

การศึกษาการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยน้ำโดยใช้ห่อวัสดุบรรจุ



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

การศึกษาการดูซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยน้ำโดยใช้ห่อวัสดุบรรจุ



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF CARBONDIOXIDE ABSORPTION WITH WATER
IN PACKED COLUMN



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING KING MONGKUT'S INSTITUTE OF
TECHNOLOGY LADKRABANG

2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาบัตรเรื่อง การศึกษาการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยน้ำโดยใช้ห่อวัสดุบรรจุ
โดย นางสาวเข็มจิรา โตชวงค์
นางสาวจิรภัทร วรรณประเสริฐ
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์

ปริญญาบัตรนี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการสอบปริญญาบัตร

.....ประธานกรรมการ
(ผศ.ดร.เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์)

.....กรรมการ
(ผศ.ดร.อภิรักษ์ นิ่มคณิตสรณ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์บุญชัย โชติวิริวาณิชย์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อภาษาไทย

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การศึกษาการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยน้ำโดยใช้ห่อวัสดุบรรจุ

โดย นางสาวเข็มจิรา โตชูวงศ์ รหัสนักศึกษา 54010141

นางสาวจิรภัทร วรรณประเสริฐ รหัสนักศึกษา 54010205

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์

ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยน้ำ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการทดลอง และนำข้อมูลไปศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสาร ในการทดลองได้ทำการศึกษาตัวแปรทั้งหมด 3 ตัวแปรคือ ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า 15, 20 และ 27.7 เปอร์เซ็นต์ อัตราการไหลของน้ำ 7.2, 15 และ 30 ลิตรต่อชั่วโมง และอัตราการไหลรวมของก๊าซ 450, 900 และ 1,250 ลิตรต่อชั่วโมง จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอัตราการไหลของน้ำ การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลรวมของก๊าซ การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง และพบว่า การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยน้ำภายใต้อุณหภูมิห้อง และความดันบรรยากาศที่เหมาะสมคือ ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 27.7 เปอร์เซ็นต์ อัตราการไหลของน้ำ 15 ลิตรต่อชั่วโมง และอัตราการไหลรวมของก๊าซ 450 ลิตรต่อชั่วโมง เนื่องจากเกิดการดูดซึมได้ดี และสภาวะนี้อยู่ในช่วงอัตราการไหลของน้ำที่ไม่ทำให้เกิดการท่วมของชั้นของเหลว และอัตราการไหลรวมของก๊าซต่ำจะไม่ทำให้เกิดการต้านระหว่างก๊าซกับของเหลวที่ไหลลงตามแรงโน้มถ่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

Report Title Study of carbon dioxide absorption with water in packed column

By Miss Kemjira Tojuvong ID. 54010141

Miss Jirapat Wannaprasert ID. 54010205

Adviser Asst.Prof.Dr. Kriangsak Kraiwattanawong

Report for Bachelor Degree of Chemical Engineering, Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

This research is to study of carbon dioxide absorption with water to identify the optimal condition and calculate mass transfer coefficient. The experimental variables include inlet carbon dioxide concentration (15, 20 and 27.7 percent), water flow rate (7.2, 15 and 30 liters per hour) and total gas flow rate (450, 900 and 1,250 liters per hour). Experimental results showed the carbon dioxide concentration in water increases, when the inlet carbon dioxide concentration and water flow rate increases. The carbon dioxide concentration in water decreases, when the total gas flow rate increases. So the experiments indicated that optimal condition for the absorption of carbon dioxide with water under room temperature and atmospheric pressure, 27.7 percent of carbon dioxide concentration, 15 liters per hour of water flow rate and 450 liters per hour of total gas flow rate, without flooding. The low total gas flow rate will not resist to fluid flow down by gravity.

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ เครื่องมืออุปกรณ์ในการทดลองการดูดซึม ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความรู้และความช่วยเหลือในทุกด้าน คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ คุณเอกราช บำรุงไทยชัยชาญ ที่คอยให้คำแนะนำ และช่วยเหลือในการจัดหาอุปกรณ์

คุณพ่อ คุณแม่ เพื่อน ๆ ของผู้จัดทำที่ให้การสนับสนุนการศึกษาและร่วมเป็นกำลังใจให้มาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ อีกทั้งยังร่วมแก้ไขปัญหาและแนวทางการดำเนินงานจนสามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ทั้งนี้หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้จัดทำขออภัยและขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

นางสาวเข็มจิรา โตชวงค์

นางสาวจิรภัทร วรรณประเสริฐ

วันที่ 19 พฤษภาคม 2558

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ความหมายและกระบวนการดูซึม	3
2.1.1 ระบบการดูซึม.....	5
2.1.2 กลไกของการดูซึม.....	5
2.1.3 หอวัสดุบรรจุ.....	9
2.1.4 หลักการทั่วไปของหอวัสดุบรรจุแบบไหลสวนทาง	10
2.1.5 ลิควิด โสลด์อ็อพ	11
2.1.6 ความดันลดของหอวัสดุบรรจุ.....	12
2.1.7 คำจำกัดความของสภาวะจุดท่วม	13
2.2 สารละลาย	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 ชนิดของสารละลาย	14
2.2.2 กระบวนการเกิดสารละลาย	14
2.2.3 การละลาย	14
2.3 ปฏิกริยาเคมี	15
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	17
3.1 สารเคมี	17
3.2 อุปกรณ์	17
3.3 วิธีการทดลอง	17
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	20
4.1 ข้อมูลเบื้องต้น	20
4.2 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซึมก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์	21
4.3 ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล	33
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	36
5.1 สรุปผลการทดลอง	36
5.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง	36
5.3 ข้อเสนอแนะ	37
เอกสารอ้างอิง	38
ภาคผนวก ก ข้อมูลดิบ	40
ก.1 อัตราการไหลของน้ำ 7.2 ลิตรต่อชั่วโมง	40
ก.2 อัตราการไหลของน้ำ 15 ลิตรต่อชั่วโมง	48
ก.3 อัตราการไหลของน้ำ 30 ลิตรต่อชั่วโมง	56
ภาคผนวก ข การคำนวณ	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.1 การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล.....	64
ข.2 การคำนวณวัสดุบรรจุ.....	72



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และห้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ค่าเวลาที่สารอยู่ในหลอดซีมีที่สภาวะต่าง ๆ	32
4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลที่สภาวะต่าง ๆ	34
4.3 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลที่ได้จากการทดลองกับงานวิจัยอื่น ๆ	35
ก.1 ข้อมูลคิบัติที่อัตราการไหลของน้ำ 7.2 ลิตรต่อชั่วโมง	40
ก.2 ข้อมูลคิบัติที่อัตราการไหลของน้ำ 15 ลิตรต่อชั่วโมง	48
ก.3 ข้อมูลคิบัติที่อัตราการไหลของน้ำ 30 ลิตรต่อชั่วโมง	56
ข.1 ค่าคงที่เฮนรีของก๊าซบางชนิด	66
ข.2 ค่าคงที่ C	67
ข.3 ค่าที่ได้จากการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (KA)	69
ข.4 ค่าเฉลี่ยของ C_1	72
ข.5 ค่าประมาณของ C_2	73

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ทฤษฎีเชื้อ 2 ชั้น	6
2.2 หอวัสดุบรรจุ	9
2.3 วัสดุที่บรรจุในแพคคอลัมน์.....	10
2.4 ความสัมพันธ์โดยทั่วไประหว่างความดันลด และอัตราการไหลเชิงปริมาตรของก๊าซ.....	12
3.1 แผนผังแสดงอุปกรณ์ในการทดลองการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยน้ำ	19
4.1 กราฟแสดงผลของเปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหลรวมของก๊าซแตกต่างกัน ที่ อัตราการไหลของน้ำ 7.2 ลิตรต่อชั่วโมง	21
4.2 กราฟแสดงผลของเปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหลรวมของก๊าซแตกต่างกัน ที่ อัตราการไหลของน้ำ 15 ลิตรต่อชั่วโมง	22
4.3 กราฟแสดงผลของเปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหลรวมของก๊าซแตกต่างกัน ที่ อัตราการไหลของน้ำ 30 ลิตรต่อชั่วโมง	23
4.4 การจำลองลักษณะการไหลของการใช้น้ำอัตราการไหลต่าง ๆ (A) 7.2 ลิตรต่อชั่วโมง (B) 15 ลิตรต่อชั่วโมง (C) 30 ลิตรต่อชั่วโมง.....	24
4.5 กราฟแสดงผลของอัตราการไหลของน้ำ ที่เปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์แตกต่างกัน และ อัตราการไหลรวมก๊าซ 450 ลิตรต่อชั่วโมง.....	25
4.6 แสดงความแตกต่างของการใช้น้ำที่อัตราการไหลต่าง ๆ ที่อัตราการไหลรวมของก๊าซ 450 ลิตร ต่อชั่วโมง (A) 7.2 ลิตรต่อชั่วโมง (B) 15 ลิตรต่อชั่วโมง (C) 30 ลิตรต่อชั่วโมง.....	26
4.7 กราฟแสดงผลของอัตราการไหลของน้ำ ที่เปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์แตกต่างกัน และ อัตราการไหลรวมก๊าซ 900 ลิตรต่อชั่วโมง	27
4.8 กราฟแสดงผลของอัตราการไหลของน้ำ ที่เปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์แตกต่างกัน และ อัตราการไหลรวมก๊าซ 1,250 ลิตรต่อชั่วโมง.....	28
4.9 กราฟแสดงผลของอัตราการไหลรวมของก๊าซที่อัตราการไหลของน้ำแตกต่างกัน และ คาร์บอน ไดออกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์.....	29

4.10 กราฟแสดงผลของอัตราการไหลรวมของก๊าซที่อัตราการไหลของน้ำแตกต่างกัน และ การรับอินไดออกไซด์ 20 Kเปอร์เซ็นต์.....	30
4.11 กราฟแสดงผลของอัตราการไหลรวมของก๊าซที่อัตราการไหลของน้ำแตกต่างกัน และ การรับอินไดออกไซด์ 27.7 เปอร์เซ็นต์.....	31
ข.1 สมดุลมวลของระบบ	65



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ภาวะโลกร้อนกำลังเป็นปัญหาสำคัญที่ควรให้ความสนใจ ซึ่งเกิดจากการปลดปล่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการเผาไหม้พลังงานเชื้อเพลิงของโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ดังนั้นจึงควรให้ความสำคัญในการหาวิธีในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อลดปริมาณการสะสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ วิธีการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีหลากหลายวิธี เช่น การแยกด้วยเมมเบรน (Membrane separation) การดูดซึม (Absorption) การดูดซับทางเคมีด้วยของแข็ง (Adsorption) และการดูดซับด้วยโมเลกุลสารซีฟ (Adsorption using molecular sieves) [1] ซึ่งวิธีการแยกด้วยเมมเบรนกับวิธีการดูดซับด้วยโมเลกุลสารซีฟ เป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายสูงและสิ้นเปลืองพลังงาน แต่วิธีการดูดซึม และการดูดซับทางเคมีเป็นอีกทางเลือกที่น่าสนใจ วิธีการดูดซับทางเคมีใช้อุณหภูมิในการทดลองต่ำ แต่จัดเตรียมตัวดูดซับที่ย่างยาก ใช้เวลานาน และการเตรียมต้องใช้อุณหภูมิสูง[2] ต่างจากการดูดซึมด้วยสารละลาย เป็นวิธีที่ง่ายกว่า สิ้นเปลืองพลังงานต่ำ สารละลายที่ใช้เป็นตัวดูดซึมสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำ อีกทั้งวิธีการดูดซึมยังเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในโรงงานอุตสาหกรรม จึงทำให้ต้องมีการศึกษาวิธีการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างละเอียด โดยในวิชาการทดลองปฏิบัติการเฉพาะหน่วย 2 (UNIT OPERATIONS LABORATORY 2) ได้มีการทดลองการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อศึกษาถึงกระบวนการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยน้ำ โดยอาศัยหลักการถ่ายเทมวลสารระหว่าง 2 วัฏภาค ซึ่งผลของการทดลองยังมีความคลาดเคลื่อนจากทฤษฎีการถ่ายเทมวลสาร ทำให้ยากในการวิเคราะห์และการสรุปผลการทดลอง ดังนั้น โครงการนี้จึงศึกษาการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยทำการทดลองที่สภาวะต่าง ๆ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการทดลองที่ทำให้การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยน้ำมีประสิทธิภาพ และมีแนวโน้มเป็นไปตามทฤษฎีการถ่ายเทมวลสาร ซึ่งในการทดลองทำการศึกษาตัวแปรอัตราการไหลรวมของก๊าซ อัตราการไหลของน้ำ และเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อหาสภาวะการทดลองที่ทำให้การดูดซึมมีประสิทธิภาพ และมีแนวโน้มเป็นไปตามทฤษฎีหลักการถ่ายเทมวลสาร

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1) ศึกษาหลักการถ่ายเทมวลสารระหว่างก๊าซกับของเหลว

2) ออกแบบการทดลอง และกำหนดตัวแปรที่ศึกษา

อัตราการไหลของน้ำ	7.2, 15 และ 30	ลิตรต่อชั่วโมง
-------------------	----------------	----------------

อัตราการไหลรวมของก๊าซ	450, 900 และ 1,250	ลิตรต่อชั่วโมง
-----------------------	--------------------	----------------

ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า	15, 20 และ 30	เปอร์เซ็นต์
--	---------------	-------------

3) ทำการทดลองตามขอบเขตของตัวแปรที่กำหนดข้างต้นที่สภาวะต่าง ๆ

วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) สามารถเป็นข้อมูลเบื้องต้นในวิชาปฏิบัติการเฉพาะหน่วย 2

2) สามารถนำไปประยุกต์ในการศึกษากระบวนการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซึมชนิดอื่น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความหมายและกระบวนการดูดซึม [3]

การดูดซึม (absorption) เป็นกระบวนการทางวิศวกรรมเคมีซึ่งใช้หลักการถ่ายโอนมวลสาร (mass transfer) โดยก๊าซในอากาศละลายในตัวทำละลายที่เป็นของเหลวด้วยแรงผลักดัน (driving force) เพื่อให้เกิดการถ่ายโอนมวลสาร แรงผลักดันที่ใช้ในการผลักดันก๊าซออกจากกระแสน้ำได้แก่ ความแตกต่างของความดันย่อย (partial pressure) ความดันไอ (vapor pressure) ที่ผิวหน้าของสารละลาย การดูดซึมจะเกิดขึ้นเมื่อแรงผลักดันเป็นบวก โดยก๊าซออกจากกระแสน้ำไปสู่ตัวทำละลาย แต่ถ้าแรงผลักดันเป็นลบจะไม่มี การดูดซึมเกิดขึ้น จะเปลี่ยนเป็นกระบวนการที่ตรงข้ามกับกระบวนการดูดซึมที่เรียกว่าการคายซับ (desorption) หรือ สตรีปปิง (stripping) กระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการที่ก๊าซออกจากตัวทำละลายไปสู่กระแสน้ำซึ่งใช้ในการกำจัดสารมลพิษที่ปะปนอยู่ในน้ำเสีย (wastewater)

อัตราการดูดซึมขึ้นกับคุณสมบัติทางกายภาพของก๊าซ เช่น การแพร่กระจาย อัตราการไหล ความเข้มข้น ความหนาแน่น และสถานะของตัวทำละลาย เช่น อุณหภูมิ อัตราการไหลของของเหลว เป็นต้น การดูดซึมเกิดได้ทั้งทางเคมีและทางกายภาพ การดูดซึมทางกายภาพเกิดขึ้นเมื่อก๊าซที่ถูกดูดซึมละลายอยู่ในตัวทำละลายโดยไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น การดูดซึมทางเคมีเกิดขึ้นเมื่อก๊าซที่ดูดซึมเกิดปฏิกิริยาเคมีกับตัวทำละลาย ถ้าก๊าซที่ปนเปื้อนในกระแสน้ำนั้นละลายในตัวทำละลายได้ดี การบำบัดด้วยการดูดซึมจะมีประสิทธิภาพสูง ดังนั้น สำหรับก๊าซปนเปื้อนที่ละลายไม่ดีในตัวทำละลายบางครั้งอาจต้องเติมสารเคมีเข้าไปเพื่อช่วยให้การละลายของก๊าซดีขึ้น และเพิ่มความสามารถในการละลายของก๊าซที่ปนเปื้อน เช่น การเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์[4] โมโนเอทานอลามีน หรือแอลกอฮอล์ในการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การเลือกตัวทำละลายที่ใช้ในการดูดซึมควรพิจารณาถึงประสิทธิภาพที่ต้องการและราคาของสารเคมี โดยทั่วไปมักใช้น้ำเป็นตัวทำละลายเนื่องจากก๊าซที่ปนเปื้อนส่วนใหญ่มักละลายน้ำได้ดี อีกทั้งน้ำยังสามารถหาได้ง่ายและราคาถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเลือกสารละลายที่จะนำมาใช้เป็นตัวดูดซึมนั้น ควรมีปัจจัยพิจารณาดังต่อไปนี้ [5]

1. ความสามารถในการละลายของก๊าซในสารละลาย (Gas Solubility)

