทิเกรต

และ

$$\begin{aligned} D_A C_{Ai} + \frac{D_{P_1} P_1^*}{y_1} &= C_2 \\ D_A C_{AO} + \frac{D_{P_1} P_1^0}{y_1} &= \frac{C_1 D_A}{k_L} + C_2 \end{aligned} \quad (4.51)$$

ดังนั้น

$$C_1 = \frac{k_L}{D_A} \left[D_A A^0 + \frac{D_{P_1} P_1^0}{y_1} - D_A A^* - \frac{D_{P_1} P_1^*}{y_1} \right] \quad (4.52)$$

อัตราเร็วในการดูดซึม R เป็นผลบวกระหว่างอัตราเร็วในการแพร่ของ A ที่ไม่เกิดปฏิกิริยากับ A ที่เกิดปฏิกิริยาซึ่งจะอยู่ในรูปของ P_1 (หรือผลิตภัณฑ์อื่นๆ) จากสมการ (4.2) จะได้ว่า

$$\bar{R} = \left(-D_A \frac{da}{dx} - \frac{D_R}{y_1} \frac{dp_1}{dx} \right)_{x=0} = -C_1 \quad (4.53)$$

$$\bar{R} = k_L \left[\left(C_{Ai} + \frac{D_{P_1} P_1^*}{D_A y_1} \right) - \left(C_{AO} + \frac{D_{P_1} P_1^0}{D_A y_1} \right) \right] \quad (4.54)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5.3 กรณีปฏิกิริยาผันกลับได้ที่เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ

รูปแบบของปฏิกิริยาเมื่อ A 1 โมลทำปฏิกิริยากับ B 2 โมลไปตั้งสมการ



เมื่อคงที่สมดุลของปฏิกิริยา, K , มีค่าเท่ากับ pq/ab^2 ถ้ากำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ \bar{R} สารทั้งหมดที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยามีค่าเท่ากัน และความเข้มข้นของ p และ q มีค่าเท่ากัน จะคำนวณค่าอัตราการดูดซึมและค่าเอนฮานซ์เมนต์แฟกเตอร์ได้ตั้งสมการที่ (4.56) และ (4.57) ได้ตามลำดับ

$$\bar{R} = k_L \left[(C_{Ai} - C_{AO}) + \frac{C_{Bb} \sqrt{\{K(C_{Ai} - C_{AO})\}}}{1 + 2\sqrt{KC_{Ai}}} \right] \quad (4.56)$$

$$E = 1 + \frac{C_{Bb} \sqrt{\{K(C_{Ai} - C_{AO})\}}}{(1 + 2\sqrt{KC_{Ai}})(C_{Ai} - C_{AO})} \quad (4.57)$$

สมการเหล่านี้จะได้นำไปใช้ในการคำนวณหาอัตราการถ่ายเทมวลสำหรับการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ข้อมูลการทดลองสำหรับใช้อ้างอิง

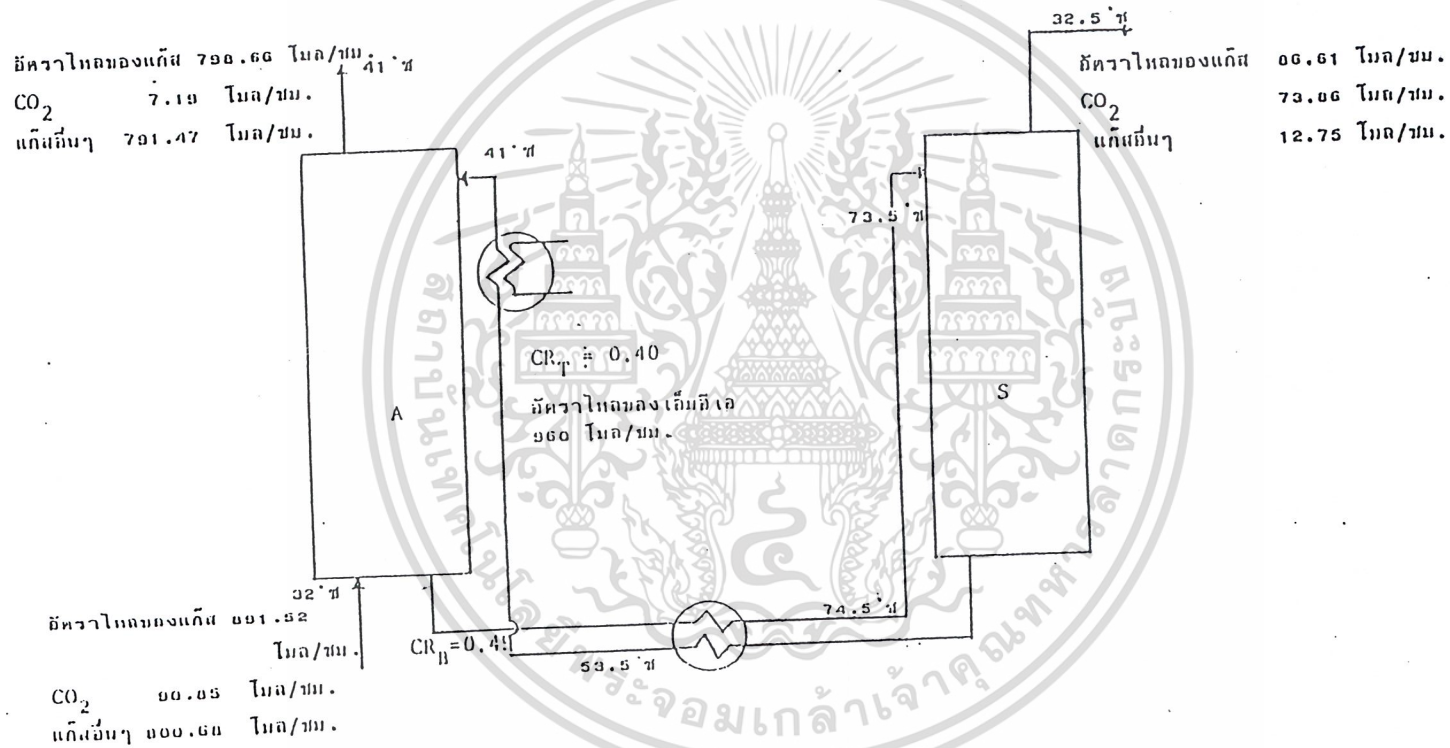
การทดลองที่ใช้อ้างอิงสำหรับการสร้างแบบจำลองในโครงการวิจัยนี้ เป็นการทดลองการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซสังเคราะห์ โดยใช้สารละลายโมโนเอทานอลามีนในหอคูดซึ่มแบบแพ็คเกจ [3] ซึ่งมีสภาวะที่ใช้ในการทดลองดังนี้

5.1 การทดลองครั้งที่ 1

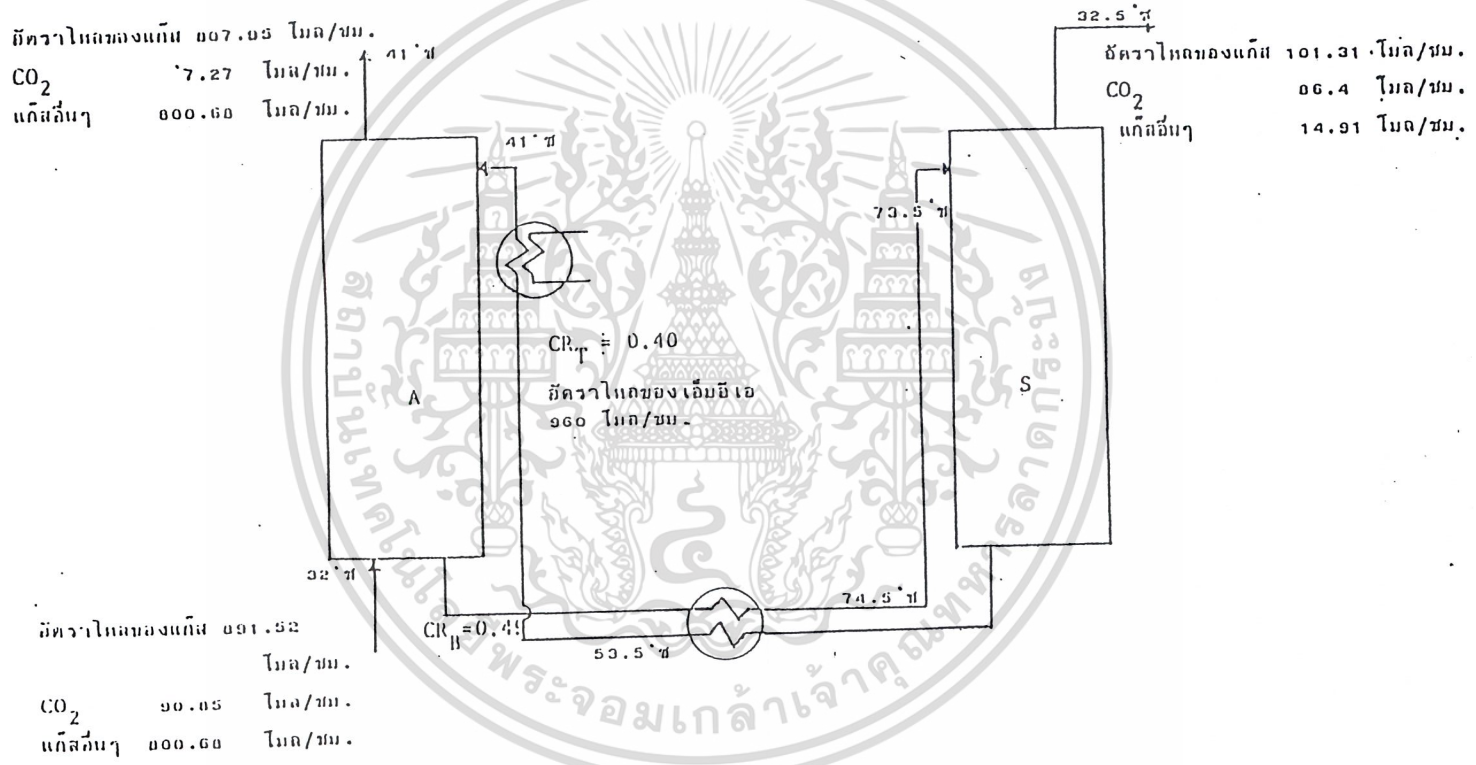
ความดันรวม	1	บาร์
อัตราการไหลของก๊าซ	0.211	กก./(วินาที.ตารางเมตร)
อัตราการไหลของสารละลาย	4.016	กก./(วินาที.ตารางเมตร)
ความเข้มข้นของสารละลายโมโนเอทานอลามีน	2	โมล/ลิตร
อุณหภูมิของก๊าซขาเข้า	31-34	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิของก๊าซขาออก	40-43	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิเฉลี่ยภายในหอคูดซึ่ม	39-42	องศาเซลเซียส
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของหอคูดซึ่ม	0.205	เมตร
พื้นที่หน้าตัดของหอคูดซึ่ม	0.033	ตารางเมตร
ความสูงของหอคูดซึ่ม	5.32	เมตร
เรซิดเดนซ์ไทม์ (Residence time) ของหอคูดซึ่มอยู่ในช่วง	3.08–10.67	นาที
ดีเลย์ไทม์ (Delay time) ของหอคูดซึ่มประมาณ	3.08	นาที
ช่วงที่บรรจุแพ็คเกจ (packing) มี 6 ชั้น		
แพ็คเกจเป็นอะลูมิเนียมแบบวงแหวนแรชชิก (Rashig ring) ขนาดมาตรฐาน $\frac{1}{2}$ นิ้ว		

ข้อมูลของการทดลองที่ 1 ในช่วงชั่วโมงที่ 3-4 และข้อมูลของการทดลองครั้งที่ 1 หลังจากการทำสมดุลมวลสารแสดงดังรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 ตัวอย่างข้อมูลการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 3-4



รูปที่ 5.2 ตัวอย่างข้อมูลการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 3-4 หลังการทำสมดุลงมวลสาร.

5.2 การทดลองครั้งที่ 2

ความดันรวม	1	บาร์
อัตราการไหลของก๊าซ	0.191	กก./(วินาที.ตารางเมตร)
อัตราการไหลของสารละลาย	4.016	กก./(วินาที.ตารางเมตร)
ความเข้มข้นของสารละลายโมโนเอธาโนลามีน	2	โมล/ลิตร
อุณหภูมิของก๊าซขาเข้า	29 - 32	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิของก๊าซขาออก	38 - 40	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิเฉลี่ยภายในหอคูดซิม	40 - 43	องศาเซลเซียส
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของหอคูดซิม	0.205	เมตร
พื้นที่หน้าตัดของหอคูดซิม	0.033	ตารางเมตร
ความสูงของหอคูดซิม	5.32	เมตร
เรซิดเอนซ์ไทม์ (Residence time) ของหอคูดซิมในช่วง	3.08-10.67	นาที
ดีเลย์ไทม์ (Delay time) ของหอคูดซิมประมาณ	3.08	นาที
ช่วงที่บรรจุแพคกิง (packing) มี 6 ชั้น		
แพคกิงเป็นอะลูมิเนียมแบบวงแหวนแรชชิก (Rashig ring) ขนาดมาตรฐาน $\frac{1}{2}$ นิ้ว		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ผลการทดลอง

สำหรับองค์ประกอบของก๊าซขาเข้าและขาออกจากหอดูดซึมที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ของการทดลอง เป็นดังแสดงต่อไปนี้

ตารางที่ 5.1 องค์ประกอบของก๊าซขาเข้าและขาออกจากหอดูดซึมของการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 3-4

ก๊าซ	ขาเข้า		ขาออก	
	%	โมล/ชั่วโมง	%	โมล/ชั่วโมง
CO ₂	10.20	90.85	0.90	7.27
H ₂	3.68	32.81	3.80	30.70
O ₂	6.75	60.18	7.16	57.85
N ₂	66.71	594.73	75.76	612.10
CO	4.14	36.91	4.91	39.67
H ₂ O	8.51	75.87	7.46	60.27

ตารางที่ 5.2 องค์ประกอบของก๊าซขาเข้าและขาออกจากหอดูดซึมของการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 4-6

ก๊าซ	ขาเข้า		ขาออก	
	%	โมล/ชั่วโมง	%	โมล/ชั่วโมง
CO ₂	9.58	85.41	1.92	15.78
H ₂	4.58	40.83	2.73	22.44
O ₂	12.20	108.77	10.45	85.88
N ₂	53.95	480.98	65.09	534.94
CO	13.49	120.27	12.44	102.24
H ₂ O	6.20	55.27	7.37	60.57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 องค์ประกอบของก๊าซขาเข้าและขาออกจากห้องดูดซึมของการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 10-12

ก๊าซ	ขาเข้า		ขาออก	
	%	โมล/ชั่วโมง	%	โมล/ชั่วโมง
CO ₂	13.5	120.36	3.50	27.95
H ₂	4.75	42.35	6.06	48.40
O ₂	3.44	30.67	4.70	37.54
N ₂	68.35	609.35	73.69	588.53
CO	5.46	48.68	6.78	54.15
H ₂ O	4.49	40.03	5.27	42.09

ตารางที่ 5.4 องค์ประกอบของก๊าซขาเข้าและขาออกจากห้องดูดซึมของการทดลองครั้งที่ 2 ช่วงชั่วโมงที่ 6-9

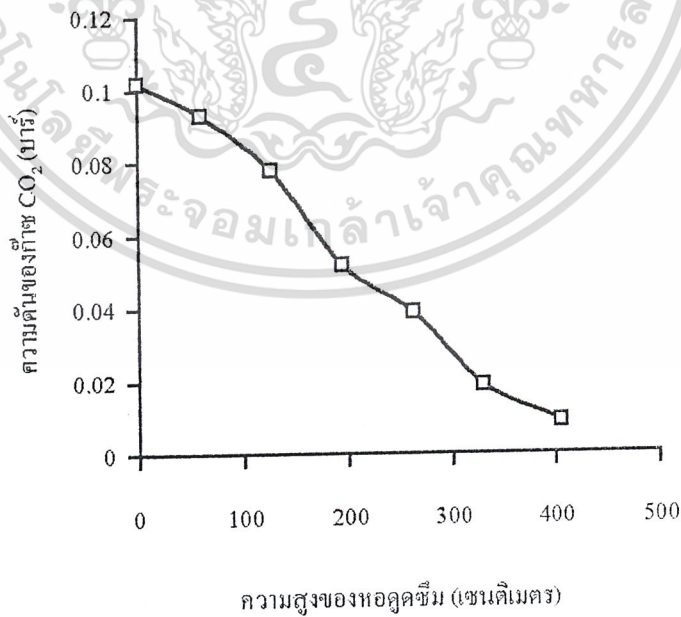
ก๊าซ	ขาเข้า		ขาออก	
	%	โมล/ชั่วโมง	%	โมล/ชั่วโมง
CO ₂	10.77	85.87	2.45	17.87
H ₂	4.62	36.84	4.39	32.02
O ₂	12.16	96.95	16.25	118.53
N ₂	58.72	468.19	63.05	459.89
CO	8.60	68.57	7.85	57.26
H ₂ O	5.14	40.98	6.01	48.84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของหอดูดชมแสดงในรูปความดัน ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.5 ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของหอดูดชม ในการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 3-4

ความสูงของหอดูดชม (เซนติเมตร)	ความดันของ CO ₂ (บาร์)	%
0	0.102	10.2
60.0	0.093	9.25
127.5	0.078	7.81
195.0	0.052	5.18
262.5	0.039	3.90
330.0	0.019	1.88
405.0	0.009	0.90

