

การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยคอลัมน์แบบพองอากาศร่วมกับการใช้ตัวกลางพลาสติก



นายภาสกร วรรณวงศ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ABSORPTION OF CARBON DIOXIDE IN BUBBLE COLUMN
WITH THE PRESENCE OF PLASTIC MEDIA

Mr. Passaworn Warunyuwong



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering
Department of Environmental Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2015
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยคอลัมน์แบบฟองอากาศ ร่วมกับการใช้ตัวกลางพลาสติก
โดย	นายภาสกร วรรณวงษ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เพชรพร เขาวงกตเจริญ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาปนัง)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ดาว สุวรรณแสง จันเจริญ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.มรุพัชร์ จำนงค์วงศ์)

ภาสวร วรรณวงศ์ : การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยคอลัมน์แบบฟองอากาศร่วมกับการใช้ตัวกลางพลาสติก (ABSORPTION OF CARBON DIOXIDE IN BUBBLE COLUMN WITH THE PRESENCE OF PLASTIC MEDIA) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล, 127 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยคอลัมน์แบบฟองอากาศร่วมกับการใช้ตัวกลางพลาสติก โดยเริ่มศึกษาผลจากรูปทรงและปริมาณของตัวกลางพลาสติกที่มีต่อตัวแปรด้านการถ่ายเทมวล และตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ ในขั้นต่อมาจะศึกษาผลจากการใช้สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีต่ออัตราการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ และสุดท้ายเป็นการศึกษาผลกระทบร่วมของการดูดซึมทางเคมีและตัวกลางพลาสติก ซึ่งผลงานวิจัยพบว่า ตัวกลางที่มีชั้นความพรุนสูงอย่างตัวกลางทรงกระบอกกลวงสามารถเพิ่มอัตราการดูดซึมได้ดีที่สุด และตัวกลางพลาสติกปริมาณมากก็ช่วยขัดขวางการรวมตัวของฟองอากาศและกักฟองอากาศให้อยู่ในระบบได้นาน โดยเฉพาะกับฟองอากาศขนาดใหญ่ ในการดูดซึมทางเคมีพบว่า อัตราการดูดซึมจะลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย เนื่องจากความสามารถในการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์จะลดลงเมื่อค่า Ionic strength สูงขึ้น ดังนั้นสำหรับงานวิจัยนี้ สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจึงสามารถดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ได้เร็วที่สุด และปฏิกิริยาเกิดขึ้นไวยิ่งขึ้นเมื่อเพิ่มสารเร่งปฏิกิริยาในระบบ สำหรับการใช้ตัวกลางพลาสติกร่วมกับการดูดซึมทางเคมีมีแนวโน้มช่วยเร่งอัตราการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในคอลัมน์แบบฟองอากาศได้เล็กน้อย จาก 0.2630 มิลลิกรัมต่อลิตร-วินาที เป็น 0.2649 มิลลิกรัมต่อลิตร-วินาที โดยรวมแล้ว การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในคอลัมน์แบบฟองอากาศร่วมกับตัวกลางในงานวิจัยนี้ มี Hatta number เท่ากับ 0.88 – 0.93 ซึ่งจัดว่าเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นค่อนข้างเร็ว

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

5570498221 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: CARBON DIOXIDE / ABSORPTION / BUBBLE COLUMN / MASS TRANSFER /
HYDRODYNAMIC / PLASTIC MEDIA

PASSAWORN WARUNYUWONG: ABSORPTION OF CARBON DIOXIDE IN BUBBLE
COLUMN WITH THE PRESENCE OF PLASTIC MEDIA. ADVISOR: ASSOC. PROF.
PISUT PAINMANAKUL, Ph.D., 127 pp.

The purpose of this work is to study the chemical absorption of carbon dioxide in bubble column reactor with the presence of plastic media. Firstly, the effect of media shape and concentration on mass transfer and bubble hydrodynamic parameters was determined. Secondly, the rate of carbon dioxide absorption was observed in varied concentration of sodium carbonate solution. Finally, the combination of chemical reaction and plastic media was conducted in bubble column reactor. The results show the media with high bed porosity like the ring media can increase absorption rate. A large number of media can obstruct bubble coalescence and trap bubbles longer in the absorption process, especially for large bubbles. For chemical reaction, the absorption rate drops with high concentration of the carbonate solution due to the low solubility of carbon dioxide which decreases with ionic strength. As the results in this study, the 1%w of sodium carbonate solution is the optimum and more efficient with the addition of rate-promoter. The plastic media tends to slightly enhance the carbon dioxide absorption rate in bubble column reactor from 0.2630 mg/L.s to 0.2649 mg/L.s. Overall, the carbon dioxide absorption processes in bubble column reactor in this study are the intermediate-rate reaction which provide the Hatta number around 0.88 – 0.93.

Department: Environmental
Engineering

Student's Signature

Advisor's Signature

Field of Study: Environmental
Engineering

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยการสนับสนุนของรองศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ์ เพียรมนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และถ่ายทอดวิชาความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ทุกชั้นตอน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณในความเมตตากรุณาของอาจารย์มา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.เพชรพร เขาวกิจเจริญ และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาปนิจ อาจารย์ ดร.ดาว สุวรรณแสง จันเจริญ และอาจารย์ ดร.มรุพัชร จำนงค์วงศ์ ที่ได้ให้เกียรติและสละเวลาเพื่อเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์นี้ รวมถึงให้คำแนะนำและชี้แนะข้อผิดพลาดเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคณะอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่ได้อบรมสั่งสอน เพิ่มพูนความรู้อันเป็นประโยชน์ในด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ขอขอบคุณ "ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต บัณฑิตวิทยาลัยแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย" ที่สนับสนุนทุนการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณ พี่ๆ น้องๆ และเพื่อนๆ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ แนะนำ และให้ความรู้ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ด้วยดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และสมาชิกทุกคนในครอบครัว ที่ช่วยสนับสนุน ส่งเสริม และให้กำลังใจ จนทำให้การศึกษาครั้งนี้ประสบผลสำเร็จได้ตามที่ตั้งใจ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 คาร์บอนไดออกไซด์	4
2.2 เทคโนโลยีการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์	6
2.2.1 การดูดซับ (Adsorption Technology).....	6
2.2.2 การดูดซึม (Absorption Technology).....	6
2.2.3 การใช้เยื่อเลือกผ่าน (Membrane Separation Technology).....	7
2.3 การดูดซึม (Absorption).....	8
2.3.1 ความรู้เบื้องต้น	8
2.3.2 ความสามารถในการละลายและกฎของเฮนรี่ (Solubility and Henry's Law).....	8
2.3.3 กลไกของการดูดซึม (Mechanism of Absorption).....	9
2.4 อุปกรณ์ในการดูดซึมก๊าซ (Gas Absorber).....	12

2.4.1 คอลัมน์แบบฟองอากาศ (Bubble Column)	12
2.4.2 คอลัมน์แบบอาศัยใบกวนทางกล (Mechanically Agitated Vessel)	13
2.4.3 คอลัมน์แบบถาด (Tray Tower).....	14
2.4.4 คอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง (Packed Tower).....	15
2.5 คอลัมน์แบบฟองอากาศ (Bubble Column).....	16
2.5.1 พลศาสตร์ของไหล (Fluid dynamic).....	16
2.5.2 สัดส่วนก๊าซ (Gas holdup)	18
2.5.3 ลักษณะของฟองอากาศ (Bubble characteristic)	18
2.5.4 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (Mass transfer coefficient).....	18
2.6 กระบวนการดูดซึมทางเคมี (Chemical Absorption).....	19
2.6.1 ความรู้เบื้องต้น	19
2.6.2 การเลือกใช้ของเหลวดูดซึม.....	23
2.6.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Promoter)	24
2.7 ตัวกลางของแข็ง.....	25
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	26
2.8.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการดูดซึมโดยใช้ตัวกลาง	26
2.8.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการดูดซึมทางเคมีของคาร์บอนไดออกไซด์	29
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	33
3.1 ภาพรวมของงานวิจัย	33
3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	33
3.2.1 การทดลองช่วงที่ 1	33
3.2.2 การทดลองช่วงที่ 2	34
3.2.3 การทดลองช่วงที่ 3.....	35

3.3 การติดตั้งระบบการทดลอง	37
3.3.1 การทดลองช่วงที่ 1	37
3.3.2 การทดลองช่วงที่ 2	38
3.3.3 การทดลองช่วงที่ 3	39
3.4 การวิเคราะห์ตัวแปรที่ศึกษาในงานวิจัย	40
3.4.1 ตัวแปรด้านการถ่ายเทมวล	40
3.4.2 ตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์	42
3.5 วิธีการทดลอง	45
3.5.1 การทดลองช่วงที่ 1	45
3.5.2 การทดลองช่วงที่ 2	47
3.5.3 การทดลองช่วงที่ 3	48
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย	51
4.1 ผลจากการใช้หัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กและขนาดใหญ่ เมื่อไม่ใช้ตัวกลางพลาสติก	51
4.1.1 ขนาดฟองอากาศ	51
4.1.2 ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ	52
4.1.3 สัดส่วนก๊าซ	54
4.1.4 พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ	55
4.1.5 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม	55
4.2 ผลจากการใช้ตัวกลางพลาสติกกับหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กและขนาดใหญ่	58
4.2.1 ขนาดฟองอากาศ	58
4.2.2 ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ	60
4.2.3 สัดส่วนก๊าซ	63
4.2.4 พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ	67

4.2.5 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม.....	69
4.3 การเลือกใช้ของเหลวดูดซึมในการดูดซึมทางเคมี.....	74
4.3.1 การหาความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่ดูดซึมดีที่สุด.....	74
4.3.2 ผลจากการใช้สารเร่งปฏิกิริยา.....	76
4.4 การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในคอลัมน์แบบฟองอากาศร่วมกับตัวกลางพลาสติก.....	78
4.4.1 ตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์.....	79
4.4.2 ตัวแปรด้านการถ่ายเทมวล.....	79
4.5 การพยากรณ์ตัวแปรในงานวิจัย.....	85
4.5.1 สมการพยากรณ์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมเนื่องจากการใช้ตัวกลาง.....	86
4.5.2 สมการพยากรณ์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของคาร์บอนไดออกไซด์.....	87
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	89
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	89
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	90
รายการอ้างอิง.....	91
ภาคผนวก.....	96
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	127

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 สมบัติของคาร์บอนไดออกไซด์	5
ตารางที่ 2.2 ลักษณะของตัวกลางที่ใช้ในงานวิจัยของ Maldonado และคณะ (2008)	28
ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบระบบดูดซึมในงานวิจัยของ Kothandaraman (2010).....	30
ตารางที่ 3.1 ลักษณะและสมบัติของตัวกลางพลาสติกที่ใช้ในงานวิจัย.....	36
ตารางที่ 3.2 สรุปตัวแปรต่างๆในการทดลองช่วงที่ 1.....	46
ตารางที่ 3.3 สรุปตัวแปรต่างๆในการทดลองช่วงที่ 2.....	47
ตารางที่ 3.4 สรุปตัวแปรต่างๆในการทดลองช่วงที่ 3.....	49
ตารางที่ 4.1 สรุปตัวแปรที่เลือกใช้ทดลองการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกับตัวกลาง.....	78
ตารางที่ 4.2 ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศของคาร์บอนไดออกไซด์.....	79
ตารางที่ 4.3 ตัวแปรทางด้านการถ่ายเทมวลในระบบดูดซึมทางเคมี	84

สารบัญภาพ

ภาพที่ 2.1 เทคโนโลยีการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการดูดซับ 6

ภาพที่ 2.2 เทคโนโลยีการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการดูดซึม 7

ภาพที่ 2.3 ทฤษฎีฟิล์ม 2 ชั้น..... 10

ภาพที่ 2.4 คอลัมน์แบบฟองอากาศ..... 13

ภาพที่ 2.5 คอลัมน์แบบอาศัยใบกวนทางกล..... 13

ภาพที่ 2.6 คอลัมน์แบบถาด..... 14

ภาพที่ 2.7 คอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง..... 15

ภาพที่ 2.8 ระบบการไหลแบบต่างๆในคอลัมน์แบบฟองอากาศ..... 17

ภาพที่ 2.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระบบการไหลแบบต่างๆในคอลัมน์แบบฟองอากาศ..... 17

ภาพที่ 2.10 ทฤษฎีฟิล์ม 2 ชั้นเปรียบเทียบระหว่างการดูดซึมทางกายภาพ และการดูดซึมทางเคมี... 20

ภาพที่ 2.11 รูปแบบการดูดซึมทางเคมี 8 รูปแบบ..... 21

ภาพที่ 2.12 รูปร่างของตัวกลางแบบต่างๆ 25

ภาพที่ 2.13 การเกิดแรงตึงผิวจากการสัมผัสกันระหว่างฟองอากาศและตัวกลาง 28

ภาพที่ 3.1 ตัวกลางที่ใช้ในงานวิจัย..... 36

ภาพที่ 3.2 หัวกำเนิดฟองอากาศที่ใช้ในงานวิจัย..... 37

ภาพที่ 3.3 คอลัมน์ที่ใช้ในงานวิจัย..... 37

ภาพที่ 3.4 แผนผังการติดตั้งระบบของการทดลองช่วงที่ 1..... 38

ภาพที่ 3.5 แผนผังการติดตั้งระบบของการทดลองช่วงที่ 2..... 39

ภาพที่ 3.6 แผนผังการติดตั้งระบบของการทดลองช่วงที่ 3..... 40

ภาพที่ 3.7 แผนผังการทดลองช่วงที่ 1..... 46

ภาพที่ 3.8 แผนผังการทดลองช่วงที่ 2..... 48

ภาพที่ 3.9 แผนผังการทดลองช่วงที่ 3..... 50

ภาพที่ 4.1 เปรียบเทียบขนาดฟองอากาศที่เกิดจากหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กและขนาดใหญ่ เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก.....	52
ภาพที่ 4.2 เปรียบเทียบความเร็วลอยตัวของฟองอากาศที่เกิดจากหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก และขนาดใหญ่ เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก	53
ภาพที่ 4.3 ปรากฏการณ์ของการลอยตัวของฟองอากาศ.....	53
ภาพที่ 4.4 เปรียบเทียบสัดส่วนก๊าซที่เกิดจากหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กและขนาดใหญ่ เมื่อ ไม่มีตัวกลางพลาสติก.....	54
ภาพที่ 4.5 เปรียบเทียบพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะที่เกิดจากหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กและขนาด ใหญ่ เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก	55
ภาพที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมที่เกิดจากหัวกำเนิดฟองอากาศขนาด เล็กและขนาดใหญ่ เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก.....	56
ภาพที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมจากการใช้ตัวกลางพลาสติกต่างชนิด.....	57
ภาพที่ 4.8 เปรียบเทียบขนาดฟองอากาศที่เกิดจากหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กและขนาดใหญ่ เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติก	59
ภาพที่ 4.9 การแตกตัวของฟองอากาศโดยตัวกลางพลาสติก	60
ภาพที่ 4.10 การยับยั้งการปะทะและรวมตัวกันของฟองอากาศด้วยตัวกลางพลาสติก.....	60
ภาพที่ 4.11 เปรียบเทียบความเร็วลอยตัวของฟองอากาศที่เกิดจากหัวกำเนิดฟองอากาศขนาด เล็กและขนาดใหญ่ เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติก	61
ภาพที่ 4.12 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ผ่านชั้นตัวกลางของฟองอากาศ.....	63
ภาพที่ 4.13 ฟองอากาศขนาดเล็กลอยตัวเร็วขึ้นด้วยแรงพาจากตัวกลางพลาสติก	63
ภาพที่ 4.14 เปรียบเทียบสัดส่วนก๊าซที่เกิดจากหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กและขนาดใหญ่ เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติก	64
ภาพที่ 4.15 การดักจับฟองอากาศของตัวกลางทรงกระบอกกลวง.....	65
ภาพที่ 4.16 เปรียบเทียบผลกระทบของปริมาณตัวกลางพลาสติกต่อความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ และสัดส่วนก๊าซ.....	66
ภาพที่ 4.17 เปรียบเทียบการลอยตัวของฟองอากาศในตัวกลางพลาสติก	67

ภาพที่ 4.18 เปรียบเทียบพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะที่เกิดจากหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กและ ขนาดใหญ่ เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติก.....	68
ภาพที่ 4.19 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมที่เกิดจากหัวกำเนิดฟองอากาศขนาด เล็ก เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติก	70
ภาพที่ 4.20 เปรียบเทียบผลกระทบของอัตราการไหลก๊าซต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม	71
ภาพที่ 4.21 เปรียบเทียบผลกระทบของหัวกำเนิดฟองอากาศต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม..	72
ภาพที่ 4.22 เปรียบเทียบผลกระทบของรูปทรงตัวกลางต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม	73
ภาพที่ 4.23 เปรียบเทียบผลกระทบของปริมาณตัวกลางต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม.....	73
ภาพที่ 4.24 ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากระบบดูดซึม	74
ภาพที่ 4.25 ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมในของเหลวดูดซึมต่างๆ	75
ภาพที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ ค่า Ionic strength และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต	76
ภาพที่ 4.27 ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากระบบที่ผสมและไม่ผสมสารเร่งปฏิกิริยา....	77
ภาพที่ 4.28 คาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมในของเหลวดูดซึมที่ผสมและไม่ผสมสารเร่งปฏิกิริยา....	77
ภาพที่ 4.29 ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากคอลัมน์แบบฟองอากาศ	80
ภาพที่ 4.30 ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมในคอลัมน์แบบฟองอากาศ.....	80
ภาพที่ 4.31 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมเนื่องจากการใช้ตัวกลางพลาสติก จากการทดลองและจากสมการพยากรณ์.....	87
ภาพที่ 4.32 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของคาร์บอนไดออกไซด์ จากการ ทดลองและจากสมการพยากรณ์.....	88

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบัน การเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหิน (Fossil fuel) ในอุตสาหกรรมยังคงมีอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศ ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์นี้เป็นตัวการหลักที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global warming) และนอกจากนี้คาร์บอนไดออกไซด์ยังเป็นสิ่งเจือปนหลักในเชื้อเพลิงพลังงานทดแทนอย่างก๊าซชีวภาพ ทำให้ประสิทธิภาพการในการเผาไหม้ของก๊าซชีวภาพนั้นลดลง

เทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์มีอยู่หลายวิธี ยกตัวอย่างเช่น การดูดซับ (Adsorption) การดูดซึม (Absorption) การใช้เยื่อเลือกผ่าน (Membrane separation) เป็นต้น ซึ่งกระบวนการหนึ่งที่น่าสนใจคือ การดูดซึม เนื่องจากมีกลไกการทำงานที่ไม่ซับซ้อน ระบบมีขนาดเล็ก และไม่จำเป็นต้องมีการดูแลรักษาเป็นอย่างดี ทั้งนี้อุปกรณ์ที่ใช้ในการดูดซึมก๊าซมีอยู่หลายชนิด เช่น คอลัมน์แบบฟองอากาศ (Bubble column) คอลัมน์แบบอาศัยใบกวนทางกล (Mechanically agitated vessel) คอลัมน์แบบถาด (Tray tower) คอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง (Packed tower) เป็นต้น

การดูดซึมก๊าซจะทำให้เกิดการถ่ายเทมวลจากเฟสก๊าซไปสู่เฟสของเหลว ทั้งนี้ความสามารถในการดูดซึมที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทมวล (Mass transfer coefficient) พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟสก๊าซและเฟสของเหลว (Gas-liquid interfacial area) ความสามารถในการละลาย (Solubility) เป็นต้น ซึ่งคอลัมน์แบบฟองอากาศสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อสร้างฟองอากาศขนาดเล็กในของเหลวดูดซึม ทำให้เกิดพื้นที่สัมผัสระหว่างเฟสก๊าซและเฟสของเหลวได้มาก และเป็นการเพิ่มความสามารถในการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนี้คอลัมน์แบบฟองอากาศยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับการใช้ตัวกลางของแข็งและการดูดซึมทางเคมีเพื่อให้มีความสามารถในการดูดซึมที่ดีขึ้น

ทั้งนี้ มีงานวิจัยบางงานวิจัยที่ผ่านมาที่ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ และตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลในคอลัมน์แบบฟองอากาศ เช่น งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ตัวกลางของแข็ง และงานวิจัยเกี่ยวกับการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์โดยการดูดซึมทางเคมี เป็นต้น แต่ถึงอย่างไรก็ตาม ยังคงมีงานวิจัยส่วนน้อยที่มีการเลือกใช้พลาสติกเป็นตัวกลางในระบบดูดซึม ซึ่งอาจสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์และการดูดซึมทางเคมีได้

ดังนั้น เพื่อให้สามารถเข้าใจกลไกการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยคอลัมน์แบบฟองอากาศ ได้มากยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้จึงมีเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซึม เช่น การใช้ตัวกลางพลาสติก รูปทรงของตัวกลางพลาสติก ปริมาณของตัวกลางพลาสติก กลไกการดูดซึมทางเคมี เป็นต้น อีกทั้งยังคาดหวังว่า งานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพ มีต้นทุนต่ำและใช้งานง่าย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในด้านการเพิ่มอัตราการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยคอลัมน์แบบฟองอากาศร่วมกับกลไกทางเคมีและตัวกลางพลาสติก

1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่ออัตราการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยคอลัมน์แบบฟองอากาศ ได้แก่ อัตราการไหลก๊าซ ขนาดหัวกำเนิดฟองอากาศ รูปทรงตัวกลางพลาสติก ปริมาณตัวกลางพลาสติก ชนิดของเหลวดูดซึม และความเข้มข้นของเหลวดูดซึม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3.2 ใช้คอลัมน์แบบฟองอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 เซนติเมตร สูง 1 เมตร ที่ทำจากแผ่นอะคริลิกหนา 5 มิลลิเมตร

1.3.3 ใช้อากาศและคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวถูกดูดซึม

1.3.4 ใช้น้ำประปา และโซเดียมคาร์บอเนต 1 – 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นตัวดูดซึม และใช้แอลาร์จินีนเป็นสารเร่งปฏิกิริยา

1.3.5 ใช้หัวกำเนิดฟองอากาศแบบเชิงทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 และ 6.5 เซนติเมตร

1.3.6 ศึกษาอัตราการไหลก๊าซอยู่ในช่วง 2.5 – 12.5 ลิตรต่อนาที

1.3.7 ใช้ตัวกลางของแข็งเป็นพลาสติกชนิดโพลิโพรไพลีน (Polypropylene) รูปทรงต่างๆ

1.3.8 เป็นการทดลองแบบทีละเท (Batch)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถประยุกต์ใช้คอลัมน์แบบฟองอากาศร่วมกับการดูดซึมทางเคมีและตัวกลางพลาสติกให้เป็นทางเลือกหนึ่งในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.4.2 สามารถทราบปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยคอลัมน์แบบฟองอากาศร่วมกับการดูดซึมทางเคมีและตัวกลางพลาสติก

1.4.3 สามารถหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้งานคอลัมน์แบบฟองอากาศในการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกับการดูดซึมทางเคมีและตัวกลางพลาสติก

1.4.4 สามารถวิเคราะห์หาแบบจำลองของระบบดูดซึมในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คาร์บอนไดออกไซด์

คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide) หรือ CO_2 คือ ก๊าซที่ไม่มีกลิ่น ไม่มีสี มีองค์ประกอบจากการรวมตัวกันของธาตุ 2 ชนิด ได้แก่ คาร์บอน (Carbon, C) และออกซิเจน (Oxygen, O) โดยมีสูตรโครงสร้างเป็น $\text{O}=\text{C}=\text{O}$ คาร์บอนไดออกไซด์เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหิน หรือไฮโดรคาร์บอน และกระบวนการทางชีวภาพ ซึ่งรวมถึง การย่อยสลายสารอินทรีย์ การหมัก และการหายใจของมนุษย์ และสิ่งมีชีวิต ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณมากมักเกิดขึ้นจากกิจกรรมทางอุตสาหกรรมต่างๆของมนุษย์ เช่น การผลิตก๊าซไฮโดรเจน การผลิตแอมโมเนียจากก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น

ปกติจะพบความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์อยู่น้อยในบรรยากาศเพียงประมาณ 0.038 เปอร์เซ็นต์ หรือ 380 ส่วนต่อล้านส่วน มีค่าขึ้นลงอยู่ในช่วง 6 ส่วนต่อล้านส่วนแล้วแต่ฤดูกาล และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น 2 ส่วนต่อล้านส่วนต่อปี คาร์บอนไดออกไซด์มีน้ำหนักมากเป็น 1.5 เท่าของอากาศ ดังนั้นคาร์บอนไดออกไซด์จึงลอยตัวอยู่ในระดับที่ต่ำในบรรยากาศ

คาร์บอนไดออกไซด์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายทาง เช่น การอัดก๊าซลงในเครื่องดื่มเพื่อให้เกิดฟองในน้ำอัดลมในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม การป้องกันการออกซิเดชันในงานเชื่อมโลหะในอุตสาหกรรมผลิตและก่อสร้าง นอกจากนี้ คาร์บอนไดออกไซด์สามารถเปลี่ยนสถานะได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า -78.5 องศาเซลเซียส อยู่ในรูปของแข็ง หรือที่เรียกว่า น้ำแข็งแห้ง ซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดความร้อน โดยน้ำแข็งแห้ง 1 กิโลกรัมสามารถดูดความร้อนได้เทียบเท่ากับน้ำแข็งปกติ 2 กิโลกรัม

ในขณะเดียวกัน คาร์บอนไดออกไซด์ก็ยังให้โทษได้เช่นกัน เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถดูดกลืนแสงอินฟราเรด และกักเก็บความร้อนไว้ในบรรยากาศ ทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสาเหตุหลักของการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse effect) ส่งผลให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global warming) โดยมีแหล่งที่มาหลักจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหิน (IPCC, 2007) และยังคงมีแนวโน้มของการปลดปล่อยสู่บรรยากาศสูงขึ้นเรื่อยๆ (Boden และคณะ, 2013)

อีกปัญหาหนึ่งในเชิงพลังงาน คาร์บอนไดออกไซด์ยังเป็นสิ่งเจือปนหลักในการผลิตไบโอมีเทนจากก๊าซธรรมชาติ โดยมีอยู่ถึง 20 - 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของก๊าซชีวภาพ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) ทั้งนี้ก๊าซชีวภาพสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงจากองค์ประกอบหลักนั่นคือ ก๊าซมีเทน (CH_4) แต่คาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซเฉื่อยที่ไม่ให้พลังงานความร้อนในการเผาไหม้ เมื่อเจือปน

อยู่ในก๊าซชีวภาพจะทำให้ค่าความร้อนในก๊าซชีวภาพลดลงจนเป็นเชื้อเพลิงที่ด้อยคุณภาพ ติดไฟยาก ลูกไหม้ช้า และเมื่อคาร์บอนไดออกไซด์รวมตัวกับน้ำหรือความชื้นจะเกิดกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) ที่มีฤทธิ์กัดกร่อนวัสดุอุปกรณ์ต่างๆที่สัมผัสกับก๊าซชีวภาพ เช่น ทำให้เกิดการกัดกร่อนในถังเก็บก๊าซ เป็นต้น ดังนั้น ในปัจจุบันจึงมีเทคโนโลยีหลากหลายวิธีที่ในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อช่วยให้เกิดประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรม และรักษาสภาพบรรยากาศให้มีความสมดุล

ตารางที่ 2.1 สมบัติของคาร์บอนไดออกไซด์

Properties	Value
Molecular weight [kg/mol]	44.01
Density (@ 1.013 bar, 15 °C) [kg/m ³]	1.87
Critical temperature [°C]	31
Critical pressure [bar]	73.825
Critical density [kg/m ³]	464
Compressibility factor (Z) (@ 1.013 bar, 15 °C)	0.9942
Specific gravity (air= 1) (@ 1.013bar, 15 °C)	1.521
Specific volume (@ 1.013 bar, 21 °C) [m ³ /kg]	0.547
Heat capacity at constant pressure (Cp) (@ 1.013 bar, 25 °C) [kJ/mol.K]	0.037
Heat capacity at constant volume (Cv) (@ 1.013 bar, 25 °C) [kJ/mol.K]	0.028
Ratio of specific heats, Cp/Cv (@ 1.013 bar, 25 °C)	1.2938
Thermal conductivity (@ 1.013 bar, 0 °C) [mW/m.K]	14.65
Solubility in water (@ 1.013 bar, 2 °C) [vol/vol]	1.7163
Concentration in air [vol %]	0.03
Diffusion coefficient in water (@ 25 °C) [μm ² /sec]	1880

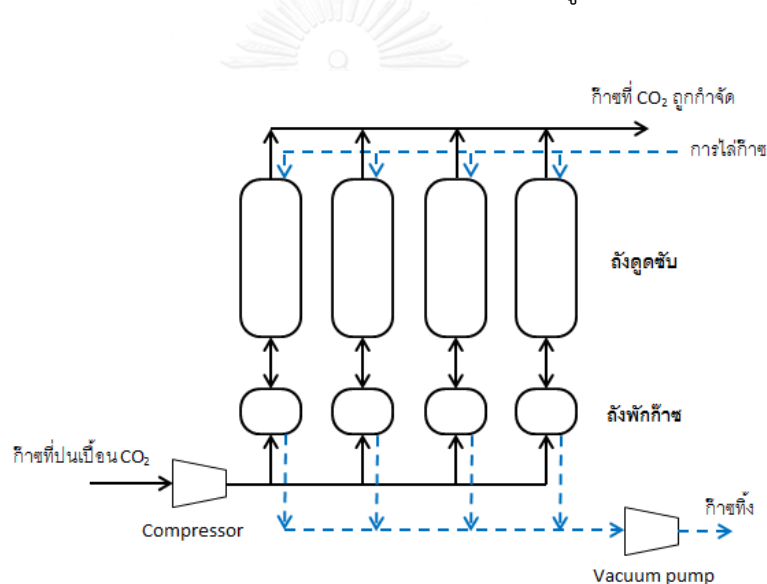
ที่มา: Air Liquide, 2009; Maxareil และ Sandall, 1980

2.2 เทคโนโลยีการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์

2.2.1 การดูดซับ (Adsorption Technology)

การดูดซับเป็นเทคโนโลยีการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ โดยหลักการทำงาน คือ ใช้การเปลี่ยนแปลงความดันก๊าซ และสมบัติในการดูดซับของวัสดุต่อคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซอื่นๆ โดยความสามารถในการดูดซับของวัสดุแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับขนาดของโมเลกุล ระบบประกอบด้วยถังดูดซับภายในบรรจุตัวดูดซับ เช่น ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) หรือซีโอไลต์ (Zeolite) การทำงานจะเป็นรอบตามวงจรของการดูดซับ ดังภาพที่ 2.1

ข้อดีของเทคโนโลยีนี้ คือ สามารถกำจัดสิ่งเจือปนอื่นๆนอกจากคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปได้ แต่ก็ยังเป็นระบบที่มีขั้นตอนมากและต้องทำงานที่ความดันสูง

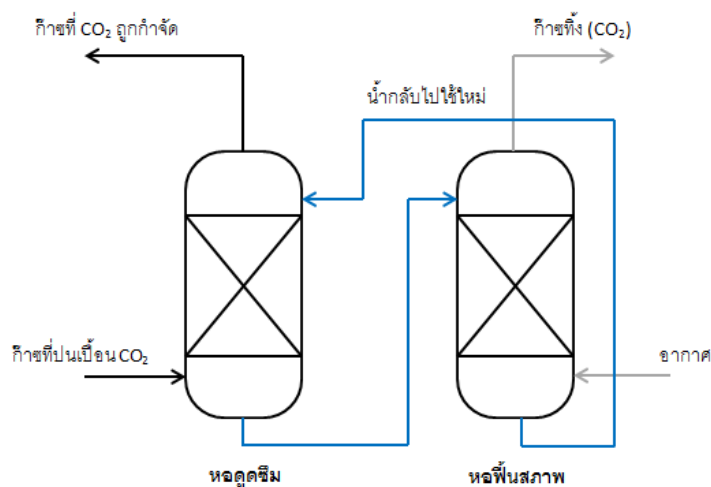


ภาพที่ 2.1 เทคโนโลยีการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการดูดซับ

(ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

2.2.2 การดูดซึม (Absorption Technology)

การดูดซึมเป็นเทคโนโลยีการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์โดยมีหลักการทำงาน คือ ให้คาร์บอนไดออกไซด์ละลายในของเหลว เช่น น้ำหรือสารละลาย ระบบการดูดซึมจะประกอบไปด้วยหอดูดซึม (Absorber) และหอฟั่นสภาพ (Stripper) และภายในหออาจมีตัวกลางเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการถ่ายเทมวลสาร ดังแสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 เทคโนโลยีการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการดูดซึม
(ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

เทคโนโลยีนี้มีเทคนิคที่ไม่ซับซ้อน ระบบมีขนาดเล็ก ไม่จำเป็นต้องทำงานที่ความดันสูง แต่อาจมีข้อเสียเรื่องค่าใช้จ่ายหากมีการใช้ตัวกลางหรือสารเคมีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซึม

2.2.3 การใช้เยื่อเลือกผ่าน (Membrane Separation Technology)

การใช้เยื่อเลือกผ่าน เป็นเทคโนโลยีการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์โดยการเลือกซึมผ่านและแพร่ผ่านเมมเบรนใช้หลักความแตกต่างของขนาดโมเลกุลหรือความจำเพาะต่อโมเลกุลของก๊าซแต่ละชนิดในการดึงดูดกัน (Affinity) ทำงานภายใต้ความดัน ประมาณ 6 - 10 บาร์ ประสิทธิภาพของการแยกขึ้นอยู่กับชนิดของเมมเบรน หลักการโดยทั่วไปของเทคนิคการแยก คือ การเลือกซึมผ่าน (Selective permeation) ซึ่งถึงแม้ว่าเทคโนโลยีนี้จะใช้พื้นที่น้อย ไม่ต้องใช้สารเคมี และมีอายุการใช้งานที่นาน แต่ก็มีราคาแพง และต้องการการควบคุมอย่างดี

จากทั้ง 3 เทคโนโลยี การที่จะเลือกใช้ระบบเพื่อกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ โดยคำนึงถึงความไม่ซับซ้อนของกลไกการทำงาน ระบบมีขนาดเล็ก และไม่จำเป็นต้องมีการบำรุงดูแลรักษาอย่างดี การดูดซึมจึงเป็นทางเลือกหนึ่งและมีข้อได้เปรียบกว่าเทคโนโลยีอื่นๆ

2.3 การดูดซึม (Absorption)

2.3.1 ความรู้เบื้องต้น

การดูดซึม เป็นวิธีที่แพร่หลายสำหรับใช้บำบัดก๊าซที่ถูกปล่อยออกมาจากกระบวนการผลิต การดูดซึมก๊าซด้วยของเหลวจะเกิดขึ้น เมื่อมีปริมาณก๊าซในของเหลวน้อยกว่าปริมาณที่ทำให้เกิดสมดุลทางเคมีหรือการละลายที่อิ่มตัว ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นจริงกับความเข้มข้นขณะสมดุลทำให้เกิดแรงขับเคลื่อน (Concentration gradient) ของการดูดซึม อัตราการดูดซึมขึ้นอยู่กับสารดูดซึมหรือของเหลว (Absorbent) สารที่ถูกดูดซึมหรือก๊าซ (Absorbate) การละลายหรือการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี และยังขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพของก๊าซและของเหลว (เช่น การแพร่ ความหนืด ความหนาแน่น เป็นต้น) และสถานะของระบบดูดซึม (เช่น อุณหภูมิ อัตราการไหลของก๊าซ อัตราการไหลของของเหลว ความดัน เป็นต้น)

การดูดซึมเกิดขึ้นได้ทั้งแบบกายภาพและแบบเคมี การดูดซึมแบบกายภาพเกิดขึ้นเมื่อก๊าซละลายอยู่ในตัวทำละลายแบบธรรมดา แต่หากเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างก๊าซกับตัวทำละลายนั้นคือ เกิดการดูดซึมแบบเคมี ในการเลือกคุณสมบัติของเหลวที่ใช้ดูดซึมควรพิจารณาถึงประสิทธิภาพที่ต้องการและราคาของสารเคมี โดยทั่วไปมักใช้น้ำเป็นของเหลวที่ใช้ดูดซึมเนื่องจากก๊าซมักจะละลายในน้ำได้ อีกทั้งน้ำยังสามารถหาได้ง่ายและมีราคาถูก

2.3.2 ความสามารถในการละลายและกฎของเฮนรี (Solubility and Henry's Law)

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการดูดซึมก๊าซ คือ ความสามารถในการละลายของก๊าซ ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิและความดันของระบบ ความสามารถในการละลายนั้นใช้การวัดที่สถานะสมดุล (Equilibrium conditions) โดยวัดความเข้มข้นของก๊าซและสารละลายในภาชนะปิด และทิ้งไว้ระยะเวลาหนึ่งจนปริมาณของก๊าซที่ถูกดูดซึมเข้าไปในสารละลายเท่ากับปริมาณที่ก๊าซที่เคลื่อนตัวออกหรือระเหยออกจากสารละลาย ณ จุดนี้ความเข้มข้นของก๊าซในส่วนที่อยู่ในอากาศและในของเหลวจะคงที่ คือ เกิดภาวะสมดุลของก๊าซในระบบก๊าซและของเหลว

กฎของเฮนรี ดังแสดงในสมการ (2.1) สามารถใช้ทำนายความสามารถในการละลายเมื่อความเข้มข้นขององค์ประกอบหรือก๊าซมีความเจือจางมาก

$$p_A = H_A C_A \quad (2.1)$$

เมื่อ p_A คือ ความดันย่อยขององค์ประกอบ A ในก๊าซที่ภาวะสมดุล, ปาสคาล
 H_A คือ ค่าคงที่ของเฮนรี, ปาสคาล-ลูกบาศก์เมตรต่อโมล
 C_A คือ ความเข้มข้นขององค์ประกอบ A ในของเหลวที่ภาวะสมดุล, โมลต่อลูกบาศก์เมตร

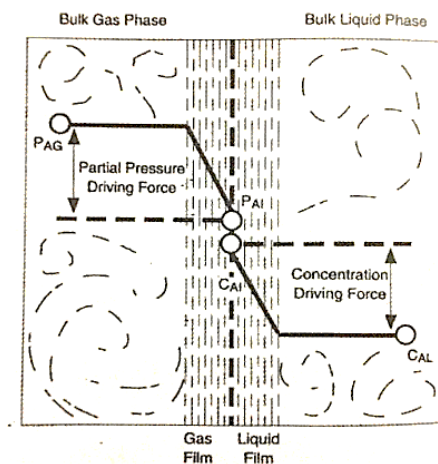
สามารถเขียนกฎของเฮนรีได้อีกรูปแบบ โดยสมมติให้ความดันย่อยขององค์ประกอบ
 ในก๊าซและความเข้มข้นขององค์ประกอบในของเหลวที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟส ณ ภาวะสมดุลมี
 ความสัมพันธ์ตามกฎของเฮนรี โดยค่าคงที่ของเฮนรีคงที่ ดังนั้นสมการ (2.1) ข้างต้น จะเป็น

$$p_{A_i} = H_A C_{A_i} \quad (2.2)$$

เมื่อ p_{A_i} คือ ความดันย่อยขององค์ประกอบ A ในก๊าซที่ผิวสัมผัสที่ภาวะสมดุล, ปาสคาล
 C_{A_i} คือ ความเข้มข้นขององค์ประกอบ A ในของเหลวที่ผิวสัมผัสที่ภาวะสมดุล, โมล
 ต่อลูกบาศก์เมตร

2.3.3 กลไกของการดูดซึม (Mechanism of Absorption)

การดูดซึมเป็นการถ่ายเทมวล ซึ่งมีทฤษฎีพื้นฐานหนึ่งสำหรับอธิบายกระบวนการดูด
 ซึมโดยกล่าวไว้ว่า ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลว ถูกกั้นไว้ด้วยเยื่อบางๆ 2 ชั้น ชั้นหนึ่งเป็นฟิล์ม
 ก๊าซ (Gas film) และอีกชั้นหนึ่งเป็นฟิล์มของเหลว (Liquid film) ทฤษฎีนี้ คือ ทฤษฎีฟิล์มสองชั้น
 (Two-film theory) เป็นแบบจำลองแสดงให้เห็นการถ่ายเทของมวลจากชั้นที่เป็นก๊าซหรืออากาศ
 ผ่านชั้นที่เป็นรอยต่อระหว่างก๊าซและของเหลว แบบจำลองนี้นำมาใช้อธิบายกลไกของการถ่ายเทมวล
 จากก๊าซเข้าสู่ของเหลวโดยผ่านชั้นฟิล์มบางๆ 2 ชั้น ดังแสดงในภาพที่ 2.3 การถ่ายเทมวล
 ประกอบด้วยกลไกการถ่ายเทที่แยกกัน 2 ส่วน คือ ส่วนของก๊าซและส่วนของของเหลว โดยสมมติว่า
 การถ่ายเทนี้เป็นแบบราบเรียบ (Laminar) จึงทำให้สามารถจำลองกลไกนี้เป็นสมการทางคณิตศาสตร์
 ที่ใช้อธิบายได้



ภาพที่ 2.3 ทฤษฎีฟิล์ม 2 ชั้น
(ที่มา: นพภาพร พานิช และคณะ, 2550)

ทฤษฎีฟิล์มสองชั้นนี้ได้สมมติว่าในส่วนของก๊าซและของเหลวแต่ละส่วนมีการผสมกันอย่างสมบูรณ์ ก๊าซและของเหลวมีการแยกออกจากกัน โดยมีความสมดุลของการถ่ายเทมวลทั้งเข้าและออก จากภาพที่ 2.3 แสดงให้เห็นว่า ในระบบมีความต้านทานการถ่ายเทขององค์ประกอบ A ที่ทะลุผ่านฟิล์ม 2 ชั้นที่กั้นระหว่างก๊าซและของเหลว ซึ่งทำให้ความเข้มข้นขององค์ประกอบ A จะเปลี่ยนจาก P_{AG} (ความเข้มข้นขององค์ประกอบ A ในเฟสก๊าซ) เป็น P_{AI} (ความเข้มข้นขององค์ประกอบ A ในเฟสก๊าซที่บริเวณใกล้ผิวสัมผัส) ทั้งนี้ความเข้มข้นขององค์ประกอบ A อาจเขียนแทนด้วยความดันย่อยก็ได้ ในทำนองเดียวกัน ความเข้มข้นขององค์ประกอบ A ในของเหลวจะเปลี่ยนจาก C_{AI} (ความเข้มข้นขององค์ประกอบ A ในเฟสของเหลวที่บริเวณใกล้ผิวสัมผัส) เป็น C_{AL} (ความเข้มข้นขององค์ประกอบ A ในเฟสของเหลว)

อัตราการถ่ายเทมวล (ในหน่วยความเข้มข้นต่อเวลา) จะเท่ากับผลคูณระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในเฟสก๊าซ (หรือของเหลว) พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะระหว่างเฟสก๊าซและเฟสของเหลว และความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นขององค์ประกอบ A ในเฟสก๊าซ (หรือของเหลว) กับความเข้มข้นขององค์ประกอบ A ในชั้นฟิล์มก๊าซ (หรือของเหลว) ดังสมการ (2.3) การถ่ายเทในชั้นฟิล์มก๊าซ และสมการ (2.4) การถ่ายเทในชั้นฟิล์มของเหลว

$$R_A = k_{AG} a (p_{AG} - p_{AI}) \quad (2.3)$$

$$R_A = k_{AL} a (C_{AI} - C_{AL}) \quad (2.4)$$

เมื่อ R_A คือ อัตราการถ่ายเทขององค์ประกอบ A, โมลต่อลูกบาศก์เมตร-วินาที
 k_{AG} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทขององค์ประกอบ A ในชั้นฟิล์มก๊าซ, โมลต่อตาราง
 เมตร-ปาสคาล-วินาที
 k_{AL} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทขององค์ประกอบ A ในชั้นฟิล์มของเหลว, เมตรต่อวินาที
 a คือ พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะระหว่างเฟส, ต่อเมตร