ควรเลือกสารละลายที่มีค่าการละลายของก๊าซสูง ซึ่งโดยปกติสารละลายที่มีลักษณะทางเคมีใกล้เคียงกับก๊าซจะมีคุณสมบัติดังกล่าว การที่ก๊าซสามารถละลายแทรกเข้าไปในเนื้อสารละลายได้มากจะเป็นการเพิ่มอัตราการดูดซึม และเป็นการลดปริมาณสารละลายที่ต้องการใช้ในการดูดซึมลงด้วย

ปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารละลายและก๊าซเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่จะทำให้ก๊าซสามารถละลายเข้าไปในสารละลายมากขึ้น อย่างไรก็ตาม หากต้องการแยกก๊าซออกจากสารละลายเพื่อนำสารละลายกลับไปใช้ในกระบวนการดูดซึมใหม่แล้ว ปฏิกิริยาเคมีดังกล่าวต้องเป็นปฏิกิริยาเคมีแบบผันกลับได้

2. ความสามารถในการระเหยของสารละลาย (Volatility)

สารละลายที่ใช้ควรมีความดันไอต่ำหรือเป็นสารที่ระเหยได้ยาก เพื่อที่ว่าจะไม่เกิดการสูญเสียสารละลายออกไปพร้อมกับก๊าซในขั้นตอนของการทำให้ก๊าซระเหยแยกออกจากสารละลาย

3. การกัดกร่อนของสารละลาย (Corrosiveness)

สารละลายที่มีฤทธิ์กัดกร่อนทำให้ต้องใช้อุปกรณ์ที่ออกแบบเป็นพิเศษ และมีความทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดี ซึ่งย่อมมีราคาแพง ส่งผลให้ต้นทุนของกระบวนการเพิ่มสูงขึ้น

4. ต้นทุน (Cost)

สารละลายที่นำมาใช้งานควรมีราคาไม่แพงและหาได้ง่าย

5. ความหนืดของสารละลาย (Viscosity)

สารละลายที่มีความหนืดต่ำจะมีข้อดีคือ มีอัตราการดูดซึมสูง ลดการเกิดการท่วม (Flooding) ในหอดูดซึม นอกจากนี้ยังมีค่าการถ่ายเทความร้อนที่ดีอีกด้วย

6. ปัจจัยอื่นๆ

หากเป็นไปได้ควรเลือกใช้สารละลายที่ไม่มีพิษ ไม่ติดไฟ มีความเสถียรทางเคมี และมีจุดเยือกแข็ง

ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 ระบบการดูดซึม [3]

ระบบการดูดซึมแบ่งออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ แบบที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย และแบบที่ใช้สารละลายอินทรีย์เป็นตัวทำละลาย ตัวทำละลายควรมีค่าอัตราการระเหยต่ำ ดังนี้

1. ระบบที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (aqueous systems) ในระบบนี้ก๊าซที่ต้องการกำจัดออกได้จะต้องมีความสามารถในการละลาย (solubility) ในน้ำที่เพียงพอ ณ อุณหภูมิของกระแสอากาศที่ถูกปลดปล่อยออกจากกระบวนการผลิต สำหรับก๊าซที่มีความสามารถในการละลายในน้ำต่ำ เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จะต้องใช้น้ำในการบำบัดเป็นปริมาณมาก จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้น้ำในการบำบัด ก๊าซที่เหมาะสมในการใช้น้ำบำบัด ได้แก่ ก๊าซไฮโดรคลอริก (hydrochloric) และก๊าซไฮโดรฟลูออริก (hydrofluoric) เป็นต้น และถ้ายิ่งใช้น้ำที่มีค่า pH ที่สูงหรือมีความเป็นด่าง ก็จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซที่มีคุณสมบัติเป็นกรดให้สูงขึ้น ในบางครั้งในบางครั้งจึงมีการใช้น้ำจากแหล่งน้ำที่มีค่า pH สูงหรือเติมสารเคมีที่มีความเป็นด่างลงในน้ำเพื่อเพิ่มค่า pH ของน้ำสูงขึ้น เช่น การเติม โซดาไฟหรือปูนขาว เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วจะใช้น้ำเป็นตัวทำละลายเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่มีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดีเท่านั้น

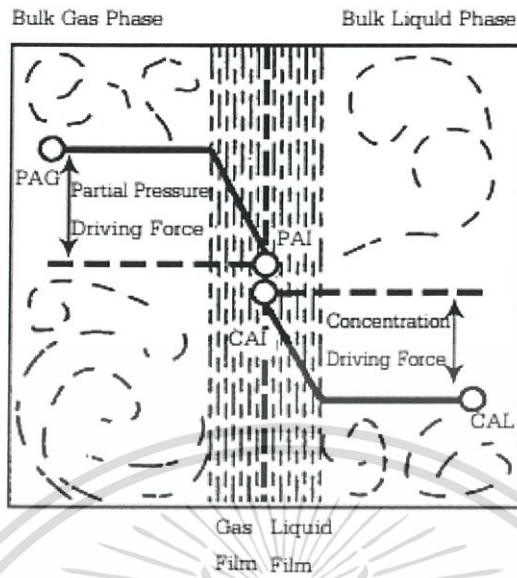
2. ระบบที่ใช้สารละลายอินทรีย์เป็นตัวทำละลาย ในระบบนี้จะใช้ของเหลวที่เป็นสารอินทรีย์แทนน้ำ เช่น โมโนเอทานอลามีน แอลกอฮอล์ ข้อจำกัดของของเหลวหรือสารละลายเหล่านี้คือ สามารถที่จะใช้ได้เฉพาะกับกระแสอากาศเสียที่มีสารมลพิษปนเปื้อนเป็นก๊าซที่ปราศจากอนุภาคเจือปน เพราะถ้าหากว่ามีอนุภาคเจือปนอยู่ในกระแสอากาศแล้ว จะทำให้เกิดการรวมตัวระหว่างตัวทำละลายดังกล่าวกับอนุภาคกลายเป็นกากตะกอน (sludges) ซึ่งยากที่จะกำจัดออกไปในภายหลัง

ในระบบการดูดซึมไม่ว่าจะเป็นระบบที่ใช้น้ำหรือไม่ใช้น้ำก็ตาม อาจใช้วิธีง่าย ๆ โดยการผ่านก๊าซที่ต้องการดูดซึมในตัวทำละลาย เมื่อเกิดการดูดซึมแล้ว ก็กำจัดตัวทำละลายที่ปนเปื้อนแล้วนั้นทิ้งไป โดยไม่นำมาใช้อีก หรือหลังจากการดูดซึมแล้วอาจนำตัวทำละลายมาแยกก๊าซหรือไอที่ดูดซึมเอาไว้เพื่อนำสารละลายนั้นมาใช้ใหม่

2.1.2 กลไกของการดูดซึม

การดูดซึมเป็นการเคลื่อนย้ายมวลของก๊าซหรือไอที่เป็นสารมลพิษออกจากกระแสอากาศไปสู่ตัวทำละลาย แบบจำลองที่ใช้สำหรับอธิบายกลไกของกระบวนการดูดซึมคือ ทฤษฎีเยื่อ 2 ชั้น (two films theory) แบบจำลองนี้อธิบายเกี่ยวกับการเคลื่อนย้ายมวลสารที่มีอยู่ในสถานะก๊าซและของเหลวบริเวณระหว่างผิวสัมผัสของก๊าซและของเหลว ดังรูปที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ทฤษฎีเยื่อ 2 ชั้น [3]

ทฤษฎีนี้สมมติว่าส่วนของก๊าซและของเหลวมีการสัมผัสกันอย่างสมบูรณ์ ทำให้มีการถ่ายโอนมวลสารของสิ่งที่อยู่ในก๊าซหรือของเหลวโดยการแพร่กระจายของโมเลกุลผ่านเยื่อที่กั้นระหว่างก๊าซกับของเหลวจนกระทั่งเข้าสู่จุดสมดุล จากรูปที่ 2.1 เมื่อการแพร่กระจายของโมเลกุลของสารเข้าสู่จุดสมดุลแล้ว ความดันย่อยของมวลของสาร A ในสถานะก๊าซจะเปลี่ยน จาก P_{AG} เป็น P_{AI} ที่ผิวระหว่างเนื้อเยื่อทั้งสอง ในทำนองเดียวกัน ความเข้มข้นของมวลของสารในสถานะของเหลวจะเปลี่ยนจาก C_{AI} เป็น C_{AL} อัตราส่วนการเคลื่อนย้ายอธิบายได้โดยสมการต่อไปนี้

$$N_A = k_G (P_{AG} - P_{AI}) \quad (2.1)$$

$$N_A = k_L (C_{AI} - C_{AL}) \quad (2.2)$$

เมื่อ N_A = อัตราส่วนของการเคลื่อนย้ายของค้ประกอบของสาร A (กรัม โมลต่อชั่วโมง·ตารางเมตร)

k_G = ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลสถานะก๊าซ (กรัม โมลต่อชั่วโมง·ตารางเมตร·ปาสคาล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

k_L = ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลสถานะของเหลว (กรัม โมลต่อชั่วโมง·ตารางเมตร·ปาสคาล)

P_{AG} = ความดันย่อยของสาร A ในสถานะก๊าซ (ปาสคาล)

P_{AI} = ความดันย่อยของสาร A ที่พื้นผิวสัมผัส (ปาสคาล)

C_{AL} = ความเข้มข้นของสาร A ในสถานะของเหลว (กรัม โมลต่อลูกบาศก์เมตร)

C_{AI} = ความเข้มข้นของสาร A ที่พื้นผิวสัมผัส (กรัม โมลต่อลูกบาศก์เมตร)

ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวล k_G และ k_L แสดงถึงค่าความต้านทานการไหลของตัวทำละลายที่พบว่ามีการกระจายทะลุผ่านผิวเนื้อเยื่อ สมการทั้งสองจะมีความแตกต่างกันในการใช้งาน เนื่องจากไม่สามารถวัดค่าความเข้มข้นที่ระหว่างเนื้อเยื่อทั้งสองได้ จึงได้มีการอธิบายการเคลื่อนย้ายมวลที่สภาวะสมดุลและมีการรวมค่าความต้านทานของแต่ละเนื้อเยื่อที่มีอยู่ทั้งหมดเข้าไปด้วย ถ้าเส้นสมดุลเป็นเส้นตรงจะได้อัตราการดูดซึมเป็นดังนี้

$$N_A = K_{OG} (P_{AG} - P_{A^*}) \quad (2.3)$$

$$N_A = K_{OL} (C_{A^*} - C_{AI}) \quad (2.4)$$

เมื่อ P_{A^*} = ความดันที่จุดสมดุลของตัวทำละลาย A (ปาสคาล)

C_{A^*} = ความเข้มข้นที่จุดสมดุลของตัวทำละลาย A (กรัม โมลต่อลูกบาศก์เมตร)

K_{OG} = ค่าสัมประสิทธิ์พื้นฐานของการเคลื่อนย้ายมวลทั้งหมดในสภาวะก๊าซ (กรัม โมลต่อชั่วโมง·ตารางเมตร·ปาสคาล)

K_{OL} = ค่าสัมประสิทธิ์พื้นฐานของการเคลื่อนย้ายมวลทั้งหมดในสภาวะของเหลว (กรัม โมลต่อชั่วโมง·ตารางเมตร·ปาสคาล)

ที่จุดสมดุล ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลทั้งหมดจะสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลแต่ละตัว ดังนี้

$$\frac{1}{K_{OG}} = \frac{1}{k_G} + \frac{H}{k_L} \quad (2.5)$$

$$\frac{1}{K_{OL}} = \frac{1}{k_L} + \frac{1}{Hk_G} \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

H เป็นค่าคงที่ของ Henry's Law จากสมการ ถ้า H มีค่าน้อยมาก หมายถึงก๊าซสามารถละลายได้ดีในของเหลว ดังนั้น K_{OG} มีค่าใกล้เคียงกับ k_G และการดูดซึมดังกล่าวนี้ จะถูกควบคุมด้วยเยื่อก๊าซ ในทางตรงกันข้าม ถ้า H มีค่ามากจะมีผลทำให้ K_{OL} มีค่าใกล้เคียงกับ k_L นั่นคือ ก๊าซละลายยากในของเหลวจะถูกควบคุมด้วยเยื่อของของเหลว ดังนั้น ส่วนใหญ่ระบบการควบคุมมลพิษทางอากาศจะใช้ระบบควบคุมด้วยก๊าซ

ในการดูดซึมต้องการให้ก๊าซและของเหลวมีการสัมผัสกันมาก โดยให้ความดันลดมีค่าน้อย โดยปกติจะมีวิธีการทำให้ของเหลวแตกย่อยเป็นหยดเล็ก ๆ หรือฟิล์มบาง ๆ เพื่อให้มีพื้นที่ผิวของเหลวมาก สำหรับการถ่ายเทมวล และให้มีฟิล์มใหม่ ๆ เป็นแรงดัน (Driving force) เครื่องมือดูดซึมที่ใช้มากที่สุดคือ packed tower, plate tower, spray tower เป็นต้น

การหาความสูงของหอดูดซึม

$$Z = H_{OG} N_{OG} \quad (2.7)$$

เมื่อ
$$H_{OG} = \frac{V}{K_x a S} \quad (2.8)$$

$$H_{OG} = \frac{V}{K_{ya}(1-y)_M S} \quad (2.9)$$

และ
$$N_{OG} = \frac{(y_1 - y_2)}{(y - y^*)_M} \quad (2.10)$$

จากสมการ (2.9) และ (2.10) จะได้

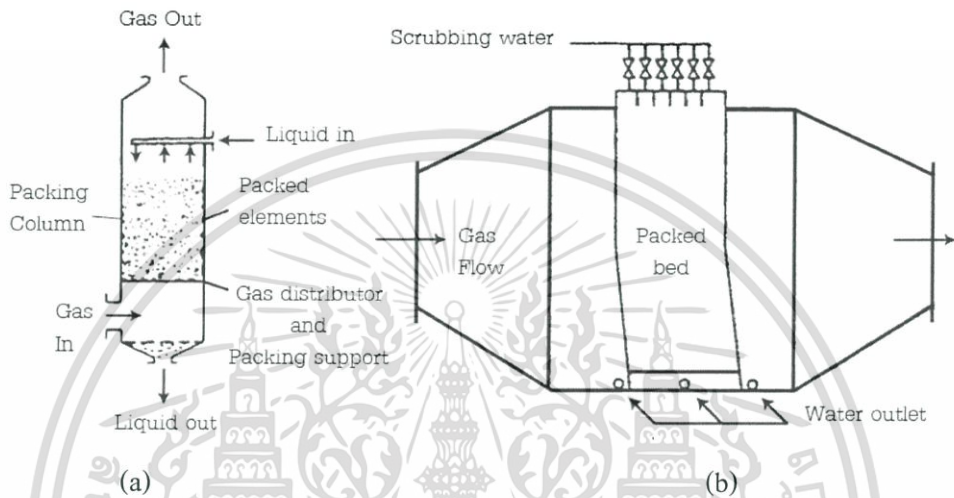
$$Z = \frac{V}{K_{ya}(1-y)_M S} \frac{(y_1 - y_2)}{(y - y^*)_M} \quad (2.11)$$

เมื่อ	V	คือ อัตราการไหลเชิงโมลในเฟสก๊าซ
	y_1	คือ สัดส่วนโมลของก๊าซในเฟสก๊าซขาเข้า
	y_2	คือ สัดส่วนโมลของก๊าซในเฟสก๊าซขาออก
	y^*	คือ สัดส่วนโมลของก๊าซในเฟสก๊าซที่ควรอยู่ในสมดุล
	S	คือ พื้นที่หน้าตัดของหอดูดซึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 หอวัสดุบรรจุ (packed tower)

หอวัสดุบรรจุ (packed tower) เป็นอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลสารได้ดีมาก จึงทำให้หอวัสดุบรรจุมีขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ชนิดอื่น ๆ หอวัสดุบรรจุที่นิยมใช้มี 2 แบบ ได้แก่ แบบไหลสวนทาง (countercurrent) และแบบไหลผ่าน (cross-flow) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (a) และ 2.2 (b) ตามลำดับ

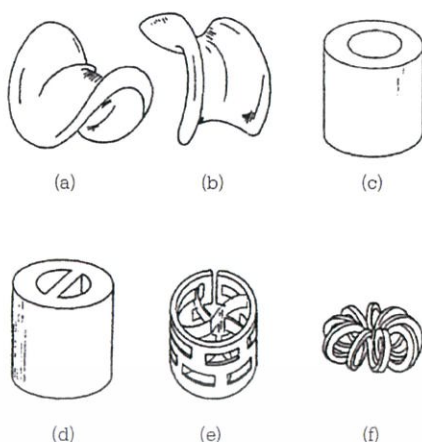


รูปที่ 2.2 หอวัสดุบรรจุ [3]

วัสดุที่บรรจุในแพคคอลัมน์ (packed column) หรือแพคเบด (packed bed) เพื่อใช้เป็นตัวกลางสำหรับเพิ่มพื้นที่ผิวของการสัมผัสอาจจะเป็นวัสดุแบบต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.3

