

การวิเคราะห์กลไกการดูดซึ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยวิธีทางกายภาพและทางเคมีในคอลัมน์แบบ
ฟองอากาศและคอลัมน์แบบอากาศยก

นางสาวเรวดี คำมี



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.

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Analysis of carbon dioxide absorption mechanism by physical and chemical methods
in bubble column and airlift reactor

Miss Rewadee Dammee



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

เรวดี คำมี : การวิเคราะห์กลไกการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยวิธีทางกายภาพและทางเคมีในคอลัมน์แบบฟองอากาศและคอลัมน์แบบอากาศยก (Analysis of carbon dioxide absorption mechanism by physical and chemical methods in bubble column and airlift reactor) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล, 168 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากลไกการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยคอลัมน์แบบฟองอากาศและคอลัมน์แบบอากาศยก โดยการพิจารณาหวักระจายอากาศร่วมกับการใช้ตัวกลางพลาสติกที่เหมาะสม โดยขั้นตอนแรกศึกษาผลกระทบจากหวักระจายอากาศที่มีรูกระจายอากาศขนาดแตกต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อค่าพารามิเตอร์ตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์และการถ่ายเทมวลสารของฟองอากาศ หลังจากนั้นศึกษาผลกระทบจากตัวกลางพลาสติกโพลีโพลีน 4 รูปทรงและปริมาณ 2-10% โดยปริมาตร ร่วมกับหวักระจายอากาศที่ได้จากการผลการทดลองในขั้นตอนแรก และวิเคราะห์ตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์เช่นเดียวกับขั้นตอนแรก ต่อมาจะศึกษาประสิทธิภาพการดูดซึม CO_2 ด้วย MEA และ Na_2CO_3 โดยผลประสิทธิภาพที่ดีที่สุดจะนำไปทดลองร่วมกับตัวกลาง และสุดท้ายเป็นวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบกับคอลัมน์ทั้ง 2 ชนิด ซึ่งจากผลวิจัยพบว่า หวักระจายแบบ Rigid ขนาดใหญ่เป็นหวักระจายที่ใช้พลังงานน้อยที่สุดและให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมดีที่อัตราการใช้ 12.5 ลิตรต่อเวลาที่ขึ้นไป นอกจากนี้ประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสูงขึ้นเมื่อใช้ร่วมกับตัวกลางพลาสติกที่มีความพรุนสูงในงานวิจัยนี้ คือ ตัวกลางทรงกระบอกกลวง และส่งผลให้ประสิทธิภาพดีขึ้นอีกเมื่อใช้ปริมาณตัวกลางที่ 5 – 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ทั้งนี้ เมื่อทดลองเฟสของเหลวด้วยสารละลายพบว่า MEA ให้ประสิทธิภาพการดูดซึมสูงกว่า Na_2CO_3 ที่ความเข้มข้น 1% โดยปริมาตร ซึ่งเมื่อนำ MEA ทดลองร่วมกับตัวกลางพบว่าประสิทธิภาพการดูดซึม CO_2 สูงถึง 92% อย่างไรก็ตามการเติมตัวกลางในระบบที่เฟสของเหลวเป็นสารละลายส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซึมเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย 2 -5% เท่านั้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าเฟสของเหลวเปลี่ยนจากน้ำประปาเป็นสารละลายทำให้ความหนาแน่นและแรงตึงผิวของน้ำเปลี่ยนไป ตัวกลางพลาสติกส่วนใหญ่จึงลอยขึ้นด้านบนผิวของระบบเมื่อเปรียบเทียบกับ 2 คอลัมน์ พบว่า คอลัมน์แบบฟองอากาศอาจจะเหมาะในการใช้งานกับระบบที่ใช้อัตราการใช้ต่ำๆ เนื่องจากฟองอากาศสามารถเคลื่อนที่ได้อิสระและมีทั่วถึงมากกว่า ส่วนคอลัมน์แบบอากาศยกเหมาะสมในการใช้งานกับระบบที่ต้องการอัตราการใช้ของก๊าซสูงๆ เพื่อที่จะให้ฟองอากาศเคลื่อนที่ไหลวนได้ทั้งระบบ

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

5570560421 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS:

REWADEE DAMMEE: Analysis of carbon dioxide absorption mechanism by physical and chemical methods in bubble column and airlift reactor. ADVISOR: ASSOC. PROF. PISUT PAINMANAKUL, Ph.D., 168 pp.

The objective of this research is to study the adsorption mechanism of carbon dioxide by bubble column and internal airlift reactor considering the suitable sparger with plastic media. First, the hole sizes in sparger were varied to investigate the effect on mass transfer and the bubble hydrodynamic parameters. Then, the media shapes and the media volume were varied by 4 shapes from 2 to 10 percent. The experiment was set up by the suitable sparger considered from first step. In the next step, CO₂ absorption efficiencies were studied with MEA and Na₂CO₃ solution. The optimum concentration of the solution was used with the best media. Finally, the previous results were applied to compare the absorption efficiency of two types of columns. The study found that large rigid sparger had the lowest energy consumption and provided good mass transfer coefficient at the flow rate of 12.5 LPM. In addition, mass transfer efficiency increased by using high-porosity plastic media (cylindrical hollow media). The efficiency enhanced by using 5 to 10 percent by volume. The result also found that 1 percent concentration by volume of MEA provided 92 percent of absorption efficiency. However, the presence of media in liquid phase slightly increased the absorption efficiency. The density and surface tension in liquid phase were changed by using solution instead of tap water, Comparing between two columns, bubble column was suitable for low flow rate because the bubble freely and thoroughly moved in the liquid phase. While internal airlift reactor was suitable for high gas flow rate in order to provide the good circulation in the system.

Department: Environmental
Engineering

Student's Signature
Advisor's Signature

Field of Study: Environmental
Engineering

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจาก รองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาให้คำแนะนำแนวคิดอันเป็นประโยชน์ ตลอดจนการสนับสนุนในด้านต่างๆและกรุณาถ่ายทอดวิชาความรู้อันเป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบพระคุณประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธิกุล และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาปนธ์ อาจารย์ ดร.ดาว สุวรรณแสง จันทเจริญ และ อาจารย์ ดร.มรุตพัชร จันทวงศ์ ที่กรุณาตรวจทาน ให้คำชี้แนะ และแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้ให้สมบูรณ์

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ สถานที่ในการทดลอง

ขอขอบพระคุณ “ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิตครั้งที่ 4 ปีงบประมาณ 2558” จากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนในการวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อน และน้องๆ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจที่ดีตลอดการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณทุกๆท่าน ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการสนับสนุนทุกอย่างในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยช่วยเหลือ ให้การสนับสนุนในทุกๆเรื่อง และเป็นกำลังใจสำคัญที่ทำให้งานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 คาร์บอนไดออกไซด์	4
2.2 แนวทางการบำบัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	6
2.2.1 กระบวนการแบบแห้ง (Dry process) อาศัยหลักการของการดูดซับ (Adsorption)....	6
2.2.2 กระบวนการใช้เยื่อเลือกผ่าน (Membrane Separation Technology).....	7
2.2.3 กระบวนการดูดซึม (Absorption).....	8
2.3 กระบวนการดูดซึม.....	10
2.3.1 ความรู้ทั่วไป	10
2.3.2 ความสามารถในการละลายของเฮนรี่.....	10
2.3.3 กลไกของการดูดซึมมีลักษณะของการถ่ายเทมวลของสถานะก๊าซหรือไอ	11
2.4 อุปกรณ์การดูดซึม.....	14
2.4.1 หอดูดซึมแบบเพลตหรือถาด (Plate or Tray column).....	14
2.4.2 หอดูดซึมแบบบรรจุตัวกลาง (Packed column).....	14

2.4.3 คอลัมน์ดูดซึมแบบฟองอากาศ (Bubble column: BCR) (Nigar et al., 2005).....	15
2.4.4 คอลัมน์แบบอากาศยก (Air lift reactors: ALR).....	17
2.5 คอลัมน์ดูดซึมแบบฟองอากาศในการบำบัด CO ₂	18
2.5.1 การวิเคราะห์ระบบการไหล และพลศาสตร์ของเหลว Fluid dynamics and regime analysis.....	18
2.5.2 ปัจจัยการดูดซึมของคอลัมน์แบบฟองอากาศโดยวิธีทางกายภาพ	19
2.6 คอลัมน์ดูดซึมแบบอากาศยกในการบำบัด CO ₂	23
2.6.1 ปัจจัยอัตราการไหล	26
2.6.2 การกระจายตัวของก๊าซ	26
2.6.3 Power input requirement.....	27
2.7 การเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซึมในงานวิจัยนี้.....	28
2.7.1 หัวกระจายก๊าซ Gas sparger.....	28
2.7.2 การปั่นป่วนหรือการผสมในเฟสของเหลว เช่น ตัวกลาง การกำหนดทิศทางการไหล..	29
2.7.3 การดูดซึมทางเคมี (Chemical absorption)	29
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
2.8.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ตัวกลางในหอดูดซึม	34
2.8.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยหอดูดซึม	38
2.8.3 งานวิจัยเกี่ยวกับการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย	41
2.9 สิ่งที่น่าสนใจในงานวิจัย.....	44
บทที่ 3 แผนการทดลองและดำเนินการวิจัย	46
3.1 ภาพรวมของงานวิจัย	46
3.2 การติดตั้งระบบการทดลอง	49
3.2.1 การติดตั้งระบบการทดลองคอลัมน์แบบฟองอากาศ (Bubble column).....	49

3.2.2 การติดตั้งระบบการทดลองคอลัมน์แบบอากาศยก (Airlift reactor).....	51
3.3. องค์ประกอบอื่นๆ ที่ใช้ในงานวิจัย.....	56
3.4 การวิเคราะห์ตัวแปรที่ศึกษาในงานวิจัย.....	56
3.4.1 ตัวแปรด้านการถ่ายเทมวล	56
3.4.2 ตัวแปรด้านลักษณะทางกายภาพ	57
3.4.3 การวิเคราะห์ CO ₂ ในของเหลว	58
3.4.4 ประสิทธิภาพการดูดซึม	60
3.5 วิธีการทดลอง.....	61
3.5.1 วิธีการทดลองคอลัมน์แบบฟองอากาศ.....	61
3.5.2 วิธีการทดลองคอลัมน์แบบอากาศยก	71
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล.....	81
4.1 คอลัมน์แบบฟองอากาศ (Bubble column reactor : BCR)	81
4.1.1 ขนาดฟองอากาศ.....	81
4.1.2 ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ	83
4.1.3 สัดส่วนก๊าซ.....	84
4.1.5 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม	85
4.1.6 ค่าการใช้พลังงาน	86
4.2 ผลจากการใช้ตัวกลางพลาสติกกับหัวกระจายฟองอากาศทั้ง 3 ชนิด.....	89
4.2.1 ขนาดฟองอากาศ.....	89
4.2.2 ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ	91
4.2.3 สัดส่วนก๊าซ.....	95
4.2.4 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม	98
4.3 การพิจารณาเลือกใช้ของเหลวดูดซึมในการดูดซึมทางเคมี.....	103

4.3.1 การเลือกความเข้มข้นของสารละลายโมโนเอทานอลามีน (MEA) ที่เหมาะสม.....	103
4.3.2 การเปรียบเทียบสารละลายระหว่างสารละลายโมโนเอทานอลามีนและสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต	104
4.4 การทดลองสารละลายร่วมกับตัวกลาง	106
4.5 คอลัมน์แบบอากาศยก (Internal airlift reactor : IALR).....	108
4.5.1 ขนาดฟองอากาศ.....	108
4.5.2 ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ	109
4.5.3 สัดส่วนก๊าซ.....	110
4.5.4 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม	111
4.5.5 ค่าการใช้พลังงาน	112
4.6 ผลจากการใช้ตัวกลางพลาสติกกับหัวกระจายฟองอากาศทั้ง 3 ชนิด.....	114
4.6.1 ขนาดฟองอากาศ.....	114
4.6.2 ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ	119
4.6.3 สัดส่วนก๊าซ.....	124
4.6.4 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม	127
4.7 การพิจารณาเลือกใช้ของเหลวดูดซึมในการดูดซึมทางเคมี.....	134
4.7.1 การเลือกความเข้มข้นของสารละลายโมโนเอทานอลามีน (MEA) ที่เหมาะสม.....	134
4.7.2 การเปรียบเทียบสารละลายระหว่างสารละลายโมโนเอทานอลามีนและสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต	135
4.8 การทดลองสารละลายร่วมกับตัวกลาง	136
4.9 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพคอลัมน์แบบฟองอากาศ BCR และคอลัมน์แบบอากาศยก IALR... ..	138
4.9.1 ประสิทธิภาพการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์	142
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	145
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	145

5.2 ข้อเสนอแนะ 147

รายการอ้างอิง 148

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 168



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2-1 ลักษณะและสมบัติทั่วไปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	4
ตารางที่ 2-2 อาการที่เกิดจากการหายใจก๊าซ CO ₂ ในอากาศเข้าสู่ร่างกาย.....	5
ตารางที่ 2-3 ข้อดีข้อเสีย ของเทคนิคการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพ.....	9
ตารางที่ 2-4 เทคโนโลยีที่ใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย	10
ตารางที่ 2-5 ค่าคงที่ในกฎของเฮนรีสำหรับก๊าซต่างๆในน้ำ (10 ⁻⁴ atm/mole fraction)	11
ตารางที่ 2-6 Geometric details of airlift reactors	25
ตารางที่ 2-7 แสดงการเปรียบเทียบระบบดูดซึมในงานวิจัย	43
ตารางที่ 2-8 แสดงการเปรียบเทียบสารละลายของระบบดูดซึมงานวิจัย ปกรณ์ ถนอมพงษ์ชาติ	44
ตารางที่ 3-1 ลักษณะรูปทรงอุปกรณ์ในการทดลอง.....	54
ตารางที่ 4-1 ตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์	107
ตารางที่ 5-1 สรุปสถานะที่เหมาะสมที่ได้จากผลการวิจัยนี้	146

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 สัญลักษณ์ NFPA Code.....	5
รูปที่ 2.2 กลไกการดูดซับ	7
รูปที่ 2.3 แสดงกลไกบำบัด CO ₂ ด้วยเมมเบรน	7
รูปที่ 2.4 กระบวนการบำบัด CO ₂ ด้วยกระบวนการดูดซึม.....	9
รูปที่ 2.5 ทฤษฎีเนื้อเยื่อ 2 ชั้น.....	12
รูปที่ 2.6 หอดูดซึมแบบเพลตหรือถาด.....	14
รูปที่ 2.7 หอดูดซึมแบบบรรจุตัวกลาง	15
รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะคอลัมน์ฟองอากาศ	16
รูปที่ 2.9 ประเภทของหอดูดซึม แบบอากาศยก	17
รูปที่ 2.10 แสดงการเปรียบเทียบขนาดของฟองอากาศจากหัวกระจายอากาศที่ต่างกัน	19
รูปที่ 2.11 ขั้นตอนของทฤษฎีสองความต้านทาน.....	22
รูปที่ 2.12 แสดงคอลัมน์แบบอากาศยกแต่ละรูปแบบการไหล	23
รูปที่ 2.13 ชนิดของตัวกลาง.....	29
รูปที่ 2.14 กระบวนการดูดซึมด้วยสารเคมี	30
รูปที่ 2.15 Log C-pH diagram for a closed system containing 10 ⁻³ and 10 ⁻⁵	33
รูปที่ 2.16 ค่าระหว่าง pH กับ log ของความเข้มข้น.....	34
รูปที่ 2.17 การถ่ายเทมวลของกระบวนการดูดซึม	35
รูปที่ 2.18 แสดงชนิดของตัวกลาง (a), 13mm SMR; (b), 13mm Pall Ring;	36
รูปที่ 2.19 ลักษณะความพรุนของตัวกลาง	37
รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของฟองอากาศที่ต่างระยะความสูง	39
รูปที่ 2.21 แสดงจำลองการติดตั้งระบบของงานวิจัย	40
รูปที่ 2.22 แสดงปฏิกิริยาแผนผังของระบบสารละลาย CO ₂ -Mg (OH) ₂	41
รูปที่ 2.23 แสดงการตั้งค่าการทดลอง	42

รูปที่ 3.1 รูปแบบคอลัมน์จำลองในการทดลองทั้งสองคอลัมน์	46
รูปที่ 3.2 แสดงแผนผังการไหลภาพรวมการทดลองทั้งหมด	47
รูปที่ 3.3 การติดตั้งการทดลองคอลัมน์แบบฟองอากาศช่วงทดลองที่ 1 – 3.....	50
รูปที่ 3.4 การติดตั้งการทดลองคอลัมน์แบบฟองอากาศช่วงทดลองที่ 4.....	51
รูปที่ 3.5 การติดตั้งการทดลองคอลัมน์แบบอากาศยกช่วงทดลองที่ 1 – 3.....	52
รูปที่ 3.6 การติดตั้งการทดลองคอลัมน์แบบอากาศยกช่วงทดลองที่ 4.....	53
รูปที่ 3.7 รูปแบบจำลองวิธีการทดลองคอลัมน์ฟองอากาศในการทดลองช่วงที่หนึ่ง	62
รูปที่ 3.8 แผนผังวิธีการทดลองคอลัมน์ฟองอากาศช่วงที่หนึ่ง	63
รูปที่ 3.9 รูปแบบจำลองวิธีการทดลองคอลัมน์ฟองอากาศในการทดลองช่วงที่สอง.....	64
รูปที่ 3.10 แผนผังวิธีการทดลองคอลัมน์ฟองอากาศช่วงที่สอง	65
รูปที่ 3.11 รูปแบบจำลองวิธีการทดลองคอลัมน์ฟองอากาศในการทดลองช่วงที่สาม	67
รูปที่ 3.12 แผนผังวิธีการทดลองคอลัมน์ฟองอากาศช่วงที่สาม	68
รูปที่ 3.13 รูปแบบจำลองวิธีการทดลองคอลัมน์ฟองอากาศในการทดลองช่วงที่สี่.....	69
รูปที่ 3.14 แผนผังการไหลวิธีการทดลองคอลัมน์ฟองอากาศช่วงที่สี่.....	70
รูปที่ 3.15 รูปแบบจำลองวิธีการทดลองคอลัมน์แบบอากาศยกการทดลองช่วงที่หนึ่ง	72
รูปที่ 3.16 แผนผังวิธีการทดลองคอลัมน์แบบอากาศยกช่วงที่หนึ่ง.....	72
รูปที่ 3.17 รูปแบบจำลองวิธีการทดลองคอลัมน์แบบอากาศยกการทดลองช่วงที่สอง	74
รูปที่ 3.18 แผนผังวิธีการทดลองคอลัมน์แบบอากาศยกช่วงที่สอง	74
รูปที่ 3.19 รูปแบบจำลองวิธีการทดลองคอลัมน์แบบอากาศยกการทดลองช่วงที่สาม	77
รูปที่ 3.20 แผนผังวิธีการทดลองคอลัมน์แบบอากาศยกช่วงที่สาม	77
รูปที่ 3.21 รูปแบบจำลองวิธีการทดลองคอลัมน์แบบอากาศยกการทดลองช่วงที่สี่	79
รูปที่ 3.22 แสดงแผนผังการไหลวิธีการทดลองคอลัมน์แบบอากาศยกช่วงที่สี่	79
รูปที่ 4.1 ภาพรวมสรุปงานผลวิจัย.....	81

รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบขนาดฟองอากาศที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบไม้ แบบ rigid ขนาดเล็ก และแบบ rigid ขนาดใหญ่ เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก	82
รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายแสดงลักษณะรูและผิวของหัวกระจายอากาศ a) rigid ขนาดเล็ก b) แบบ rigid ขนาดใหญ่ และ c) แบบ แบบไม้ (scale มิลลิเมตร)	82
รูปที่ 4.4 แสดงทิศทางการไหลของฟองอากาศ a) rigid ขนาดเล็ก b) แบบ rigid ขนาดใหญ่	83
รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบความเร็วลอยตัวของฟองอากาศที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบไม้ แบบ rigid ขนาดเล็ก และแบบ rigid ขนาดใหญ่ เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก	83
รูปที่ 4.6 สัดส่วนก๊าซที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบไม้ แบบ rigid ขนาดเล็ก และแบบ rigid ขนาดใหญ่ เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก	84
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบไม้ แบบ rigid ขนาดเล็ก และแบบ rigid ขนาดใหญ่ เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก	85
รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบไม้ แบบ rigid ขนาดเล็ก และแบบ rigid ขนาดใหญ่ เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก	87
รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมจากการใช้ตัวกลาง 3 ชนิด พลาสติกพอลิโพรไพลีน (PP) อะครีโลไนไตรล์บิวทาไดอีนสไตรีน (ABS) และพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC)	88
รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบขนาดฟองอากาศที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบ rigid ขนาดเล็ก และแบบ rigid ขนาดใหญ่ เมื่อมีตัวกลางพลาสติก เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ a) 2 % b) 5 % และ c) 10 % โดยปริมาตร	89
รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบขนาดฟองอากาศที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบไม้ เมื่อมีตัวกลางพลาสติก เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ a) 2 % b) 5 % และ c) 10 % โดยปริมาตร.....	90
รูปที่ 4.12 การแตกตัวของฟองอากาศโดยตัวกลางพลาสติก.....	91
รูปที่ 4.13 การขีดขวางการปะทะและรวมตัวกันของฟองอากาศด้วยตัวกลางพลาสติก.....	91
รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบความเร็วลอยตัวของฟองอากาศที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบ rigid ขนาดเล็ก และแบบ rigid ขนาดใหญ่ เมื่อมีตัวกลางพลาสติก เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติก ปริมาณ a) 2 % b) 5 % และ c) 10 % โดยปริมาตร.....	93

รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบความเร็วลอยตัวของฟองอากาศที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบไม้ เมื่อมีตัวกลางพลาสติก เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ a) 2 % b) 5 % และ c) 10 % โดยปริมาตร (ต่อ).....	94
รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่แทรกผ่านตัวกลางพลาสติกของฟองอากาศ จากหัวกระจายอากาศแบบ a) rigid ขนาดเล็ก b) แบบ rigid ขนาดใหญ่ และ c) แบบ แบบไม้.....	95
รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบสัดส่วนก๊าซที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบ rigid ขนาดเล็ก และแบบ rigid ขนาดใหญ่ เมื่อมีตัวกลางพลาสติก เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ a) 2 % b) 5 % และ c) 10 % โดยปริมาตร.....	96
รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบสัดส่วนก๊าซที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบไม้ เมื่อมีตัวกลางพลาสติก เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ a) 2 % b) 5 % และ c) 10 % โดยปริมาตร (ต่อ).....	97
รูปที่ 4.19 การดักจับฟองอากาศของตัวกลางทรงกระบอกกลวง.....	97
รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบ rigid ขนาดเล็ก และแบบ rigid ขนาดใหญ่ เมื่อมีตัวกลางพลาสติก เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ a) 2 % b) 5 % และ c) 10 % โดยปริมาตร.....	99
รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบไม้ เมื่อมีตัวกลางพลาสติก เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ a) 2 % b) 5 % และ c) 10 % โดยปริมาตร (ต่อ).....	100
รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบผลกระทบของอัตราการไหลก๊าซต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของตัวกลางทรงกระบอกกลวง.....	101
รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบผลกระทบของหัวกระจายฟองอากาศต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม.....	101
รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบผลกระทบของรูปทรงตัวกลางต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม.....	102
รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบผลกระทบของปริมาณตัวกลางต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม.....	102
รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบค่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากระบบที่วัดได้.....	103
รูปที่ 4.27 ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมด้วยสารละลาย MEA ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	104
รูปที่ 4.28 ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมในของเหลวดูดซึมต่างๆ.....	105

รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมระหว่างสารละลาย 2 ชนิด โมโนเอทานอลามีนและสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต	105
รูปที่ 4.30 เปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมระหว่างสารละลาย 2 ชนิด กับตัวกลาง	106
รูปที่ 4.31 การลอยตัวเหนือระบบของตัวกลาง เมื่อใช้เฟสของเหลวสารละลายโมโนเอทานอลามีน	107
รูปที่ 4.32 เปรียบเทียบขนาดฟองอากาศที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบไม้ แบบ rigid ขนาดเล็ก และแบบ rigid ขนาดใหญ่ เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก.....	108
รูปที่ 4.33 การเคลื่อนที่ของฟองอากาศในคอลัมน์แบบอากาศยก	109
รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบความเร็วลอยตัวของฟองอากาศที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบไม้ แบบ rigid ขนาดเล็ก และแบบ rigid ขนาดใหญ่ เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก	110
รูปที่ 4.35 แสดงสัดส่วนก๊าซที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบไม้ แบบ rigid ขนาดเล็ก และแบบ rigid ขนาดใหญ่ เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก.....	110
รูปที่ 4.36 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบไม้ แบบ rigid ขนาดเล็ก และแบบ rigid ขนาดใหญ่ เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก	112
รูปที่ 4.37 เปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบไม้ แบบ rigid ขนาดเล็ก และแบบ rigid ขนาดใหญ่ เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก.....	112
รูปที่ 4.38 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมจากการใช้ตัวกลาง 3 ชนิด พลาสติก โพลีโพรไพลีน (PP) อะครีโลไนไตรล์บิวทาไดอีนสไตรีน (ABS) และพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC)	113
รูปที่ 4.39 การจมตัวของตัวกลาง (a) PVC, และ (b) ABS).....	114
รูปที่ 4.40 เปรียบเทียบขนาดฟองอากาศที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบ rigid ขนาดเล็ก เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ a) 2 % b) 5 % และ c) 10 % โดยปริมาตร	115
รูปที่ 4.41 แสดงทิศทางการไหลวนภายในระบบของคอลัมน์ที่มีปริมาณตัวกลางต่างๆ.....	116
รูปที่ 4.42 เปรียบเทียบขนาดฟองอากาศที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบไม้ เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ a) 2 % b) 5 % และ c) 10 % โดยปริมาตร.....	117
รูปที่ 4.43 เปรียบเทียบขนาดฟองอากาศที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบ rigid ขนาดใหญ่ เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ a) 2 % b) 5 % และ c) 10 % โดยปริมาตร	118

รูปที่ 4.44 เปรียบเทียบความเร็วลอยตัวที่เกิดจากหวักระจ่ายอากาศแบบ rigid ขนาดเล็ก เมื่อใช้
 ตัวกลางพลาสติกปริมาณ a) 2 % b) 5 % และ c) 10 % โดยปริมาตร 120

รูปที่ 4.45 เปรียบเทียบความเร็วลอยตัวที่เกิดจากหวักระจ่ายอากาศแบบไม้ เมื่อใช้ตัวกลาง
 พลาสติกปริมาณ a) 2 % b) 5 % และ c) 10 % โดยปริมาตร..... 121

รูปที่ 4.46 เปรียบเทียบความเร็วลอยตัวที่เกิดจากหวักระจ่ายอากาศแบบ rigid ขนาดใหญ่ เมื่อใช้
 ตัวกลางพลาสติกปริมาณ a) 2 % b) 5 % และ c) 10 % โดยปริมาตร 123

รูปที่ 4.47 เปรียบเทียบสัดส่วนก๊าซที่เกิดจากหวักระจ่ายอากาศแบบ rigid ขนาดเล็ก เมื่อมี
 ตัวกลางพลาสติก เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ a) 2 % b) 5 % และ c) 10 %
 โดยปริมาตร..... 124

รูปที่ 4.48 เปรียบเทียบสัดส่วนก๊าซที่เกิดจากหวักระจ่ายอากาศแบบไม้ เมื่อมีตัวกลางพลาสติก
 เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ a) 2 % b) 5 % และ c) 10 % โดยปริมาตร 125

รูปที่ 4.49 เปรียบเทียบสัดส่วนก๊าซที่เกิดจากหวักระจ่ายอากาศแบบ rigid ขนาดใหญ่ เมื่อมี
 ตัวกลางพลาสติก เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ a) 2 % b) 5 % และ c) 10 %
 โดยปริมาตร..... 126

รูปที่ 4.50 จำลองลักษณะการค้ำตัวของตัวกลางพลาสติกที่อัตราการใช้ต่าง ๆ 127

รูปที่ 4.51 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมที่เกิดจากหวักระจ่ายอากาศแบบ rigid
 ขนาดเล็ก เมื่อมีตัวกลางพลาสติก เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ 128

รูปที่ 4.52 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมที่เกิดจากหวักระจ่ายอากาศแบบไม้
 เมื่อมีตัวกลางพลาสติก เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ a) 2 % b) 5 % และ c) 10
 % โดยปริมาตร..... 129

รูปที่ 4.53 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมที่เกิดจากหวักระจ่ายอากาศแบบ rigid
 ขนาดใหญ่ เมื่อมีตัวกลางพลาสติก เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ a) 2 % b) 5 %
 และ c) 10 % โดยปริมาตร 130

รูปที่ 4.54 ผล k_{La} จากการใส่ตัวกลางทรงกระบอกกลวงในหวักระจ่ายอากาศ rigid large
 เปรียบเทียบกับผล k_{La} หวักระจ่ายอากาศ rigid small แบบไม่มีตัวกลาง..... 131

รูปที่ 4.55 ผล U_B จากการใส่ตัวกลางทรงกระบอกกลวงในหวักระจ่ายอากาศ rigid large
 ปริมาณต่างๆ 132

รูปที่ 4.56	พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะกับหัวกระจายอากาศต่างๆ.....	132
รูปที่ 4.57	เปรียบเทียบผลกระทบของรูปทรงตัวกลางต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม.....	133
รูปที่ 4.58	เปรียบเทียบค่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากระบบที่วัดได้.....	134
รูปที่ 4.59	ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมด้วยสารละลาย MEA ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	135
รูปที่ 4.60	เปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมระหว่างสารละลาย 2 ชนิด โมโนเอทานอลามีนและสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต	136
รูปที่ 4.61	เปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมระหว่างสารละลาย 2 ชนิด กับตัวกลาง	137
รูปที่ 4.62	การลอยตัวเหนือระบบของตัวกลาง เมื่อใช้เฟสของเหลวสารละลายโมโนเอทานอลามีน	137
รูปที่ 4.63	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมระหว่างคอลัมน์แบบ BCR และ ILALR.	138
รูปที่ 4.64	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมระหว่างคอลัมน์แบบ BCR และ ILALR ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 0.14 เมตร	139
รูปที่ 4.65	เปรียบเทียบสภาพตัดขวางคอลัมน์ BCR และ ILALR	140
รูปที่ 4.66	เปรียบเทียบขนาดฟองอากาศระหว่างคอลัมน์แบบ BCR และ ILALR.....	140
รูปที่ 4.67	เปรียบเทียบพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะระหว่างคอลัมน์แบบ BCR และ ILALR.....	142
รูปที่ 4.68	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซึม CO ₂ ระหว่างคอลัมน์แบบ BCR และ ILALR	143

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide: CO₂) สู่ชั้นบรรยากาศเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกที่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน จากข้อมูลที่ได้ทำการสำรวจกิจกรรมที่ปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ในประเทศสหรัฐอเมริกาพบว่า การผลิตพลังงานด้านไฟฟ้ามีการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุด เนื่องจากทรัพยากรที่ใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้ามาจากการทับถมของซากฟอสซิล (EIA 2011) ทั้งนี้ ทรัพยากรที่ใช้มีอย่างจำกัด และยังคงปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นเหตุให้สภาพภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง มนุษย์จึงสนใจที่จะมองหาพลังงานทางเลือก ได้แก่ พลังงานจากก๊าซชีวภาพโดยมีองค์ประกอบก๊าซ คือ ก๊าซมีเทน CH₄ 50-70% ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 30-40% (482,727 -643,636 ppm) และก๊าซอื่นๆ อีกปริมาณเล็กน้อย ดังนั้นการจะนำพลังงานจากก๊าซชีวภาพไปใช้งานนั้น ก๊าซชีวภาพที่เหมาะสมควรมีปริมาณก๊าซมีเทนที่สูงและคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำๆ เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์จะขัดขวางการติดไฟเมื่อนำก๊าซชีวภาพไปผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า พลังงานความร้อนต่อไป นอกจากนี้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อไปทำปฏิกิริยารวมกับก๊าซอื่นๆ อาจจะทำให้วัสดุอุปกรณ์ข้างเคียงเกิดการกัดกร่อนซึ่งอาจทำให้อายุการใช้งานสั้นลง การกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงเป็นที่สนใจมากขึ้น

ปัจจุบันหนึ่งในเทคโนโลยีทั่วไปที่ใช้ในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ คือ กระบวนการดูดซึม ซึ่งในระบบการดูดซึมมีอุปกรณ์หลายชนิด เช่น หอดูดซึมแบบเพลตหรือถาด หอดูดซึมแบบแพค หอดูดซึมแบบเมมเบรน และหอดูดซึมแบบฟองอากาศ และงานวิจัยนี้สนใจศึกษาหอดูดซึมแบบฟองอากาศ เนื่องจากก่อสร้างง่าย ใช้ค่าดำเนินการต่ำ ดูแลรักษาไม่ยาก เป็นที่นิยมใช้บำบัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างแพร่หลาย จึงเหมาะที่จะนำมาทำการศึกษา

คอลัมน์แบบฟองอากาศ (Bubble reactor column : BCR) นิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการทำปฏิกิริยาระหว่างเฟสก๊าซและเฟสของเหลว การนำไปใช้งานจริงของคอลัมน์แบบฟองอากาศมีความหลากหลาย เช่น การดูดซึมกระบวนการหมักทางชีวภาพ ปฏิกิริยาการดูดซึมทางชีวภาพ และการบำบัดน้ำเสีย ข้อดีของคอลัมน์แบบฟองอากาศ คือ ง่ายต่อการออกแบบและการก่อสร้าง สะดวกต่อการบำรุงรักษา ใช้พลังงานการเดินระบบต่ำ ต้นทุนในการก่อสร้างต่ำ และทนความร้อนได้ดี มีลักษณะการถ่ายเทมวลในคอลัมน์ที่ดี (Haibo et al., 2014) ที่สำคัญในการออกแบบและขนาดฟองของคอลัมน์แบบฟองอากาศขึ้นอยู่กับรูปทรงและชนิดหัวกระจายอากาศ ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงระบบการไหลของก๊าซได้มี 2 แบบ (Cheng et al., 2013) นอกจากนี้ยังพบปัจจัยอื่นที่มีอิทธิพลต่อ

อัตราการถ่ายเทมวลสารในคอลัมน์แบบฟองอากาศ เนื่องจากระบบการดูดซึมของคอลัมน์แบบฟองอากาศมีอุปสรรค คือการผสมผสานในแนวแกน ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีเติมตัวกลางลงในคอลัมน์เพื่อเพิ่มการผสมระหว่างเฟสแล้วยังเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสฟองอากาศอีกด้วย(B. Bhatia et al., 2004) จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการคิดค้นประยุกต์คอลัมน์แบบฟองอากาศเพิ่มมากยิ่งขึ้น แม้กระทั่งการดัดแปลงลักษณะทิศทางการไหลภายในและภายนอกคอลัมน์เพื่อเพิ่มระยะเวลาในการถ่ายเทมวลสาร ซึ่งเป็นที่รู้จักกันในชื่อ คอลัมน์แบบอากาศยก (Airlift reactor column: ALR)