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล k_{AG} และ k_{AL} แสดงถึงค่าความสามารถในการถ่ายเท
 ขององค์ประกอบ A ผ่านฟิล์ม 2 ชั้น สมการทั้งสองจะมีความแตกต่างกันในการใช้งาน เนื่องจากไม่
 สามารถวัดค่าความเข้มข้นขององค์ประกอบ A ที่ระหว่างเฟสทั้งสองได้ (p_{AI} และ C_{AI}) จึงได้มีการ
 อธิบายการถ่ายเทมวลที่สถานะสมดุล และมีการรวมค่าความต้านทานของแต่ละฟิล์มที่มีอยู่ทั้งหมด
 เข้าไปด้วย อัตราการดูดซึมจะเป็นดังนี้

$$R_A = K_{AG} a (p_{AG} - p_{A^*}) \quad (2.5)$$

$$R_A = K_{AL} a (C_{A^*} - C_{AL}) \quad (2.6)$$

เมื่อ p_{A^*} คือ ความดันย่อยที่จุดสมดุลขององค์ประกอบ A ในเฟสก๊าซ, ปาสคาล
 C_{A^*} คือ ความเข้มข้นที่จุดสมดุลขององค์ประกอบ A ในเฟสของเหลว, โมลต่อลูกบาศก์เมตร
 K_{AG} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทรวมขององค์ประกอบ A ในเฟสก๊าซ, โมลต่อ
 ตารางเมตร-ปาสคาล-วินาที
 K_{AL} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทรวมขององค์ประกอบ A ในเฟสของเหลว, เมตรต่อวินาที

ที่สถานะสมดุล ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทรวมในเฟสก๊าซและของเหลว (K_{AG} ,
 K_{AL}) มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลย่อยในเฟสก๊าซและของเหลว (k_{AG} , k_{AL}) ดังนี้

$$\frac{1}{K_{AG}} = \frac{1}{k_{AG}} + \frac{H_A}{k_{AL}} \quad (2.7)$$

$$\frac{1}{K_{AL}} = \frac{1}{k_{AG}} + \frac{1}{H_A k_{AG}} \quad (2.8)$$

H_A ซึ่งเป็นค่าคงที่ของเฮนรีขององค์ประกอบ A จากสมการ (2.7) ถ้า H_A มีค่าน้อย
 มาก ซึ่งหมายถึง องค์ประกอบ A ในก๊าซสามารถละลายได้ดีในของเหลว ดังนั้น $K_{AG} \approx k_{AG}$ และการ

ถ่ายเทมวลจะถูกควบคุมด้วยกระบวนการที่เกิดขึ้นในชั้นฟิล์มก๊าซ ในทางตรงกันข้าม จากสมการ (2.8) ถ้า H_A มีค่ามากซึ่งหมายถึง องค์ประกอบ A ในก๊าซสามารถละลายได้น้อยในของเหลวจะมีผลทำให้ $K_{AL} \approx k_{AL}$ นั่นคือ อัตราการถ่ายเทมวลจะถูกควบคุมด้วยชั้นฟิล์มและกระบวนการที่เกิดขึ้นในของเหลว

สำหรับงานวิจัยนี้ คาร์บอนไดออกไซด์มีค่าคงที่ของเฮนรี่สูง ($H_{CO_2} = 2,980$ ปาสคาล-ลูกบาศก์เมตรต่อโมล ที่ 25 องศาเซลเซียส) ดังนั้น อัตราการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์จึงถูกควบคุมด้วยชั้นฟิล์มของเหลว และจากสมการ (2.4) และสมการ (2.6) สามารถรวมสมการได้เป็นสมการ (2.9)

$$R_A = k_{AL} a (C_{A^*} - C_{AL}) \quad (2.9)$$

จากสมการ (2.9) จึงเห็นว่า อัตราการดูดซึม (R_A) ขึ้นกับ

1. ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในเฟสของเหลว (k_{AL})
2. พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะระหว่างเฟสก๊าซและของเหลว (a)
3. ความแตกต่างของความเข้มข้นที่สถานะสมดุลกับในเฟสของเหลว ($C_{A^*} - C_{AL}$)

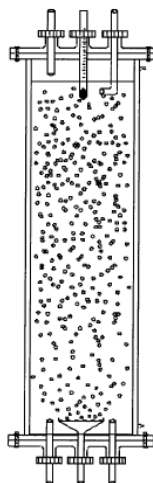
ซึ่งถ้าหากมีการปรับปรุงทั้ง 3 ปัจจัยนี้ จะทำให้อัตราการดูดซึมเพิ่มสูงขึ้น และความเหมาะสมในการปรับปรุงปัจจัยเหล่านี้ ควรคำนึงถึงการเลือกใช้อุปกรณ์ดูดซึมที่เหมาะสม

2.4 อุปกรณ์ในการดูดซึมก๊าซ (Gas Absorber)

วัตถุประสงค์ของการใช้อุปกรณ์ดูดซึม คือ เพื่อให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างเฟสของก๊าซและของเหลว และเกิดการถ่ายเทมวลระหว่างเฟส อัตราการถ่ายเทมวลขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟส และความสามารถในการแพร่ขององค์ประกอบหนึ่งจากก๊าซไปยังของเหลว อุปกรณ์ดูดซึมมีหลายชนิด และอาจแบ่งได้ตามการกระจายของก๊าซและของเหลวในอุปกรณ์ดูดซึม เช่น

2.4.1 คอลัมน์แบบฟองอากาศ (Bubble Column)

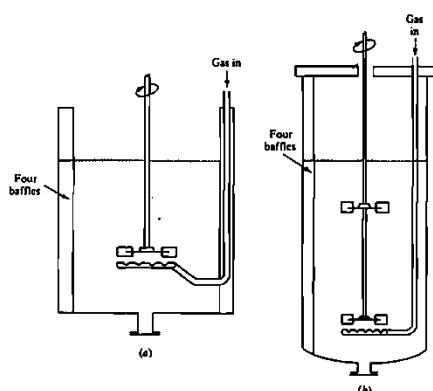
ลักษณะโดยทั่วไปของคอลัมน์แบบฟองอากาศ (Bubble column) แสดงดังภาพที่ 2.4 โดยปกติ ด้านล่างของคอลัมน์ติดตั้งด้วยอุปกรณ์กำเนิดฟองอากาศ (Sparger) ทำหน้าที่แพร่กระจายก๊าซไปในของเหลวในรูปของฟองอากาศ ทำให้เกิดการสัมผัสและถ่ายเทมวลระหว่างฟองอากาศและของเหลว และช่วยทำให้ของเหลวเกิดความปั่นป่วนมากหรือน้อยขึ้นกับอัตราการไหลของก๊าซที่เข้ามายังคอลัมน์



ภาพที่ 2.4 คอลัมน์แบบฟองอากาศ
(ที่มา: Vazquez และคณะ, 2000)

2.4.2 คอลัมน์แบบอาศัยใบกวนทางกล (Mechanically Agitated Vessel)

ลักษณะของคอลัมน์ชนิดนี้เป็นดังภาพที่ 2.5 โดยมีใบกวน (Impeller) ทำให้น้ำเกิดความปั่นป่วนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซึม โดยหลักการทั่วไปคือ ก๊าซจะเข้าทางด้านล่างของใบกวน ก๊าซที่เข้ามาจะสร้างตัวเป็นฟองอากาศ ในบางระบบสามารถเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลวโดยการเพิ่มความสูงของคอลัมน์ และเพิ่มจำนวนของใบกวน เพื่อช่วยในการตีฟองอากาศที่ใหญ่ขึ้นจากการรวมตัวกันเมื่อฟองอากาศลอยสูงขึ้นให้มีขนาดเล็กลง และช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลว

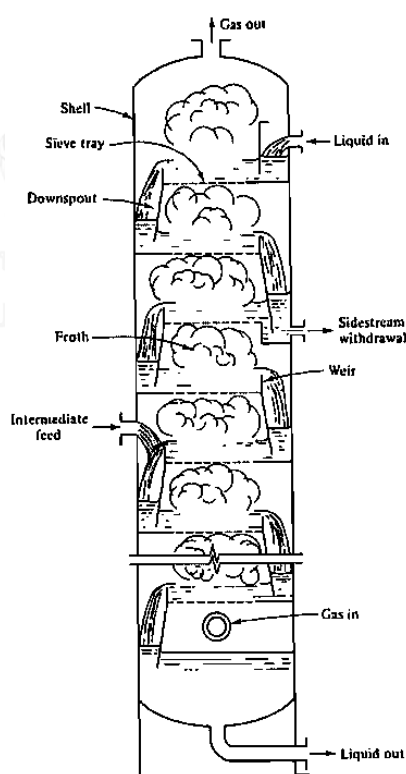


ภาพที่ 2.5 คอลัมน์แบบอาศัยใบกวนทางกล
(ที่มา: Treybel, 1981)

2.4.3 คอลัมน์แบบถาด (Tray Tower)

คอลัมน์แบบถาดนี้ ภายในคอลัมน์มีถาดเป็นชั้นๆ ทำให้เกิดการสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลวเป็นชั้นๆบนถาด ดังภาพที่ 2.6 โดยหลักการทั่วไปคือ ของเหลวเข้าทางด้านบนของคอลัมน์แล้วไหลลงตามแรงโน้มถ่วง โดยของเหลวจะขังอยู่ในถาดแล้วล้นผ่านขอบ (Weir) ไหลลงมายังถาดถัดไปด้านล่างผ่านถาดแต่ละชั้นเป็นลำดับ แล้วไหลออกจากคอลัมน์ทางด้านล่าง ส่วนก๊าซไหลย้อนขึ้นสวนทางกับการไหลของของเหลว ผ่านรูเปิดของแต่ละถาด สร้างตัวเป็นฟองอากาศ (Bubble) ในของเหลว ลอยตัวขึ้นหลุดออกจากชั้นของเหลวเป็นฟองอิสระ (Froth) แล้วหลุดจากฟองอิสระไปยังถาดชั้นถัดไปด้านบน จนกระทั่งถึงชั้นบนสุดแล้วออกจากคอลัมน์

ประสิทธิภาพการดูดซึมขึ้นกับระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างก๊าซกับของเหลว พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซกับของเหลว และความปั่นป่วนของของเหลว ดังนั้นคอลัมน์ที่มีประสิทธิภาพสูงจึงควรมีระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างก๊าซกับของเหลวที่นาน ของเหลวที่ขังอยู่ในแต่ละชั้นควรมีความลึก เพื่อให้ฟองอากาศใช้เวลาในการลอยขึ้นจนหลุดพ้นชั้นของของเหลว และอัตราการไหลของก๊าซสูงๆ ทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก และเกิดความปั่นป่วนในของเหลวสูง

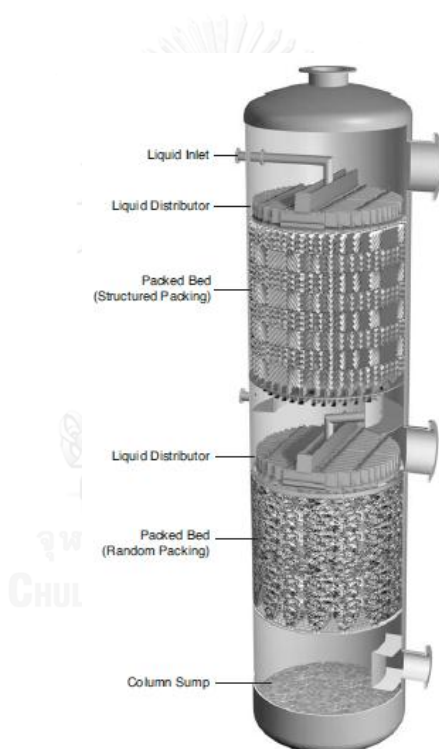


ภาพที่ 2.6 คอลัมน์แบบถาด

(ที่มา: Treybel, 1981)

2.4.4 คอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง (Packed Tower)

คอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง ดังภาพที่ 2.7 เป็นระบบดูดซึมแบบพื้นฐานที่นำมาใช้สำหรับการดูดซึมก๊าซ โดยในคอลัมน์จะมีการสเปรย์ของเหลวจากด้านบนเหนือชั้นของตัวกลาง (Packing materials) ซึ่งทำหน้าที่ทำให้เกิดพื้นที่ผิวสำหรับให้ก๊าซและของเหลวมีการสัมผัสกันอย่างต่อเนื่อง ก๊าซจะเข้ามาทางด้านล่างของคอลัมน์ และไหลขึ้นผ่านชั้นของตัวกลาง ส่วนของเหลวที่เป็นสารดูดซึมจะถูกป้อนเข้าทางด้านบนของชั้นของตัวกลางโดยวิธีการสเปรย์ และไหลลงผ่านชั้นของตัวกลาง ในทางทฤษฎี วิธีนี้จะให้เกิดประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดถ้าสามารถกระจายสารดูดซึมให้ทั่วคอลัมน์ให้มากที่สุด เพื่อให้ก๊าซสัมผัสกับของเหลวที่เป็นตัวดูดซึมให้มากที่สุด โดยกระบวนการทั้งหมดเกิดในหอที่มีความสูงเพียงพอ



ภาพที่ 2.7 คอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง

(ที่มา: Green และ Perry, 2007)

นอกจากนี้แล้วยังมีอุปกรณ์ในแบบต่างๆอีกที่ใช้ในการดูดซึมก๊าซ และจากสมการ (2.9) เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยที่สามารถเพิ่มอัตราการดูดซึม อาจพิจารณาได้ว่า คอลัมน์แบบฟองอากาศเป็นอุปกรณ์ที่สามารถปรับปรุงปัจจัยต่างๆเหล่านั้นได้สะดวก ทั้งการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในเฟสของเหลว การเพิ่มความสามารถในการละลายของก๊าซในของเหลวโดยการปรับปรุงสมบัติของ

ของเหลว การเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟส โดยการสร้างฟองอากาศขนาดเล็กและอาจใช้ตัวกลางของแข็งแขวนลอยในอุปกรณ์ อีกทั้งคอลัมน์แบบฟองอากาศยังเป็นอุปกรณ์ที่ไม่มีความซับซ้อนในการใช้งาน การออกแบบ และการบำรุงรักษา

2.5 คอลัมน์แบบฟองอากาศ (Bubble Column)

คอลัมน์แบบฟองอากาศ เป็นอุปกรณ์สร้างการสัมผัสหลายสถานะ (Multiphase contactor) มักมีลักษณะเป็นหอทรงกระบอก ด้านล่างมีหัวกำเนิดฟองอากาศ ก๊าซจะสร้างตัวเป็นฟองอากาศอยู่ในของเหลว (Liquid phase) หรือในของเหลวที่มีของแข็งแขวนลอย (Liquid-solid suspension) นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมชีวเคมี อุตสาหกรรมปิโตรเคมี เป็นต้น มีข้อดีคือ ใช้งานและดูแลรักษาได้ง่าย มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลได้ดี

การออกแบบคอลัมน์แบบฟองอากาศที่คำนึงถึงประสิทธิภาพและอัตราการดูดซึม ควรพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆ ได้แก่ พลศาสตร์ของเหลว (Fluid dynamic) สัดส่วนก๊าซ (Gas holdup) ลักษณะของฟองอากาศ (Bubble characteristic) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (Mass transfer coefficient) เป็นต้น (Kantarci และคณะ, 2005)

2.5.1 พลศาสตร์ของไหล (Fluid dynamic)

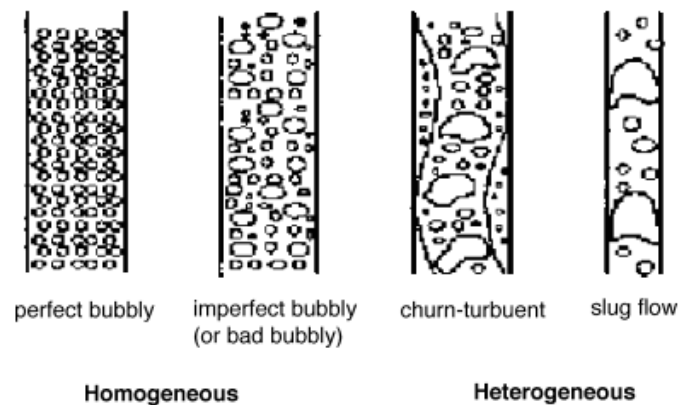
พลศาสตร์ของไหลส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของคอลัมน์แบบฟองอากาศ โดยขึ้นอยู่กับระบบการไหล (Flow regime) ในคอลัมน์ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ ขึ้นกับขนาดของคอลัมน์และความเร็วก๊าซ (Superficial gas velocity) ได้แก่

1. Homogeneous หรือ Bubbly flow regime
2. Heterogeneous หรือ Churn-turbulent regime
3. Slug flow regime

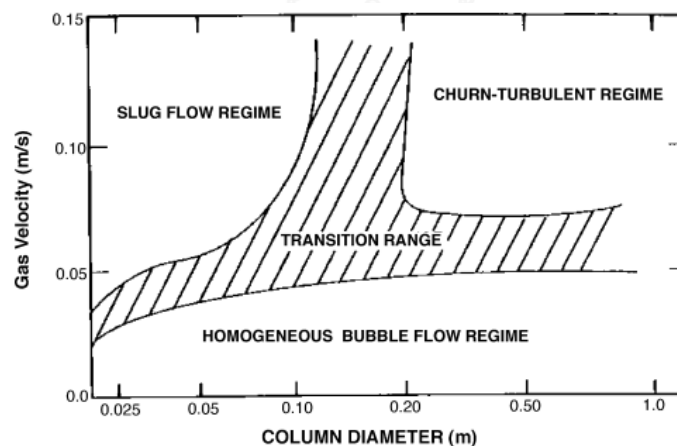
ระบบการไหลแบบ Bubbly flow regime เกิดขึ้นเมื่อความเร็วก๊าซต่ำ หรือน้อยกว่า 5 เซนติเมตรต่อวินาที ฟองอากาศจะมีขนาดเล็กสม่ำเสมอ ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศสม่ำเสมอ มักไม่เกิดการรวมตัวหรือแตกตัวของฟองอากาศ ทำให้ขนาดของฟองอากาศคงที่ตามขนาดของหัวกำเนิดฟองอากาศ

ระบบการไหลแบบ Churn-turbulent regime เกิดขึ้นเมื่อความเร็วก๊าซสูง หรือมากกว่า 5 เซนติเมตรต่อวินาที เกิดความปั่นป่วนในของเหลว เนื่องจากการเคลื่อนที่อย่างรุนแรงของฟองอากาศ และการไหลเวียนของของเหลว เกิดรูปแบบการไหลที่ไม่คงตัว (Unsteady flow

pattern) มีการรวมตัวของฟองอากาศทำให้เกิดฟองอากาศขนาดใหญ่ ในขณะที่เดียวกันก็เกิดการแตกตัวของฟองอากาศเกิดเป็นฟองอากาศขนาดเล็ก ทำให้ในระบบมีขนาดฟองอากาศที่แตกต่างกัน ประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลอาจต่ำกว่าแบบ Bubbly flow regime แต่โดยส่วนมากในระดับอุตสาหกรรมยังคงเป็นแบบ Churn-turbulent regime เนื่องจากต้องการอัตราการไหลของก๊าซสูง ระบบการไหลแบบ Slug flow regime เป็นระบบการไหลในคอลัมน์ขนาดเล็กในระดับห้องปฏิบัติการ มักมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 15 เซนติเมตร และมีอัตราการไหลของก๊าซสูง



ภาพที่ 2.8 ระบบการไหลแบบต่างๆในคอลัมน์แบบฟองอากาศ
(ที่มา: Kantarci และคณะ, 2005)



ภาพที่ 2.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระบบการไหลแบบต่างๆในคอลัมน์แบบฟองอากาศ
กับความเร็วก๊าซและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์
(ที่มา: Kantarci และคณะ, 2005)

2.5.2 สັดส่วนก๊าซ (Gas holdup)

สັดส่วนก๊าซ หรือที่นิยมเรียกว่า Gas holdup เป็นตัวแปรไร้หน่วยที่สำคัญที่ใช้สำหรับการออกแบบระบบของคอลัมน์ สັดส่วนก๊าซ คือ สັดส่วนโดยปริมาตรของฟองอากาศในระบบดูดซึม ทำให้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความดันในระบบดูดซึม และการไหลเวียนของของเหลวในระบบ ส่งผลต่อเนื่องมาถึงการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลของระบบ จึงมีงานวิจัยหลายงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับสັดส่วนก๊าซ และพบว่าถ้าเป็นระบบดูดซึมในของเหลว (Two-phase bubble column) หรือระบบดูดซึมในของเหลวที่มีของแข็ง (Three-phase bubble column) สັดส่วนก๊าซจะขึ้นอยู่กับความเร็วก๊าซ สมบัติของของเหลว ขนาดของคอลัมน์ อุณหภูมิและความดันของระบบ ลักษณะของหัวกำเนิดฟองอากาศ และสมบัติของของแข็ง เป็นต้น

2.5.3 ลักษณะของฟองอากาศ (Bubble characteristic)

ลักษณะของฟองอากาศ ได้แก่ ขนาดฟองอากาศ และความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ จะส่งผลต่อความสามารถในการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลในคอลัมน์แบบฟองอากาศ จึงมีงานวิจัยหลายงานที่ศึกษาลักษณะของฟองอากาศในคอลัมน์แบบฟองอากาศ และพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะของฟองอากาศ ได้แก่ ความเร็วก๊าซ สมบัติของของเหลว ลักษณะของหัวกำเนิดฟองอากาศ อุณหภูมิและความดันของระบบ และขนาดของคอลัมน์ เป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้ทำให้เกิดขนาดฟองอากาศ และความเร็วลอยตัวของฟองอากาศที่แตกต่างกัน

2.5.4 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (Mass transfer coefficient)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล คือ อัตราการถ่ายเทมวลทั้งหมดต่อหน่วยปริมาตร โดยปกติค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม (Volumetric mass transfer coefficient) หมายถึง การถ่ายเทมวลในก๊าซและในของเหลวมรวมกัน แต่ในคอลัมน์แบบฟองอากาศ จะหมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมในของเหลว (Liquid-side mass transfer coefficient, $k_L a$) เนื่องจากความต้านทานในของเหลวเป็นตัวควบคุมการถ่ายเทมวล (ตามหัวข้อ 2.3.3 กลไกการดูดซึม)

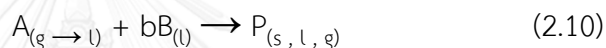
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม หรือ $k_L a$ ประกอบด้วยตัวแปร 2 ตัวคูณกัน คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในของเหลว (Liquid mass transfer coefficient, k_L) และพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (Specific interfacial area, a) ซึ่งการแบ่งตัวแปรทั้งสองนี้ออกจากกันจะทำให้เข้าใจกลไกของการดูดซึมได้ว่า ตัวแปรใดเป็นตัวที่ควบคุมกระบวนการดูดซึมปัจจัยต่างๆ เช่น ความเร็วก๊าซ สมบัติของของเหลว ปริมาณของของแข็ง สมบัติของฟองอากาศ ขนาดของคอลัมน์ ลักษณะของหัวกำเนิดฟองอากาศ และอุณหภูมิและความดันของระบบ เป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม

ในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาการเพิ่มอัตราการดูดซึมก๊าซ ซึ่งสามารถทำได้โดยการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลขององค์ประกอบของก๊าซในของเหลว การเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟส ก๊าซและของเหลว และการเพิ่มความสามารถในการละลายของก๊าซในของเหลว ตามสมการ (2.9) ซึ่งอาจทำได้โดยใช้กระบวนการดูดซึมทางเคมี และการใช้ตัวกลางของแข็ง

2.6 กระบวนการดูดซึมทางเคมี (Chemical Absorption)

2.6.1 ความรู้เบื้องต้น

การดูดซึมทางเคมี คือ การดูดซึมก๊าซในของเหลวโดยมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นร่วมด้วย เพื่อเร่งอัตราการดูดซึม (Absorption rate) และเพิ่มความสามารถในการดูดซึม (Absorption capacity) โดยกระบวนการเคมีที่เกิดขึ้นสามารถเขียนเป็นสมการทางเคมีได้ดังนี้



โดยที่ A คือ องค์ประกอบที่อยู่ในเฟสก๊าซ และสามารถละลายในของเหลวได้ตามกฎของเฮนรี ส่วน B คือ องค์ประกอบที่อยู่ในเฟสของเหลว และไม่สามารถถ่ายเทไปยังเฟสก๊าซได้ และ P คือ ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาเคมี เกิดขึ้นได้ทั้งในสถานะของแข็ง (s) ของเหลว (l) หรือก๊าซ (g) ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในของเหลวอาจเกิดใกล้ผิวสัมผัสระหว่างเฟส (Interface) หรือในฟิล์มของเหลว (Liquid film) หรือในชั้นของเหลว (Liquid bulk) และอัตราการเกิดปฏิกิริยาแสดงดังสมการ (2.11)

$$r_A = \frac{r_B}{b} = kC_A C_B \quad (2.11)$$

เมื่อ r_A คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาขององค์ประกอบ A, โมลต่อลูกบาศก์เมตร-วินาที

r_B คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาขององค์ประกอบ B, โมลต่อลูกบาศก์เมตร-วินาที

b คือ จำนวนโมลขององค์ประกอบ B, ไม่มีหน่วย

k คือ ค่าคงที่ปฏิกิริยา, ลูกบาศก์เมตรต่อโมล-วินาที

C_A คือ ความเข้มข้นขององค์ประกอบ A ในของเหลวก่อนทำปฏิกิริยา, โมลต่อลูกบาศก์เมตร

C_B คือ ความเข้มข้นขององค์ประกอบ B ในของเหลวก่อนทำปฏิกิริยา, โมลต่อลูกบาศก์เมตร

จากการดูซึมทางกายภาพ หรือแบบไม่มีปฏิกิริยาเคมี สามารถเขียนสมการของอัตราการดูซึมในเฟสก๊าซและเฟสของเหลวได้ดังสมการ (2.12)

$$R_A = k_{Ag}a(p_A - p_{Ai}) = k_{Al}a(C_{Ai} - C_A) \quad (2.12)$$

เมื่อ R_A คือ อัตราการดูซึมขององค์ประกอบ A, โมลต่อลูกบาศก์เมตร-วินาที
 k_{Ag} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทขององค์ประกอบ A ในชั้นฟิล์มก๊าซ, โมลต่อตารางเมตร-ปาสคาล-วินาที

k_{Al} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทขององค์ประกอบ A ในชั้นฟิล์มของเหลว, เมตรต่อวินาที

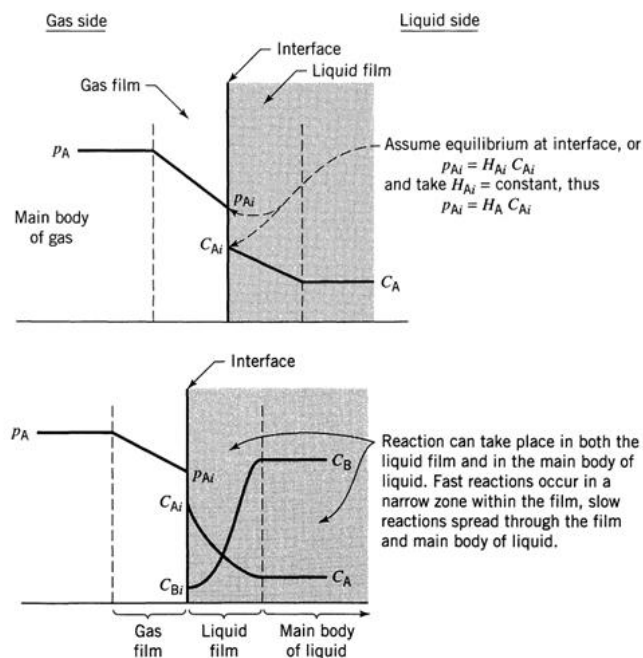
a คือ พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะระหว่างก๊าซและของเหลว, ต่อเมตร

p_A คือ ความดันย่อยขององค์ประกอบ A ในเฟสก๊าซ, ปาสคาล

p_{Ai} คือ ความดันย่อยขององค์ประกอบ A ในเฟสก๊าซที่บริเวณใกล้ผิวสัมผัส, ปาสคาล

C_A คือ ความเข้มข้นขององค์ประกอบ A ในเฟสของเหลว, โมลต่อลูกบาศก์เมตร

C_{Ai} คือ ความเข้มข้นขององค์ประกอบ A ในเฟสของเหลวที่บริเวณใกล้ผิวสัมผัส, โมลต่อลูกบาศก์เมตร

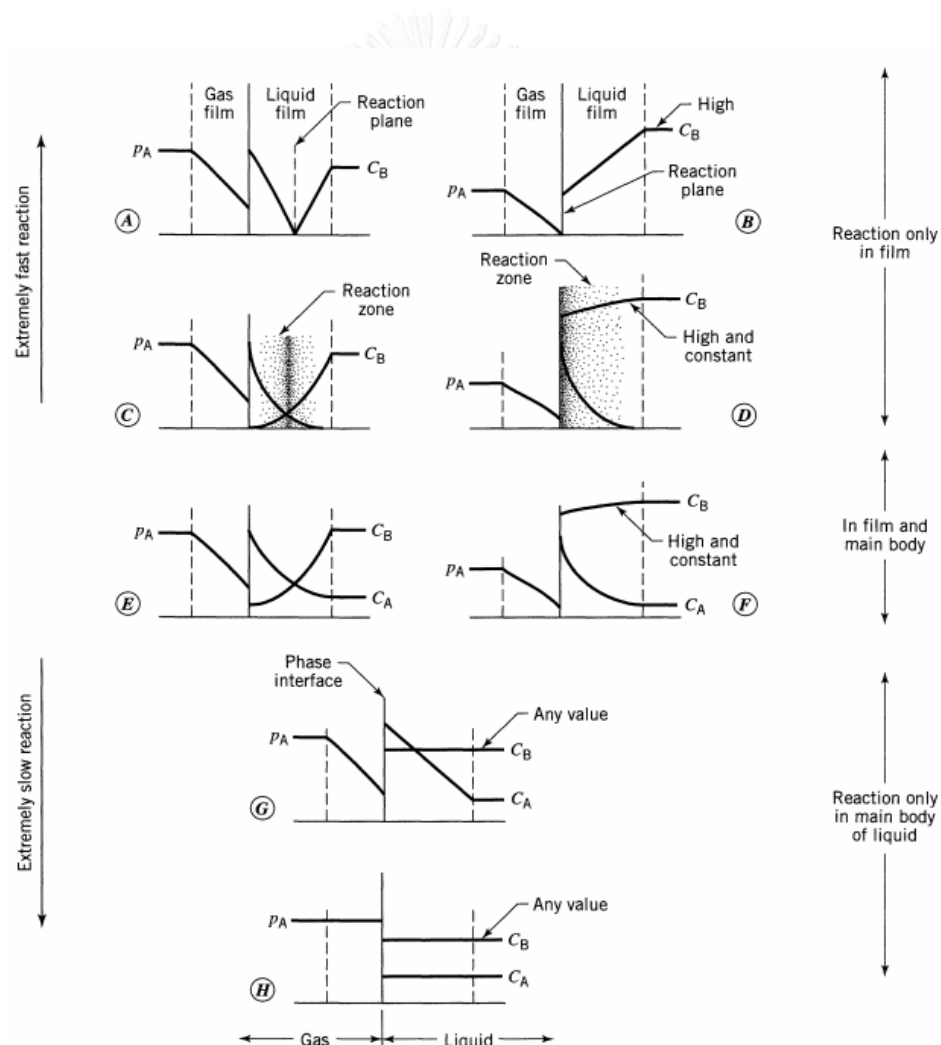


ภาพที่ 2.10 ทฤษฎีฟิล์ม 2 ชั้นเปรียบเทียบระหว่างการดูซึมทางกายภาพ (บน)

และการดูซึมทางเคมี (ล่าง) (ที่มา: Levenspiel, 1999)

รูปแบบการดูดซึมทางเคมี มีทั้งหมด 8 รูปแบบ (ภาพที่ 2.11) ดังนี้

- A. การดูดซึมที่ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นทันที และมีความเข้มข้นขององค์ประกอบ B ต่ำ
- B. การดูดซึมที่ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นทันที และมีความเข้มข้นขององค์ประกอบ B สูง
- C. การดูดซึมที่ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นเร็วในฟิล์มของเหลว และมีความเข้มข้นขององค์ประกอบ B ต่ำ
- D. การดูดซึมที่ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นเร็วในฟิล์มของเหลว และมีความเข้มข้นขององค์ประกอบ B สูง
- E. การดูดซึมที่ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นค่อนข้างเร็ว และมีความเข้มข้นขององค์ประกอบ B ต่ำ
- F. การดูดซึมที่ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นค่อนข้างเร็ว และมีความเข้มข้นขององค์ประกอบ B สูง
- G. การดูดซึมที่ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นช้า และมีความต้านทานของฟิล์มของเหลว
- H. การดูดซึมที่ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นช้า และไม่มี ความต้านทานของฟิล์มของเหลว



ภาพที่ 2.11 รูปแบบการดูดซึมทางเคมี 8 รูปแบบ (ที่มา: Levenspiel, 1999)

จากสมการ (2.12) และสมการกฎของเฮนรีที่ผิวสัมผัส (สมการ (2.2)) สามารถรวมสมการได้เป็น

$$R_A = \frac{1}{\frac{1}{k_{Ag}a} + \frac{H_A}{k_{Al}a}} (p_A - H_A C_A) \quad (2.13)$$

ส่วนการดูดซึมทางเคมี หรือแบบมีปฏิกิริยาเคมีร่วมด้วย สามารถเขียนสมการของอัตราการดูดซึมในเฟสก๊าซและเฟสของเหลว และปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นได้ดังสมการ (2.14)

$$R_A = k_{Ag}a(p_A - p_{A_i}) = Ek_{Al}a(C_{A_i} - C_A) = kC_A C_B \quad (2.14)$$

เมื่อ $E = \text{Liquid Film Enhancement Factor}$

และจากสมการ (2.14) และสมการกฎของเฮนรีที่ผิวสัมผัส (สมการ (2.2)) สามารถรวมสมการได้เป็น

$$R_A = \frac{1}{\frac{1}{k_{Ag}a} + \frac{H_A}{k_{Al}aE} + \frac{H_A}{kC_B}} p_A \quad (2.15)$$

ทั้งนี้ Liquid film enhancement factor หรือ E คือ สัดส่วนระหว่างอัตราการถ่ายเทมวลที่มีปฏิกิริยาเคมีต่ออัตราการถ่ายเทมวลที่ไม่มีปฏิกิริยาเคมี ซึ่งบอกว่าระบบมีความเร็วในการดูดซึมเพิ่มขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีหรือไม่ โดยที่ค่า E จะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1 เสมอ (ค่า $E = 1$ แสดงว่าปฏิกิริยาเคมีไม่ส่งผลต่ออัตราการดูดซึม แต่ถ้าค่า $E > 1$ แสดงว่าปฏิกิริยาเคมีทำให้อัตราการดูดซึมสูงขึ้น) สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.16)

$$E = \frac{\text{อัตราการถ่ายเทมวลขององค์ประกอบ A ที่มีปฏิกิริยาเคมี}}{\text{อัตราการถ่ายเทมวลขององค์ประกอบ A ที่ไม่มีปฏิกิริยาเคมี}} \quad (2.16)$$

การที่จะบอกได้ว่าปฏิกิริยาเกิดขึ้นเร็วหรือช้า สามารถบอกได้ด้วย Hatta number ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 กรณี ได้แก่

1. ถ้า $M_H > 2$ แสดงว่าปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นเร็วถึงเร็วมาก รูปแบบการดูดซึมทางเคมีในกรณีนี้ ได้แก่ รูป A B C และ D ในภาพที่ 2.11
2. ถ้า $0.02 < M_H < 2$ แสดงว่าปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นช้าถึงค่อนข้างเร็ว รูปแบบการดูดซึมทางเคมีในกรณีนี้ ได้แก่ รูป E F และ G ในภาพที่ 2.11
3. ถ้า $M_H < 0.02$ แสดงว่าปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นช้า รูปแบบการดูดซึมทางเคมีในกรณีนี้ ได้แก่ รูป H ในภาพที่ 2.11

ทั้งนี้ Hatta number สามารถคำนวณด้วยสมการ (2.17)

$$M_H = \frac{\sqrt{k_C D_A}}{k_{Al}} = \frac{\sqrt{k_1 D_A}}{k_{Al}} \quad (2.17)$$

เมื่อ k_1 คือ ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน, ต่อวินาที

D_A คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ขององค์ประกอบ A ในของเหลว, ตารางเมตรต่อวินาที

2.6.2 การเลือกใช้ของเหลวดูดซึม

การเลือกใช้ของเหลวดูดซึม (Absorbent) หรือตัวทำละลาย (Solvent) ในการดูดซึมก๊าซ ควรคำนึงถึงความสามารถในการละลาย (Solubility) ขององค์ประกอบของก๊าซในของเหลวดูดซึม และสมบัติที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างองค์ประกอบของก๊าซกับของเหลวดูดซึม เช่น ในกรณีที่องค์ประกอบของก๊าซที่ต้องการดูดซึม คือ คาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมีฤทธิ์เป็นกรด จึงควรเลือกใช้ของเหลวดูดซึมที่มีฤทธิ์เป็นด่าง เพื่อช่วยปรับสภาพความเป็นกรดและต่างระหว่างกระบวนการดูดซึม และช่วยให้สามารถดูดซึมได้มากขึ้น นอกจากนี้ควรเลือกใช้ของเหลวดูดซึมที่ดูดซึมได้เร็ว ใช้พลังงานในการฟื้นฟูสภาพต่ำ สลายตัวช้า ราคาถูก และไม่ทำให้เกิดการกัดกร่อน เป็นต้น (Devries, 2014)

ของเหลวดูดซึมที่นิยมเลือกใช้ในกระบวนการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ ได้แก่ สารละลายเอมีน (Amine) แอมโมเนียเหลว (Aqua ammonia) สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate) เป็นต้น (Spigarelli และ Kawatra, 2013)

2.6.2.1 การดูดซึมด้วยสารละลายเอมีน (Amine absorption)

สารละลายเอมีน ได้แก่ โมโนเอทานอลามีน (Monoethanolamine : MEA) ไดเอทานอลามีน (Diethanolamine : DEA) และเมทิลไดเอทานอลามีน (Methyl diethanolamine : MDEA) เป็นต้น ซึ่งโมโนเอทานอลามีนเป็นที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากมีราคาถูกที่สุด และมีข้อดีใน

การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ใช้จริงในอุตสาหกรรมกันอย่างคุ้นเคย แต่กลับมีข้อเสียตรงที่มีกำลังการดูดซึมต่ำ (ประมาณ 0.40 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ ต่อกิโลกรัมโมโนเอทานอลามีน) ของเหลวดูดซึมไม่สามารถฟื้นฟูสภาพได้หมด ใช้พลังงานสูงในกระบวนการฟื้นฟูสภาพ ทำให้เกิดการกัดกร่อนของอุปกรณ์ เกิดการสลายของสารละลายเอมีนจากสารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) สารประกอบซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO_x) ออกซิเจน และฝุ่นละออง เป็นต้น

2.6.2.2 การดูดซึมด้วยแอมโมเนียเหลว (Aqua ammonia absorption)

แอมโมเนียเหลวมีข้อดี คือ สามารถดูดซึมก๊าซได้หลายชนิด สามารถกำจัดสารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) สารประกอบซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO_x) และคาร์บอนไดออกไซด์ได้ในเวลาเดียวกัน มีกำลังการดูดซึมสูง (ประมาณ 1.20 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ ต่อกิโลกรัมแอมโมเนีย) ไม่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของอุปกรณ์ ไม่เกิดการสลายตัวของของเหลวดูดซึมจากกระบวนการออกซิเดชัน สารประกอบที่ได้จากกระบวนการ เช่น แอมโมเนียมไนเตรต และแอมโมเนียมซัลเฟต สามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยได้ แต่ก็มีข้อเสีย คือ อุปกรณ์อาจเกิดการอุดตัน เนื่องจากเกิดของแข็งในกระบวนการดูดซึม และเกิดการสูญเสียแอมโมเนียสูงเนื่องจากการระเหย

2.6.2.3 การดูดซึมด้วยสารละลายคาร์บอเนต (Carbonate absorption)

สารละลายคาร์บอเนตมีข้อดี คือ สามารถดูดซึมก๊าซได้หลายชนิด ไม่เป็นอันตรายและไม่ระเหยง่าย ไม่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของอุปกรณ์ ไม่ทำให้อุปกรณ์อุดตัน มีราคาถูก ส่วนข้อเสียคือ มีอัตราการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในเกณฑ์ต่ำ อุปกรณ์จึงมักเป็นคอลัมน์ที่มีความสูง

จากการพิจารณาของเหลวดูดซึมชนิดต่างๆ สำหรับงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตในการดูดซึมทางเคมีเพื่อดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากมีข้อได้เปรียบกว่าของเหลวดูดซึมชนิดอื่นๆ เช่น ไม่ระเหยและสลายตัวง่าย ไม่ทำให้อุปกรณ์เสียหาย และปลอดภัยต่อการใช้งาน แต่ถึงอย่างไรก็ตามยังคงมีข้อเสียเปรียบตรงที่มีอัตราการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ ทั้งนี้ ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อช่วยเพิ่มอัตราการดูดซึมได้

2.6.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Promoter)

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมเติมในสารละลายคาร์บอเนตสำหรับดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ อาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภท (Shen และคณะ, 2013) ได้แก่

2.6.3.1 เกลืออนินทรีย์ (Inorganic salt)

เกลืออนินทรีย์ เช่น สารประกอบอาร์ซีเนต (Arsenate) วานาเดต (Vanadate) บอเรต (Borate) และซิลิเกต (Silicate) เป็นต้น ข้อดีของเกลืออนินทรีย์ คือ ระเหยและสลายตัวได้ยาก และในบรรดาเกลืออนินทรีย์ชนิดต่างๆเมื่อเติมในสารละลายคาร์บอเนต พบว่า สารประกอบอาร์

ซิเนตมีประสิทธิภาพในการเร่งกระบวนการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุด แต่กลับมีข้อเสีย คือ มีความเป็นพิษสูงและเป็นสารก่อมะเร็ง จึงมีข้อจำกัดในการนำไปใช้ในเชิงการค้า

2.6.3.2 เอนไซม์ชีวภาพ (Biological enzyme)

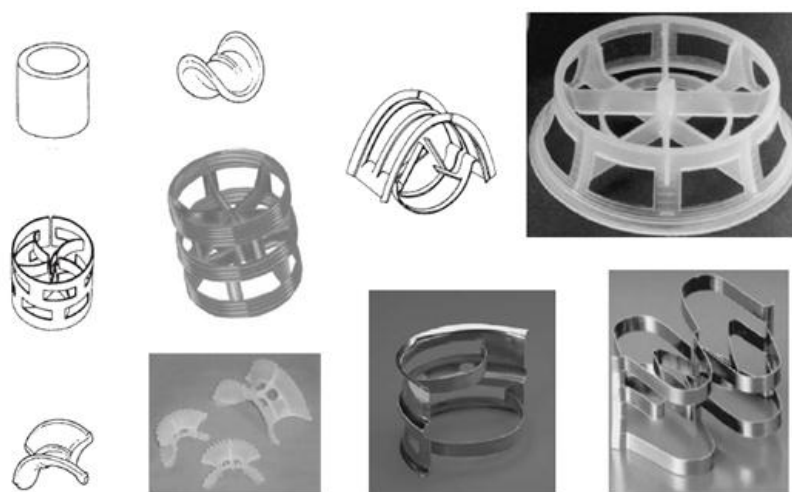
เอนไซม์ชีวภาพที่นิยมใช้สำหรับเร่งการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ เช่น คาร์บอนิกแอนไฮเดรส (Carbonic anhydrase : CA) และไพเปอราซีน (Piperazine : PZ) ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดนี้ช่วยเร่งอัตราดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลายคาร์บอนเนตได้ แต่สำหรับการนำคาร์บอนิกแอนไฮเดรสไปใช้พบว่า ยังต้องมีการศึกษาเรื่องความเสถียรและประสิทธิภาพในการคืนสภาพมากกว่านี้ ส่วนไพเปอราซีนสามารถระเหยและสลายตัวได้ง่าย ใช้พลังงานสูง มีฤทธิ์กัดกร่อน และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