วัสดุที่ใช้บรรจุในแพคคอลัมน์นี้ควรมีพื้นที่ผิวมาก เมื่อบรรจุในแพคคอลัมน์แล้ว จะทำให้เกิดการสัมผัสระหว่างก๊าซกับของเหลวได้มาก และควรมีช่องว่าง (void space) มากพอ เพื่อให้ของเหลวไหลได้โดยสะดวก รวมทั้งต้องมีความแข็งแรงทนทานพอสมควร ไม่แตกหักง่ายเมื่อทำการบรรจุและใช้งาน นอกจากนี้ วัสดุดังกล่าวต้องไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมี และราคาไม่สูงจนเกินไปนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 วัสดุที่บรรจุในแพคคอล์มน์ (a) Berl saddle; (b) Intalox saddle;

(c) Raschig ring; (d) Lessing ring; (e) Pall ring; (f) Tellerette [3]

ห่อวัสดุบรรจุชนิดไหลสวนทางจะทำให้เกิดแรงผลัก และการถ่ายโอนมวลสารได้ดีมาก และเหมาะที่จะใช้สำหรับบำบัดก๊าซมลพิษที่ไม่มีอนุภาคปะปนอยู่ในกระแสอากาศเสีย เพราะถ้ามีอนุภาคปะปนอยู่จะทำให้เกิดการอุดตันได้ง่าย หากมีอนุภาคอยู่ในกระแสอากาศควรจะใช้ชนิดไหลไปในทางเดียวกัน (concurrent) คือ ปล่อยให้กระแสอากาศกับของเหลวไหลลงมาพร้อม ๆ กัน เพื่อลดการอุดตัน ถ้าต้องการลดการอุดตันให้มากยิ่งขึ้นก็ควรใช้ชนิดไหลผ่าน

2.1.4 หลักการทั่วไปของห่อวัสดุบรรจุแบบไหลสวนทาง [5]

จุดมุ่งหมายทั่วไปของห่อบรรจุคือ การกระจายก๊าซมาสัมผัสกับของเหลวอย่างทั่วถึง โดยที่ของเหลวจะไหลจากด้านบน โดยใช้ตัวกระจายของเหลว และก๊าซถูกป้อนเข้าทางด้านล่างของคอลัมน์ ซึ่งเป็นการไหลสวนทางกัน โดยที่ของเหลวเป็นตัวทำละลาย ทำหน้าที่ละลายก๊าซซึ่งเป็นตัวถูกละลายที่ต้องการในก๊าซผสม โดยที่อัตราการถ่ายเทมวลจะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับผลต่างความเข้มข้นของตัวถูกละลายในตัวทำละลาย ทั้งในของเหลวและก๊าซ และลักษณะการไหลของของเหลวและก๊าซซึ่งพื้นผิวสัมผัสจะขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของวัสดุบรรจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5 ลิควิด โฮลด์อัฟ (Liquid holdup) [5]

ลิควิด โฮลด์อัฟคือ ของเหลวที่มีอยู่ภายในช่องว่างของวัสดุบรรจุ ซึ่งพบว่า ณ สภาวะจุดท่วมนั้น ช่องว่างที่มีอยู่ภายในวัสดุบรรจุทั้งหมดจะถูกบรรจุด้วยของเหลวหรือฟองของของเหลว ดังนั้น ภายใต้สภาวะปกติ (ต่ำกว่าจุดท่วม) ลิควิด โฮลด์อัฟที่เกิดขึ้นจะช่วยทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสารได้อย่างดี และทำให้คอลัมน์มีการปฏิบัติการได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เมื่อลิควิด โฮลด์อัฟมีค่าเพิ่มขึ้นหรือสูงเกินไปจึงควรที่จะปรับให้ลิควิด โฮลด์อัฟนั้นมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากว่า สภาวะที่ลิควิด โฮลด์อัฟมีค่าสูงขึ้นนั้นจะมีผลทำให้การเพิ่มความดันลด น้ำหนักของวัสดุบรรจุ วัสดุประกอบอื่น ๆ ที่ส่วนล่างของวัสดุบรรจุและคอลัมน์ รวมถึงเวลาที่ใช้ในการระบายของเหลวออกมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมามีความเข้มข้นลดลงด้วย วัสดุบรรจุที่มีขนาดเล็กกว่ามักจะมีลิควิด โฮลด์อัฟมากกว่าวัสดุบรรจุที่มีขนาดใหญ่กว่า

ลิควิด โฮลด์อัฟจำแนกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. โฮลด์อัฟคงที่ (Static holdup)

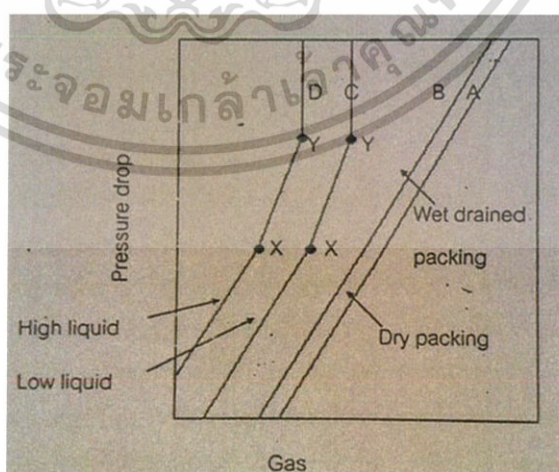
โฮลด์อัฟคงที่คือ ของเหลวที่ยังเหลืออยู่ในวัสดุบรรจุหลังจากที่ได้มีการทำให้เปียกและระบายของเหลวออกไปจากคอลัมน์แล้วเป็นระยะเวลาสั้น ซึ่งการที่เกิดโฮลด์อัฟคงที่นั้นจะมีผลทำให้ความสามารถในการถ่ายเทมวลสารระหว่างของเหลวและไอถูกจำกัด

2. โฮลด์อัฟระหว่างปฏิบัติการ (Operating holdup)

โฮลด์อัฟดำเนินการคือ ของเหลวที่อยู่ในวัสดุบรรจุที่เกิดขึ้นในระหว่างดำเนินการหรือมีการเคลื่อนที่ของของเหลวภายในคอลัมน์หรือหาได้จากความแตกต่างระหว่างโฮลด์อัฟทั้งหมดกับโฮลด์อัฟคงที่ โฮลด์อัฟดำเนินการนั้นนำมาซึ่งการถ่ายเทมวลสารระหว่างของเหลวและก๊าซในช่วงเวลาระหว่างการดำเนินการ

2.1.6 ความดันตกของห่อวัสดุบรรจุ [6]

เป็นสิ่งจำเป็นในการประมาณค่าความดันตกในห่อวัสดุบรรจุ เมื่อมีของไหลไหลสวนทางกันในห่อ รูปแบบของความสัมพันธ์โดยทั่วไประหว่างความดันตก ($-\Delta P$) และอัตราการไหลเชิงปริมาตรของแก๊สต่อพื้นที่หน้าตัดของห่อ (U_G) แสดงในรูปที่ 2.4 โดยที่ $-\Delta P$ จะเป็นสัดส่วนกับประมาณ $U_G^{1.8}$ ถ้าขณะที่แก๊สไหลขึ้น มีของเหลวเริ่มไหลลงในห่อ จะพบว่าที่อัตราการไหลของของเหลวต่ำ ๆ เส้นความดันตกจะคล้ายกับกรณีที่ไม่มีของเหลวไหลอยู่ด้วย นั่นคือการไหลของของเหลวไม่มีผลต่อทางเดินของแก๊ส แต่เมื่อความเร็วของแก๊สเพิ่มขึ้นถึงค่าหนึ่ง $-\Delta P$ จะเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และ $-\Delta P$ จะแปรผันตาม $U_G^{2.5}$ ดังแสดงในช่วง xy บนเส้นกราฟ C บนช่วง xy นี้ การไหลของของเหลวมีผลต่อการไหลของแก๊สและค่าโฮลด์อัป (Hold-up) ของของเหลวจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เกิดการสะสมของของเหลวอยู่ภายในช่องว่างของวัสดุบรรจุ ส่งผลให้การต้านทานการไหลเพิ่มสูงขึ้นและที่การไหลของแก๊สที่เหนือจุด y จะทำให้ค่า $-\Delta P$ สูงขึ้นมาก จนอาจทำให้ของเหลวในห่อหยุดไหล จุด x เรียกว่า จุดการโหลด (loading point) และจุด y เรียกว่า จุดการท่วม (flooding point) สำหรับการไหลของของเหลวที่ค่าอื่น ๆ ถ้าการไหลของของเหลวเพิ่มขึ้นจะได้เส้นกราฟใหม่คือ เส้นกราฟ D ซึ่งจะพบว่าจุดการท่วมจะเกิดขึ้นที่ค่าการไหลของแก๊สต่ำกว่า แต่ค่า $-\Delta P$ ยังคงเป็นค่าเดิม โดยปกติห่อวัสดุบรรจุจะทำงานอยู่ในช่วง xy นั่นคือ กำหนดค่าโฮลด์อัป ค่าหนึ่ง เพื่อให้การสัมผัสกันระหว่างของเหลวกับแก๊สเกิดได้ดี และห่อวัสดุบรรจุจะไม่ทำงานที่สภาวะการท่วม จากรูปที่ 2.4 จะพบว่าช่วง xy นี้ มีช่วงการไหลของแก๊สสั้นมาก ดังนั้น เพื่อความปลอดภัยในการออกแบบ กำหนดให้การทำงานของห่ออยู่ที่จุดการโหลด (จุด x)



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์โดยทั่วไประหว่างความดันตก และอัตราการไหลเชิงปริมาตรของก๊าซ [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.7 คำจำกัดความของสภาวะจุดท่วม [6]

ได้มีผู้ให้คำจำกัดความของคำว่าสภาวะจุดท่วม (Flooding) ซึ่งแตกต่างกันไป โดยจำแนกได้ดังต่อไปนี้

1. สภาวะจุดท่วมเกิดขึ้นเมื่อช่องว่างทั้งหมดของวัสดุบรรจุถูกบรรจุให้เต็มด้วยของเหลว
2. สภาวะจุดท่วมเกิดขึ้นเมื่อค่าลิกวิด โพลด์ออฟเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว
3. สภาวะจุดท่วมเกิดขึ้นเมื่อของเหลวค้างอยู่ส่วนบนของหอ ส่งผลให้ก๊าซเคลื่อนที่ขึ้นในลักษณะของฟอง (Gas bubbles)
4. สภาวะจุดท่วมเกิดขึ้นเมื่อความชันของกราฟระหว่างความดันลดกับอัตราการไหลของก๊าซมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด
5. สภาวะจุดท่วมเกิดขึ้นเมื่อประสิทธิภาพเปลี่ยนแปลงไป โดยมีแนวโน้มที่ลดลง
6. สภาวะจุดท่วมเกิดขึ้นเมื่อมีการล้นของของเหลวออกมาทางส่วนบนของหอ

อย่างไรก็ตาม ได้มีการปรับปรุงคำจำกัดความของสภาวะจุดท่วม โดยการกำหนดปริมาณหรือตัวเลขเข้าไปเพื่อขยายคำจำกัดความให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ตัวอย่างเช่น สภาวะจุดท่วมเกิดขึ้นเมื่อมีของเหลวเกิดขึ้นเมื่อมีความดันลดเกิดขึ้นเป็น 2 นิ้วน้ำต่อความสูงของวัสดุบรรจุ (ฟุต) เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้มีผู้ให้คำจำกัดความว่า สภาวะจุดท่วมเป็นสภาวะที่กำหนดความสามารถสูงสุดของคอลัมน์ที่สามารถดำเนินการได้ (Maximum operating capacity: MOC) ซึ่งพิจารณาจากอัตราการไหลของแก๊สสูงสุดที่ทำให้คอลัมน์มีประสิทธิภาพในการดำเนินการอยู่ได้ในสภาวะปกติ

2.2 สารละลาย [7]

สารละลายคือ ของผสมที่มีองค์ประกอบตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ซึ่งรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) องค์ประกอบที่มีปริมาณมากที่สุด เรียกว่าตัวทำละลาย (solvent) ส่วนองค์ประกอบอื่น ๆ ที่มีปริมาณน้อยกว่า เรียกว่า ตัวถูกละลาย (solute) ถ้ากล่าวถึงตัวทำละลายแล้ว ตัวทำละลายที่เรารู้จักกันดี ก็คือ น้ำ สารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย เรียกว่า สารละลายในน้ำ (aqueous solution) ถึงแม้ว่าในสารละลายหนึ่ง ๆ จะมีองค์ประกอบอยู่หลาย ๆ อย่างในสารละลาย ทั้งตัวทำละลาย และตัวถูกละลาย ซึ่งอาจจะมีมากกว่า 1 ชนิดขึ้นไป แต่สมบัติทางเคมี และสมบัติทางกายภาพขององค์ประกอบแต่ละชนิดก็ยังคงเหมือนเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 ชนิดของสารละลาย

ในขั้นตอนการจำแนกชนิดของสารละลาย โดยทั่วไปจะจำแนกสารละลายตามสถานะ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ สารละลายของแข็ง สารละลายของเหลว และสารละลายก๊าซ ซึ่งตัวทำละลายจะต้องมีสถานะเช่นเดียวกับสถานะของสารละลาย กล่าวคือ สารละลายของแข็ง ตัวทำละลายจะต้องเป็นของแข็ง สารละลายของเหลว ตัวทำละลายจะต้องเป็นของเหลว และสารละลายก๊าซ ตัวทำละลายจะต้องเป็นก๊าซ ส่วนตัวถูกละลายในสารละลายทั้ง 3 ชนิด เป็นได้ทั้งของแข็ง ของเหลว และก๊าซ

2.2.2 กระบวนการเกิดสารละลาย

ในกระบวนการเกิดสารละลายได้นั้น อนุภาคของตัวถูกละลายจะต้องสามารถกระจายตัวเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างอนุภาคของตัวทำละลายได้อย่างทั่วถึง การที่อนุภาคของตัวถูกละลายจะเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างอนุภาคของตัวทำละลายได้หรือไม่ จะขึ้นอยู่กับแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวทำละลายกับตัวทำละลาย แรงดึงดูดโมเลกุลระหว่างตัวทำละลายกับตัวถูกละลาย และแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลตัวถูกละลายกับตัวถูกละลาย ปกติแล้วการที่ตัวถูกละลายจะละลายในตัวทำละลายหนึ่ง ๆ ได้นั้น สารทั้งสองชนิดจะต้องมีสมบัติเหมือนกัน ตามกฎ like dissolves like ก็คือ ตัวถูกละลายที่มีขั้วจะละลายในตัวทำละลายที่มีขั้ว เพราะแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้วเป็นแรงไดโพล-ไดโพล (dipole-dipole) แต่จะไม่ละลายในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เอทานอล ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) ละลายในน้ำ (H_2O) แต่ไม่ละลายในเฮกเซน (C_6H_{14}) ในทางตรงข้าม ตัวถูกละลายที่ไม่มีขั้วจะละลายในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เพราะแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้วเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) เหมือนกัน แต่จะไม่ละลายในตัวทำละลายที่มีขั้ว เช่น คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (CCl_4) ละลายในเบนซีน (C_6H_6) ไม่ละลายในน้ำ แต่ถ้าในกรณีที่สารหนึ่งมีขั้วน้อยกว่าอีกสารตัวหนึ่ง ความสามารถในการละลายก็ลดลง หรืออาจจะกล่าวอีกนัยคือละลายได้เพียงบางส่วนเท่านั้น

2.2.3 การละลาย

ตัวแปรที่มีความสำคัญต่อจำนวนของก๊าซป็นไอออนที่สามารถละลายและเกิดการดูดซึม การละลายเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความดันของระบบ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จำนวนของก๊าซที่ถูกดูดซึมด้วยของเหลวจะลดลง ส่วนความดันจะมีผลตรงกันข้ามกับอุณหภูมิโดยเมื่อความดันในระบบเพิ่มขึ้น จำนวนการดูดซึมของก๊าซก็จะเพิ่มขึ้นด้วย การละลายของก๊าซในของเหลวจะถูกกำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กฎของเฮนรี (Henry's Law) อาจใช้กล่าวถึงสมมูลการละลายของก๊าซ-ของเหลว

$$P^* = Hx \quad (2.12)$$

โดยที่

P^* = ความดันย่อยของการละลายที่สมดุล (atm)

H = ค่าคงที่ของเฮนรี (atm ต่อเศษส่วน โมล)

x = เศษส่วน โมลของการละลายในของเหลว

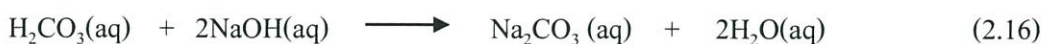
2.3 ปฏิกิริยาเคมี

ในการศึกษาโครงการนี้เป็นการศึกษาการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยน้ำ ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาดังต่อไปนี้



ในปฏิกิริยา (2.13) เป็นปฏิกิริยาการรวมตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำจะกลายเป็นกรดคาร์บอนิก กรดคาร์บอนิกยังสามารถแตกตัวได้อีก 2 ครั้ง เนื่องจากเป็นกรดอ่อน และมีไฮโดรเจน 2 อะตอม ซึ่งจะได้เป็นไฮโดรเจนคาร์บอนเนต และคาร์บอนเนต ในสมการที่ (2.14) และ (2.15) ตามลำดับ