คอลัมน์แบบอากาศยก (Airlift reactor column: ALR) เป็นที่รู้จักกันดีในกระบวนการถ่ายเทมวลสาร ซึ่งมีรูปแบบการไหลของของเหลวที่มีความเสถียร โดยจะมีส่วนที่ไหลภายในหรือภายนอกที่แยกออกจากกัน ของเหลวในทิสไหลขึ้น (Riser โรเซอร์) เมื่อของไหลในดันโรเซอร์ผ่านขึ้นสู่ด้านบนจะถูกส่งกลับไปด้านล่างของคอลัมน์โดยมีทิศทางการไหลลง (Downcomer ดาวน์คอเมอร์) (Chisti et al., 1988) ข้อดีของคอลัมน์แบบอากาศยก คือ ง่ายต่อการออกแบบและก่อสร้าง สะดวกต่อการบำรุงรักษา ต้นทุนต่ำ สามารถกำหนดทิศทางการไหลได้ แรงเฉือนและความเครียดปั่นป่วนต่ำ คอลัมน์แบบอากาศยกจึงนิยมใช้อย่างกว้างขวางในหลายด้าน เช่น กระบวนการเคมี กระบวนการสิ่งแวดล้อม และกระบวนการทางเทคโนโลยีชีวภาพ นอกจากนี้คอลัมน์แบบอากาศยก ยังช่วยในการระงับตัวเร่งปฏิกิริยาของอนุภาคในแนวแกน และแวนซ์ที่มีมีการกระจายตัว ซึ่งเหมาะสำหรับใช้เป็นเครื่องปฏิกรณ์ของของเหลว ความเข้าใจในด้านพลศาสตร์ของของเหลวในคอลัมน์แบบอากาศยกเป็นสิ่งที่สำคัญมาก เนื่องจากการใช้งานถูกประยุกต์ใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรม และมีอิทธิพลในทฤษฎีด้านอุทกพลศาสตร์ที่มีต่ออัตราการถ่ายเทมวลสาร ทั้งนี้ คอลัมน์แบบอากาศยกถูกพัฒนามาจากคอลัมน์แบบฟองอากาศ ดังนั้นปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออัตราการดูดซึมจึงคล้ายกัน ดังนั้น เพื่อการพัฒนาประสิทธิภาพระบบการดูดซึมของหอดูดซึมแบบฟองอากาศและหอดูดซึมแบบอากาศยก จึงได้มีการเพิ่มปัจจัยที่เอื้ออำนวยในการถ่ายเทมวลสารให้ง่ายขึ้นได้แก่ ปัจจัยทางด้านกายภาพ และปัจจัยทางด้านเคมี โดยการเพิ่มปัจจัยด้านกายภาพนั้นได้แก่ การลดขนาดฟองอากาศด้วยการใช้หัวกระจายอากาศที่มีขนาดเล็ก การปั่นป่วนในแนวแกนเพื่อให้พื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้นด้วยการเติมตัวกลางและการปรับเปลี่ยนลักษณะเฟสของเหลวด้วยการเติมสารละลาย โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซึม CO_2 ด้วยการประยุกต์ใช้กลไกการดูดซึมทางกายภาพร่วมกับทางเคมี ในคอลัมน์แบบฟองอากาศและคอลัมน์แบบอากาศยก

1.2.2 ศึกษาผลกระทบจากกลไกการดูดซึมด้านกายภาพด้วยอุปกรณ์การเติมอากาศที่ขนาดรูกระจายอากาศแตกต่าง รูปทรงของตัวกลาง และปริมาณของตัวกลาง ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพกลไกการดูดซึม CO_2

1.2.3 ศึกษาผลกระทบจากกลไกการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้านทางเคมีด้วยสารละลายโมโนเอทานอลามีน (Mono ethanolamine : MEA)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 งานวิจัยนี้ทดลองด้วยคอลัมน์แบบที่ละเทห์หรือแบบ Batch

1.3.2 ใช้คอลัมน์แบบพองอากาศ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 10 เซนติเมตร สูง 1 เมตร หน้า 3 มิลลิเมตร

1.3.3 ใช้คอลัมน์แบบอากาศยก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 15 เซนติเมตร สูง 1 เมตร หน้า 5 มิลลิเมตร

1.3.4 ใช้หัวกระจายอากาศ 3 ชนิด ได้แก่ ชนิดของ Rigid ขนาดเล็กและขนาดใหญ่ และชนิดไม้

1.3.5 ใช้ตัวกลางชนิดโพลีโพลีไพลีนจากการ 3 รูปทรง ได้แก่ ทรงกลม ทรงกระบอกสี่เหลี่ยม

1.3.6 สารละลายใช้สารเคมี โมโนเอทานอลามีน *Monoethanolamine* (MEA) ที่ความเข้มข้น 1% 5% และ 10%

1.3.7 ใช้เฟสของเหลวเป็นน้ำประปา ที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3.8 ใช้เฟสก๊าซ เป็นคาร์บอนไดออกไซด์จากถังบรรจุ และอากาศจาก Air pump

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เพื่อเป็นทางเลือกสภาวะดำเนินการที่ใช้บำบัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยคอลัมน์แบบพองอากาศและคอลัมน์แบบอากาศยกอย่างเหมาะสม

1.4.2 เพื่อพัฒนาการดูดซับในการบำบัด CO₂ โดยการทดลองคอลัมน์ 2 รูปแบบร่วมกับหัวกระจายอากาศ ตัวกลาง และความเข้มข้นสารละลาย

1.4.3 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยตัวแปรด้านกายภาพและเคมี ในการบำบัด CO₂

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คาร์บอนไดออกไซด์

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide : CO₂) เป็นก๊าซที่ลอยตัวอยู่ในบรรยากาศ มีโครงสร้างในหนึ่งโมเลกุล คือ คาร์บอน 1 อะตอม และออกซิเจน 2 อะตอม สูตรทางเคมี คือ CO₂ ไม่มีกลิ่นไม่มีสี ข้อดีของ CO₂ คือ เป็นประโยชน์ต่อพืช ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำแข็งแห้ง ใช้ทำฝนเทียม ใช้ในการดับเพลิง เป็นต้น ส่วนข้อเสีย คือ เกิดก๊าซเรือนกระจกที่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน ทำให้ประสิทธิภาพการติดไฟของก๊าซชีวภาพลดลง เมื่อ CO₂ บางส่วนละลายน้ำ จะทำปฏิกิริยาเกิด H₂CO₃ กรดคาร์บอนิก (Carbonic acid) อาจทำให้เกิดการกัดกร่อนของวัสดุ อุปกรณ์ ทำให้อายุการใช้งานลดลง ทั้งนี้ CO₂ ไม่ใช่ก๊าซพิษดังรูปที่ 2.1 เพียงแต่สิ่งมีชีวิตดำรงชีวิตหายใจด้วยออกซิเจน หากมีปริมาณ CO₂ มากเกินไปจะทำให้สิ่งมีชีวิตอาจถึงตายได้ ซึ่งลักษณะและสมบัติทั่วไปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แสดงดังตารางที่ 2.1 และลักษณะอาการของการรับ CO₂ ดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-1 ลักษณะและสมบัติทั่วไปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

Molecular	44.01
Chemical Family	Acid Anhydride
Chemical Name	Carbon Dioxide
Chemical Formula	CO ₂
Appearance and Odor	Colorless and odorless; sharp nasal sensation at high concentration
Physical State (at NPT)	Gas
Gas Specific Gravity (air = 1)	1.52 (@70 °F/21°C and 1 atm)
Gas Density	0.1444 lb/ft ³ (1.833 kg/m ³) (@70 °F/21°C and 1 atm)
Liquid Specific Gravity (water = 1)	0.713 (@70 °F/25°C)
Boiling Point	Sublimes at -109.3 °F (-78.5°C) @ 1 atm
Freezing Point	-69.82 °F (-56.57 °C) @ 5.11 atm
Triple Point	-69.9 °F (-56.6 °C) @ 75.1 psia (-56.6 °C @ 416 kPa)
Vapor Pressure	5778 kPa, 838 psig (@70 °F/21.1°C)
% Volatile (by volume)	100
Solubility in Water (% vol)	0.9 (@20 °C/ 68°F)

ตารางที่ 2-2 อาการที่เกิดจากการหายใจก๊าซ CO₂ ในอากาศเข้าสู่ร่างกาย

% CO ₂ In Air	Symptoms
1%	Breathing rate increases slightly.
2%	50 percent increase in breathing rate. Prolonged exposure can cause headache and tiredness.
3%	100 percent increase in breathing rate. Prolonged exposure can cause impaired hearing, headache, and increase blood pressure and pulse rate.
4-5%	Breathing increase to four times the normal rate. Symptoms of intoxication. Slight choking may be felt.
6-10%	Characteristic sharp odor noticeable. Very labored breathing, headache, visual impairment, and ringing in ears. Judgment may be impaired and followed by loss of consciousness within minutes.
11-100%	Unconsciousness occurs rapidly. Prolonged exposure may eventually result in death from asphyxiation.

ที่มา : (Praxair Safety Data Sheet, 2015)



รูปที่ 2.1 สัญลักษณ์ NFPA Code

ที่มา : (ฐานข้อมูลของศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์ กรมควบคุมมลพิษ, 2556)

เมื่อสัมผัสหรือรับประทาน CO₂ เข้าไปไม่ปรากฏอาการที่เป็นพิษหรืออันตราย แต่เมื่อรับ CO₂ ด้วยการหายใจนั้นพบว่าเป็นอันตรายต่อระบบการหายใจ เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์สามารถทำให้ผู้รับผ่านทางระบบหายใจเสียชีวิตได้ในบรรยากาศที่มีออกซิเจนปกติเมื่อหายใจเอา CO₂ เข้าไป

ในปริมาณที่มากดูได้จากตารางที่ 2-2 จะเกิดการระคายเคืองที่จมูกและคอ สาเหตุมาจากเกิดการละลายของ CO₂ ในเมือกของระบบหายใจ

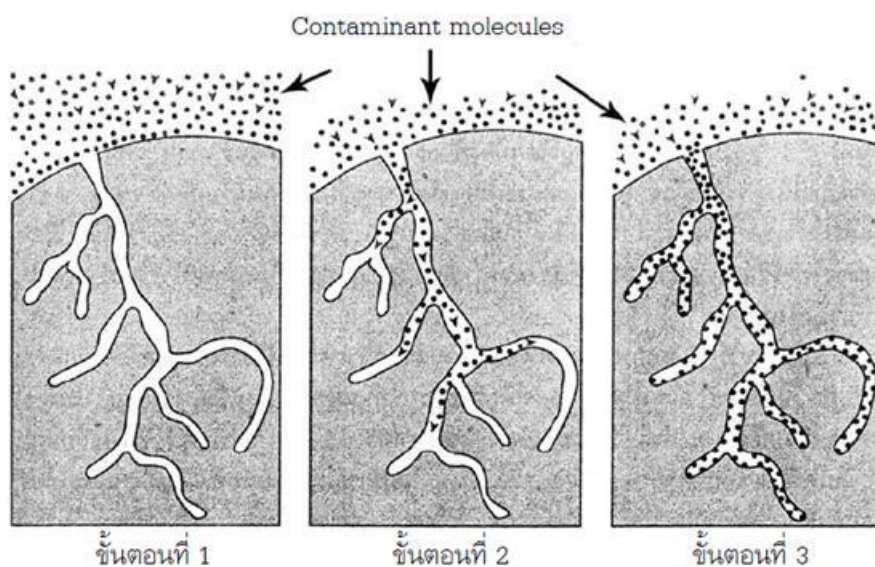
นอกจากนี้คาร์บอนไดออกไซด์มีสมบัติที่สามารถยอมให้แสงผ่านได้แต่จะกักพลังงานความร้อนไว้ เป็นสาเหตุให้ความร้อนที่เข้ามาถูกเก็บไว้ในผิวโลกและจะไม่หลุดไปในเวลากลางคืน เป็นสาเหตุที่อุณหภูมิในเวลากลางวันและกลางคืนไม่แตกต่างกันนำไปสู่ภาวะโลกร้อน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงมีบทบาทสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศของโลก ดังนั้นจากผลกระทบที่กล่าวมาข้างต้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการบำบัด CO₂

2.2 แนวทางการบำบัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

2.2.1 กระบวนการแบบแห้ง (Dry process) อาศัยหลักการของการดูดซับ (Adsorption)

เป็นกระบวนการที่อาศัยหลักการของการดูดซับ (Adsorption) โดยสารดูดซับ (Adsorbent) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกดักจับไว้ในรูพรุน (Pore) ของสารดูดซับ หรือหลังจากถูกดูดซับไว้ในรูพรุนแล้วอาจจะเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ เทคโนโลยีที่ใช้ในการจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารดูดซับในรูปของแข็งนั้น จะประกอบไปด้วยถึงปฏิกรณ์มีลักษณะเป็น Column ภายในบรรจุไว้ด้วยสารดูดซับ (Packed Bed) การไหลของก๊าซอาจจะมีการไหลขึ้น (Upflow) หรือไหลลง (Downflow) เมื่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไหลผ่านสารดูดซับ ก็จะมีการจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น ดังรูปที่ 2.2 สารดูดซับที่ใช้กัน ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ ซีโอไลต์ และถ่านกัมมันต์ เป็นต้น เมื่อมีการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จนอิ่มตัวแล้ว ต้องเปลี่ยนสารดูดซับใหม่ แล้วนำสารดูดซับที่อิ่มตัวแล้วไปฟื้นฟูสภาพ (Regenerate) และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

การนำตัวดูดซับไปฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่นั้นต้องใช้พลังงานมาก จึงมีค่าใช้จ่ายสูง และต้องกักเก็บวัสดุที่ใช้แล้วปริมาณมาก เนื่องจากตัวดูดซับมีน้ำหนักเบาจึงใช้พื้นที่มากในการกักเก็บเพื่อรวบรวมน้ำหนักให้ได้ตามปริมาณที่ผู้รับบริการฟื้นฟูสภาพกำหนด

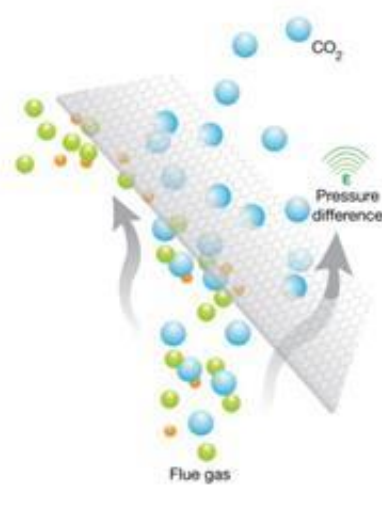


รูปที่ 2.2 กลไกการดูดซับ

ที่มา : (รศ.ปิติ พูนไชยศรีและคณะ, 2544)

2.2.2 กระบวนการใช้เยื่อเลือกผ่าน (Membrane Separation Technology)

เป็นกระบวนการใช้ความดันช่วยในการแลกเปลี่ยนของ CO_2 เข้าสู่ตัวเมมเบรน ซึ่งมีการควบคุมความดันไว้ที่ P_1 และ P_2 ที่อยู่คนละด้านของเมมเบรนให้มีค่าแตกต่างกันดังรูปที่ 2.3 จึงจะทำให้ CO_2 สามารถเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนได้ แล้วจึงแยก CO_2 ออกไปบำบัดต่อไป กระบวนการนี้ใช้พลังงานสูง ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย

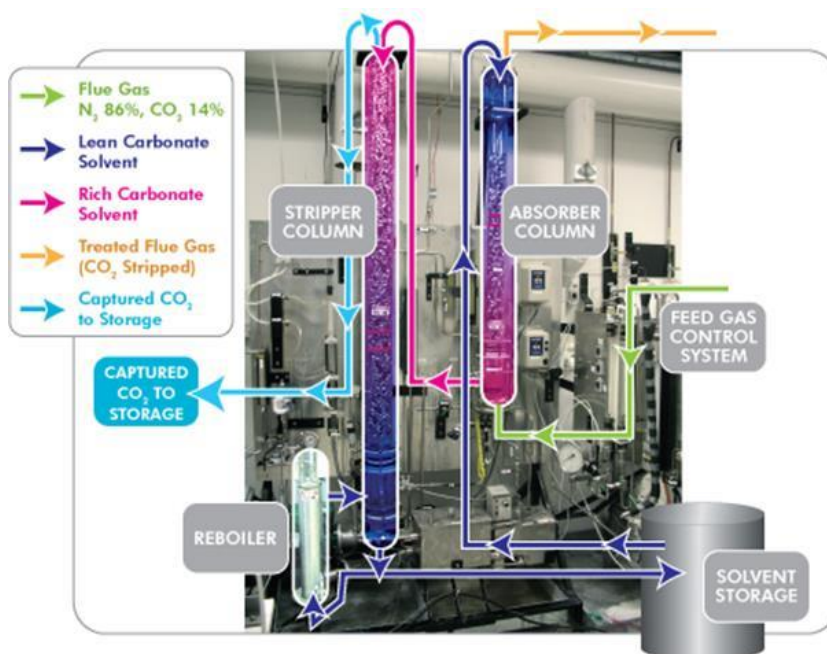


รูปที่ 2.3 แสดงกลไกบำบัด CO_2 ด้วยเมมเบรน (CO2CRC, 2014a)

2.2.3 กระบวนการดูดซึม (Absorption)

เป็นการถ่ายเทมวลสารโดยใช้กลไกการแพร่โมเลกุลจากสถานะก๊าซไปสู่สถานะของเหลว ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นของสารทั้งสองสถานะ โดยจะมีการถ่ายเทมวลสารจากความเข้มข้นสูงไปยังความเข้มข้นต่ำ ซึ่งปัจจุบันในกลุ่มอุตสาหกรรมมักนิยมใช้กระบวนการดูดซึมเพื่อกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ อาทิ เช่น อุตสาหกรรมที่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิง, การแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซธรรมชาติหรือก๊าซเชื้อเพลิง เป็นต้น ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นตัวอย่างระบบบำบัด CO₂ ด้วยกระบวนการดูดซึม กระบวนการดูดซึมนั้นจะใช้งานได้ดีเมื่อมีพื้นที่ผิวสัมผัสของเฟสก๊าซและของเหลวมากขึ้น โดยจะกล่าวถึงกลไกในการดูดซึมต่อไป

หลักการทั่วไปการดูดซึมมีทั้งการดูดซึมทางกายภาพและทางเคมี ทั้งนี้เกณฑ์การพิจารณาเลือกใช้วิธีบำบัดนั้น มักคำนึงถึงด้านเศรษฐศาสตร์และปัจจัยหลายอย่าง ซึ่งกระบวนการดูดซึมทางกายภาพนั้นมักนิยมใช้เฟสของเหลวเป็นน้ำ ซึ่งหาได้ง่ายและราคาลงทุนต่ำ อีกทั้งเฟสก๊าซที่จะนำมาวิจัยมักจะละลายน้ำได้ อย่างไรก็ตามบางกรณีมีความจำเป็นต้องเลือกใช้วิธีการดูดซึมทางเคมีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพอัตราการดูดซึม ซึ่งสารเคมีที่นิยมใช้ในการดูดซึมได้แก่ โมโนเอทานอลามีน MonoEthanolamine (MEA, (CH₂CH₂OH)₂NH) และ Methyl Diglycolamine (DGA) เป็นต้น นอกจากนี้สารละลายเอมีนที่ใช้อย่างสามารถหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ได้ จึงเป็นวิธีที่น่าสนใจอย่างยิ่ง ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบหลายปัจจัยในการเลือกวิธีการบำบัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่กล่าวมา และจากตารางที่ 2.3 – 2.4 ของเทคนิคการดักจับก๊าซ เห็นได้ว่ากระบวนการดูดซึมที่ใช้สารละลาย MEA ร่วมด้วยนั้นมีความน่าสนใจ และให้ความเข้มข้นมีเทนในก๊าซชีวภาพสูงสุดอีกด้วย อีกทั้งยังดำเนินระบบได้ดีในสถานะเป็นกรด นอกจากนี้การก่อสร้างไม่ซับซ้อน ราคาไม่สูงมากนัก บำรุงรักษาง่าย งานวิจัยนี้จึงสนใจกระบวนการดูดซึม