2.6.3.3 เกลืออินทรีย์ (Organic salt)

เกลืออินทรีย์ เช่น เกลือของกรดอะมิโนชนิดต่างๆ ได้แก่ ไกลซีน (Glycine) แอลอาร์จินีน (L-arginine) แอลโพรลีน (L-proline) ซาร์โคซีน (Sarcosine) เป็นต้น เกลืออินทรีย์ช่วยเร่งอัตราการดูดซึมได้ และยังมีข้อดีต่างๆ เช่น เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ระเหยและสลายตัวได้ยาก เป็นต้น

2.7 ตัวกลางของแข็ง

ตัวกลางมีความสำคัญของระบบดูดซึม ในการทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสในระบบการดูดซึม ภาพที่ 2.12 แสดงรูปร่างของตัวกลางแบบต่างๆ วัสดุที่ใช้ทั่วไปอาจทำจากกระเบื้อง หรือจากพลาสติกทนความร้อนที่มีความหนาแน่นสูงจำพวกพอลิเอทิลีน (PE) พอลิโพรไพลีน (PP) หรืออาจเป็นวัสดุอื่นๆ



ภาพที่ 2.12 รูปร่างของตัวกลางแบบต่างๆ (ที่มา: Green และ Perry, 2007)

การเลือกตัวกลางควรพิจารณาจากลักษณะของก๊าซที่เข้าระบบ รูปแบบหรือทิศทางของการไหลเข้าสัมผัส ขนาดของคอลัมน์ และของเหลวดูดซึมที่ใช้ และที่สำคัญคือ พื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรของตัวกลางจะต้องมากพอเพื่อใช้สำหรับการเคลื่อนตัวของก๊าซสู่ของเหลวดูดซึม และความดันลด (Pressure drop) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับช่องว่างในคอลัมน์หลังเติมตัวกลางแล้ว จะต้องไม่สูงมาก ปกติขนาดของตัวกลางที่ใหญ่กว่ามักจะทำให้เกิดค่าความดันลดที่น้อยกว่า

ตัวกลางอาจจะถูกจัดเรียงในคอลัมน์ได้ 2 แบบ คือ แบบไม่เป็นระเบียบ (Random) และแบบเป็นระเบียบ (Systematic) การจัดเรียงแบบไม่เป็นระเบียบนั้นให้พื้นที่ผิวที่มากกว่าแต่ทำให้เกิดความดันลดสูงกว่าการจัดเรียงแบบเป็นระเบียบ นอกจากการจัดเรียงแบบเป็นระเบียบจะทำให้เกิดความดันลดน้อยลงแล้ว ยังทำให้เกิดการกระจายตัวของของเหลวบนพื้นผิวของตัวกลางดีกว่าด้วย ทั้งนี้การจัดเรียงตัวกลางแบบเป็นระเบียบมักไม่ใช้กับระบบใหญ่ๆ ยกเว้นในกรณีต้องการอัตราการไหลสูงๆ

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการดูดซึมโดยใช้ตัวกลาง

Moustiri และคณะ (2002) ได้ศึกษาผลกระทบของตัวกลางของแข็งที่มีผลต่อตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ เช่น สัดส่วนก๊าซ (\mathcal{E}_g) และขนาดฟองอากาศ (d_b) ในคอลัมน์แบบฟองอากาศ โดยได้สรุปไว้ว่า การใช้ตัวกลางจะทำให้เกิดการหน่วงระบบการไหล (Flow regime) และสามารถคงระบบการไหลให้อยู่ในแบบ Homogeneous regime ได้แม้เมื่อมีความเร็วก๊าซสูง

งานวิจัยนี้ทำการทดลองโดยมีเฟสก๊าซเป็นอากาศ และเฟสของเหลวเป็นน้ำประปา ตัวกลางที่ใช้เป็นลวดสแตนเลสทำให้มีขนาดช่องว่างประมาณ 12.5 มิลลิเมตร ทดลองที่ความเร็วก๊าซในช่วง 0.52 – 5.5 เซนติเมตรต่อวินาที และผลการวิจัยพบว่า

1. สัดส่วนก๊าซ (\mathcal{E}_g) มีค่ามากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มความเร็วก๊าซ (V_g) ทั้งในระบบที่มีและไม่มีตัวกลาง โดยที่ความเร็วก๊าซต่ำ (น้อยกว่า 1 เซนติเมตรต่อวินาที) ตัวกลางจะทำให้สัดส่วนก๊าซลดลงเล็กน้อย เนื่องจากตัวกลางทำให้เกิดช่องว่างในการเคลื่อนที่ของฟองอากาศ ส่งผลให้ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (U_b) สูงขึ้น ฟองอากาศในคอลัมน์จึงน้อยลงและสัดส่วนก๊าซลดลง ในขณะที่ความเร็วก๊าซสูง (มากกว่า 1 เซนติเมตรต่อวินาที) ตัวกลางจะทำหน้าที่ขัดขวางการลอยตัวของฟองอากาศ ทำให้ฟองอากาศใช้เวลาลอยตัวนานในคอลัมน์ ส่งผลให้สัดส่วนก๊าซสูง

2. ในระบบที่ไม่มีตัวกลาง ช่วงของการเปลี่ยนระบบการไหลจาก Homogeneous เป็น Heterogeneous อยู่ที่ความเร็วก๊าซประมาณ 4 เซนติเมตรต่อวินาที แต่ในระบบที่มีตัวกลางพบว่าเกิดการเปลี่ยนระบบการไหลที่ความเร็วก๊าซประมาณ 6 เซนติเมตรต่อวินาที

3. ตัวกลางจะทำให้ขนาดของของฟองอากาศเล็กลง เนื่องจากเมื่อฟองอากาศลอยขึ้นชนกับตัวกลาง ฟองอากาศจะแตกตัวออกกลายเป็นฟองขนาดเล็ก

Bhatia และคณะ (2004) ก็ได้ทำการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับงานวิจัยของ Moustiri และคณะ (2002) แต่เพิ่มเติมเรื่องผลกระทบของตัวกลางที่มีผลต่อการถ่ายเทมวล ซึ่งผลการวิจัยพบว่า

1. ตัวกลางช่วยถ่วงเวลาลอยตัวของฟองอากาศ ส่งผลให้สัดส่วนก๊าซสูง
2. พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (a) ในระบบที่มีตัวกลาง จะมากกว่าในระบบที่ไม่มีตัวกลาง
3. ตัวกลางแทบไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทมวลรวม ($k_L a$) ในงานวิจัยนี้

Maldonado และคณะ (2008) ได้วิจัยเกี่ยวกับการใช้ตัวกลางลักษณะต่างๆ เพื่อศึกษาผลกระทบที่มีต่อตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์และการถ่ายเทมวล โดยทดลองการดูดซึมออกซิเจนด้วยน้ำประปาในคอลัมน์แบบฟองอากาศ โดยใช้ตัวกลางที่ใช้มีลักษณะดังตารางที่ 2.6 และผลการวิจัยพบว่า

1. สัดส่วนก๊าซเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วก๊าซสูงขึ้นในทุกชนิดตัวกลาง แต่สัดส่วนก๊าซก็จะลดลงเมื่อใช้ตัวกลางที่มีความพรุนมากขึ้นหรือมีขนาดใหญ่ขึ้น เหตุผลก็คือ ความพรุนและขนาดของตัวกลางทำให้เกิดพื้นที่สัมผัสระหว่างฟองอากาศและตัวกลาง เกิดแรงดึงผิวดังภาพที่ 2.13 ซึ่งเมื่อความพรุนต่ำ พื้นที่สัมผัสระหว่างฟองอากาศและตัวกลางจะมาก เกิดแรงดึงผิวมาก ซึ่งมีทิศตรงกันข้ามกับแรงลอยตัวของฟองอากาศ ทำให้ฟองอากาศลอยตัวอยู่ในคอลัมน์ได้นาน และสัดส่วนก๊าซจะสูง

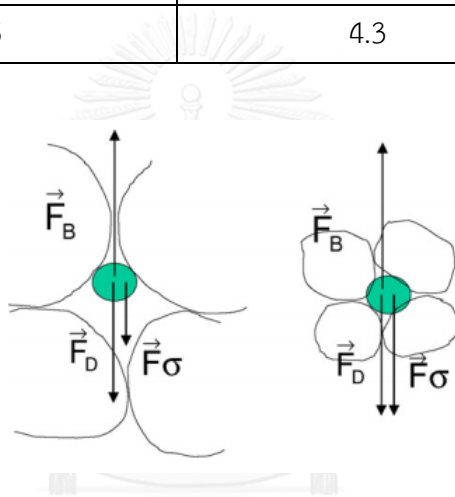
2. ชนิดของตัวกลางที่แตกต่างกันในงานวิจัยนี้ ไม่ส่งผลต่อขนาดฟองอากาศ (d_B)

3. ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม ($k_L a$) สูงขึ้นตามความเร็วก๊าซที่สูงขึ้น แต่จากลักษณะของตัวกลาง พบว่าตัวกลางขนาดเล็ก (ความพรุนน้อย) จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมมีค่าต่ำ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลย่อย (k_L) มีค่าน้อยลงเนื่องจากความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (U_B) ตามสมการของ Higbie (สมการ (2.18)) เมื่อ D คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซในของเหลว

$$k_L = 2 \sqrt{\frac{DU_B}{\pi d_B}} \quad (2.18)$$

ตารางที่ 2.2 ลักษณะของตัวกลางที่ใช้ในงานวิจัยของ Maldonado และคณะ (2008)

ชนิด	ความหนาแน่น, ρ_p (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง, d_p (มิลลิเมตร)	ความพรุน, ϵ (-)
A	1,576	4.4	0.48
B	968	10.0	0.79
C	1,570	4.2	0.41
D	1,554	2.7	0.42
E	1,302	5.0	0.42
F	54	1.8	0.34
G	65	4.3	0.35



ภาพที่ 2.13 การเกิดแรงดึงผิวจากการสัมผัสกันระหว่างฟองอากาศและตัวกลาง
เปรียบเทียบตัวกลางที่มีความพรุนมาก (รูปซ้าย) และตัวกลางที่มีความพรุนน้อย (รูปขวา)
(ที่มา: Maldonado และคณะ, 2008)

วราลี วิศาลโกคะ และคณะ (2556) ได้ศึกษาการดูดซึมออกซิเจนด้วยน้ำประปา ด้วยคอลัมน์แบบฟองอากาศ เพื่อศึกษาผลกระทบจากปริมาณและชนิดของตัวกลางพลาสติก 3 ชนิด ได้แก่ โพลีโพรไพลีน (Polypropylene, PP) โพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride, PVC) และ อะครีโลไนไตรล์บิวทาไดอีนสไตรีน (Acrylonitrile butadiene styrene, ABS) ซึ่งผลการวิจัยพบว่า

1. ระบบดูดซึมในงานวิจัย มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม ($k_L a$) สูงสุด เมื่อ อัตราการไหลก๊าซสูงสุด และใช้ตัวกลาง PP ปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งใกล้เคียงกับระบบดูดซึมที่ใช้ตัวกลาง ABS เพียง 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่อัตราการไหลก๊าซเท่ากัน

2. การใช้ตัวกลางพลาสติกทั้ง 3 ชนิดในระบบดูดซึม จะทำให้ฟองอากาศมีขนาดเล็กลง ส่งผลให้ฟองอากาศมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับของเหลวมากกว่า และมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมสูงกว่าระบบที่ไม่ใช้ตัวกลาง

2.8.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการดูดซึมทางเคมีของคาร์บอนไดออกไซด์

Vázquez และคณะ (2000) ได้ประยุกต์ใช้วิธี Danckwerts (ดังสมการ(2.19)) ในการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวสัมผัส (Interfacial area, A) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลย่อย (k_L) ในการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต-ไบคาร์บอเนต (Na_2CO_3 - NaHCO_3) ที่มีการปรับสภาพด้วยการเติมสารเร่งปฏิกิริยาโซเดียมอาร์เซไนต์ (NaAsO_2) และสารลดแรงตึงผิวโซเดียมลอริลซัลเฟต (SLS) ใช้ห้วก้านิตฟองอากาศชนิดรูพรุน (Porous plate) ขนาดต่างๆ โดยผลงานวิจัยนี้พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลย่อย และพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟสจะเพิ่มขึ้น เมื่อ

1. อัตราการไหลก๊าซสูงขึ้น
2. รูของห้วก้านิตฟองอากาศ หรือฟองอากาศมีขนาดเล็กลง
3. แรงตึงผิวมากขึ้น หรือใช้สารลดแรงตึงผิวน้อยลง

$$n = C^e A \sqrt{k_L^2 + k_1 D} \quad (2.19)$$

เมื่อ n คือ อัตราการดูดซึม, โมลต่อวินาที
 C^e คือ ความเข้มข้นของก๊าซในของเหลวที่ภาวะสมดุล, โมลต่อลูกบาศก์เมตร
 A คือ พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟส, ตารางเมตร
 k_L คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลย่อย, เมตรต่อวินาที
 k_1 คือ ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน, ต่อวินาที
 D คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซในของเหลว, ตารางเมตรต่อวินาที

Zhao และคณะ (2004) ได้ทำการศึกษาเหมือนกับงานวิจัยของ Vazquez และคณะ (2000) คือ ใช้วิธี Danckwerts เพื่อศึกษาพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (a) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลย่อย (k_L) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม ($k_L a$) ในการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในคอลัมน์แบบฟองอากาศ ด้วยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต-ไบคาร์บอเนต (Na_2CO_3 - NaHCO_3) ปรับสภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมอาร์เซไนต์ (NaAsO_2) และสารลดแรงตึงผิวโดเดซิลเบนซีนซัลโฟเนต (DBS) และทดลองผลกระทบที่เกิดจากอุณหภูมิ ผลงานวิจัยพบว่า

1. เมื่อความเร็วก๊าซสูงขึ้น พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลย่อย และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม จะมีค่าสูงขึ้น
2. เมื่ออุณหภูมิของของเหลวสูงขึ้น พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะจะลดลง เนื่องจากอุณหภูมิสูงทำให้แรงดึงผิวของของเหลวลดลง ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลย่อยและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมจะสูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิสูงจะทำให้โมเลกุลของก๊าซเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น
3. เมื่อสารลดแรงดึงผิวมีมากขึ้น พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลย่อยและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมจะมีค่าลดลง เนื่องจากสารลดแรงดึงผิวไปเกาะบนผิวของฟองอากาศ ทำให้พื้นที่ในการถ่ายเทมวลบนฟองอากาศลดลง

Kothandaraman (2010) ได้ศึกษาและเปรียบเทียบการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย 3 ชนิด ได้แก่ โมโนเอทานอลามีน (MEA) แอมโมเนียเย็น (Chilled ammonia) และโพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) และได้ผลเปรียบเทียบดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบระบบดูดซึมในงานวิจัยของ Kothandaraman (2010)

เกณฑ์เปรียบเทียบ	โมโนเอทานอลามีน	แอมโมเนียเย็น	โพแทสเซียมคาร์บอเนต
กำลังที่ใช้ในการดูดซึม CO_2 ได้ 85 เปอร์เซ็นต์ (กิโวลต์-ชั่วโมงต่อกรัมโมล)	0.0157	0.0209	0.0095
ขนาดของอุปกรณ์	หอดูดซึมมีขนาดใหญ่กว่าหอพื้นสภาพ	หอดูดซึมมีขนาดใหญ่กว่าหอดูดซึมที่ใช้ MEA	หอดูดซึมมีขนาดเท่ากับหอดูดซึมที่ใช้ MEA แต่หอพื้นสภาพมีขนาดใหญ่กว่า
การเสื่อมสภาพ และการละเหยของสารละลาย	เสื่อมสภาพที่อุณหภูมิสูง และระเหยได้	ระเหยได้	ไม่ระเหย ไม่เสื่อมสภาพ

Spigarelli (2012) ใช้การคำนวณทางทฤษฎี และการทดลองในการหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตในการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในขบวนการหมัก ผลงานวิจัย พบว่า

1. จากการคำนวณทางทฤษฎี ความสามารถในการละลาย (Solubility) ของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต เนื่องจากค่า Ionic strength เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการทดลองซึ่งพบว่า อัตราการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต

2. เมื่อพิจารณาจากความสามารถในการดูดซึม (Absorption capacity) และอัตราการดูดซึม (Absorption rate) พบว่าสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีที่สุด

Shen และคณะ (2013) ได้ศึกษาการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต และเปรียบเทียบผลจากการเติมสารเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ได้แก่ แอลอาร์จินิน (L-arginine) แอลฮิสติดีน (L-histidine) แอลไลซีน (L-lysine) โพแทสเซียมซิลิเกต (Potassium silicate) โซเดียมโมลิบเดต (Sodium molybdate) และกรดบอริก (Boric acid) ผลการทดลองพบว่า กรดบอริกและโพแทสเซียมซิลิเกตสามารถเร่งอัตราการดูดซึมได้ เช่นเดียวกับเกลือของกรดอะมิโนที่ใช้ ซึ่งพบว่า แอลอาร์จินินสามารถเร่งการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีที่สุด โดยให้เหตุผล 2 ประการ เหตุผลแรกคือ แอลอาร์จินินประกอบด้วยกลุ่มอะมิโนปฐมภูมิ (Primarily amino group) ซึ่งจะทำปฏิกิริยาได้ไวกับคาร์บอนไดออกไซด์ และเหตุผลที่สองคือ ความเป็นเบสของแอลอาร์จินิน ซึ่งค่า pK_a ของแอลอาร์จินิน แอลฮิสติดีน และแอลไลซีน มีค่าเท่ากับ 12.5 10.5 และ 6.0 ตามลำดับ

จากนั้น เมื่อ Shen และคณะทราบแล้วว่าแอลอาร์จินินสามารถเร่งปฏิกิริยาได้ดีที่สุด จึงได้ทดลองขั้นต่อไป เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของแอลอาร์จินินที่เติมลงไป และผลของอุณหภูมิ ผลการทดลองพบว่า อัตราการดูดซึมมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแอลอาร์จินินและอุณหภูมิ

Yan และคณะ (2015) ทดลองการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซชีวภาพโดยใช้เกลือของกรดอะมิโน 5 ชนิด ได้แก่ ไกลซีน (Glycine) แอลอาร์จินิน (L-arginine) แอลโพรลีน (L-proline) ซาร์โคซีน (Sarcosine) และแอลออร์นิธินไฮโดรคลอไรด์ (L-ornithine hydrochloride) ซึ่งผลงานวิจัยพบว่า

1. เมื่อเพิ่มปริมาณเกลือของกรดอะมิโน อัตราการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์จะสูงขึ้น แต่ประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพจะลดลง

2. แอลอาร์จินินสามารถดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ได้มาก สามารถฟื้นฟูสภาพได้ดี และพบว่าเกิดการสร้างตัวของไบคาร์บอเนตและคาร์บอเนตปริมาณมากระหว่างการดูดซึม ซึ่งทำให้เหมาะกับการนำไปใช้เร่งปฏิกิริยารวมตัวกับน้ำ (Hydration) ของคาร์บอนไดออกไซด์

จากความรู้และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่างๆพบว่ามีการศึกษาอยู่มากมายที่เกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ และตัวแปรด้านการถ่ายเทมวล แต่ถึงอย่างไรก็ตาม ในเชิงของการเลือกใช้ตัวกลางของแข็งในระบบดูดซึมเพื่อประยุกต์ใช้กับคอลัมน์แบบฟองอากาศ ยังคงมีส่วนน้อยที่จะเลือกใช้พลาสติก เช่น เลือกใช้โลหะหรืออื่นๆ ซึ่งมีความหนาแน่นมากกว่าของเหลว ทำให้ตัวกลางจมอยู่ในระบบ ทั้งนี้ การเลือกใช้ตัวกลางพลาสติกที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าของเหลว ตัวกลางจะสามารถแขวนลอยอยู่ในระบบ ซึ่งอาจช่วยเพิ่มความปั่นป่วนระบบดูดซึม เพิ่มโอกาสการสัมผัสกับฟองอากาศ และช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับของเหลวดูดซึมได้ดี อีกทั้งยังไม่จำเป็นต้องมีการฟื้นฟูสภาพตัวกลาง ทำให้ดูแลรักษาอุปกรณ์สะดวก

นอกจากนี้ เพื่อให้สามารถดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี การเลือกใช้ของเหลวดูดซึมก็มีส่วนสำคัญ และมีหลายงานวิจัยที่ศึกษามาแล้ว เช่น การใช้น้ำ ซึ่งเป็นการดูดซึมทางกายภาพ หรือการใช้สารเคมี เช่น สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต โพแทสเซียมคาร์บอเนต โมโนเอทานอลามีน เกลือของกรดอะมิโน เป็นต้น ซึ่งเป็นที่แน่ชัดว่าการดูดซึมทางเคมีมีความสามารถในการดูดซึมดีกว่าการดูดซึมทางกายภาพ แต่สารเคมีตัวที่เหมาะสมก็ควรพิจารณาถึงสมบัติของของเหลว เช่น ใช้กำลังไฟฟ้าต่ำ ไม่ระเหยหรือเสื่อมสภาพง่าย การเลือกใช้สารละลายคาร์บอเนตและใช้สารเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วย จึงอาจเป็นทางเลือกที่เหมาะสม และการประยุกต์ใช้ร่วมกับตัวกลางพลาสติก ซึ่งจะเป็นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ ก็อาจจะช่วยเพิ่มความสามารถของระบบดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ได้

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 ภาพรวมของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ได้แก่ อัตราการไหลของก๊าซ ขนาดหัวกำเนิดฟองอากาศ รูปทรงตัวกลาง ปริมาณตัวกลาง ชนิดของเหลวดูดซึ่ม และความเข้มข้นของเหลวดูดซึ่ม ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อตัวแปรด้านการถ่ายเทมวล และตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ โดยงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 3 ช่วงการทดลอง ได้แก่

การทดลองช่วงที่ 1 คือ การศึกษาผลกระทบของขนาดหัวกำเนิดฟองอากาศ รูปทรงและปริมาณตัวกลางพลาสติกที่มีต่อตัวแปรด้านการถ่ายเทมวล และตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ โดยใช้อากาศเป็นตัวถูกดูดซึ่ม และใช้น้ำประปาเป็นของเหลวดูดซึ่ม ผลการทดลองที่ได้จะแสดงให้เห็นแนวโน้มจากการใช้หัวกำเนิดฟองอากาศ และตัวกลางพลาสติกก่อนใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวถูกดูดซึ่ม

การทดลองช่วงที่ 2 คือ การศึกษาผลกระทบของของเหลวดูดซึ่มที่มีต่ออัตราการดูดซึ่ม โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวถูกดูดซึ่ม และใช้น้ำประปาและสารละลายต่างๆเป็นของเหลวดูดซึ่ม ผลการทดลองที่ได้จะแสดงให้เห็นแนวโน้มจากการการดูดซึ่มทางเคมีก่อนทดลองร่วมกับตัวกลางพลาสติก

การทดลองช่วงที่ 3 คือ การศึกษาปัจจัยที่ได้ผลการทดลองจากการทดลองช่วงที่ 1 และ 2 ได้แก่ ขนาดหัวกำเนิดฟองอากาศ รูปทรงตัวกลางพลาสติก ปริมาณตัวกลางพลาสติก และของเหลวดูดซึ่มที่ใช้ เพื่อศึกษาการดูดซึ่มคาร์บอนไดออกไซด์ในคอลัมน์แบบฟองอากาศ

จากการทดลองทั้ง 3 ช่วง สามารถนำผลการทดลองทั้งหมดมาวิเคราะห์และวิจารณ์เพื่อหาสถานะที่ดีที่สุดสำหรับการใช้คอลัมน์แบบฟองอากาศในการดูดซึ่มคาร์บอนไดออกไซด์ ในเชิงของรูปทรงตัวกลางพลาสติก ปริมาณตัวกลางพลาสติก ชนิดและความเข้มข้นสารเคมีที่ควรเลือกใช้

3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 การทดลองช่วงที่ 1

3.2.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองช่วงที่ 1

1. คอลัมน์ทรงกระบอก ทำจากอะคริลิก (Acrylic) หนา 5 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 14 เซนติเมตร และสูง 1 เมตร

2. หัวกำเนิดฟองอากาศแบบแข็งทรงกลม ขนาดต่างๆ ได้แก่
 - ขนาดเล็ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ประกอบด้วยรูขนาดประมาณ 100 – 200 ไมโครเมตร
 - ขนาดใหญ่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 เซนติเมตร ประกอบด้วยรูขนาดประมาณ 500 – 1,000 ไมโครเมตร
3. ตัวกลางพลาสติกชนิดพอลิโพรไพลีน (Polypropylene) รูปทรงต่างๆ ได้แก่
 - ทรงกระบอกกลวง (Ring : R)
 - ทรงรี (Ellipse : E)
 - ทรงกลม (Sphere : S)
 - ทรงกระบอก (Cylinder : C)
4. เครื่องอัดอากาศ ยี่ห้อ Atman High-Class Air Pump
5. อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลก๊าซ ยี่ห้อ Dwyer
6. เครื่องวัดออกซิเจนละลาย ยี่ห้อ Eutech Instruments
7. กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง ยี่ห้อ Basler
8. โปรแกรมบันทึกภาพนิ่ง LabVIEW
9. โปรแกรมวิเคราะห์ภาพ Images Frame Work

3.2.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลองช่วงที่ 1

1. น้ำประปา
2. โซเดียมซัลไฟต์ (Sodium sulphite anhydrous : Na_2SO_3) ยี่ห้อ Ajax Finechem

3.2.2 การทดลองช่วงที่ 2

3.2.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองช่วงที่ 2

1. ขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate) ขนาด 1.5 ลิตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร และสูง 30 เซนติเมตร
2. หัวกำเนิดฟองอากาศแบบแข็งทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร
3. เครื่องอัดอากาศ ยี่ห้อ Atman High-Class Air Pump
4. อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลก๊าซ ยี่ห้อ Dwyer
5. อุปกรณ์ควบคุมความดันก๊าซ ยี่ห้อ Harris
6. เครื่องวัดคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ยี่ห้อ Testo

3.2.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลองช่วงที่ 2

1. ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ยี่ห้อ Praxair
2. น้ำประปา
3. โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate anhydrous : Na_2CO_3) ยี่ห้อ Ajax Finechem
4. แอลอาร์จินีน (L-Arginine : $\text{C}_6\text{H}_{14}\text{N}_4\text{O}_2$) ยี่ห้อ Himedia

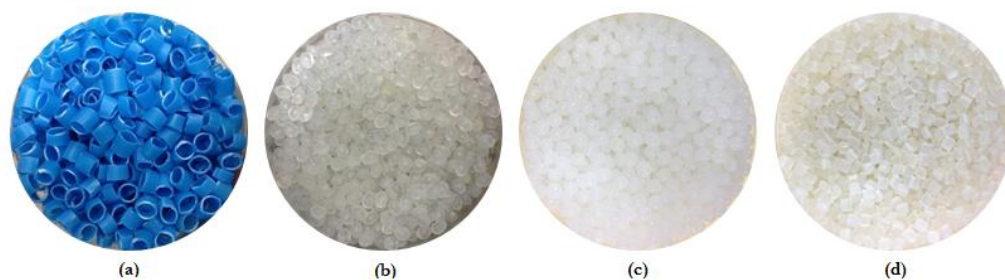
3.2.3 การทดลองช่วงที่ 3

3.2.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองช่วงที่ 3

1. คอลัมน์ทรงกระบอก (จากการทดลองช่วงที่ 1)
2. หัวกำเนิดฟองอากาศแบบแข็งทรงกลม (เลือกที่ดีที่สุดจากการทดลองช่วงที่ 1)
3. ตัวกลางพลาสติกชนิดพอลิโพรไพลีน (เลือกที่ดีที่สุดจากการทดลองช่วงที่ 1)
4. เครื่องอัดอากาศ ยี่ห้อ Atman High-Class Air Pump
5. อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลก๊าซ ยี่ห้อ Dwyer
6. อุปกรณ์ควบคุมความดันก๊าซ ยี่ห้อ Harris
7. เครื่องวัดคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ยี่ห้อ Testo
8. กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง ยี่ห้อ Basler
9. โปรแกรมบันทึกภาพนิ่ง LabVIEW
10. โปรแกรมวิเคราะห์ภาพ Images Frame Work

3.2.3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลองช่วงที่ 3

1. ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ยี่ห้อ Praxair
2. น้ำประปา
3. โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate anhydrous : Na_2CO_3) ยี่ห้อ Ajax Finechem
4. แอลอาร์จินีน (L-Arginine : $\text{C}_6\text{H}_{14}\text{N}_4\text{O}_2$) ยี่ห้อ Himedia

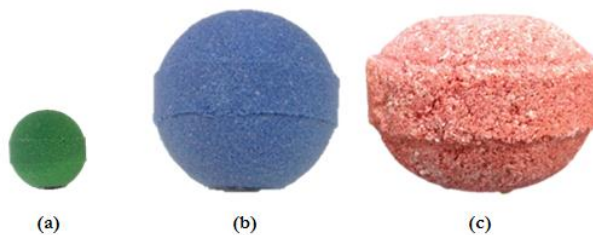


ภาพที่ 3.1 ตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย

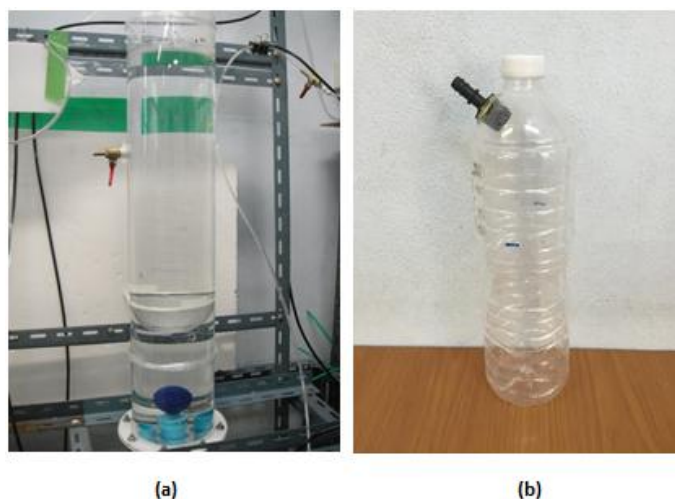
(a) ทรงกระบอกกลวง (b) ทรงรี (c) ทรงกลม (d) ทางกระบอก

ตารางที่ 3.1 ลักษณะและสมบัติของตัวอย่างพลาสติกที่ใช้ในงานวิจัย

รูปทรง	ทรงกระบอก กลวง (R)	ทรงรี (E)	ทรงกลม (S)	ทรงกระบอก (C)
ขนาดฉายเส้นผ่าน ศูนย์กลางเทียบเท่า, d_p (มิลลิเมตร)	5.61	3.43	3.70	2.73
ความพรุนของชั้น ตัวอย่าง, ϵ	0.68	0.37	0.38	0.30
พื้นที่ผิวสัมผัส, A (ตารางมิลลิเมตร)	156.69	62.59	43.05	38.43
ปริมาตร, V (ลูกบาศก์มิลลิเมตร)	49.48	37.11	26.56	17.69
พื้นที่ผิวสัมผัสต่อ ปริมาตร, A/V (ต่อเมตร)	3,167	1,687	1,621	2,172
น้ำหนักเม็ดตัวอย่าง, m_p (กรัมต่อเม็ด)	0.047	0.035	0.025	0.017
ความเร็วลอยตัวของ เม็ดตัวอย่าง, U_T (เซนติเมตรต่อ วินาที)	2.28	4.67	4.87	3.53



ภาพที่ 3.2 หัวกำเนิดฟองอากาศที่ใช้ในงานวิจัย ที่มีขนาดหน้าตัดเส้นผ่านศูนย์กลาง
(a) 2 เซนติเมตร (b) 5 เซนติเมตร (c) 6.5 เซนติเมตร

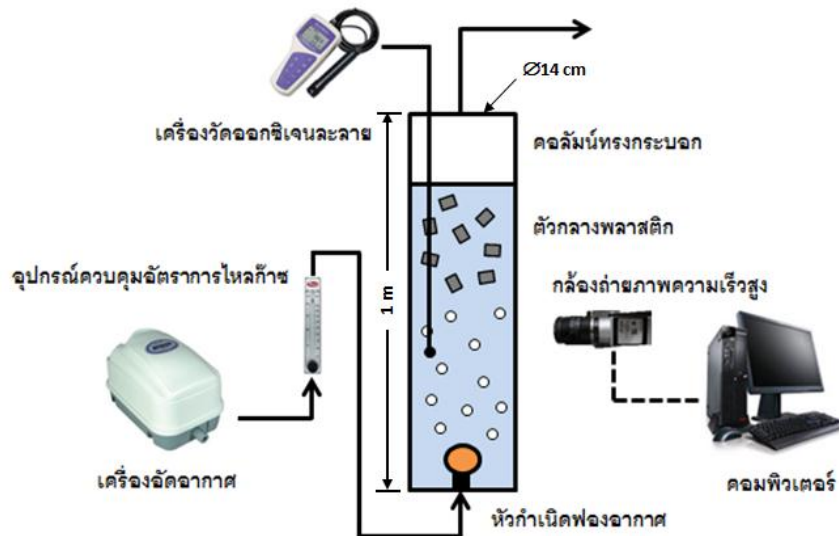


ภาพที่ 3.3 คอลัมน์ที่ใช้ในงานวิจัย
(a) คอลัมน์อะคริลิก (b) ขวดพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต

3.3 การติดตั้งระบบการทดลอง

3.3.1 การทดลองช่วงที่ 1

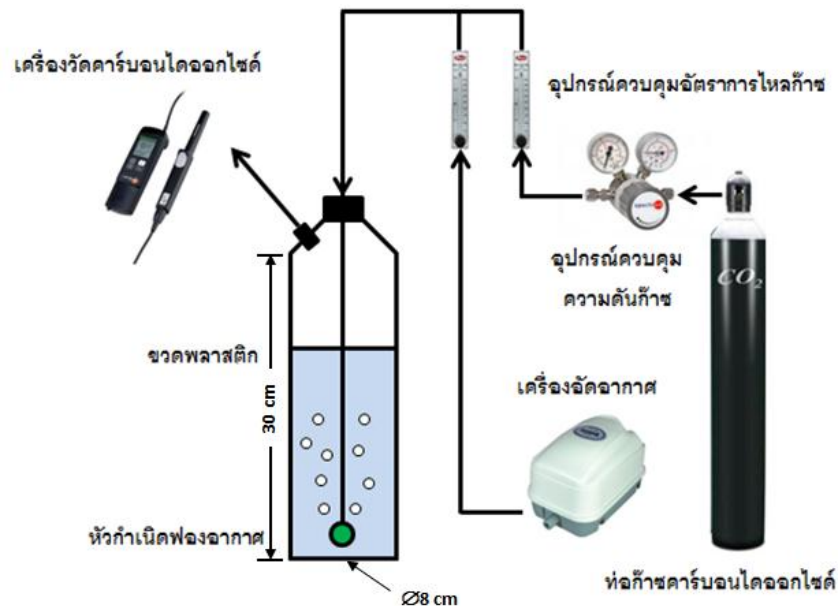
การติดตั้งระบบการทดลองช่วงที่ 1 แสดงดังรูปที่ 3.4 เครื่องอัดอากาศสร้างอากาศเข้าระบบผ่านอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลก๊าซเข้าทางด้านล่างของคอลัมน์ทรงกระบอก อากาศสร้างตัวเป็นฟองด้วยหัวกำเนิดฟองอากาศ ภายในคอลัมน์บรรจุน้ำประปาและตัวกลางพลาสติก อากาศออกจากระบบทางด้านบนของคอลัมน์ วัดออกซิเจนในน้ำประปาด้วยเครื่องวัดออกซิเจนละลายโดยให้หัววัดอยู่ที่กึ่งกลางคอลัมน์ บันทึกภาพฟองอากาศด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงซึ่งควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 3.4 แผนผังการติดตั้งระบบของการทดลองช่วงที่ 1

3.3.2 การทดลองช่วงที่ 2

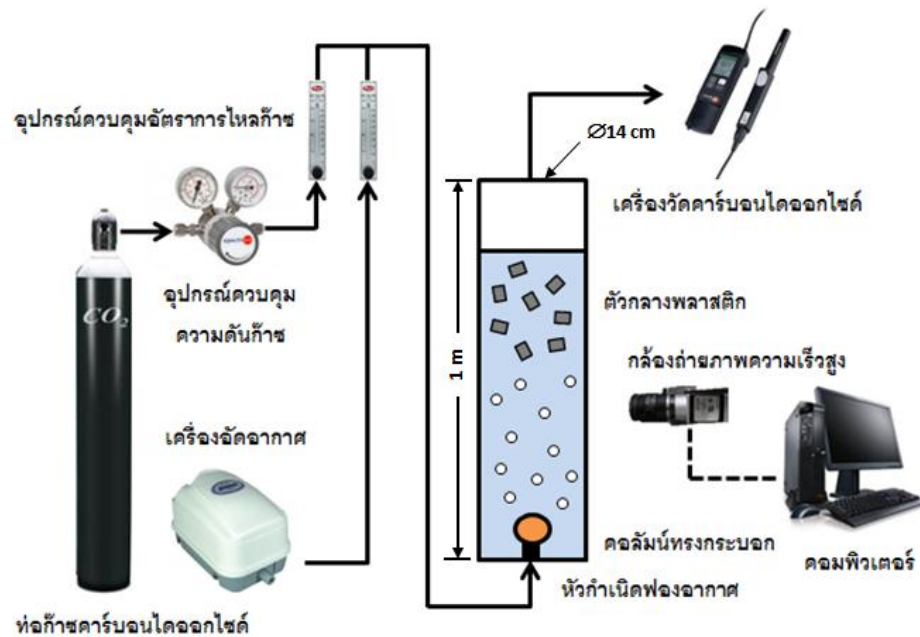
การติดตั้งระบบการทดลองช่วงที่ 2 แสดงดังรูปที่ 3.5 คาร์บอนไดออกไซด์ถูกจ่ายออกจากท่อก๊าซผ่านอุปกรณ์ควบคุมความดันและอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลก๊าซ ผสมกับอากาศจากเครื่องอัดอากาศ ก๊าซผสมเข้าสู่ระบบและสร้างตัวเป็นฟองด้วยหัวกำเนิดฟองอากาศที่ใส่ไว้ที่ด้านล่างของขวด ภายในขวดบรรจุของเหลว ก๊าซออกจากระบบทางด้านบนของขวด และวัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากระบบด้วยเครื่องวัดคาร์บอนไดออกไซด์



ภาพที่ 3.5 แผนผังการติดตั้งระบบของการทดลองช่วงที่ 2

3.3.3 การทดลองช่วงที่ 3

การติดตั้งระบบการทดลองช่วงที่ 3 แสดงดังรูปที่ 3.6 คาร์บอนไดออกไซด์ถูกจ่ายออกจากท่อก๊าซผ่านอุปกรณ์ควบคุมความดันและอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลก๊าซ ผสมกับอากาศจากเครื่องอัดอากาศ ก๊าซผสมเข้าสู่ระบบทางด้านล่างของคอลัมน์ทรงกระบอกและสร้างตัวเป็นฟองด้วยหัวกำเนิดฟองอากาศ ภายในคอลัมน์บรรจุของเหลวและตัวกลางพลาสติก ก๊าซออกจากระบบทางด้านบนของคอลัมน์ และวัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากระบบด้วยเครื่องวัดคาร์บอนไดออกไซด์ บันทึกภาพฟองอากาศด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงซึ่งควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 3.6 แผนผังการติดตั้งระบบของการทดลองช่วงที่ 3

3.4 การวิเคราะห์ตัวแปรที่ศึกษาในงานวิจัย

3.4.1 ตัวแปรด้านการถ่ายเทมวล

3.4.1.1 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม

สำหรับการทดลองช่วงที่ 1 ต้องลดความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในน้ำประปา ก่อน โดยเติมโซเดียมซัลไฟต์ลงในน้ำประปาจนกระทั่งความเข้มข้นของออกซิเจนละลายลดลงเหลือ ศูนย์ (Bouaifi และคณะ, 2001) หลังจากนั้นจึงเติมอากาศ แล้ววัดและบันทึกค่าออกซิเจนละลายที่ เวลาต่างๆ แล้ววิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทรวม (Deckwer และ Field, 1992) ได้จาก สมการ (3.1)

$$\frac{dC}{dt} = k_L a (C^* - C_t) \quad (3.1)$$

หรือในรูปปฏิยานุพันธ์ดังสมการ (3.2)

$$\ln(C^* - C_t) = -k_L a t + C^* \quad (3.2)$$

เมื่อ C^* คือ ความเข้มข้นของก๊าซละลายที่สภาวะสมดุล, มิลลิกรัมต่อลิตร
 C_t คือ ความเข้มข้นของก๊าซละลายที่เวลา t ใดๆ, มิลลิกรัมต่อลิตร
 $k_L a$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม, ต่อวินาที
 t คือ เวลา, วินาที

จากสมการ (3.2) จะสามารถนำไปพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (t) ซึ่งเป็นแกน x กับค่า $\ln(C^* - C_t)$ ซึ่งเป็นแกน y ทำให้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม ($k_L a$) ได้จากความชันของกราฟในสมการ (3.2)

3.4.1.2 อัตราการดูดซึม

สำหรับการทดลองช่วงที่ 2 และการทดลองช่วงที่ 3 เป็นการวัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากกระบวนการดูดซึม ทำให้สามารถคำนวณหาคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในของเหลวที่เวลาต่างๆด้วยสมการสมดุลมวล ดังสมการ (3.3) (Heymes และคณะ, 2006)

$$C_{L,t} = \frac{Q_G}{V_L} (C_{G,in} \times t - \int C_{G,out}(t) dt) \quad (3.3)$$

เมื่อ $C_{L,t}$ คือ คาร์บอนไดออกไซด์ในของเหลวที่เวลา t ใดๆ, มิลลิกรัมต่อลิตร
 Q_G คือ อัตราการไหลก๊าซ, ลิตรต่อนาที
 V_L คือ ปริมาตรของของเหลวดูดซึม, ลิตร
 $C_{G,in}$ คือ ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า, มิลลิกรัมต่อลิตร
 $C_{G,out}(t)$ คือ ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกในเทอมของเวลา t , มิลลิกรัมต่อลิตร
 t คือ เวลา, นาที

และสามารถพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (t) ซึ่งเป็นแกน x กับคาร์บอนไดออกไซด์ในของเหลวที่เวลาใดๆ ($C_{L,t}$) ซึ่งเป็นแกน y จะทำให้สามารถหาอัตราการดูดซึมได้จากความชันของกราฟดังกล่าว

3.4.2 ตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์

3.4.2.1 ขนาดฟองอากาศเฉลี่ย

การวิเคราะห์ขนาดฟองอากาศ สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์จากภาพถ่ายด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง ในแต่ละการทดลอง ฟองอากาศจะถูกสุ่มจำนวน 100 - 200 ฟอง และวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าด้วยโปรแกรม Image Frame Work แล้วหาค่าเฉลี่ยของขนาดฟองอากาศดังสมการ (3.4)

$$d_B = \frac{\sum_{i=1}^N d_i}{N} \quad (3.4)$$

เมื่อ d_B คือ ขนาดฟองอากาศเฉลี่ย, มิลลิเมตร
 d_i คือ ขนาดฟองอากาศลำดับที่ i , มิลลิเมตร
 N คือ จำนวนฟองอากาศที่สุ่ม, ไม่มีหน่วย