ปฏิกิริยาในการไทเทรต



เมื่อทำการเก็บสารละลายตัวอย่างที่อยู่ในรูปของสารละลายกรดคาร์บอนิก นำมาทำการไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งอยู่ในรูปของโซเดียมคาร์บอเนตเพื่อหาความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ในน้ำ ดังสมการที่ (2.16)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นันทน์ภัส รุณรงค์ และคณะ [2] ได้ศึกษาผลการเติมโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแคลเซียมออกไซด์สำหรับการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่ำ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง สภาวะในการทดลองอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันบรรยากาศ

การเตรียมตัวดูดซับโดยละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต 2.5 กรัม ในน้ำที่ปราศจากไอออน 15 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายลงบนตัวรองรับแคลเซียมออกไซด์ 5 กรัม ทำการปั่นกวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทำให้แห้งโดยการอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ทำการบด และนำไปเผาภายใต้ก๊าซไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ผลการทดลองพบว่า การเติมสารโพแทสเซียมคาร์บอเนตลงบนตัวรองรับแคลเซียมออกไซด์ จะทำให้มีประสิทธิภาพในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่า เนื่องจากการดูดซับจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างโพแทสเซียมคาร์บอเนตและน้ำ เกิดเป็นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์คาร์บอเนต

Guo Yincheng, et al. [4] ได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างสารละลายแอมโมเนีย และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในหอสเปรย์ ตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลาย อัตราการไหลของสารละลาย และอัตราการไหลรวมของก๊าซ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของสารละลายสูง อัตราการไหลของสารละลายสูง และอัตราการไหลรวมของก๊าซต่ำ จะส่งผลดีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

Filip Sjöstrand และ Reza Yazdi [8] ได้ศึกษาการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารดูดซึมที่แตกต่างกันในหอบรรจุวัสดุ โดยสารดูดซึมที่ใช้คือ น้ำ สารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ และแอมโมเนียความเข้มข้น 0.5, 1, 2, 3 และ 5 โมลาร์ ใช้อัตราการไหลของก๊าซ 0.9 และ 1.8 ลิตรต่อชั่วโมง อัตราการไหลน้ำ 10, 20 และ 30 ลิตรต่อชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่า น้ำมีประสิทธิภาพในการดูดซึมเพียงเล็กน้อย สารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตมีประสิทธิภาพการดูดซึมได้ถึง 7% และสารละลายแอมโมเนียมีประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างกัน อยู่ระหว่าง 12 ถึง 94%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 สารเคมี

1. โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.01M
2. ฟีนอล์ฟทาลีน
3. น้ำ
4. ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

3.2 อุปกรณ์

1. หอคูดซิม
2. นาฬิกาจับเวลา
3. ปิเปต
4. บิวเรต
5. บีกเกอร์
6. ขวดรูปชมพู่
7. ขวดเก็บสารตัวอย่าง

3.3 วิธีการทดลอง

1. ตรวจสอบความพร้อมของหอคูดซิม และอุปกรณ์ต่าง ๆ
2. ปรับอัตราการไหลของอากาศ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์ โดยทำการปรับค่าอัตราการไหลรวมของก๊าซดังที่กำหนดต่อไปนี้

- อัตราการไหลรวมของก๊าซที่ 450, 900 และ 1,250 ลิตรต่อชั่วโมง

3. ปรับอัตราการไหลของน้ำให้ได้ตามที่ต้องการ โดยระบุจำนวนรอบที่ปั๊มดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จำนวนรอบ 20, 40 และ 80 เรเดียนต่อนาที ซึ่งจะได้อัตราการไหลของน้ำ 7.2, 15 และ 30 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

4. วัดอัตราการไหลของน้ำผ่านกระบอกตวง

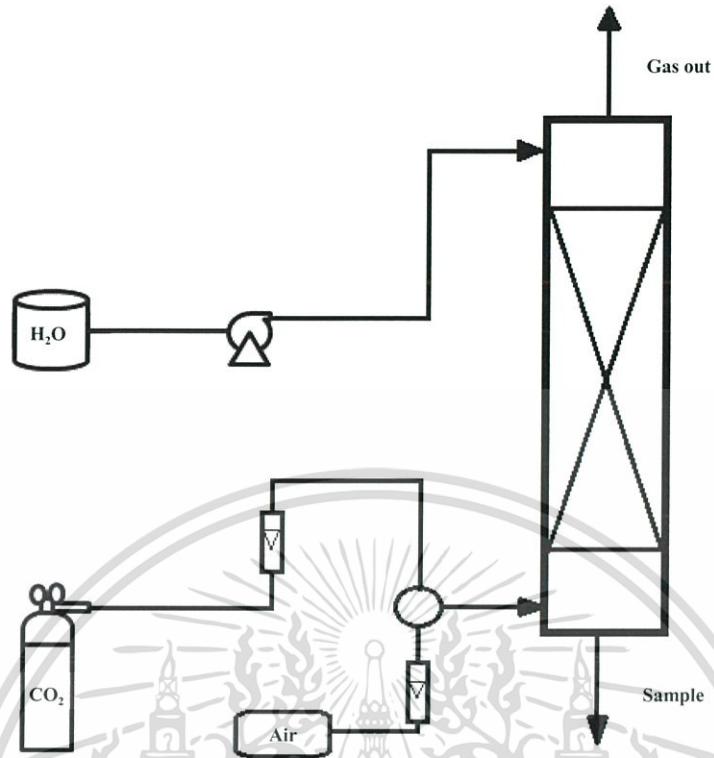
5. เริ่มทดลองการดูดซึม พร้อมกับจับเวลา เมื่อน้ำไหลเข้าสู่คอลัมน์ โดยน้ำต้องสัมผัสวัสดุบรรจุ ก่อน

6. เก็บตัวอย่างของน้ำขาออกที่เวลาต่าง ๆ โดยในช่วง 10 นาทีแรกเก็บสารตัวอย่าง ทุก ๆ 2 นาที หลังจากใช้เวลา 10 นาที ไปแล้วเก็บสารตัวอย่างทุก ๆ 5 นาที เก็บจนกว่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสารตัวอย่างคงที่

7. นำน้ำตัวอย่างที่เก็บได้ ไปวิเคราะห์ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการนำสารละลาย ตัวอย่างจำนวน 20 มิลลิลิตร ไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ โดยใช้สารละลายฟีนอล์ฟทาไลน์เป็นอินดิเคเตอร์

7. ทำการทดลองซ้ำ แต่เปลี่ยนความเข้มข้นของเปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์ที่ 20 และ 27.7 เปอร์เซ็นต์

8. จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองนำไปคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในแต่ละกรณี



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงอุปกรณ์ในการทดลองการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

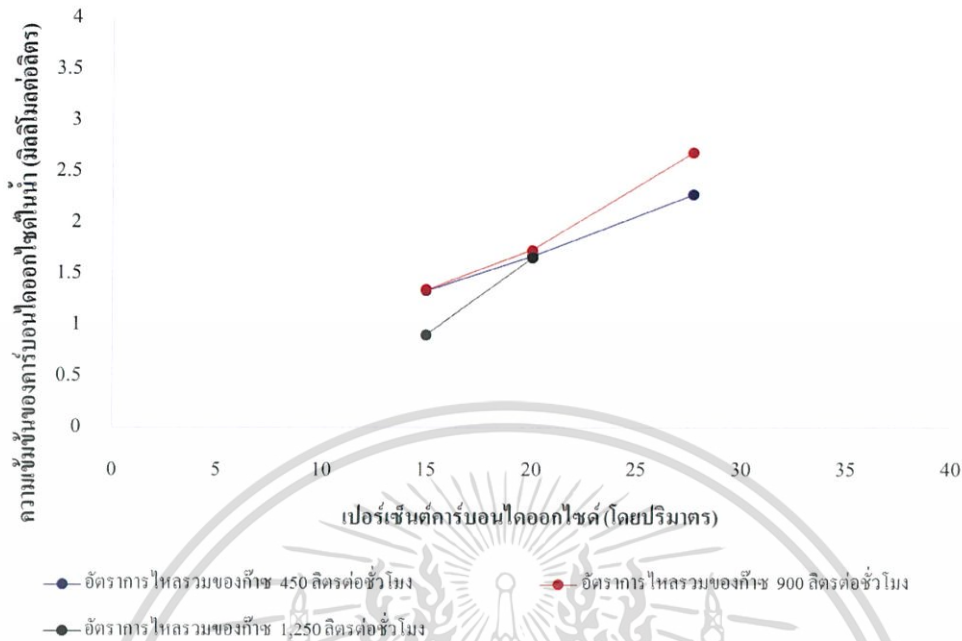
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ข้อมูลเบื้องต้น

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของหอคูดซิม	4.3	เซนติเมตร
ความสูงของวัสดุบรรจุ	95	เซนติเมตร
ชนิดของวัสดุบรรจุ	Raschig ring	
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของวัสดุบรรจุ	4.034	มิลลิเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของวัสดุบรรจุ	3.072	มิลลิเมตร
ความยาวของวัสดุบรรจุ	4.116	มิลลิเมตร
ปริมาตรหอ	1379.59	ลูกบาศก์เซนติเมตร
จำนวนชั้นวัสดุทั้งหมด	17,881	ชั้น
อัตราส่วนว่าง (ϵ , Voidage)	0.5781	
พื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตรคอลัมน์ (a_p)	10.07	ตารางเซนติเมตรต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
แฟคทิง แพคเตอร์ (Packing factor)	1,589	ฟุต ⁻¹

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



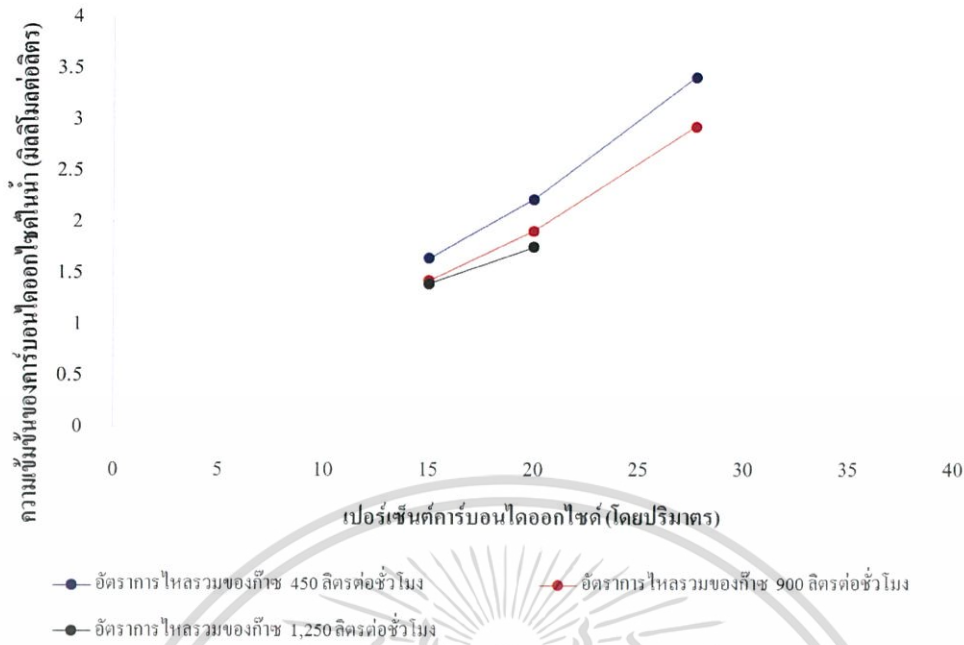
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลของเปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหลรวมของก๊าซแตกต่างกัน ที่อัตราการไหลของน้ำ 7.2 ลิตรต่อชั่วโมง

จากกราฟรูปที่ 4.1 แสดงถึงเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า ที่ 15 20 และ 27.7 เปอร์เซ็นต์ จะพบว่าที่อัตราการไหลรวมของก๊าซค่าต่าง ๆ มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน คือเมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า จะทำให้การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มเปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์ทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างเฟสก๊าซและเฟสของเหลวมากขึ้น ทำให้การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นดังสมการ (2.2)

$$N_A = k_L(C_{AI} - C_{AL}) \quad (2.2)$$

โดยการเคลื่อนย้ายมวลจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของความเข้มข้น คือเมื่อความแตกต่างของความเข้มข้นเพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสารได้มากขึ้น

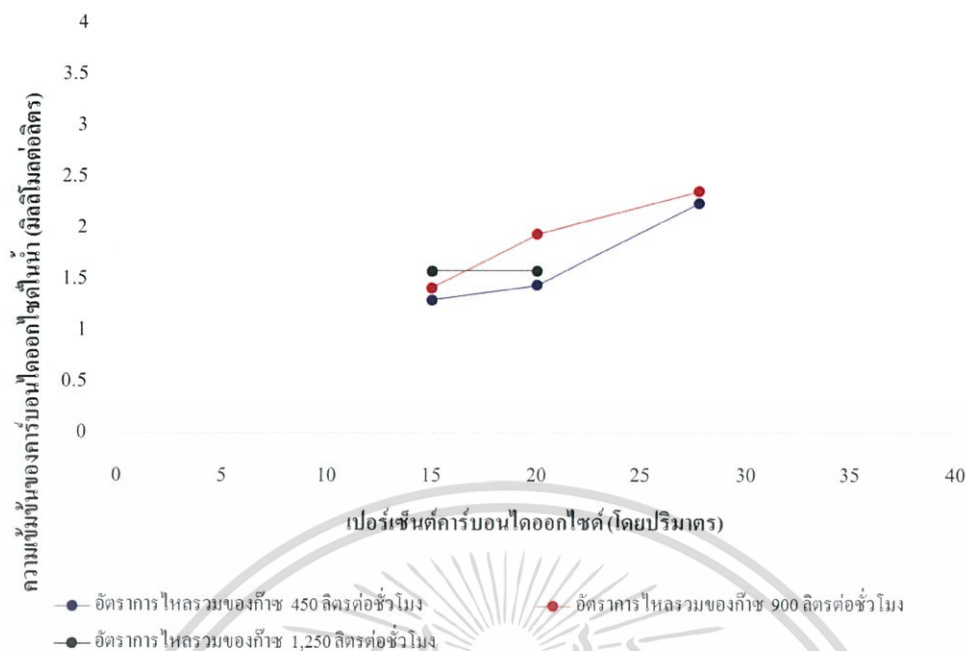
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลของเปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหลรวมของก๊าซแตกต่างกัน ที่อัตราการไหลของน้ำ 15 ลิตรต่อชั่วโมง

จากกราฟรูปที่ 4.2 แสดงผลเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้าที่ 15 20 และ 27.7 เปอร์เซ็นต์ โดยพบว่า ที่อัตราการไหลรวมของก๊าซต่างกัน เมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า จะทำให้การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากการเพิ่มเปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์ทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างเฟสก๊าซและเฟสของเหลวมากขึ้น ทำให้การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น สามารถอธิบายได้ด้วยสมการการเคลื่อนย้ายมวล $N_A = k_L(C_{Ai} - C_{AL})$ โดยการเคลื่อนย้ายมวลจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของความเข้มข้น คือเมื่อความแตกต่างของความเข้มข้นเพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสารได้มากขึ้น

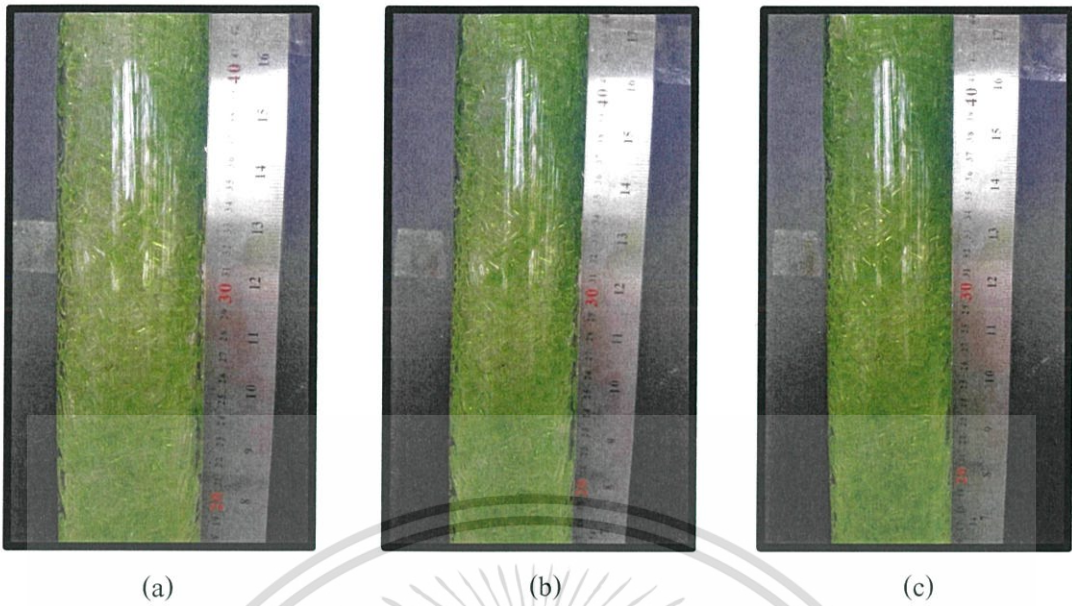
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลของเปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหลรวมของก๊าซแตกต่างกัน ที่อัตราการไหลของน้ำ 30 ลิตรต่อชั่วโมง