รูปที่ 2.4 กระบวนการบำบัด CO₂ ด้วยกระบวนการดูดซึม (CO2CRC, 2014b)

ตารางที่ 2-3 ข้อดีข้อเสีย ของเทคนิคการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพ

ลักษณะของระบบ	การดูดซับโดยการเปลี่ยนความดันหรือ PSA Adsorption	การดักจับด้วยน้ำ Water scrubbing	การดูดซึมด้วยสารละลายเอทานอลามีน หรือ MEA	การแยกด้วยเยื่อเลือกผ่านหรือ Membrane
ลักษณะการดูดซึม	ดูดติดผิว	ทางกายภาพ	ทางเคมี	ใช้เมมเบรน
ระบบทำความสะอาด	จำเป็น	ไม่จำเป็น	จำเป็น	จำเป็น
ความดัน (Bar)	4 - 7	4 - 7	บรรยากาศ	16 - 40
ปริมาณก๊าซมีเทนที่สูญเสีย	3 - 10%	1 - 2 %	< 0.1%	ไม่มีข้อมูล
ความเข้มข้น CH ₄ ในก๊าซชีวภาพ	>96%	>97%	>99%	90 - 94%
พลังงานที่ใช้ในระบบ (kWh/Nm ³)	0.25	<0.25	<0.15	ไม่มีข้อมูล
อุณหภูมิของระบบ (°C)	อุณหภูมิห้อง	อุณหภูมิห้อง	100	อุณหภูมิห้อง
การคืนสภาพของสารเคมี	ได้	ได้	ได้	-

ที่มา: (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2556)

ตารางที่ 2-4 เทคโนโลยีที่ใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย

วิธีการ	ความเข้มข้น (พีพีเอ็ม)	ประสิทธิภาพ	ข้อได้เปรียบ	ข้อเสียเปรียบ
การดูดซึม (Absorption)	250 1,000 5,000	90% 95% 98%	บำบัดก๊าซอินทรีย์ที่มีสถานะเป็นกรดได้ดี	มีข้อกำหนดในการใช้งาน
การดูดซับ (Adsorption)	200 1,000 5,000	50% 90 – 95% 98%	สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ดี	ประสิทธิภาพขึ้นกับความชื้น อุณหภูมิ
การควบแน่น (Condensation)	500 10,000	50% 95%	ดีสำหรับสารที่ต้องการนำกลับมาใช้ใหม่	มีข้อกำหนดในการใช้งาน
การเผาทำลายโดยใช้ความร้อน	20 100	95% 99%	ทำลายโครงสร้างทางเคมีได้สูง สามารถนำพลังงานความร้อนกลับมาใช้ใหม่ได้	สารอินทรีย์ไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้ ราคาในการบำบัดสูง
การเผาทำลายโดยใช้ตัวเร่ง	50	90%	ทำลายโครงสร้างทางเคมีได้สูง	สารอินทรีย์ไม่สามารถนำกลับมาได้

2.3 กระบวนการดูดซึม

2.3.1 ความรู้ทั่วไป

กระบวนการดูดซึม CO₂ คือ การบำบัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการสัมผัสระหว่างเฟสของเหลว และเฟสก๊าซ มักนิยมใช้ถังการบำบัดรูปแบบ Tower หรือคอลัมน์ ซึ่งมีหลายรูปแบบ โดยก๊าซที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ปนเปื้อนอยู่จะถูกป้อนเข้ามาด้วยแรงดันจากด้านล่างของหอบำบัด โดยด้านในหอดูดซึมจะมีเฟสของเหลว ทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกสัมผัสด้วยเฟสของเหลวภายในหอบำบัด ประสิทธิภาพการดูดซึมจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเฟสก๊าซหรือเฟสของเหลว เช่น การแพร่กระจายความเร็ว ความหนาแน่น ความเข้มข้นเฟสของเหลว พื้นที่ผิวสัมผัส และสถานะของตัวดูดซึม เช่น อุณหภูมิ อัตราการไหลของก๊าซและของเหลว ส่วนก๊าซที่ผ่านการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์แล้วจะผ่านออกสู่ด้านบนของหอบำบัดโดยถือว่าเป็นก๊าซที่สะอาดขึ้น

2.3.2 ความสามารถในการละลายของเฮนรี

เฮนรีเป็นความสัมพันธ์ระหว่างการละลายของก๊าซและของเหลว โดยปริมาณของก๊าซที่ละลายอยู่ในของเหลวจะเปลี่ยนแปลงเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับความดันของก๊าซที่กระทำเหนือของเหลว เขียนเป็นสมการ 2.1 ได้ดังนี้ นอกจากนี้ค่าความสามารถในการละลายของก๊าซสู่ของเหลวขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเหลวด้วย ดังตารางที่ 2.5 ซึ่งในงานวิจัยนี้ในช่วงแรกจะใช้อากาศ (Air) เข้าสู่

ระบบ โดยจะใช้กฎของเฮนรีในการหาค่า C^* เพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณการถ่ายเทมวลรวมดังในสมการที่ 3.1 ต่อไป

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{A_1}{A_2} \quad 2.1$$

โดยที่ P_1 = ความกดดันของก๊าซครั้งแรก

P_2 = ความกดดันของก๊าซครั้งหลัง

A_1 = ปริมาตรของก๊าซที่ละลายอยู่ในของเหลวครั้งแรก

A_2 = ปริมาตรของก๊าซที่ละลายอยู่ในของเหลวครั้งหลัง

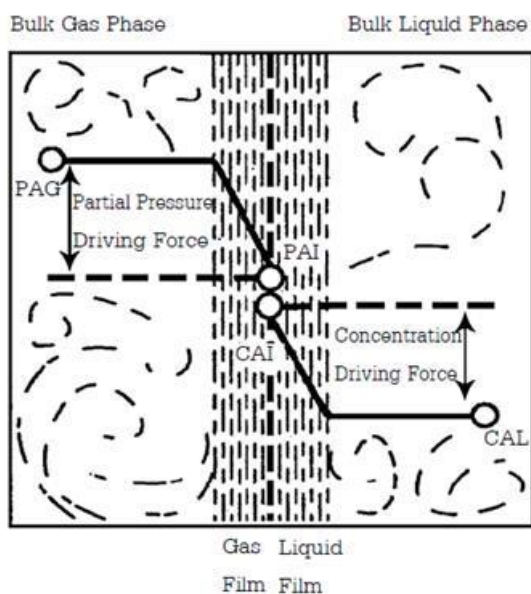
ตารางที่ 2-5 ค่าคงที่ในกฎของเฮนรีสำหรับก๊าซต่างๆในน้ำ (10^{-4} atm/mole fraction)

อุณหภูมิ °C	Gas									
	Air	CO ₂	CO	H ₂ S	NO	N ₂	O ₂	SO ₂	NH ₃	COS
0	4.32	0.0728	3.52	0.0268	1.69	5.59	2.55	0.0011	0.000034	0.092
10	5.49	0.104	4.42	0.0367	2.18	6.68	3.27	0.0017	0.000054	0.148
20	6.64	0.142	5.36	0.0483	2.64	8.04	4.01	0.0024	0.000090	0.219
30	7.71	0.186	6.20	0.0609	3.10	9.24	4.75	0.0034	0.00013	0.304
40	8.70	0.233	6.96	0.0745	3.52	10.4	5.35	0.0054	0.00019	-
50	9.46	0.283	7.61	0.0884	3.90	11.3	5.88	0.0070	0.00029	-
60	10.1	0.341	8.21	0.103	4.18	12.0	6.29	-	0.00038	-
70	10.5	-	8.45	0.119	4.38	12.5	6.63	0.013	-	-
80	10.7	-	8.45	0.135	4.48	12.6	6.87	-	-	-
90	10.8	-	8.46	0.144	4.52	12.6	6.99	-	-	-
100	10.9	-	8.46	0.148	4.54	12.6	7.01	0.026	-	-

2.3.3 กลไกของการดูดซึมมีลักษณะของการถ่ายเทมวลของสถานะก๊าซหรือไอ

ระหว่างผิวสองส่วนกับของเหลว โดยอธิบายได้ด้วยแบบจำลองทฤษฎีเยื่อ 2 ชั้น (two films theory) ดังรูปที่ 2.5 ต่อไปนี้ เป็นทฤษฎีจำลองในการสัมผัสพื้นที่ผิวหรือผสมกันอย่างสมบูรณ์ระหว่างเฟส 2 เฟส คือ เฟสก๊าซและเฟสของเหลว ซึ่งมีการถ่ายเทมวลสารระหว่างสองเฟสดังกล่าวแพร่ทะลุผ่านเนื้อเยื่อที่กั้นระหว่างสองเฟสจนเข้าสู่จุดสมดุล จากนั้นความเข้มข้นของสาร A ในเฟสก๊าซเปลี่ยนจาก P_{AG} เป็น P_{AI} ที่ผิวระหว่างเนื้อเยื่อ ในขณะที่ความเข้มข้นของสารในเฟสของเหลวเปลี่ยนจาก C_{AI}

เป็น C_{AL} สามารถอธิบายได้ดังสมการ 2.2 เป็นทฤษฎีเนื้อเยื่อ 2 ชั้น ซึ่งจำลองการสัมผัสพื้นที่ผิวหรือส่วนที่ผสมกันอย่างสมบูรณ์ระหว่างเฟส 2 เฟส คือ เฟสก๊าซและเฟสของเหลว ซึ่งมีการถ่ายเทมวลสารระหว่างสองเฟสดังกล่าวแพร่ทะลุผ่านเนื้อเยื่อที่กั้นระหว่างสองเฟสจนเข้าสู่จุดสมดุล จากนั้นความเข้มข้นของสาร A ในเฟสก๊าซเปลี่ยนจาก P_{AG} เป็น P_{AI} ที่ผิวระหว่างเนื้อเยื่อ ในขณะที่ความเข้มข้นของสารในเฟสของเหลวเปลี่ยนจาก C_{AI} เป็น C_{AL} สามารถอธิบายได้ดังสมการ 2.3 – 2.4



รูปที่ 2.5 ทฤษฎีเนื้อเยื่อ 2 ชั้น

ที่มา : (นพภาพร พานิช และคณะ, 2550)

$$N_A = k_g (P_{AG} - P_{AI}) \quad (2.2)$$

$$N_A = k_l (C_{AI} - C_{AL}) \quad (2.3)$$

โดยที่ N_A = อัตราส่วนของการถ่ายเทมวลสารของสาร A กรัมโมล/ชั่วโมงตารางเมตร

k_g = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเฟสก๊าซ กรัมโมล/ชั่วโมงตารางเมตร P_a

k_l = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเฟสของเหลว กรัมโมล/ชั่วโมงตารางเมตร P_a

จากสมการทั้ง 2.2 และ 2.3 จะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างกันในด้านการใช้งาน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของค่า k_g และ k_l มีการแพร่ผ่านเนื้อเยื่อ ทำให้ไม่สามารถวัดค่าความเข้มข้นที่ผิวเนื้อเยื่อได้ จึงมีการอธิบายทฤษฎีการถ่ายเทมวลสารที่จุดสมดุลที่รวมค่าความต้านทาน

ทั้งหมดของเนื้อเยื่อแต่ละเฟส โดยสมมติฐานให้เส้นตรงเป็นเส้นสมดุลของอัตราการดูดซึมได้ดังสมการ 2.4 – 2.5

$$N_A = K_{OG} (P_{AG} - P_A) \quad 2.4$$

$$N_A = K_{OL} (C_A - C_{AI}) \quad 2.5$$

โดยที่ P_A = ความดันที่จุดสมดุลของตัวทำละลาย A

C_A = ความเข้มข้นที่จุดสมดุลของตัวทำละลาย A

C_{AI} = ความเข้มข้นขององค์ประกอบ A ในเฟสของเหลวที่บริเวณใกล้ผิวสัมผัส

K_{OG} = ค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทมวลทั้งหมดในเฟสก๊าซ, กรัมโมล/ชั่วโมงตารางเมตร P_a

K_{OL} = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลทั้งหมดในเฟสของเหลว, กรัมโมล/ชั่วโมงตารางเมตร P_a

ณ จุดสมดุลค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารทั้งหมดจะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารแต่ละเฟส ดังสมการ 2.6 – 2.7

$$\frac{1}{K_{OG}} = \frac{1}{K_g} + \frac{H}{K_l} \quad 2.6$$

$$\frac{1}{K_{OL}} = \frac{1}{K_l} + \frac{1}{H \cdot k_g} \quad 2.7$$

โดยที่ H = ค่าคงที่จากทฤษฎี Henry's Law

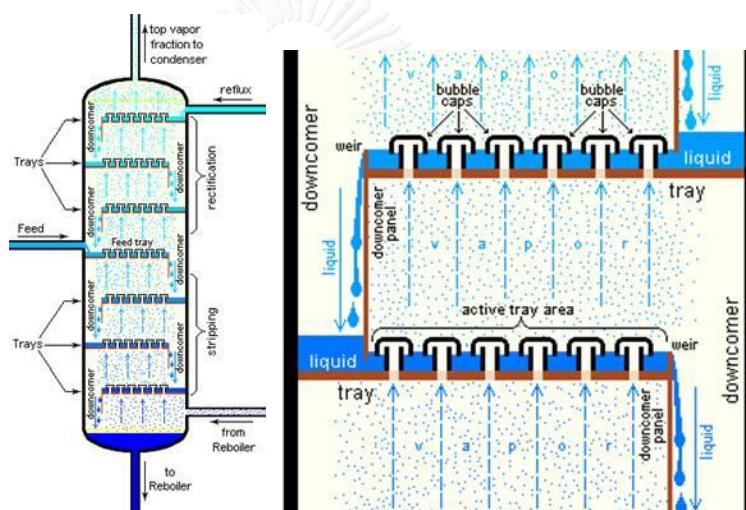
ดังนั้นจากสมการ หากค่า H มีค่าน้อยมากแสดงว่าเฟสก๊าซสามารถละลายได้ดี ในเฟสของเหลว ซึ่งเป็นเหตุให้ค่า K_{OG} ใกล้เคียงกับ k_g ดังนั้นเฟสก๊าซจึงเป็นเฟสควบคุม แต่ในกรณีที่ค่า H มีค่ามากแสดงว่าเฟสก๊าซละลายไม่ดี เป็นเหตุให้ ค่า K_{OL} ใกล้เคียงกับ K_l เฟสที่ควบคุมจึงกลายเป็นเฟสของเหลวแทน

ทั้งนี้ จึงมองในภาพรวมในด้านการใช้งานในการควบคุมมลพิษอากาศจึงมักนิยมใช้เฟสควบคุมเป็นเฟสก๊าซ

2.4 อุปกรณ์การดูดซึม

2.4.1 หอดูดซึมแบบเพลตหรือถาด (Plate or Tray column)

เป็นหอดูดซึมที่มีทิศทางระหว่างเฟสก๊าซและเฟสของเหลวสวนทางกัน โดยเฟสก๊าซจะถูกปล่อยเข้าหอดูดซึมจากด้านล่างและเคลื่อนที่ไปยังด้านบนโดยสัมผัสกับเฟสของเหลวในถาดผ่าน wire กันออก เพื่อไหลผ่านที่ละชั้นๆ ไปสู่ด้านบนสุด โดยมีรูหรือช่องให้ผ่านลงมา ดังรูปที่ 2.6 เพื่อให้เฟสทั้งสองได้สัมผัสกันมากขึ้น หอดูดซึมนี้หากนำมาใช้งานกับระบบที่มีอัตราการไหลสูงๆ จะทำให้ระบบเกิดการปั่นป่วนได้ และการถ่ายเทมวลระหว่าง 2 เฟส อาจต้องใช้ระยะเวลาซึ่งอาจทำให้ต้องเพิ่มจำนวนถาดหรือชั้น และความสูงของคอลัมน์ เพื่อให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลระหว่าง 2 เฟสมากขึ้น (Treybel, 1981b)

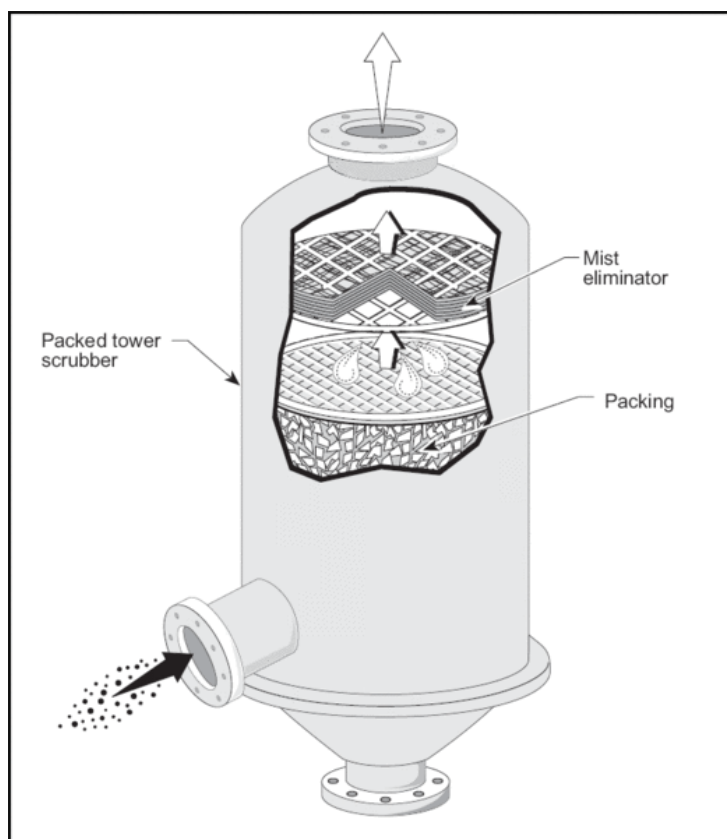


รูปที่ 2.6 หอดูดซึมแบบเพลตหรือถาด

(Treybel, 1981a)