3.4.2.2 สัดส่วนก๊าซ

การวิเคราะห์สัดส่วนก๊าซ คำนวณจากปริมาตรของก๊าซที่ปรากฏในระบบระหว่างการเติมก๊าซเข้าคอลัมน์ (Maldonado และคณะ, 2008) ซึ่งแสดงดังสมการ (3.5)

$$\mathcal{E}_G = \frac{V_G}{V_G + V_L + V_S} \quad (3.5)$$

เมื่อ \mathcal{E}_G คือ สัดส่วนก๊าซ, ไม่มีหน่วย
 V_G คือ ปริมาตรของก๊าซในระบบ, ลูกบาศก์เมตร
 V_L คือ ปริมาตรของของเหลวดูดซึมในระบบ, ลูกบาศก์เมตร
 V_S คือ ปริมาตรของตัวกลางพลาสติกในระบบ, ลูกบาศก์เมตร

3.4.2.3 พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ

การวิเคราะห์พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะระหว่างก๊าซและของเหลวใช้วิธีการคำนวณ เมื่อพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ คือ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสของก๊าซในระบบ (หรือฟองอากาศทั้งหมด) ต่อปริมาตรของเหลวดูดซึมในระบบ ดังสมการ (3.6)

$$a = \frac{N_B S_B}{V_L} \quad (3.6)$$

เมื่อ a คือ พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ, ต่อเมตร
 N_B คือ จำนวนฟองอากาศทั้งหมดในระบบ, ไม่มีหน่วย
 S_B คือ พื้นที่ผิวเฉลี่ยของฟองอากาศ, ตารางเมตร

โดยที่ จำนวนฟองอากาศทั้งหมด คำนวณจาก

$$N_B = \frac{V_G}{V_B} \quad (3.7)$$

และ ปริมาตรของเหลวในระบบ เท่ากับ

$$V_L = V_T - V_G - V_S \quad (3.8)$$

เมื่อ V_B คือ ปริมาตรเฉลี่ยของฟองอากาศ, ลูกบาศก์เมตร
 V_T คือ ปริมาตรรวมของของแข็ง ของเหลว และก๊าซในระบบ, ลูกบาศก์เมตร

จากสมการ (3.6) (3.7) และ (3.8) จึงได้

$$a = \frac{S_B}{V_B} \cdot \frac{V_G}{V_T - V_G - V_S} \quad (3.9)$$

ปริมาตรของก๊าซและของแข็งในระบบสามารถคำนวณในเทอมของปริมาตรรวมได้ ดังนี้

$$V_G = V_T \mathcal{E}_G \quad (3.10)$$

$$V_S = V_T \mathcal{E}_S \quad (3.11)$$

เมื่อ \mathcal{E}_S คือ สัดส่วนของแข็ง, ไม่มีหน่วย

เมื่อสมมติว่าฟองอากาศมีรูปร่างเป็นทรงกลม จึงสรุปว่า พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะสามารถคำนวณได้ ดังแสดงในสมการ (3.12) (Maldonado และคณะ, 2008)

$$a = \frac{6}{d_B} \cdot \frac{\epsilon_G}{1 - \epsilon_G - \epsilon_S} \quad (3.12)$$

ทั้งนี้ สัดส่วนของแข็งสามารถคำนวณได้จาก

$$\epsilon_S = \frac{V_S}{V_G + V_L + V_S} \quad (3.13)$$

3.4.2.4 ความเร็วลอยตัวเฉลี่ยของฟองอากาศ

การวิเคราะห์ความเร็วลอยตัวเฉลี่ยของฟองอากาศ ใช้วิธีคำนวณจากพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ ซึ่งอ้างอิงจากสมการ (3.6)

$$a = \frac{N_B S_B}{V_L} \quad (3.6)$$

โดยที่ จำนวนฟองอากาศคำนวณจาก (Painmanakul และคณะ, 2009)

$$N_B = \frac{f_B H_B}{U_B} \quad (3.14)$$

เมื่อ f_B คือ ความถี่ในการเกิดฟองอากาศ, ต่อวินาที
 H_B คือ ระยะทางที่ฟองอากาศลอยตัวในแนวตั้งอยู่ในระบบ, เมตร
 U_B คือ ความเร็วลอยตัวเฉลี่ยของฟองอากาศ, เมตรต่อวินาที

โดยที่

$$f_B = \frac{Q_G}{V_B} \quad (3.15)$$

เมื่อ Q_G คือ อัตราการไหลก๊าซ, ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

จากสมการ (3.6) (3.14) และ (3.15) จึงได้

$$a = \frac{Q_G H_B S_B}{V_B U_B V_L} \quad (3.16)$$

หรือจัดสมการใหม่ ความเร็วลอยตัวเฉลี่ยของฟองอากาศจึงคำนวณได้ดังนี้

$$U_B = \frac{Q_G H_B S_B}{V_B V_L a} \quad (3.17)$$

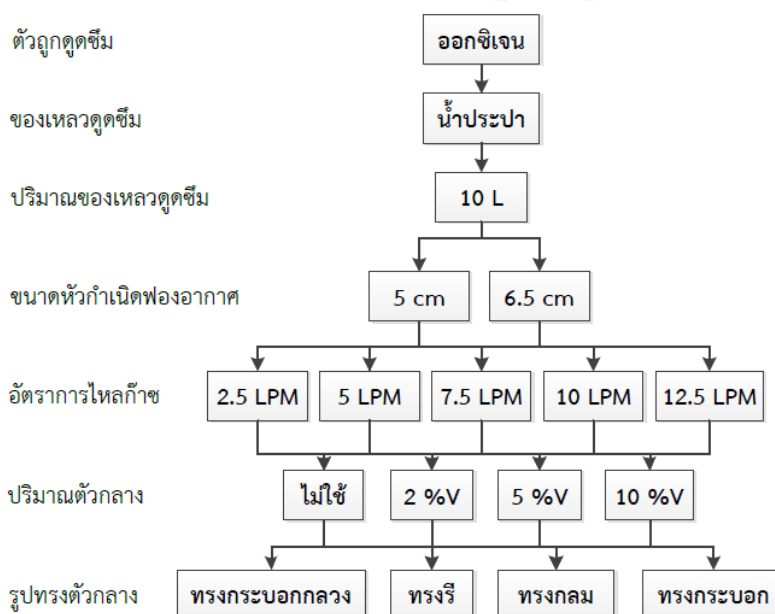
3.5 วิธีการทดลอง

3.5.1 การทดลองช่วงที่ 1

วัตถุประสงค์ของการทดลองนี้ คือ เพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดหัวกำเนิดฟองอากาศ รูปร่างและปริมาณของตัวกลางพลาสติกที่มีผลต่อตัวแปรด้านการถ่ายเทมวล และตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ การทดลอง คือ ศึกษากระบวนการดูดซึมของออกซิเจนด้วยน้ำประปาปริมาตร 10 ลิตร ที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์แบบฟองอากาศ ก่อนเริ่มต้นทดลองต้องลดความเข้มข้นของออกซิเจนละลายด้วยโซเดียมซัลไฟท์ จากนั้นเติมอากาศที่อัตราการไหลก๊าซในช่วง 2.5 – 12.5 ลิตรต่อนาที แล้ววัดค่าออกซิเจนละลายที่เวลาต่างๆ ถ่ายภาพด้วยกล้องความเร็วสูงเพื่อวิเคราะห์ขนาดฟองอากาศ แล้ววิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม ซึ่งสามารถสรุปตัวแปรต่างๆ ได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สรุปตัวแปรต่างๆในการทดลองช่วงที่ 1

ตัวแปรควบคุม	รายละเอียด
ตัวถูกดูดซึมที่วิเคราะห์	ออกซิเจน
ของเหลวดูดซึม	น้ำประปา
ปริมาณของเหลวดูดซึม	10 ลิตร
ตัวแปรต้น	รายละเอียด
อัตราการไหลของก๊าซ	2.5 5 7.5 10 และ 12.5 ลิตรต่อนาที
ขนาดหัวกำเนิดฟองอากาศ	ขนาดเล็ก (5 เซนติเมตร) และขนาดใหญ่ (6.5 เซนติเมตร)
ปริมาณตัวกลางพลาสติก	ไม่ใช่ตัวกลางพลาสติก
	2 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
รูปทรงตัวกลางพลาสติก	ทรงกระบอกกลวง ทรงรี ทรงกลม และทรงกระบอก
ตัวแปรตาม	รายละเอียด
ตัวแปรด้านการถ่ายเทมวล	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม
ตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์	ขนาดฟองอากาศเฉลี่ย
	สัดส่วนก๊าซ
	พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ
	ความเร็วลอยตัวเฉลี่ยของฟองอากาศ



ภาพที่ 3.7 แผนผังการทดลองช่วงที่ 1

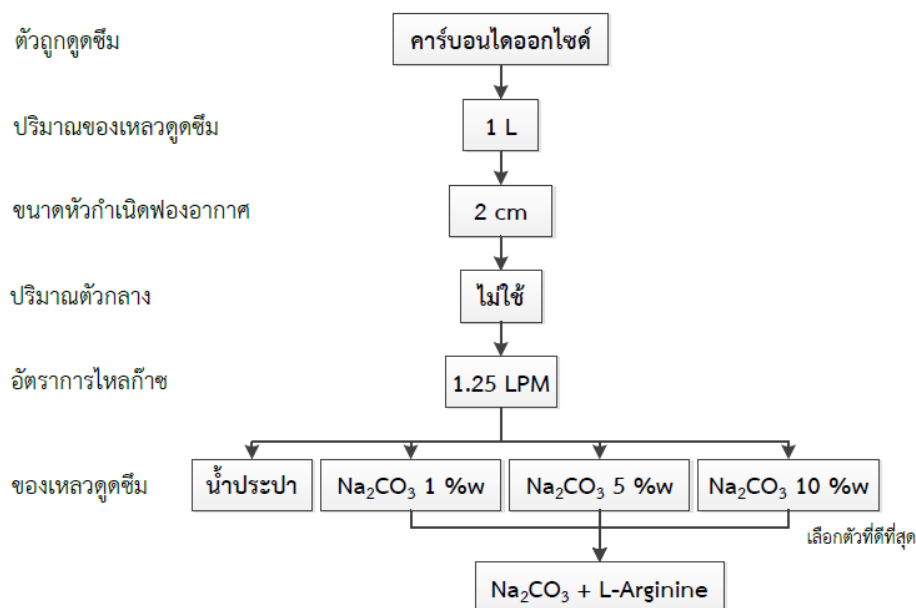
3.5.2 การทดลองช่วงที่ 2

วัตถุประสงค์ของการทดลองนี้ คือ เพื่อศึกษาผลกระทบของของเหลวดูดซึมที่มีผลต่อตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ การทดลอง คือ ศึกษากระบวนการดูดซึมของคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยของเหลวดูดซึมปริมาตร 1 ลิตรที่บรรจุอยู่ในขวดพลาสติก โดยของเหลวดูดซึม ได้แก่ น้ำประปา สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต และสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตผสมแอลกอฮอล์ โดยใช้โซเดียมคาร์บอเนต 1 – 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และใช้แอลกอฮอล์ 1 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้ก๊าซผสมที่มีความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 7,500 ส่วนต่อล้านส่วน ที่อัตราการไหลก๊าซ 1.25 ลิตรต่อนาที โดยไม่มีการใช้ตัวกลางพลาสติก แล้ววัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากระบบที่เวลาต่างๆ แล้ววิเคราะห์หาอัตราการดูดซึม ซึ่งสามารถสรุปตัวแปรต่างๆได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สรุปตัวแปรต่างๆในการทดลองช่วงที่ 2

ตัวแปรควบคุม	รายละเอียด
ตัวถูกดูดซึมที่วิเคราะห์	คาร์บอนไดออกไซด์
ปริมาณของเหลวดูดซึม	1 ลิตร
ขนาดหัวกำเนิดฟองอากาศ	2 เซนติเมตร
ปริมาณตัวกลางพลาสติก	ไม่ใช้ตัวกลางพลาสติก
อัตราการไหลของก๊าซ	1.25 ลิตรต่อนาที
ตัวแปรต้น	รายละเอียด
ของเหลวดูดซึม	น้ำประปา
	สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ความเข้มข้น 1 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
	สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต* ผสมแอลกอฮอล์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ตัวแปรตาม	รายละเอียด
ตัวแปรด้านการถ่ายเทมวล	อัตราการดูดซึม
	Enhancement factor

หมายเหตุ *เลือกความเข้มข้นสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีอัตราการดูดซึมดีที่สุด



ภาพที่ 3.8 แผนผังการทดลองช่วงที่ 2

3.5.3 การทดลองช่วงที่ 3

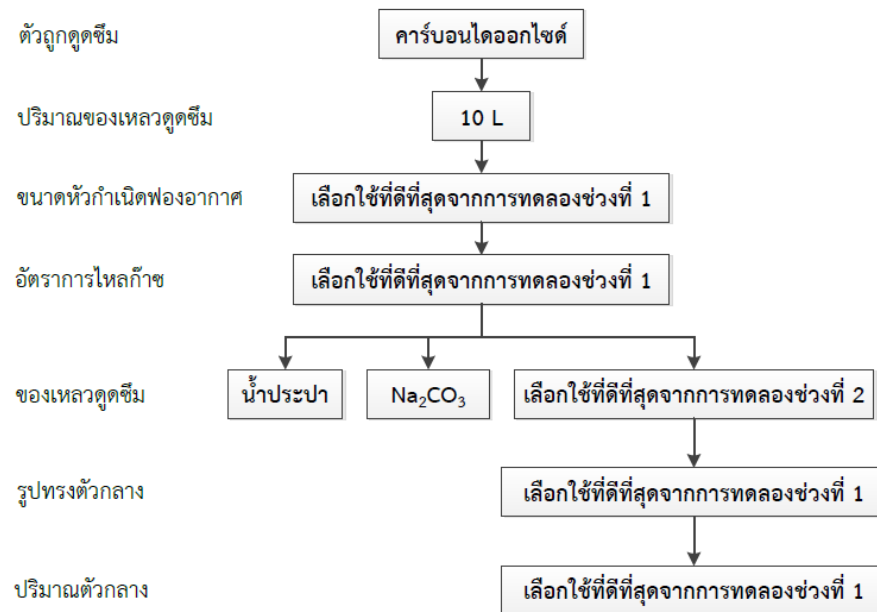
วัตถุประสงค์ของการทดลองนี้ คือ เพื่อศึกษาปัจจัยที่ได้ผลการทดลองจากการทดลองช่วงที่ 1 และ 2 ได้แก่ ขนาดหัวกำเนิดฟองอากาศ รูปร่างตัวกลางพลาสติก ปริมาณตัวกลางพลาสติก และของเหลวดูดซึมที่ใช้ เพื่อศึกษาการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในคอลัมน์แบบฟองอากาศ การทดลอง คือ ศึกษากระบวนการดูดซึมของคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยของเหลวดูดซึมปริมาตร 10 ลิตรที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ ของเหลวดูดซึม ได้แก่ น้ำประปา สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต และสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตผสมแอลอาร์จินีน ใช้หัวกำเนิดฟองอากาศ รูปร่างตัวกลางพลาสติก และปริมาณตัวกลางพลาสติกที่ให้ผลดีที่สุดจากการทดลองช่วงที่ 1 และใช้ก๊าซผสมที่มีความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 7,500 ส่วนต่อล้านส่วน ที่อัตราการไหลก๊าซที่ให้ผลดีที่สุดจากการทดลองช่วงที่ 1 แล้ววัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากระบบที่เวลาต่างๆ ถ่ายภาพด้วยกล้องความเร็วสูงเพื่อวิเคราะห์ขนาดฟองอากาศ แล้ววิเคราะห์หาตัวแปรต่างๆ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 สรุปตัวแปรต่างๆในการทดลองช่วงที่ 3

ตัวแปรควบคุม	รายละเอียด
ชนิดของตัวถุกดูดซึมน้ำที่วิเคราะห์	คาร์บอนไดออกไซด์
ปริมาณของของเหลวดูดซึม	10 ลิตร
ขนาดหัวกำเนิดฟองอากาศ	ดีที่สุดจากการทดลองช่วงที่ 1
รูปทรงตัวกลางพลาสติก	ดีที่สุดจากการทดลองช่วงที่ 1
ปริมาณของตัวกลางพลาสติก	ดีที่สุดจากการทดลองช่วงที่ 1
อัตราการไหลของก๊าซ	ดีที่สุดจากการทดลองช่วงที่ 1
ตัวแปรต้น	รายละเอียด
ของเหลวดูดซึม	น้ำประปา
	สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต*
	ดีที่สุดจากการทดลองช่วงที่ 2**
ตัวแปรตาม	รายละเอียด
ตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์	ขนาดฟองอากาศเฉลี่ย
	สัดส่วนก๊าซ
	พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ
	ความเร็วลอยตัวเฉลี่ยของฟองอากาศ
ตัวแปรด้านการถ่ายเทมวล	อัตราการดูดซึม
	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม
	Enhancement factor
	Hatta number

หมายเหตุ *เลือกความเข้มข้นที่มีอัตราการดูดซึมสูงสุดจากการทดลองช่วงที่ 2

**นำไปทดลองร่วมกับตัวกลางพลาสติก



ภาพที่ 3.9 แผนผังการทดลองช่วงที่ 3

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ได้แก่ อัตราการไหลก๊าซ ขนาดหัวกำเนิดฟองอากาศ รูปทรงตัวกลาง ปริมาณตัวกลาง ชนิดของเหลวดูดซึม และความเข้มข้นของเหลวดูดซึม ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อตัวแปรด้านการถ่ายเทมวล และตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ โดยงานวิจัยนี้ได้ผลการดำเนินงานวิจัยโดยแบ่งเป็นหัวข้อ ดังต่อไปนี้

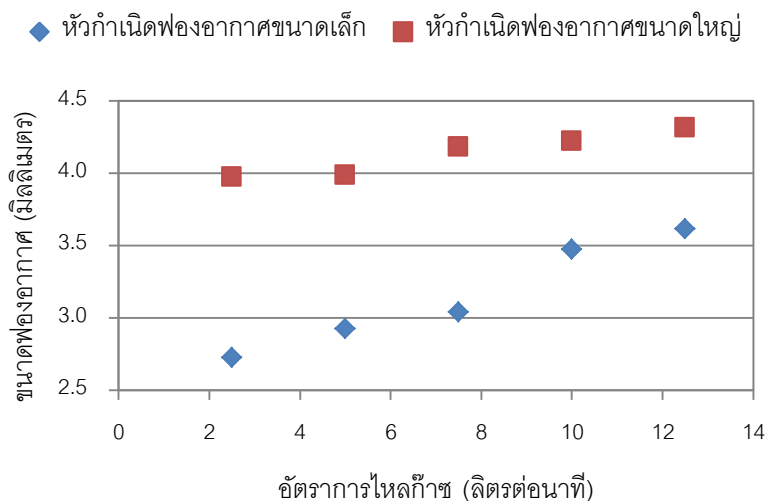
4.1 ผลจากการใช้หัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กและขนาดใหญ่ เมื่อไม่ใช้ตัวกลางพลาสติก

ผลที่ได้จากการใช้หัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก และขนาดใหญ่ เมื่อไม่ใช้ตัวกลางพลาสติก ที่มีต่อตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและตัวแปรด้านการถ่ายเทมวล มีดังต่อไปนี้

4.1.1 ขนาดฟองอากาศ

จากภาพที่ 4.1 แสดงขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้นจากหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก และขนาดใหญ่ เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก ซึ่งผลแสดงให้เห็นว่า ขนาดฟองอากาศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลก๊าซสูงขึ้น และหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดใหญ่ทำให้เกิดฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่กว่าอย่างชัดเจน ซึ่งที่อัตราการไหลก๊าซสำหรับงานวิจัยนี้ หัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กทำให้เกิดฟองอากาศที่มีขนาดอยู่ในช่วง 2.7 – 3.6 มิลลิเมตร ในขณะที่หัวกำเนิดฟองอากาศขนาดใหญ่ทำให้เกิดฟองอากาศที่มีขนาดอยู่ในช่วง 3.9 – 4.3 มิลลิเมตร ทั้งนี้เพราะขนาดของรูบนหัวกำเนิดฟองอากาศส่งผลโดยตรงต่อขนาดฟองอากาศ นั่นคือ ฟองอากาศขนาดใหญ่เกิดจากรูขนาดใหญ่ของหัวกำเนิดฟองอากาศ (Kumar และคณะ, 1976, Leibson และคณะ, 1956a, Leibson และคณะ, 1956b, Tate, 1864)

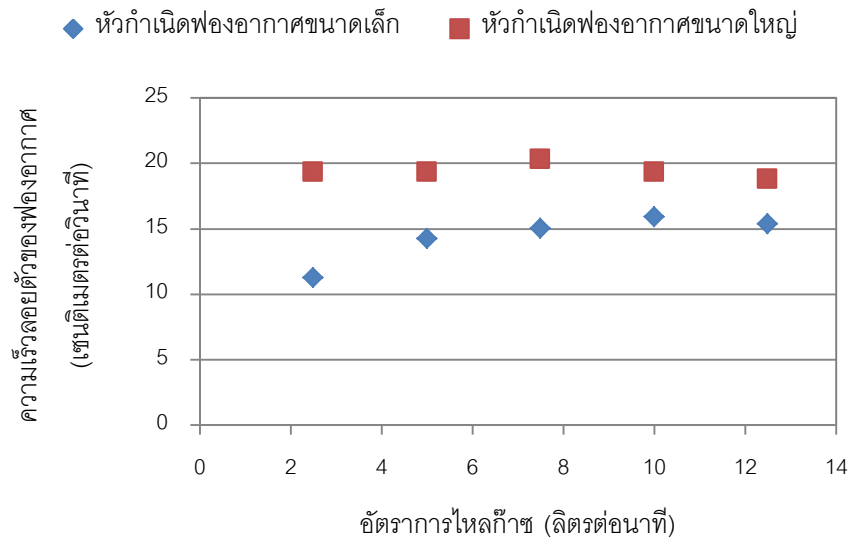
แต่อย่างไรก็ตาม ขนาดฟองอากาศที่วัดได้ ณ หัวกำเนิดฟองอากาศมีขนาดเล็กกว่าขนาดฟองอากาศเฉลี่ยที่วัดได้ ณ ตำแหน่งกลางคอลัมน์ โดยมีขนาดประมาณ 1.5 – 2.0 มิลลิเมตร และ 2.8 – 3.5 มิลลิเมตร สำหรับหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะฟองอากาศปะทะและรวมตัวกันระหว่างลอยขึ้น เกิดเป็นฟองที่มีขนาดใหญ่ขึ้น (Yang และคณะ, 2007) อีกทั้งฟองอากาศจะมีจำนวนมากขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลก๊าซ ทำให้ฟองอากาศมีโอกาสปะทะและรวมตัวกันมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้เมื่ออัตราการไหลก๊าซสูง ฟองอากาศจึงมีขนาดใหญ่กว่าที่อัตราการไหลก๊าซต่ำ



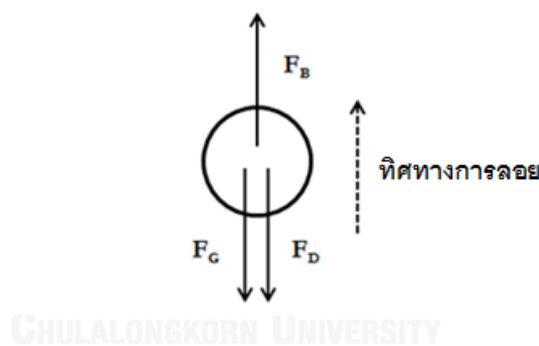
ภาพที่ 4.1 เปรียบเทียบขนาดพองอากาศที่เกิดจากหัวกำเนิดพองอากาศขนาดเล็กและขนาดใหญ่
เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก

4.1.2 ความเร็วลอยตัวของพองอากาศ

จากภาพที่ 4.2 แสดงความเร็วลอยตัวของพองอากาศที่เกิดจากหัวกำเนิดพองอากาศขนาดเล็กและขนาดใหญ่ เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก ซึ่งผลแสดงให้เห็นว่า ความเร็วลอยตัวของพองอากาศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออัตราการไหลก๊าซสูงขึ้น และพองอากาศขนาดใหญ่จะลอยขึ้นได้ไวกว่าพองอากาศขนาดเล็กอย่างชัดเจน ซึ่งที่อัตราการไหลก๊าซสำหรับงานวิจัยนี้ หัวกำเนิดพองอากาศขนาดเล็กทำให้เกิดพองอากาศที่มีความเร็วลอยตัวอยู่ในช่วง 11.28 – 15.92 เซนติเมตรต่อวินาที ในขณะที่หัวกำเนิดพองอากาศขนาดใหญ่ทำให้เกิดพองอากาศที่มีความเร็วลอยตัวอยู่ในช่วง 18.80 – 20.30 เซนติเมตรต่อวินาที ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก ขนาดพองอากาศส่งผลโดยตรงต่อความเร็วลอยตัวของพองอากาศ นั่นคือ พองอากาศขนาดใหญ่จะมีความเร็วลอยตัวสูง สอดคล้องกับปรากฏการณ์ของการลอยตัวของพองอากาศ ดังแสดงในภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.2 เปรียบเทียบความเร็วลอยตัวของฟองอากาศที่เกิดจากหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก และขนาดใหญ่ เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก



ภาพที่ 4.3 ปรากฏการณ์ของการลอยตัวของฟองอากาศ

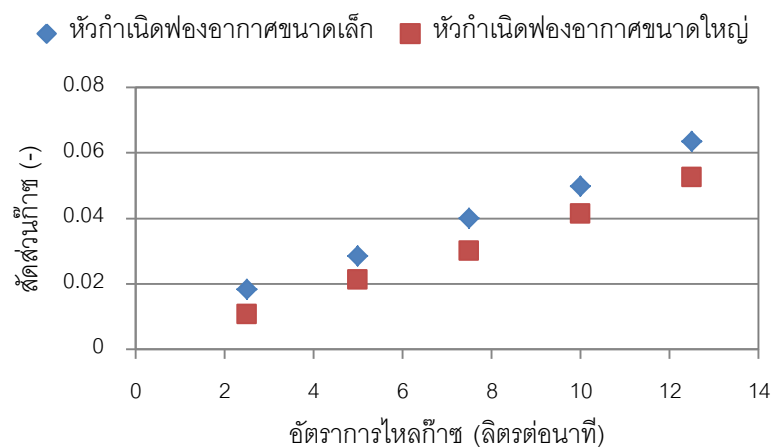
จากภาพที่ 4.3 เมื่อเปรียบว่า ฟองอากาศฟองหนึ่งคือวัตถุชิ้นหนึ่งที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ ฟองอากาศจึงสามารถลอยขึ้นได้ด้วยแรงลอยตัว (Buoyancy force, F_B) และมีแรงที่กระทำกับฟองอากาศในทิศทางตรงกันข้ามกับแรงลอยตัว ได้แก่ แรงโน้มถ่วง (Gravitational force, F_G) และแรงต้านการเคลื่อนที่ (Drag force, F_D) จากแรงทั้งหมดที่กระทำต่อฟองอากาศ และสมมติว่าฟองอากาศเป็นทรงกลม ทำให้เกิดความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลอยตัวของฟองอากาศกับขนาดฟองอากาศ ดังสมการ (4.1) ซึ่งจะเห็นว่า ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศจะสูงขึ้นเมื่อฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้น

$$U_B = \sqrt{\frac{4(\rho_W - \rho_B)gd_B}{3C_d\rho_W}} \quad (4.1)$$

- เมื่อ U_B คือ ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ, เมตรต่อวินาที
 ρ_W คือ ความหนาแน่นของน้ำ, กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
 ρ_B คือ ความหนาแน่นของฟองอากาศ, กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
 g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, เมตรต่อวินาทียกกำลังสอง
 d_B คือ ขนาดฟองอากาศ, เมตร
 C_d คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน, ไม่มีหน่วย

4.1.3 สัตส่วนก๊าซ

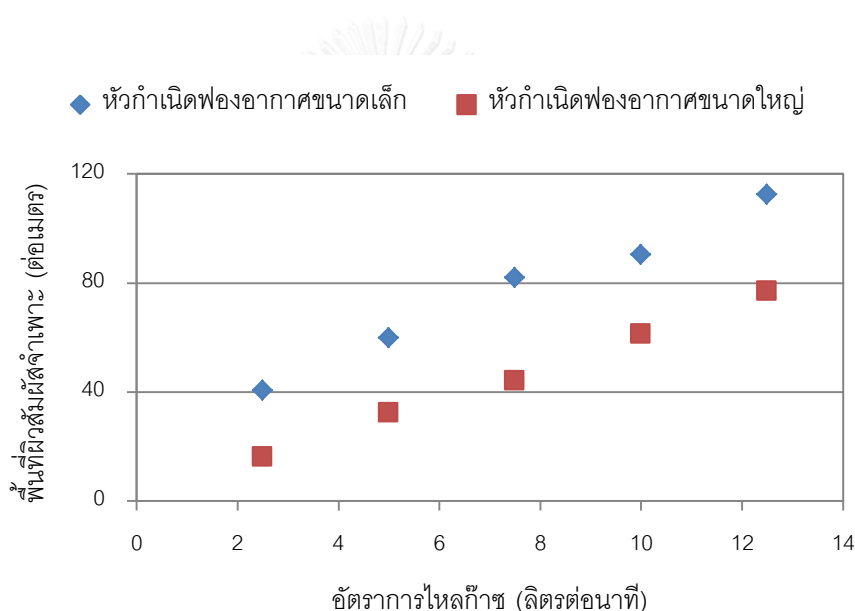
จากภาพที่ 4.4 แสดงสัตส่วนก๊าซที่เกิดจากหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กและขนาดใหญ่ เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก ซึ่งผลแสดงให้เห็นว่า สัตส่วนก๊าซมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลก๊าซสูงขึ้น และสัตส่วนก๊าซที่เกิดจากหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดใหญ่ค่อนข้างน้อยกว่าสัตส่วนก๊าซที่เกิดจากหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก ซึ่งที่อัตราการไหลก๊าซสำหรับงานวิจัยนี้ หัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กทำให้เกิดสัตส่วนก๊าซอยู่ในช่วง 0.0181 – 0.0634 ในขณะที่หัวกำเนิดฟองอากาศขนาดใหญ่ทำให้เกิดสัตส่วนก๊าซอยู่ในช่วง 0.0107 – 0.0525 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดใหญ่ทำให้เกิดฟองอากาศขนาดใหญ่ที่มีความเร็วลอยตัวสูง ฟองอากาศจึงลอยตัวออกจากน้ำได้ไว ใช้เวลาอยู่ในน้ำน้อยกว่าฟองอากาศขนาดเล็ก ทำให้มีก๊าซสะสมอยู่ในระบบน้อย



ภาพที่ 4.4 เปรียบเทียบสัตส่วนก๊าซที่เกิดจากหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กและขนาดใหญ่ เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก

4.1.4 พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ

จากภาพที่ 4.5 แสดงพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะที่เกิดจากหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กและขนาดใหญ่ เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก ซึ่งผลแสดงให้เห็นว่า พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลก๊าซสูงขึ้น และพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะที่เกิดจากหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดใหญ่จะน้อยกว่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะที่เกิดจากหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก ซึ่งที่อัตราการไหลก๊าซสำหรับงานวิจัยนี้ หัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะอยู่ในช่วง 40.65 – 112.41 ต่อเมตร ในขณะที่หัวกำเนิดฟองอากาศขนาดใหญ่ทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะอยู่ในช่วง 16.27 – 77.09 ต่อเมตร ทั้งนี้เป็นผลมาจากการคำนวณในสมการ (3.12) เมื่อหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดใหญ่ทำให้เกิดฟองอากาศขนาดใหญ่ และสัดส่วนก๊าซน้อย จึงทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะต่ำ



ภาพที่ 4.5 เปรียบเทียบพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะที่เกิดจากหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กและขนาดใหญ่ เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก

4.1.5 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม

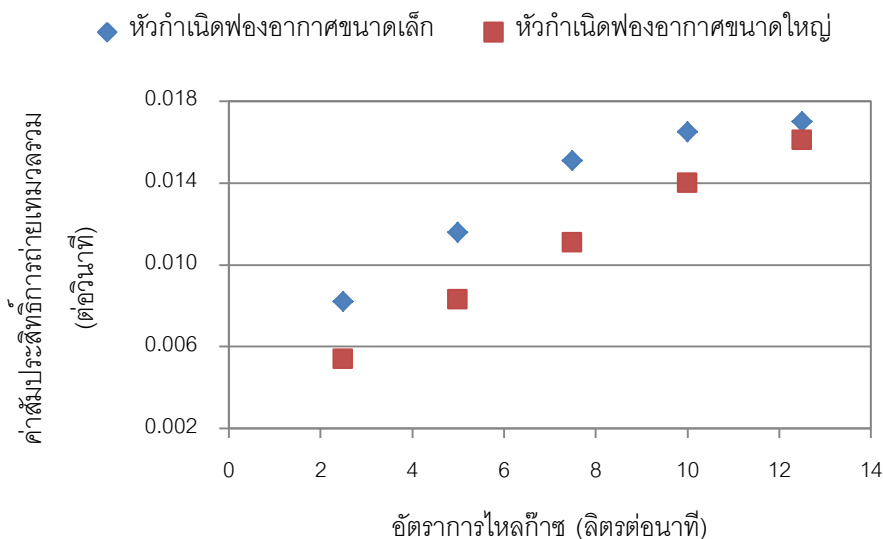
จากภาพที่ 4.6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมที่เกิดจากหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กและขนาดใหญ่ เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก ซึ่งผลแสดงให้เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลก๊าซสูงขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมที่เกิดจากหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดใหญ่จะมีค่าต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมที่เกิดจากหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก ซึ่งที่อัตราการไหลก๊าซสำหรับงานวิจัยนี้ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมที่เกิดจากหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กอยู่ในช่วง 0.0082 – 0.0170 ต่อวินาที ในขณะที่ค่า

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมที่เกิดจากหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดใหญ่อยู่ในช่วง 0.0054 – 0.0161 ต่อวินาที ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมแปรผันตรงกับพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ ดังแสดงในสมการ (4.2)

$$k_L a = k_L \times a \quad (4.2)$$

เมื่อ $k_L a$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม, ต่อวินาที
 k_L คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในเฟสของเหลว, เมตรต่อวินาที
 a คือ พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ, ต่อเมตร

เนื่องจากในช่วงการทดลองนี้ใช้น้ำประปาเป็นของเหลวดูดซึม ซึ่งสมบัติทางกายภาพของของเหลวดูดซึมจะใกล้เคียงกันในทุกการทดลอง ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในเฟสของเหลวมีค่าค่อนข้างคงที่ และมีค่าใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในเฟสของเหลวของน้ำประปา ซึ่งอยู่ในช่วง $1 - 4 \times 10^{-4}$ เมตรต่อวินาที (Sardeing และคณะ, 2006)

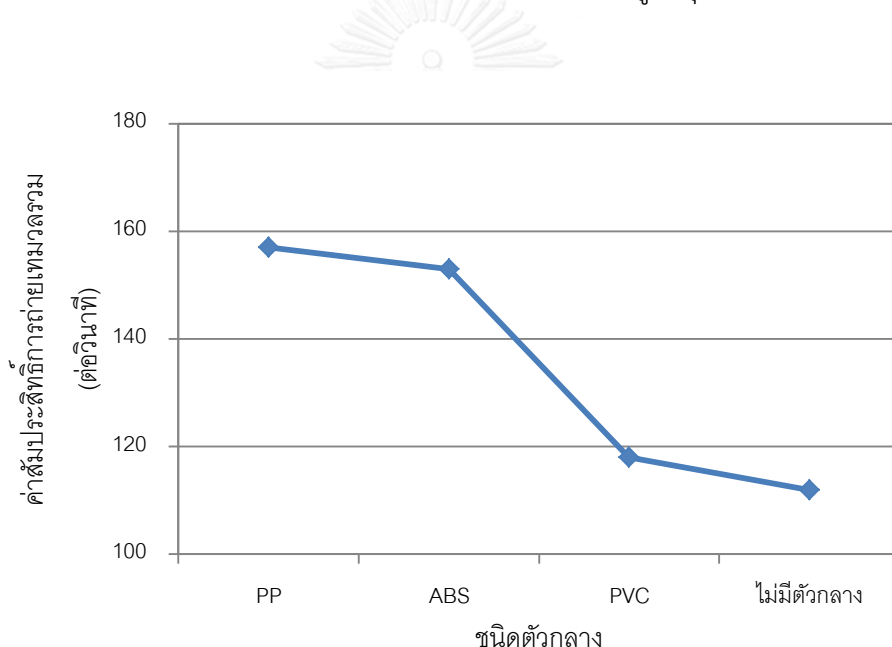


ภาพที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมที่เกิดจากหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กและขนาดใหญ่ เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก

จากการเปรียบเทียบผลจากการใช้หัวกำเนิดฟองอากาศที่ต่างกัน ทำให้สรุปได้ว่าหัวกำเนิดฟองอากาศที่มีรูขนาดเล็ก ให้ผลที่ดีกว่าหัวกำเนิดฟองอากาศที่มีรูขนาดใหญ่ ทั้งในด้านตัวแปร

ทางด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ และตัวแปรทางด้าน การถ่ายเทมวล คือ มีพื้นที่ผิวสัมผัส จำเพาะและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมสูง แต่ถึงอย่างไรก็ตาม หัวกำเนิดฟองอากาศที่มีรูขนาดเล็กหรือมีจำนวนรูน้อย มักจะต้องการพลังงานสูงในการเติมก๊าซเข้าสู่ระบบ (Bouaifi และคณะ, 2001, Loubière และคณะ, 2003, Painmanakul และคณะ, 2004) ดังนั้น จึงต้องคำนึงถึง ประสิทธิภาพในเชิงพลังงานในการเลือกใช้หัวกำเนิดฟองอากาศด้วยเช่นกัน

เมื่อถึงขั้นนี้ จึงขออ้างอิงถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 วราลี วิศาลโกชะ และคณะ (2556) ศึกษาผลจากการใช้ตัวกลางพลาสติกแตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ พอลิโพรไพลีน (PP) อะครีโลไนไตรล์บิวทาไดอีนสไตรีน (ABS) และพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) ซึ่งพบว่าตัวกลางพลาสติก ชนิดพอลิโพรไพลีน (PP) ทำให้เกิดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสูงที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมจากการใช้ตัวกลางพลาสติกต่างชนิด

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมจะขึ้นกับขนาดฟองอากาศ ฟองอากาศยังมีขนาดเล็ก ยังมีพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะระหว่างเฟสสูง ความหนาแน่นของตัวกลางแต่ละชนิดเป็นตัวแปรสำคัญ ซึ่งจะส่งผลต่อลักษณะการลอยตัวและพฤติกรรมของตัวกลางในของเหลว โดยตัวกลางพอลิโพรไพลีน (PP) และอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดอีนสไตรีน (ABS) ซึ่งมีความหนาแน่นประมาณ 900 และ 1,040 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ จะแขวนลอยในของเหลว ตัวกลางพอลิโพรไพลีน (PP) ซึ่งมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำจะทำให้ฟองอากาศแตกตัวและมีขนาดเล็กได้มากกว่าเมื่อใช้ตัวกลางอะครีโลไน

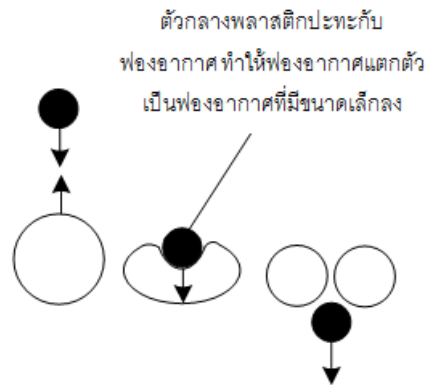
ไตรลิวทาไดอินสไตรีน (ABS) ซึ่งมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับน้ำ จะกระทำตัวเสมือนเป็นอนุภาคน้ำ และลอยตัวไปกับฟองอากาศ ในขณะที่ตัวกลางพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) ซึ่งมีความหนาแน่นประมาณ 1,490 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จะจมอยู่ที่ด้านล่างของคอลัมน์ ทำให้ฟองอากาศมีแนวโน้มรวมตัวกันมากกว่าแตกตัว การถ่ายเทมวลจึงแย่ที่สุดในบรรดาตัวกลางทั้งหมด ดังนั้น ในหัวข้อต่อไปจึงเป็นการศึกษาการใช้ตัวกลางพอลิโพรไพลีน (PP) กับหัวกำเนิดฟองอากาศต่างขนาดกัน

4.2 ผลจากการใช้ตัวกลางพลาสติกกับหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กและขนาดใหญ่

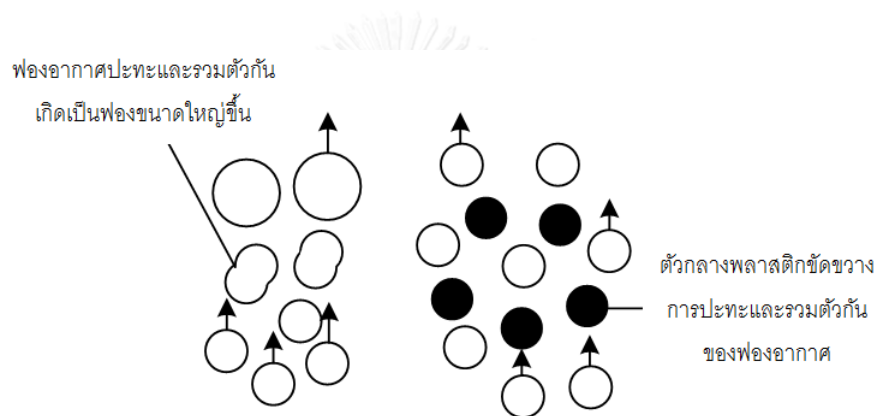
4.2.1 ขนาดฟองอากาศ

ขนาดฟองอากาศที่เกิดจากการใช้ตัวกลางพลาสติก แสดงภาพที่ 4.8 ซึ่งผลแสดงให้เห็นว่า ขนาดฟองอากาศมีแนวโน้มเล็กลงเมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกทุกรูปทรง โดยลดลงอย่างชัดเจนตามปริมาณตัวกลางพลาสติกเมื่อใช้หัวกำเนิดฟองอากาศขนาดใหญ่ แต่ในเชิงรูปทรงตัวกลางไม่เห็นผลแตกต่างที่ชัดเจนนัก

การใช้ตัวกลางพลาสติกส่งผลให้ฟองอากาศมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับระบบที่ไม่ใช้ตัวกลางพลาสติก อาจเนื่องมาจากสาเหตุ 2 กรณี กรณีแรกคือ ฟองอากาศปะทะกับตัวกลางพลาสติก ทำให้ฟองอากาศแตกตัวเป็นฟองอากาศที่มีขนาดเล็กลง (Luo, 1993) ดังแสดงในภาพที่ 4.9 ส่วนกรณีที่สองคือ จากที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ เมื่อฟองอากาศลอยตัวขึ้นจากหัวกำเนิดฟองอากาศ ฟองอากาศจะปะทะและรวมตัวกันทำให้เกิดฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่เมื่อมีตัวกลางพลาสติกในระบบ ตัวกลางพลาสติกจะกระทำตัวเสมือนตัวยับยั้งไม่ให้ฟองอากาศรวมตัวกัน ทำให้ขนาดฟองอากาศเฉลี่ยมีขนาดเล็กกว่าเมื่อไม่ใช้ตัวกลาง (Lindner และคณะ, 1988) ดังภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.9 การแตกตัวของฟองอากาศโดยตัวกลางพลาสติก