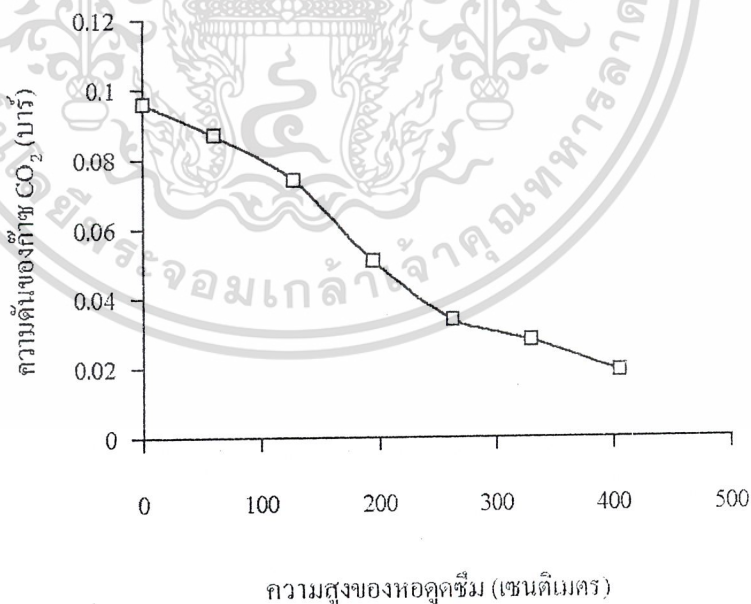


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้เพื่อการอื่นใด

รูปที่ 5.3 ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของหอดูดชม ในการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 3-4 จำของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.6 ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของหอดูดซึม
ในการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 4-6

ความสูงของหอดูดซึม (เซนติเมตร)	ความดันของ CO ₂ (บาร์)	%
0	0.096	9.58
60.0	0.087	8.65
127.5	0.074	7.40
195.0	0.051	5.05
262.5	0.034	3.43
330.0	0.028	2.75
405.0	0.019	1.92

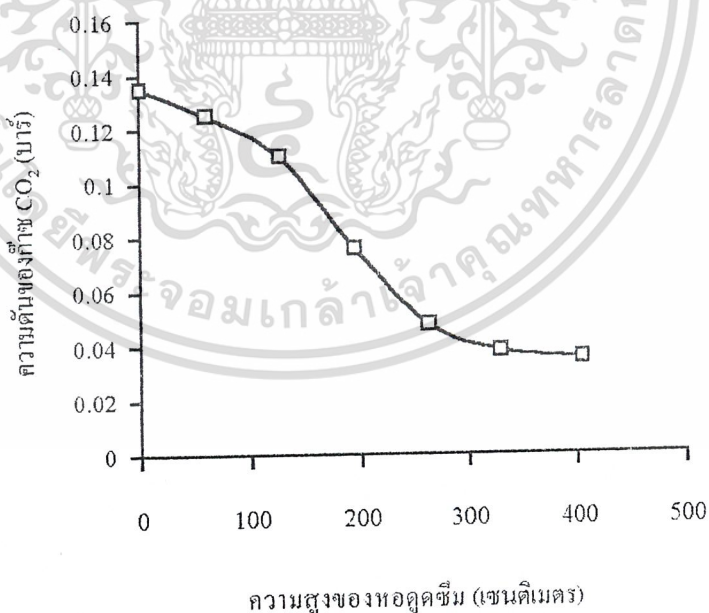


รูปที่ 5.4 ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของหอดูดซึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ในการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 4-6 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.7 ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของหอดูดูดซึม
ในการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 10-12

ความสูงของหอดูดูดซึม (เซนติเมตร)	ความดันของ CO ₂ (บาร์)	%
0	0.135	13.5
60.0	0.125	12.5
127.5	0.110	11.0
195.0	0.076	7.6
262.5	0.048	4.8
330.0	0.038	3.8
405.0	0.035	3.5

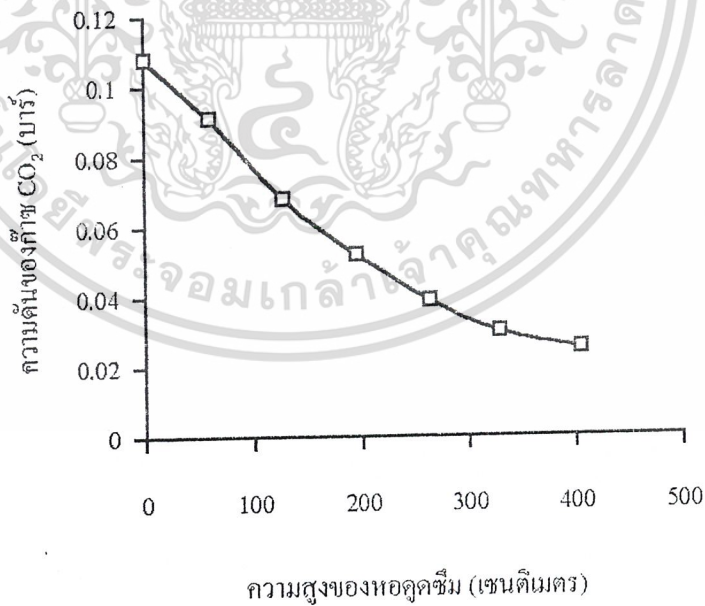


รูปที่ 5.5 ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของหอดูดูดซึม
ในการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 10-12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.8 ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของหอดูดาว
ในการทดลองครั้งที่ 2 ช่วงชั่วโมงที่ 6-9

ความสูงของหอดูดาว (เซนติเมตร)	ความดันของ CO ₂ (บาร์)	%
0	0.108	10.77
60.0	0.091	9.05
127.5	0.068	6.75
195.0	0.052	5.16
262.5	0.039	3.90
330.0	0.030	3.00
405.0	0.025	2.45



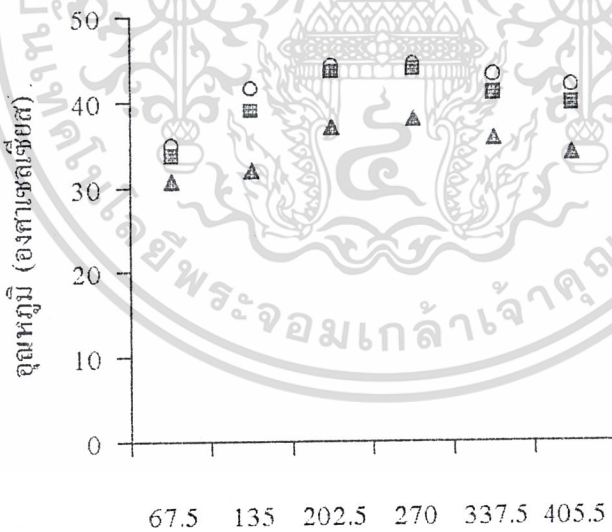
รูปที่ 5.6 ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของหอดูดาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ในการทดลองครั้งที่ 2 ช่วงชั่วโมงที่ 6-9
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผู้ทำการทดลองยังได้วัดอุณหภูมิของสารละลายโมโนเอธาโนลามีนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของหลอดชิมด้วย ผลที่ได้เป็นดังแสดงต่อไปนี้

ตารางที่ 5.9 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของหลอดชิม ในการทดลองครั้งที่ 1

ความสูงของหลอดชิม (เซนติเมตร)	อุณหภูมิ (°C)		
	ชั่วโมงที่ 3-4	ชั่วโมงที่ 4-6	ชั่วโมงที่ 6-12
67.5	35.0	33.7	30.7
135.0	41.6	38.8	32.02
202.5	44.2	43.5	37.0
270.0	44.5	43.8	38.0
337.5	43.2	41.0	35.7
405.0	41.9	39.7	34.0

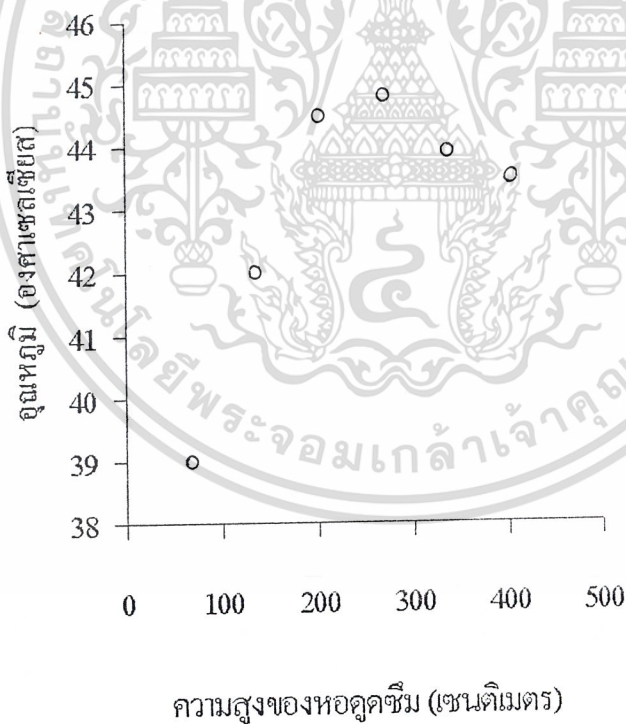


○ ชั่วโมงที่ 3-4 ■ ชั่วโมงที่ 4-6 ▲ ชั่วโมงที่ 10-12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 5.7 อุณหภูมิของสารละลายโมโนเอธาโนลามีน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของหลอดชิม
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแต่ง เนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ในการทดลองครั้งที่ 1

ตารางที่ 5.10 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของหอคูดซิม ในการทดลองครั้งที่ 2

ความสูงของหอคูดซิม (เซนติเมตร)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)
67.5	39.0
135.0	42.0
202.5	44.5
270.0	44.8
337.5	43.9
405.0	43.5



รูปที่ 5.8 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของหอคูดซิม ในการทดลองครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองจะเห็นว่า อุณหภูมิของสารละลายโมโนเอธาโนลามีนเมื่อเข้ามาในหอดูด
ซิม จะสูงขึ้นจากช่วง $34-43.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ไปเป็นประมาณ $38-45.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่าง
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับโมโนเอธาโนลามีนเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน อุณหภูมิของสารละลาย
จึงสูงขึ้น สำหรับส่วนล่างของหอดูดซิมนั้น สารละลายสัมผัสกับกระแสก๊าซซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าภาย
ใน หอดูดซิม อุณหภูมิของสารละลายจึงลดลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

ผลการคำนวณ

6.1 การคำนวณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามความสูงของหอคูดซิมเมื่อคิดว่าเป็นการคูดซิมแบบไม่มีปฏิกิริยาเคมี

การคำนวณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปความดัน (P) ตามความสูงของหอคูดซิม (z) ในกรณีนี้ เริ่มต้นด้วยการตั้งสมมติฐานว่าเป็นการคูดซิมแบบไม่มีปฏิกิริยาเคมี อัตราการไหลของก๊าซและอุณหภูมิภายในหอคูดซิมคงที่ตลอดความสูงของหอคูดซิม ผลการคำนวณแสดงไว้ในตาราง 6.1

ตาราง 6.1 ความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความสูงต่างๆ ของหอคูดซิม เมื่อคิดว่าเป็นการคูดซิมแบบไม่มีปฏิกิริยาเคมี

ความสูง ของหอคูดซิม (เซนติเมตร)	ความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (บาร์)			
	การทดลองครั้งที่ 1			การทดลองครั้งที่ 2
	ชั่วโมงที่ 3-4	ชั่วโมงที่ 4-6	ชั่วโมงที่ 10-12	ชั่วโมงที่ 6-9
0	0.102	0.096	0.135	0.108
60.0	0.1019	0.0959	0.1348	0.1079
127.0	0.1017	0.0957	0.1346	0.1077
195.0	0.1016	0.0956	0.1344	0.1076
262.5	0.1014	0.0955	0.1343	0.1074
330.0	0.1013	0.0953	0.1341	0.1073
405.0	0.1011	0.0952	0.1339	0.1071

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 การคำนวณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามความสูงของหอคูดูดซึมเมื่อคิดว่าเป็นการดูดซึมที่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น

เมื่อการดูดซึมเป็นแบบที่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น ผลของปฏิกิริยาเคมีจะทำให้อัตราการถ่ายเทมวลสูงขึ้น นั่นคือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะแพร่เข้ามาในสารละลายโมโนเอธาโนลามีนและเกิดการดูดซึมมากขึ้น ผลของปฏิกิริยาเคมีที่มีต่อการดูดซึมสามารถแสดงได้ด้วยค่าแฟกเตอร์กระตุ้นดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 และบทที่ 5

6.2.1 การดูดซึมแบบที่มีปฏิกิริยาเคมีอันดับหนึ่งแบบไม่ผันกลับ

ผลการคำนวณความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามความสูงของหอคูดูดซึม เมื่อคิดว่าเป็นการดูด-ซึมแบบที่มีปฏิกิริยาเคมีอันดับหนึ่งแบบ ไม่ผันกลับ เป็นไปดังแสดงไว้ในตาราง 6.2

ตาราง 6.2 ความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามความสูงของหอคูดูดซึมเมื่อคิดว่าเป็นการดูดซึมแบบที่มีปฏิกิริยาเคมีอันดับหนึ่งแบบไม่ผันกลับ

ความสูง ของหอคูดูดซึม (เซนติเมตร)	ความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (บาร์)			
	การทดลองครั้งที่ 1			การทดลองครั้งที่ 2
	ชั่วโมงที่ 3-4	ชั่วโมงที่ 4-6	ชั่วโมงที่ 10-12	ชั่วโมงที่ 6-9
0	0.1020	0.096	0.135	0.108
60.0	0.0772	0.0715	0.1158	0.0846
127.0	0.0564	0.0482	0.0895	0.0593
195.0	0.0356	0.0321	0.0613	0.0391
262.5	0.0213	0.0204	0.0372	0.0245
330.0	0.0129	0.0132	0.0191	0.0142
405.0	0.0081	0.0074	0.0139	0.0091

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.2 การดูดซึมที่มีปฏิกิริยาเคมีอันดับสองแบบไม่ผันกลับ

ผลการคำนวณความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามความสูงของหอดูดซึม เมื่อคิดว่าเป็นการดูด-ซึมแบบที่มีปฏิกิริยาเคมีอันดับสองที่ไม่ผันกลับ เป็นไปดังแสดงไว้ในตาราง 6.3

ตาราง 6.3 ความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามความสูงของหอดูดซึมเมื่อคิดว่าเป็นการดูดซึมแบบที่มีปฏิกิริยาเคมีอันดับสองที่ไม่ผันกลับ

ความสูง ของหอดูดซึม (เซนติเมตร)	ความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (บาร์)			
	การทดลองครั้งที่ 1			การทดลองครั้งที่ 2
	ชั่วโมงที่ 3-4	ชั่วโมงที่ 4-6	ชั่วโมงที่ 10-12	ชั่วโมงที่ 6-9
0	0.102	0.096	0.135	0.108
60.0	0.0096	0.0134	0.018	0.0149
127.0	0.0028	0.0031	0.0043	0.0032
195.0	0.0024	0.0022	0.0024	0.0022
262.5	0.0022	0.0021	0.0022	0.0021
330.0	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021
405.0	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.3 การดูดซึมที่มีปฏิกิริยาเคมีอันดับสองแบบผันกลับ

ผลการคำนวณความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามความสูงของหอดูดซึม เมื่อคิดว่าเป็นการดูด-ซึมแบบที่มีปฏิกิริยาเคมีอันดับสองที่ผันกลับ เป็นไปดังแสดงไว้ในตาราง 6.4

ตาราง 6.4 ความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามความสูงของหอดูดซึมเมื่อคิดว่าเป็นการดูดซึมแบบที่มีปฏิกิริยาเคมีอันดับสองที่ผันกลับ

ความสูงของ หอดูดซึม (เซนติเมตร)	ความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (บาร์)			
	การทดลองครั้งที่ 1			การทดลองครั้งที่ 2
	ชั่วโมงที่ 3-4	ชั่วโมงที่ 4-6	ชั่วโมงที่ 10-12	ชั่วโมงที่ 6-9
0	0.102	0.096	0.135	0.108
60.0	0.082	0.0773	0.1087	0.0870
127.0	0.0643	0.0606	0.0852	0.0681
195.0	0.0504	0.0475	0.0667	0.0534
262.5	0.0375	0.0372	0.0523	0.0418
330.0	0.0310	0.0291	0.0410	0.0328
405.0	0.0236	0.0222	0.0312	0.0250