2.4.2 หอดูดซึมแบบบรรจุตัวกลาง (Packed column)

หอดูดซึมชนิดนี้ จะเพิ่มวัสดุตัวกลาง (Media or packing materials) ภายในหอดูดซึม ซึ่งอาจจะทำมาจากพลาสติกหรืออื่นๆก็ได้ เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานและบำรุงรักษา การบรรจุตัวกลางดังกล่าวจะเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการถ่ายเทมวลสารระหว่างเฟสก๊าซและเฟสของเหลว หอดูดซึมนี้สามารถกำหนดทิศทางการไหลระหว่างสองเฟสที่จะให้สวนทางกันหรือไหลตามกันก็ได้ นอกจากนี้ยังช่วยให้จุลชีพเกาะติดตัวกลางซึ่งสามารถช่วยในการบำบัดน้ำเสียได้อีกด้วย อย่างไรก็ตาม หอดูดซึมนี้ มีข้อเสีย คือ อุดตันได้ง่าย และอาจทำให้เกิดก๊าซไหลย้อนกลับหากเกิดการอุดตัน ดังรูปที่



รูปที่ 2.7 หอดูดซึมแบบบรรจุตัวกลาง

(Acquired Engineering 360 by IEEE, 2016)

2.4.3 คอลัมน์ดูดซึมแบบฟองอากาศ (Bubble column: BCR) (Nigar et al., 2005)

เป็นหอดูดซึมที่มีลักษณะพิเศษแตกต่างไปจากหอดูดซึมแบบอื่นๆ คือมีการใช้ฟองอากาศเพื่อช่วยการถ่ายเทมวลสารจากเฟสก๊าซไปสู่เฟสของเหลว เนื่องจากขนาดฟองอากาศทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสในการถ่ายเทมวลสารมีการเปลี่ยนแปลง หลักการนี้สามารถใช้ได้กับระบบที่ปั่นป่วนของเหลวภายใน ซึ่งจะปั่นป่วนมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของระบบ เหมาะกับระบบที่ใช้เฟสของเหลวเป็นตัวควบคุมการถ่ายเทมวลสาร ซึ่งสามารถบำบัดเฟสก๊าซได้ดี ดังรูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นการเคลื่อนที่ของฟองอากาศ

ทั้งนี้ อุปกรณ์หอดูดซึมฟองอากาศสามารถทำงานได้ทั้งระบบแบบทีละเท (Batch) หรือแบบต่อเนื่อง (Continuous) ได้เช่นกัน ซึ่งประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารของระบบดังกล่าว จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายด้าน ดังจะอธิบายต่อไปนี้

2.4.3.1 ปัจจัยด้านการถ่ายเทมวลสาร เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารโดยรวม และการถ่ายเทมวลสารย่อย

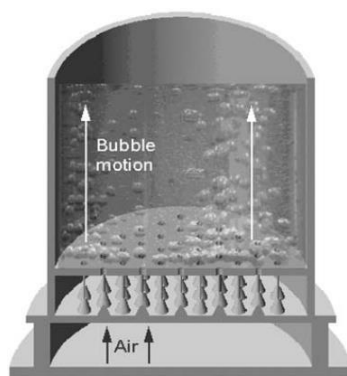
2.4.3.2 ตัวแปรที่เกี่ยวกับลักษณะทางอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamic-parameters) เช่น ขนาดฟองอากาศ ความถี่ในการเกิดฟองอากาศความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศและค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ เป็นต้น

2.4.3.3 ความเข้มข้นในเฟสของเหลว ได้แก่ น้ำสะอาด สารละลายที่มีผลต่อแรงตึงผิวของพื้นที่ผิวสัมผัส การเลือกตัวทำละลายในการดูดซึมควรพิจารณาด้านประสิทธิภาพและราคาของสารเคมี เมื่อมองด้านราคาโดยทั่วไปนิยมใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย เนื่องจากน้ำหาได้ง่ายและราคาถูก นอกจากนี้ก๊าซที่บำบัดส่วนใหญ่จะละลายน้ำได้ หากไม่กังวลค่าใช้จ่ายมากนักสารเคมีก็จะช่วยให้เห็นผลการบำบัดที่ชัดเจนและแน่นอนมากขึ้น

ตัวทำละลายที่ดีควรมีสมบัติดังนี้

1. สามารถละลายก๊าซที่ต้องการออกจากระบบการถ่ายเทมวลสารได้ดี
2. ควรมีอัตราการระเหยต่ำ เพื่อลดการสูญเสียตัวทำละลาย
3. ควรเป็นสารที่ไม่กัดกร่อน เพื่อยืดอายุการใช้งานอุปกรณ์
4. หาได้ง่ายและราคาถูก
5. ไม่เป็นสารพิษ ไม่ติดไฟ และจุดเยือกแข็งต่ำ
6. มีความหนืดต่ำ ทำให้ช่วยเพิ่มการดูดซึม และลดการท่วมขังของตัวทำละลายในอุปกรณ์

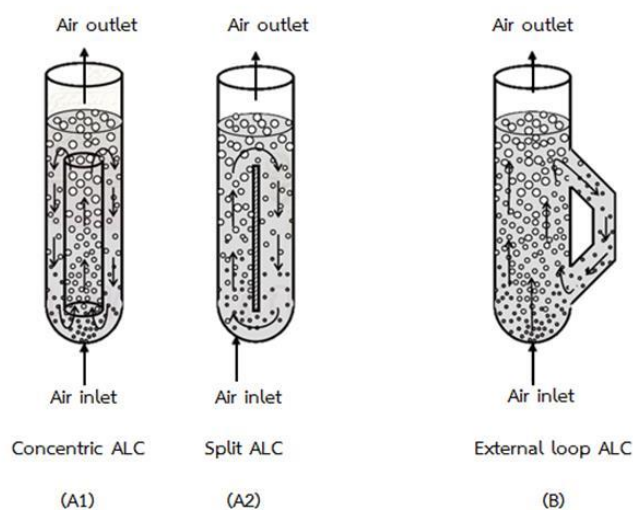
ซึ่งในงานวิจัยนี้ จะทำการศึกษากระบวนการดูดซึมแบบหอดูดซึมฟองอากาศ เนื่องจากมีราคาในการก่อสร้างน้อย และดูแลรักษาง่ายไม่ซับซ้อน เพื่อจะศึกษากลไกปัจจัยการดูดซึมทั้ง 2 ปัจจัยคือปัจจัยด้านกายภาพ และเคมี ได้แก่ ขนาดฟองอากาศ สัดส่วนก๊าซ ความเร็วลอยตัว พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ ประสิทธิภาพการดูดซึม เป็นต้น



รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะคอลัมน์ฟองอากาศ (สุภาภรณ์ มานะรังสรรค์, 2545)

2.4.4 คอลัมน์แบบอากาศยก (Air lift reactors: ALR)

เป็นหอดูดซึมอีกแบบหนึ่งที่นิยมนำมาใช้ในงานวิจัยเนื่องจากสามารถนำมาประยุกต์หรือทำการวิจัยขั้นสูงได้ ซึ่งคอลัมน์แบบอากาศยก (ALR) นั้นมีการดัดแปลงมาจากหอดูดซึมแบบฟองอากาศ (BCR) โดยที่หอดูดซึมแบบอากาศยกมีการกำหนดการไหลเวียนเฟสของเหลวและก๊าซอยู่ภายในคอลัมน์ ในขณะที่เฟสของเหลวไหลไปในทิศทางเดียวกันกับเฟสก๊าซ และระบบ ALR อัตราการหมุนเวียนของของเหลวไม่ขึ้นกับอัตราการไหลของก๊าซ นอกจากนี้เมื่ออัตราการไหลของของเหลวหมุนเวียนสูงขึ้น ALR ไม่จำเป็นต้องติดตั้งปั๊มเพิ่ม หอดูดซึมแบบอากาศยกนั้นมี 2 ประเภท คือ แบบหมุนวนภายใน และแบบหมุนวนภายนอก ดังรูปที่ 2.9 โดยรูป (A1) คือ หอดูดซึมแบบอากาศยกที่มีการหมุนวนภายในด้วยการใช้พื้นที่ศูนย์กลางร่วมกันของฝั่ง Riser zone ในการปล่อยอากาศเข้า ซึ่งการติดตั้งหอดูดซึมจะซับซ้อนและละเอียดกว่าการติดตั้งหอดูดซึมในรูป (A2) ซึ่งมีเพียงแผ่นกั้นภายในแผ่นเดียวในการกำหนดทิศทางการหมุนวนภายในของหอดูดซึมแบบอากาศยก ส่วนในรูป (B) จะเป็นหอดูดซึมอากาศยกที่มีการหมุนวนภายนอก ซึ่งจะใช้พื้นที่เยอะกว่าหอดูดซึมในรูป (A1) และ (A2)



รูปที่ 2.9 ประเภทของหอดูดซึม แบบอากาศยก

(A1) และ (A2) เป็นหอดูดซึมอากาศยกแบบหมุนวนภายใน และ

(B) เป็นหอดูดซึมอากาศยกแบบหมุนวนภายนอก

นอกจากนี้ ALR สามารถผสมระหว่างสองเฟสโดยการยกอากาศให้ไหลวนด้วยการฉีดก๊าซเข้ามาในระบบและไหลยกขึ้นสู่ด้านบนเพื่อไหลเวียนลงมาอีกฝั่งไปสัมผัสเฟสก๊าซกับเฟสของเหลว หลักการนี้เพื่อลดแรงเฉือนและช่วยเพิ่มการถ่ายเทมวลในการกวนผสมในระบบระหว่างเฟสก๊าซและเฟสของเหลวมากขึ้น อากาศยกหมุนเวียนแข็งแรงมากขึ้นสำหรับการไหลของก๊าซที่เหมือนกัน แต่อัตราการถ่ายเทอากาศมักจะต่ำกว่าคอลัมน์แบบฟองอากาศ ทั้งนี้ ALR สามารถใช้ได้ดีในระบบที่มี

ขนาดไม่ใหญ่มาก แต่กับเงื่อนไขนี้ขึ้นอยู่กับกาเกิดฟองและพลังงานที่ใช้ หอดูดซึมแบบอากาศยก (ALR) เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยในการถ่ายเทมวลสารระหว่างเฟสก๊าซและเฟสของเหลว โดยการผสมสองเฟสด้วยการเคลื่อนที่ของฟองอากาศ การเดินระบบ ALR นั้นไม่มีอุปกรณ์หรือเครื่องจักรกลในการช่วยให้เกิดการหมุนเวียน การกำหนดทิศทางการไหลของ ALR ช่วยให้การไหลเวียนของของเหลวเป็นธรรมชาติในระบบ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้คอลัมน์แบบอากาศยก ALR ทำการทดลองเปรียบเทียบกับคอลัมน์แบบฟองอากาศ

2.5 คอลัมน์ดูดซึมแบบฟองอากาศในการบำบัด CO₂

คอลัมน์แบบฟองอากาศมีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรม เช่น การใช้งานกับตัวเร่งปฏิกิริยา และการใช้งานทางชีวเคมีที่จุลินทรีย์ที่ถูกนำมาใช้เป็นสารแขวนลอย เพื่อผลิตสารชีวภาพที่มีคุณค่าอุตสาหกรรม ข้อดีหลายประการของคอลัมน์แบบฟองอากาศ ได้แก่ ไม่มีปัญหาที่ความร้อนสูง และอัตราการถ่ายเทมวลสารได้ดี ใช้ต้นทุนต่ำ ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาน้อยการดูดซึมแบ่งได้เป็น 2 วิธี ได้แก่ การดูดซึมทางกายภาพ จะเกิดขึ้นได้เมื่อก๊าซถูกดูดซึมละลายในตัวทำละลาย เช่น น้ำ โดยไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น และอีกหนึ่งวิธีคือ การดูดซึมทางเคมี เกิดขึ้นเมื่อก๊าซถูกดูดซึมกับตัวทำละลายด้วยปฏิกิริยาทางเคมี

การศึกษาพารามิเตอร์ในการออกแบบระบบ BCR สามารถอธิบายลักษณะการดำเนินงานของ BCR เพื่อนำไปสู่ความเข้าใจยิ่งขึ้น ได้แก่ คุณสมบัติของความร้อน กลไกการถ่ายเทมวล ด้านอุทกพลศาสตร์ และระบบการไหล นอกจากนี้พลศาสตร์ของไหล (CFDs) เป็นอีกปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบ BCR

2.5.1 การวิเคราะห์ระบบการไหล และพลศาสตร์ของเหลว Fluid dynamics and regime analysis

ลักษณะที่เลื่อนไหลแบบไดนามิกของคอลัมน์แบบฟองอากาศมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อการดำเนินงานและประสิทธิภาพการดูดซึม จะสังเกตเห็นได้ทั่วไปในคอลัมน์แบบฟองอากาศ มีระบบการไหล 3 ประเภท ได้แก่ homogeneous (bubbly flow), heterogeneous (churn-turbulent) regime และ slug flow regime

homogeneous (bubbly flow) เกิดขึ้นที่ความเร็วก๊าซต่ำ ประมาณน้อยกว่า 5 เซนติเมตรต่อวินาที ฟองอากาศที่มีขนาดเล็กค่อนข้างสม่ำเสมอ การกระจายฟองสม่ำเสมอ ฟองอากาศไม่รวมตัวกันหรือแตกออก

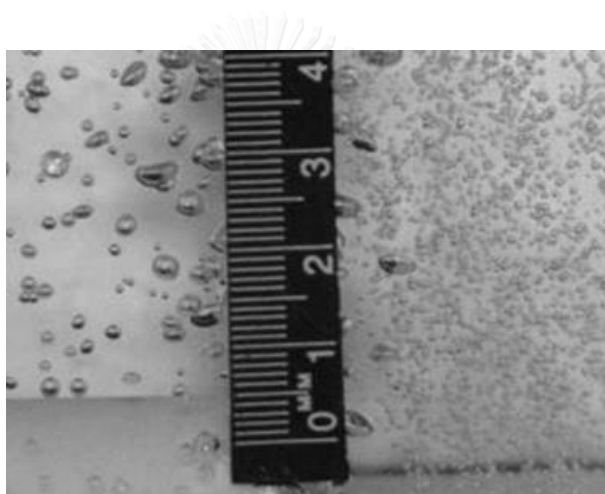
heterogeneous (churn-turbulent) เกิดขึ้นที่ความเร็วมากกว่า 5 เซนติเมตรต่อวินาที ฟองอากาศมีการปั่นป่วน รูปแบบการไหลไม่คงที่ ฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้น เกิดการรวมตัวของฟองอากาศและการแตกตัวของฟอง

slug flow regime ระบบการไหลมักใช้งานระดับการทดลองขนาดเล็ก เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15 เซนติเมตร มีอัตราการไหลของก๊าซที่สูง

2.5.2 ปัจจัยการดูดซึมของคอลัมน์แบบฟองอากาศโดยวิธีทางกายภาพ

2.5.2.1 ขนาดฟองอากาศ

ขนาดของฟองอากาศมีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพถ่ายเทมวลสาร โดยอาศัยปริมาณพื้นที่ผิวสัมผัส เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนหรือละลายระหว่างเฟสก๊าซและเฟสของเหลวเพิ่มขึ้นได้ ดังนั้นหากขนาดของฟองอากาศเล็กลงในอัตราความเร็วกว่า อาจเป็นเหตุให้มีการมีพื้นที่สัมผัสในการถ่ายเทมวลสารเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.10 การคำนวณหาขนาดของฟองอากาศนั้นสามารถคำนวณได้ดังสมการ 2.8 ต่อไปนี้



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.10 แสดงการเปรียบเทียบขนาดของฟองอากาศจากหวักระจายอากาศที่ต่างกัน

หาขนาดของฟองอากาศโดยเฉลี่ย

$$d_{\text{avg}} = \frac{\sum_{i=1}^N d_i}{N} \quad 2.8$$

เมื่อ d_{avg} ค่าเฉลี่ยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ หน่วย mm
 N คือจำนวนฟองอากาศ ไม่มีหน่วย
 d_i ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางฟองอากาศแต่ละฟอง หน่วย m
 หาความถี่ของฟองอากาศ (Bubble frequency) จำนวนฟองอากาศที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งวินาที
 จากสมการที่ (2.10)

$$f_B = \frac{Q_G}{V_B} = \frac{6Q_G}{\pi D_B^3} \quad 2.9$$

เมื่อ f_B ความถี่ฟองอากาศ
 Q_G อัตราการไหลก๊าซ
 V_B ปริมาตรของเหลวในคอลัมน์ m^3
 2.5.2.2 พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ

ดังนั้นพื้นที่ผิวสัมผัสที่คำนวณได้ในวิธีการมาตรฐานดังสมการต่อไปนี้

$$a = \frac{6\epsilon_G}{d_s} \quad 2.10$$

เมื่อ d_s ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย
 ϵ_G สัดส่วนก๊าซไม่มีหน่วย
 a พื้นที่ผิวสัมผัส m^2/m^3
 2.5.2.3 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม ($K_L a$)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม ($K_L a$) ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการ
 การดูดซึม ตามการเคลื่อนที่หรือแบบไดนามิก $K_L a$ ได้จากสมการต่อไปนี้

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C^* - C) \quad 2.11$$

$$\frac{\ln [C^* - C]}{\ln C^*} = -K_L a(t) \quad 2.12$$

เมื่อ k_L ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลย่อย, m/s
 a พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ, m^2/m^3
 C^* ความเข้มข้นของก๊าซละลายที่สภาวะสมดุล, mg/l
 C_L ความเข้มข้นของก๊าซละลายที่สภาวะใดๆ, mg/l

ที่ C และ C* มีความเข้มข้นของการปนเปื้อนและความเข้มข้นของความอิมิตัวของสารปนเปื้อนในของเหลวของเหลวตามลำดับ ความลาดชันของสมการนี้จะช่วยให้การหา $K_L a$

2.5.2.4 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเฟสของเหลว (K_L)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเฟสของเหลว (K_L) ในระบบนี้จะถูกกำหนดโดย:

$$K_L = \frac{K_L a}{a} \quad 2.13$$

2.5.2.5 สัดส่วนของก๊าซ (Gas holdup)