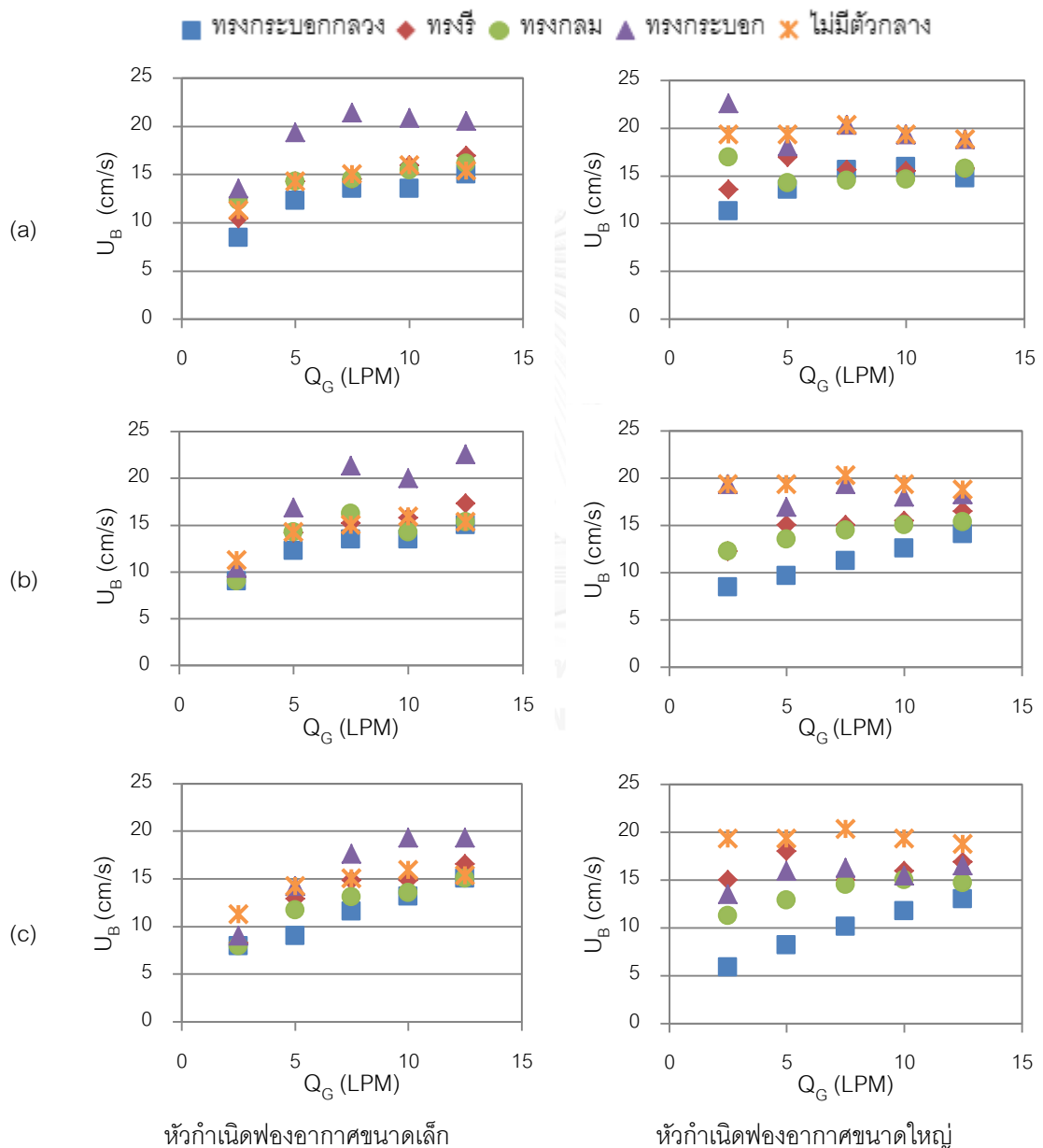
ภาพที่ 4.10 การยับยั้งการปะทะและรวมตัวกันของฟองอากาศด้วยตัวกลางพลาสติก

จากที่เห็นได้อย่างชัดเจนว่า ตัวกลางพลาสติกในระบบหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดใหญ่สามารถลดขนาดฟองอากาศได้มากกว่าระบบหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก ซึ่งอาจเป็นเพราะฟองอากาศขนาดใหญ่มีโอกาสปะทะกับตัวกลางพลาสติกได้ง่ายกว่าฟองอากาศขนาดเล็ก ทำให้ตัวกลางพลาสติกมีโอกาสในการยับยั้งการรวมตัวของฟองอากาศในระบบหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดใหญ่มากกว่าในระบบหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก

4.2.2 ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ

ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศที่เกิดจากการใช้ตัวกลางพลาสติก แสดงดังภาพที่ 4.11 ซึ่งผลแสดงให้เห็นว่า ตัวกลางพลาสติกแต่ละรูปทรงส่งผลต่อความเร็วลอยตัวของฟองอากาศไม่เหมือนกัน โดยในกรณีที่ใช้หัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก ตัวกลางทรงกระบอก (C) จะทำให้ฟองอากาศลอยตัวเร็วขึ้น ตัวกลางทรงรี (E) และตัวกลางทรงกลม (S) แทบไม่ส่งผลต่อความเร็วลอยตัวของ

ฟองอากาศ และตัวกลางทรงกระบอกกลม (R) จะทำให้ฟองอากาศลอยตัวช้าลง ในกรณีที่ใช้หัวกำเนิดฟองอากาศขนาดใหญ่ ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศมีแนวโน้มลดลง โดยตัวกลางทรงกระบอกกลม (R) ทำให้ฟองอากาศลอยตัวช้าที่สุด รองลงมาเป็นตัวกลางทรงกลม (S) ตัวกลางทรงรี (E) และตัวกลางทรงกระบอก (C) ทำให้ฟองอากาศลอยตัวเร็วที่สุด และไม่ว่าจะใช้หัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กหรือขนาดใหญ่ เมื่อเพิ่มปริมาณตัวกลางพลาสติก พบว่าทำให้ฟองอากาศลอยตัวช้าลง



ภาพที่ 4.11 เปรียบเทียบความเร็วลอยตัวของฟองอากาศที่เกิดจากหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก และขนาดใหญ่ เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ (a) 2 % (b) 5 % และ (c) 10 % โดยปริมาตร

ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศที่เกิดจากการใช้ตัวกลาง ที่เป็นแบบนี้ อาจเนื่องมาจากความเร็วแทรกผ่านระหว่างตัวกลาง (Interstitial velocity) ที่เกิดจากความพรุนของชั้นตัวกลางพลาสติก และความเร็วผิว (Superficial velocity) ดังแสดงในสมการ (4.3) และสมการ (4.4) (Cohen และ Metzner, 1981, Subagyo และคณะ, 1998)

$$V_i = \frac{V_s}{\epsilon} \quad (4.3)$$

$$V_s = \frac{Q_g}{A} \quad (4.4)$$

เมื่อ V_i คือ ความเร็วแทรกผ่านระหว่างตัวกลาง, เมตรต่อวินาที

V_s คือ ความเร็วผิว, เมตรต่อวินาที

ϵ คือ ความพรุนของชั้นตัวกลาง, ไม่มีหน่วย

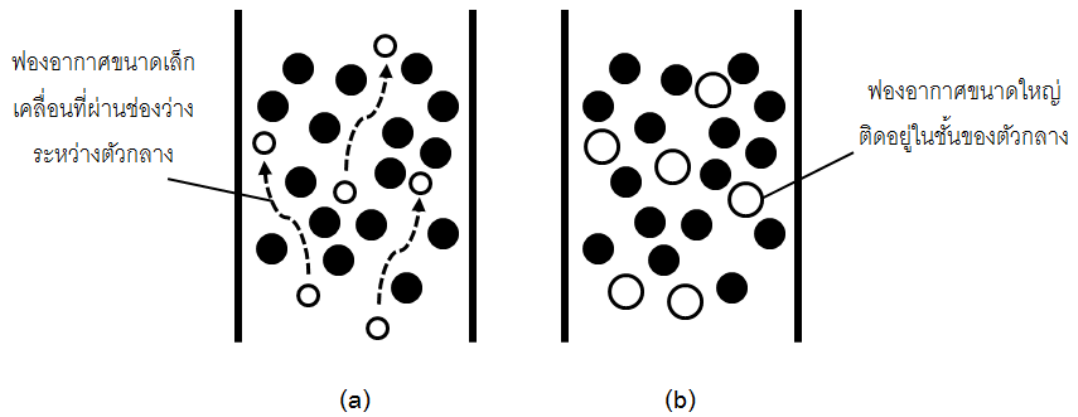
Q_g คือ อัตราการไหลก๊าซ, ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

A คือ พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์, ตารางเมตร

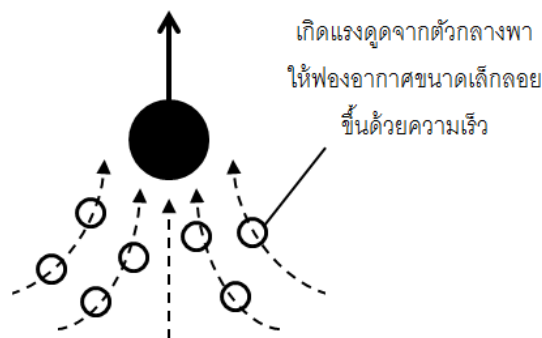
ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศอาจเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วแทรกผ่านระหว่างตัวกลางเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อใช้ตัวกลางที่มีความพรุนของชั้นตัวกลางน้อย (ดังสมการ (4.3)) ดังนั้น จากตารางที่ 3.1 ตัวกลางทรงกระบอก (C) ซึ่งมีความพรุนของชั้นตัวกลางน้อยที่สุด ($\epsilon = 0.30$) จึงมีความเร็วลอยตัวของฟองอากาศสูงที่สุด ในขณะที่ตัวกลางทรงรี (E) และตัวกลางทรงกลม (S) มีความพรุนของชั้นตัวกลางใกล้เคียงกัน ($\epsilon = 0.37$ และ $\epsilon = 0.38$ ตามลำดับ) จึงมีความเร็วลอยตัวของฟองอากาศใกล้เคียงกัน และตัวกลางทรงกระบอกกลวง (R) ซึ่งมีความพรุนของชั้นตัวกลางมากที่สุด ($\epsilon = 0.68$) จึงมีความเร็วลอยตัวของฟองอากาศน้อยที่สุด

เมื่อเปรียบเทียบความเร็วลอยตัวของฟองอากาศในระบบหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กและขนาดใหญ่ พบว่าตัวกลางพลาสติกมีแนวโน้มทำให้ฟองอากาศลอยตัวช้าลงในระบบหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดใหญ่ ซึ่งอาจเป็นเพราะการลอยของฟองอากาศขนาดใหญ่ถูกขัดขวางโดยตัวกลางพลาสติก และฟองอากาศจะยิ่งลอยช้าลงเมื่อเพิ่มปริมาณตัวกลางพลาสติกเนื่องจากมีตัวกลางมาขวางทิศทางการลอยตัวมากขึ้น ในขณะที่ตัวกลางพลาสติกมีแนวโน้มทำให้ฟองอากาศลอยตัวเร็วขึ้นในระบบหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก ซึ่งอาจเป็นเพราะฟองอากาศขนาดเล็กสามารถเคลื่อนที่ไปตามช่องว่างระหว่างตัวกลางได้สะดวกกว่าฟองอากาศขนาดใหญ่ ดังแสดงในภาพที่ 4.12 อีกทั้งเมื่อตัวกลางพลาสติกลอยขึ้นเนื่องจากปล่อยก๊าซเข้าระบบ ตัวกลางพลาสติกซึ่งมีขนาดค่อนข้างใหญ่กว่า

ฟองอากาศ และเคลื่อนที่ขึ้นด้วยความเร็ว จะช่วยพาฟองอากาศขนาดเล็กให้ลอยขึ้นด้วยความเร็ว (Li และคณะ, 1999) ดังแสดงในภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.12 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ผ่านชั้นตัวกลางของฟองอากาศ
(a) ขนาดเล็ก (b) ขนาดใหญ่

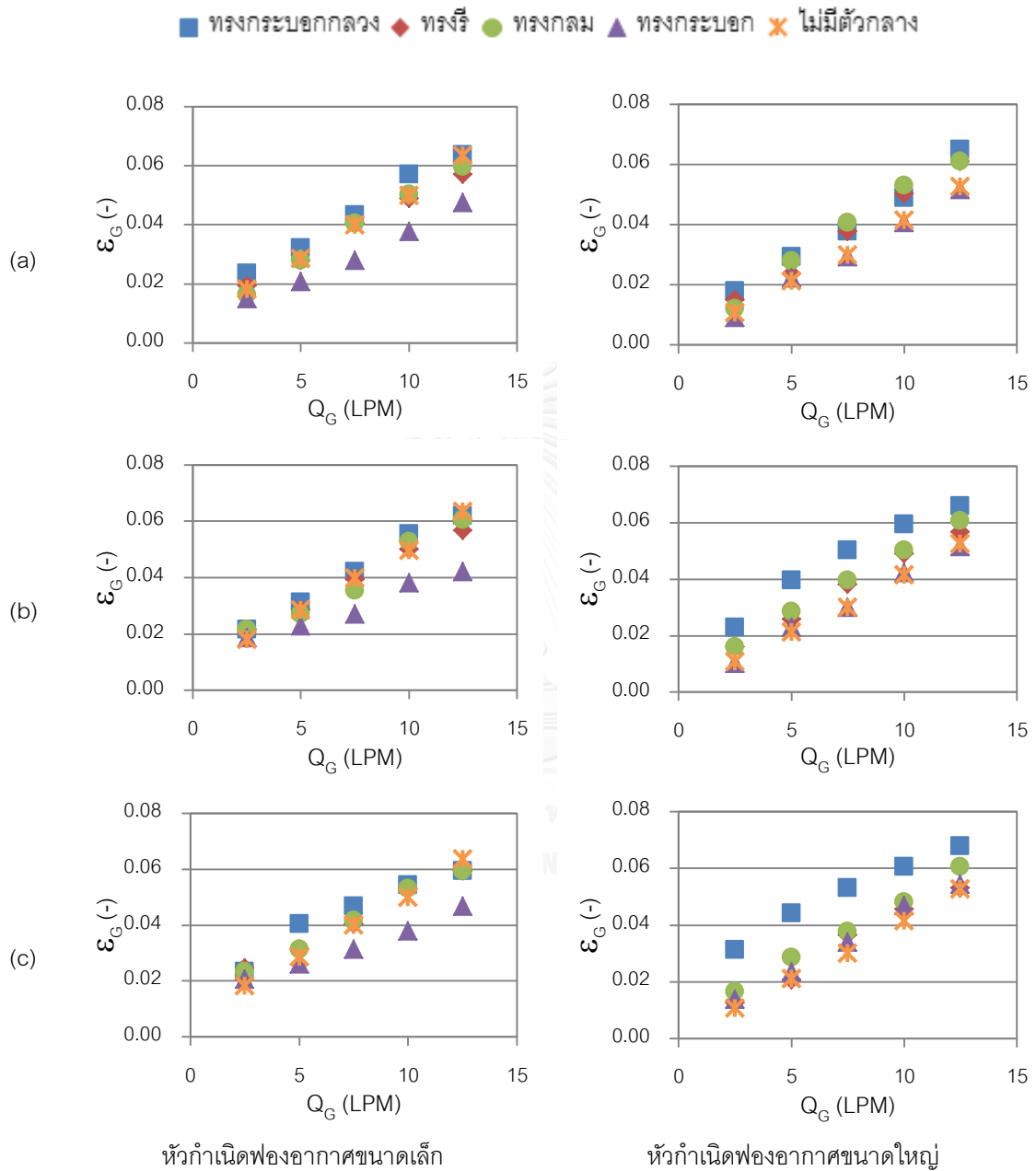


ภาพที่ 4.13 ฟองอากาศขนาดเล็กลอยตัวเร็วขึ้นด้วยแรงพาจากตัวกลางพลาสติก

4.2.3 สัดส่วนก๊าซ

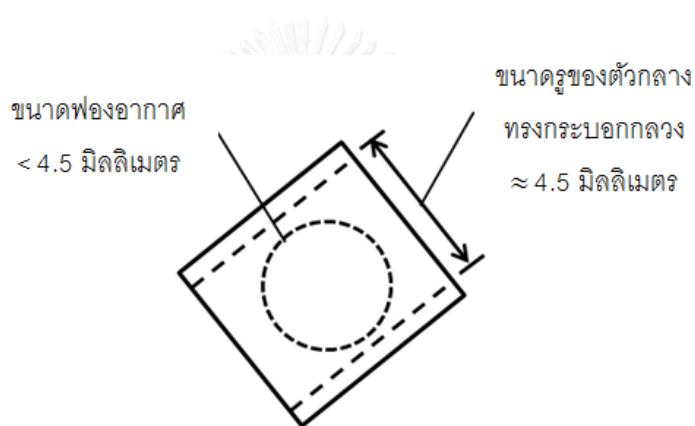
สัดส่วนก๊าซที่เกิดจากการใช้ตัวกลางพลาสติก แสดงดังภาพที่ 4.14 ซึ่งผลแสดงให้เห็นว่า ตัวกลางพลาสติกแต่ละรูปทรงส่งผลต่อสัดส่วนก๊าซไม่เหมือนกัน โดยในกรณีที่ใช้หัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก ตัวกลางทรงกระบอก (C) จะทำให้สัดส่วนก๊าซลดลง ตัวกลางทรงรี (E) และตัวกลางทรงกลม (S) แทบไม่ส่งผลต่อสัดส่วนก๊าซ และตัวกลางทรงกระบอกกลวง (R) จะทำให้สัดส่วนก๊าซเพิ่มขึ้น ในกรณีที่ใช้หัวกำเนิดฟองอากาศขนาดใหญ่ สัดส่วนก๊าซมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยตัวกลางทรงกระบอกกลวง (R) ทำให้มีสัดส่วนก๊าซมากที่สุด รองลงมาเป็นตัวกลางทรงกลม (S) ตัวกลางทรงรี (E)

และตัวกลางทรงกระบอก (C) ทำให้สัดส่วนก๊าซน้อยที่สุด และไม่ว่าจะใช้หัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กหรือขนาดใหญ่ เมื่อเพิ่มปริมาณตัวกลางพลาสติก พบว่าทำให้สัดส่วนก๊าซเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.14 เปรียบเทียบสัดส่วนก๊าซที่เกิดจากหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กและขนาดใหญ่ เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ (a) 2 % (b) 5 % และ (c) 10 % โดยปริมาตร

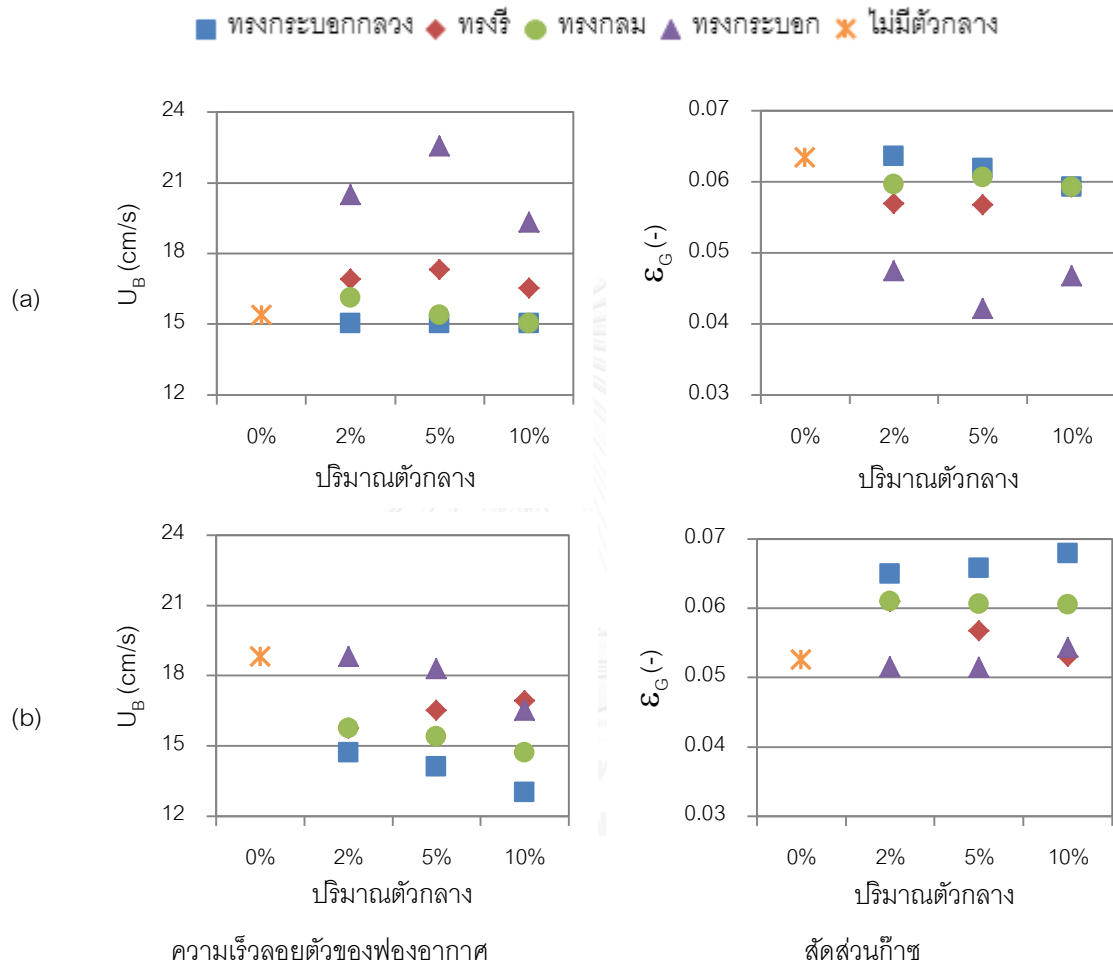
สัดส่วนก๊าซที่เกิดจากการใช้ตัวกลางพลาสติกสอดคล้องกับความเร็วลอยตัวของ ฟองอากาศ กล่าวคือ เมื่อฟองอากาศมีความเร็วลอยตัวสูง ก็จะสามารถลอยออกจากระบบได้เร็ว ทำให้มีปริมาณก๊าซสะสมอยู่ในระบบน้อย ดังนั้น เมื่อตัวกลางทรงกระบอก (C) ทำให้ฟองอากาศลอยตัวเร็วที่สุด จึงทำให้เกิดสัดส่วนก๊าซต่ำที่สุด ในขณะที่ตัวกลางทรงรี (E) และตัวกลางทรงกลม (S) มีความเร็วลอยตัวของฟองอากาศใกล้เคียงกัน จึงมีสัดส่วนก๊าซใกล้เคียงกันด้วย และตัวกลางทรงกระบอกกลาง (R) ทำให้ฟองอากาศลอยตัวช้าที่สุด จึงทำให้เกิดสัดส่วนก๊าซสูงที่สุด นอกจากนี้ยังมีความเป็นไปได้อีกว่า ตัวกลางทรงกระบอกกลาง (R) จะสามารถดักจับฟองอากาศไว้ในรูของตัวกลาง เมื่อฟองอากาศมีขนาดเล็กกว่ารูของตัวกลาง ดังแสดงในภาพที่ 4.15 เมื่อฟองอากาศถูกดักจับไว้ในระบบได้มาก สัดส่วนก๊าซก็ย่อมสูงตาม



ภาพที่ 4.15 การดักจับฟองอากาศของตัวกลางทรงกระบอกกลาง

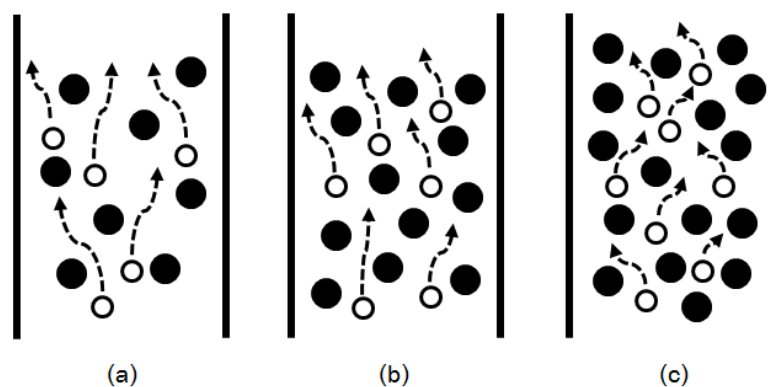
ปริมาณตัวกลางที่ใช้จะส่งผลโดยตรงต่อสัดส่วนก๊าซ และขึ้นกับขนาดหัวกำเนิด ฟองอากาศด้วย ตามที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ สัดส่วนก๊าซจะสัมพันธ์กับความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ ถ้าฟองอากาศลอยตัวได้ช้า ก๊าซจะสะสมอยู่ในระบบได้นานและทำให้สัดส่วนก๊าซสูง และถ้า ฟองอากาศมีขนาดเล็ก ก็จะสามารถลอยผ่านตัวกลางได้ง่าย ก๊าซจะสะสมอยู่ในระบบได้น้อยและทำ ให้สัดส่วนก๊าซต่ำ ดังนั้นเมื่อพิจารณาในเชิงของปริมาณตัวกลางพลาสติก ในกรณีที่ฟองอากาศมีขนาด เล็ก จากภาพที่ 4.16(a) ฟองอากาศจะลอยผ่านตัวกลางด้วยความเร็วที่ค่อนข้างสม่ำเสมอไม่ว่าจะใช้ ตัวกลางพลาสติกปริมาณเท่าไร จึงทำให้สัดส่วนก๊าซมีแนวโน้มคงที่เช่นกัน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณตัวกลาง พลาสติกมากๆ ฟองอากาศขนาดเล็กก็มีแนวโน้มจะลอยผ่านตัวกลางได้ยากขึ้นเนื่องจากถูกขัดขวาง ด้วยตัวกลาง ทำให้ฟองอากาศลอยตัวได้ช้าลง และเกิดก๊าซสะสมในระบบได้มากขึ้น สัดส่วนก๊าซก็ สูงขึ้น

ในกรณีที่ฟองอากาศมีขนาดใหญ่ จากภาพที่ 4.16(b) ฟองอากาศลอยตัวผ่านตัวกลางได้ยากและมีแนวโน้มจะถูกขัดขวางมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณตัวกลาง ทำให้ฟองอากาศลอยตัวช้าลง และส่งผลให้ก๊าซสะสมในระบบมากขึ้น จึงมีส่วนก๊าซสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณตัวกลางพลาสติกในระบบ



ภาพที่ 4.16 เปรียบเทียบผลกระทบของปริมาณตัวกลางพลาสติกต่อความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ และสัดส่วนก๊าซ ในกรณีที่เป็น (a) ฟองอากาศขนาดเล็ก และ (b) ฟองอากาศขนาดใหญ่

เพื่ออาจให้เห็นภาพสิ่งที่อธิบายไว้ในข้างต้นได้ชัดเจนขึ้น ฟองอากาศจะเคลื่อนผ่านตัวกลางพลาสติกได้ดีเมื่อมีตัวกลางปริมาณน้อย และมีแนวโน้มจะถูกขัดขวางการลอยตัวของฟองอากาศเมื่อมีตัวกลางปริมาณมากๆ ดังที่ยกตัวอย่างในภาพที่ 4.17



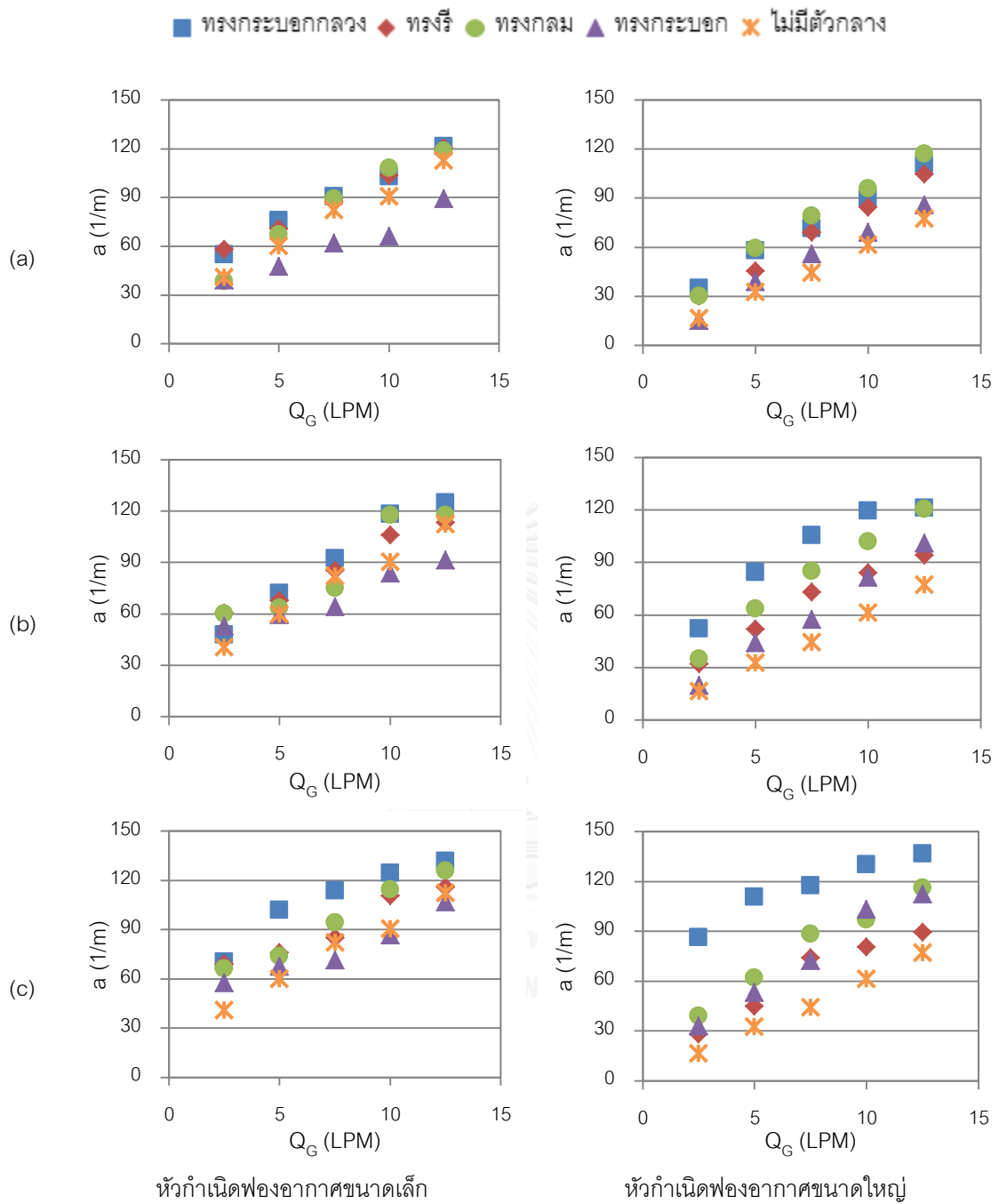
ภาพที่ 4.17 เปรียบเทียบการลอยตัวของฟองอากาศในตัวกลางพลาสติกปริมาณ

(a) 2 % (b) 5% และ (c) 10 % โดยปริมาตร

4.2.4 พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ

พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะที่เกิดจากการใช้ตัวกลางพลาสติก แสดงดังภาพที่ 4.18 ซึ่งผลแสดงให้เห็นว่า ตัวกลางพลาสติกแต่ละรูปทรงส่งผลต่อพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะไม่เหมือนกัน โดยในกรณีที่ใช้หัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก ตัวกลางทรงกระบอก (C) จะทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะลดลง ในขณะที่ตัวกลางทรงรี (E) ตัวกลางทรงกลม (S) และตัวกลางทรงกระบอกกลวง (R) มีแนวโน้มทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะเพิ่มขึ้น ซึ่งตัวกลางทรงกระบอกกลวง (R) ทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะสูงที่สุด ในกรณีที่ใช้หัวกำเนิดฟองอากาศขนาดใหญ่ พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยตัวกลางทรงกระบอกกลวง (R) ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะมากที่สุด รองลงมาเป็นตัวกลางทรงกลม (S) ตัวกลางทรงรี (E) และตัวกลางทรงกระบอก (C) ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะน้อยที่สุด และไม่ว่าจะใช้หัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กหรือขนาดใหญ่ เมื่อเพิ่มปริมาณตัวกลางพลาสติก พบว่าทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะเพิ่มขึ้น

พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะมีความสอดคล้องกับสัดส่วนก๊าซและขนาดฟองอากาศ กล่าวคือ พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะจะเพิ่มขึ้น ก็ต่อเมื่อสัดส่วนก๊าซเพิ่มขึ้นและ/หรือเมื่อฟองอากาศมีขนาดเล็กลงตามสมการ (3.12) ดังนั้น ในกรณีตัวกลางทรงกระบอก (C) ซึ่งทำให้เกิดสัดส่วนก๊าซน้อยกว่าเมื่อไม่ใช้ตัวกลางพลาสติก จึงทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะน้อยกว่าเมื่อไม่ใช้ตัวกลางพลาสติก ในขณะที่ตัวกลางทรงรี (E) และตัวกลางทรงกลม (S) ซึ่งทำให้เกิดสัดส่วนก๊าซใกล้เคียงกับเมื่อไม่ใช้ตัวกลางพลาสติก แต่มีขนาดฟองอากาศเล็กกว่า จึงทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะสูงกว่าเมื่อไม่ใช้ตัวกลางพลาสติก และตัวกลางทรงกระบอกกลวง (R) ซึ่งทำให้เกิดสัดส่วนก๊าซสูงที่สุด จึงทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะสูงที่สุด

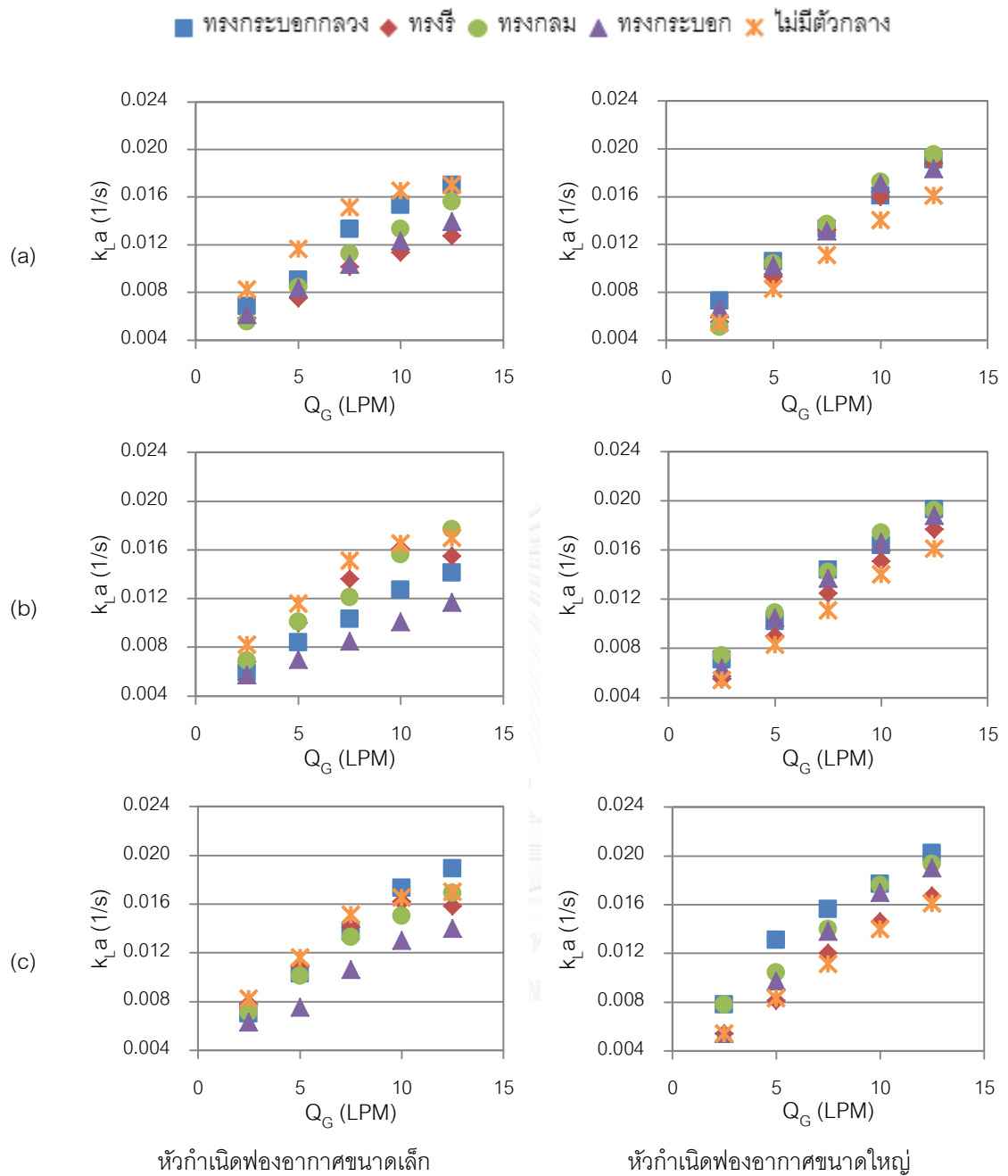


ภาพที่ 4.18 เปรียบเทียบพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะที่เกิดจากหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กและขนาดใหญ่ เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ (a) 2 % (b) 5 % และ (c) 10 % โดยปริมาตร

4.2.5 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมที่เกิดจากการใช้ตัวกลางพลาสติก แสดงดังภาพที่ 4.19 ซึ่งผลแสดงให้เห็นว่า เมื่อใช้หั่วกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กพร้อมกับตัวกลางพลาสติกมีแนวโน้มทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลมีค่าลดลง โดยตัวกลางทรงกระบอก (C) จะทำให้เกิดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมต่ำที่สุด ในขณะที่ตัวกลางทรงรี (E) และตัวกลางทรงกลม (S) ทำให้เกิดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมใกล้เคียงกัน และตัวกลางทรงกระบอกกลวง (R) ทำให้เกิดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมที่สูงกว่าเล็กน้อย ในขณะที่เมื่อใช้หั่วกำเนิดฟองอากาศขนาดใหญ่ร่วมกับตัวกลางพลาสติกมีแนวโน้มทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมเพิ่มขึ้น โดยตัวกลางทรงกระบอกกลวง (R) ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมสูงที่สุด และไม่ว่าจะใช้หั่วกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กหรือขนาดใหญ่ เมื่อเพิ่มปริมาณตัวกลางพลาสติก พบว่าทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมเพิ่มขึ้น

โดยปกติ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมจะเกิดขึ้นจากพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ แต่ผลกลับพบว่า แม้ว่าตัวกลางทรงรี (E) และตัวกลางทรงกลม (S) จะทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะเพิ่มขึ้น แต่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมกลับไม่เพิ่มขึ้นตาม ทั้งนี้อาจเพราะพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะเพิ่มขึ้นไม่มากนัก ถึงอย่างไรก็ตาม ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมยังคงสอดคล้องกับพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ กล่าวคือ ในกรณีตัวกลางทรงกระบอก (C) ซึ่งทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะต่ำ ก็ทำให้เกิดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมต่ำด้วย ในขณะที่ตัวกลางทรงกระบอกกลวง (R) ซึ่งทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะสูงที่สุด ก็มีแนวโน้มทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมสูงเช่นกัน

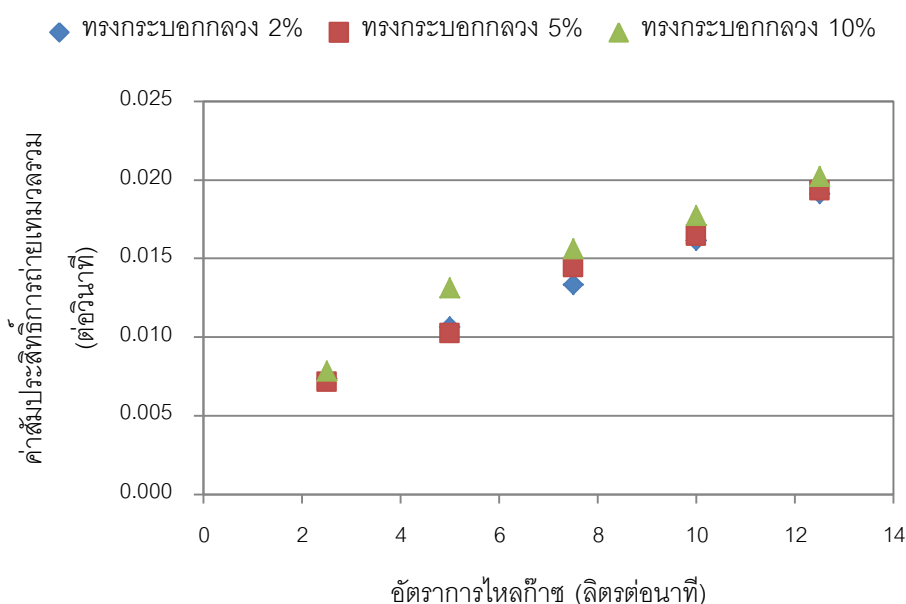


ภาพที่ 4.19 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมที่เกิดจากหัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ (a) 2 % (b) 5 % และ (c) 10 % โดยปริมาตร

จากจุดนี้ถือเป็นการเสร็จสิ้นการทดลองช่วงที่ 1 จึงพอสรุปตัวแปรต้นที่ทำให้ได้ผลการทดลองดีที่สุด ซึ่งในงานวิจัยนี้ค่านิ่งถึงอัตราการดูดซึม ดังนั้น ตัวแปรตามที่น่าสนใจจึงเป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม ซึ่งสามารถสรุปตามตัวแปรต้นได้ดังต่อไปนี้

1. อัตราการไหลก๊าซ

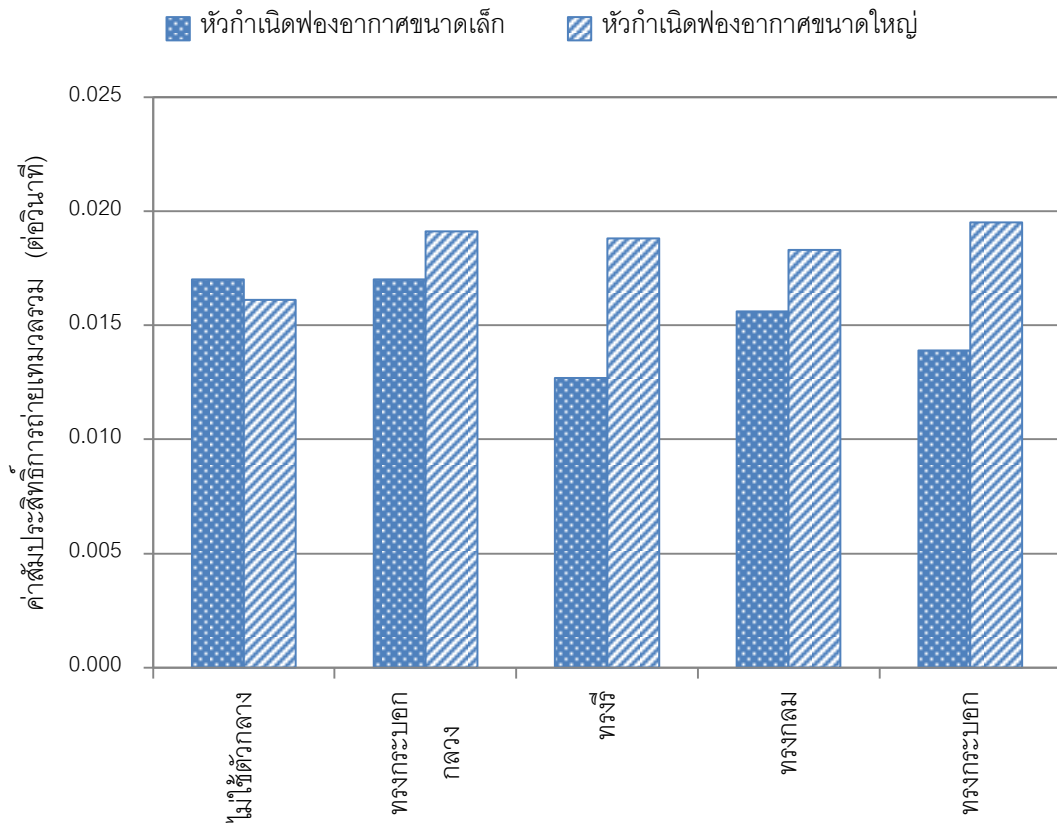
ภาพที่ 4.20 เป็นตัวอย่างกรณีที่ใช้ตัวกลางพลาสติกทรงกระบอกกลวง (R) ปริมาณต่างๆ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอัตราการไหลก๊าซ ดังนั้น อัตราการไหลก๊าซที่ดูดซึมได้ดีที่สุดในงานวิจัยนี้ คือ 12.5 ลิตรต่อนาที