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

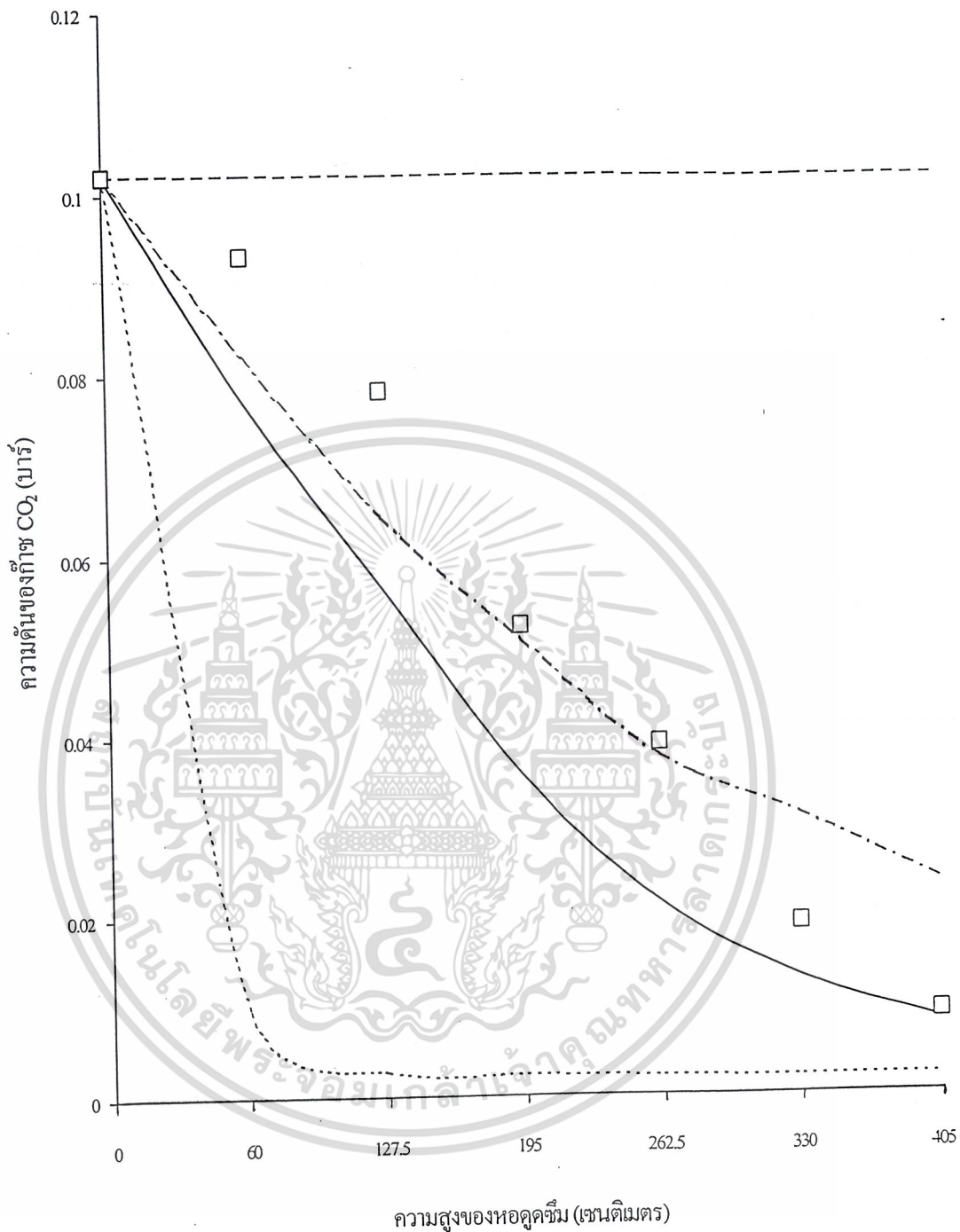
6.3 การเปรียบเทียบผลการคำนวณ

ตารางที่ 6.5-6.8 แสดงการเปรียบเทียบค่าความดันของก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ที่คำนวณได้จากกลไกการดูดซึมแบบต่างๆ เปรียบเทียบกับผลการทดลองหาค่าความดันของก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ที่ความสูงต่าง ๆ ของหอดูดซึม สำหรับรูป 6.1-6.4 เป็นกราฟเปรียบเทียบค่าความดันที่คำนวณได้ในกลไกการดูดซึมแต่ละแบบกับผลการทดลอง

ตารางที่ 6.5 การเปรียบเทียบค่าความดันของก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ที่คำนวณได้
เปรียบเทียบกับผลการทดลอง สำหรับการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 3-4

ความสูงของ หอดูดซึม (เซนติเมตร)	ความดันของก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ (บาร์)				
	ผล การทดลอง	ไม่มี ปฏิกิริยา	ปฏิกิริยาอันดับ หนึ่ง ไม่ผันกลับ	ปฏิกิริยาอันดับ สอง ไม่ผันกลับ	ปฏิกิริยาอันดับ สอง ผันกลับ
0	0.102	0.102	0.1020	0.102	0.102
60.0	0.093	0.1019	0.0772	0.0096	0.082
127.0	0.078	0.1017	0.0564	0.0028	0.0643
195.0	0.052	0.1016	0.0356	0.0024	0.0504
262.5	0.039	0.1014	0.0213	0.0022	0.0375
330.0	0.019	0.1013	0.0129	0.0021	0.0310
405.0	0.009	0.1011	0.0081	0.0021	0.0236

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



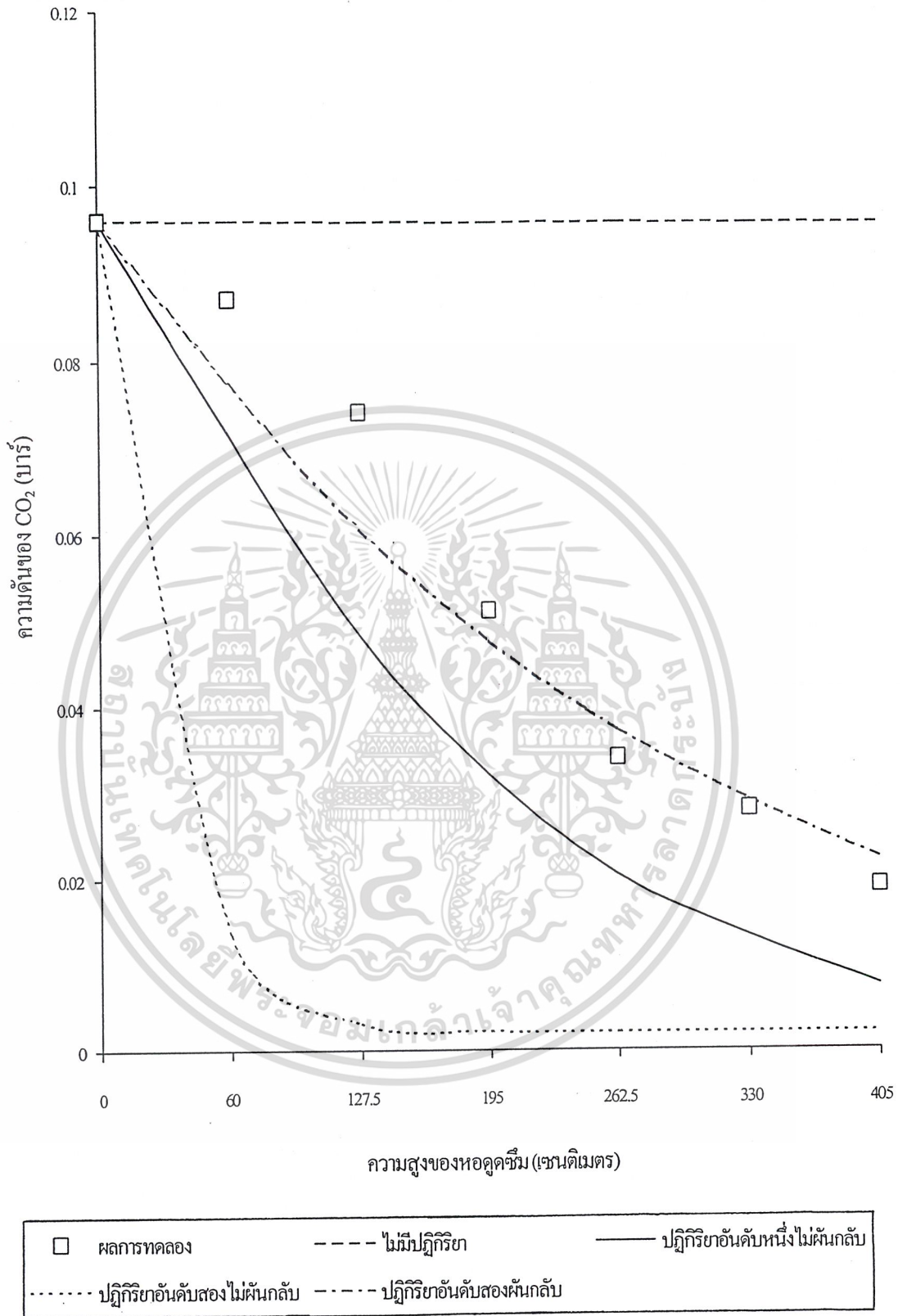
ผลการทดลอง
 ไม่มีปฏิกิริยา
 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งไม่ผันกลับ
 ปฏิกิริยาอันดับสองไม่ผันกลับ
 ปฏิกิริยาอันดับสองผันกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 6.1 กราฟเปรียบเทียบผลการคำนวณของการดูดซึ่มที่มีกลไกแบบต่างๆ กับผลการทดลอง สำหรับการทดลองที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 3-4

ตารางที่ 6.6 การเปรียบเทียบค่าความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คำนวณได้
เปรียบเทียบกับผลการทดลอง สำหรับการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 4-6

ความสูงของ หลอดซีม (เซนติเมตร)	ความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (บาร์)				
	ผลการทดลอง	ไม่มี ปฏิกิริยา	ปฏิกิริยาอันดับ หนึ่ง ไม่ผันกลับ	ปฏิกิริยาอันดับ สอง ไม่ผันกลับ	ปฏิกิริยาอันดับ สอง ผันกลับ
0	0.096	0.096	0.096	0.096	0.096
60.0	0.087	0.0959	0.0715	0.0134	0.0773
127.0	0.074	0.0957	0.0482	0.0031	0.0606
195.0	0.051	0.0956	0.0321	0.0022	0.0475
262.5	0.034	0.0955	0.0204	0.0021	0.0372
330.0	0.028	0.0953	0.0132	0.0021	0.0291
405.0	0.019	0.0952	0.0074	0.0021	0.0222

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

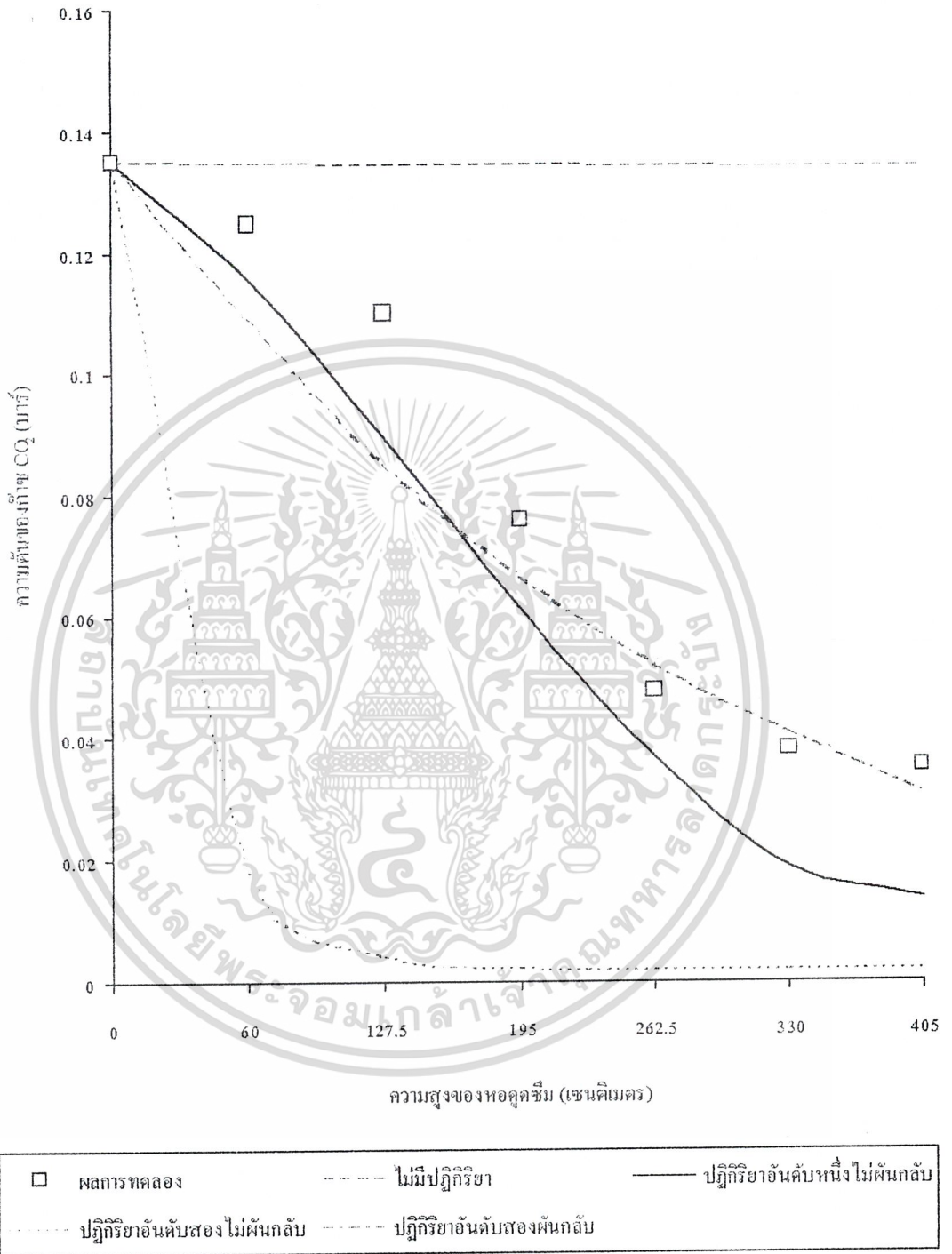


รูปที่ 6.2 กราฟเปรียบเทียบผลการคำนวณของการดูดซึมที่มีกลไกแบบต่าง ๆ กับผลการทดลอง สำหรับการทดลองที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 4-6

ตารางที่ 6.7 การเปรียบเทียบค่าความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คำนวณได้
เปรียบเทียบกับผลการทดลอง สำหรับการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 10-12

ความสูงของ หลอดซีมี (เซนติเมตร)	ความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (บาร์)				
	ผลการ ทดลอง	ไม่มี ปฏิกิริยา	ปฏิกิริยาอันดับ หนึ่ง ไม่ผันกลับ	ปฏิกิริยาอันดับ สอง ไม่ผันกลับ	ปฏิกิริยาอันดับ สอง ผันกลับ
0	0.135	0.135	0.135	0.135	0.135
60.0	0.125	0.1348	0.1158	0.018	0.1087
127.0	0.110	0.1346	0.0895	0.0043	0.0852
195.0	0.076	0.1344	0.0613	0.0024	0.0667
262.5	0.048	0.1343	0.0372	0.0022	0.0523
330.0	0.038	0.1341	0.0191	0.0021	0.0410
405.0	0.035	0.1339	0.0139	0.0021	0.0312

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



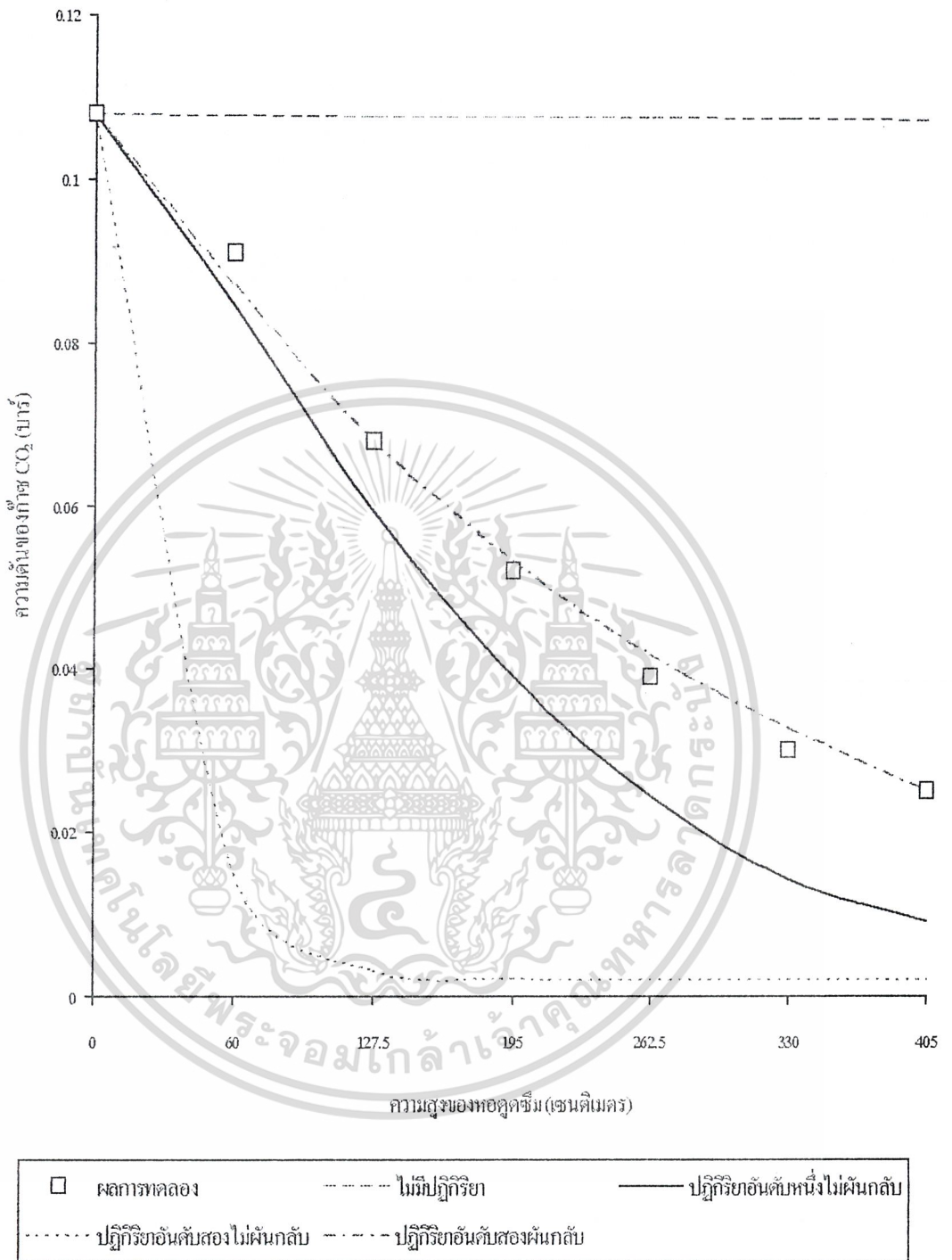
รูปที่ 6.3 กราฟเปรียบเทียบผลการคำนวณของการดูดซึ่มที่มีกลไกแบบต่าง ๆ ด้วยผลการทดลอง สำหรับการทดลองที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 10-12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนักเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.8 การเปรียบเทียบค่าความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คำนวณได้
เปรียบเทียบ กับผลการทดลอง สำหรับการทดลองครั้งที่ 2 ช่วงชั่วโมงที่ 6-9

ความสูงของ หลอดซีม (เซนติเมตร)	ความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (บาร์)				
	ผลการ ทดลอง	ไม่มี ปฏิกิริยา	ปฏิกิริยาอันดับ หนึ่ง ไม่ผันกลับ	ปฏิกิริยาอันดับ สอง ไม่ผันกลับ	ปฏิกิริยาอันดับ สอง ผันกลับ
0	0.108	0.108	0.108	0.108	0.108
60.0	0.091	0.1079	0.0846	0.0149	0.0870
127.0	0.068	0.1077	0.0593	0.0032	0.0681
195.0	0.052	0.1076	0.0391	0.0022	0.0534
262.5	0.039	0.1074	0.0245	0.0021	0.0418
330.0	0.030	0.1073	0.0142	0.0021	0.0328
405.0	0.025	0.1071	0.0091	0.0021	0.0250