จากกราฟรูปที่ 4.3 แสดงถึงผลของเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้าที่ 15 20 และ 27.7 เปอร์เซ็นต์ พบว่าที่อัตราการไหลรวมของก๊าซ 900 ลิตรต่อชั่วโมง (สีแดง) และที่อัตราการไหลรวมของก๊าซ 450 ลิตรต่อชั่วโมง (สีน้ำเงิน) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับการดูดซึมดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 แต่ที่อัตราการไหลรวมของก๊าซ 1,250 ลิตรต่อชั่วโมง (สีดำ) และอัตราการไหลของน้ำ 30 ลิตรต่อชั่วโมง การเพิ่มเปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้าไม่ส่งผลให้การดูดซึมเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีโอกาสอิ่มตัวที่คาร์บอนไดออกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์ แม้เพิ่มเปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์ก็ไม่สามารถเพิ่มการดูดซึมได้อีก เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำ และอัตราการไหลรวมของก๊าซมากเกินไป จะเป็นการต้านทานการไหลของน้ำ ทำให้เกิดการท่วมของหอ ดังแสดงดังรูปที่ 4.4

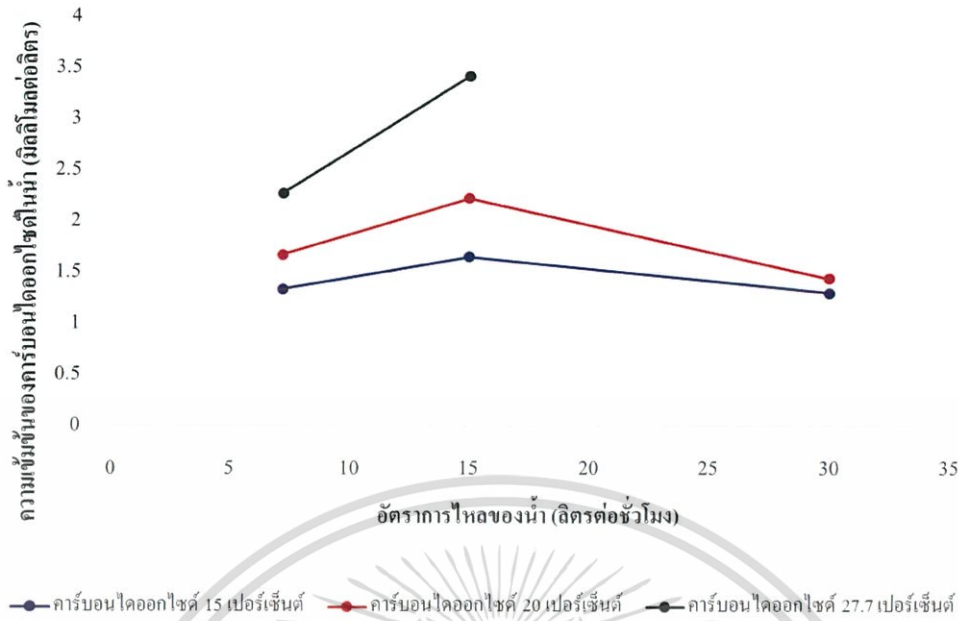
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 การจำลองลักษณะการไหลของการใช้น้ำอัตรากาไหลต่าง ๆ (a) 7.2 ลิตรต่อชั่วโมง (b) 15 ลิตรต่อชั่วโมง (c) 30 ลิตรต่อชั่วโมง

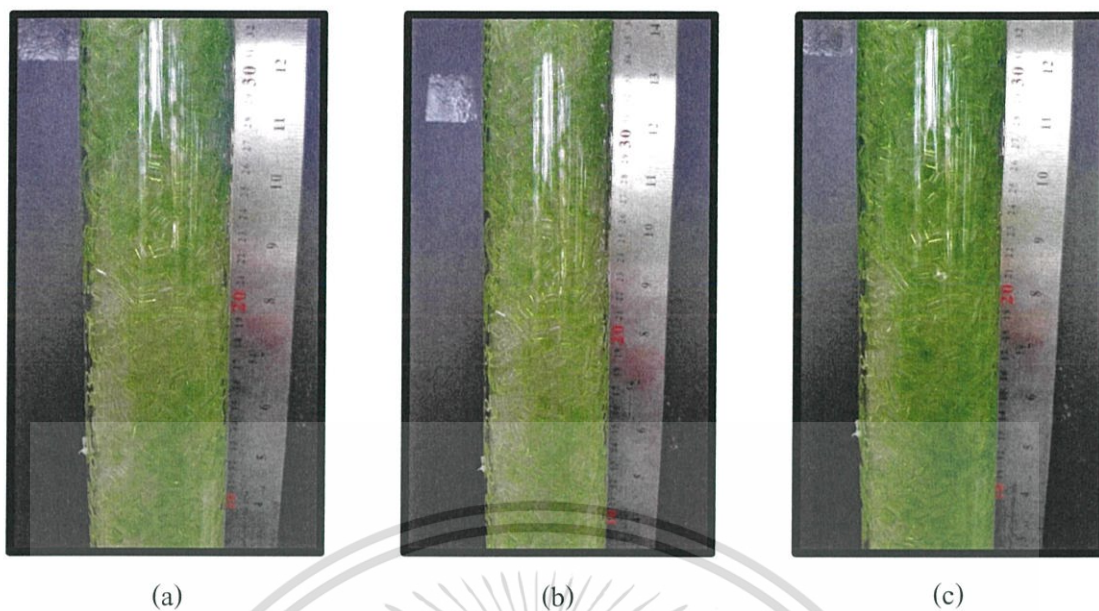
จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างว่าการใช้น้ำที่อัตรากาไหลต่าง ๆ กัน นั้นทิศทางการไหลของน้ำเมื่อใช้อัตรากาไหลของน้ำต่ำ ๆ ทำให้น้ำไม่สามารถไหลได้ทั่วทั้งหอดูดซึม และเมื่อใช้อัตรากาไหลของน้ำสูง ๆ จะเกิดการท่วมของหอดูดซึมเป็นบางส่วนหรือการท่วมนั้นอาจจะเกิดขึ้นแค่ช่วงระยะเวลาซึ่งจะส่งผลให้การดูดซึมลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



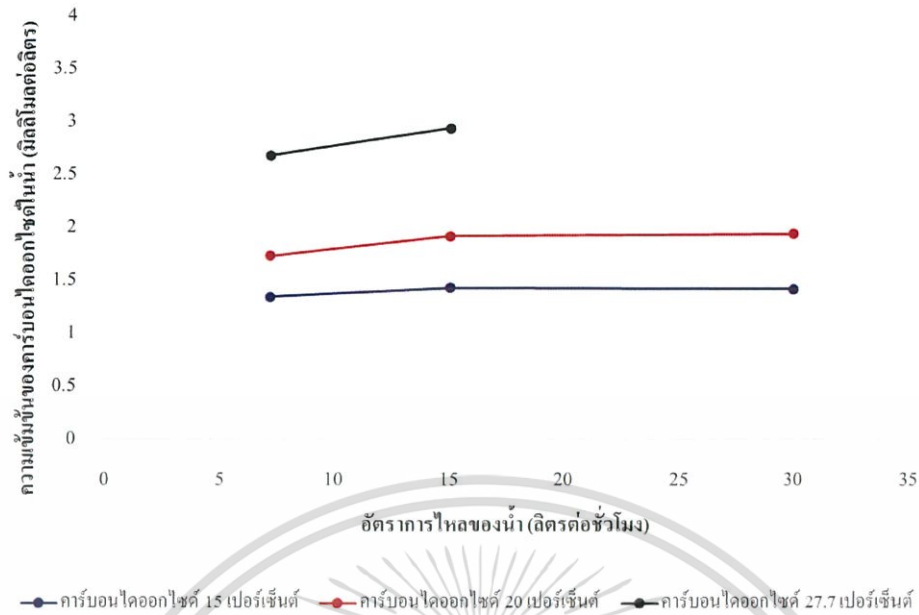
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลของอัตราการไหลของน้ำ ที่เปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์แตกต่างกัน และอัตราการไหลรวมก๊าซ 450 ลิตรต่อชั่วโมง

จากกราฟรูปที่ 4.5 แสดงถึงผลของอัตราการไหลของน้ำที่ 7.2 15 และ 30 ลิตรต่อชั่วโมง ที่ส่งผลต่อการดูดซึม พบว่าการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่อัตราการไหลของน้ำ 7.2 และ 15 ลิตรต่อชั่วโมง แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเป็น 30 ลิตรต่อชั่วโมง การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง เนื่องจากอัตราการไหลของน้ำมากเกินไปทำให้ก๊าซไม่สามารถไหลผ่านหรือเกิดการต้านระหว่างน้ำกับก๊าซ ส่งผลเกิดการท่วมเป็นชั้นน้ำบางส่วนภายในหอ หรือน้ำไหลไม่ทั่วหอ จึงทำให้การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง แสดงดังรูปที่ 4.6 ส่งผลทำให้การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง



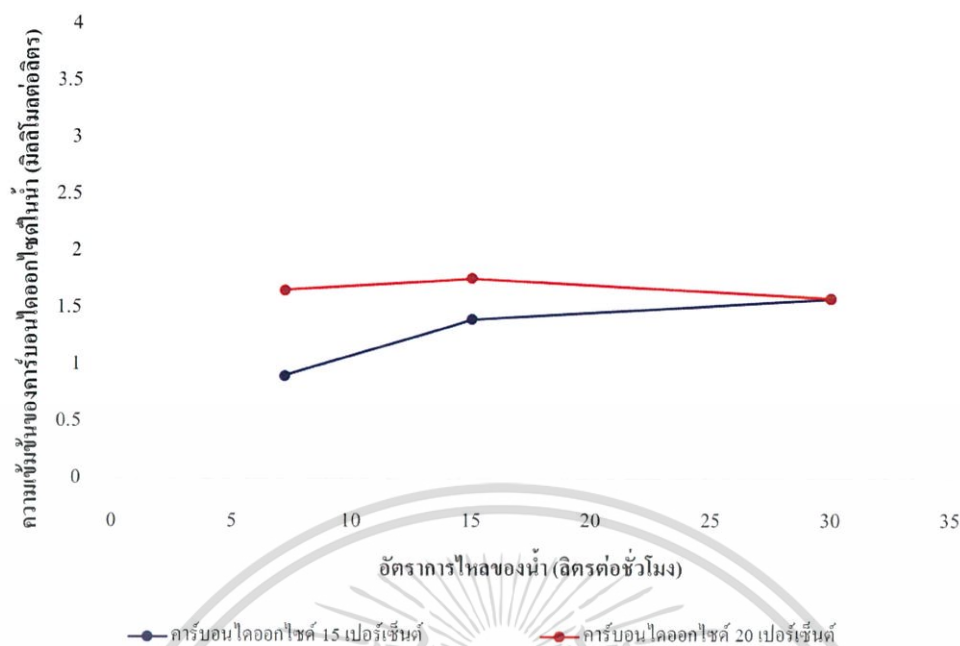
รูปที่ 4.6 การจำลองลักษณะการไหลของน้ำที่อัตราการไหลต่าง ๆ ที่อัตราการไหลรวมของก๊าซ 450 ลิตรต่อชั่วโมง (a) 7.2 ลิตรต่อชั่วโมง (b) 15 ลิตรต่อชั่วโมง (c) 30 ลิตรต่อชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



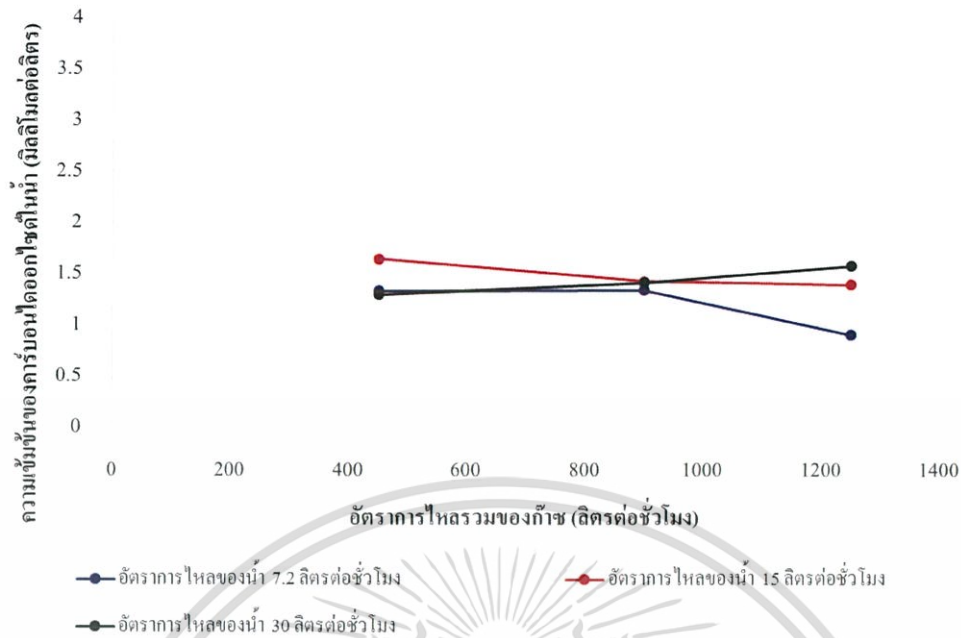
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลของอัตราการไหลของน้ำ ที่เปอร์เซ็นต์คาร์บอน ไดออกไซด์แตกต่างกัน และอัตราการไหลรวมก๊าซ 900 ลิตรต่อชั่วโมง

จากกราฟรูปที่ 4.7 แสดงถึงผลของอัตราการไหลของน้ำที่ส่งผลต่อการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำมีผลทำให้ค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมเพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากการที่อัตราการไหลของของเหลวที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการแพร่กระจายของของเหลวบนพื้นผิวของวัสดุบรรจุ เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัส และจากกราฟพบว่าที่อัตราการไหลของน้ำ 15 ลิตรต่อชั่วโมง และ 30 ลิตรต่อชั่วโมง มีค่าการดูดซึมที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งอัตราการไหลของน้ำที่เหมาะสมในการทดลองอาจอยู่ในช่วง 15 - 20 ลิตรต่อชั่วโมง



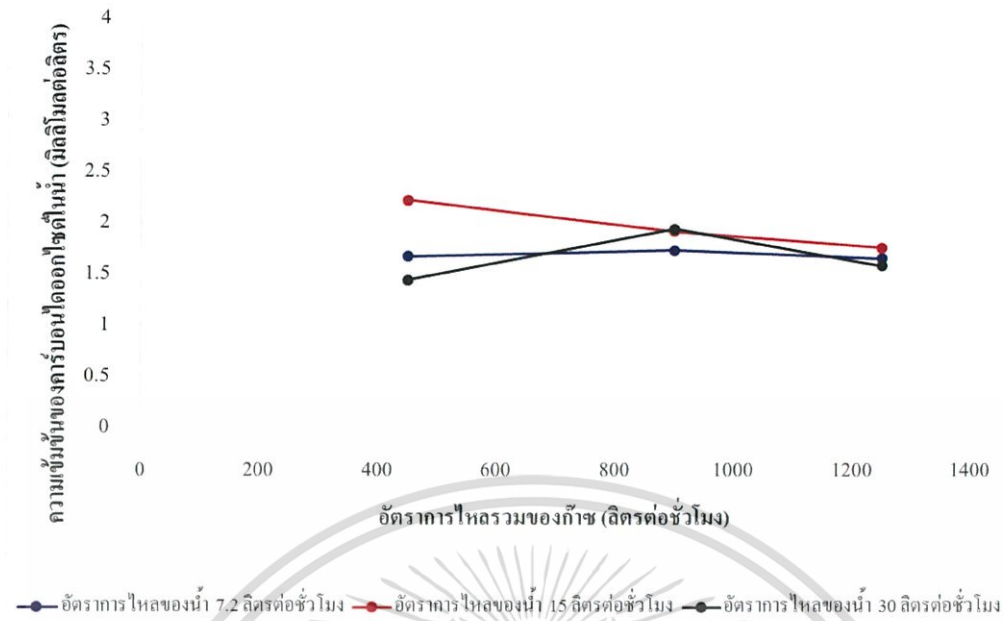
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงผลของอัตราการไหลของน้ำ ที่เปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์แตกต่างกัน และอัตราการไหลรวมก๊าซ 1,250 ลิตรต่อชั่วโมง

จากรูปที่ 4.8 แสดงถึงผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำ ที่ส่งผลต่อความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำพบว่าที่คาร์บอนไดออกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์ (สีน้ำเงิน) มีแนวโน้มของการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้น แต่ที่คาร์บอนไดออกไซด์ 20 เปอร์เซ็นต์ (เส้นกราฟสีแดง) มีการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย



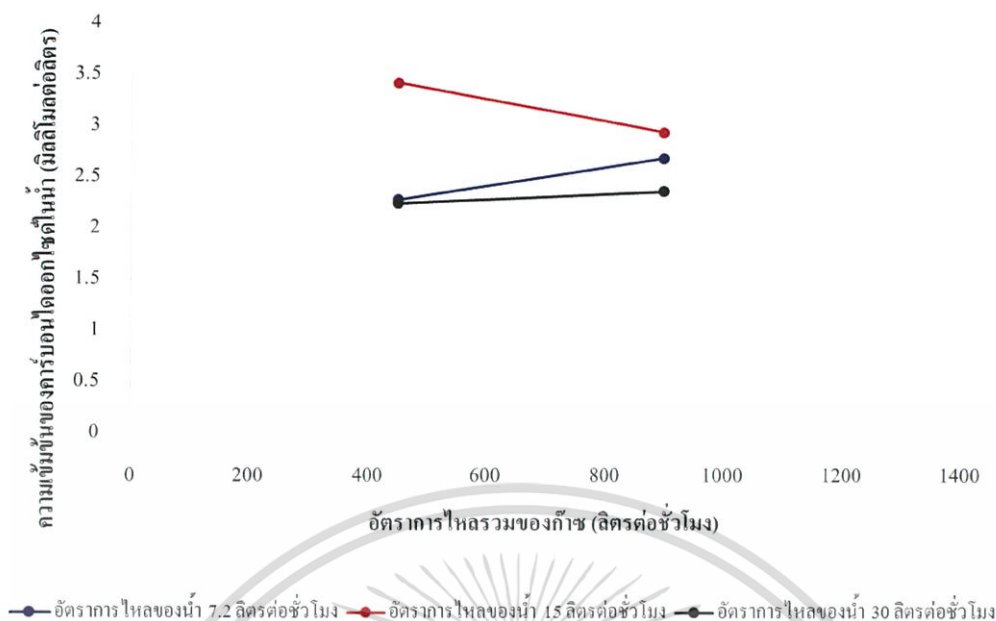
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผลของอัตราการไหลรวมของก๊าซที่อัตราการไหลของน้ำแตกต่างกัน และคาร์บอนไดออกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์

จากรูปที่ 4.9 แสดงถึงผลกระทบของอัตราการไหลรวมของก๊าซที่ส่งผลต่อความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ พบว่าอัตราการไหลของน้ำ 7.2 และ 15 ลิตรต่อชั่วโมง (สีน้ำเงินและสีแดง) การเพิ่มอัตราการไหลรวมของก๊าซ ทำให้แนวโน้มการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลรวมของก๊าซทำให้ระยะเวลาในการสัมผัสกันระหว่างก๊าซและของเหลวลดลง ทำให้มีระยะเวลาในการดูดซึมน้อยลง ดังแสดงค่า Residence time ในตารางที่ 4.1 แต่อัตราการไหลของน้ำ 30 ลิตรต่อชั่วโมง (สีดำ) เมื่อเพิ่มอัตราการไหลรวมของก๊าซ การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากอัตราการไหลของน้ำมีผลกระทบต่อ การดูดซึมนอกเหนือจากอัตราการไหลรวมของก๊าซ จึงทำให้เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำและอัตราการไหลของก๊าซ ส่งผลให้การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลของอัตราการไหลรวมของก๊าซที่อัตราการไหลของน้ำแตกต่างกัน และคาร์บอนไดออกไซด์ 20 เปอร์เซ็นต์

จากรูปที่ 4.10 แสดงถึงผลกระทบของอัตราการไหลรวมของก๊าซที่ส่งผลต่อความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำพบว่าอัตราการไหลของน้ำ 7.2 และ 15 ลิตรต่อชั่วโมง (สีน้ำเงินและสีแดง) การเพิ่มอัตราการไหลรวมของก๊าซ ทำให้แนวโน้มการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงแต่อัตราการไหลของน้ำ 30 ลิตรต่อชั่วโมง (สีดำ) เมื่อเพิ่มอัตราการไหลรวมของก๊าซ 450 และ 900 ลิตรต่อชั่วโมง การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเป็น 1,250 ลิตรต่อชั่วโมง การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงผลของอัตราการไหลรวมของก๊าซที่อัตราการไหลของน้ำแตกต่างกัน และคาร์บอนไดออกไซด์ 27.7 เปอร์เซ็นต์

จากรูปที่ 4.11 แสดงถึงผลกระทบของอัตราการไหลรวมของก๊าซที่ส่งผลต่อความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลรวมของก๊าซ ที่อัตราการไหลของน้ำ 7.2 และ 30 ลิตรต่อชั่วโมง (สีน้ำเงินและสีดำ) มีการดูดซึมเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากอัตราการไหลของน้ำ 7.2 ลิตรต่อชั่วโมง ทำให้มีการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้น้อย และที่อัตราการไหลของน้ำ 30 ลิตรต่อชั่วโมง เป็นอัตราการไหลที่มากเกินไปทำให้เกิดการท่วมภายในหอคอยดูดซึม ส่งผลทำให้การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ

อัตราการไหลของน้ำ 15 ลิตรต่อชั่วโมง (สีแดง) เมื่อเพิ่มอัตราการไหลรวมของก๊าซ ทำให้การดูดซึมลดลง เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลรวมของก๊าซทำให้เวลาในการสัมผัสกันระหว่างก๊าซกับของเหลวลดลง ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในเฟสก๊าซไม่มีเวลามากพอในการแพร่ไปยังเฟสของเหลว จึงเป็นสาเหตุของการทำให้การดูดซึมนั้นน้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของเวลาที่สารอยู่ในหลอดชิม

จากการคำนวณค่า Residence time ที่แสดงผลการคำนวณในตารางที่ 4.1 พบว่าค่าของ Residence time ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของรวมของก๊าซ ถ้ามีอัตราการไหลรวมของก๊าซมากขึ้นทำให้มีค่า Residence time ลดลง ซึ่งในการทดลองทำการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลของก๊าซ 450 900 และ 1,250 ลิตรต่อชั่วโมง มีค่า Residence time อยู่ที่ 11.6 5.8 และ 4.18 วินาที ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ค่าเวลาที่สารอยู่ในหลอดชิมที่สภาวะต่าง ๆ

อัตราการไหลน้ำ (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลรวมก๊าซ (ลิตรต่อชั่วโมง)	เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (%)	ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำขาออก (มิลลิโมลต่อลิตร)	Residence time (s)
7.2	450	15.0	1.3375	11.60
		20.0	1.6750	11.60
		27.7	2.2750	11.60
	900	15.0	1.3438	5.80
		20.0	1.7313	5.80
		27.7	2.6813	5.80
	1250	15.0	0.9063	4.18
		20.0	1.6563	4.18
	15	450	15.0	1.6500
20.0			2.2250	11.60
27.7			3.4167	11.60
900		15.0	1.4313	5.80
		20.0	1.9188	5.80
		27.7	2.9375	5.80
1250		15.0	1.4000	4.18
		20.0	1.7583	4.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการไหลน้ำ (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลรวมก๊าซ (ลิตรต่อชั่วโมง)	เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (%)	ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำขาออก (มิลลิโมลต่อลิตร)	Residence time (s)
30	450	15.0	1.3000	11.60
		20.0	1.4417	11.60
		27.7	2.2417	11.60
	900	15.0	1.4188	5.80
		20.0	1.9417	5.80
		27.7	2.3583	5.80
	1250	15.0	1.5813	4.18
		20.0	1.5833	4.18

4.3 ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล ($K_y a$)

จากการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล แสดงผลการคำนวณดังตารางที่ 4.2 พบว่าที่สภาวะอัตราการไหลของน้ำ 30 ลิตรต่อชั่วโมง อัตราการไหลของรวมของก๊าซ 1,250 ลิตรต่อชั่วโมง และเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสูงสุดเมื่อเทียบกับสภาวะอื่น ๆ ซึ่งสภาวะนี้ใช้อัตราการไหลของน้ำและอัตราการไหลรวมของก๊าซมาก ทำให้ สิ้นเปลือง นอกจากนี้หอคูดซึมมีขนาดเล็ก และความสูงเพียง 0.95 เมตร เนื่องจากสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลนั้น มีความสัมพันธ์กับค่าอัตราการไหลของก๊าซดังสมการที่ 4.1 คือ เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซ จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสูงขึ้น

$$K_y a = \frac{V}{z(1-y)_M S} \frac{(y_1 - y_2)}{(y - y^*)_M} \quad (4.1)$$

แต่ไม่ใช่สภาวะที่เหมาะสมของการทดลอง เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลรวมของก๊าซมากเกินไปจะทำให้เกิดการต้านทานการไหลของน้ำ ดังนั้นจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสภาวะที่เหมาะสมคืออัตราการไหลของน้ำ 15 ลิตรต่อชั่วโมง อัตราการไหลของรวมของก๊าซ 450 ลิตรต่อชั่วโมง และเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 27.7 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากอยู่ในช่วงที่อัตราการไหลของน้ำไหลทั่วทั้งห่อ และอัตราการไหลรวมของก๊าซนั้น ไม่มากหรือน้อยเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลที่สภาวะต่าง ๆ

อัตราการไหลน้ำ (ลิตรต่อชั่วโมง)	อัตราการไหลรวมก๊าซ (ลิตรต่อชั่วโมง)	เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (%)	ความเข้มข้นของก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ ขาออก (มิลลิโมลต่อลิตร)	$K_y a$
7.2	450	15.0	1.3375	0.9267
		20.0	1.6750	0.8943
		27.7	2.2750	0.9244
	900	15.0	1.3438	0.9310
		20.0	1.7313	0.9270
		27.7	2.6813	1.1095
	1250	15.0	0.9063	0.6076
		20.0	1.6563	0.8828
		27.7	2.6813	1.1095
15	450	15.0	1.6500	2.4435
		20.0	2.2250	2.5623
		27.7	3.4167	3.0562
	900	15.0	1.4313	2.0810
		20.0	1.9188	2.1658
		27.7	2.9375	2.5644
	1250	15.0	1.4000	2.0300
		20.0	1.7583	1.9651
		27.7	2.9375	2.5644
30	450	15.0	1.3000	3.7530
		20.0	1.4417	3.1709
		27.7	2.2417	3.7996
	900	15.0	1.4188	4.1259
		20.0	1.9417	4.3942
		27.7	2.3583	4.0118
	1250	15.0	1.5813	4.6547
		20.0	1.5833	3.5047
		27.7	2.3583	4.0118

หมายเหตุ: หน่วยของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลคือ โมลต่ออนาที·ลูกบาศก์เมตร·กิโลปาสคา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลที่ได้จากการทดลองกับงานวิจัยอื่น ๆ

สารละลาย	อัตราการไหลรวม ของก๊าซ	อัตราการไหลของ สารละลาย	ความเข้มข้นของ สารละลาย (โมลาร์)	ความเข้มข้น คาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (%Vol)	$K_L a$ (กิโลโมลต่อลูกบาศก์ เมตร·ชั่วโมง·กิโลปาสกาล)
น้ำ	450 (ลิตรต่อนาที)	15 (ลิตรต่อนาที)	-	27.7	1.81×10^{-3}
โมโนเอทานอลามีน [11]	18.65 (ลูกบาศก์เมตร ต่อตารางเมตร· ชั่วโมง)	5 (ลูกบาศก์เมตรต่อ ตารางเมตร·ชั่วโมง)	1.16	15	1.00
โมโนเอทานอลามีน ผสม เมทานอล [12]	6 (ลิตรต่อนาที)	60 (ลิตรต่อนาที)	5	15	5.25

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองที่ได้จากการทดลองระบบดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้น้ำเป็นของเหลวที่ใช้ในการดูดซึม ในการทดลองทำการศึกษา 3 ตัวแปรคือ อัตราการไหลของน้ำ อัตราการไหลรวมของก๊าซและเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า ซึ่งใช้วิธีการไทเทรตในการหาความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ พบว่าเมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำ และเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลรวมของก๊าซ จะทำให้การดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดน้อยลง

ทั้งนี้เมื่อทำการทดลองที่อัตราการไหลของน้ำต่ำ จะทำให้น้ำไหลไม่ทั่วหอ แต่เมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำสูง ๆ ก็จะสามารถเกิดการท่วมของชั้นของเหลวได้ ซึ่งจากการทดลองควรทำการทดลองที่สภาวะอัตราการไหลของน้ำ 15 ลิตรต่อชั่วโมง ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 27.7 เปอร์เซ็นต์ และอัตราการไหลรวมของก๊าซ 450 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการทดลอง เนื่องจากสภาวะนี้อยู่ในช่วงอัตราการไหลของน้ำที่ไม่ทำให้เกิดการท่วมของชั้นของเหลว และอัตราการไหลรวมของก๊าซต่ำจะไม่ทำให้เกิดการต้านระหว่างก๊าซกับของเหลวที่ไหลลงตามแรงโน้มถ่วง

5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองเราจะพบว่าบางกรณีที่ผลการทดลองนั้นไม่เป็นไปตามทฤษฎี ซึ่งอาจเกิดจากปัจจัยต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. สภาพแวดล้อมขณะที่ทำการทดลองในแต่ละวันไม่เหมือนกัน เนื่องจากสภาพอากาศแต่ละวันที่ทำการทดลองไม่เท่ากัน อาจส่งผลต่ออุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในการดูดซึม ทำให้ค่าการละลายได้ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เปลี่ยนไป
2. ในการทดลองบางครั้งพบว่าอัตราการไหลก๊าซไม่คงที่ หรือมีค่าลดลงจากค่าที่ตั้งไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในน้ำในรูปของกรดคาร์บอนิก สามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระเหยออกไปได้ ดังนั้นในระหว่างทำการทดลอง หากมีการเขย่า หรือเทตัวอย่างน้ำแรงเกินไป จะทำให้ความเข้มข้นที่ไทเทรตได้ลดลงจากความเป็นจริง
4. การวิเคราะห์ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำโดยวิธีการไทเทรต ทำให้ค่าที่ได้อาจคลาดเคลื่อนได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการทดลองโดยใช้อัตราการไหลของน้ำ 15 ลิตรต่อนาที
2. ควรปรับค่าความดันย่อยของก๊าซให้มีค่าต่ำกว่า 2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
3. ควรใช้สารดูดซึมอื่น ๆ เช่น สารละลายเอมีน สารละลายโมโนเอทานอลามีน สารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต
4. ควรใช้ขนาดของหอทดลองที่มีขนาดใหญ่กว่านี้ ใช้ความสูง มากกว่า 2 เมตร และขนาดของวัสดุบรรจุให้ตรงตามมาตรฐาน เพื่อให้ค่าที่ได้ในการคำนวณนั้นสามารถเปรียบเทียบในทางทฤษฎีและการทดลอง
5. ควรใช้วิธีอื่น ๆ ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อให้ได้ค่าที่มีความแม่นยำมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] ชงไทย วิฑูรย์. เทคโนโลยีการกักเก็บและแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิล. วิศวกรรมสาร มข. 38, 4(2554): 453-467

[2] นันทน์ภัส รุณรงค์, ดร.อาทิตย์ เนรมิตตกพงศ์, ดร.สุธาสิณี เนรมิตตกพงศ์. 2556. ผลของการเติมโพแทสเซียมคาร์บอเนตลงบนตัวรองรับเคลือบออกไซด์ สำหรับการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่ำ. วิทยานิพนธ์, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

[3] รองศาสตราจารย์ ดร.จักรกฤษณ์ สีวะระเดชาเทพ. “อุปกรณ์ควบคุมมลพิษชนิดก๊าซและไอ”. Available online: <http://www.safety-stou.com/UserFiles/File/54114-6.pdf>. Oct.9.14.

[4] Guo Yincheng, Niu Zhenqi, Lin Wenyi. 2011 **Comparison of removal efficiencies of carbon dioxide between aqueous ammonia and NaOH solution in a fine spray column**. Department of Engineering Mechanics School of Aerospace Tsinghua University.