ภาพที่ 4.20 เปรียบเทียบผลกระทบของอัตราการไหลก๊าซต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม

2. ขนาดหัวกำเนิดฟองอากาศ

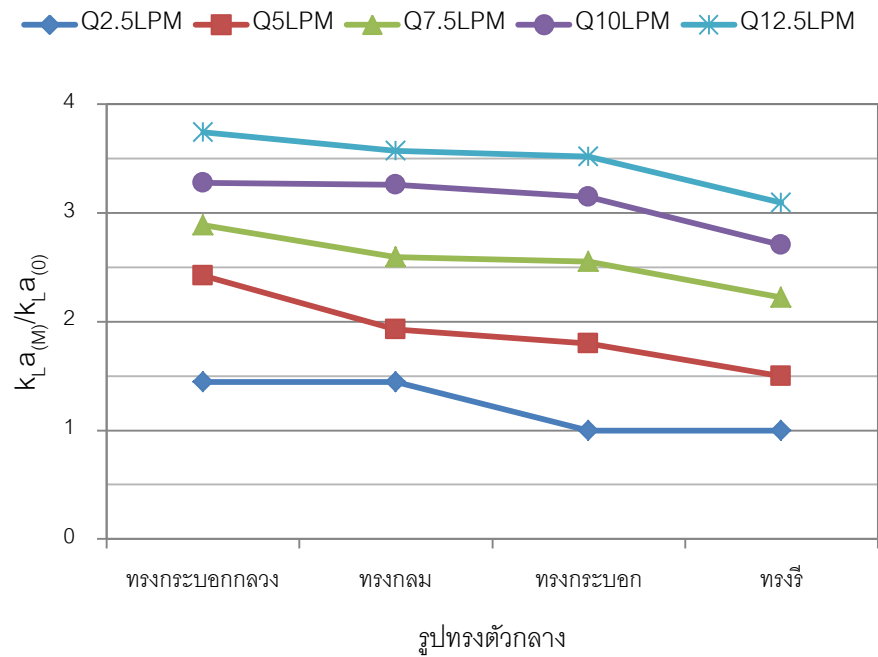
ภาพที่ 4.21 เป็นตัวอย่างกรณีที่ใช้ตัวกลางพลาสติก 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่อัตราการไหล 12.5 ลิตรต่อนาที พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมมีแนวโน้มสูงกว่าเมื่อใช้หัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก แต่ว่าเมื่อทดลองร่วมกับตัวกลางพลาสติกกลับพบว่า หัวกำเนิดฟองอากาศที่ช่วยในการดูดซึมดีกว่า คือ หัวกำเนิดฟองอากาศขนาดใหญ่



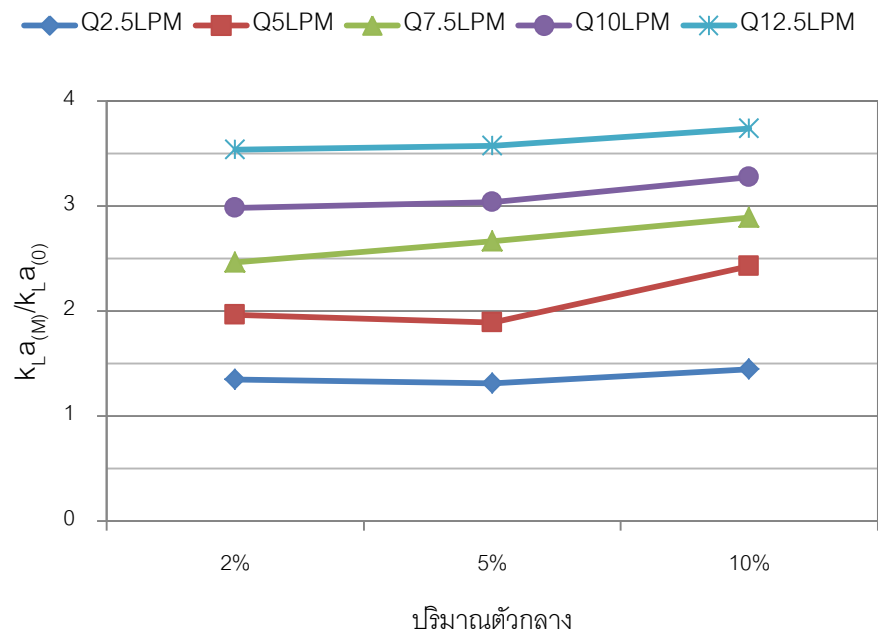
ภาพที่ 4.21 เปรียบเทียบผลกระทบของหัวกำเนิดฟองอากาศต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม

3. รูปทรงและปริมาณของตัวกลางพลาสติก

ภาพที่ 4.22 และ 4.23 แสดงสัดส่วนของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมเมื่อใช้ตัวกลางกับเมื่อไม่ใช้ตัวกลาง ($k_{La(M)}/k_{La(0)}$) ที่มีผลมาจากรูปทรงและปริมาณของตัวกลางพลาสติกตามลำดับ จะเห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมจะมีค่าสูงที่สุดเมื่อใช้ตัวกลางทรงกระบอก กว้าง (R) และมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณตัวกลาง ดังนั้น ตัวกลางพลาสติกที่ช่วยในการดูดซึมได้ดีที่สุด คือ ตัวกลางทรงกระบอก กว้าง (R) ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร



ภาพที่ 4.22 เปรียบเทียบผลกระทบของรูปทรงตัวกลางต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม



ภาพที่ 4.23 เปรียบเทียบผลกระทบของปริมาณตัวกลางต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม

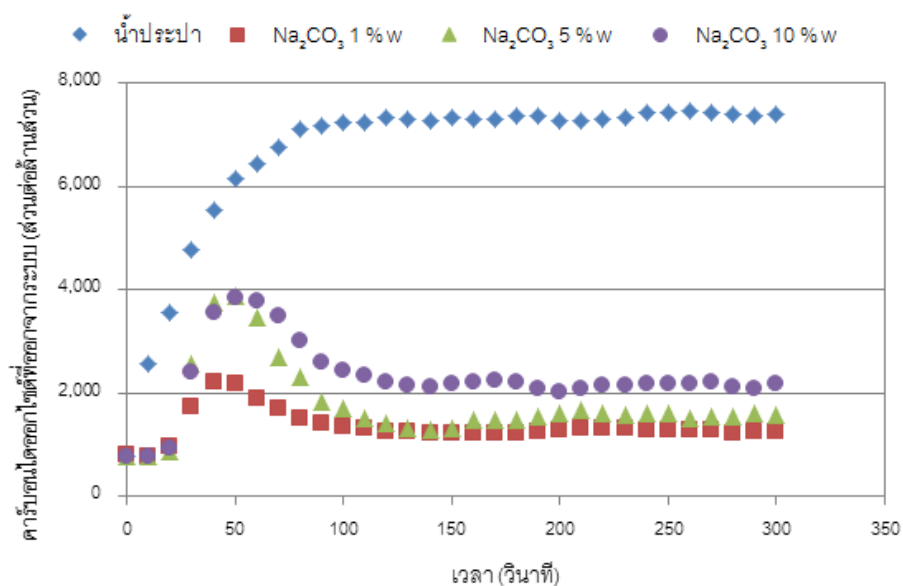
4.3 การเลือกใช้ของเหลวดูดซึมในการดูดซึมทางเคมี

ในหัวข้อนี้เป็นการทดลองช่วง 2 เพื่อศึกษาอัตราการดูดซึมทางเคมีของคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้ของเหลวดูดซึมต่างๆ ได้แก่ น้ำประปา ซึ่งเป็นการดูดซึมทางกายภาพ และสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ซึ่งเป็นการดูดซึมทางเคมี และศึกษาหาความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่สามารถดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีที่สุด แล้วจึงเพิ่มแอลอาร์จินีนเป็นสารเร่งปฏิกิริยา

4.3.1 การหาความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่ดูดซึมดีที่สุด

ขั้นนี้เป็นการทดลองดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน ได้แก่ 1 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทียบกับการดูดซึมด้วยน้ำประปา คาร์บอนไดออกไซด์ที่วัดได้เมื่อออกจากระบบแสดงดังภาพที่ 4.24 และสามารถหาปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมในของเหลวด้วยสมการ (3.3) ดังแสดงในภาพที่ 4.25

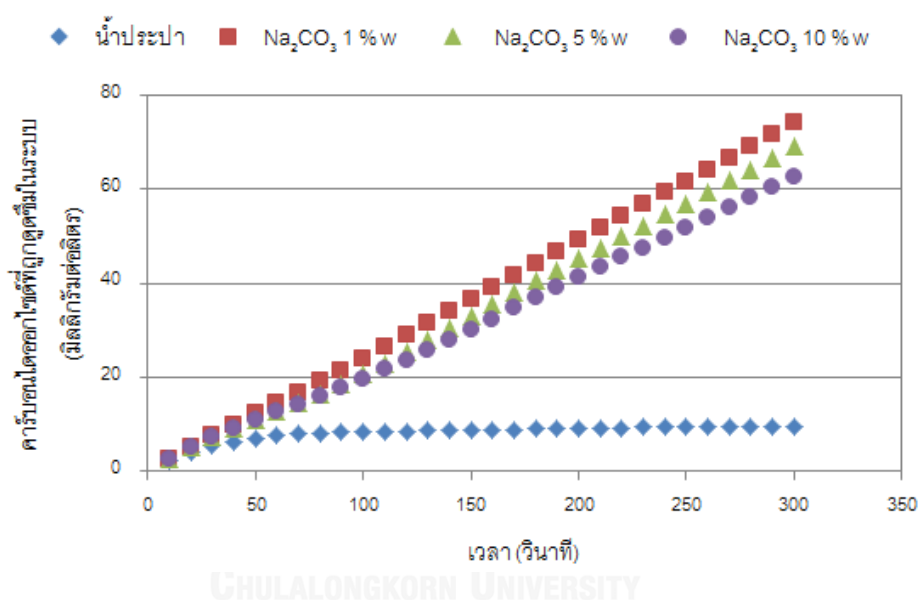
$$C_{L,t} = \frac{Q_G}{V_L} (C_{G,in} \times t - \int C_{G,out}(t) dt) \quad (3.3)$$



ภาพที่ 4.24 ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากระบบดูดซึม

จากภาพที่ 4.24 จะเห็นว่า เมื่อใช้ของเหลวดูดซึมเป็นน้ำประปา ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากระบบจะมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น

ช้าหรือแทบไม่เกิดขึ้นเลย ในขณะที่เมื่อใช้ของเหลวดูดซึมเป็นสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากระบบจะน้อยกว่าเมื่อใช้น้ำประปา และจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตน้อยลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาเคมีเกิดเร็วขึ้น คาร์บอนไดออกไซด์ถูกดูดซึมได้มากขึ้นในเวลาเท่ากัน เมื่อใช้ของเหลวดูดซึมเป็นสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต และเมื่อมีความเข้มข้นลดลงนั่นเอง นอกจากนี้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากระบบจะเพิ่มสูงขึ้นในช่วงแรกก่อนที่จะลดลงแล้วคงที่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนหนึ่งสามารถหลุดออกไปจากระบบได้ในช่วงต้นของการทดลองเนื่องจากระบบมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นจึงดูดซึมในอัตราที่คงที่



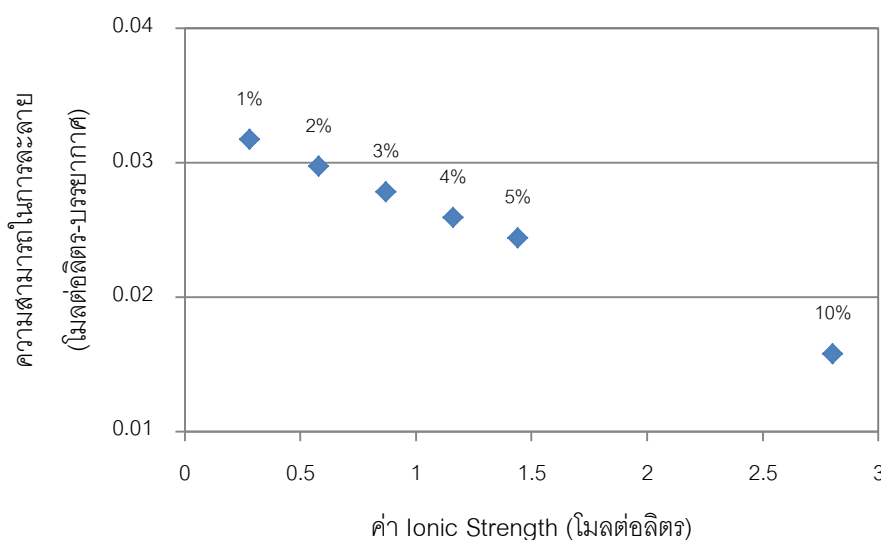
ภาพที่ 4.25 ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมในของเหลวดูดซึมต่างๆ

กราฟที่พล็อตได้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (t) กับคาร์บอนไดออกไซด์ในของเหลวที่เวลาใดๆ ($C_{L,t}$) ซึ่งจะทำให้สามารถหาอัตราการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ได้จากความชันของกราฟ

จากภาพที่ 4.25 พบว่า สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตช่วยเพิ่มอัตราการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ได้ โดยที่ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีอัตราการดูดซึมสูงสุด คิดเป็น 0.2479 มิลลิกรัมต่อลิตร-วินาที รองลงมาเป็นที่ความเข้มข้น 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก คิดเป็น 0.2318 และ 0.2067 มิลลิกรัมต่อลิตร-วินาที ตามลำดับ เมื่อเทียบกับการดูดซึมด้วยน้ำประปา ซึ่งมีอัตราการดูดซึม 0.1167 มิลลิกรัมต่อลิตร-วินาที พบว่าการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย

สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 1 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีค่า Enhancement factor ในการดูดซึมเท่ากับ 2.12 1.99 และ 1.77 ตามลำดับ

การใช้สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตช่วยเพิ่มอัตราการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ แต่การเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมคาร์บอเนตมีแนวโน้มทำให้อัตราการดูดซึมลดลง ที่เป็นเช่นนี้อาจเพราะว่า โซเดียมคาร์บอเนตทำให้ค่า Ionic strength ในของเหลวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการละลายและอัตราการดูดซึมของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง (Spigarelli, 2012) ทั้งนี้จากกฎของเฮนรีที่สภาวะการทดลองพบว่า คาร์บอนไดออกไซด์มีความสามารถในการละลายเท่ากับ 10.38 9.76 7.52 และ 4.53 มิลลิกรัมต่อลิตร-บรรยากาศ ในน้ำประปา สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 1 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ แม้ว่าความสามารถในการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำประปาจะสูงที่สุด แต่เป็นเพียงการดูดซึมทางกายภาพเท่านั้น ไม่มีปฏิกิริยาเคมีร่วมด้วย คาร์บอนไดออกไซด์จึงละลายในสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตได้เร็วกว่า

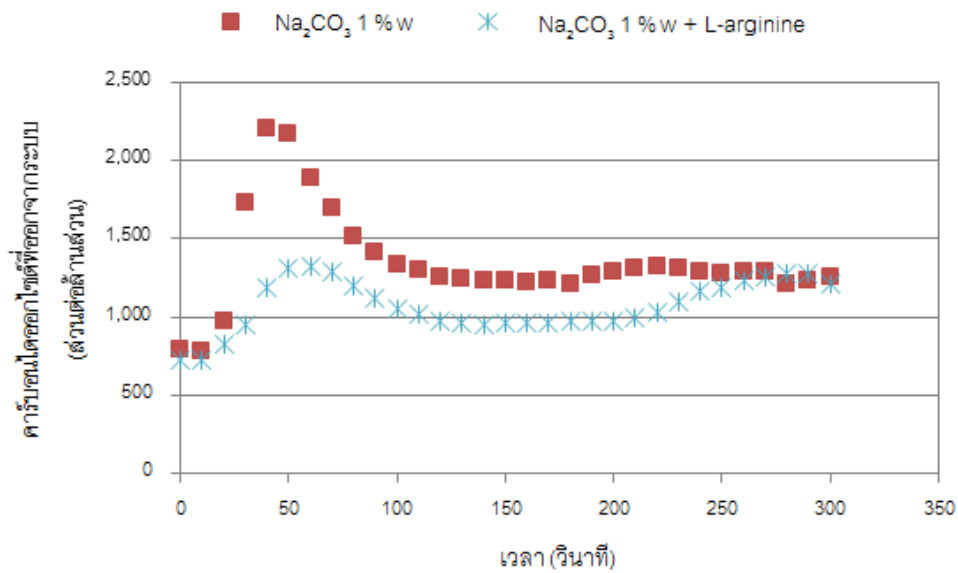


ภาพที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์
ค่า Ionic strength และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต

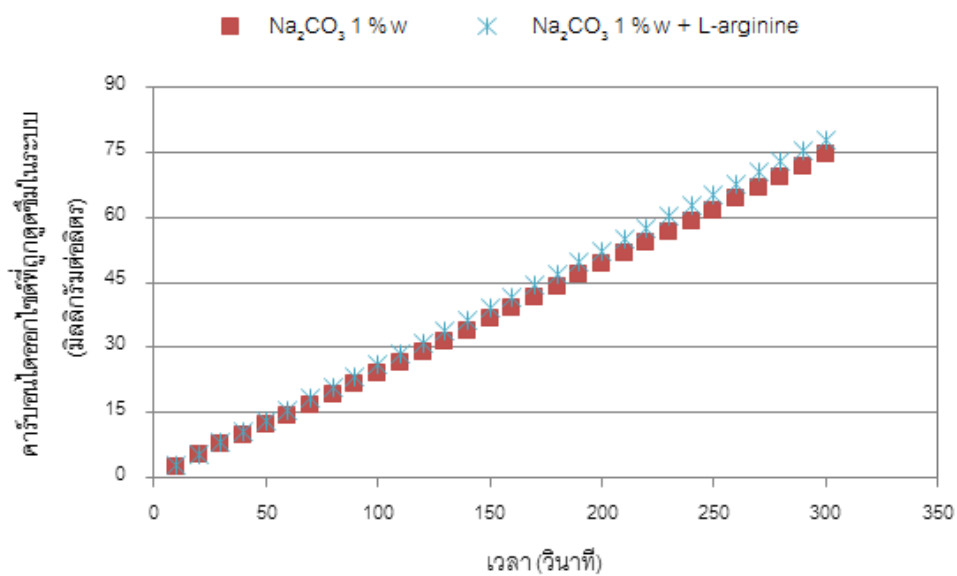
4.3.2 ผลจากการใช้สารเร่งปฏิกิริยา

ขั้นต่อมาเป็นการทดลองโดยเลือกปรับสภาพสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่สามารถดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ได้เร็วที่สุดด้วยการเติมสารเร่งปฏิกิริยา คือ สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักผสมแอลอาร์จินีน ซึ่งผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.27 และ 4.28

จากภาพที่ 4.28 พบว่า สารเร่งปฏิกิริยาสามารถเพิ่มอัตราการดูดซึ่มในสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตได้ โดยเพิ่มจาก 0.2479 มิลลิกรัมต่อลิตร-วินาที เป็น 0.2599 มิลลิกรัมต่อลิตร-วินาที และมีค่า Enhancement factor เท่ากับ 2.23



ภาพที่ 4.27 ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากระบบที่ผสมและไม่ผสมสารเร่งปฏิกิริยา



ภาพที่ 4.28 คาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึ่มในของเหลวดูดซึ่มที่ผสมและไม่ผสมสารเร่งปฏิกิริยา

จากการทดลองช่วงที่ 2 จึงพอสรุปได้ว่า ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่สามารถดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ได้เร็วที่สุด คือ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และจะสามารถดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดียิ่งขึ้นเมื่อเติมด้วยแอลอาร์จินีน 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4.4 การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในคอลัมน์แบบฟองอากาศร่วมกับตัวกลางพลาสติก

ในหัวข้อนี้เป็นการทดลองช่วงที่ 3 คือ การศึกษาปัจจัยที่ได้ผลการทดลองดีที่สุดจากการทดลองช่วงที่ 1 และ 2 ได้แก่ ขนาดหัวกำเนิดฟองอากาศ รูปทรงตัวกลางพลาสติก ปริมาณตัวกลางพลาสติก และของเหลวดูดซึมที่ใช้ เพื่อศึกษาการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในคอลัมน์แบบฟองอากาศ ปัจจัยที่เลือกใช้สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สรุปตัวแปรที่เลือกใช้ทดลองการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกับตัวกลาง

ตัวแปร	รายละเอียด
ขนาดหัวกำเนิดฟองอากาศ	ขนาดใหญ่ (6.5 เซนติเมตร)
รูปทรงตัวกลางพลาสติก	ทรงกระบอกกลวง (R)
ปริมาณตัวกลางพลาสติก	10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
อัตราการไหลก๊าซ	12.5 ลิตรต่อนาที
ระบบดูดซึม	น้ำประปา
	สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Na ₂ CO ₃ 1%w)
	สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผสมแอลอาร์จินีน 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (S+A)
	สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผสมแอลอาร์จินีน 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ร่วมกับตัวกลางพลาสติก (S+A+M)

และผลการทดลองช่วงนี้สามารถแบ่งออกได้ดังนี้

4.4.1 ตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์

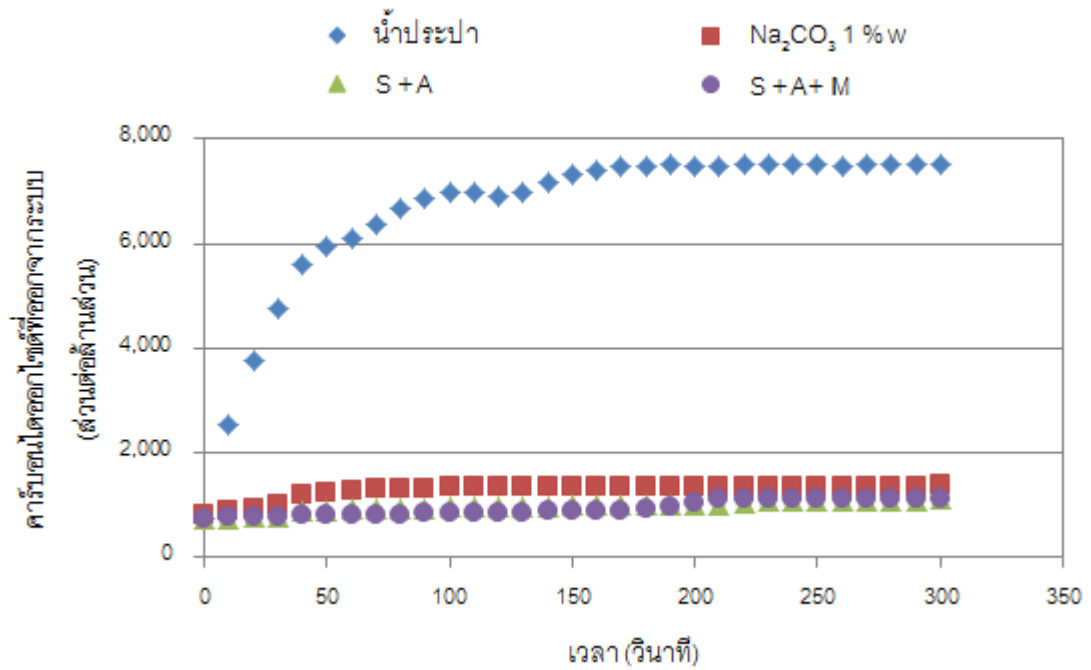
ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศในระบบดูดซึมทางเคมี แสดงดังตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ขนาดฟองอากาศ สัดส่วนก๊าซ พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ และความเร็วลอยตัวของ ฟองอากาศของระบบดูดซึมที่เป็นสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตและสารละลายผสมระหว่างโซเดียม คาร์บอเนตและแอลอาร์จินีนมีความใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าแอลอาร์จินีนที่เติมลงไปนั้น น้อยมากๆ ซึ่งคิดเป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของโซเดียมคาร์บอเนตที่ใช้ จึงทำให้มีสมบัติทาง กายภาพใกล้เคียงกันและไม่ส่งผลต่อลักษณะของฟองอากาศ ในขณะที่ระบบที่ใช้ตัวกลางทำให้เกิด ฟองอากาศที่มีขนาดเล็กกว่า และมีพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะที่สูงกว่า

ตารางที่ 4.2 ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศของคาร์บอนไดออกไซด์

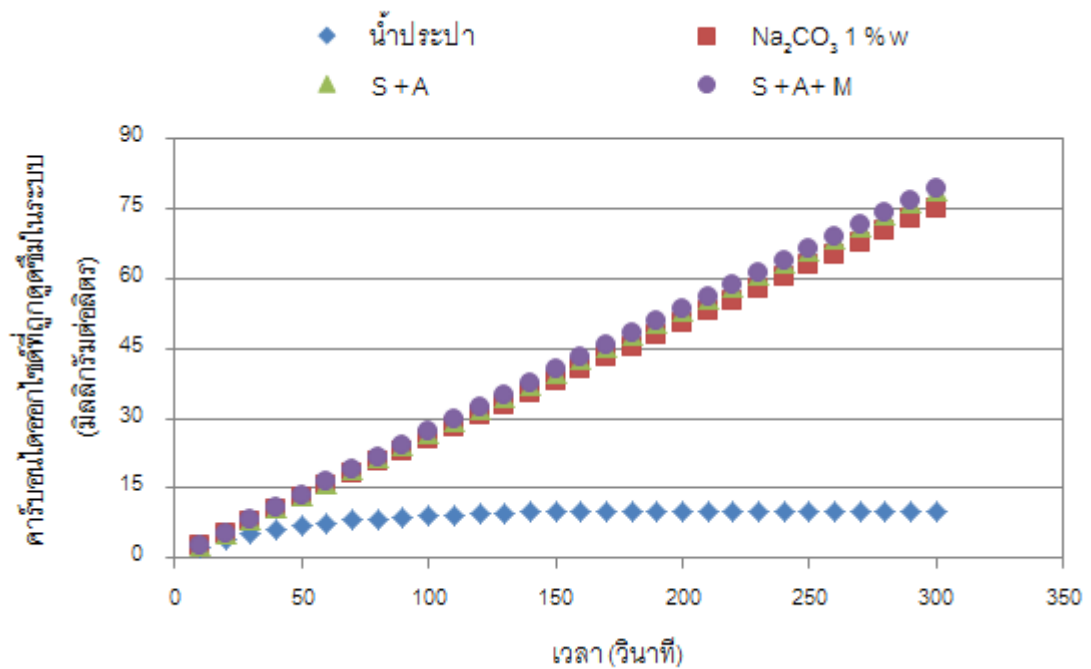
ระบบดูดซึม ทางเคมี	ขนาดฟองอากาศ (มิลลิเมตร)	สัดส่วนก๊าซ (-)	พื้นที่ผิวสัมผัส จำเพาะ (ต่อเมตร)	ความเร็วลอยตัว ของฟองอากาศ (เซนติเมตรต่อวินาที)
น้ำประปา	4.31	0.0525	77.09	18.80
Na ₂ CO ₃ 1%w	3.47	0.0576	105.60	17.05
S+A	3.45	0.0608	112.39	16.10
S+A+M	3.19	0.0523	114.21	17.16

4.4.2 ตัวแปรด้านการถ่ายเทมวล

ผลการดูดซึมแสดงดังภาพที่ 4.29 และ 4.30 ซึ่งพบว่า การดูดซึมทางเคมีร่วมกับ ตัวกลางพลาสติกในคอลัมน์แบบฟองอากาศสามารถเพิ่มอัตราการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ได้ (ภาคผนวก ค.) โดยในระบบสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต สามารถดูดซึมได้ 0.2492 มิลลิกรัมต่อ ลิตร-วินาที ในระบบสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตผสมแอลอาร์จินีน สามารถดูดซึมได้ 0.2630 มิลลิกรัมต่อลิตร-วินาที และในระบบสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตผสมแอลอาร์จินีน ร่วมกับการใช้ ตัวกลางพลาสติก สามารถดูดซึมได้ 0.2649 มิลลิกรัมต่อลิตร-วินาที เมื่อเทียบกับการดูดซึมด้วย น้ำประปาซึ่งสามารถดูดซึมได้ 0.1161 มิลลิกรัมต่อลิตร-วินาที พบว่า สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตผสมแอลอาร์จินีน และสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตผสมแอลอาร์จินีน ร่วมกับการใช้ตัวกลางพลาสติก มีค่า Enhancement factor ในการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ เท่ากับ 2.15 2.27 และ 2.28 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.29 ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากคอลัมน์แบบฟองอากาศ



ภาพที่ 4.30 ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับในคอลัมน์แบบฟองอากาศ

สำหรับ Hatta number ซึ่งจะบอกว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นเร็วหรือช้า สามารถคำนวณได้ด้วยการศึกษากลไกทางเคมี โดยปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายคาร์บอเนต (Knuutila และคณะ, 2010, Rahimpour และ Kashkooli, 2004, Shen และคณะ, 2013, Ye และ Lu, 2014, Zhao และคณะ, 2004) มีปฏิกิริยารวม (Overall reaction) คือ



ซึ่งแบ่งออกได้ดังนี้

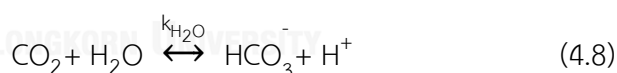
1. การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ในของเหลว (Dissolution of CO₂ in liquid)



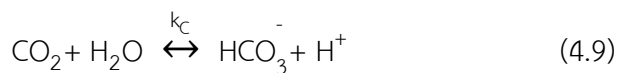
2. การแตกตัวของน้ำ (Dissociation of water)



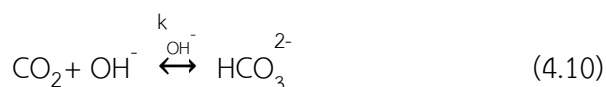
3. การแตกตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ (Dissociation of CO₂ in water)



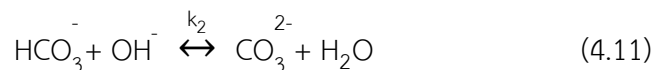
4. การแตกตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำที่มีสารเร่งปฏิกิริยา



5. การรวมตัวกับน้ำของคาร์บอนไดออกไซด์ (Hydration of CO₂) ซึ่งแบ่งเป็น



และ



โดยปฏิกิริยาในสมการ (4.11) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเร็วกว่าปฏิกิริยาในสมการ (4.10) มาก ปฏิกิริยาในสมการ (4.10) จึงเป็นปฏิกิริยาที่ใช้กำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Rate-determining reaction) โดยที่ค่าคงที่ปฏิกิริยารวม (k_{ov}) หรือค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (k_1) คือ

$$k_{ov} = k_1 = k_{\text{H}_2\text{O}} + k_{\text{OH}^-}[\text{OH}^-] + k_c[\text{Cat}] \quad (4.12)$$

โดยที่ (Zhao และคณะ, 2004)

$$\log k_{\text{H}_2\text{O}} = 329.80 - 110.54 \log T - \frac{17265}{T} \quad (4.13)$$

$$\log k_{\text{OH}^-} = \log k_{\text{OH}^-}^\circ + 0.20I - 0.0182I^2 \quad (4.14)$$

$$\log k_{\text{OH}^-}^\circ = 13.635 - \frac{2985}{T} \quad (4.15)$$

$$\log k_2 = \log k_2^\circ + \frac{1.01\sqrt{[\text{Na}^+]}}{1 + 1.27\sqrt{[\text{Na}^+]}} + 0.125[\text{Na}^+] \quad (4.16)$$

$$\log k_2^\circ = \frac{1568.94}{T} + 0.4134 + 0.006737T \quad (4.17)$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิ, เคลวิน

I คือ ค่า Ionic strength, โมลต่อลิตร

ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส และสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่า Ionic strength ประมาณ 0.28 โมลต่อลิตร และจาก Shen และคณะ (2013) ทำให้สามารถประมาณค่า k_c จากการใช้อัลลาร์จินินได้ประมาณ 374 ลิตรต่อโมล-วินาที

ดังนั้น จากสมการ (4.12) ถึง (4.17) จึงสามารถคำนวณหาค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือนได้เท่ากับ 15.45 และ 15.69 ต่อวินาที สำหรับระบบที่ไม่ใช่และใช้แอลอาร์จินิน ตามลำดับ

สำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม ($k_L a$) และ Hatta number (M_H) สามารถหาได้จากอัตราการดูดซึมโดยใช้สมการถ่ายเทมวลในระบบดูดซึม และใช้สมการ Danckwerts ในการคำนวณ (Vazquez และคณะ, 2000; Zhao และคณะ, 2004)

สมการถ่ายเทมวลในระบบดูดซึม ดังสมการ (4.18) สามารถใช้คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของคาร์บอนไดออกไซด์ได้ทั้งในระบบดูดซึมทางกายภาพและระบบดูดซึมทางเคมี

$$N = k_L a (C^* - C_0) \quad (4.18)$$

เมื่อ N คือ อัตราการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์, มิลลิกรัมต่อลิตร-วินาที
 C^* คือ ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ละลายที่สภาวะสมดุล, มิลลิกรัมต่อลิตร
 C_0 คือ ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ละลายก่อนเริ่มทดลอง, มิลลิกรัมต่อลิตร

ก่อนเริ่มการทดลอง ยังไม่มีการเติมคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบ ซึ่งในของเหลวอย่างน้ำประปาหรือสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต จะมีคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่น้อยมากๆ จึงสมมติให้เป็นศูนย์ ($C_0 = 0$) ดังนั้น สมการ (4.18) จึงสามารถจัดรูปได้เป็นสมการ (4.19)

$$k_L a = \frac{N}{C^*} \quad (4.19)$$

สมการ Danckwerts ดังสมการ (4.20) สามารถใช้คำนวณหาค่า k_L'

$$N = C^* a \sqrt{k_L'^2 + k_1 D} \quad (4.20)$$

หรือจัดรูปได้เป็น

$$k_L' = \sqrt{\left(\frac{N}{C^* a}\right)^2 - k_1 D} \quad (4.21)$$

- เมื่อ a คือ พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ, ต่อเมตร
 k_1 คือ ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง, ต่อวินาที
 D คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลาย, ตารางเมตรต่อวินาที

นอกจากนี้ จากรูปแบบของสมการ (4.18) และ (4.20) จะสังเกตได้ว่าค่า k_L ในสมการ (4.18) ก็คือเทอม $\sqrt{k_L^2 + k_1 D}$ ในสมการ (4.20) นั่นเอง

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลายที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ประมาณ 1.66×10^{-4} ตารางเมตรต่อวินาที (Ratcliff และ Holdcroft, 1963) และสามารถคำนวณ Hatta number (M_H) จากสมการ (4.22)

$$M_H = \frac{\sqrt{k_1 D}}{k_L} \quad (4.22)$$

ดังนั้น ตัวแปรทางด้านการถ่ายเทมวลในระบบดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์จึงสามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ตัวแปรทางด้านการถ่ายเทมวลในระบบดูดซึมทางเคมี

ระบบดูดซึม	อัตราการดูดซึม (มิลลิกรัมต่อลิตร-วินาที)	Enhancement factor (-)	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลย่อย, k_L (เมตรต่อวินาที)	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม, $k_L a$ (ต่อวินาที)	Hatta number (-)
น้ำประปา	0.1161	1.00	1.45×10^{-4}	0.0112	-
Na ₂ CO ₃ 1%w	0.2492	2.15	2.42×10^{-4}	0.0255	0.88
S+A	0.2630	2.27	2.40×10^{-4}	0.0269	0.91
S+A+M	0.2649	2.28	2.38×10^{-4}	0.0271	0.93

จากตาราง 4.3 จึงเห็นได้ว่า ระบบที่มีการดูดซึมทางเคมี มี Hatta number อยู่ในช่วง 0.88 – 0.93 ซึ่งบ่งชี้ว่า การดูดซึมที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นค่อนข้างเร็ว (Intermediate

rate) เนื่องจากมี Hatta number อยู่ระหว่าง 0.02 - 2 ซึ่งปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นทั้งที่ชั้นฟิล์มและในเฟสของเหลว (Levenspiel, 1999)

จากการทดลองที่ผ่านมาพบว่า อัตราการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นเมื่อมีการดูดซึมทางเคมี และสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์สามารถดูดซึมได้ดีกว่าความเข้มข้นอื่นๆที่สูงกว่า เพราะเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ทำให้เกิดปรากฏการณ์ Salting out ส่งผลให้ ค่า Ionic strength ในของเหลวเพิ่มขึ้น โซเดียมคาร์บอเนตจะไปจับกับอนุภาคของน้ำ ทำให้คาร์บอนไดออกไซด์ไม่มีที่จับและต้องการออกจากน้ำ ทำให้ลดความสามารถในการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์หรือก๊าซใดๆในของเหลว (Chang, 2000)

ต่อมา เมื่อเติมแอลกอฮอล์ลงไปในของเหลวดูดซึมสามารถทำให้อัตราการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มสูงขึ้น อาจเนื่องจากแอลกอฮอล์มีหมู่เอมิโนปฐมภูมิซึ่งทำปฏิกิริยาได้เร็วกับคาร์บอนไดออกไซด์ (Cullinane และ Rochelle, 2004, Tseng และคณะ, 1988) และอีกทั้งมีค่า pK_a สูงถึง 12.5 ซึ่งมีความเป็นด่างสูงก็ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีเช่นกัน

สุดท้าย เมื่อใช้ระบบดูดซึมทางเคมีร่วมกับตัวกลางพลาสติกกลับพบว่า อัตราการดูดซึมเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งอาจเป็นเพราะตัวกลางพลาสติกช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะได้เพียงเล็กน้อยดังตารางที่ 4.2 พองอากาศที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กกว่าในระบบน้ำประปาเสมือนใช้หัวกำเนิดพองอากาศขนาดเล็ก ทั้งนี้เพราะพองอากาศจะมีขนาดเล็กเมื่อแรงตึงผิวของของเหลวลดลง (Jia และคณะ, 2015, Sardeing และคณะ, 2006) และแรงตึงผิวของของเหลวก็ลดลงเมื่อค่าพีเอชของของเหลวเพิ่มขึ้น (Beattie และคณะ, 2014) ซึ่งเกิดจากโซเดียมคาร์บอเนตและแอลกอฮอล์ที่เติมลงไป

จากการทดลองช่วงที่ 3 จึงพอสรุปได้ว่า การดูดซึมทางเคมีร่วมกับตัวกลางพลาสติกในคอลัมน์แบบพองอากาศสามารถเพิ่มอัตราการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ได้ แต่ในสภาวะที่ทำการวิจัยนั้น อัตราการดูดซึมอาจเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากในระบบดูดซึมทางเคมีในคอลัมน์แบบพองอากาศ ตัวกลางพลาสติกส่งผลต่อตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของพองอากาศเพียงเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนี้ยังพบว่า การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตในงานวิจัยนี้เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นค่อนข้างเร็ว

4.5 การพยากรณ์ตัวแปรในงานวิจัย

จากผลการทดลองทั้งหมด สามารถนำมาวิเคราะห์หาสมการเพื่อพยากรณ์ตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมเนื่องจากการใช้ตัวกลางพลาสติก และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเท

มวลรวมของคาร์บอนไดออกไซด์ ในกรณีที่ใช้ตัวกลางพลาสติกที่มีความพรุนของชั้นตัวกลางสูงอย่าง ตัวกลางทรงกระบอกกลวง ร่วมกับการดูดซึมทางเคมีด้วยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตและสารเร่ง ปฏิกิริยาแอลอาร์จีนิน

ในการสร้างสมการพยากรณ์ ใช้วิธีหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดของค่าคงตัวของตัวแปรต่างๆ โดยนำตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องมาสร้างเป็นกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยให้กลายเป็นสมการด้วยการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ของฟังก์ชัน Solver ในโปรแกรม Microsoft Excel 2010

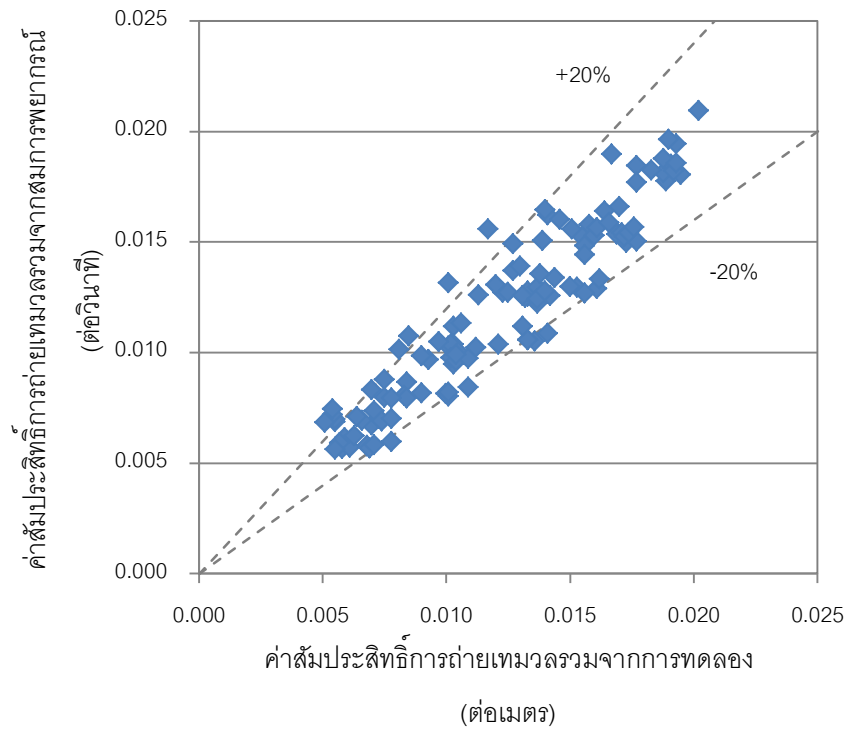
4.5.1 สมการพยากรณ์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมเนื่องจากการใช้ตัวกลาง

จากตัวแปรในการทดลองช่วงที่ 1 สำหรับการดูดซึมออกซิเจนในน้ำประปาร่วมกับการใช้ตัวกลางพลาสติกในคอลัมน์แบบฟองอากาศ สามารถคาดคะเนตัวแปรที่อาจส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม ได้แก่ ปริมาตรของเหลวดูดซึม อัตราการไหลก๊าซ ขนาดรูบนหัวกำเนิดฟองอากาศ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ ปริมาณตัวกลาง ความพรุนของชั้นตัวกลาง น้ำหนักของเม็ดตัวกลาง พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะของตัวกลาง ขนาดตัวกลาง ความเร็วลอยตัวของตัวกลาง และความหนาแน่นของตัวกลาง และสามารถวิเคราะห์ได้เป็นดังสมการ (4.23)

$$\frac{5k_L a V_L}{Q_G + 6 \times 10^{-5}} = 1.63 + \exp\left(\frac{100D_{OR}}{D_C}\right) + 1.4 \times 10^{-4} \left(\frac{\%M}{\epsilon}\right) \left(\frac{m_p a_p g}{d_p U_T \rho}\right)^{0.888} \quad (4.23)$$