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.4 กราฟเปรียบเทียบผลการคำนวณของการดูดซึมที่มีกลไกแบบต่าง ๆ คับ
ผลการทดลอง สำหรับการทดลองที่ 2 ช่วงชั่วโมงที่ 6-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.4 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซึมน้ำของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายโมโนเอทานอลามีน

ใช้กลไกการดูดซึมแบบที่ไม่มีปฏิกิริยาและแบบที่มีปฏิกิริยาอันดับสองผันกลับได้ในการคำนวณหาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซึมน้ำของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายโมโนเอทานอลามีน

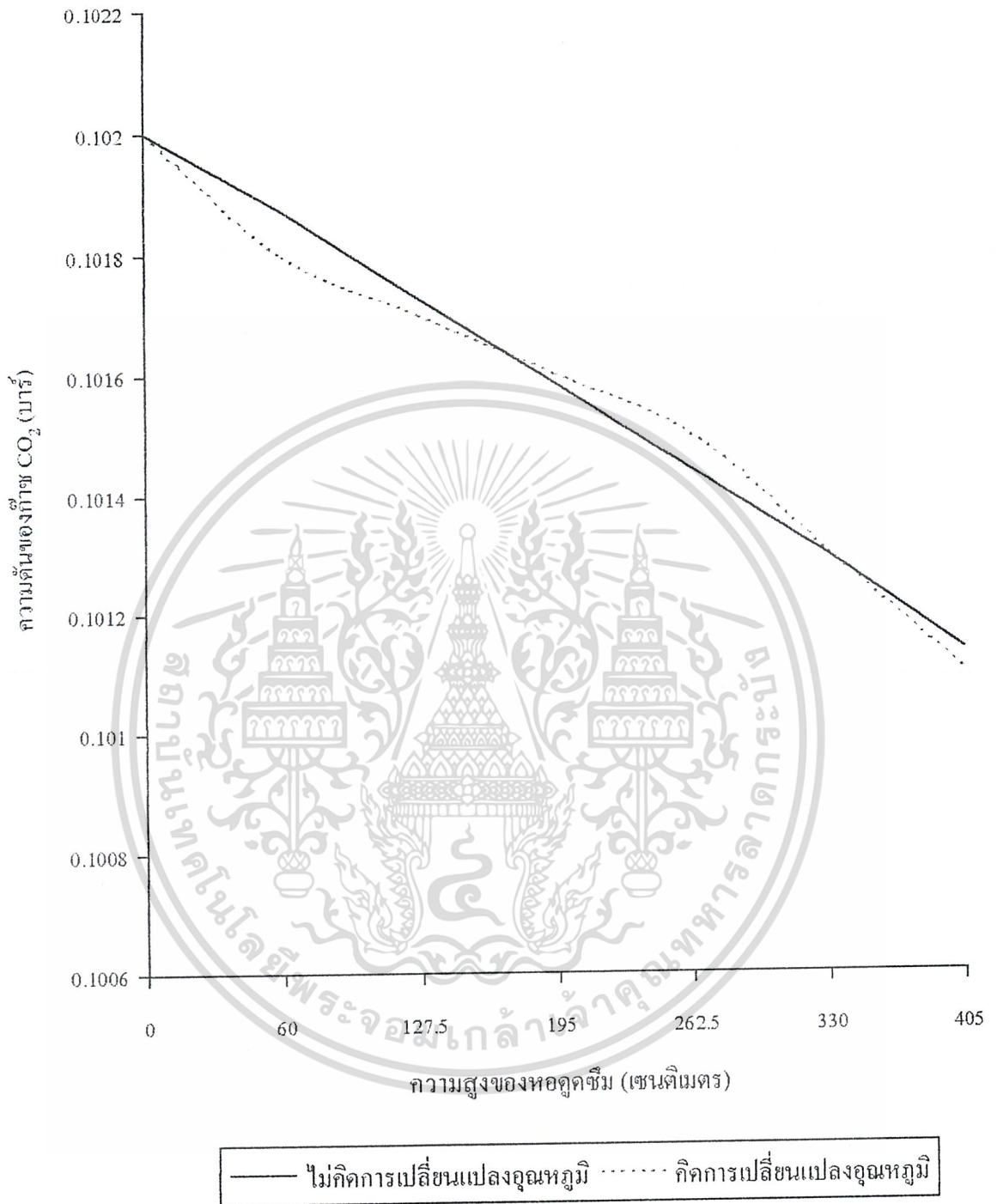
6.4.1 การดูดซึมน้ำของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยกลไกแบบที่ไม่มีปฏิกิริยาและคิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในหอดูดซึม

ตารางที่ 6.9-6.12 แสดงการเปรียบเทียบค่าความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คำนวณได้จากกลไกการดูดซึมแบบไม่มีปฏิกิริยาเมื่อไม่คิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและคิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของหอดูดซึม สำหรับรูปที่ 6.5-6.8 เป็นกราฟเปรียบเทียบค่าความดันที่คำนวณได้จากทั้งสองกรณีดังกล่าว

ตารางที่ 6.9 การดูดซึมน้ำของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายโมโนเอทานอลามีนแบบไม่มีปฏิกิริยา เมื่อคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของหอดูดซึมในการทดลองที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 3-4

ความสูงของหอดูดซึม (เซนติเมตร)	ความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (บาร์)	
	ไม่คิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	คิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
0	0.102	0.102
60.0	0.1019	0.1018
127.0	0.1017	0.1017
195.0	0.1016	0.1016
262.5	0.1014	0.1015
330.0	0.1013	0.1013
405.0	0.1011	0.1011

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอกองค์กร
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



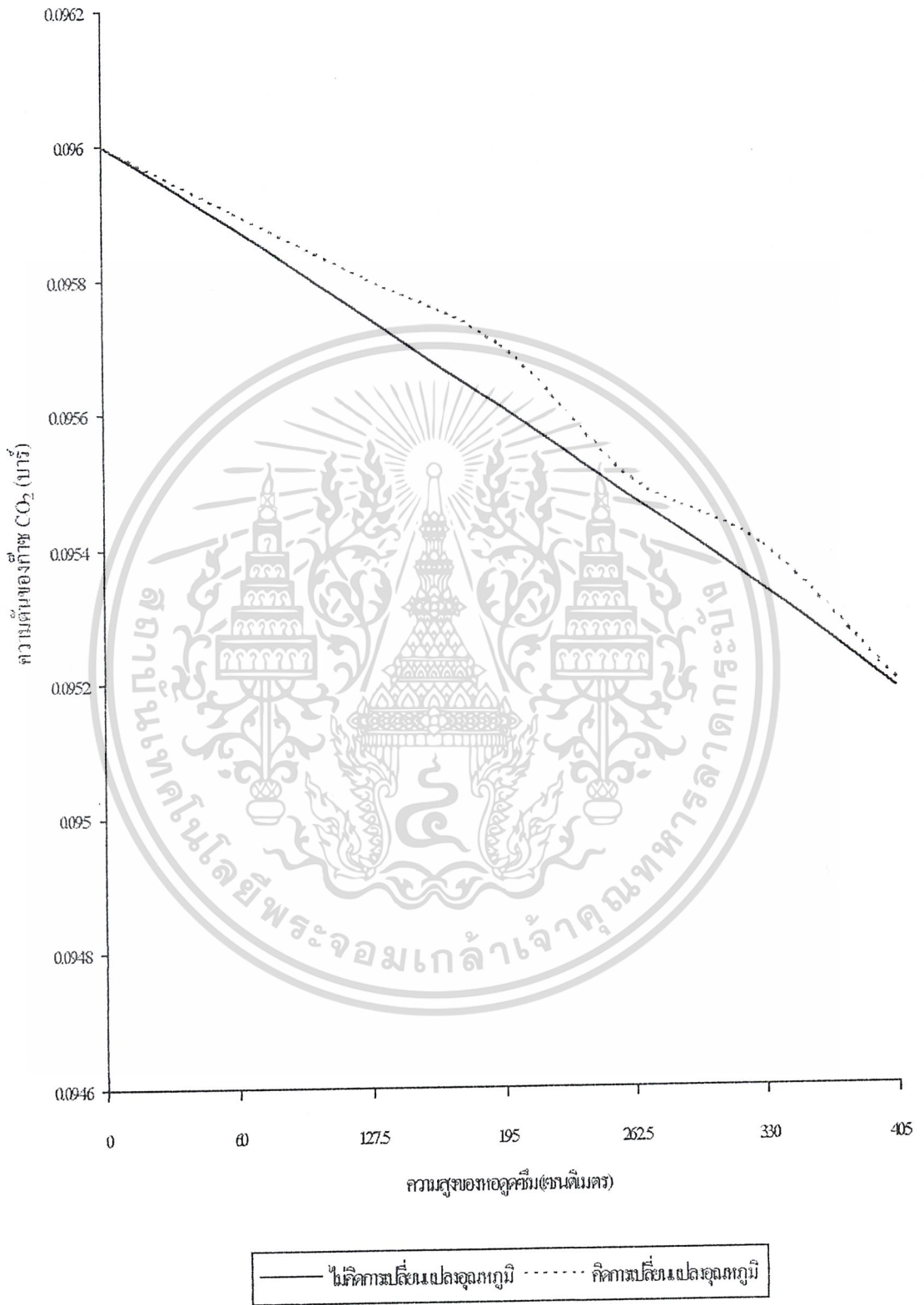
รูปที่ 6.5 กราฟเปรียบเทียบผลการคำนวณของการดูดซึมแบบไม่มีปฏิกิริยา แบบที่คิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับแบบที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในหอดูดซึม สำหรับการทดลองที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 3-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.10 การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายโมโนเอธาโนลามีนแบบ
ไม่มีปฏิกิริยา เมื่อคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของหอดูดซึม
ในการทดลองที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 4-6

ความสูงของหอดูดซึม (เซนติเมตร)	ความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (บาร์)	
	ไม่คิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	คิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
0	0.096	0.096
60.0	0.0959	0.0959
127.0	0.0957	0.0958
195.0	0.0956	0.0957
262.5	0.0955	0.0955
330.0	0.0953	0.0954
405.0	0.0952	0.0952

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

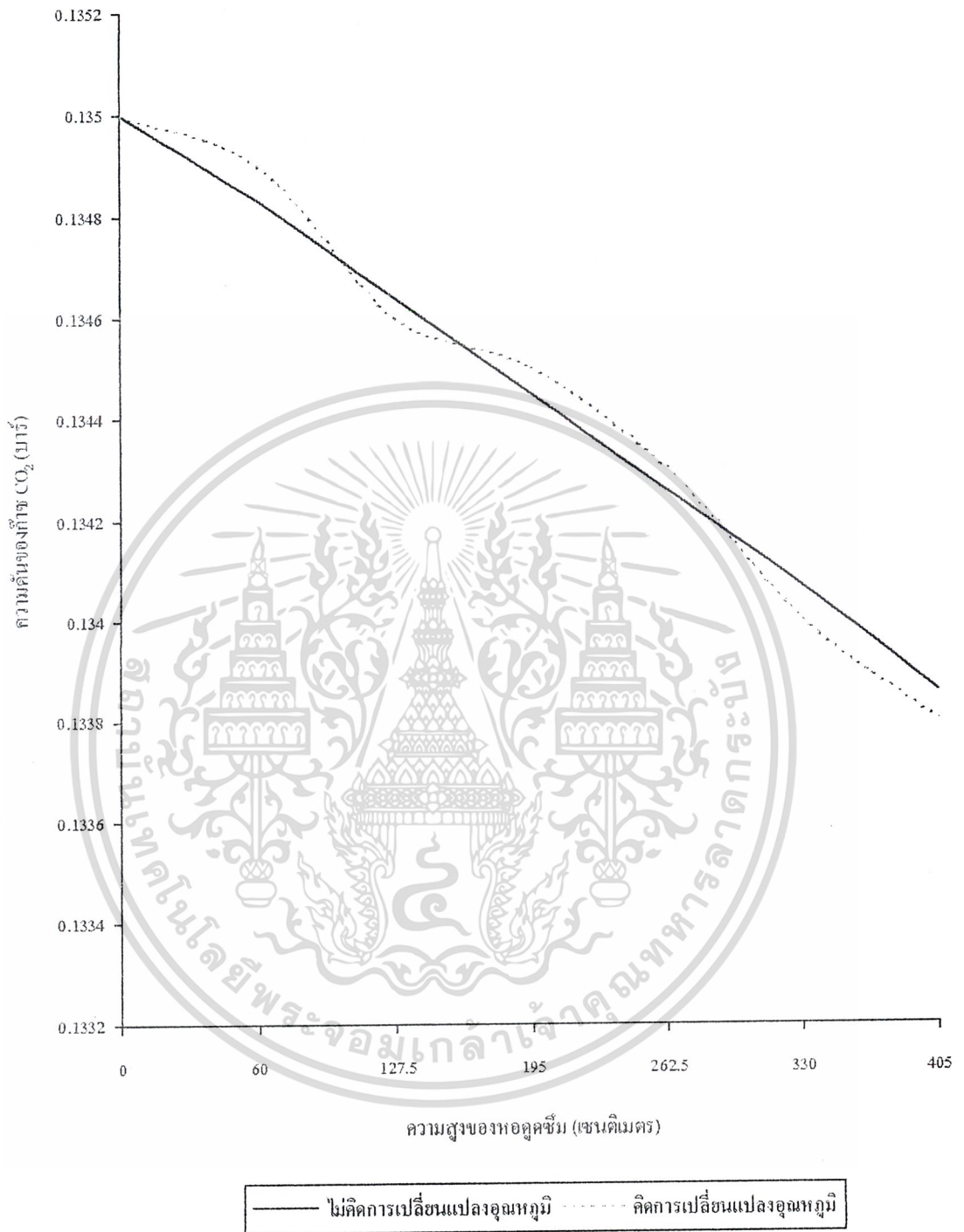


รูปที่ 6.6 กราฟเปรียบเทียบผลการคำนวณของการดูดซึมแบบไม่มีปฏิกิริยา แบบที่คิดการ
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 เปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับแบบที่ไม่คิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในหอคอย-
 ซีม ถ้าหากกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 ซีม สำหรับคาร์ทดลองที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 4-6

ตารางที่ 6.11 การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายโมโนเอทาโนลามีนแบบไม่มีปฏิกิริยา เมื่อคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของหอดูดซึมในการทดลองที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 10-12

ความสูงของหอดูดซึม (เซนติเมตร)	ความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (บาร์)	
	ไม่คิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	คิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
0	0.135	0.135
60.0	0.1348	0.1349
127.0	0.1346	0.1346
195.0	0.1344	0.1345
262.5	0.1343	0.1343
330.0	0.1341	0.1340
405.0	0.1339	0.1338

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



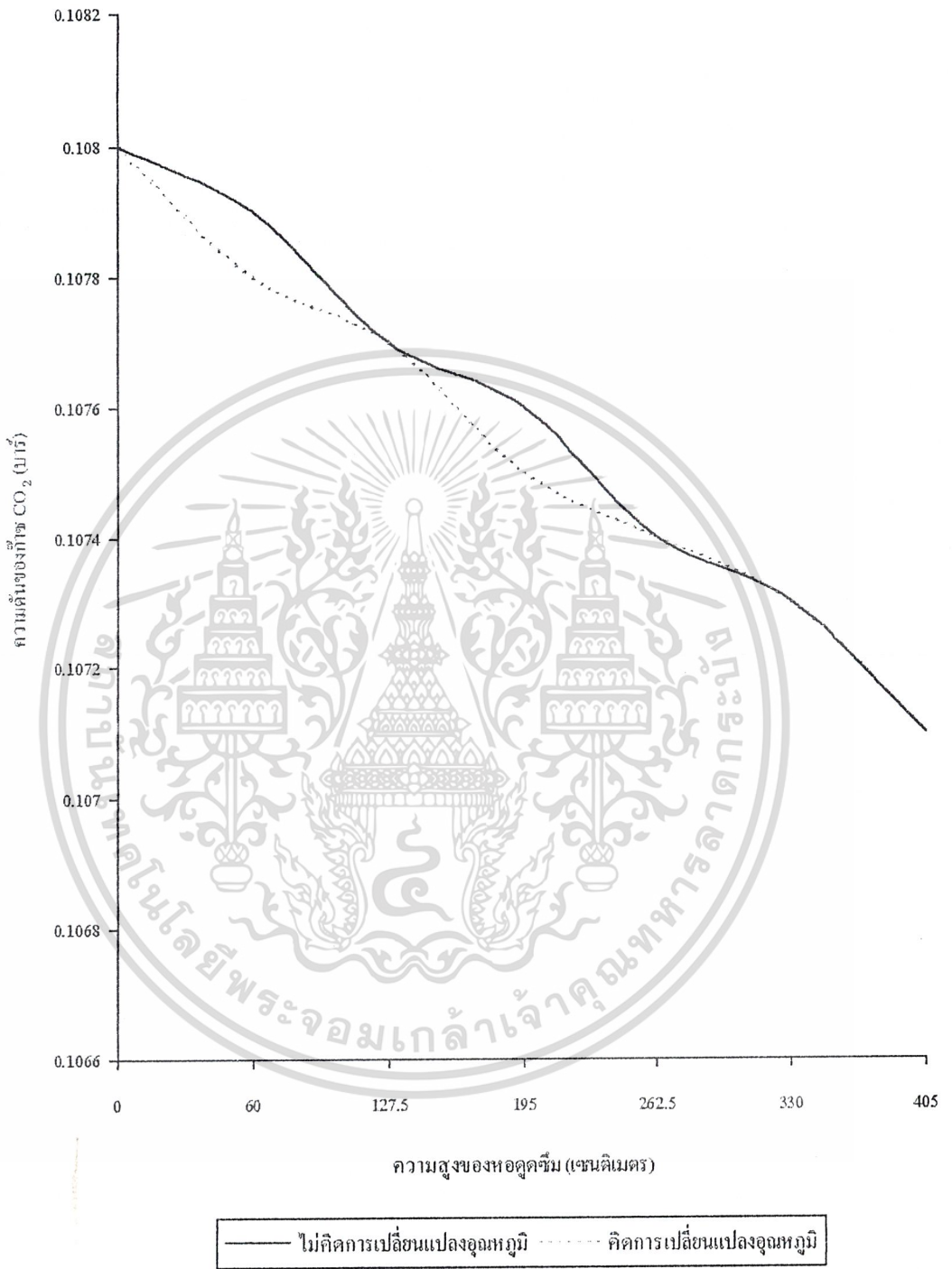
รูปที่ 6.7 กราฟเปรียบเทียบผลการคำนวณของกรูดซี่มแบบไม่มีปฏิกิริยา แบบที่คีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับแบบที่ไม่คีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในหอกูดซี่ม สำหรับกรทดลองที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 10-12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.12 การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายโมโนเอธาโนลามีนแบบ
ไม่มีปฏิกิริยา เมื่อคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของหอดูดซึม
ในภาคทดลองที่ 2 ช่วงชั่วโมงที่ 6-9