สัดส่วนของก๊าซเป็นปัจจัยหนึ่งที่ใช้ในการออกแบบคอลัมน์ชนิดดูดซึมแบบฟองอากาศ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดันดันภายในระบบ นอกจากนี้อัตราการไหลของก๊าซและขนาดของฟองซึ่งทั้งสองมีผลต่อสัดส่วนของก๊าซ ในปัจจุบันเป็นส่วนสำคัญในการศึกษาด้านอุทกพลศาสตร์เป็นกลยุทธ์การควบคุมสำหรับหอดูดซึม และการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ (Nigar et al., 2005)

ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะพัฒนาเพื่อปรับปรุงรูปแบบ ในด้านอุทกพลศาสตร์หอดูดซึมสำหรับการวิจัยออกแบบการควบคุมและการเพิ่มประสิทธิภาพ ในกรณีนี้สมการ flotation ของ (Sinan et al., 2013) ได้รับการปรับปรุงที่สัมพันธ์กับขนาดฟองอากาศเฉลี่ยของสัดส่วนก๊าซ วิธีการนี้ได้ทำนายค่าขนาดฟองเฉลี่ยจากการสัดส่วนของก๊าซ ซึ่งวัดในคอลัมน์ขนาดเล็ก (น้อยกว่า 0.1 ม.) โดยใช้เพียงความเร็วก๊าซน้อยกว่า 3 ซม./วินาที (Maceiras and Cancela, 2011) ได้แสดงให้เห็นว่าการหมุนเวียนที่เป็นของเหลวและเฟสก๊าซจะติดไปกับพื้นผิวฟองอากาศ สัดส่วนก๊าซประมาณได้จากการวัดความดันที่แตกต่างกันในขณะลอยเหนือผิวหอดูดซึม ส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นของฟองอากาศ เมื่อมีก๊าซเพิ่มขึ้น

โดยสัดส่วนของก๊าซสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.14 (Audrey and Martine, 2009)

$$\epsilon_g = \frac{\rho_{SL} - \rho_w (\Delta P / gL)}{\rho_{SL} - \rho_a} \quad 2.14$$

โดยที่ ρ_{SL} ความหนาแน่นของน้ำเฉลี่ย

ρ_w ความหนาแน่นของน้ำ

ρ_a คือความหนาแน่นที่ปรากฏของมวลฟองอากาศระหว่างจุดตรวจวัดความดันทั้ง

สองอนุภาค

ΔP สามารถวัดได้โดยใช้เครื่องส่งสัญญาณแรงดันที่ความดันแตกต่างกัน

2.5.2.6 ลักษณะของฟองอากาศ (Bubble characteristic)

ลักษณะขนาดฟองอากาศมีอิทธิพลต่อการถ่ายเทมวล ได้มีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเฟสของเหลวและเฟสก๊าซ พบว่าความเร็วของก๊าซที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อการถ่ายเทมวลสาร ในขณะที่ฟองอากาศมีขนาดที่เล็กลงนั้นกลับทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสในการแลกเปลี่ยนในการถ่ายเท

มวลสารระหว่างสองเฟสเพิ่มขึ้น ในปัจจุบันรูปแบบการถ่ายเทมวลถูกนำมาใช้สำหรับการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางฟองอากาศเฉลี่ย d_s (B. Bhatia et al., 2004.) จะใช้ได้เฉพาะกับคอลัมน์ฟองอากาศในเฟสก๊าซและเฟสของเหลว โดยการคำนวณจำนวนฟองอากาศ Reynolds Re_B ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของสารละลาย ρ_{sl} และค่าสัมประสิทธิ์ความหนืด μ_{eff}

2.5.2.7 ตัวแปรการถ่ายเทมวลสารในกระบวนการดูดซึม (Mass transfer parameters)

กระบวนการดูดซึมระหว่างเฟสสองเฟส คือเฟสก๊าซและเฟสของเหลว โดยเฟสก๊าซจะเป็นอากาศและคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนเฟสของเหลวนั้นจะเป็นน้ำอุณหภูมิห้อง ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในสถานะก๊าซ เมื่อสัมผัสกับน้ำจะสามารถละลายซึ่งกันและกันได้ อาจคาดเดาได้ยากว่าเฟสไหนระหว่างเฟสก๊าซและเฟสของเหลวเป็นเฟสควบคุม จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทราบกลไกการถ่ายเทมวลโดยใช้หลักการทฤษฎีสองความต้านทาน (Two – resistance theory) ซึ่งจะอธิบายดังหัวข้อต่อไปนี้

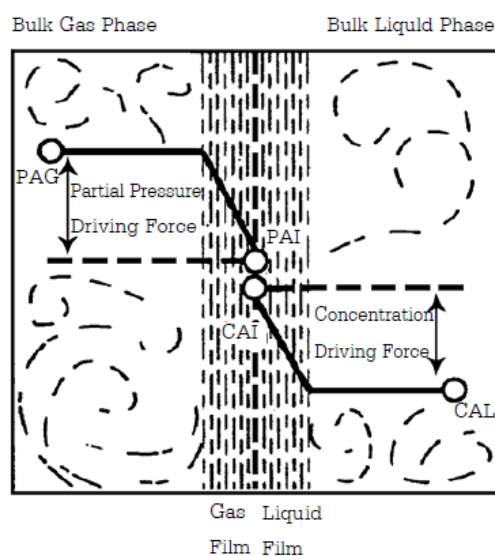
ทฤษฎีสองความต้านทาน (Two – resistance theory) มี 3 ขั้นตอนได้แก่

1. การถ่ายเทมวลสารจากเฟสหนึ่งไปยังผิวสัมผัสระหว่างเฟสก๊าซและเฟสของเหลว
2. การถ่ายเทมวลสารข้ามผิวสัมผัสระหว่างเฟส
3. การถ่ายเทมวลสารจากผิวสัมผัสระหว่างเฟสไปยังเฟสตรงกันข้าม

โดยทฤษฎีนี้มีข้อสมมุติฐานสองข้อ คือ

- 1) อัตราการถ่ายเทมวลระหว่างสองเฟสถูกควบคุมโดยการแพร่ผ่านแต่ละเฟส
- 2) ไม่มีความต้านทานการถ่ายเทมวลข้ามชั้นผิวสัมผัส

ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังรูปภาพที่ 2.11

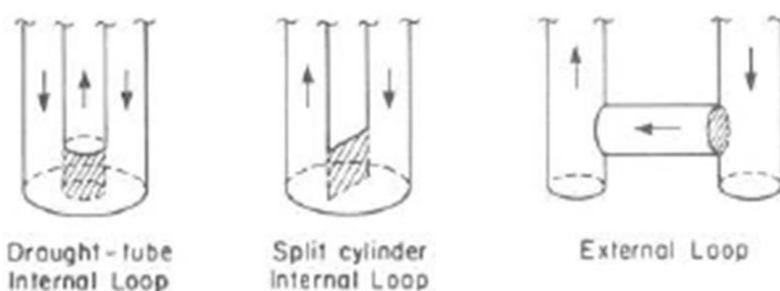


รูปที่ 2.11 ขั้นตอนของทฤษฎีสองความต้านทาน (นภาพพร พาณิช และคณะ, 2550)

จะเห็นได้ว่าการถ่ายเทมวลสารจากเฟสก๊าซของสาร A ไปยังเฟสของเหลวโดยมีฟิล์มบางบางของทั้งสองเฟสที่จุดผิวสัมผัส ซึ่งจะมีความดันย่อยจากเฟสก๊าซ (P_{Ai})

2.6 คอลัมน์ดูดซึมแบบอากาศยกในการบำบัด CO_2

คอลัมน์แบบอากาศยกนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ในการสัมผัสระหว่างเฟสก๊าซและเฟสของเหลว ทั้งในอุตสาหกรรมเทคโนโลยีชีวภาพ โดยทั่วไปทิศทางการไหลจะไหลสู่ด้านบนแล้วลงมาด้านล่างของคอลัมน์แยกออกเป็นสองส่วน ส่วนใหญ่มักจะติดตั้งหัวกระจายอากาศไว้ด้านฝั่งทิศทางไหลขึ้น (riser) ส่วนฝั่งที่ไหลลงสู่ด้านล่าง (downcomer) จะไม่มีหัวกระจายอากาศ ตัวแปรที่มีผลต่อการออกแบบคอลัมน์แบบอากาศยกได้แก่ สัดส่วนของก๊าซ ประสิทธิภาพการถ่ายเทมวล ระบบการไหล และขอบเขตการผสมภายใน รูปแบบการไหลของคอลัมน์แบบฟองอากาศมี 2 แบบ ได้แก่ การไหลเวียนภายใน และการไหลเวียนภายนอก ดังรูปที่ 2.12 โดยมีรูปแบบทิศทางการไหลที่แตกต่างกัน ซึ่งอธิบายดังต่อไปนี้



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.12 แสดงคอลัมน์แบบอากาศยกแต่ละรูปแบบการไหล จากงานวิจัย (Chisti et al., 1988)

1. ทิศทางการไหลเวียนขึ้น (Riser) ส่วนที่เป็นการกระจายของฟองอากาศในส่วนนี้จะมียองค์ประกอบของก๊าซที่สูงกว่า จึงทำให้ก๊าซที่มีความหนาแน่นมากกว่าเคลื่อนที่ไปยังส่วนที่มีความหนาแน่นต่ำขึ้นสู่ด้านบนของคอลัมน์ ทั้งนี้ เฟสก๊าซและเฟสของเหลวไหลขึ้นไปด้วยกัน
2. โชนแบ่งเฟสก๊าซ เฟสของเหลว (Gas-liquid separator) ก๊าซที่หลุดออกในส่วนนี้จะอยู่บริเวณด้านบนของส่วน riser และ downcomer ของเหลวที่ไหลผ่านในส่วนนี้ถูกผสมผ่านฝั่ง riser มาแล้ว เมื่อทั้งสองเฟสออกจากส่วนนี้ไปแล้วจะเข้าสู่ส่วนของ downcomer ต่อไป
3. ทิศทางการไหลเวียนลง (Downcomer) เป็นส่วนที่ของเหลวไหลผ่านในทิศทางลงด้านล่าง ของเหลวในส่วนนี้อาจจะมีสองแบบ คือ สองเฟส (ก๊าซและของเหลว) หรือเฟส

เดี่ยว (ของเหลวเท่านั้น) ขึ้นอยู่กับสภาพอุทกพลศาสตร์ในระบบ และของเหลวที่ไหลผ่านส่วน downcomer นั้นจะไหลไปยังด้านล่างของหอดูดูดซึมสู่ส่วน riser อีกครั้ง แม้ว่างานวิจัยที่ผ่านมาดังตารางที่ 2.6 เคยมีการออกแบบต่างๆของ ALR ซึ่งเห็นได้ว่าการกำหนดค่าของ ALR สามารถแบ่งตามลักษณะทางกายภาพเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

1. การหมุนเวียนภายใน (Internal loop) สามารถทำได้ง่าย โดยการทำให้แผ่นกั้น หลอดกั้น หรือหลอดที่จุดศูนย์กลางระหว่างส่วน riser และ downcomer ภายในหอดูดูดซึม ซึ่งจะเห็นทิศทางการไหลในแบบต่างๆได้
2. การหมุนเวียนภายนอก (External loop) หอดูดูดซึมชนิดนี้ส่วนของ riser และ downcomer จะแยกเป็น 2 คอลัมน์โดยเชื่อมต่อกันด้วยส่วนที่เป็นแนวนอนอยู่ด้านบนและด้านล่าง การไหลเวียนของของเหลวที่เกิดขึ้นระหว่างสองคอลัมน์จะแยกจากกันระหว่าง riser และ downcomer การไหลเวียนกลับของก๊าซมักจะน้อยลง เมื่อเทียบกับ ALR ในข้อที่ 1

อุปกรณ์การติดตั้งของ ALR แต่ละชนิดสามารถติดตั้งได้ทั้งคอลัมน์สี่เหลี่ยมหรือวงกลม นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มเติมวัสดุเพื่อปรับเปลี่ยนในการการกำหนดค่าการถ่ายเทมวลสารของหอดูดูดซึมแบบ ALR เช่น ผสมแผ่นพรุนแทรกลงในคอลัมน์

ตารางที่ 2-6 Geometric details of airlift reactors

No.	Description	V_L (m ³)	h_L, h_D (m)	D_r (m)	D_d (m)	A_r/A_d	L_r (m)	L_d (m)	L_b (m)	K_B	Reference
1	DT internal loop (DT sparged)	0.06	1.33	0.146	0.104	0.541	1.22	-	0.1	9.22 ± 0.47	Jones (1985)
2	DT internal loops	≈ 0.033	1.80	0.101	0.051	7.692			0.1	4.92 ± 2.77	Bello (1981)
3	DT internal loop (DT sparged)	0.2	2.8	0.206	0.094	0.892	2.6	-	0.033	16.98 ± 3.74	Hatch (1973)
4	Split cylinder (internal loop)	0.02354	5.076	0.19	0.102	2.44	5.076	5.076	0.102	7.38	Chiste (1988)

A_r cross-sectional area (riser) m²

A_d cross-sectional area (downcomer), m²

V_L liquid volume, (m³)

h_L, h_D un-aerated liquid height, gas-liquid dispersion height, m

D_r, D_d diameter or equivalent diameter (riser, downcomer), m

L_r, L_d riser height, downcomer height, (m)

K_B frictional loss coefficient (bottom), dimensionless

2.6.1 ปัจจัยอัตราการไหล

กลไกการไหลเวียนของหอดูดซึมแบบอากาศยกมี 2 กลไก ได้แก่

2.6.1.1 การถ่ายเทมวลสารโดยใช้หลักโมเมนตัมเนื่องจากการขยายตัวของก๊าซจากด้านล่างขึ้นไปสัมผัสด้านบน

2.6.1.2 ความแตกต่างของความหนาแน่นเฉลี่ยระหว่างการเติมอากาศและไม่เติมอากาศเนื่องจากความแตกต่างของ holdups ของก๊าซในทั้งสองเฟส

เมื่อก๊าซสามารถกระจายตัวลงไปของเหลวในคอลัมน์ปลังงานจะถูกถ่ายเทมวลสารไปยังของเหลวและจะเหนี่ยวนำให้เกิดการเคลื่อนไหวของเหลว นอกจากนี้ในพื้นที่ที่ก๊าซสามารถกระจายตัวซึ่งอยู่ในส่วน (Riser) เป็นเหตุให้เกิดความหนาแน่นของของเหลวต่ำกว่าความหนาแน่นของของเหลวในส่วนอื่น ๆ ซึ่งอยู่ในส่วน (Downcomer) ดังนั้นจึงมีความแตกต่างของความหนาแน่นของของเหลวระหว่างเติมอากาศและไม่เติมอากาศ และความแตกต่างนี้ยังเอื้ออำนวยต่อรูปแบบการไหลเวียนของของเหลว ALR มีข้อดีที่สามารถกำหนดรูปแบบการไหลของระบบ ALR เป็นวงกลมของของเหลวที่มีความเร็วและขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับหอดูดซึมแบบคอลัมน์ฟองอากาศที่มีรูปแบบการเคลื่อนไหวของของเหลวอยู่ในรูปแบบสุ่ม

2.6.2 การกระจายตัวของก๊าซ

การกระจายของก๊าซมีสองประเภทขึ้นอยู่กับระดับการส่งผ่านก๊าซใน ALR ดังต่อไปนี้

2.6.2.1 การแพร่กระจายของก๊าซที่เหมือนกัน

โดยทั่วไปฟองอากาศที่กระจายตัวค่อนข้างต่ำไหลผ่านไปตามคอลัมน์ด้านบนที่มีการปฏิสัมพันธ์โดยตรงระหว่างกัน ซึ่งเป็นระบบการไหลของฟองอากาศที่เหมือนกันเป็นเนื้อเดียวและไม่มีสิ่งกีดขวางในระบบการไหลของฟองอากาศ การกระจายก๊าซประเภทนี้เป็นที่น่าสนใจโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการถ่ายเทมวลสารระหว่างผิวสัมผัสทั้งสองเฟส คือ ก๊าซ และของเหลวเป็นที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่

2.6.2.2 การแพร่กระจายของก๊าซที่แตกต่างกัน

อุตสาหกรรมส่วนใหญ่ได้ดำเนินการการถ่ายเทมวลสารระหว่างเฟสก๊าซและเฟสของเหลวภายใต้อัตราการไหลของฟองอากาศในระบบที่แตกต่างกัน โดยได้รับการพัฒนาจากระบบที่มีจำนวนฟองและความถี่ในการชนกันของเหลวที่สามารถสังเกตได้ เนื่องจากการการมีปฏิสัมพันธ์มากขึ้นระหว่างฟองอากาศฟองมีแนวโน้มที่จะรวมกันและชนกันซึ่งส่งผลให้การกระจายของขนาดฟองอากาศพร้อมคอลัมน์ในเฟสก๊าซ มักจะมีขนาดเล็กกว่าพื้นที่ผิวสัมผัสของของเหลว แต่ด้วยสภาพปั่นป่วนอย่างมากที่เกิดจากการเคลื่อนไหวฟองอากาศผสมในระบบทำให้น่าสนใจมาก อย่างไรก็ตามหากการส่งผ่านก๊าซที่สูงเกินไป จะสามารถเข้าสู่ระบบการไหลเกิดฟองอากาศที่ขนาดใหญ่มาก เป็น

เหตุให้เป็นระบบที่ไม่พึงประสงค์ในการถ่ายเทมวลสารเพราะเฟสก๊าซ-ของเหลวที่ต่ำมากเนื่องจากพื้นที่การถ่ายเทมวลขนาดเล็กมาก

2.6.3 Power input requirement

ในระบบ ALR การไหลเวียนของของเหลวที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากความแตกต่างในความหนาแน่นของเฟสในการเติมอากาศและไม่เติมอากาศดังนั้นอุปกรณ์เครื่องจักรกลไม่จำเป็นต้องใช้ในการดำเนินงานในระบบ ALR ความต้องการกำลังในระบบ ALR จะมีน้อยกว่าในระบบถังกวนโดยทั่วไปกำลังที่เข้ามาสัมพันธ์นิวมตึกใดๆ ได้มาจากแหล่งที่มาหลักๆ คือ

1. พลังงานที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการขยายตัวของก๊าซที่อุณหภูมิคงที่ ขณะเคลื่อนที่ขึ้นในหอดูดซึม (P_{GE})