[5] เบ็ญจมาพร สัมฤทธิ์. 2547. ความสัมพันธ์ทางด้านพลศาสตร์ของการดูดซึมโดยใช้หอดูดซึมแบบบรรจุ Hydrodynamic correlation of absorption in packed column. วิทยานิพนธ์, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[6] ปิยะสาร ประเสริฐธรรม. 2542. หลักการออกแบบเครื่องมือแยกสาร. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[7] “สารละลาย”. Available online: http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/ap-chemistry2/liquid_solution/solution_types.htm. Nov.5.14

[8] Filip Sjöstrand, Reza Yazdi. 2009. Absorption of CO₂ by Ammonia. Diploma Work, School of Technology and Design

[9] “Henry's Law”. Available online: https://chemengineering.wikispaces.com/Henry%27s+Law#cite_note-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] Knowledge Management. “ การออกแบบอุปกรณ์ควบคุมแก๊ส ”. Available online: <http://www2.diw.go.th/km/pdf/%5Cknow%5Cgas.pdf>. Oct.9.14.
- [11] Teerawat Sema, et al., 2012, Comprehensive mass transfer and reaction kinetics studies of CO₂absorption into aqueous solutions of blended MDEA–MEA, Chemical Engineering Journal
- [12] Teerawat Sema et al., 2013, Mass transfer of CO₂absorption in hybrid MEA-methanol solvents in packed column, Energy Procedia
- [13] Christie John Geankoplis. 2003. **Transport Process and Separation Process Principles**, 3rd ed, New Jersey: Prentic Hall International,1993.
- [14] James R.Welty, Robert E.Wilson, Gregory L.Rorrer and Charles E. Wicks. **Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer**. 5th Edition. Oregon : Wiley, 2007
- [15] ปิยสุดา เรียงทรัพย์, พนารัตน์ โทมณี, อุษา ตั้งพิทักษ์เสมอ. 2541. การจำลองการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายโมโนเอทานอลามีนในน้ำ. ปรินญานิพนธ์, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ภาคผนวก ก

ข้อมูลดิบ

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลดิบที่อัตราการไหลของน้ำ 7.2 ลิตรต่อชั่วโมง

ก.1 อัตราการไหลของน้ำ 7.2 ลิตรต่อชั่วโมง

ก.1.1 อัตราการไหลรวมของก๊าซ 450 ลิตรต่อชั่วโมง

ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์

เวลา (นาที)	ปริมาตร NaOH (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น CO ₂ (มิลลิโมลต่อลิตร)
2	5.4	1.3500
4	5.3	1.3250
6	4.9	1.2250
8	5.2	1.3000
10	4.4	1.1000
15	5.1	1.2750
20	5.1	1.2750
25	5.0	1.2500
30	4.9	1.2250
35	5.0	1.2500
40	4.5	1.1250
45	4.6	1.1500
50	5.8	1.4500
55	5.8	1.4500
60	5.3	1.3250
65	5.2	1.3000
70	5.1	1.2750

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ 20 เปอร์เซ็นต์

เวลา (นาที)	ปริมาตร NaOH (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น CO ₂ (มิลลิโมลต่อลิตร)
2	6.1	1.5250
4	5.6	1.4000
6	5.9	1.4750
8	6.5	1.6250
10	6.5	1.6250
15	6.8	1.7000
20	6.8	1.7000
25	6.0	1.5000
30	6.1	1.5250
35	6.1	1.5250
40	6.6	1.6500
45	6.0	1.5000
50	6.5	1.6250
55	6.6	1.6500
60	6.8	1.7000
65	6.9	1.7250

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ 27.7 เปอร์เซ็นต์

เวลา (นาที)	ปริมาตร NaOH (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น CO ₂ (มิลลิโมลต่อลิตร)
2	6.4	1.6000
4	7.0	1.7500
6	7.9	1.9750
8	9.5	2.3750
10	9.0	2.2500
15	8.9	2.2250
20	9.1	2.2750
25	9.0	2.2500
30	8.6	2.1500
35	9.8	2.4500
40	9.7	2.4250
45	10.0	2.5000
50	10.0	2.5000
55	8.8	2.2000
60	9.1	2.2750
65	9.4	2.3500

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.1.2 อัตราการไหลรวมของก๊าซ 900 ลิตรต่อชั่วโมง

ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์

เวลา (นาที)	ปริมาตร NaOH (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น CO ₂ (มิลลิโมลต่อลิตร)
2	3.9	0.9750
4	4.0	1.0000
6	4.2	1.0500
8	4.5	1.1250
10	4.3	1.0750
15	4.1	1.0250
20	4.3	1.0750
25	4.6	1.1500
30	4.6	1.1500
35	5.1	1.2750
40	4.7	1.1750
45	4.9	1.2250
50	5.4	1.3500
55	5.3	1.3250
60	5.4	1.3500
65	5.4	1.3500

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ 20 เปอร์เซ็นต์

เวลา (นาที)	ปริมาตร NaOH (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น CO ₂ (มิลลิโมลต่อลิตร)
2	5.7	1.4250
4	6.0	1.5000
6	5.2	1.3000
8	5.8	1.4500
10	5.9	1.4750
15	6.8	1.7000
20	7.1	1.7750
25	8.5	2.1250
30	8.1	2.0250
35	8.0	2.0000
40	7.2	1.8000
45	6.8	1.7000
50	8.0	2.0000
55	7.1	1.7750
60	7.1	1.7750
65	7.1	1.7750
70	6.4	1.6000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ 27.7 เปอร์เซ็นต์

เวลา (นาที)	ปริมาตร NaOH (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น CO ₂ (มิลลิโมลต่อลิตร)
2	9.6	2.4000
4	10.2	2.5500
6	10.2	2.5500
8	10.7	2.6750
10	10.9	2.7250
15	11.0	2.7500
20	11.4	2.8500
25	11.5	2.8750
30	11.2	2.8000
35	10.9	2.7250
40	12.2	3.0500
45	11.8	2.9500
50	10.4	2.6000
55	9.2	2.3000
60	10.4	2.6000
65	11.3	2.8250
70	12.6	3.1500
75	10.5	2.6250
80	11.3	2.8250
85	10.9	2.7250
90	10.2	2.5500

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.1.3 อัตราการไหลรวมของก๊าซ 1,250 ลิตรต่อชั่วโมง

ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์

เวลา (นาที)	ปริมาตร NaOH (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น CO ₂ (มิลลิโมลต่อลิตร)
2	5.5	1.3750
4	5.2	1.3000
6	3.5	0.8750
8	3.2	0.8000
10	3.3	0.8250
15	2.8	0.7000
20	3.4	0.8500
25	3.3	0.8250
30	2.5	0.6250
35	3.2	0.8000
40	3.3	0.8250
45	3.2	0.8000
50	3.3	0.8250
55	3.6	0.9000
60	3.8	0.9500
65	3.8	0.9500
70	3.3	0.8250

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ 20 เปอร์เซ็นต์

เวลา (นาที)	ปริมาตร NaOH (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น CO ₂ (มิลลิโมลต่อลิตร)
2	3.8	0.9500
4	4.3	1.0750
6	4.6	1.1500
8	5.9	1.4750
10	6.2	1.5500
15	4.9	1.2250
20	6.1	1.5250
25	4.4	1.1000
30	4.8	1.2000
35	4.9	1.2250
40	5.5	1.3750
45	5.3	1.3250
50	6.5	1.6250
55	6.7	1.6750
60	6.7	1.6750
65	6.6	1.6500

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลดิบที่อัตราการไหลของน้ำ 15 ลิตรต่อชั่วโมง

ก.2 อัตราการไหลของน้ำ 15 ลิตรต่อชั่วโมง

ก.2.1 อัตราการไหลรวมของก๊าซ 450 ลิตรต่อชั่วโมง

ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์

เวลา (นาที)	ปริมาตร NaOH (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น CO ₂ (มิลลิโมลต่อลิตร)
2	5.1	1.2750
4	5.3	1.3250
6	5.4	1.3500
8	4.9	1.2250
10	5.5	1.3750
15	5.5	1.3750
20	5.9	1.4750
25	5.4	1.3500
30	4.8	1.2000
35	5.1	1.2750
40	5.3	1.3250
45	5.1	1.2750
50	5.4	1.3500
55	6.6	1.6500
60	6.9	1.7250
65	6.4	1.6000
70	6.5	1.6250

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ 20 เปอร์เซ็นต์

เวลา (นาที)	ปริมาตร NaOH (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น CO ₂ (มิลลิโมลต่อลิตร)
2	6.6	1.6500
4	7.3	1.8250
6	7.5	1.8750
8	7.6	1.9000
10	7.4	1.8500
15	7.8	1.9500
20	7.8	1.9500
25	7.0	1.7500
30	7.3	1.8250
35	7.6	1.9000
40	7.8	1.9500
45	8.0	2.0000
50	8.2	2.0500
55	9.6	2.4000
60	9.9	2.4750
65	8.1	2.0250
70	8.0	2.0000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ 27.7 เปอร์เซ็นต์

เวลา (นาที)	ปริมาตร NaOH (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น CO ₂ (มิลลิโมลต่อลิตร)
2	11.0	2.7500
4	11.4	2.8500
6	11.2	2.8000
8	10.9	2.7250
10	11.0	2.7500
15	11.1	2.7750
20	10.2	2.5500
25	10.7	2.6750
30	9.9	2.4750
35	10.2	2.5500
40	10.2	2.5500
45	11.4	2.8500
50	9.2	2.3000
55	10.6	2.6500
60	13.7	3.4250
65	14.0	3.5000
70	13.3	3.3250

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2.2 อัตราการไหลรวมของก๊าซ 900 ลิตรต่อชั่วโมง

ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์

เวลา (นาที)	ปริมาตร NaOH (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น CO ₂ (มิลลิโมลต่อลิตร)
2	4.4	1.1000
4	4.5	1.1250
6	4.9	1.2250
8	4.7	1.1750
10	5.0	1.2500
15	5.0	1.2500
20	5.3	1.3250
25	4.6	1.1500
30	5.1	1.2750
35	5.1	1.2750
40	5.5	1.3750
45	5.4	1.3500
50	6.2	1.5500
55	5.8	1.4500
60	5.9	1.4750
65	5.7	1.4250
70	5.5	1.3750

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ 20 เปอร์เซ็นต์

เวลา (นาที)	ปริมาตร NaOH (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น CO ₂ (มิลลิโมลต่อลิตร)
2	6.2	1.5500
4	6.4	1.6000
6	7.6	1.9000
8	7.2	1.8000
10	7.9	1.9750
15	7.5	1.8750
20	8.1	2.0250
25	7.2	1.8000
30	8.2	2.0500
35	8.1	2.0250
40	7.5	1.8750
45	8.5	2.1250
50	9.2	2.3000
55	7.1	1.7750
60	7.6	1.9000
65	8.4	2.1000
70	7.6	1.9000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ 27.7 เปอร์เซ็นต์

เวลา (นาที)	ปริมาตร NaOH (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น CO ₂ (มิลลิโมลต่อลิตร)
2	10.0	2.5000
4	10.6	2.6500
6	9.9	2.4750
8	11.7	2.9250
10	10.2	2.5500
15	11.0	2.7500
20	10.7	2.6750
25	11.1	2.7750
30	11.0	2.7500
35	12.5	3.1250
40	10.5	2.6250
45	10.0	2.5000
50	10.1	2.5250
55	9.9	2.4750
60	9.9	2.4750
65	11.7	2.9250
70	11.8	2.9500

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2.3 อัตราการไหลรวมของก๊าซ 1,250 ลิตรต่อชั่วโมง

ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์

เวลา (นาที)	ปริมาตร NaOH (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น CO ₂ (มิลลิโมลต่อลิตร)
2	4.6	1.1500
4	4.9	1.2250
6	5.1	1.2750
8	6.1	1.5250
10	5.3	1.3250
15	5.8	1.4500
20	5.0	1.2500
25	5.7	1.4250
30	5.2	1.3000
35	5.3	1.3250
40	5.8	1.4500
45	6.1	1.5250
50	5.6	1.4000
55	5.6	1.4000
60	5.6	1.4000
65	4.9	1.2250
70	6.3	1.5750

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ 20 เปอร์เซ็นต์

เวลา (นาที)	ปริมาตร NaOH (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น CO ₂ (มิลลิโมลต่อลิตร)
2	6.1	1.5250
4	6.7	1.6750
6	7.1	1.7750
8	7.2	1.8000
10	8.0	2.0000
15	7.6	1.9000
20	7.0	1.7500
25	8.5	2.1250
30	7.8	1.9500
35	6.8	1.7000
40	7.1	1.7750
45	6.6	1.6500
50	6.6	1.6500
55	6.2	1.5500
60	6.7	1.6750
65	6.9	1.7250
70	7.5	1.8750

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลดิบที่อัตราการไหลของน้ำ 30 ลิตรต่อชั่วโมง

ก.3 อัตราการไหลของน้ำ 30 ลิตรต่อชั่วโมง

ก.3.1 อัตราการไหลรวมของก๊าซ 450 ลิตรต่อชั่วโมง

ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์

เวลา (นาที)	ปริมาตร NaOH (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น CO ₂ (มิลลิโมลต่อลิตร)
2	4.1	1.0250
4	4.8	1.2000
6	4.1	1.0250
8	4.6	1.1500
10	4.9	1.2250
15	5.4	1.3500
20	5.3	1.3250
25	5.3	1.3250
30	5.2	1.3000
35	5.1	1.2750
40	5.2	1.3000
45	5.2	1.3000
50	5.2	1.3000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ 20 เปอร์เซ็นต์

เวลา (นาที)	ปริมาตร NaOH (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น CO ₂ (มิลลิโมลต่อลิตร)
2	4.2	1.0500
4	5.6	1.4000
6	6.5	1.6250
8	4.8	1.2000
10	6.2	1.5500
15	5.4	1.3500
20	5.4	1.3500
25	5.9	1.4750
30	5.9	1.4750
35	7.0	1.7500
40	7.3	1.8250
45	5.2	1.3000
50	5.8	1.4500
55	5.7	1.4250
60	5.8	1.4500

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ 27.7 เปอร์เซ็นต์

เวลา (นาที)	ปริมาตร NaOH (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น CO ₂ (มิลลิโมลต่อลิตร)
2	7.8	1.9500
4	8.3	2.0750
6	8.6	2.1500
8	8.8	2.2000
10	8.9	2.2250
15	9.5	2.3750
20	10.1	2.5250
25	9.5	2.3750
30	9.3	2.3250
35	10	2.5000
40	9.1	2.2750
45	9.2	2.3000
50	10	2.5000
55	8.2	2.0500
60	9.3	2.3250
65	8.4	2.1000
70	9.2	2.3000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.3.2 อัตราการไหลรวมของก๊าซ 900 ลิตรต่อชั่วโมง

ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์

เวลา (นาที)	ปริมาตร NaOH (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น CO ₂ (มิลลิโมลต่อลิตร)
2	4.3	1.0750
4	4.8	1.2000
6	4.4	1.1000
8	4.8	1.2000
10	5.0	1.2500
15	5.0	1.2500
20	5.3	1.3250
25	4.9	1.2250
30	5.5	1.3750
35	5.8	1.4500
40	5.4	1.3500
45	6.0	1.5000
50	6.6	1.6500
55	7.1	1.7750
60	5.3	1.3250
65	5.8	1.4500
70	5.8	1.4500
75	5.8	1.4500
80	5.9	1.4750

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ 20 เปอร์เซ็นต์

เวลา (นาที)	ปริมาตร NaOH (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น CO ₂ (มิลลิโมลต่อลิตร)
2	6.4	1.6000
4	6.2	1.5500
6	9.0	2.2500
8	8.6	2.1500
10	7.6	1.9000
15	6.8	1.7000
20	7.2	1.8000
25	6.8	1.7000
30	8.5	2.1250
35	7.9	1.9750
40	8.2	2.0500
45	7.9	1.9750
50	8.8	2.2000
55	7.7	1.9250
60	7.5	1.8750
65	8.1	2.0250

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ 27.7 เปอร์เซ็นต์

เวลา (นาที)	ปริมาตร NaOH (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น CO ₂ (มิลลิโมลต่อลิตร)
2	7.3	1.8250
4	8.0	2.0000
6	9.5	2.3750
8	7.0	1.7500
10	7.0	1.7500
15	6.0	1.5000
20	6.7	1.6750
25	7.7	1.9250
30	8.3	2.0750
35	8.9	2.2250
40	8.8	2.2000
45	7.2	1.8000
50	8.8	2.2000
55	6.5	1.6250
60	9.5	2.3750
65	9.3	2.3250
70	9.5	2.3750

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.3.3 อัตราการไหลรวมของก๊าซ 1,250 ลิตรต่อชั่วโมง

ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์

เวลา (นาที)	ปริมาตร NaOH (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น CO ₂ (มิลลิโมลต่อลิตร)
2	4.3	1.0750
4	5.1	1.2750
6	4.7	1.1750
8	5.3	1.3250
10	5.6	1.4000
15	5.7	1.4250
20	5.8	1.4500
25	5.6	1.4000
30	5.4	1.3500
35	6.1	1.5250
40	6.8	1.7000
45	6.5	1.6250
50	6.5	1.6250
55	6.5	1.6250
60	6.4	1.6000
65	6.3	1.5750
70	6.1	1.5250

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ 20 เปอร์เซ็นต์

เวลา (นาที)	ปริมาตร NaOH (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น CO ₂ (มิลลิโมลต่อลิตร)
2	6.4	1.6000
4	5.8	1.4500
6	7.2	1.8000
8	8.1	2.0250
10	6.6	1.6500
15	5.9	1.4750
20	6.35	1.5875
25	7.0	1.7500
30	6.5	1.6250
35	5.2	1.3000
40	5.0	1.2500
45	5.7	1.4250
50	5.7	1.4250
55	6.8	1.7000
60	5.4	1.3500
65	6.0	1.5000
70	6.3	1.5750
75	6.7	1.6750

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การคำนวณ

ข.1 การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (K_a)

สมมุติฐาน

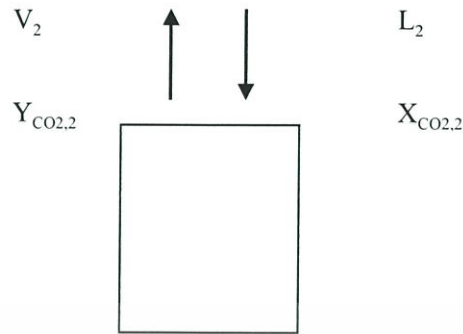
- 1) เป็นการดูดซึมที่ไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น
- 2) อัตราการไหลของก๊าซและน้ำค้างที่ตลอดการทดลอง
- 3) ไม่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในของน้ำขาเข้า
- 4) อุณหภูมิคงที่ตลอดความสูงของหอ