ความสูงของหอดูดซึม (เซนติเมตร)	ความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (บาร์)	
	ไม่คิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	คิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
0	0.108	0.108
60.0	0.1079	0.1078
127.0	0.1077	0.1077
195.0	0.1076	0.1075
262.5	0.1074	0.1074
330.0	0.1073	0.1073
405.0	0.1071	0.1071

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.8 กราฟเปรียบเทียบผลการคำนวณของ การดูดซึมแบบไม่มีปฏิกิริยา แบบที่คิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับแบบที่ไม่คิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในหอดูดซึม สำหรับการทดลองที่ 2 ช่วงชั่วโมงที่ 6-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

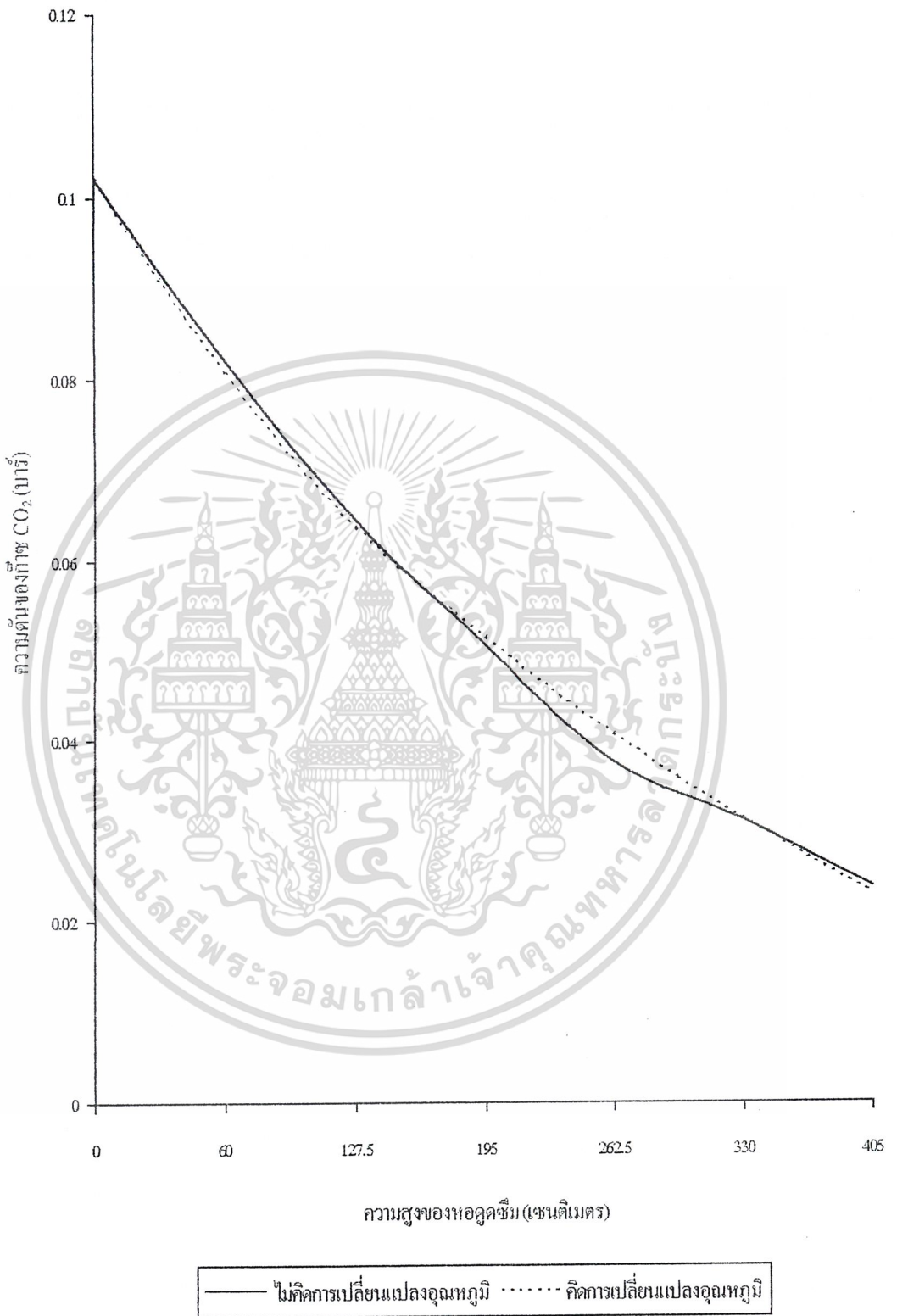
6.4.2 การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยกลไกแบบที่มีปฏิกิริยาอันดับสองแบบผันกลับและคิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในหอดูดซึม

ตารางที่ 6.13–6.16 แสดงการเปรียบเทียบค่าความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คำนวณได้จากกลไกการดูดซึมแบบที่มีปฏิกิริยาอันดับสองผันกลับ เมื่อไม่คิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและคิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของหอดูดซึม สำหรับรูปที่ 6.9 – 6.12 เป็นกราฟเปรียบเทียบค่าความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คำนวณได้ในทั้งสองกรณีดังกล่าว

ตารางที่ 6.13 การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายโมโนเอธาโนลามีนแบบที่มีปฏิกิริยาอันดับสองผันกลับ เมื่อคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของหอดูดซึม ในการทดลองที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 3-4

ความสูงของหอดูดซึม (เซนติเมตร)	ความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (บาร์)	
	ไม่คิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	คิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
0	0.1020	0.102
60.0	0.082	0.0805
127.0	0.0643	0.0636
195.0	0.0504	0.0513
262.5	0.0375	0.0407
330.0	0.0310	0.0312
405.0	0.0236	0.0229

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

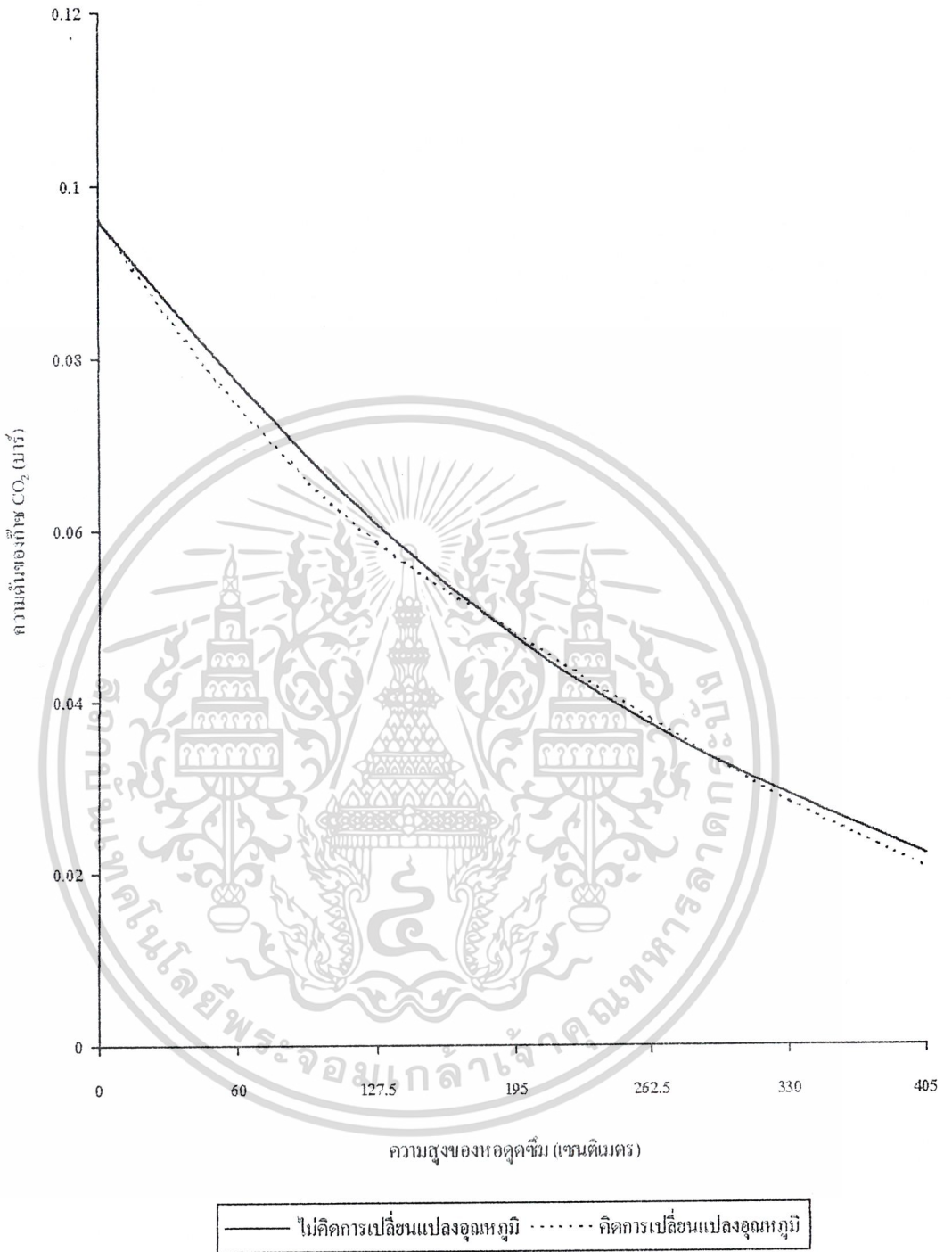


รูปที่ 6.9 กราฟเปรียบเทียบผลการคำนวณของคาร์บอนไดออกไซด์แบบที่มีปฏิกิริยาอันดับสอง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ให้นำกลับ แบบที่คิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับแบบที่ไม่คิดการเปลี่ยนแปลง
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ข้อมูลเอกสารนี้แก่บุคคลอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต
 อุดมฤทธิลาโยในหอดูดซึม สำหรับการทดลองที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 3-4

ตารางที่ 6.14 การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายโมโนเอธาโนลามีนแบบที่มีปฏิกิริยาอันดับสองผันกลับ เมื่อคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของหลอดซึม ในการทดลองที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 4-6

ความสูงของหลอดซึม (เซนติเมตร)	ความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (บาร์)	
	ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
0	0.096	0.096
60.0	0.0773	0.0744
127.0	0.0606	0.0586
195.0	0.0475	0.0479
262.5	0.0372	0.0378
330.0	0.0291	0.0282
405.0	0.0222	0.0206

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



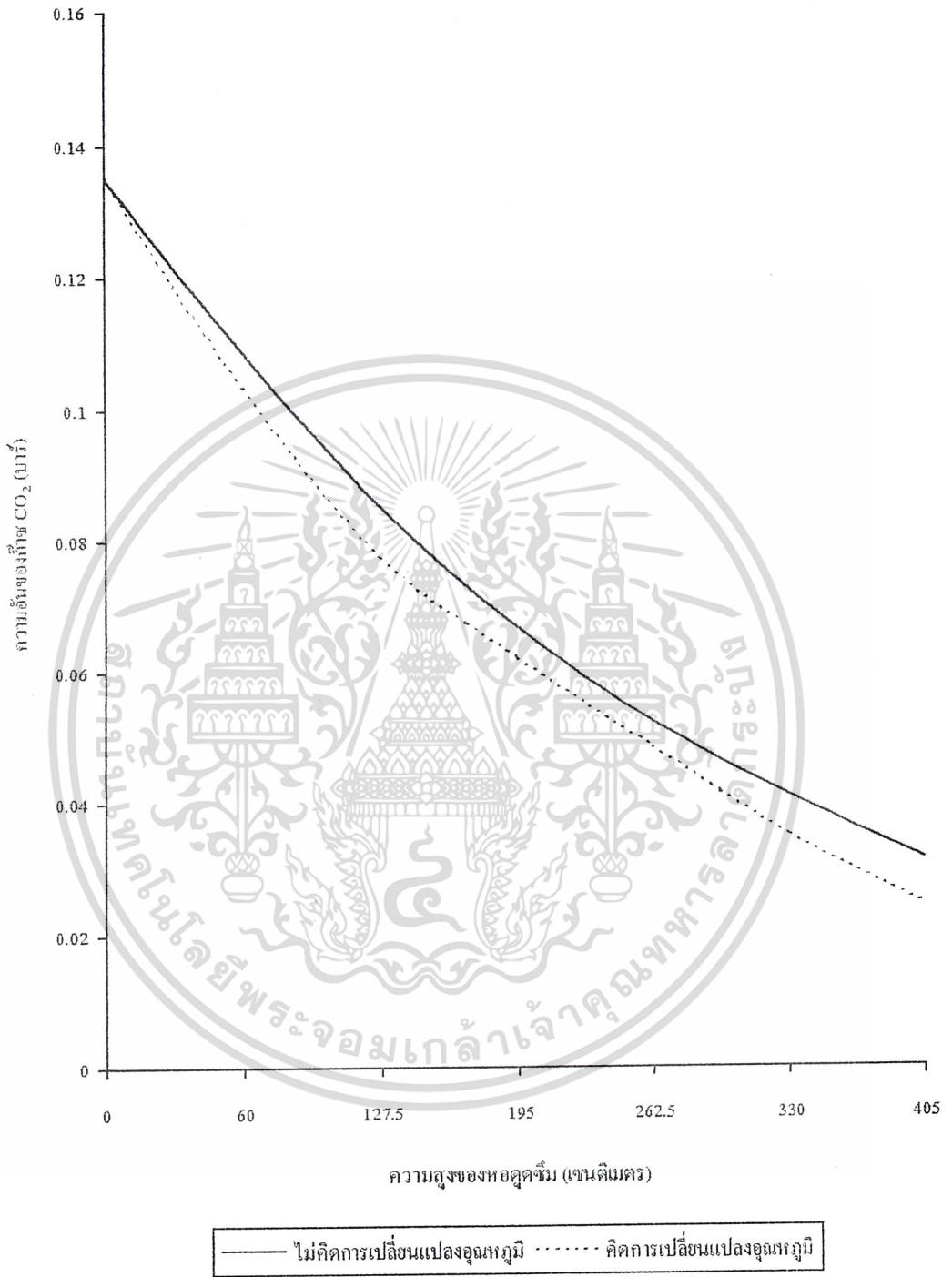
รูปที่ 6.10 กราฟเปรียบเทียบผลการคำนวณของ การดูดซึมแบบที่มีปฏิกิริยาอันดับสองผันกลับ แบบที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับแบบที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในหอคูดخم สำหรับการทดลองที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 4-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.15 การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายโมโนเอธาโนลามีนแบบ
ที่มีปฏิกิริยาอันดับสองผันกลับ เมื่อคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของ
หอดูดซึม ในการทดลองที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 10-12

ความสูงของหอดูดซึม (เซนติเมตร)	ความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (บาร์)	
	ไม่คิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	คิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
0	0.135	0.135
60.0	0.1087	0.1032
127.0	0.0852	0.0774
195.0	0.0667	0.0621
262.5	0.0523	0.0485
330.0	0.0410	0.0351
405.0	0.0312	0.0244