- เมื่อ $k_L a$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม, ต่อวินาที
 V_L คือ ปริมาตรของเหลวดูดซึม, ลูกบาศก์เมตร
 Q_G คือ อัตราการไหลก๊าซ, ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที
 D_{OR} คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูบนหัวกำเนิดฟองอากาศ, เมตร
 D_C คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์, เมตร
 $\%M$ คือ ปริมาณตัวกลางพลาสติก, เปอร์เซ็นต์
 ϵ คือ ความพรุนของชั้นตัวกลาง, ไม่มีหน่วย
 m_p คือ น้ำหนักของเม็ดตัวกลาง, กิโลกรัม
 a_p คือ พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะของเม็ดตัวกลาง, ต่อเมตร
 d_p คือ ขนาดของเม็ดตัวกลาง, เมตร
 U_T คือ ความเร็วลอยตัวของเม็ดตัวกลาง, เมตรต่อวินาที
 g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, เมตรต่อวินาทียกกำลังสอง
 ρ คือ ความหนาแน่นของตัวกลาง, กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

จากสมการดังกล่าว พบว่าค่าที่คำนวณได้จากสมการและค่าที่ทดลองได้จริงในงานวิจัย มีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ประมาณ ± 20 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.31 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมเนื่องจากการใช้ตัวกลางพลาสติกจากการทดลองและจากสมการพยากรณ์

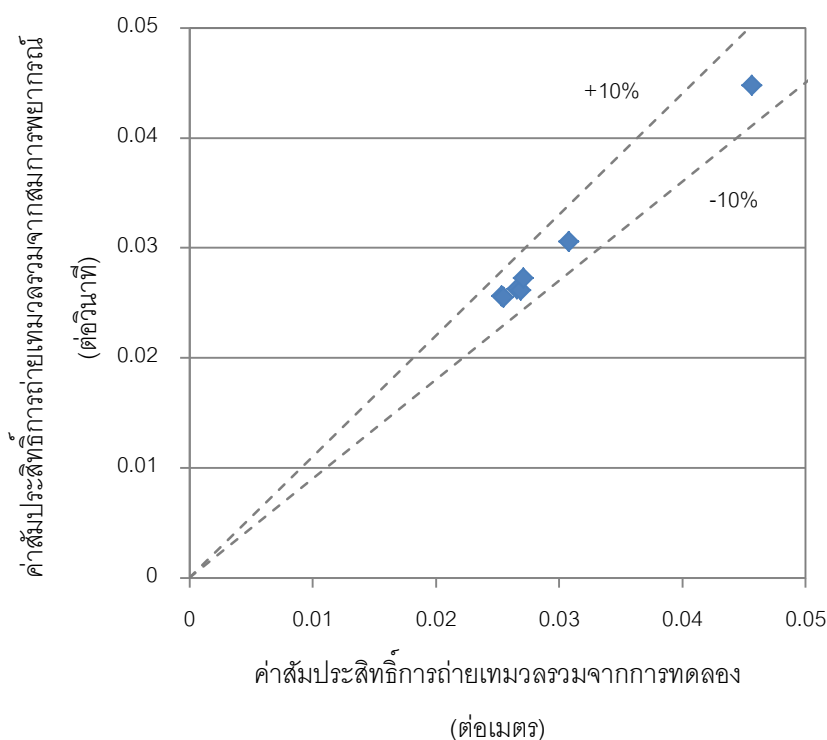
4.5.2 สมการพยากรณ์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของคาร์บอนไดออกไซด์

จากตัวแปรในการทดลองช่วงที่ 2 และ 3 สำหรับการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตและแอลอาร์จินีนร่วมกับการใช้ตัวกลางทรงกระบอกกลวงในงานวิจัยนี้ สามารถคาดคะเนตัวแปรที่อาจส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม ได้แก่ ปริมาตรของเหลวดูดซึม อัตราการไหลก๊าซ ปริมาณตัวกลางพลาสติก ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ปริมาณแอลอาร์จินีนที่เติม ขนาดรูบนหัวกำเนิดฟองอากาศ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ และสามารถวิเคราะห์ได้เป็นดังสมการ (4.24)

$$\frac{183.6k_L aV_L}{Q_G} = (\%M - 414) + (\%Arg + 120) \ln(\%Na^{2.8} + 203) + \left(\frac{D_C}{345D_{OR}}\right) \quad (4.24)$$

- เมื่อ k_{La} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของคาร์บอนไดออกไซด์, ต่อวินาที
 V_L คือ ปริมาตรของเหลวดูดซึม, ลูกบาศก์เมตร
 Q_G คือ อัตราการไหลก๊าซ, ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที
 $\%M$ คือ ปริมาณตัวกลางพลาสติก, เปอร์เซ็นต์
 $\%Na$ คือ ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต, เปอร์เซ็นต์
 $\%Arg$ คือ ปริมาณแอลอาร์จินีนเทียบกับโซเดียมคาร์บอเนต, เปอร์เซ็นต์
 D_{OR} คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูบนหัวกำเนิดฟองอากาศ, เมตร
 D_C คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์, เมตร

จากสมการดังกล่าว พบว่าค่าที่คำนวณได้จากสมการและค่าที่ทดลองได้จริงในงานวิจัย มีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงระหว่าง ± 10 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.32 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของคาร์บอนไดออกไซด์จากการทดลองและจากสมการพยากรณ์

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาระบบการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยคอลัมน์แบบฟองอากาศในระดับห้องปฏิบัติการ โดยศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการใช้ตัวกลางพลาสติกและสารเคมีในระบบ การใช้ตัวกลางพลาสติกแบ่งออกเป็นตามปริมาณ ได้แก่ 2.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และตามรูปร่าง ได้แก่ ทรงกระบอกกลม (R) ทรงรี (E) ทรงกลม (S) และทรงกระบอก (C) ส่วนสารเคมีที่ใช้ ได้แก่ สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 1.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเติมสารเร่งปฏิกิริยา คือ แอลอาร์จินีน ซึ่งจากผลการทดลองสามารถสรุปงานวิจัยได้ดังนี้

1. ตัวกลางพลาสติกที่สามารถเพิ่มอัตราการดูดซึมได้ดี ควรเป็นตัวกลางที่มีความพรุนของชั้นตัวกลางมากๆ และควรใช้ในปริมาณมากพอสมควรเพื่อช่วยในการขัดขวางการรวมตัวของฟองอากาศและกักฟองอากาศให้อยู่ในระบบได้นาน ซึ่งมีส่วนช่วยในการเพิ่มระยะเวลาและโอกาสในการสัมผัสกันระหว่างเฟสก๊าซและเฟสของเหลว ซึ่งทำให้อัตราการดูดซึมก๊าซสูงขึ้น นอกจากนี้ขนาดของตัวกลางพลาสติกที่ใช้ในงานวิจัยยังส่งผลต่อการถ่ายเทมวลในระบบที่มีฟองอากาศขนาดใหญ่มากกว่าฟองอากาศขนาดเล็ก และที่อัตราการไหลก๊าซสูง

2. สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตสามารถเพิ่มอัตราการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ได้ โดยอัตราการดูดซึมจะสูงในสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำ และปฏิกิริยาเกิดขึ้นไวยิ่งขึ้นเมื่อเพิ่มสารเร่งปฏิกิริยาในระบบ ซึ่งปฏิกิริยาทางเคมีนี้ทำให้อัตราการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น เพราะความเป็นเบสของสารละลาย ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยาได้ดีในสารละลายเบส แต่อย่างไรก็ตามค่า Ionic strength ของสารละลายที่เพิ่มขึ้น เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้น ก็ทำให้อัตราการดูดซึมลดลงได้เช่นกัน

3. การใช้ตัวกลางพลาสติกร่วมกับสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตมีแนวโน้มช่วยเร่งอัตราการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในคอลัมน์แบบฟองอากาศได้ แม้ว่าสำหรับงานวิจัยนี้ ตัวกลางพลาสติกอาจช่วยเพิ่มอัตราการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลายได้เพียงเล็กน้อย เนื่องจากตัวกลางพลาสติกส่งผลต่อตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศในสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และโดยสรุปแล้ว การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตในงานวิจัยนี้ เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นค่อนข้างเร็ว

5.2 ข้อเสนอแนะ

ถึงอย่างไรก็ตาม เพื่อให้การศึกษาการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยคอลัมน์แบบฟองอากาศ โดยใช้ตัวกลางพลาสติกร่วมกับการดูดซึมทางเคมี มีความชัดเจนและเข้าใจกลไกต่างๆที่เกิดขึ้นได้มากยิ่งขึ้น เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงควรมีแนวทางการศึกษาเพิ่มเติมดังนี้

1. ควรศึกษาเรื่องความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวกลางพลาสติกที่ใช้กับอัตราการไหลก๊าซ เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสม เช่น ถ้าใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณนี้ ควรใช้อัตราการไหลก๊าซเท่าไรจึงจะเหมาะสม ทั้งในเชิงการถ่ายเทมวลและพลังงาน
2. ควรศึกษาเรื่องความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของฟองอากาศกับขนาดของเม็ดตัวกลางพลาสติก เพื่อศึกษาว่า ถ้าใช้เม็ดตัวกลางซึ่งมีขนาดหนึ่ง ฟองอากาศที่เกิดขึ้นหรือขนาดรูของหัวกำเนิดฟองอากาศที่ใช้ควรมีขนาดเท่าไรจึงจะเหมาะสม
3. ควรศึกษาเพิ่มเติมกับสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้นน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเพิ่มปริมาณแอลาร์จินีน เนื่องจากอาจมีความเป็นไปได้ว่า สารละลายอาจดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีขึ้น เมื่อสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตมีความเข้มข้นต่ำ และมีแอลาร์จินีนสูง
4. ควรศึกษาในช่วงอัตราการไหลที่สูงขึ้น เนื่องจากก๊าซถ่ายเทมวลได้ดีที่อัตราการไหลสูง และควรเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เข้าระบบดูดซึม เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับคอลัมน์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นในเชิงอุตสาหกรรม

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2553. คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบ การผลิต การควบคุมคุณภาพ และการใช้ก๊าซชีวภาพ (Biogas) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ.
- นพภาพร พานิช, แสงสันต์ พานิช, วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์, วิจิตรา จงวิศาล และ วรารุช เสือดี. 2550. ตำราระบบบำบัดมลพิษทางอากาศ. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ.
- วราลี วิศาลโกตะ, สุริยพงศ์ ศศิวรรณพงศ์, ประจักษ์ ศาสตรเวช, เรวดี ดำมี, นราพงศ์ หงส์ประสิทธิ์ และ พิสุทธิ์ เพียรมนกุล. 2556. ผลกระทบของตัวกลางพลาสติกต่อตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์และการถ่ายเทมวลสารในคอลัมน์แบบฟองอากาศ. การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 12, 27-29 มีนาคม 2556 โรงแรมพูลแมน ขอนแก่น. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.

ภาษาอังกฤษ

- Air Liquide. 2009. Gas encyclopedia. [Online]. Available at: <http://encyclopedia.airliquide.com/encyclopedia.asp>. [Accessed 2 November 2015].
- Beattie, J. K., Djerdjev, A. M., Gray-Weale, A., Kallay, N., Lützenkirchen, J., Preočanin, T. and Selmani, A. 2014. pH and the surface tension of water. Journal of Colloid and Interface Science. 422: 54-57.
- Bhatia, B., Nigam, K. D. P., Auban, D. and Hebrard, G. 2004. Effect of a new high porosity packing on hydrodynamics and mass transfer in bubble columns. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. 43(11): 1371-1380.
- Boden, T. A., Marland, G. and Andres, R. J. 2013. Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions. Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC), Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy, Oak Ridge, Tennessee.
- Bouaifi, M., Hebrard, G., Bastoul, D. and Roustan, M. 2001. A comparative study of gas hold-up, bubble size, interfacial area and mass transfer coefficients in stirred gas-liquid reactors and bubble columns. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. 40(2): 97-111.

- Chang, R. 2000. Physical chemistry for the chemical and biological sciences. 3rd edition. University Science Books.
- Cohen, Y. and Metzner, A. B. 1981. Wall effects in laminar flow of fluids through packed beds. AIChE Journal. 27(5): 705-715.
- Cullinane, J. T. and Rochelle, G. T. 2004. Carbon dioxide absorption with aqueous potassium carbonate promoted by piperazine. Chemical Engineering Science. 59(17): 3619-3630.
- Deckwer, W. D. and Field, R. W. 1992. Bubble column reactors. New York: Wiley.
- Devries, N. P. 2014. CO₂ absorption into concentrated carbonate solutions with promoters at elevated temperatures. Master of Science. Agricultural and Biological Engineering, University of Illinois.
- Green, D. and Perry, R. 2007. Perry's Chemical Engineers' Handbook. 8th edition. McGraw-Hill Education.
- Heymes, F., Manno-Demoustier, P., Charbit, F., Fanlo, J. L. and Moulin, P. 2006. A new efficient absorption liquid to treat exhaust air loaded with toluene. Chemical Engineering Journal. 115(3): 225-231.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change.
- Jia, X., Hu, W., Yuan, X. and Yu, K. 2015. Effect of surfactant type on interfacial area and liquid mass transfer for CO₂ absorption in a bubble column. Chinese Journal of Chemical Engineering. 23(3): 476-481.
- Kantarci, N., Borak, F. and Ulgen, K. O. 2005. Bubble column reactors. Process Biochemistry. 40(7): 2263-2283.
- Knuutila, H., Hessen, E. T., Kim, I., Haug-Warberg, T. and Svendsen, H. F. 2010. Vapor-liquid equilibrium in the sodium carbonate-sodium bicarbonate-water-CO₂-system. Chemical Engineering Science. 65(6): 2218-2226.
- Kothandaraman, A. 2010. Carbon dioxide capture by chemical absorption: A solvent comparison study. Doctor of Philosophy. Chemical Engineering, Massachusetts Institute of Technology.
- Kumar, A., Degaleesan, T. E., Laddha, G. S. and Hoelscher, H. E. 1976. Bubble swarm characteristics in bubble columns. The Canadian Journal of Chemical Engineering. 54(6): 503-508.

- Leibson, I., Holcomb, E. G., Cacosso, A. G. and Jacmic, J. J. 1956a. Rate of flow and mechanics of bubble formation from single submerged orifices. I. Rate of flow studies. AIChE Journal. 2(3): 296-300.
- Leibson, I., Holcomb, E. G., Cacosso, A. G. and Jacmic, J. J. 1956b. Rate of flow and mechanics of bubble formation from single submerged orifices. II. Mechanics of bubble formation. AIChE Journal. 2(3): 300-306.
- Levenspiel, O. 1999. Chemical Reaction Engineering. 3rd edition. John Wiley & Sons.
- Li, Y., Zhang, J. and Fan, L.-S. 1999. Numerical simulation of gas-liquid-solid fluidization systems using a combined CFD-VOF-DPM method: bubble wake behavior. Chemical Engineering Science. 54(21): 5101-5107.
- Lindner, D., Werner, M. and Schumpe, A. 1988. Hydrogen transfer in slurries of carbon supported catalysts. AIChE Journal. 34(10): 1691-1697.
- Loubière, K., Hébrard, G. and Guiraud, P. 2003. Dynamics of bubble growth and detachment from rigid and flexible orifices. The Canadian Journal of Chemical Engineering. 81(3-4): 499-507.
- Luo, H. 1993. Coalescence, Breakup and Liquid Circulation in Bubble Column Reactors. Trondheim, Norway.
- Maldonado, J. G. G., Bastoul, D., Baig, S., Roustan, M. and Hébrard, G. 2008. Effect of solid characteristics on hydrodynamic and mass transfer in a fixed bed reactor operating in co-current gas-liquid up flow. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. 47(8): 1190-1200.
- Maxarej, A. F. and Sandall, D. C. 1980. Diffusion coefficients for helium, hydrogen and carbon dioxide in water at 25 C. AIChE Journal. 26: 154-157.
- Moustiri, S., Hebrard, G. and Roustan, M. 2002. Effect of a new high porosity packing on hydrodynamics of bubble columns. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. 41(5): 419-426.
- Painmanakul, P., Loubiere, K., Hebrard, G. and Buffiere, P. 2004. Study of different membrane spargers used in waste water treatment: characterisation and performance. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. 43(11): 1347-1359.

- Painmanakul, P., Wachirasak, J., Jamnongwong, M. and Hebrard, G. 2009. Theoretical prediction of volumetric mass transfer coefficient for designing an aeration tank. Engineering Journal. 13(3): 13-28.
- Rahimpour, M. R. and Kashkooli, A. Z. 2004. Enhanced carbon dioxide removal by promoted hot potassium carbonate in a split-flow absorber. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. 43(7): 857-865.
- Ratcliff, G. A. and Holdcroft, J. G. 1963. Diffusivities of gases in aqueous solutions. Transactions of the Institution of Chemical Engineers. 41: 315-319.
- Sardeing, R., Painmanakul, P. and Hébrard, G. 2006. Effect of surfactants on liquid-side mass transfer coefficients in gas-liquid systems: A first step to modeling. Chemical Engineering Science. 61(19): 6249-6260.
- Shen, S., Feng, X., Zhao, R., Ghosh, U. K. and Chen, A. 2013. Kinetic study of carbon dioxide absorption with aqueous potassium carbonate promoted by arginine. Chemical Engineering Journal. 222: 478-487.
- Spigarelli, B. P. 2012. Equilibrium analysis of CO₂ absorption in carbonate solution. Minerals & Metallurgical Processing. 29(2): 131-132.
- Spigarelli, B. P. and Kawatra, S. K. 2013. Opportunities and challenges in CO₂ capture. Journal of CO₂ Utilization. 1: 69-87.
- Subagyo, Standish, N. and Brooks, G. A. 1998. A new model of velocity distribution of a single-phase fluid flowing in packed beds. Chemical Engineering Science. 53(7): 1375-1385.
- Tate, T. 1864. On the magnitude of a drop of liquid formed under different circumstances. Philosophical Magazine Series 4. 27(181): 176-180.
- Treybel, R. E. 1981. Mass-Transfer Operations. 3rd edition. McGraw-Hill.
- Tseng, P. C., Ho, W. S. and Savage, D. W. 1988. Carbon dioxide absorption into promoted carbonate solutions. AIChE Journal. 34(6): 922-931.
- Vázquez, G., Cancela, M. A., Riverol, C., Alvarez, E. and Navaza, J. M. 2000. Application of the Danckwerts method in a bubble column: Effects of surfactants on mass transfer coefficient and interfacial area. Chemical Engineering Journal. 78(1): 13-19.

- Yan, S., He, Q., Zhao, S., Zhai, H., Cao, M. and Ai, P. 2015. CO₂ removal from biogas by using green amino acid salts: Performance evaluation. Fuel Processing Technology. 129: 203-212.
- Yang, G. Q., Du, B. and Fan, L. S. 2007. Bubble formation and dynamics in gas-liquid-solid fluidization—A review. Chemical Engineering Science. 62(1-2): 2-27.
- Ye, X. and Lu, Y. 2014. Kinetics of CO₂ absorption into uncatalyzed potassium carbonate-bicarbonate solutions: Effects of CO₂ loading and ionic strength in the solutions. Chemical Engineering Science. 116: 657-667.
- Zhao, W. R., Shi, H. X. and Wang, D. H. 2004. Modeling of mass transfer characteristics of bubble column reactor with surfactant present. Journal of Zhejiang University Science. 5(6): 714-720.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



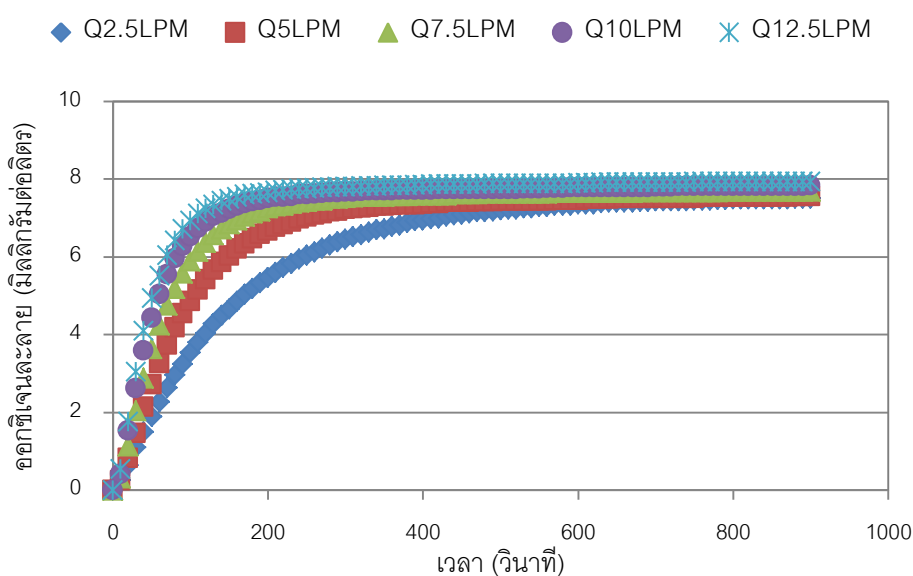
ภาคผนวก ก.

การวิเคราะห์และการคำนวณ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของออกซิเจน-น้ำประปา

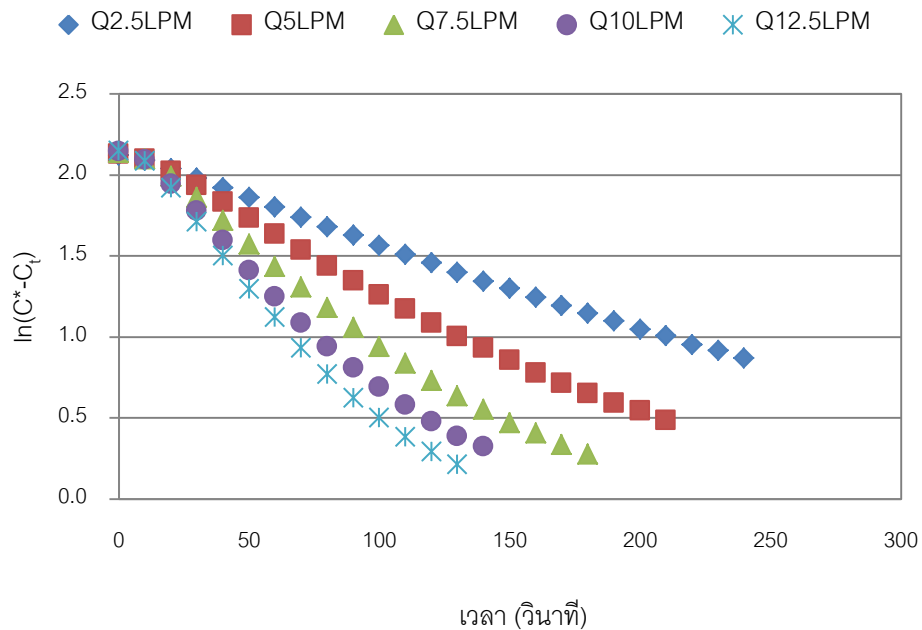
เมื่อวัดค่าออกซิเจนละลายในน้ำที่เวลาต่างๆ จะสามารถนำค่ามาพล็อตได้ดังตัวอย่างในภาพที่ ก.1 ซึ่งเป็นตัวอย่างการพล็อตกราฟค่าออกซิเจนละลายในการทดลองช่วงที่ 1 เมื่อใช้หัวกำเนิดฟองอากาศขนาดใหญ่และไม่ใช้ตัวกลางพลาสติก



ภาพที่ ก.1 ตัวอย่างการพล็อตกราฟค่าออกซิเจนละลายในการทดลองช่วงที่ 1

นำค่าออกซิเจนละลายที่ได้ไปแทนค่าในสมการ (3.2) แล้วพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (t) ซึ่งเป็นแกน x กับค่า $\ln(C^* - C_t)$ ซึ่งเป็นแกน y ทำให้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม ($k_L a$) โดยเลือกช่วงเวลาที่กราฟความชันมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ดังแสดงในภาพที่ ก.2

$$\ln(C^* - C_t) = -k_L a t + C^* \quad (3.2)$$



ภาพที่ ก.2 ตัวอย่างการพล็อตกราฟระหว่าง $\ln(C^* - C_t)$ กับ t ในการทดลองช่วงที่ 1

การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของคาร์บอนไดออกไซด์

การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มจากการหาค่าของตัวแปรต่างๆในสมการ (4.12) โดยใช้สมการ (4.13) ถึง (4.15)

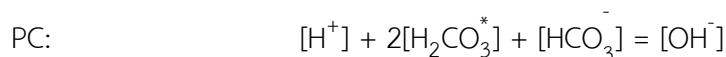
$$k_{ov} = k_1 = k_{H_2O} + k_{OH^-} [OH^-] + k_C [Cat] \quad (4.12)$$

ก่อนอื่นต้องวิเคราะห์ส่วนประกอบต่างๆในระบบคาร์บอนเนตของสารละลายก่อน โดยวิเคราะห์จาก Proton Condition สำหรับระบบปิดของสารละลายโซเดียมคาร์บอนเนตความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก คิดเป็น 0.094 โมลต่อลิตร (มวลโมเลกุลเท่ากับ 106 กรัมต่อโมล) และมีค่า $pK_{a,1}$ และ $pK_{a,2}$ เท่ากับ 6.3 และ 10.3 ตามลำดับ

จากสมดุลมวล (Mass Balance Equation) จะได้

$$MBE: \quad TOTNa = [Na^+] = 2 \times 0.094 = 0.188 \text{ M}$$

$$TOTCO_3 = [H_2CO_3^*] + [HCO_3^-] + [CO_3^{2-}] = 0.094 \text{ M}$$



หรือโดยประมาณ

$$[HCO_3^-] = [OH^-]$$

$$\frac{[H^+] K_{a,1} TOTCO_3}{[H^+]^2 + [H^+] K_{a,1} + K_{a,1} K_{a,2}} = \frac{K_w}{[H^+]}$$

$$\frac{[H^+] (10^{-6.3}) (0.094)}{[H^+]^2 + [H^+] (10^{-6.3}) + (10^{-6.3})(10^{-10.3})} = \frac{10^{-14}}{[H^+]}$$

$$[H^+] = 2.363 \times 10^{-12} \text{ M} \rightarrow \text{pH} = 11.63$$

หาสปีชีส์ต่างๆในระบบคาร์บอนเนต

$$[HCO_3^-] = \frac{[H^+] K_{a,1} TOTCO_3}{[H^+]^2 + [H^+] K_{a,1} + K_{a,1} K_{a,2}} = 4.2 \times 10^{-3} \text{ M}$$

$$[CO_3^{2-}] = \frac{K_{a,1} K_{a,2} TOTCO_3}{[H^+]^2 + [H^+] K_{a,1} + K_{a,1} K_{a,2}} = 0.09 \text{ M}$$

หาค่า Ionic strength

$$I = \frac{1}{2} \sum C_i z_i^2$$

$$= \frac{1}{2} (0.188 \times 1^2 + 4.2 \times 10^{-3} \times 1^2 + 0.09 \times 2^2)$$

$$= 0.2761 \text{ M}$$

หา $\{H^+\}$ เนื่องจากค่า Ionic strength

$$-\log \gamma_{OH^-} = \frac{0.5z^2 \sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}} = 0.1722$$

$$\gamma_{OH^-} = 0.673$$

$$\{\text{OH}^-\} = \gamma_{\text{OH}^-} [\text{OH}^-] = 2.87 \times 10^{-3} \text{ M}$$

$$\{\text{H}^+\} = 3.48 \times 10^{-12} \text{ M} \rightarrow \text{pH} = 11.45$$

หา $k_{\text{H}_2\text{O}}$ โดยสมมติอุณหภูมิที่อุณหภูมิห้อง (27 องศาเซลเซียส หรือ 300 เคลวิน)

$$\log k_{\text{H}_2\text{O}} = 329.80 - 110.54 \log T - \frac{17265}{T} \quad (4.13)$$

$$= 329.80 - 110.54 \log(300) - \frac{17265}{300}$$

$$k_{\text{H}_2\text{O}} = 0.0268 \text{ s}^{-1}$$

หา $\log k_{\text{OH}^-}^\circ$

$$\log k_{\text{OH}^-}^\circ = 13.635 - \frac{2985}{T} \quad (4.15)$$

$$= 13.635 - \frac{2985}{300}$$

$$= 3.685$$

หา k_{OH^-}

$$\log k_{\text{OH}^-} = \log k_{\text{OH}^-}^\circ + 0.20I - 0.0182I^2 \quad (4.14)$$

$$= 3.685 + 0.20(0.2761) - 0.0182(0.2761)^2$$

$$k_{\text{OH}^-} = 5481 \text{ L/mol.s}$$

หา k_1 เมื่อไม่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา

$$k_1 = 0.0263 + (5481)(2.87 \times 10^{-3}) + 0 = 15.48 \text{ s}^{-1}$$

หา k_1 เมื่อใช้สารเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีค่า k_c เท่ากับ $364 \text{ L/mol}\cdot\text{s}$ สารเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ คือ แอลอาร์จินีน ซึ่งมีมวลโมเลกุลเท่ากับ 174.2 กรัมต่อโมล เติมในปริมาณ 1 กรัมในสารละลาย 10 ลิตร ดังนั้น

$$k_{1,\text{cat}} = 15.48 + (374) \left(\frac{1}{10 \times 174.2} \right) = 15.69 \text{ s}^{-1}$$

หา k'_L จากสมการ Danckwerts เมื่อทราบ ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ละลายที่ภาวะสมดุล อัตราการดูดซึม พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ซึ่งสำหรับกรณีที่ใช้สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักผสมแอลอาร์จินีนร่วมกับตัวกลางพลาสติก ค่าดังกล่าวจึงเท่ากับ 9.76 มิลลิกรัมต่อลิตร 0.2649 มิลลิกรัมต่อลิตร-วินาที 114.21 ต่อเมตร และ 1.66×10^{-4} ตารางเมตรต่อวินาที ตามลำดับ

$$\begin{aligned} k'_L &= \sqrt{\left(\frac{N}{C_a^*} \right)^2 - k_1 D} & (4.21) \\ &= \sqrt{\left(\frac{0.2649}{9.76 \times 114.21} \right)^2 - (15.69)(1.66 \times 10^{-4})} \\ &= 1.74 \times 10^{-4} \text{ m/s} \end{aligned}$$

หา k_L

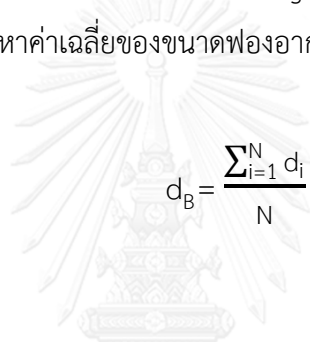
$$\begin{aligned} k_L &= \sqrt{k'^2_L + k_1 D} \\ &= \sqrt{(1.74 \times 10^{-4})^2 + (15.69)(1.66 \times 10^{-4})} \\ &= 2.38 \times 10^{-4} \text{ m/s} \end{aligned}$$

หา $k_L a$

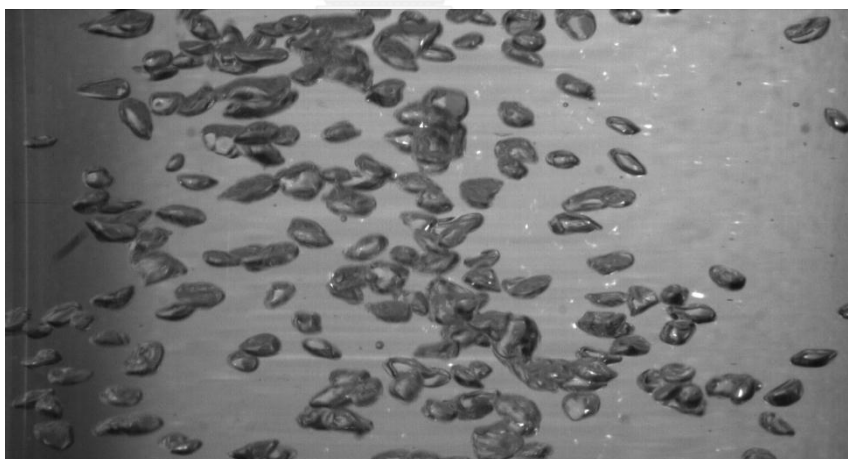
$$\begin{aligned} k_L a &= k_L \times a \\ &= 2.38 \times 10^{-4} \times 114.21 \\ &= 0.0271 \text{ m}^{-1} \end{aligned}$$

การวิเคราะห์ขนาดฟองอากาศเฉลี่ย

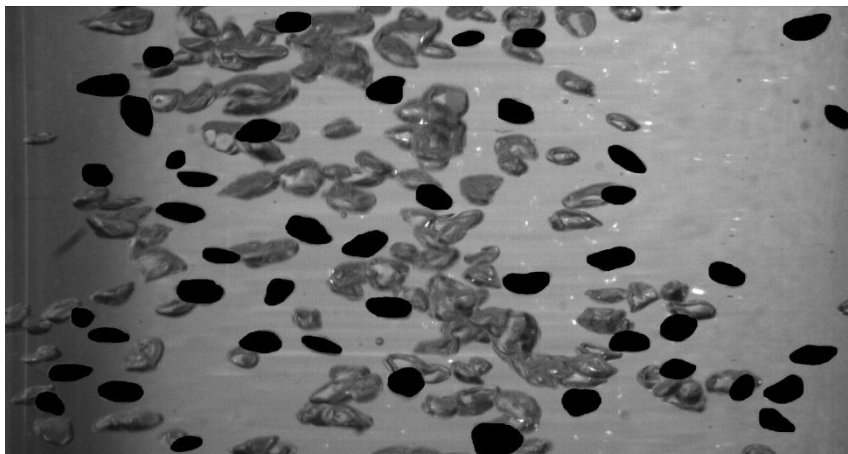
การวิเคราะห์ขนาดฟองอากาศ สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์จากภาพถ่ายด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง โดยภาพที่ถ่ายได้แสดงดังภาพที่ ก.3 จากนั้นจึงสุ่มฟองอากาศโดยการระบายฟองเป็นสีดำดังแสดงในภาพที่ ก.4 แล้วใช้โปรแกรม Image Frame Work ช่วยในการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า แล้วจึงหาค่าเฉลี่ยของขนาดฟองอากาศด้วยสมการ (3.4)



$$d_B = \frac{\sum_{i=1}^N d_i}{N} \quad (3.4)$$



ภาพที่ ก.3 ตัวอย่างภาพฟองอากาศที่ถ่ายได้จากกล้องความเร็วสูง



ภาพที่ ก.4 ตัวอย่างภาพฟองอากาศที่ระบายสีดำเพื่อนำไปวิเคราะห์หาขนาด

การวิเคราะห์สัดส่วนก๊าซ

การวิเคราะห์สัดส่วนก๊าซ คำนวณจากสมการ (3.5) จากปริมาตรของก๊าซ ของเหลว และของแข็งในระบบ

$$\mathcal{E}_G = \frac{V_G}{V_G + V_L + V_S} \quad (3.5)$$

ปริมาตรก๊าซวัดเมื่อเติมก๊าซเข้าระบบ ระดับความสูงของระบบจะสูงขึ้นเนื่องจากก๊าซ ระดับความสูงที่เปลี่ยนไปนี้ใช้คำนวณหาปริมาตรก๊าซ ส่วนปริมาตรของเหลวในระบบคงที่ คือ 10 ลิตร (0.01 ลูกบาศก์เมตร) และปริมาตรของแข็งคิดจากปริมาณตัวกลางพลาสติกที่เติม คือ 2.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร (0.0002 0.0005 และ 0.001 ลูกบาศก์เมตร)

ยกตัวอย่างกรณีใช้หัวกำเนิดฟองอากาศขนาดใหญ่และตัวกลางทรงกลม 2 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลก๊าซ 12.5 ลิตรต่อนาที

เมื่อเติมก๊าซ ระดับความสูงของระบบสูงขึ้น 4.3 เซนติเมตรคิดเป็น

$$\begin{aligned} V_G &= \frac{\pi}{4} D_c^2 h \\ &= \frac{\pi}{4} (0.14)^2 (4.3) \\ &= 0.00066 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

ดังนั้น สัดส่วนก๊าซจึงเท่ากับ

$$\begin{aligned}\epsilon_G &= \frac{0.00066}{0.00066 + 0.01 + 0.0002} \\ &= 0.0609\end{aligned}$$

การวิเคราะห์พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ

การวิเคราะห์พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ คำนวณจากสมการ (3.12)

$$a = \frac{6}{d_B} \cdot \frac{\epsilon_G}{1 - \epsilon_G - \epsilon_S} \quad (3.12)$$

ยกตัวอย่างกรณีใช้หัวกำเนิดฟองอากาศขนาดใหญ่และตัวกลางทรงกลม 2 เฟอร์เซนต์ ที่ อัตราการไหลก๊าซ 12.5 ลิตรต่อนาที
คำนวณสัดส่วนของแข็งได้เป็น

$$\begin{aligned}\epsilon_S &= \frac{0.0002}{0.00066 + 0.01 + 0.0002} \\ &= 0.0184\end{aligned}$$

และเมื่อวัดขนาดฟองอากาศเฉลี่ยได้เท่ากับ 3.40 มิลลิเมตร ดังนั้น

$$\begin{aligned}a &= \frac{6}{0.0034} \cdot \frac{0.0609}{1 - 0.0609 - 0.0184} \\ &= 116.82 \text{ m}^{-1}\end{aligned}$$

การวิเคราะห์ความเร็วลอยตัวเฉลี่ยของฟองอากาศ

การวิเคราะห์ความเร็วลอยตัวเฉลี่ยของฟองอากาศ คำนวณจากสมการ (3.17)

$$U_B = \frac{Q_G H_B S_B}{V_B V_L a} \quad (3.17)$$

ยกตัวอย่างกรณีใช้หัวกำเนิดฟองอากาศขนาดใหญ่และตัวกลางทรงกลม 2 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลก๊าซ 12.5 ลิตรต่อนาที

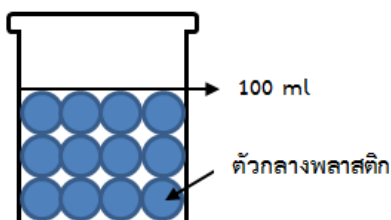
เมื่อวัดขนาดฟองอากาศเฉลี่ยได้เท่ากับ 3.40 มิลลิเมตร เมื่อสมมติว่าฟองอากาศมีรูปร่างเป็นทรงกลม ดังนั้น พื้นที่ผิวเฉลี่ยของฟองอากาศเท่ากับ 1.45×10^{-4} ตารางเมตร และปริมาตรเฉลี่ยของฟองอากาศเท่ากับ 1.65×10^{-7} ลูกบาศก์เมตร และฟองอากาศสามารถลอยได้ในแนวตั้งอยู่ในระบบประมาณ 50 เซนติเมตร

$$U_B = \frac{2.1 \times 10^{-4} \times 0.5 \times 1.45 \times 10^{-4}}{1.65 \times 10^{-4} \times 0.01 \times 116.82}$$

$$= 15.74 \text{ cm/s}$$

การหาความพรุนของชั้นตัวกลาง

การหาความพรุนของชั้นตัวกลางสามารถทำได้โดยการทดลองด้วยปิกลักษณะขนาด 100 มิลลิลิตร เติมตัวกลางพลาสติกที่ต้องการหาความพรุนของชั้นตัวกลางให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ดังภาพที่ ก.5 และใช้สมการ



ภาพที่ ก.5 เติมตัวกลางพลาสติกในปิกละ

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{\text{bulk}}}{\rho_{\text{particle}}}$$

เมื่อ ε คือ ความพรุนของชั้นตัวกลาง, ไม่มีหน่วย

ρ_{bulk} คือ ความหนาแน่นรวม, กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ρ_{particle} คือ ความหนาแน่นของตัวกลาง, กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

หรือเปลี่ยนรูปเป็น

$$\epsilon = 1 - \frac{m_{\text{bulk}}}{m_{\text{particle}}} \frac{V_{\text{particle}}}{V_{\text{bulk}}}$$

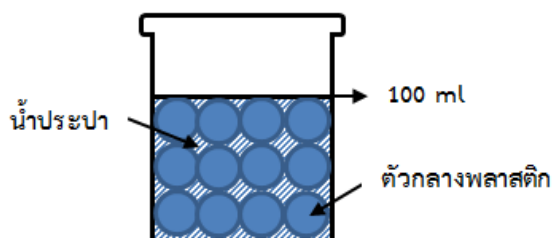
เมื่อ m_{bulk} คือ มวลรวม, กรัม

V_{bulk} คือ ปริมาตรรวม, ลูกบาศก์เซนติเมตร

m_{particle} คือ มวลของตัวกลาง, กรัม

V_{particle} คือ ปริมาตรของตัวกลาง, ลูกบาศก์เซนติเมตร

จากภาพที่ ก.5 จะพบว่ามวลรวมจะเท่ากับมวลของตัวกลาง ($m_{\text{bulk}} = m_{\text{particle}}$) เนื่องจากช่องว่างระหว่างตัวกลางเป็นอากาศซึ่งมีมวลน้อยมากๆ และเมื่อเติมน้ำประปาจนปริมาตร 100 มิลลิลิตร ดังนั้นจึงได้ดังภาพที่ ก.6 และสมการ



ภาพที่ ก.6 เติมน้ำประปาให้ปริมาตรในบีกเกอร์

$$\epsilon = 1 - \frac{V_{\text{particle}}}{V_{\text{bulk}}} = \frac{V_{\text{water}}}{V_{\text{bulk}}} = \frac{m_{\text{water}}}{\rho_{\text{water}} V_{\text{bulk}}}$$

เมื่อ m_{water} คือ มวลของน้ำ, กรัม

V_{water} คือ ปริมาตรของน้ำ, มิลลิลิตร

ρ_{water} คือ ความหนาแน่นน้ำ, กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ดังนั้นจึงต้องชั่งน้ำหนักของบีกเกอร์ก่อนและหลังเติมน้ำ ยกตัวอย่างการหาความพรุนของชั้นตัวกลางทรงกระบอกกลวง น้ำหนักของบีกเกอร์ก่อนเติมน้ำตามภาพที่ ก.5 และหลังเติมน้ำตามภาพที่

ก.6 เท่ากับ 22.36 และ 90.16 กรัม ตามลำดับ ดังนั้นมวลของน้ำจึงเป็น $90.16 - 22.36 = 67.80$ กรัม และน้ำมีความหนาแน่นเท่ากับ 0.997 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จึงคำนวณความพรุนของชั้นตัวกลางได้เป็น

$$\begin{aligned}\epsilon &= \frac{67.80}{0.997 \times 100} \\ &= 0.68\end{aligned}$$





ตารางที่ ข.1 ผลการทดลองช่วงที่ 1 เมื่อใช้หัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก ที่อัตราไหลก๊าซ 2.5 ลิตรต่อนาที