สถานะในการคำนวณ	
เปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้าของก๊าซ	15
อัตราการไหลเชิงปริมาตร (ลิตรต่อนาที)	
- น้ำ	0.12
- ก๊าซ	15
อัตราการไหลเชิงโมล (โมลต่อนาที)	
- น้ำ	6.64
- ก๊าซ	1.17

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสามารถคำนวณได้ด้วยสมการดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หางค์ประกอบของคาร์บอนไดออกไซด์ในสถานะก๊าซขาออก



รูปที่ ข.1 สมดุลมวลของระบบ

จากรูปที่ ข.1 สามารถหาสมการสมดุลมวลของคาร์บอน ไดออกไซด์

$$V_2 Y_{CO_2,2} + L_1 X_{CO_2,1} = V_1 Y_{CO_2,1} + L_2 X_{CO_2,2} \quad (\text{ข.1.1})$$

แทนค่าสมการ (ข.1.1) จะได้

$$Y_{CO_2,2} = 0.1497$$

- หาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ($K_y a$)

จากสมการหาความสูงของหอคูดซึม

$$Z = H_{OG} N_{OG} \quad (\text{ข.1.2})$$

เมื่อ

$$H_{OG} = \frac{V}{K_y a S} \quad (\text{ข.1.3})$$

$$H_{OG} = \frac{V}{K_y a (1-y)_M S} \quad (\text{ข.1.4})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{และ} \quad N_{OG} = \frac{(y_1 - y_2)}{(y - y^*)_M} \quad (\text{ข.1.5})$$

จากสมการ (ข.1.3) และ (ข.1.5) จะได้

$$Z = \frac{V}{K_{ya}(1-y)_M S} \frac{(y_1 - y_2)}{(y - y^*)_M} \quad (\text{ข.1.6})$$

แทนค่าต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ลงในสมการ (ข.1.6)

ความสูงของหอ, Z	0.95	เมตร
พื้นที่หน้าตัดของหอคอย, S	0.00145	ตารางเมตร
อัตราการไหลของก๊าซ, V	1.17	โมลต่อนาที
สัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซขาเข้า, y_1	0.15	
สัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซขาออก, y_2	0.1497	

- หาสัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซขาเข้าและขาออกที่สภาวะสมดุล

$$\text{จาก} \quad y_1^* = Hx_1 \quad (\text{ข.1.7})$$

$$y_2^* = Hx_2 \quad (\text{ข.1.8})$$

ตารางที่ ข.1 ค่าคงที่เฮนรีของก๊าซบางชนิด (ที่อุณหภูมิ 298 เคลวิน) [9]

สมการ	$k_{H,pc} = \frac{p_{gas}}{c_{aq}}$	$k_{H,cp} = \frac{c_{aq}}{p_{gas}}$	$k_{H,px} = \frac{p_{gas}}{x_{aq}}$	$k_{H,cc} = \frac{c_{aq}}{c_{gas}}$
หน่วย	$\left[\frac{L_{soln} \cdot atm}{mol_{gas}} \right]$	$\left[\frac{mol_{gas}}{L_{soln} \cdot atm} \right]$	$\left[\frac{atm \cdot mol_{soln}}{mol_{gas}} \right]$	ไม่มีหน่วย
ออกซิเจน	769.23	1.3×10^{-3}	4.259×10^4	3.180×10^{-2}
ไฮโดรเจน	1282.05	7.8×10^{-4}	7.099×10^4	1.907×10^{-2}
คาร์บอนไดออกไซด์	29.41	3.4×10^{-2}	0.163×10^4	0.8317
ไนโตรเจน	1639.34	6.1×10^{-4}	9.077×10^4	1.492×10^{-2}
ฮีเลียม	2702.7	3.7×10^{-4}	14.97×10^4	9.051×10^{-2}
นีออน	2222.22	4.5×10^{-4}	12.30×10^4	1.101×10^{-2}
อาร์กอน	714.28	1.4×10^{-3}	3.955×10^4	3.425×10^{-2}
คาร์บอนมอนอกไซด์	1052.63	9.5×10^{-4}	5.828×10^4	2.324×10^{-2}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	c_{aq}	=	โมลของก๊าซต่อลิตรของสารละลาย
	L_{soln}	=	ลิตรของสารละลาย
	p_{gas}	=	ความดันย่อยของก๊าซเหนือสารละลาย
	x_{aq}	=	สัดส่วนโมลของก๊าซในสารละลาย \approx โมลของก๊าซต่อโมลของน้ำ
	atm	=	ความดันบรรยากาศ

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าคงที่เฮนรี

$$k_{H,pc} = k_{H,pc}^0 \exp \left[-C \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T^0} \right) \right] \quad (\text{ข.1.9})$$

$$k_{H,cp} = k_{H,cp}^0 \exp \left[C \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T^0} \right) \right] \quad (\text{ข.1.10})$$

เมื่อ	k_H	=	ค่าคงที่เฮนรี
	C	=	ค่าคงที่ในหน่วยเคลวิน แสดงในตารางที่ ข.2
	T	=	อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน
	T^0	=	อุณหภูมิอ้างอิง = 298 เคลวิน

ตารางที่ ข.2 ค่าคงที่ C

Gas	O ₂	H ₂	CO ₂	N ₂	He	Ne	Ar	CO
C	1700	500	2400	1300	230	490	1300	1300

ที่อุณหภูมิ	298 เคลวิน	$k_H = 0.163 \times 10^4 \frac{\text{atm} \cdot \text{mol}_{\text{soln}}}{\text{mol}_{\text{gas}}}$
-------------	------------	---

ที่อุณหภูมิ	303 เคลวิน	$k_H = 0.1866 \times 10^4 \frac{\text{atm} \cdot \text{mol}_{\text{soln}}}{\text{mol}_{\text{gas}}}$
-------------	------------	--

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า $k_H = 0.1866 \times 10^4 \frac{\text{atm}\cdot\text{mol}_{\text{soln}}}{\text{mol}_{\text{gas}}}$ ในสมการ (ข.1.7) และ (ข.1.8) จะได้

$$y_1^* = 0.0234$$

$$y_2^* = 0$$

จากสมการ (ข.1.6) หาค่า $(y-y^*)_M$ และ $(1-y)_M^*$

$$(y-y^*)_M = \frac{(y_1-y_1^*)-(y_2-y_2^*)}{\ln[(y_1-y_1^*)/(y_2-y_2^*)]} \quad (\text{ข.1.11})$$

แทนค่าสมการ (ข.1.9) จะได้

$$(y-y^*)_M = 0.1379$$

$$(1-y)_M^* = \frac{(1-y_1^*)-(1-y_1)}{\ln[(1-y_1^*)/(1-y_1)]} \quad (\text{ข.1.12})$$

แทนค่าสมการ (ข.1.10) จะได้

$$(1-y)_M^* = 0.9118$$

ดังนั้นแทนค่าสมการ (ข.1.6) จะได้

$$K_a = 0.9310 \text{ โมลต่ออนาติ-ลูกบาศก์เมตร-กิโกลาสกาล}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 ค่าที่ได้จากการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล ($K_y a$)

1. อัตราการไหลของน้ำ 7.2 ลิตรต่อชั่วโมง

อัตราการไหลก๊าซ, V (mol/min)	เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้น ของ CO ₂ ขาเข้า	ความเข้มข้น CO ₂ ในน้ำขาออก (mol/L)	สัดส่วนโดยโมลขาออก (x_1)	y_1	y_1^*	y_2	$(y - y^*)_M$	$(1 - y)_{*M}$	$K_y a$
0.5839	15%	0.0013	0.000024	0.1500	0.0233	0.1497	0.1379	0.9119	0.9267
	20%	0.0017	0.000030	0.2000	0.0292	0.1997	0.1849	0.8827	0.8943
	27.70%	0.0023	0.000041	0.2770	0.0397	0.2765	0.2564	0.8361	0.9244
1.1678	15%	0.0013	0.000024	0.1500	0.0234	0.1499	0.1379	0.9118	0.9310
	20%	0.0017	0.000031	0.2000	0.0302	0.1998	0.1844	0.8822	0.9270
	27.70%	0.0027	0.000048	0.2770	0.0467	0.2767	0.2528	0.8328	1.1095
1.6219	15%	0.0009	0.000016	0.1500	0.0158	0.1499	0.1419	0.9155	0.6076
	20%	0.0017	0.000030	0.2000	0.0289	0.1999	0.1851	0.8828	0.8828

2. อัตราการไหลของน้ำ 15 ลิตรต่อชั่วโมง

อัตราการไหลก๊าซ, V (mol/min)	เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้น ของ CO ₂ ขาเข้า	ความเข้มข้น CO ₂ ในน้ำ ขาออก (mol/L)	สัดส่วนโดยโมลขาออก (x ₁)	y ₁	y ₁ [*]	y ₂	(y - y [*]) _M	(1 - y) _{*M}	K _y a
0.5839	15%	0.0017	0.000030	0.1500	0.0288	0.1493	0.1348	0.9093	2.4435
	20%	0.0022	0.000040	0.2000	0.0388	0.1990	0.1795	0.8781	2.5623
	27.70%	0.0034	0.000062	0.2770	0.0596	0.2755	0.2453	0.8270	3.0562
1.1678	15%	0.0014	0.000026	0.1500	0.0249	0.1497	0.1370	0.9111	2.0810
	20%	0.0019	0.000035	0.2000	0.0334	0.1996	0.1826	0.8807	2.1658
	27.70%	0.0029	0.000053	0.2770	0.0512	0.2764	0.2502	0.8308	2.5644
1.6219	15%	0.0014	0.000025	0.1500	0.0244	0.1498	0.1373	0.9114	2.0300
	20%	0.0018	0.000032	0.2000	0.0306	0.1997	0.1841	0.8820	1.9651

3. อัตราการไหลของน้ำ 30 ลิตรต่อชั่วโมง

อัตราการไหลก๊าซ, V (mol/min)	เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้น ของ CO2 ขาเข้า	ความเข้มข้น CO2 ใน น้ำขาออก (mol/L)	สัดส่วนโดยโมลขาออก (x_1)	y_1	y_1^*	y_2	$(y - y^*)_M$	$(1 - y)_{*M}$	$K_y a$
0.5839	15%	0.0013	0.000024	0.15	0.0227	0.1489	0.1378	0.9122	3.7530
	20%	0.0014	0.000026	0.2	0.0251	0.1988	0.1866	0.8846	3.1709
	27.70%	0.0022	0.000041	0.277	0.0391	0.2751	0.2561	0.8363	3.7996
1.1678	15%	0.0014	0.000026	0.15	0.0247	0.1494	0.1370	0.9112	4.1259
	20%	0.0019	0.000035	0.2	0.0338	0.1992	0.1822	0.8805	4.3942
	27.70%	0.0024	0.000043	0.277	0.0411	0.2760	0.2554	0.8354	4.0118
1.6219	15%	0.0016	0.000029	0.15	0.0276	0.1495	0.1355	0.9098	4.6547
	20%	0.0016	0.000029	0.2	0.0276	0.1995	0.1856	0.8834	3.5047

ข.2 การคำนวณวัสดุบรรจุ (Packing)

1. จำนวนชิ้นต่อหน่วยปริมาตร (n)

ค่า n จะขึ้นกับวิธีการบรรจุ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของหอ และขนาดของวัสดุบรรจุ ถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของหอโตกว่าขนาดวัสดุบรรจุตั้งแต่ 10 เท่าขึ้นไป โดยที่มีรูปร่างใกล้เคียงกัน ความสัมพันธ์ต่อไปนี้สามารถประยุกต์ใช้โดยประมาณ

$$nd_p^3 = c_1 \quad (\text{ข.2.1})$$

เมื่อ n = จำนวนชิ้นวัสดุบรรจุใน 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร

d_p = ขนาดเฉลี่ยของวัสดุบรรจุ (เซนติเมตร)

c_1 = ค่าคงที่คู่ที่ตารางที่ ข.4

สำหรับวงแหวนที่มีความสูงกับเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน ให้กำหนดขนาดโดยใช้ค่าเฉลี่ยทาง

เรขาคณิต $\bar{d}_p = \sqrt{d_{p1}d_{p2}}$ แทนได้

ตารางที่ ข.4 ค่าเฉลี่ยของ c_1

วัสดุบรรจุ	c_1
บรรจุวงแหวนอย่างไม่มีระเบียบ	0.77
บรรจุวงแหวนอย่างมีระเบียบ	1.0
ทรงกลม ทรงอานม้า กรวด	1.3

ขนาดเฉลี่ยของวัสดุบรรจุ $\bar{d}_p = \sqrt{d_{p1}d_{p2}}$

2. อัตราส่วนว่างขณะที่แห้ง (\mathcal{E}_d , Voidage)

ให้ v_p (ลูกบาศก์เซนติเมตร) เป็นปริมาตรแท้จริงของวัสดุบรรจุ 1 ชิ้น อัตราส่วนว่างขณะที่ไม่มีของเหลวไหลผ่าน สามารถคำนวณได้จากสูตรต่อไปนี้

$$\mathcal{E}_d = 1 - nv_p \quad (\text{ข.2.2})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปกติค่า v_p ของวัสดุบรรจุ 1 ชั้น หาได้จากน้ำหนักและความหนาแน่นของเนื้อวัสดุบรรจุ สำหรับ Raschig ring ที่มีรูปทรงเรขาคณิตแน่นอน สามารถคำนวณได้ดังนี้

ให้เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของวงแหวน = ความสูง = d_p (เซนติเมตร)

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของวงแหวน = d'_p (เซนติเมตร)

$$v_p = [\pi d_p^3/4][1 - (d'_p/d_p)^2] \quad (\text{ข.2.3})$$

จากสมการ (ข.2.2) (ข.2.3) และตามตารางที่ ข.4 จะสามารถคำนวณอัตราส่วนสำหรับ Raschig ring ที่บรรจุอย่างไม่มีระเบียบได้ดังนี้

$$\varepsilon_d = 1 - n[\pi d_p^3/4][1 - (d'_p/d_p)^2] \quad (\text{ข.2.4})$$

3. พื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตรขณะแห้ง (a_s)

สมการประมาณค่าใกล้เคียงของ a_s (ตารางเซนติเมตร/ลูกบาศก์เซนติเมตร) ดังนี้

$$a_s d_p = c_2 \quad (\text{ข.2.5})$$

เมื่อ c_2 = เป็นค่าคงที่ ซึ่งขึ้นกับชนิดของวัสดุบรรจุ ดังแสดงไว้ในตารางที่ ข.5

ตารางที่ ข.5 ค่าประมาณของ c_2

วัสดุบรรจุ	ขนาด	c_2
Raschig ring เซรามิก เหล็ก หรือแก้ว (บรรจุอย่างไม่มีระเบียบ)	¼" ~ 3"	4.8
Berl saddle เซรามิก	½" ~ 2"	6.2
กรวด ลูกดินเหนียว ลูกปิ่นตะกั่ว	2 – 100 mm	3.6
Lessing ring (บรรจุอย่างเป็นระเบียบ)	3" ~ 6"	9.6

นอกจากนี้ถ้าวัดพื้นที่ผิวของวัสดุบรรจุ 1 ชั้น A_p (ลูกบาศก์เซนติเมตร) ได้ จะสามารถคำนวณค่า a_s ได้ ดังต่อไปนี้

$$a_s = nA_p \quad (\text{ข.2.6})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งนี้ n สามารถหาได้จากสมการ (.1)

เมื่อพิจารณา Rasching ring หนา t (เซนติเมตร) สามารถหาค่า a_t ได้อย่างใกล้เคียงจากอัตราส่วนว่าง ϵ_d โดยอาศัยสมการต่อไปนี้

$$\text{กรณีเซรามิก หรือคาร์บอน} \quad a_t = \frac{2.35(1-\epsilon_d)}{t} \quad (\text{ข.2.7-a})$$

$$\text{กรณีเหล็ก} \quad a_t = \frac{2.14(1-\epsilon_d)}{t} \quad (\text{ข.2.7-b})$$

4. แฟ็คกิ้ง แฟคเตอร์ (Packing factor)

วิธีการหาค่าแฟคกิ้ง แฟคเตอร์ (Packing factor) นั้น โลโบ (Lobo) และคณะได้คิดค้นวิธีการทำนายค่าสำหรับวัสดุบรรจุหลายชนิดที่มีขนาดแตกต่างกันไป โดยประมาณได้จากความสัมพันธ์ ดังสมการ

$$F = \frac{a_p}{\epsilon^3} \quad (\text{ข.2.8})$$

เมื่อ F = แฟ็คกิ้ง แฟคเตอร์ (Packing factor)

a_p = พื้นที่ผิวของวัสดุบรรจุต่อปริมาตรคอลัมน์ (ตารางฟุตต่อลูกบาศก์ฟุต)

ϵ = สัดส่วนช่องว่างของวัสดุบรรจุ (ลูกบาศก์ฟุตต่อลูกบาศก์ฟุต)

แทนค่า $a_p = 307.07$ ตารางฟุตต่อลูกบาศก์ฟุต

$\epsilon = 0.5781$ ลูกบาศก์ฟุตต่อลูกบาศก์ฟุต

จะได้ค่า $F = 1,589 \text{ ฟุต}^{-1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้