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



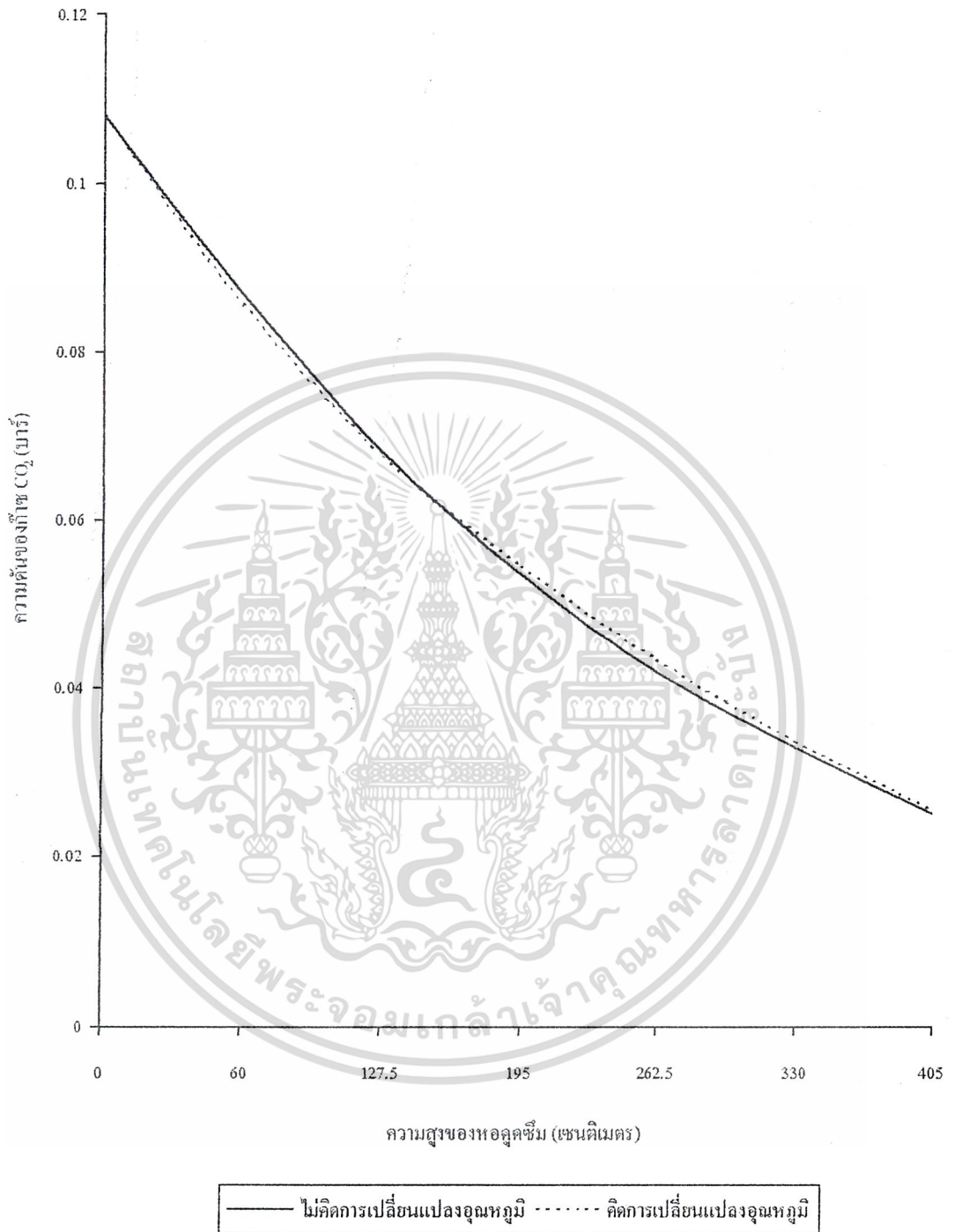
รูปที่ 6.11 กราฟเปรียบเทียบผลการคำนวณของการดูดซึมแบบที่มีปฏิกิริยาอันดับสอง
 ผันกลับ แบบที่กิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับแบบที่ไม่กิดการเปลี่ยนแปลง
 อุณหภูมิภายในหอดูดาว สำหรับการทดลองที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 10-12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.16 การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายโมโนเอทาโนลามีนแบบ
ที่มีปฏิกิริยาอันดับสองแบบผันกลับ เมื่อคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
ของหอดูดซึม ในการทดลองที่ 2 ช่วงชั่วโมงที่ 6-9

ความสูงของหอดูดซึม (เซนติเมตร)	ความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (บาร์)	
	ไม่คิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	คิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
0	0.108	0.108
60.0	0.0870	0.0856
127.0	0.0681	0.0676
195.0	0.0534	0.0545
262.5	0.0418	0.0432
330.0	0.0328	0.0336
405.0	0.0250	0.0254

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.12 กราฟเปรียบเทียบผลการคำนวณของการดูดซึมแบบที่มีปฏิริยาอันดับสองผันกลับแบบที่คิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับแบบที่ไม่คิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในหอดูดซึม สำหรับการทดลองที่ 2 ช่วงชั่วโมงที่ 6-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

สรุปผล

7.1 กลไกของการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายโมโนเอธาโนลามีน

จากรูปที่ 6.1 – 6.4 แสดงให้เห็นว่าความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของหอดูดซึมซึ่งคำนวณได้จากกลไกการดูดซึมแบบที่มีปฏิกิริยาเคมีอันดับสองผันกลับได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองมากที่สุด สรุปได้ว่า การทดลองการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายโมโนเอธาโนลามีนแบบที่นำมาศึกษานี้เป็นารดูดซึมที่มีปฏิกิริยาเคมีแบบอันดับสองผันกลับเกิดขึ้น

7.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายโมโนเอธาโนลามีน

จากรูปที่ 6.5–6.8 และรูปที่ 6.9 – 6.12 แสดงให้เห็นว่าความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของหอดูดซึมแบบที่ไม่คำนึงถึงผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีค่าใกล้เคียงกันดังนั้นสรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในหอดูดซึมของการทดลองนี้ไม่มีผลต่ออัตราการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลาย โมโนเอธาโนลามีน อย่างไรก็ตาม จากการที่อุณหภูมิภายในหอดูดซึมสูงขึ้นหลังจากที่มีการดูดซึม แสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายโมโนเอธาโนลามีนในน้ำนั้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้นกระบวนการนี้จะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิไม่สูงมากนัก เมื่อต้องการใช้กระบวนการนี้ จึงควรกำหนดสภาวะทางอุณหภูมิจัดให้เหมาะสม

อย่างไรก็ตาม แบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้อยู่บนสมมติฐานที่ว่าอัตราการไหลของวัฏภาคก๊าซมีค่าคงที่เท่านั้น หากเป็นกระบวนการดูดซึมที่มีสภาวะและสมมติฐานแบบอื่นๆ จะต้องสร้างแบบจำลองใหม่ แต่สามารถใช้ลำดับขั้นตอนการคำนวณแบบเดียวกันได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. Treybal, R.E., "Mass -Transfer Operation", 3rd ed., McGraw-Hill, 1981, 275-333
2. Kohl, A. and Riesenfeld, "Gas Purification", 2nd ed., Gulf Publishing, 1974
3. ชัยทวี โตจิรกุล, "การดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายโมโนเอธาโนลามีน ใน หอดูดซับแบบแพค", วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, ภาควิชาสหสาขาวิชาปิโตรเคมี-โพลีเมอร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530
4. Perry, R.H. and Green, D., "Perry's Chemical Engineer's Handbook", 6th ed.,
5. Butler, J.N, "Carbon Dioxide Equilibria and their application", Addison-Wesley Publishing Company
6. Jerome, G., "Carbon, Nitrogen and Sulfur Pollutants and Their Determination",
7. Sherwood, T.K. and Pigford, R.L., "Absorption and Extraction", McGraw-Hill, 1952, 217-369
8. Walker, W.H., Lewis, W.K., McAdams, W.H., and Gilliland, E.R., "Principle of Chemical Engineering", 1937, 462-513
9. "Encyclopedia of Chemical Technology", vol.5, 4th ed., A Wiley-Interscience Publication, John-Wiley & Sons, 1993
10. "Encyclopedia of Chemical Technology", vol.2, 4th ed., A Wiley-Interscience Publication, John-Wiley & Sons, 1993
11. "Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry", vol.A5, 5th ed., VCH, 1987, 166-171
12. "Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry", vol.A10, 5th ed., VCH, 1987, 166-171
13. Welty, J.R., Wicks, C.E. and Wilson, R.E., "Fundamental of Momentum, Heat and Mass Transfer", 3rd ed., John-Wiley & Sons, 1984
14. Danckwerts, P.V., "Gas-Liquid Reaction", McGraw-Hill Book Company, 1970
15. McCabe, W.L., Smith, J.C. and Harriott, P., "Unit Operation of Chemical Engineering", 5th ed. McGraw-Hill Book Company, 1993
16. Laddha, S. S. and Danckwerts, P.V., "Reaction of CO₂ with Ethanolamines: Kinetics from Gas-Absorption", *Chem.Eng.Sci.*, vol.36, 479-482 (1981)

17. Danckwerts, P.V., "The Reaction of Carbon Dioxide with Ethanolamines", *Chem.Eng.Sci.*, เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า vol.34, 443-446 (1979)

ไม่ว่ากรณีใดๆ พงษ์สิน ออกทงห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

18. Billet, R., "Pack Tower in Processing and Environmental Technology", VCH, 1995, 119-141
19. Etter, D.M., "Engineering Problem Solving with MATLAB", Prentice Hall, 1993
20. Lewis, M.J., "Physical Properties of Foods Processing Systems", Ellis Horwood Limited, 1990, 230
21. Foust, A.S., Wenzel, L.A., Crump, C.W., Maus, L. and Anderson, L.B., "Principle of Unit Operations", 2nd edition, John Wiley & Son, 1979
22. Decrousey, W.J., "Absorption with Chemical Reaction : Development of A New Relation for the Danckwerts Model.", *Chem.Eng.Sci.*, 29, 1867-1872, 1974
23. Bird, R.B., Stewart, W.E. and Lightfoot, E.N., "Transport Phenomena", John-Wiley & Sons, 1960
24. Sharma, M.M., "Kinetics of Gas Absorption", Ph.D.Thesis, University of Cambridge, 1964
25. Clark, J.K.A., "Kinetic of Gas Absorption in Monoethanolamine Solution at Short Contact Times", *Ind.Eng.Chem.Fundamentals*, 3, 1964, 239
26. Sada, E., Kumazawa, H. and Butt, M.A., "Chemical Absorption of Carbon Dioxide into Aqueous Solution of Monoethanolamine", *AIChE.J.*, 22, 1976, 196

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉากผนวก ก.

การคำนวณ

การทดลองที่นำมาใช้ในการหาผลึกเกิดการเกิดปฏิกิริยาการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในสารละลายโมโนเอธาโนลามีนนี้ เป็นระบบที่มีของไหลไหลสวนทางกันในหอดูดซึมแบบแพกการคำนวณค่าคงที่ต่าง ๆ และค่าความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของหอดูดซึมเป็นไปดังต่อไปนี้

1. การคำนวณค่าพื้นที่ผิวที่เปียกของเหลวของแพกกิ้งต่อปริมาตรของเบด (a) [18]

พื้นที่ผิวที่เปียกของเหลวของแพกกิ้งต่อปริมาตรของเบดสำหรับใช้ในสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลและอัตราการถ่ายเทมวลของการดูดซึมนี้ สามารถคำนวณได้จากสมการ (ก.1)

$$\frac{a}{a_v} = 3\varepsilon^{0.5} \left(\frac{u_L \rho_L}{a_v \mu_L} \right)^{-0.2} \left(\frac{u_L^2 \rho_L}{\sigma_L a_v} \right)^{0.75} \left(\frac{u_L^2 a_v}{g_c} \right)^{-0.45} \quad (\text{ก.1})$$

โดย a คือ พื้นที่ผิวที่เปียกของเหลวของแพกกิ้งต่อปริมาตรของเบด (ตารางเมตร/ลูกบาศก์เมตร)

a_v คือ พื้นที่ผิวของวัสดุที่เป็นแพกกิ้งต่อปริมาตรของแพกกิ้ง
= 387 เมตร²/เมตร³

ε คือ ค่า void fraction ของเบดของแพกกิ้ง = 0.73

u_L คือ ค่าอัตราการไหลต่อพื้นที่หน้าตัดของวัฏภาคของเหลว
= 4.041×10^{-3} ลูกบาศก์เมตร/ตารางเมตร.วินาที

μ_L คือ ความหนืดของวัฏภาคของเหลว
= 9.93464×10^{-4} กิโลกรัม/เมตร วินาที

ρ_L คือ ความหนาแน่นของวัฏภาคของเหลว
= 994 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

σ_L คือ ค่าแรงตึงผิวของของเหลว ค่านี้ใช้ค่าแรงตึงผิวของน้ำที่ 20 °C
= 0.0753 กิโลกรัม/วินาที²

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
แบบค่าต่าง ๆ เข้าไปในสมการ (ก.1) จะ ได้ค่าพื้นที่ผิวที่เปียกของเหลวของแพกกิ้งต่อ ปริมาตร
ของ เบดสำหรับระบบนี้เท่ากับ 61.362 ตารางเมตร/ลูกบาศก์เมตร

2. การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ [23]

2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในวัสดุแก๊ซ

วิธีก๊าซสำหรับระบบนี้คือก๊าซผสมที่ผลิตออกมาจากเตาผลิตก๊าซสังเคราะห์ที่สมมติให้ก๊าซผสมนี้มี สมบัติเหมือนกับอากาศการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในวิธีก๊าซใช้วิธีการของ Fuller, Schettler และ Giddling ดังสมการ

$$D_{A(air)} = \frac{10^{-3} T^{1.75} \left[\frac{(M_A + M_{air})}{M_A M_{air}} \right]^{\frac{1}{2}}}{P \left[(\sum v_A)^{\frac{1}{3}} + (\sum v_{air})^{\frac{1}{3}} \right]^2} \quad (ก.2)$$

โดย $(\sum v_A) = 26.9$ และ $(\sum v_{air}) = 20.1$

$D_{A(air)}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ

P คือ ความดันรวมของระบบ = 1 บาร์

T คือ อุณหภูมิเคลวินของห้องดูดซึม = 314.5 เคลวิน

M_A คือ น้ำหนักโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ = 44

M_{air} คือ น้ำหนักโมเลกุลของอากาศ = 28.09

แทนค่าต่าง ๆ เข้าไปในสมการ (ก.2)

$$D_{A(air)} = \frac{10^{-3} (314.5)^{1.75} \left[\frac{(44 + 28.09)}{44 \times 28.09} \right]^{\frac{1}{2}}}{1 \times \left[(26.9)^{\frac{1}{3}} + (20.1)^{\frac{1}{3}} \right]^2}$$

จะได้ $D_{A(air)} = 1.74 \times 10^{-5}$ ตารางเมตร/วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในวัสดุลาของเหลว [1]

ให้การแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลายโมโนเอทาโนลามีน มีลักษณะเหมือน การแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ได้

จาก

$$D_{A(MEA)} = \frac{117.3 \times 10^{-18} (M_{solvent})^{\frac{1}{2}} T}{\mu V_{solute}^{0.6}} \quad (ก.3)$$

โดย $D_{A(MEA)}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลาย โมโนเอทาโนลามีน (ตารางเมตร/วินาที)

$M_{solvent}$ คือ มวลโมเลกุลของตัวทำละลาย คือ มวลโมเลกุลของน้ำ = 18

T คือ อุณหภูมิ ในที่นี้ใช้อุณหภูมิเฉลี่ยของหลอดชิม คือ 40 องศาเซลเซียส

μ คือ ความหนืดของสารละลาย = 9.93464×10^{-4} กิโลกรัม/(เมตร.วินาที)

V_{solute} คือ ปริมาตรต่อโมลของตัวถูกละลาย = 0.0734

G คือ ค่า association factor ของสารละลาย = 2.26 สำหรับน้ำ

แทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ (ก.3)

$$D_{A(MEA)} = \frac{117.3 \times 10^{-18} (2.26 \times 18)^{\frac{1}{2}} \times 313}{9.93464 \times 10^{-4} \times (0.0734)^{0.6}}$$

จะได้

$$D_{A(MEA)} = 1.13 \times 10^{-2} \text{ ตารางเมตร/วินาที}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล[16]

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ใช้หลักการคำนวณ เช่นเดียวกับ การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คือ ให้วัฏภาคก๊าซคืออากาศและวัฏภาคของเหลว คือน้ำ

3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในวัฏภาคก๊าซ

สมการสำหรับคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์คือ

$$k_x = k_G P(1 - X_{AO}) \quad (\text{ก.4})$$

โดย k_x คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของระบบที่มีสององค์ประกอบ
 P คือ ความดันรวม = 1 บรรยากาศ
 X_{AO} คือ เศษส่วนโมลเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

จากสมการ (ก.4) สามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$k_G = \frac{k_x}{P(1 - X_{AO})} \quad (\text{ก.5})$$

ค่า k_x สามารถคำนวณได้จาก

$$k_x = \frac{j_D G_O}{M_{air} (Sc)^{\frac{2}{3}}} \quad (\text{ก.6})$$

ค่า j_D คือ Chilton-Colburn j-factor สำหรับการถ่ายเทมวล ค่านี้แปรผันไปตามค่า Reynold number (Re) ของระบบ ดังนี้

$$\text{Re} < 50 ; \quad j_D = 0.91 \text{Re}^{-0.51} \psi \quad (\text{ก.7})$$

$$\text{Re} > 50 ; \quad j_D = 0.61 \text{Re}^{-0.41} \psi \quad (\text{ก.8})$$

เมื่อ ψ คือ particle shape factor สำหรับก้อนกลมแบบแพน (ภาคผนวก ข) มีค่า 0.79
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า Reynold number ของระบบนี้ในวิชาเคมีหาได้จาก

$$\text{Re} = \frac{G_o}{a\Psi\mu} \quad (\text{ก.9})$$

โดย $G_o = 0.211$ กิโลกรัม/(ตารางเมตร.วินาที)

$a = 61,362$ ตารางเมตร/ลูกบาศก์เมตร

$\mu = 1.914 \times 10^{-5}$ กิโลกรัม/(เมตร.วินาที)

แทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ (ก.9) จะได้ $\text{Re} = 227.412$

ค่า Reynold number ของระบบมากกว่า 50 ดังนั้นใช้สมการ (ก.8) ในการคำนวณหาค่า j_D เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการจะได้

$$\begin{aligned} j_D &= 0.61 \times 227.412^{0.41} \times 0.79 \\ &= 0.052 \end{aligned}$$

ค่า Sc คือ Schmidt number หาได้จาก

$$\text{Sc} = \frac{\mu}{\rho D} \quad (\text{ก.10})$$

เมื่อ $\rho = 1.1235$ กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และ $D = 1.74 \times 10^{-5}$ ตารางเมตร/วินาที

แทนค่าต่าง ๆ ในสมการ (ก.10) จะได้

$$\text{Sc} = \frac{1.914 \times 10^{-5}}{1.1235 \times 1.74 \times 10^{-5}}$$

$$\text{Sc} = 0.979$$

คำนวณหาค่า k_x ได้

$$k_x = \frac{0.052 \times 0.211}{28.09(0.979)^{1/3}}$$

$$k_x = 3.962 \times 10^{-4} \text{ โมล/(วินาที.ตารางเมตร)}$$

จากสมการ (ก.5) คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า วิชาเคมีได้ $k_c = 4.42 \times 10^{-4}$ กิโลโมล/(บาร์.ตารางเมตร.วินาที) ไม่ว่าจะพิมพ์ใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในของเหลว

สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ในวัฏภาคของเหลวได้จาก

$$k_x = k_L C(1 - X_{BO}) \quad (\text{ก.11})$$

เมื่อ C คือ ความเข้มข้นของโมโนเอธาโนลามีนในสารละลาย = 2 โมล/ลิตร

X_{BO} คือ เศษส่วนโมลเริ่มต้นของตัวถูกละลาย = 0.1222

ค่ามวลโมลของสารละลายนี้คือ 23.26 ค่า Reynold number ของระบบในวัฏภาคของเหลว จากสมการ (ก.9) เมื่อ G_o และ μ สำหรับวัฏภาคของเหลวมีค่า 4.016 กิโลกรัม/(ตารางเมตร.วินาที) และ 9.93464×10^{-4} กิโลกรัม/(เมตร.วินาที) ตามลำดับ ได้ค่า Reynold number เท่ากับ 94.68 มากกว่า 50 ดังนั้นคำนวณหาค่า Chilton-Colburn j-factor จากสมการ (ก.7) ได้ 0.075

ค่า Schmid number จากสมการ (ก.10) มีค่าเท่ากับ 779.01 แทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ (ก.6) ได้

$$k_x = \frac{0.075 \times 4.016}{23.26(779.01)^2}$$

$$k_x = 1.52 \times 10^{-4}$$

คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ในวัฏภาคของเหลวจากสมการ (ก.11) ได้ $k_L = 1.06 \times 10^{-5}$ เมตร/วินาที

ดังนั้นค่าที่ต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับการคำนวณหาอัตราการดูดซึมก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ในสารละลายโมโนเอธาโนลามีน ได้แก่

$$a_v = 61.362 \text{ ตารางเมตร/ลูกบาศก์เมตร}$$

$$D_{A(av)} = 1.74 \times 10^{-5} \text{ ตารางเมตร/วินาที}$$

$$D_{A(MEA)} = 1.13 \times 10^{-9} \text{ ตารางเมตร/วินาที}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในโครงการวิจัยที่สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การคำนวณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของหอดูดซึม

กรณีที่ 1

สมมติฐาน

- 1) เป็นการดูดซึมแบบไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น
- 2) อัตราการไหลของวัฏภาคก๊าซที่ตลอดความสูงของหอดูดซึม
- 3) ไม่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในของเหลว ($C_{Ab} = 0$)
- 4) อุณหภูมิคงที่ตลอดความสูงของหอดูดซึม

อัตราการดูดซึมสามารถแสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$N_A a = k_L' a C_{Ai} \quad (\text{ก.12})$$

หรือ

$$N_A a = k_G a (P_A - H C_{Ai}) \quad (\text{ก.13})$$

จากสมการ (ก.12) และ (ก.13) จะได้

$$N_A a = \frac{P_A}{\frac{1}{k_G a} + \frac{H}{k_L' a}} \quad (\text{ก.14})$$

จากสมการ (3.20)

$$\frac{dP_A}{dz} = -N_A a \frac{AP_T}{V} \quad (\text{ก.15})$$

$$\frac{dP_A}{dT} = -\frac{P_A}{\frac{1}{k_G a} + \frac{H}{k_L' a}} \frac{AP_T}{V}$$

จะได้

โดย $P_T = 1$ บาร์

$$V = 2.476 \times 10^{-4} \text{ กิโลกรัมโมล/วินาที}$$

$$H = 41.73 \text{ บาร์.ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัมโมล (ภาคผนวก ก)}$$

$$A = 0.033 \text{ ตารางเมตร}$$

แทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ (ก.15) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{dP_A}{dz} = -0.01068 P_A \quad (\text{ก.16})$$

อินทิกรัลสมการ (ก.16) โดยใช้เงื่อนไขขอบเขตคือ

$$z=0 ; P_A = 0.102$$

$$z=z ; P_A = P_A$$

จะได้

$$\ln P_A = -0.01068z - 2.283 \quad (\text{ก.17})$$

สมการ (ก.17) เป็นสมการที่ใช้สำหรับหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปความดันกับความสูงของหอคูดซิม ในกรณีการดูดซิมแบบไม่มีปฏิกิริยา

กรณีที่ 2

สมมติฐาน

- 1) เป็นการดูดซิมที่มีปฏิกิริยาเคมีอันดับหนึ่งแบบไม่ผันกลับเกิดขึ้น
- 2) อัตราการไหลของวฏภาคก๊าซคงที่ตลอดความสูงของหอคูดซิม
- 3) ไม่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในของเหลว ($C_{Ab} = 0$)
- 4) อุณหภูมิคงที่ตลอดความสูงของหอคูดซิม

สมการอัตราการดูดซิมสามารถแสดงได้ดังนี้

$$N_A a = Ek_L^o a C_{A^*} \quad (\text{ก.18})$$

หรือ

$$N_A a = Ek_G a (P_A - HC_{A^*}) \quad (\text{ก.19})$$

จากสมการ (ก.18) และ (ก.19) จะได้

$$N_A a = \frac{P_A}{\frac{1}{k_G a} + \frac{H}{Ek_L^o a}} \quad (\text{ก.20})$$

ค่าตัวประกอบกระตุ้น (E) ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งหาได้จากสมการ (ก.21)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาเอกสารต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการเผยแพร่

$$E = \frac{\sqrt{D_A k_1}}{k_L} \quad (\text{ก.21})$$

โดย D_A คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลายโมโนเอทานอลามีน

$$= 1.13 \times 10^{-9} \text{ ตารางเมตร/วินาที}$$

k_L คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในวัฏภาคของเหลว

$$= 1.06 \times 10^{-5} \text{ เมตร/วินาที}$$

k_1 คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

ถือว่ามีการคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในระบบน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณโมโนเอทานอลามีน ดังนั้นเมื่อเกิดการดูดซึมจึงถือได้ว่าความเข้มข้นของโมโนเอทานอลามีนคงที่ และสามารถแทนค่า k_1 ได้ด้วย $k_2 C_{Bb}$

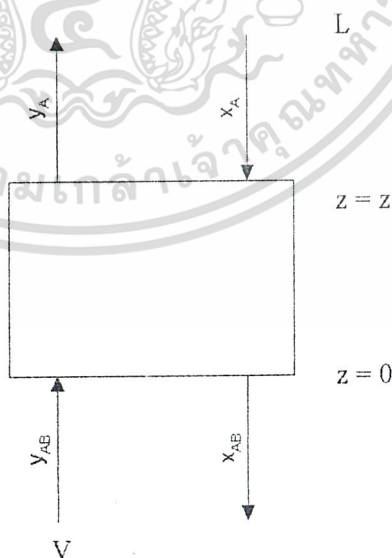
ค่า C_{Bb} คำนวณได้จาก

$$C_{Bb} = C_{Bo} - 2C_A \tag{ก.22}$$

โดย C_{Bo} = ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการดูดซึม = 2 โมล/ลิตร

ค่า C_A คำนวณได้จากการทำสมดุลมวลสารรอบส่วนที่อยู่ระหว่างกันหอกับระดับความสูง z

ดังแสดงในรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 ส่วนย่อยสำหรับทำสมดุลมวลสารเพื่อใช้คำนวณหาค่า C_A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าการพิมพ์หรือการเผยแพร่ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L(x_{AB} - x_A) = V(y_{AB} - y_A) \tag{ก.23}$$

$$\text{หรือ} \quad L_V(C_{AB}-C_A) = V(P_{AB}-P_A)/P_T \quad (\text{ก.24})$$

โดย L_V คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของวัฏภาคของเหลว = 0.133 ลิตร/วินาที จากสมการ (ก.24) จะได้

$$C_A = \frac{V(P_{AB}-P_A)}{P_T L_V} + C_{AB} \quad (\text{ก.25})$$

แทนค่า C_A ลงในสมการ (ก.22) จะได้

$$C_{Bb} = (C_{B0} - 2C_{AB}) + \frac{2V(P_{AB}-P_A)}{P_T L_V} \quad (\text{ก.26})$$

หรือ

$$C_{Bb} = (C_{B0} - 2C_{B0}CR_B) + \frac{2V(P_{AB}-P_A)}{P_T L_V} \quad (\text{ก.27})$$

CR_B คืออัตราส่วนการจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่กั้นหอดูดซึม ซึ่งจะต้องทำการสมมติขึ้นมา ถ้าสมมติได้ถูกต้องจะได้ค่า C_{Bb} ที่ส่วนบนของหอดูดซึมตรงกับค่า C_{Bb} ที่วัดค่าได้จากการทดลอง [3] ค่า CR_B ที่ผู้ทำการทดลองได้สมมติและทำให้ได้ค่าทั้งสองดังกล่าวได้ใกล้เคียงกันคือ ค่า $CR_B = 0.48$

P_{AB} คือค่าความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกระแสก๊าซที่ทางเข้าของหอดูดซึม สำหรับการทดลองที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 3-4 ค่า $P_{AB} = 0.102$ บาร์

เมื่อแทนค่าเข้าไปในสมการ (ก.27) จะได้

$$C_{Bb} = 0.4588 - 3.714P_A \quad (\text{ก.28})$$

แทนค่า C_{Bb} และ ค่า E เข้าไปในสมการ (ก-4.9) จะได้

$$N_A a = \frac{P_A}{37.037 + \frac{0.68052}{\sqrt{9.06 \times 10^{-6} - 7.3394 \times 10^{-5} P_A}}} \quad (\text{ก.29})$$

แทนค่า $N_A a$ จากสมการ (ก.29) ในสมการ (3-20) จะได้สมการอนุพันธ์สำหรับคำนวณความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในหอดูดซึมดังสมการ (ก.30)

$$\frac{dP_A}{dz} = - \frac{133.26P_A}{37.037 + \frac{0.68052}{\sqrt{9.06 \times 10^{-6} - 7.3394 \times 10^{-5} P_A}}} \quad (\text{ก.30})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
หาคำตอบของสมการ (ก.30) ได้โดยการใช้โปรแกรม MATLAB®

กรณีศึกษาที่ 3

สมมติฐาน

- 1) เป็นการดูดซับที่มีปฏิกิริยาเคมีอันดับสองแบบไม่ผันกลับเกิดขึ้น
- 2) อัตราการไหลของวัฏภาคก๊าซคงที่ตลอดความสูงของหอดูดซับ
- 3) ไม่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในของเหลว ($C_{Ab} = 0$)
- 4) อุณหภูมิคงที่ตลอดความสูงของหอดูดซับ

สมการอัตราการดูดซับคือ

$$N_{Aa} = Ek_L a C_{Ai} \quad (ก.31)$$

หรือ

$$N_{Aa} = k_g a (P_A - H C_{Ai}) \quad (ก.32)$$

ค่าเอนฮานซ์เมนต์แฟกเตอร์สำหรับกรณีนี้คำนวณได้จากสมการ (ก.33)

$$E = -\frac{M}{2(E_i - 1)} + \sqrt{\frac{M^2}{4(E_i - 1)^2} + \frac{E_i M}{(E_i - 1)} + 1} \quad (ก.33)$$

โดย

$$M = \frac{D_{A(MEA)} k_2 C_{Bb}}{(k_L)^2}$$

และ

$$E_i = \left(1 + \frac{D_B C_{Bb}}{n D_A C_{Ai}} \right)$$

D_B คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของโมโนเอธาโนลามีนในสารละลาย

$$= 7.8 \times 10^{-10} \text{ ตารางเมตร/วินาที (จากผนวก ๓)}$$

$$D_{A(MEA)} = 1.13 \times 10^{-9} \text{ ตารางเมตร/วินาที}$$

$$k_L = 1.06 \times 10^{-5} \text{ เมตร/วินาที}$$

n คือ จำนวนโมลของโมโนเอธาโนลามีนที่เข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์

$$= 2$$

$$k_2 = 17930 \text{ ลิตร/(โมล.วินาที)} \quad \text{ที่อุณหภูมิเฉลี่ยของหอดูดซับ 41 องศาเซลเซียส}$$

จากสมการ (ก.31) (ก.32) และ (ก.33) จะได้สมการสำหรับคำนวณค่าความดันของก๊าซ-

คาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการ (ก.34)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$\frac{dP_A}{dz} = -3.6143P_A + 150.8238C_{Ai} \quad (ก.34)$$

กรณี 4

สมมติฐาน

- 1) เป็นการดูดซึมที่มีปฏิกิริยาเคมีอันดับสองแบบผันกลับเกิดขึ้น
- 2) อัตราการไหลของวัฏภาคก๊าซคงที่ตลอดความสูงของหอดูดซึม
- 3) ไม่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในของเหลว ($C_{Ab} = 0$)
- 4) อุณหภูมิคงที่ตลอดความสูงของหอดูดซึม

สมการอัตราการดูดซึมสามารถแสดงได้ดังนี้

$$N_A a = Ek_L^0 a C_{Ai} \quad (\text{ก.35})$$

หรือ

$$N_A a = Ek_G a (P_A - HC_{Ai}) \quad (\text{ก.36})$$

จากสมการ (ก.31) และ (ก.32) จะได้

$$N_A a = \frac{P_A}{\frac{1}{k_G a} + \frac{H}{Ek_L^0 a}} \quad (\text{ก.37})$$

ค่าตัวประกอบกระตุ้น (E) ของปฏิกิริยาอันดับสองผันกลับได้หาได้จากสมการ (ก.38)

$$E = 1 + \frac{C_{Eb} \sqrt{\{K(C_{A^*} - C_{A0})\}}}{(1 + 2\sqrt{KC_{A^*}})(C_{A^*} - C_{A0})} \quad (\text{ก.38})$$

โดย	C_{Eb}	=	2		โมล/ลิตร
	C_{A^*}	=	0.0282		โมล/ลิตร
	C_{A0}	=	0		โมล/ลิตร
	K	=	0.478×10^5		

เมื่อแทนค่าต่างๆลงในสมการที่ (ก.38) จะได้ค่าตัวประกอบกระตุ้น(E)มีค่าเท่ากับ 35.985

จากสมการที่(3-20) เมื่อแทนค่าต่างๆลงไป จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำเนื้อหาไปใช้

$$\frac{dP_A}{dz} = -0.36136P_A \quad (\text{ก.39})$$

อินทิกรตสมการ(ก.39)โดยใช้เงื่อนไขขอบเขตคือ

$$z = 0 ; P_A = 0.102$$

$$z = z ; P_A = P_A$$

จะได้ $\ln P_A = -0.36136z - 2.2828$ (ก.40)

กรณีที่ 5

สมมติฐาน

- 1) เป็นการดูดซึมแบบไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น
- 2) อัตราการไหลของวัฏภาคก๊าซคงที่ตลอดความสูงของหอคูดซึม
- 3) ไม่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในของเหลว ($C_{Ae} = 0$)
- 4) อุณหภูมิไม่คงที่ตลอดความสูงของหอคูดซึม

การคำนวณสำหรับการดูดซึมในกรณีนี้ 5 นี้จะเหมือนกับการคำนวณในกรณีที่ 1 แต่ค่าต่าง ๆ ได้แก่สมบัติทางกายภาพค่าสัมประสิทธิ์การแพร่รวมถึงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของวัฏภาคของเหลวและก๊าซจะเปลี่ยนแปรลงไปตามอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของหอคูดซึมด้วย

สมการสำหรับคำนวณค่าความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความสูงต่าง ๆ ของหอคูดซึมในการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 3-4 แสดงไว้ดังตารางที่ ก.1

ตาราง ก.1 สมการสำหรับคำนวณค่าความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความสูงต่าง ๆ ของหอคูดซึมแบบไม่มีปฏิกิริยา ในการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 3-4

ช่วงความสูงของหอคูดซึม (z) (เซนติเมตร)	อุณหภูมิ (เคลวิน)	$\ln P_A$
0-101.3	308.0	$-0.00221z - 2.283$
101.3-168.8	314.6	$-0.00207z - 2.283$
168.8-236.3	317.2	$-0.00197z - 2.283$
236.3-303.8	317.5	$-0.00195z - 2.283$
303.8-371.3	316.2	$-0.00201z - 2.283$
371.3-405	314.9	$-0.00206z - 2.283$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 6

สมมติฐาน

- 1) เป็นการดูดซึมแบบมีปฏิกิริยาเคมีอันดับสองผันกลับเกิดขึ้นเกิดขึ้น
- 2) อัตราการไหลของวัฏภาคก๊าซคงที่ตลอดความสูงของหอดูดซึม
- 3) ไม่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในของเหลว ($C_{Ab} = 0$)
- 4) อุณหภูมิไม่คงที่ตลอดความสูงของหอดูดซึม

สมการสำหรับคำนวณค่าความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความสูงต่าง ๆ ของหอดูดซึม ในการทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 3-4 แสดงไว้ดังตารางที่ ก.2

ตาราง ก.2 สมการสำหรับคำนวณค่าความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความสูงต่าง ๆ ของหอดูดซึมแบบปฏิกิริยาอันดับสองผันกลับ ในกรณีทดลองครั้งที่ 1 ช่วงชั่วโมงที่ 3-4

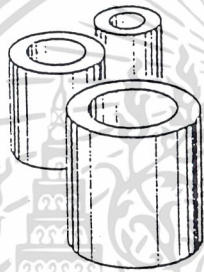
ช่วงความสูง ของหอดูดซึม (z) (เซนติเมตร)	อุณหภูมิ (เคลวิน)	$\ln P_A$
0-101.3	308.0	$-0.39332z-2.283$
101.3-168.8	314.6	$-0.37008z-2.283$
168.8-236.3	317.2	$-0.35203z-2.283$
236.3-303.8	317.5	$-0.35007z-2.283$
303.8-371.3	316.2	$-0.35882z-2.283$
371.3-405	314.9	$-0.36794z-2.283$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ลักษณะทางกายภาพของแพคกิ้ง

วัสดุที่ใช้เป็นแพคกิ้งในหอดูดูดซึมของการทดลองการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายโมโนเอชานอลามีนที่ศึกษานี้คือวงแหวนแรชชิก (Rashig ring) ที่ทำด้วยอะลูมิเนียมขนาดมาตรฐาน $\frac{1}{2}$ นิ้ว มีลักษณะดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 แพคกิ้งแบบวงแหวนแรชชิก (Rashig ring) [21]