2. พลังงานจลน์ถ่ายเทมวลไปยังของเหลวโดยการฉีดก๊าซเข้า (P_{KE}) พลังงานที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการขยายตัวของก๊าซอุณหภูมิคงที่ ขณะเคลื่อนที่ขึ้นในหอดูดซึม (P_{GE}) งานระหว่างการขยายตัวของก๊าซที่อุณหภูมิคงที่ n โมล จากปริมาณเริ่มต้น

การถ่ายเทพลังงานจลน์ไปยังของเหลวโดยการฉีดก๊าซเข้าสู่หอดูดซึมพลังงานจลน์ (P_{KE}) สามารถคำนวณได้จาก

$$P_{KE} = \frac{1}{2} G u_{Go}^2 \quad 2.15$$

โดยที่ G คือ ที่อัตราการไหลของมวลก๊าซ (ลิตรต่อวินาที)

u_{Go} คือ ความเร็วการกระจายของก๊าซขาออก (เซนติเมตรต่อวินาที)

G สามารถแทนด้วยผลระหว่างน้ำหนักโมเลกุลและอัตราการไหลของโมลก๊าซ

โดยปกติพลังงานจลน์จะพบน้อยมากเมื่อเทียบกับการขยายตัวของก๊าซที่ isothermal

ดังนั้นจากทฤษฎีดังกล่าวมาของคอลัมน์แบบฟองอากาศและแบบอากาศยกสามารถสรุปข้อดีข้อจำกัดได้ดังตารางที่ 2-7 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2-7 สรุปข้อได้เปรียบข้อจำกัดระหว่างหอดูดูดซึมแบบอากาศยกและหอดูดูดซึมแบบฟองอากาศ

ประเภทของอุปกรณ์สัมผัส เฟสก๊าซ – เฟสของเหลว	ข้อได้เปรียบ	ข้อจำกัด
1. หอดูดูดซึมแบบอากาศยก Airlift reactor (ALR)	<ul style="list-style-type: none"> - ง่ายต่อการออกแบบและการก่อสร้าง - ไม่มีอุปกรณ์เครื่องจักรในการทำให้กระแสของระบบปั่นป่วน - สะดวกต่อการบำรุงรักษา - ใช้พลังงานต่ำในต่อหน่วยปริมาตรของของเหลว - ต้นทุนต่ำ - แรงเฉือนและความเครียดปั่นป่วนต่ำ - สามารถกำหนดรูปแบบการไหลได้ - สามารถควบคุมอัตราการไหลเวียนของของเหลว 	<ul style="list-style-type: none"> - ประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลสารต่ำ
2. หอดูดูดซึมแบบฟองอากาศ Bubble column (BC)	<ul style="list-style-type: none"> - ง่ายต่อการออกแบบและการก่อสร้าง - ไม่มีอุปกรณ์เครื่องจักรในการทำให้กระแสของระบบปั่นป่วน - สะดวกต่อการบำรุงรักษา - ใช้พลังงานเดินระบบต่ำ - ต้นทุนต่ำ 	<ul style="list-style-type: none"> - ประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลสารต่ำ - เกิดแรงเฉือนที่ไม่สม่ำเสมอ

2.7 การเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซึมในงานวิจัยนี้

2.7.1 หัวกระจายก๊าซ Gas sparger

ชนิดตัวกระจายก๊าซเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สามารถเปลี่ยนแปลงลักษณะฟองซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสัดส่วนปริมาตรก๊าซ และพารามิเตอร์อื่น ๆ อีกมากมาย ดังนั้นลักษณะตัวกระจายใช้กำหนด ขนาดฟองในคอลัมน์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพุนขนาดเล็กช่วยให้การก่อตัวของฟองอากาศขนาดเล็ก ชนิดหัวกระจายก๊าซ (Bouaifi et al., 2001) ที่ใช้ในงานวิจัยทั่วไป ได้แก่ แผ่นที่มีรูพุน เมมเบรนชนิดแหวน และแบบแขนกระจายก๊าซ ฟองอากาศที่ขนาดเล็กมากขึ้น ค่าสัดส่วนก๊าซสูงขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความเร็วก๊าซต่ำกว่า 6 ซม./วินาที

2.7.2 การป้อนหรือการผสมในเฟสของเหลว เช่น ตัวกลาง การกำหนดทิศทางการไหล



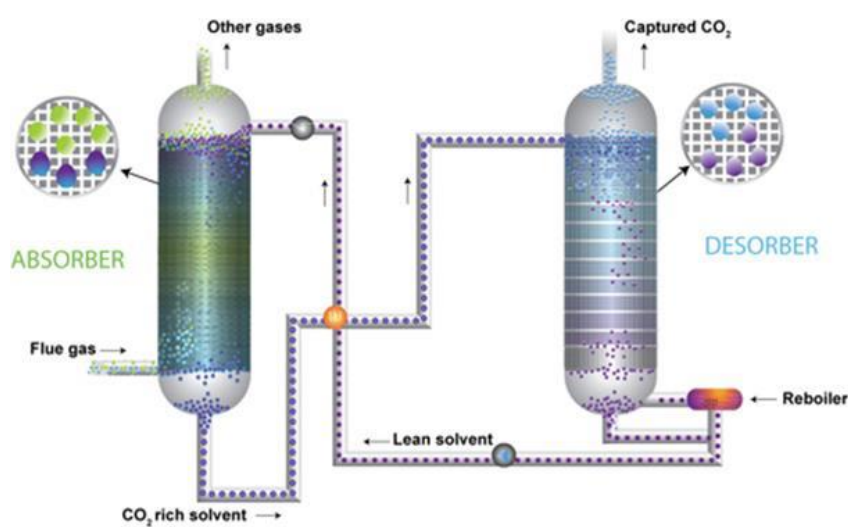
รูปที่ 2.13 ชนิดของตัวกลาง (ที่มา: (Tainyi chemical, 2015))

การเพิ่มตัวกลางผสมในเฟสของเหลว เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสองเฟสมากยิ่งขึ้น ทั่วไปแล้วมักนิยมใช้ตัวกลางที่ทำมาจากวัสดุพลาสติก และโลหะ ซึ่งการเลือกใช้ขึ้นอยู่กับการใช้งาน นอกจากนี้ลักษณะทางกายภาพของตัวกลาง เช่น ความพรุน รูปทรง ความหนาแน่น ขนาด เป็นต้น พบว่ามีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสาร โดยเฉพาะความพรุนและพื้นที่ผิวสัมผัส ดังนั้นจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงจุดนี้ในการเลือกใช้ด้วย การเติมตัวกลางในคอลัมน์แบบฟองอากาศเพื่อเพิ่มการผสมในแนวแกน (Antti et al., 2006) นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มอุปกรณ์ผสมแบบคงที่ในคอลัมน์มีสัดส่วนก๊าซสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอลัมน์ฟองอากาศอย่างเดียว

2.7.3 การดูดซึมทางเคมี (Chemical absorption)

การพิจารณาการเลือกใช้สารละลายนั้น ควรคำนึงถึงคุณสมบัติความสามารถการละลายของก๊าซที่ใช้ และการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟสก๊าซและเฟสของเหลว และคำนึงถึงค่าใช้จ่ายใน

กระบวนการดูดซึมเคมีที่ หากสารละลายที่ใช้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หรือมีการฟื้นฟูสภาพได้ก็ยิ่งช่วยในการลดต้นทุน ในคอลัมน์การดูดซึมปฏิกิริยาของ CO_2 โดยใช้เอมีน (CSIRO) ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในของเหลว และส่งผลให้ความสามารถในการดูดซึมที่ดีขึ้น ดังนั้นเมื่อเทียบ การดูดซึมทางกายภาพ และการดูดซึมเคมี ไม่จำเป็นต้องใช้ สภาวะความดันสูงหรือส่วนประกอบการละลายสูงของการดูดซึม การดูดซึมทางเคมีมีอัตราการควบคุมการผสมความเข้มข้นต่ำ กระบวนการดูดซึมด้วยสารเคมี Absorption by Chemical process มักนิยมใช้สารละลายเอมีน จำพวก Mono Ethanolamine (MEA, $(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH})\text{N}_2\text{H}$), Diethanolamine (DEA, $(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH})_2\text{NH}$) และ Methyl Diglycolamine (DGA) สามารถดูภาพจำลองได้ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 กระบวนการดูดซึมด้วยสารเคมี

ที่มา: (CSIRO)

ตารางที่ 2-8 Henry's constants of some environmentally important gases

Compound	Henry (H) [(L _{soln} * atm)/mol _{gas}]
Nitrogen	1560
Hydrogen	1260
Carbon monoxide	1050
Oxygen	790
Methane	776
Ozone	107
Carbon dioxide	28.8
Tetrachloroethylene	20
trichloroethylene	11
Hydrogen sulfide	9.8
Chloroform	4.0
Sulfur dioxide	0.81
Bromonform	0.70
Benzene	0.22
Hydrogen cyanide	0.040
Ammonia	0.017
Acetic acid	0.0013

ที่มา: (Snoeyink and Jenkins, 2002)

จาก Henry law ในตารางที่ 2.8 สามารถคำนวณความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายน้ำได้ที่ 20 °C ดังต่อไปนี้ กำหนดให้ ก๊าซ CO₂ ถูกบรรจุในถังอุตสาหกรรม บริษัท ลินเด้ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) ซึ่งมีความดันที่ pressure ~ 800 psig = 55.16 bar

$$CO_2(aq) = \frac{P_{CO_2(g)}}{H_{CO_2}}$$

2.19

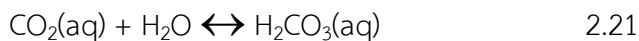
$$= \frac{55.16 \text{ bar}}{28.8 \text{ bar}/\left(\frac{\text{mol}}{\text{L}}\right)} = 1.91 \text{ mol/L}$$

การละลายของ CO₂ ในน้ำ

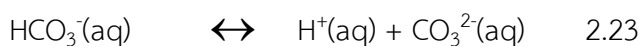
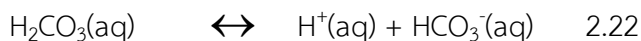
1) การละลายของก๊าซ



2) การสร้างกรดคาร์บอนิก



3) สมดุลกรดคาร์บอนิก



MEA balance:



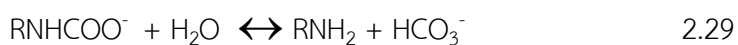
Carbon balance:



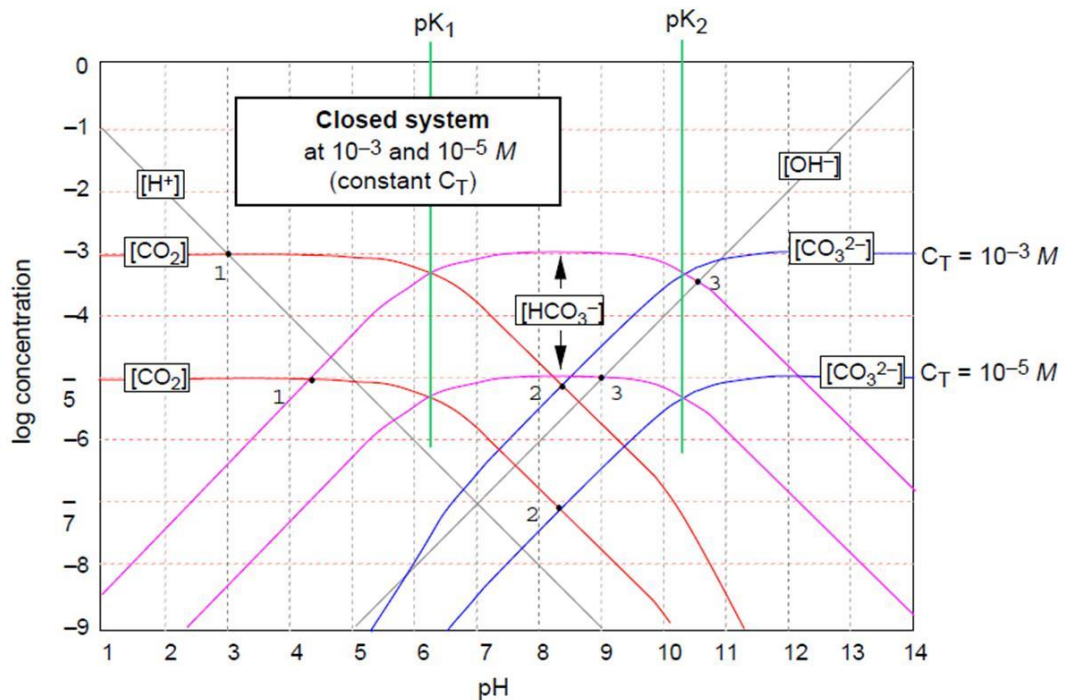
Charge balance:



ปฏิกิริยาของ CO_2 กับสารเอมีน (MEA)



เมื่อ CO_2 ทำปฏิกิริยากับ MEA ทำให้ค่า pH สูงขึ้นและมีลักษณะเป็นต่าง จะเห็นได้ว่าจากรูปภาพที่ 2.15 – 2.16 CO_2 จะละลายน้ำได้ดีที่ของเหลวมีค่าความเป็นต่าง HCO_3^- และหาก pH สูงเกินไปจะได้ CO_3^{2-} จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าจะมีการดูดซึม CO_2 ได้น้อยเมื่อมี CO_3^{2-}



รูปที่ 2.15 Log C-pH diagram for a closed system containing 10^{-3} and 10^{-5} (Snoeyink and Jenkins, 1980)

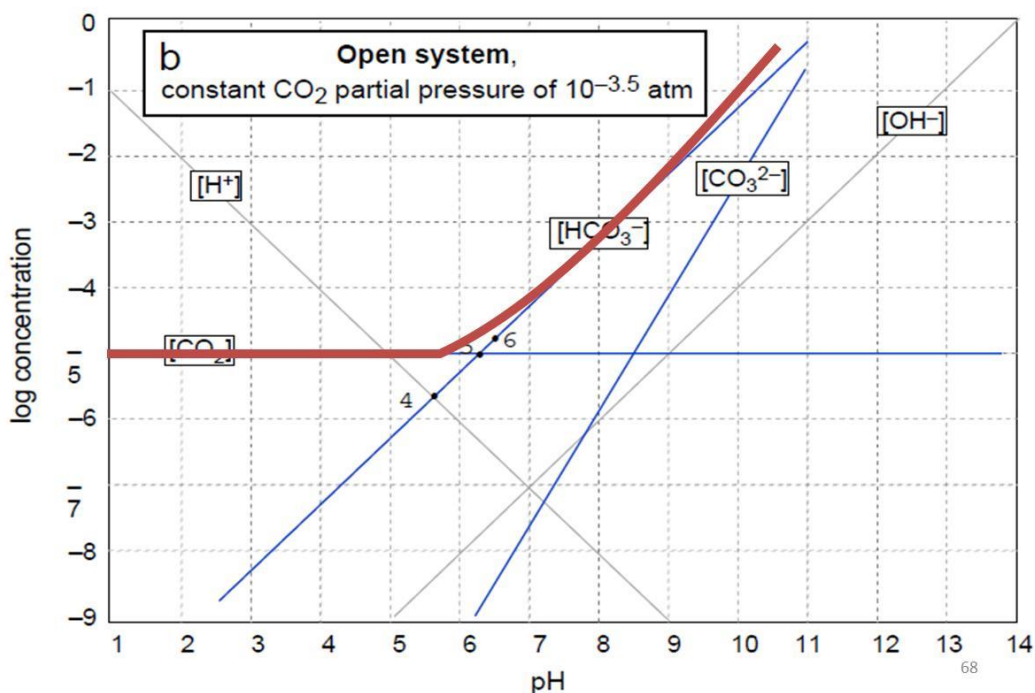
ความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ คือ $3.5 \cdot 10^{-4}$ bar ($10^{-3.46}$ bar) และมีค่า Henry constant คือ $10^{1.48}$ bar-L/mol ดังนั้น คาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายได้ในน้ำ คือ $P_{\text{CO}_2(\text{g})}/H_{\text{CO}_2} = 1.15 \cdot 10^{-5}$ mol/L ($10^{-4.94}$ mol/L) H_2CO_3

$$[\text{HCO}_3^-] = \frac{K_{a1}[\text{H}_2\text{CO}_3]}{[\text{H}^+]} = \frac{(10^{-6.35})(10^{-4.94})}{[\text{H}^+]} = \frac{10^{-11.29}}{[\text{H}^+]} \quad 2.30$$

$$\log[\text{HCO}_3^-] = -11.29 - \log[\text{H}^+] = -11.29 + \text{pH} \quad 2.31$$

$$[\text{CO}_3^{2-}] = \frac{K_{a1}K_{a2}[\text{H}_2\text{CO}_3]}{[\text{H}^+]^2} = \frac{(10^{-6.35} \cdot 10^{-10.33})(10^{-4.94})}{[\text{H}^+]^2} \quad 2.32$$

$$\log[\text{CO}_3^{2-}] = -16.68 - 4.94 - 2\log[\text{H}^+] = -21.62 + 2\text{pH} \quad 2.33$$