ตัวกลาง	ปริมาณ (%v)	V_S (m^3)	V_G (m^3)	d_B (mm)	ϵ_G (-)	ϵ_S (-)	a (1/m)	U_B (cm/s)	$k_L a$ (1/s)	k_L (m/s)
None	0	0	0.000185	2.73	0.0181	0	40.65	11.28	0.0082	0.000202
Ellipse	2	0.0002	0.000200	2.07	0.0192	0.0192	57.92	10.41	0.0058	0.000100
Ellipse	5	0.0005	0.000231	2.18	0.0215	0.0466	60.65	9.47	0.0068	0.000112
Ellipse	10	0.0010	0.000277	2.19	0.0246	0.0887	68.94	8.27	0.0078	0.000113
Ring	2	0.0002	0.000246	2.70	0.0236	0.0191	54.70	8.46	0.0068	0.000124
Ring	5	0.0005	0.000231	2.89	0.0215	0.0466	47.99	9.02	0.0059	0.000123
Ring	10	0.0010	0.000262	2.24	0.0232	0.0888	70.20	7.96	0.0070	0.000100
Cylinder	2	0.0002	0.000154	2.36	0.0149	0.0193	39.05	13.53	0.0061	0.000156
Cylinder	5	0.0005	0.000200	2.27	0.0187	0.0467	52.80	10.41	0.0057	0.000108
Cylinder	10	0.0010	0.000231	2.41	0.0206	0.0890	57.49	9.02	0.0063	0.000110
Sphere	2	0.0002	0.000169	2.64	0.0163	0.0193	38.48	12.30	0.0055	0.000143
Sphere	5	0.0005	0.000231	2.31	0.0215	0.0466	60.10	9.02	0.0069	0.000115
Sphere	10	0.0010	0.000262	2.37	0.0232	0.0888	66.17	7.96	0.0071	0.000107

ตารางที่ ข.2 ผลการทดลองช่วงที่ 1 เมื่อใช้หัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก ที่อัตราไหลก๊าซ 5 ลิตรต่อนาที

ตัวกลาง	ปริมาณ (%v)	V_S (m^3)	V_G (m^3)	d_B (mm)	ϵ_G (-)	ϵ_S (-)	a (1/m)	U_B (cm/s)	$k_L a$ (1/s)	k_L (m/s)
None	0	0	0.000292	2.93	0.0284	0	59.96	14.25	0.0116	0.000193
Ellipse	2	0.0002	0.000292	2.49	0.0279	0.0191	70.53	14.25	0.0075	0.000106
Ellipse	5	0.0005	0.000308	2.59	0.0285	0.0463	67.86	14.21	0.0100	0.000147
Ellipse	10	0.0010	0.000354	2.55	0.0312	0.0881	75.74	12.95	0.0109	0.000144
Ring	2	0.0002	0.000339	2.68	0.0321	0.0190	75.89	12.30	0.0090	0.000119
Ring	5	0.0005	0.000339	2.82	0.0312	0.0461	72.03	12.30	0.0084	0.000117
Ring	10	0.0010	0.000462	2.72	0.0403	0.0872	101.84	9.02	0.0103	0.000101
Cylinder	2	0.0002	0.000216	2.72	0.0207	0.0192	47.54	19.33	0.0083	0.000175
Cylinder	5	0.0005	0.000246	2.49	0.0229	0.0465	59.44	16.92	0.0070	0.000118
Cylinder	10	0.0010	0.000292	2.60	0.0259	0.0886	67.50	14.25	0.0075	0.000111
Sphere	2	0.0002	0.000292	2.61	0.0279	0.0191	67.16	14.25	0.0084	0.000125
Sphere	5	0.0005	0.000292	2.76	0.0271	0.0463	63.55	14.25	0.0101	0.000159
Sphere	10	0.0010	0.000354	2.88	0.0312	0.0881	73.81	11.77	0.0101	0.000137

ตารางที่ ข.3 ผลการทดลองช่วงที่ 1 เมื่อใช้หัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก ที่อัตราไหลก๊าซ 7.5 ลิตรต่อนาที

ตัวกลาง	ปริมาณ (%v)	V_S (m^3)	V_G (m^3)	d_B (mm)	ϵ_G (-)	ϵ_S (-)	a (1/m)	U_B (cm/s)	$k_L a$ (1/s)	k_L (m/s)
None	0	0	0.000416	3.04	0.0399	0	82.01	15.04	0.0151	0.000184
Ellipse	2	0.0002	0.000431	2.96	0.0405	0.0188	87.38	14.50	0.0101	0.000116
Ellipse	5	0.0005	0.000431	2.88	0.0394	0.0457	85.59	15.23	0.0136	0.000159
Ellipse	10	0.0010	0.000462	2.97	0.0403	0.0872	84.84	14.89	0.0141	0.000166
Ring	2	0.0002	0.000462	3.06	0.0433	0.0188	90.46	13.53	0.0133	0.000147
Ring	5	0.0005	0.000462	3.00	0.0421	0.0456	92.40	13.53	0.0103	0.000111
Ring	10	0.0010	0.000539	2.85	0.0467	0.0867	113.58	11.60	0.0137	0.000121
Cylinder	2	0.0002	0.000292	2.84	0.0279	0.0191	61.82	21.37	0.0103	0.000167
Cylinder	5	0.0005	0.000292	2.74	0.0271	0.0463	64.05	21.37	0.0085	0.000133
Cylinder	10	0.0010	0.000354	2.97	0.0312	0.0881	71.44	17.65	0.0106	0.000148
Sphere	2	0.0002	0.000431	2.90	0.0405	0.0188	89.10	14.50	0.0112	0.000126
Sphere	5	0.0005	0.000385	3.07	0.0354	0.0459	75.27	16.24	0.0121	0.000161
Sphere	10	0.0010	0.000477	3.04	0.0416	0.0871	94.18	13.10	0.0133	0.000141

ตารางที่ ข.4 ผลการทดลองช่วงที่ 1 เมื่อใช้หัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก ที่อัตราไหลก๊าซ 10 ลิตรต่อนาที

ตัวกลาง	ปริมาณ (%v)	V_S (m^3)	V_G (m^3)	d_B (mm)	ϵ_G (-)	ϵ_S (-)	a (1/m)	U_B (cm/s)	$k_L a$ (1/s)	k_L (m/s)
None	0	0	0.000523	3.47	0.0497	0	90.42	15.92	0.0165	0.000182
Ellipse	2	0.0002	0.000523	3.04	0.0488	0.0187	103.46	15.92	0.0113	0.000109
Ellipse	5	0.0005	0.000554	2.98	0.0501	0.0452	106.26	15.79	0.0161	0.000152
Ellipse	10	0.0010	0.000616	3.04	0.0530	0.0861	110.46	14.89	0.0162	0.000147
Ring	2	0.0002	0.000616	3.59	0.0569	0.0185	102.91	13.53	0.0153	0.000149
Ring	5	0.0005	0.000616	3.12	0.0554	0.0450	118.33	13.53	0.0127	0.000107
Ring	10	0.0010	0.000631	3.04	0.0543	0.0860	124.40	13.20	0.0173	0.000139
Cylinder	2	0.0002	0.000400	3.64	0.0378	0.0189	66.06	20.82	0.0123	0.000186
Cylinder	5	0.0005	0.000416	2.97	0.0381	0.0458	83.90	20.05	0.0101	0.000120
Cylinder	10	0.0010	0.000431	2.99	0.0377	0.0875	86.53	19.33	0.0130	0.000150
Sphere	2	0.0002	0.000539	2.99	0.0502	0.0186	108.14	15.47	0.0133	0.000123
Sphere	5	0.0005	0.000585	2.98	0.0528	0.0451	117.89	14.25	0.0156	0.000132
Sphere	10	0.0010	0.000616	3.23	0.0530	0.0861	114.44	13.53	0.0150	0.000131

ตารางที่ ข.5 ผลการทดลองช่วงที่ 1 เมื่อใช้หัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก ที่อัตราไหลก๊าซ 12.5 ลิตรต่อนาที

ตัวกลาง	ปริมาณ (%v)	V_S (m^3)	V_G (m^3)	d_B (mm)	ϵ_G (-)	ϵ_S (-)	a (1/m)	U_B (cm/s)	$k_L a$ (1/s)	k_L (m/s)
None	0	0	0.000677	3.62	0.0634	0	112.41	15.38	0.0170	0.000151
Ellipse	2	0.0002	0.000616	3.07	0.0569	0.0185	120.38	16.92	0.0127	0.000105
Ellipse	5	0.0005	0.000631	3.18	0.0567	0.0449	113.48	17.33	0.0155	0.000137
Ellipse	10	0.0010	0.000693	3.26	0.0592	0.0855	115.73	16.54	0.0158	0.000137
Ring	2	0.0002	0.000693	3.43	0.0636	0.0184	121.28	15.04	0.0170	0.000140
Ring	5	0.0005	0.000693	3.33	0.0619	0.0447	124.94	15.04	0.0141	0.000113
Ring	10	0.0010	0.000693	3.16	0.0592	0.0855	131.64	15.04	0.0189	0.000144
Cylinder	2	0.0002	0.000508	3.42	0.0474	0.0187	89.24	20.51	0.0139	0.000156
Cylinder	5	0.0005	0.000462	3.03	0.0421	0.0456	91.34	22.56	0.0117	0.000128
Cylinder	10	0.0010	0.000539	3.03	0.0467	0.0867	106.81	19.33	0.0140	0.000131
Sphere	2	0.0002	0.000647	3.27	0.0596	0.0184	118.63	16.11	0.0156	0.000131
Sphere	5	0.0005	0.000677	3.45	0.0606	0.0447	117.72	15.38	0.0177	0.000150
Sphere	10	0.0010	0.000693	3.30	0.0592	0.0855	125.78	15.04	0.0169	0.000134

ตารางที่ ข.6 ผลการทดลองช่วงที่ 1 เมื่อใช้หัวกำเนิดฟองอากาศขนาดใหญ่ ที่อัตราไหลก๊าซ 2.5 ลิตรต่อนาที

ตัวกลาง	ปริมาณ (%v)	V_S (m^3)	V_G (m^3)	d_B (mm)	ϵ_G (-)	ϵ_S (-)	a (1/m)	U_B (cm/s)	$k_L a$ (1/s)	k_L (m/s)
None	0	0	0.000108	3.97	0.0107	0	16.27	19.33	0.0054	0.000332
Ellipse	2	0.0002	0.000154	3.10	0.0149	0.0193	29.78	13.53	0.0055	0.000185
Ellipse	5	0.0005	0.000169	3.20	0.0159	0.0469	31.73	12.30	0.0055	0.000173
Ellipse	10	0.0010	0.000139	2.96	0.0124	0.0898	28.05	15.04	0.0054	0.000193
Ring	2	0.0002	0.000185	3.19	0.0178	0.0193	34.72	11.28	0.0073	0.000210
Ring	5	0.0005	0.000246	2.84	0.0229	0.0465	51.96	8.46	0.0071	0.000137
Ring	10	0.0010	0.000354	2.46	0.0312	0.0881	86.29	5.88	0.0078	0.000090
Cylinder	2	0.0002	0.000092	3.68	0.0090	0.0194	15.08	22.56	0.0066	0.000438
Cylinder	5	0.0005	0.000108	3.33	0.0102	0.0471	19.42	19.33	0.0064	0.000330
Cylinder	10	0.0010	0.000154	2.81	0.0138	0.0897	32.86	13.53	0.0054	0.000164
Sphere	2	0.0002	0.000123	2.48	0.0119	0.0194	29.77	16.92	0.0051	0.000171
Sphere	5	0.0005	0.000169	2.93	0.0159	0.0469	34.64	12.30	0.0074	0.000214
Sphere	10	0.0010	0.000185	2.83	0.0165	0.0894	39.16	11.28	0.0078	0.000199

ตารางที่ ข.7 ผลการทดลองช่วงที่ 1 เมื่อใช้หัวกำเนิดฟองอากาศขนาดใหญ่ ที่อัตราไหลก๊าซ 5 ลิตรต่อนาที

ตัวกลาง	ปริมาณ (%v)	V_S (m^3)	V_G (m^3)	d_B (mm)	ϵ_G (-)	ϵ_S (-)	a (1/m)	U_B (cm/s)	$k_L a$ (1/s)	k_L (m/s)
None	0	0	0.000216	3.99	0.0211	0	32.42	19.33	0.0083	0.000256
Ellipse	2	0.0002	0.000246	3.27	0.0236	0.0191	45.19	16.92	0.0093	0.000206
Ellipse	5	0.0005	0.000277	3.21	0.0257	0.0464	51.83	15.04	0.0090	0.000174
Ellipse	10	0.0010	0.000231	3.09	0.0206	0.0890	44.87	18.04	0.0081	0.000181
Ring	2	0.0002	0.000308	3.21	0.0293	0.0190	57.62	13.53	0.0106	0.000184
Ring	5	0.0005	0.000431	3.07	0.0394	0.0457	84.33	9.67	0.0102	0.000121
Ring	10	0.0010	0.000508	2.75	0.0441	0.0869	110.80	8.20	0.0131	0.000118
Cylinder	2	0.0002	0.000231	3.58	0.0221	0.0192	38.66	18.04	0.0102	0.000264
Cylinder	5	0.0005	0.000246	3.37	0.0229	0.0465	43.79	16.92	0.0105	0.000240
Cylinder	10	0.0010	0.000262	2.97	0.0232	0.0888	52.95	15.92	0.0097	0.000183
Sphere	2	0.0002	0.000292	2.97	0.0279	0.0191	59.15	14.25	0.0104	0.000176
Sphere	5	0.0005	0.000308	2.91	0.0285	0.0463	63.45	13.53	0.0109	0.000172
Sphere	10	0.0010	0.000323	3.12	0.0285	0.0883	62.14	12.89	0.0104	0.000167

ตารางที่ ข.8 ผลการทดลองช่วงที่ 1 เมื่อใช้หัวกำเนิดฟองอากาศขนาดใหญ่ ที่อัตราไหลก๊าซ 7.5 ลิตรต่อนาที

ตัวกลาง	ปริมาณ (%v)	V_S (m^3)	V_G (m^3)	d_B (mm)	ϵ_G (-)	ϵ_S (-)	a (1/m)	U_B (cm/s)	$k_L a$ (1/s)	k_L (m/s)
None	0	0	0.000308	4.18	0.0299	0	44.19	20.30	0.0111	0.000251
Ellipse	2	0.0002	0.000400	3.49	0.0378	0.0189	68.89	15.62	0.0132	0.000192
Ellipse	5	0.0005	0.000416	3.42	0.0381	0.0458	73.00	15.04	0.0125	0.000171
Ellipse	10	0.0010	0.000416	3.36	0.0364	0.0876	74.15	15.04	0.0120	0.000162
Ring	2	0.0002	0.000400	3.37	0.0378	0.0189	71.31	15.62	0.0133	0.000187
Ring	5	0.0005	0.000554	3.15	0.0501	0.0452	105.48	11.28	0.0144	0.000137
Ring	10	0.0010	0.000616	3.14	0.0530	0.0861	117.63	10.15	0.0156	0.000133
Cylinder	2	0.0002	0.000308	3.32	0.0293	0.0190	55.62	20.30	0.0131	0.000236
Cylinder	5	0.0005	0.000323	3.38	0.0299	0.0462	57.37	19.33	0.0137	0.000239
Cylinder	10	0.0010	0.000385	3.19	0.0338	0.0878	72.35	16.24	0.0138	0.000191
Sphere	2	0.0002	0.000431	3.27	0.0405	0.0188	79.08	14.50	0.0137	0.000173
Sphere	5	0.0005	0.000431	3.04	0.0394	0.0457	85.06	14.50	0.0142	0.000167
Sphere	10	0.0010	0.000431	2.93	0.0377	0.0875	88.38	14.50	0.0140	0.000158

ตารางที่ ข.9 ผลการทดลองช่วงที่ 1 เมื่อใช้หัวกำเนิดฟองอากาศขนาดใหญ่ ที่อัตราไหลก๊าซ 10 ลิตรต่อนาที

ตัวกลาง	ปริมาณ (%v)	V_S (m^3)	V_G (m^3)	d_B (mm)	ϵ_G (-)	ϵ_S (-)	a (1/m)	U_B (cm/s)	$k_L a$ (1/s)	k_L (m/s)
None	0	0	0.000431	4.22	0.0413	0	61.29	19.33	0.0140	0.000228
Ellipse	2	0.0002	0.000539	3.84	0.0502	0.0186	84.20	15.47	0.0160	0.000190
Ellipse	5	0.0005	0.000539	3.85	0.0488	0.0453	84.07	15.47	0.0151	0.000180
Ellipse	10	0.0010	0.000523	3.90	0.0454	0.0868	80.54	15.92	0.0146	0.000181
Ring	2	0.0002	0.000523	3.50	0.0488	0.0187	89.84	15.92	0.0161	0.000179
Ring	5	0.0005	0.000662	3.33	0.0593	0.0448	119.33	12.59	0.0164	0.000137
Ring	10	0.0010	0.000708	3.26	0.0605	0.0854	130.18	11.77	0.0177	0.000136
Cylinder	2	0.0002	0.000431	3.75	0.0405	0.0188	68.99	19.33	0.0171	0.000248
Cylinder	5	0.0005	0.000462	3.41	0.0421	0.0456	81.23	18.04	0.0166	0.000204
Cylinder	10	0.0010	0.000539	3.13	0.0467	0.0867	103.13	15.47	0.0170	0.000165
Sphere	2	0.0002	0.000570	3.57	0.0529	0.0186	95.69	14.63	0.0172	0.000180
Sphere	5	0.0005	0.000554	3.26	0.0501	0.0452	101.89	15.04	0.0174	0.000171
Sphere	10	0.0010	0.000554	3.43	0.0480	0.0865	96.87	15.04	0.0176	0.000182

ตารางที่ ข.10 ผลการทดลองช่วงที่ 1 เมื่อใช้หัวกำเนิดฟองอากาศขนาดใหญ่ ที่อัตราไหลก๊าซ 12.5 ลิตรต่อนาที

ตัวกลาง	ปริมาณ (%v)	V_S (m^3)	V_G (m^3)	d_B (mm)	ϵ_G (-)	ϵ_S (-)	a (1/m)	U_B (cm/s)	$k_L a$ (1/s)	k_L (m/s)
None	0	0	0.000554	4.31	0.0525	0	77.09	18.80	0.0161	0.000209
Ellipse	2	0.0002	0.000662	3.80	0.0609	0.0184	104.43	15.74	0.0188	0.000180
Ellipse	5	0.0005	0.000631	4.02	0.0567	0.0449	94.15	16.50	0.0177	0.000188
Ellipse	10	0.0010	0.000616	4.13	0.0530	0.0861	89.49	16.92	0.0167	0.000187
Ring	2	0.0002	0.000708	3.85	0.0649	0.0183	110.29	14.71	0.0191	0.000173
Ring	5	0.0005	0.000739	3.66	0.0657	0.0445	121.07	14.10	0.0193	0.000159
Ring	10	0.0010	0.000800	3.52	0.0678	0.0847	136.63	13.01	0.0202	0.000148
Cylinder	2	0.0002	0.000554	3.88	0.0515	0.0186	85.76	18.80	0.0183	0.000213
Cylinder	5	0.0005	0.000570	3.38	0.0515	0.0452	100.97	18.29	0.0188	0.000186
Cylinder	10	0.0010	0.000631	3.37	0.0543	0.0860	112.43	16.50	0.0190	0.000169
Sphere	2	0.0002	0.000662	3.40	0.0609	0.0184	116.82	15.74	0.0195	0.000167
Sphere	5	0.0005	0.000677	3.38	0.0606	0.0447	120.41	15.38	0.0192	0.000159
Sphere	10	0.0010	0.000708	3.66	0.0605	0.0854	116.20	14.71	0.0193	0.000166

ตารางที่ ข.11 ผลการทดลองช่วงที่ 2 เมื่อใช้น้ำประปาเป็นของเหลวดูดซึม

Time (s)	[CO ₂] _{out} (ppm)	[CO ₂] _{out} (mg/m ³)	[CO ₂] _{out} × t (mg.s/m ³)	[CO ₂] _{in} × t (mg.s/m ³)	[CO ₂] _{liquid} (mg/L)
0	770	1,493	-	-	-
10	2,576	4,993	32,102	145,374	2.36
20	3,573	6,926	92,590	290,749	4.13
30	4,792	9,288	175,256	436,123	5.43
40	5,532	10,723	275,006	581,498	6.39
50	6,149	11,919	387,702	726,872	7.07
60	6,434	12,471	510,020	872,247	7.55
70	6,768	13,119	639,324	1,017,621	7.88
80	7,110	13,781	773,560	1,162,996	8.11
90	7,183	13,923	911,148	1,308,370	8.28
100	7,245	14,043	1,050,907	1,453,744	8.39
110	7,251	14,055	1,191,973	1,599,119	8.48
120	7,347	14,241	1,333,736	1,744,493	8.56
130	7,322	14,192	1,475,790	1,889,868	8.63
140	7,270	14,092	1,617,884	2,035,242	8.69
150	7,344	14,235	1,759,882	2,180,617	8.77
160	7,317	14,183	1,901,737	2,325,991	8.84
170	7,313	14,175	2,043,462	2,471,366	8.91
180	7,378	14,301	2,185,112	2,616,740	8.99
190	7,368	14,282	2,326,767	2,762,115	9.07
200	7,285	14,121	2,468,518	2,907,489	9.15
210	7,260	14,072	2,610,461	3,052,863	9.22
220	7,293	14,136	2,752,683	3,198,238	9.28
230	7,355	14,256	2,895,255	3,343,612	9.34
240	7,422	14,386	3,038,223	3,488,987	9.39
250	7,432	14,406	3,181,599	3,634,361	9.43
260	7,455	14,450	3,325,346	3,779,736	9.47
270	7,451	14,442	3,469,363	3,925,110	9.49
280	7,397	14,338	3,613,465	4,070,485	9.52
290	7,380	14,305	3,757,360	4,215,859	9.55
300	7,388	14,320	3,900,613	4,361,233	9.60

ตารางที่ ข.12 ผลการทดลองช่วงที่ 2 เมื่อใช้ Na_2CO_3 1 %w เป็นของเหลวดูดซึม

Time (s)	$[\text{CO}_2]_{\text{out}}$ (ppm)	$[\text{CO}_2]_{\text{out}}$ (mg/m^3)	$[\text{CO}_2]_{\text{out}} \times t$ ($\text{mg.s}/\text{m}^3$)	$[\text{CO}_2]_{\text{in}} \times t$ ($\text{mg.s}/\text{m}^3$)	$[\text{CO}_2]_{\text{liquid}}$ (mg/L)
0	790	1,531	-	-	-
10	787	1,525	15,453	145,374	2.71
20	972	1,884	39,833	290,749	5.23
30	1,731	3,355	70,251	436,123	7.62
40	2,207	4,278	104,300	581,498	9.94
50	2,176	4,218	140,042	726,872	12.23
60	1,890	3,663	175,979	872,247	14.51
70	1,694	3,284	211,020	1,017,621	16.80
80	1,520	2,946	244,440	1,162,996	19.14
90	1,418	2,749	275,839	1,308,370	21.51
100	1,340	2,597	305,085	1,453,744	23.93
110	1,303	2,526	332,270	1,599,119	26.39
120	1,261	2,444	357,654	1,744,493	28.89
130	1,246	2,415	381,615	1,889,868	31.42
140	1,230	2,384	404,597	2,035,242	33.97
150	1,236	2,396	427,063	2,180,617	36.53
160	1,220	2,365	449,453	2,325,991	39.09
170	1,228	2,380	472,146	2,471,366	41.65
180	1,209	2,343	495,426	2,616,740	44.19
190	1,266	2,454	519,467	2,762,115	46.72
200	1,291	2,502	544,313	2,907,489	49.23
210	1,317	2,553	569,881	3,052,863	51.73
220	1,328	2,574	595,969	3,198,238	54.21
230	1,313	2,545	622,282	3,343,612	56.69
240	1,286	2,493	648,467	3,488,987	59.18
250	1,278	2,477	674,173	3,634,361	61.67
260	1,295	2,510	699,122	3,779,736	64.18
270	1,291	2,502	723,197	3,925,110	66.71
280	1,212	2,349	746,559	4,070,485	69.25
290	1,238	2,400	769,779	4,215,859	71.79
300	1,256	2,435	793,991	4,361,233	74.32

ตารางที่ ข.13 ผลการทดลองช่วงที่ 2 เมื่อใช้ Na_2CO_3 5 %w เป็นของเหลวดูดซึม

Time (s)	$[\text{CO}_2]_{\text{out}}$ (ppm)	$[\text{CO}_2]_{\text{out}}$ (mg/m^3)	$[\text{CO}_2]_{\text{out}} \times t$ ($\text{mg.s}/\text{m}^3$)	$[\text{CO}_2]_{\text{in}} \times t$ ($\text{mg.s}/\text{m}^3$)	$[\text{CO}_2]_{\text{liquid}}$ (mg/L)
0	783	1,518	-	-	-
10	777	1,506	13,909	145,374	2.74
20	874	1,694	46,868	290,749	5.08
30	2,576	4,993	93,171	436,123	7.14
40	3,758	7,284	147,747	581,498	9.04
50	3,866	7,494	206,272	726,872	10.85
60	3,467	6,720	265,230	872,247	12.65
70	2,682	5,199	321,934	1,017,621	14.49
80	2,323	4,503	374,510	1,162,996	16.43
90	1,839	3,565	421,843	1,308,370	18.47
100	1,690	3,276	463,504	1,453,744	20.63
110	1,524	2,954	499,649	1,599,119	22.91
120	1,416	2,745	530,903	1,744,493	25.28
130	1,326	2,570	558,239	1,889,868	27.74
140	1,283	2,487	582,845	2,035,242	30.26
150	1,321	2,561	605,996	2,180,617	32.80
160	1,484	2,876	628,928	2,325,991	35.36
170	1,488	2,884	652,726	2,471,366	37.89
180	1,470	2,849	678,230	2,616,740	40.39
190	1,532	2,970	705,959	2,762,115	42.84
200	1,610	3,121	736,064	2,907,489	45.24
210	1,660	3,218	768,317	3,052,863	47.59
220	1,613	3,127	802,135	3,198,238	49.92
230	1,577	3,057	836,649	3,343,612	52.23
240	1,595	3,092	870,825	3,488,987	54.55
250	1,590	3,082	903,634	3,634,361	56.89
260	1,521	2,948	934,286	3,779,736	59.28
270	1,529	2,964	962,534	3,925,110	61.72
280	1,538	2,981	989,037	4,070,485	64.20
290	1,609	3,119	1,015,816	4,215,859	66.67
300	1,581	3,064	1,046,775	4,361,233	69.05

ตารางที่ ข.14 ผลการทดลองช่วงที่ 2 เมื่อใช้ Na_2CO_3 10 %w เป็นของเหลวดูดซึม

Time (s)	$[\text{CO}_2]_{\text{out}}$ (ppm)	$[\text{CO}_2]_{\text{out}}$ (mg/m^3)	$[\text{CO}_2]_{\text{out}} \times t$ ($\text{mg.s}/\text{m}^3$)	$[\text{CO}_2]_{\text{in}} \times t$ ($\text{mg.s}/\text{m}^3$)	$[\text{CO}_2]_{\text{liquid}}$ (mg/L)
0	788	1,527	-	-	-
10	788	1,527	13,693	145,374	2.74
20	925	1,793	43,826	290,749	5.14
30	2,396	4,644	87,309	436,123	7.27
40	3,560	6,900	140,792	581,498	9.18
50	3,833	7,430	200,955	726,872	10.96
60	3,782	7,331	264,723	872,247	12.66
70	3,506	6,796	329,431	1,017,621	14.34
80	3,007	5,829	392,924	1,162,996	16.04
90	2,610	5,059	453,604	1,308,370	17.81
100	2,438	4,726	510,450	1,453,744	19.65
110	2,340	4,536	562,983	1,599,119	21.59
120	2,230	4,322	611,211	1,744,493	23.61
130	2,145	4,158	655,550	1,889,868	25.71
140	2,123	4,115	696,725	2,035,242	27.89
150	2,175	4,216	735,659	2,180,617	30.10
160	2,203	4,270	773,364	2,325,991	32.35
170	2,244	4,350	810,824	2,471,366	34.59
180	2,203	4,270	848,898	2,616,740	36.83
190	2,080	4,032	888,229	2,762,115	39.04
200	2,029	3,933	929,176	2,907,489	41.21
210	2,074	4,020	971,778	3,052,863	43.36
220	2,149	4,165	1,015,748	3,198,238	45.47
230	2,162	4,191	1,060,509	3,343,612	47.56
240	2,193	4,251	1,105,278	3,488,987	49.66
250	2,188	4,241	1,149,199	3,634,361	51.77
260	2,188	4,241	1,191,545	3,779,736	53.92
270	2,208	4,280	1,231,976	3,925,110	56.11
280	2,125	4,119	1,270,879	4,070,485	58.33
290	2,101	4,072	1,309,778	4,215,859	60.54
300	2,188	4,241	1,351,838	4,361,233	62.70

ตารางที่ ข.15 ผลการทดลองช่วงที่ 2 เมื่อใช้ Na_2CO_3 1 %w ผสม L-arginine เป็นของเหลวดูดซึม

Time (s)	$[\text{CO}_2]_{\text{out}}$ (ppm)	$[\text{CO}_2]_{\text{out}}$ (mg/m^3)	$[\text{CO}_2]_{\text{out}} \times t$ ($\text{mg}\cdot\text{s}/\text{m}^3$)	$[\text{CO}_2]_{\text{in}} \times t$ ($\text{mg}\cdot\text{s}/\text{m}^3$)	$[\text{CO}_2]_{\text{liquid}}$ (mg/L)
0	728	1,411	-	-	-
10	729	1,413	13,884	145,374	2.74
20	827	1,603	30,561	290,749	5.42
30	954	1,849	49,720	436,123	8.05
40	1,192	2,310	70,889	581,498	10.64
50	1,307	2,533	93,513	726,872	13.19
60	1,325	2,568	117,021	872,247	15.73
70	1,291	2,502	140,868	1,017,621	18.27
80	1,198	2,322	164,582	1,162,996	20.80
90	1,118	2,167	187,778	1,308,370	23.35
100	1,056	2,047	210,181	1,453,744	25.91
110	1,021	1,979	231,628	1,599,119	28.49
120	972	1,884	252,063	1,744,493	31.09
130	959	1,859	271,536	1,889,868	33.72
140	950	1,841	290,180	2,035,242	36.36
150	962	1,865	308,200	2,180,617	39.01
160	957	1,855	325,845	2,325,991	41.67
170	963	1,867	343,392	2,471,366	44.33
180	970	1,880	361,118	2,616,740	46.99
190	978	1,896	379,279	2,762,115	49.64
200	979	1,898	398,091	2,907,489	52.28
210	1,001	1,940	417,712	3,052,863	54.90
220	1,029	1,995	438,231	3,198,238	57.50
230	1,096	2,124	459,658	3,343,612	60.08
240	1,163	2,254	481,930	3,488,987	62.65
250	1,187	2,301	504,916	3,634,361	65.20
260	1,231	2,386	528,439	3,779,736	67.74
270	1,251	2,425	552,300	3,925,110	70.27
280	1,280	2,481	576,325	4,070,485	72.80
290	1,275	2,471	600,417	4,215,859	75.32
300	1,214	2,353	624,627	4,361,233	77.85

ตารางที่ ข.16 ผลการทดลองช่วงที่ 3 เมื่อใช้น้ำประปาเป็นของเหลวดูดซึม

Time (s)	[CO ₂] _{out} (ppm)	[CO ₂] _{out} (mg/m ³)	[CO ₂] _{out} × t (mg.s/m ³)	[CO ₂] _{in} × t (mg.s/m ³)	[CO ₂] _{liquid} (mg/L)
0	747	1,448	-	-	-
10	2,548	4,939	32,487	145,374	2.35
20	3,752	7,273	94,817	290,749	4.08
30	4,763	9,232	178,866	436,123	5.36
40	5,586	10,827	278,448	581,498	6.31
50	5,962	11,556	388,962	726,872	7.04
60	6,121	11,864	507,077	872,247	7.61
70	6,377	12,361	630,465	1,017,621	8.07
80	6,679	12,946	757,568	1,162,996	8.45
90	6,852	13,281	887,396	1,308,370	8.77
100	6,977	13,524	1,019,368	1,453,744	9.05
110	6,965	13,500	1,153,174	1,599,119	9.29
120	6,903	13,380	1,288,671	1,744,493	9.50
130	6,980	13,530	1,425,796	1,889,868	9.67
140	7,180	13,917	1,564,509	2,035,242	9.81
150	7,312	14,173	1,704,755	2,180,617	9.91
160	7,389	14,322	1,846,434	2,325,991	9.99
170	7,476	14,491	1,989,398	2,471,366	10.04
180	7,480	14,499	2,133,448	2,616,740	10.07
190	7,507	14,551	2,278,350	2,762,115	10.08
200	7,498	14,534	2,423,851	2,907,489	10.08
210	7,479	14,497	2,569,700	3,052,863	10.07
220	7,511	14,559	2,715,672	3,198,238	10.05
230	7,536	14,607	2,861,588	3,343,612	10.04
240	7,516	14,568	3,007,334	3,488,987	10.03
250	7,501	14,539	3,152,869	3,634,361	10.03
260	7,493	14,524	3,298,230	3,779,736	10.03
270	7,503	14,543	3,443,515	3,925,110	10.03
280	7,513	14,563	3,588,866	4,070,485	10.03
290	7,522	14,580	3,734,415	4,215,859	10.03
300	7,519	14,574	3,880,234	4,361,233	10.02

ตารางที่ ข.17 ผลการทดลองช่วงที่ 3 เมื่อใช้ Na_2CO_3 1 %w เป็นของเหลวดูดซึม

Time (s)	$[\text{CO}_2]_{\text{out}}$ (ppm)	$[\text{CO}_2]_{\text{out}}$ (mg/m^3)	$[\text{CO}_2]_{\text{out}} \times t$ ($\text{mg.s}/\text{m}^3$)	$[\text{CO}_2]_{\text{in}} \times t$ ($\text{mg.s}/\text{m}^3$)	$[\text{CO}_2]_{\text{liquid}}$ (mg/L)
0	794	1,539	-	-	-
10	896	1,737	16,054	145,374	2.69
20	918	1,779	33,827	290,749	5.35
30	993	1,925	53,368	436,123	7.97
40	1,195	2,316	74,575	581,498	10.56
50	1,231	2,386	97,255	726,872	13.12
60	1,267	2,456	121,156	872,247	15.65
70	1,315	2,549	146,007	1,017,621	18.16
80	1,324	2,566	171,545	1,162,996	20.66
90	1,330	2,578	197,528	1,308,370	23.14
100	1,339	2,595	223,754	1,453,744	25.62
110	1,353	2,623	250,064	1,599,119	28.11
120	1,356	2,628	276,346	1,744,493	30.59
130	1,349	2,615	302,537	1,889,868	33.07
140	1,332	2,582	328,611	2,035,242	35.55
150	1,334	2,586	354,580	2,180,617	38.04
160	1,342	2,601	380,478	2,325,991	40.53
170	1,351	2,619	406,356	2,471,366	43.02
180	1,351	2,619	432,270	2,616,740	45.51
190	1,346	2,609	458,269	2,762,115	48.00
200	1,358	2,632	484,393	2,907,489	50.48
210	1,360	2,636	510,657	3,052,863	52.96
220	1,356	2,628	537,055	3,198,238	55.44
230	1,354	2,624	563,557	3,343,612	57.92
240	1,361	2,638	590,111	3,488,987	60.39
250	1,366	2,648	616,654	3,634,361	62.87
260	1,363	2,642	643,125	3,779,736	65.35
270	1,363	2,642	669,485	3,925,110	67.83
280	1,367	2,650	695,748	4,070,485	70.31
290	1,362	2,640	722,014	4,215,859	72.79
300	1,370	2,656	748,512	4,361,233	75.27

ตารางที่ ข.18 ผลการทดลองช่วงที่ 3 เมื่อใช้ Na_2CO_3 1 %w ผสม L-arginine เป็นของเหลวดูดซึม

Time (s)	$[\text{CO}_2]_{\text{out}}$ (ppm)	$[\text{CO}_2]_{\text{out}}$ (mg/m^3)	$[\text{CO}_2]_{\text{out}} \times t$ ($\text{mg.s}/\text{m}^3$)	$[\text{CO}_2]_{\text{in}} \times t$ ($\text{mg.s}/\text{m}^3$)	$[\text{CO}_2]_{\text{liquid}}$ (mg/L)
0	726	1,407	-	-	-
10	726	1,407	14,076	145,374	2.74
20	775	1,502	28,828	290,749	5.46
30	793	1,537	44,334	436,123	8.16
40	884	1,713	60,585	581,498	10.85
50	896	1,737	77,514	726,872	13.53
60	941	1,824	95,019	872,247	16.19
70	943	1,828	112,980	1,017,621	18.85
80	942	1,826	131,280	1,162,996	21.49
90	938	1,818	149,810	1,308,370	24.14
100	952	1,845	168,479	1,453,744	26.78
110	967	1,874	187,220	1,599,119	29.41
120	961	1,863	205,991	1,744,493	32.05
130	964	1,869	224,771	1,889,868	34.69
140	981	1,901	243,565	2,035,242	37.33
150	987	1,913	262,394	2,180,617	39.96
160	996	1,931	281,293	2,325,991	42.60
170	995	1,929	300,305	2,471,366	45.23
180	988	1,915	319,477	2,616,740	47.86
190	992	1,923	338,849	2,762,115	50.48
200	1,005	1,948	358,456	2,907,489	53.10
210	1,023	1,983	378,320	3,052,863	55.72
220	1,048	2,031	398,446	3,198,238	58.33
230	1,066	2,066	418,823	3,343,612	60.93
240	1,069	2,072	439,425	3,488,987	63.53
250	1,075	2,084	460,211	3,634,361	66.13
260	1,086	2,105	481,136	3,779,736	68.72
270	1,089	2,111	502,157	3,925,110	71.31
280	1,087	2,107	523,246	4,070,485	73.90
290	1,092	2,117	544,412	4,215,859	76.49
300	1,106	2,144	565,716	4,361,233	79.07

ตารางที่ ข.19 ผลการทดลองช่วงที่ 3 เมื่อใช้ Na_2CO_3 1 %w ผสม L-arginine เป็นของเหลวดูซึม ร่วมกับตัวกลางพลาสติก

Time (s)	$[\text{CO}_2]_{\text{out}}$ (ppm)	$[\text{CO}_2]_{\text{out}}$ (mg/m^3)	$[\text{CO}_2]_{\text{out}} \times t$ ($\text{mg.s}/\text{m}^3$)	$[\text{CO}_2]_{\text{in}} \times t$ ($\text{mg.s}/\text{m}^3$)	$[\text{CO}_2]_{\text{liquid}}$ (mg/L)
0	741	1,436	-	-	-
10	761	1,475	14,525	145,374	2.73
20	767	1,487	29,101	290,749	5.45
30	776	1,504	43,949	436,123	8.17
40	802	1,555	59,150	581,498	10.88
50	805	1,560	74,691	726,872	13.59
60	807	1,564	90,510	872,247	16.29
70	817	1,584	106,521	1,017,621	18.98
80	818	1,586	122,642	1,162,996	21.67
90	837	1,622	138,808	1,308,370	24.37
100	836	1,620	154,986	1,453,744	27.06
110	849	1,646	171,172	1,599,119	29.75
120	859	1,665	187,400	1,744,493	32.44
130	864	1,675	203,735	1,889,868	35.13
140	872	1,690	220,265	2,035,242	37.81
150	886	1,717	237,094	2,180,617	40.49
160	890	1,725	254,332	2,325,991	43.16
170	902	1,748	272,086	2,471,366	45.82
180	922	1,787	290,442	2,616,740	48.46
190	982	1,903	309,465	2,762,115	51.10
200	1,043	2,022	329,182	2,907,489	53.71
210	1,103	2,138	349,581	3,052,863	56.32
220	1,127	2,184	370,604	3,198,238	58.91
230	1,134	2,198	392,153	3,343,612	61.49
240	1,134	2,198	414,089	3,488,987	64.06
250	1,132	2,194	436,248	3,634,361	66.63
260	1,136	2,202	458,456	3,779,736	69.19
270	1,128	2,186	480,555	3,925,110	71.76
280	1,125	2,181	502,429	4,070,485	74.33
290	1,113	2,157	524,052	4,215,859	76.91
300	1,110	2,152	545,532	4,361,233	79.49

ตารางที่ ข.20 ผลการทดลองดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในคอลัมน์แบบฟองอากาศ (ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ)

ระบบดูดซึม	V_S (m^3)	V_G (m^3)	d_B (mm)	ϵ_G (-)	ϵ_S (-)	a (1/m)	U_B (cm/s)
W	0	0.000554	4.31	0.0525	0	77.09	18.80
S	0	0.000611	3.47	0.0576	0	105.60	17.05
S+A	0	0.000647	3.45	0.0608	0	112.39	16.10
S+A+M	0.0010	0.000607	3.19	0.0523	0.0862	114.21	17.16

ตารางที่ ข.21 ผลการทดลองดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในคอลัมน์แบบฟองอากาศ (ตัวแปรด้านการถ่ายเทมวล)

ระบบดูดซึม	k_L (m/s)	$k_L a$ (1/s)	N (mg/L.s)	E (-)	Ha (-)
W	0.000145	0.0112	0.1161	1	-
S	0.000242	0.0255	0.2492	2.15	0.88
S+A	0.000240	0.0269	0.2630	2.27	0.91
S+A+M	0.000238	0.0271	0.2649	2.28	0.93

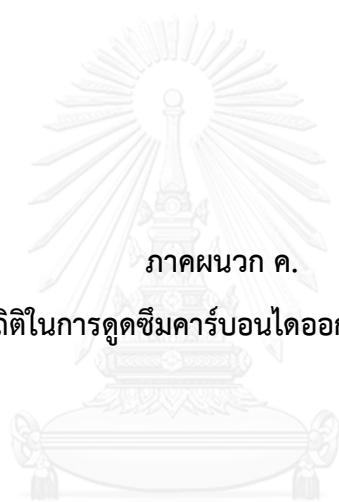
* W คือ น้ำประปา

S คือ สารละลาย Na_2CO_3 ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

S+A คือ สารละลายใช้ Na_2CO_3 ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักผสม L-arginine

S+A+M คือ สารละลายใช้ Na_2CO_3 ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักผสม L-arginine

ร่วมกับตัวกลาง พลาสติก



ภาคผนวก ค.

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติในการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในคอลัมน์แบบฟองอากาศ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ค.1 ผลการวิเคราะห์ t-test เปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมในสารละลาย Na_2CO_3 1%w กับสารละลาย Na_2CO_3 1%w ผสม L-arginine ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

t-Test: Paired Two Sample for Means		
	Na_2CO_3	S+A
Mean	39.23141	41.16805
Variance	481.385	536.0935
Observations	30	30
Pearson Correlation	0.999996	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	29	
t Stat	-8.73224	
P(T<=t) one-tail	6.5E-10	
t Critical one-tail	1.699127	
P(T<=t) two-tail	1.3E-09	
t Critical two-tail	2.04523	

ตารางที่ ค.2 ผลการวิเคราะห์ t-test เปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมในสารละลาย Na_2CO_3 1%w ผสม L-arginine กับสารละลาย Na_2CO_3 1%w ผสม L-arginine ร่วมกับตัวกลางพลาสติก ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

t-Test: Paired Two Sample for Means		
	S+A	S+A+M
Mean	41.16805	41.53845
Variance	536.0935	543.9987
Observations	30	30
Pearson Correlation	0.999985	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	29	
t Stat	-9.49883	
P(T<=t) one-tail	1.05E-10	
t Critical one-tail	1.699127	
P(T<=t) two-tail	2.09E-10	
t Critical two-tail	2.04523	

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายภาสกร วรรณวงษ์ เกิดเมื่อวันที่ 24 มิถุนายน พ.ศ. 2530 ที่จังหวัดสกลนคร สำเร็จ การศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์ มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี การศึกษา 2555

การเผยแพร่วิทยานิพนธ์แบบบรรยายในที่ประชุมระดับนานาชาติ

[1] Passaworn Warunyuwong, Rewadee Dammee, Kritchart Wongwailikhit, Prajak Sastaravet, Nattawin Chawaloessphonsiya and Pisut Painmanakul. 2015. "Effect of Gas Sparger and Plastic Media on Mass Transfer and Hydrodynamic Parameters in Bubble Column Reactor". The Proceedings of 21st Thailand-Korea Conference on Environmental Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand. 1 - 6 February, 2015.