พื้นที่ผิวของวัสดุที่เป็นแพคกิ้ง ต่อปริมาตรของแพคกิ้ง (a_v) สามารถหาได้จากตารางที่ ข-1 ซึ่งแสดงลักษณะทางกายภาพของแพคกิ้ง [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ลักษณะทางกายภาพของแหกคิง

Packing	Percent Voids (ϵ)	Specific Surface (a_v) ft ² /ft ³	Packing Factor F	Dumped Weight lb/ft ³
Ceramic Raschig rings				
$\frac{1}{8}$ in.	73	240	1600	46
$\frac{1}{2}$	63	111	580	54
1	73	58	155	40
2	74	28	65	38
Metal Raschig rings (1/16 in. wall)				
$\frac{1}{8}$	73	118	410	132
1	85	57	137	71
2	92	31.4	57	37
Berl saddles				
$\frac{1}{8}$ in.	60	274	900	56
$\frac{1}{2}$	63	142	240	54
1	69	76	110	45
2	72	32	45	40
Pall rings				
1 in.	93.4	66.3	48	33
2	94.0	36.6	20	27.5
Cyclohelix and single spiral				
$3\frac{1}{2}$ in.	58	40		60
4	60	32		61
6	66	21		59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ความดันไอ ปริมาตรจำเพาะ และเอนทาลปีของน้ำ

ค่าความดันไอ ปริมาตรจำเพาะ และเอนทาลปีของน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ เป็นไปดังแสดงไว้ใน ตาราง

ก.1

ตาราง ก.1 ค่าความดันไอ ปริมาตรจำเพาะ และเอนทาลปีของน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ

Temperature T , °F	Vapor pressure p_v , lb _f /in. ²	Specific volume, ft ³ /lb		Enthalpy, Btu/lb		
		Liquid v_x	Saturated vapor v_y	Liquid H_x	Vaporization λ	Saturated vapor H_y
32	0.08859	0.016022	3305	0	1075.4	1075.4
35	0.09992	0.016021	2948	3.00	1073.7	1076.7
40	0.12166	0.016020	2445	8.02	1070.9	1078.9
45	0.14748	0.016021	2037	13.04	1068.1	1081.1
50	0.17803	0.016024	1704.2	18.06	1065.2	1083.3
55	0.2140	0.016029	1431.4	23.07	1062.4	1085.5
60	0.2563	0.016035	1206.9	28.08	1059.6	1087.7
65	0.3057	0.016042	1021.5	33.09	1056.8	1089.9
70	0.3632	0.016051	867.7	38.09	1054.0	1092.0
75	0.4300	0.016061	739.7	43.09	1051.1	1094.2
80	0.5073	0.016073	632.8	48.09	1048.3	1096.4
85	0.5964	0.016085	543.1	53.08	1045.5	1098.6
90	0.6988	0.016099	467.7	58.07	1042.7	1100.7
95	0.8162	0.016114	404.0	63.06	1039.8	1102.9
100	0.9503	0.016130	350.0	68.05	1037.0	1105.0
110	1.2763	0.016166	265.1	78.02	1031.4	1109.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

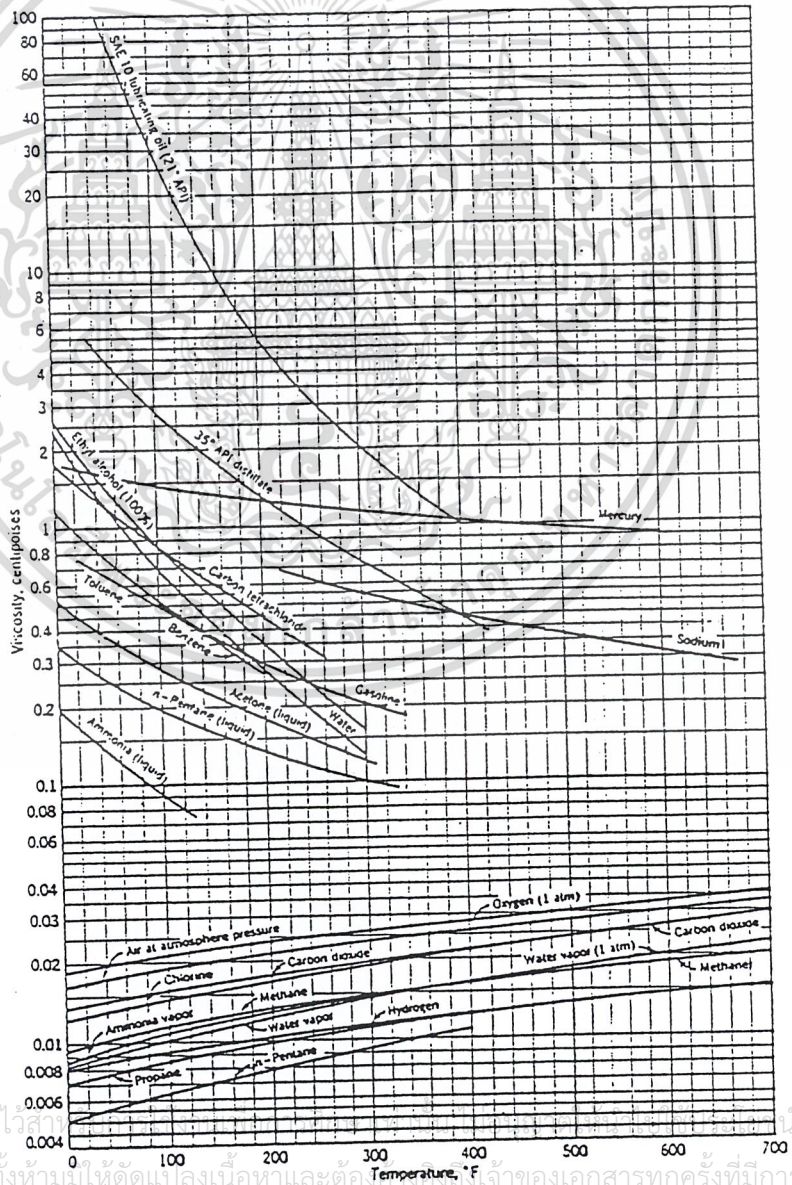
ภาคผนวก ง

ความหนืดของก๊าซและของเหลวที่อุณหภูมิต่างๆ

ค่าความหนืดของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำที่ใช้สำหรับการคำนวณ หาได้จากตาราง

ง.1

ตาราง ง.1 ความหนืดของก๊าซและของเหลวต่างๆ ที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิ ความดันคงที่ 1 บรรยากาศ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ...
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องขอขออนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

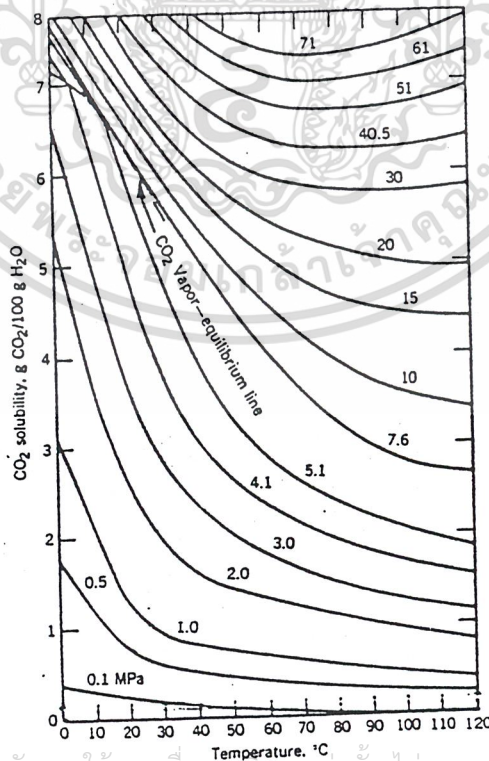
ค่าการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในโมโนเอทานอลามีน

การวิจัยครั้งนี้จะถือว่าการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลายโมโนเอทานอลามีนมีลักษณะเหมือนกับการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากสมการต่อไปนี้ [3]

$$\log H = 4.3651 - \frac{861.8175}{T} \tag{จ.1}$$

โดย H = ค่าคงที่เฮนรี (Henry constant)
 (บาร์.ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัม)
 T = อุณหภูมิ (เคลวิน)

สำหรับความสามารถในการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำที่ความดันต่างๆ แสดงไว้ในรูปที่ จ.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไขประโยชน์ด้านการค้า
 ระบุว่ากรณีใดๆ รูปที่ จ.1 ความสามารถในการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำที่ความดันต่างๆ

ภาคผนวก ฉ

ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับ 2

ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับโมโนเอทาโนลามีนที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ ฉ.1

ตารางที่ ฉ.1 ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับโมโนเอทาโนลามีน ณ อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่อัตราเร็ว (ลิตร/กรัม โมล.วินาที)	เอกสารอ้างอิง
18	5100	24
25	7600	24
	8300	25
	8400	26
35	13000	24

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับสองกับอุณหภูมิแสดงไว้ดังสมการ (ฉ.1) [24]

$$k_2 = A \exp\left(\frac{-4932.1815}{T}\right) \quad (\text{ฉ.1})$$

โดย $A = 1.16 \times 10^{11}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ค่าตัวประกอบรูปร่างของอนุภาค

ค่าตัวประกอบรูปร่างของอนุภาค (Particle shape factor) สำหรับใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารมีค่าแตกต่างกันไปตามรูปร่างของวัสดุที่ใช้บรรจุในหอคูลูซึม ค่านี้ได้แสดงไว้ในตาราง ข.1

ตาราง ข.1 ค่าตัวประกอบรูปร่างของอนุภาคสำหรับการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์

การถ่ายเทมวล

Particle Shape	ψ
ทรงกลม (Spheres)	1.00
ทรงกระบอก (Cylinders)	0.91
แผ่น (Flakes)	0.86
ราเชิกริง (Raschig rings)	0.79
พาร์ทิชันริง (Parttition rings)	0.67
ทรงอานม้า (Berl saddles)	0.80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ค่าคงที่สมดุล

ปฏิกิริยาระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับ โมโนเอทานอลามีนเป็นไปดังแสดงไว้ในสมการ (ข.1)



ค่า K คือค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา หาได้จาก [3]

$$K = \frac{K_1}{K_2 K_p} \quad (\text{ข.2})$$

โดย

$$K_1 = \frac{[\text{H}^+][\text{HCO}_3^-]}{[\text{CO}_2]} \quad (\text{ข.3})$$

จากรูป ข.1 จะได้ค่า $K_1 = 5.4 \times 10^{-7}$ โมล/ลิตร

$$K_2 = \frac{[\text{RNH}_2][\text{HCO}_3^-]}{[\text{RNHCOO}^-]} \quad (\text{ข.4})$$

จากรูป ข.2 จะได้ค่า $K_2 = 0.045$ โมล/ลิตร

$$K_p = \frac{[\text{H}^+][\text{RNHCOO}^-]}{[\text{RNH}_3^+]} \quad (\text{ข.5})$$

จากตารางที่ ข.1 จะได้ค่า $K_p = 2.512 \times 10^{-10}$ โมล/ลิตร

แทนค่า และ ลงในสมการ (ข.2) จะได้

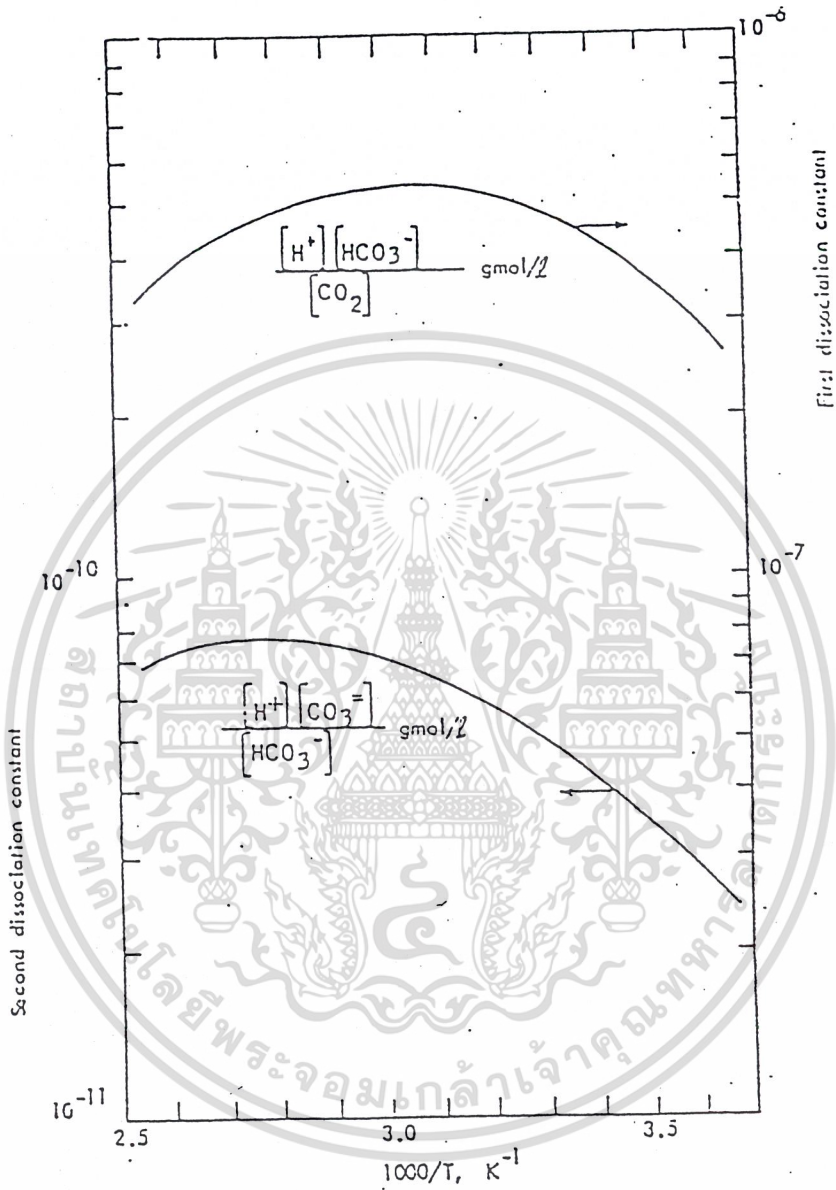
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ค่า pK ของสารประกอบเอมีนชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง

Primary amines		
n-butylamine	10.6	(nBA)
ethylenediamine	9.9	(EDA)
monoethanolamine	9.6	(MEA)
monoisopropanolamine	9.4	(MIPA)
Secondary amines		
2-ethylaminoethanol	9.8	(EAE)
2-methylaminoethanol	9.7	(MAE)
diethanolamine	8.9	(DEA)
diisopropanolamine	8.8	(DIPA)
Tertiary amines		
n-methyl piperidine ethanol	9.5	(MPE)
methyldiethanolamine	8.5	(MDEA)
triethanolamine	7.8	(TEA)

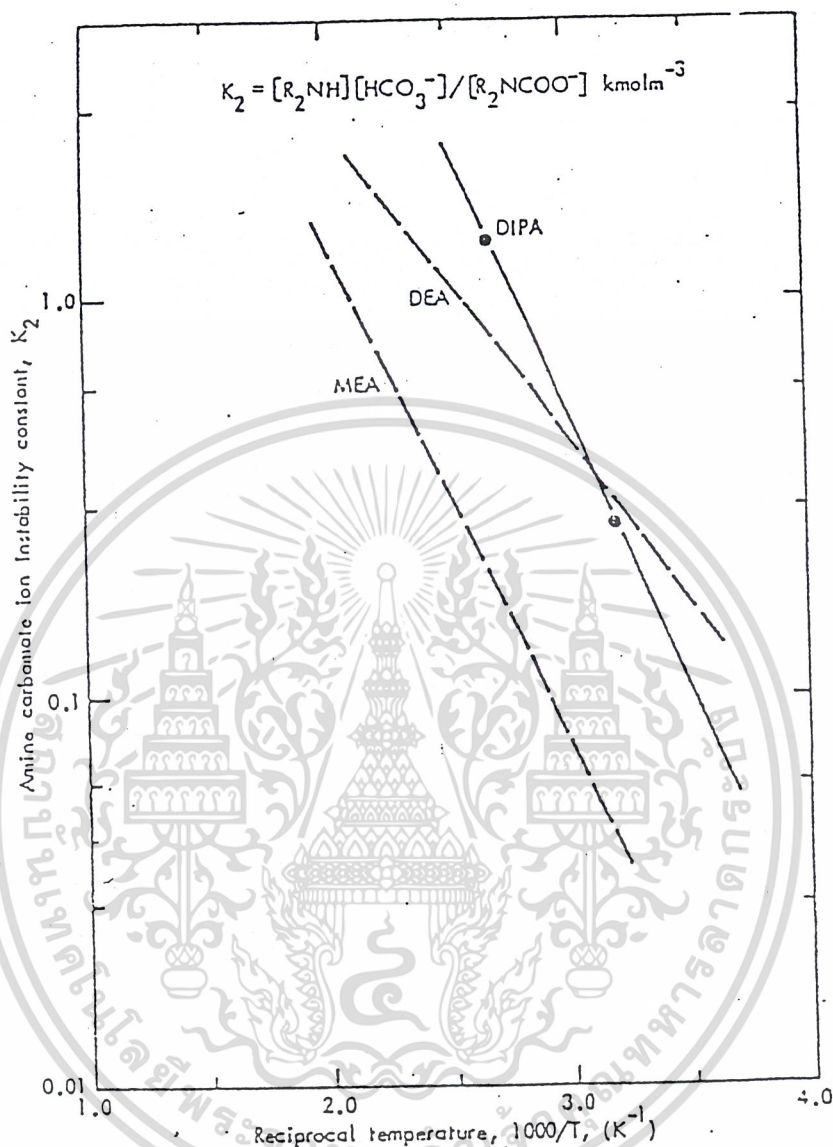
$${}^a pK = -\log_{10} K_p, K_p = \frac{[Am][H^+]}{[AmH^+]}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.1 ค่าคงที่การแตกตัวเป็นไอออนขั้นแรก (First Ionization Constant) ของคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.2 ค่าคงที่ความไม่เสถียรของคาร์บาเมต (Carbamate Instability Constant) ที่อุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้