รูปที่ 2.16 ค่าระหว่าง pH กับ log ของความเข้มข้น

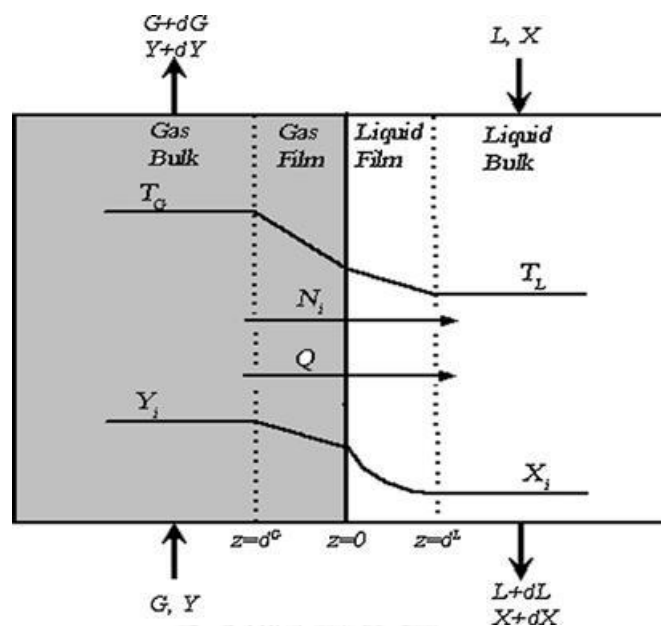
หาค่า pH ที่สมดุล จากการทำสมดุลประจุ จะได้ pH คือ 5.64

$$[H^+] = [OH^-] + [HCO_3^-] + 2[CO_3^{2-}] \quad 2.34$$

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ตัวกลางในหอดูดซึม

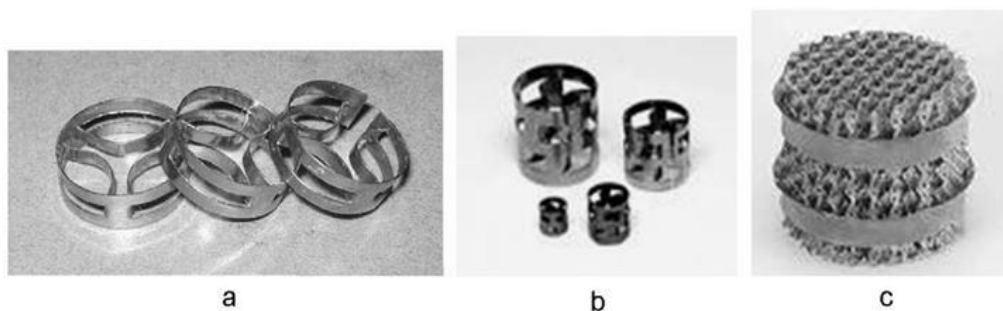
(C.-C. Cormos, 2015) ได้ศึกษาการประเมินการรสร้างแบบจำลองและเทคนิคกระบวนการตรวจจับก๊าซ CO₂ จากปล่องควันของภาคการผลิตกระแสไฟฟ้า (ตรวจจับหลังการเผาไหม้) ด้วยสารละลายของโมโนเอทาโนลามีน (MEA) เพื่อตรวจสอบรูปแบบการดูดซับรวมถึงการทำนายความเสี่ยงเหตุการณ์พลวัตของกระบวนการดูดซึม CO₂ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รวมถึงสมการเชิงอนุพันธ์ เช่น มวลและรูปแบบการถ่ายเทความร้อนเพื่อศึกษาผลกระทบทั้งสองของอุณหภูมิและความเข้มข้นที่อัตราการดูดซึมจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาของสมดุลไอและของเหลว (VLE) ในด้านอุทกพลศาสตร์อื่นๆ พบว่า ประสิทธิภาพพื้นที่ผิวสัมผัสที่ความดันและสัดส่วนของเหลวลดลง คอลัมน์ที่สภาพการดำเนินงานสูงมีผลต่อความถูกต้องแม่นยำของรูปแบบการดูดซับและการถ่ายเทมวล รูปแบบกลศาสตร์ของไหลสามารถนำไปใช้ในการศึกษาการทำงานของคอลัมน์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของกลไกไดนามิกได้ ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การถ่ายเทมวลของกระบวนการดูดซึม (C.-C. Cormos, 2015)

ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าพื้นที่การถ่ายเทมวลมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทมวล อัตราการถ่ายเทในคอลัมน์บรรจุ ความดันลดมีความสัมพันธ์ค่อนข้างน้อย การตรวจจับการเผาไหม้ใน กระบวนการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย monoethanolamine เห็นได้ว่าพื้นที่การถ่ายเท มวลโดยทั่วไปมีแนวโน้มให้ประสิทธิภาพสูง จากการวิเคราะห์ค่าความเป็ยเบนของอัตราการถ่ายเท มวล สรุปได้ว่ารูปแบบการถ่ายเทมวลระบบ CO_2 -MEA ที่ดีกับความดันบรรยากาศ

(Zhao et al., 2011) ได้ศึกษาชนิดตัวกลาง ในการดูดซึมสารเคมี CO_2 ในคอลัมน์แบบแพค ได้อ้างอิงถึงการใส่สารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตในอดีตพบว่ามีประสิทธิภาพการดูดซึม CO_2 ต่ำ จึงมองหาตัวเลือกนอกเหนือจากสารละลาย และตัวเลือกการปรับปรุงประสิทธิภาพการถ่ายเทมวล ของอุปกรณ์อื่น การศึกษาครั้งนี้มีเป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพของคอลัมน์แบบแพคโดยเปลี่ยนตัว กลาง 3 รูปแบบที่แตกต่างกัน คือ Super Mini Rings (SMRs) Pall Rings และ Mellapak ดังรูปที่ 2.18 ได้รับการศึกษาความดันบรรยากาศในคอลัมน์ระดับห้องปฏิบัติการ สำหรับการดูดซึม CO_2 30% โดยน้ำหนัก กับสารละลาย K_2CO_3 พบว่าตัวกลาง SMR ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล ที่ 20% และ 30% สูงกว่าตัวกลาง Mellapak และ Pall Rings ตามลำดับ ดังนั้นชั้นความสูงในคอลัมน์ ที่บรรจุไปด้วย SMR จะต่ำกว่าที่มี Mellapak และ Pall Rings ในขณะที่การใช้ SMR มีความดันลด โดดเดี่ยวกับตัวกลางชนิดอื่นๆ ที่ความเร็วน้ำท่วมก๊าซสูงเมื่อภาระของเหลวอยู่เหนือ 25 กิโลกรัมต่อ ตารางเมตรต่อวินาที ผลการวิจัยเปรียบเทียบได้ดังนี้



รูปที่ 2.18 แสดงชนิดของตัวกลาง (a) 13mm SMR; (b) 13mm Pall Ring; and (c) Mellapak 700Y

1. ความเร็วน้ำล้น Flooding velocity: ความเร็วของเหลวหรือก๊าซเพิ่มขึ้นสัดส่วนปริมาตรเหลวในการเพิ่มพื้นที่ตัวกลาง การไหลของก๊าซลดลงและความดันลดยที่เพิ่มขึ้นผ่านคอลัมน์ เมื่อฟองอากาศผ่านของเหลวที่ความดันลดลงอย่างรวดเร็ว ของเหลวถูกยกขึ้นไปด้านบนของคอลัมน์ผ่านก๊าซ จุดนี้เรียกว่า "จุดท่วม" และขึ้นอยู่กับอัตราทั้งสองเฟสก๊าซและของเหลว ความรู้เกี่ยวกับความเร็วของน้ำล้นจะมีประโยชน์อย่างมากในตอนแรกที่ย่ำแย่ก๊าซ ผลการทดลองความเร็วน้ำล้นของก๊าซ ที่ ϕ 13 มม SMR ประมาณ 10% สูงกว่าตัวกลางอื่นๆ เห็นได้ว่าการบรรจุ SMR เป็นประโยชน์ สูงสำหรับการตรวจจับ CO_2

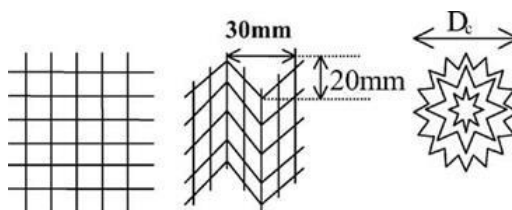
2. สัดส่วนของเหลว Liquid holdup: ซึ่งมีอิทธิพลโดยตรงต่อการถ่ายเทมวลของเฟสของเหลว พบว่า SMR ϕ 13 มม และ Mellapak 700Y มีสัดส่วนปริมาตรของเหลวที่สูงกว่า Pall Ring

3. ความดันลด Pressure drop: พบว่าทั้งสามตัวกลางมีความดันลดลงเมื่อเทียบกับภายใต้เงื่อนไขที่การศึกษา เมื่อใช้ความสัมพันธ์งานวิจัยของ (Billet and Schultes, 1999) ตัวกลาง 13 mm Pall Ring เหมาะสมในการนำไปใช้งาน

4. ประสิทธิภาพการถ่ายเทมวล Mass transfer performance: จากงานวิจัยพบว่า 13mm SMR ที่ 30% และ 20% มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมที่สูงขึ้นมากกว่า 13mm Pall Ring และ Mellapak 700Y ตามลำดับ ที่ SMR มีศักยภาพที่มีแนวโน้มในการดูดซับ CO_2 เนื่องจากลักษณะพิเศษของรูปทรงเรขาคณิต

(B. Bhatia et al., 2004) ศึกษาผลกระทบของความพรุนของตัวกลางบนอุทกพลศาสตร์และการถ่ายเทมวลในคอลัมน์แบบฟองอากาศ โดยจะศึกษาตัวกลางวัสดุสแตนเลสตารางมีขนาดตาข่าย 12.5 มิลลิเมตร ในคอลัมน์แบบฟองอากาศเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตร และความสูง 4.5

เมตร การดำเนินงานด้วย อากาศ – น้ำ และ อากาศ – สารละลายเอทานอล (ปริมาณ 0.5%) ผลของ อุทกพลศาสตร์ และการถ่ายเทมวลของของเหลวและก๊าซ ในการบรรจุสแตนเลสใน เฟสก๊าซและเฟส ของเหลว ได้ศึกษาในคอลัมน์แบบฟองอากาศกับระบบ น้ำ – อากาศ ส่วนระบบอากาศ – สารละลาย เอทานอล เคยถูกนำมาใช้แทนระบบน้ำ – อากาศ เพื่อจำลองพฤติกรรมของผสมอินทรีย์ใน อุตสาหกรรม



รูปที่ 2.19 ลักษณะความพ่วนของตัวกลาง

งานทดลองที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคหลายการวัดได้รับการดำเนินการเพื่อให้ได้คำอธิบายส่วนติ ของพารามิเตอร์อุทกพลศาสตร์และลักษณะการถ่ายเทมวลภายใต้เงื่อนไขที่การดำเนินงานต่างๆ ใน การทดลองพบว่า ทั้งสองแบบ อากาศ – น้ำ และ อากาศ – สารละลายเอทานอล เมื่อเพิ่มตัวกลางมี ผลกระทบอย่างมากต่ออุทกพลศาสตร์และการถ่ายเทมวลสารเมื่อเปรียบเทียบกับแบบไม่มีตัวกลาง ความเร็วก๊าซโดยเฉลี่ยค่าคงที่เหนือ $U_G = 4$ เซนติเมตร / วินาที แตกต่างจากระบบมีตัวกลางใน ทิศทางตรงกันข้ามกับระบบที่เป็นเนื้อเดียวกันบรรจุตัวกลางภายใต้สภาวะเดียวกัน ในที่สุดการศึกษา นี้แสดงให้เห็นว่า การเดินระบบที่ความเร็วของก๊าซที่แตกต่างกัน ที่สังเกตได้คือการเพิ่มขึ้นของสัดส่วน ก๊าซ ขนาดฟองอากาศและความเร็วลดลง เมื่อใช้แอลกอฮอล์มีแนวโน้มการกระจายขนาดฟองแคบ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสูงขึ้นเมื่อแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้น การใส่ตัวกลางทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ การถ่ายเทมวลด้านของเหลวมีความเร็วก๊าซสูงสม่ำเสมอ นอกจากนี้การใช้ตัวกลางพร้อมกับ สารละลายแอลกอฮอล์จะช่วยเพิ่มทั้งอุทกพลศาสตร์และลักษณะการถ่ายเทมวล ทั้งนี้ขนาดฟองเล็กๆ และสามารถกระจายขนาดของฟองแคบ ๆ ทำให้ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสมาก และด้วยเหตุนี้ก็เป็นลักษณะที่ดี ต่อการถ่ายเทมวลกับของเหลวที่ผสมยาก

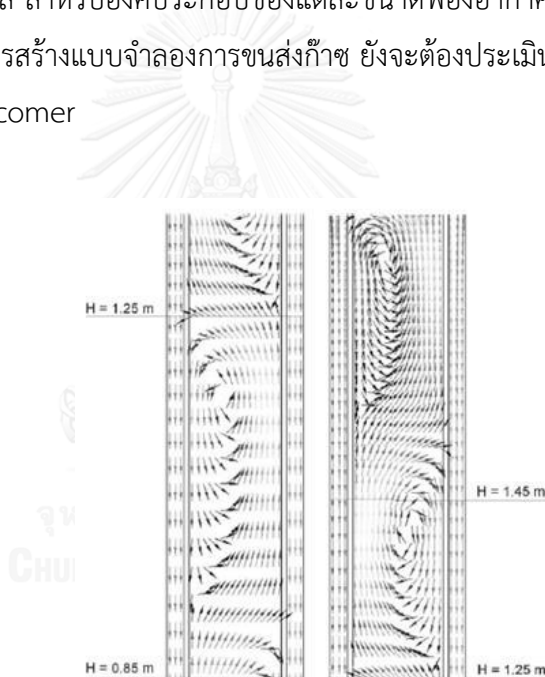
2.8.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยหูดูดซึม

(A.-M. Cormos and Gaspar, 2012) ได้ศึกษาลักษณะการถ่ายเทมวลในคอลัมน์แบบ ฟองอากาศระหว่างเฟสก๊าซ - ของเหลว - ของแข็ง ภายใต้อุณหภูมิต่ำและความดันสูง สัดส่วนปริมาตร ของก๊าซและพื้นที่ผิวสัมผัสที่ได้รับผลกระทบของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล อุณหภูมิ ความดัน ความเร็วที่ผิวของก๊าซ และความเข้มข้นของของแข็ง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลก๊าซ - ของเหลว $k_L a$ และพื้นที่ผิวสัมผัสที่เพิ่มขึ้นด้วยความดันที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ อุณหภูมิ ความเร็วของก๊าซ และความเข้มข้นสารละลายที่ลดลง สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล k_L สูงขึ้นด้วยการเพิ่มความเร็วของก๊าซและอุณหภูมิ ส่วนความเข้มข้นผสมของสารละลายลดลง ในขณะที่ความดันมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ตามการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองความสัมพันธ์เชิง ทดลองจะได้รับการคำนวณค่าของ $k_L a$ สำหรับ H_2 , CO , และ CO_2 ในระบบก๊าซในคอลัมน์แบบ ฟองอากาศภายใต้อุณหภูมิต่ำและความดันสูง และลักษณะการถ่ายเทมวลสารของคอลัมน์แบบ ฟองอากาศส่วนใหญ่จะเป็นการควบคุมโดยพฤติกรรมฟองอากาศเล็กๆซึ่งใช้สมการคำนวณดังนี้

ตารางที่ 2-9 การหาความสัมพันธ์ขนาดฟองอากาศจากความเร็วที่เพิ่มขึ้น

งานวิจัย	สมการ	ช่วงการประยุกต์
Mendelson และคณะ 1967	$V_T = \sqrt{\frac{2\sigma}{d_B \rho_L} + \frac{gd_B}{2}}$	$782 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3} < \rho < 1480 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ $0.02 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1} < \sigma < 0.72 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ $0.00052 \text{ Pa}\cdot\text{s} < \mu < 18 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
Jamialahmadi และคณะ 1994	$V_{sp} = \frac{\Delta\rho g d_B^2}{18\mu} \left(\frac{3\mu_L + 3\mu_G}{2\mu_L + 3\mu_G} \right)$ $V_w = \sqrt{\frac{2\sigma}{d_B(\rho_L + \rho_G)} + \frac{gd_B}{2}}$ $V_T = \frac{V_{sp} V_w}{\sqrt{V_{sp}^2 + V_w^2}}$	$626 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3} < \rho < 1071 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ $0.016 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1} < \sigma < 0.72 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ $0.00022 \text{ Pa}\cdot\text{s} < \mu < 0.031 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
Lehrer และคณะ 1967	$V_T = \sqrt{\frac{3\sigma}{d_B \rho_L} + \frac{d_B g \Delta\rho}{2\rho_L}}$	$0.02 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1} < \sigma < 0.72 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ $0.00052 \text{ Pa}\cdot\text{s} < \mu < 18 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ $3425 < Re < 7490$
Talaia และคณะ 2007	$V_T = 0.694 \left(\frac{gd_B \Delta\rho}{\rho_L} \right)^{0.5}$	$25.5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1} < V_T < 32.9 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$

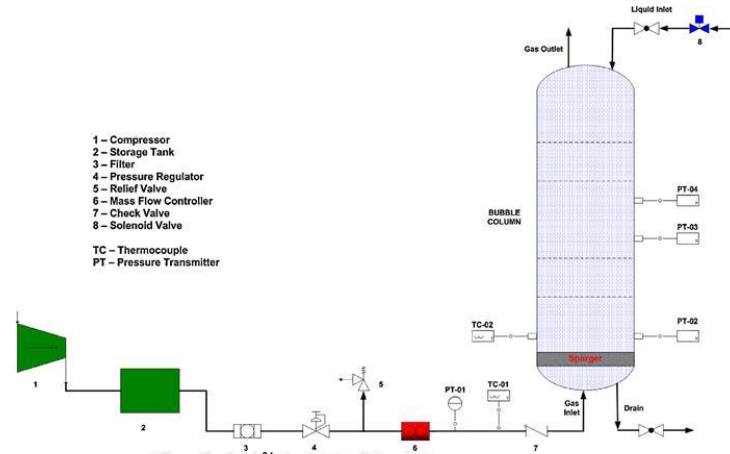
(Blažej et al., 2004) ได้ศึกษาการจำลองเฟสก๊าซและเฟสของเหลวในคอลัมน์แบบอากาศยก (ปริมาตร 32 ลิตร) ข้อมูลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองที่ได้จากการติดตามลักษณะอนุภาคสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 2.20 และการวิเคราะห์ของความดันลดเพื่อตรวจสอบสัดส่วนก๊าซ เปรียบเทียบระหว่างความเร็วในแนวตั้งและสัดส่วนก๊าซ สำหรับชุดการทดลองที่ความเร็วของผิวก๊าซในด้านการยกระดับของฟองอากาศไรเซอร์ (Riser) มีการปรับความเร็วระหว่าง 0.01 และ 0.075 เมตรต่อวินาที ผลมีแนวโน้มด้านไรเซอร์ที่เหมาะสม และค่าอยู่ในรูปแบบที่ดีถูกต้อง แต่การไหลในส่วน Downcomer ที่ไหลลง มีลักษณะที่ไม่ดี อาจมีผลกระทบเนื่องจากการขนาดความละเอียดของฟอง ปริมาณสมการและความละเอียดตาข่ายที่ใช้ ดังนั้นเพื่อให้แม่นยำแบบจำลองการเคลื่อนไหวของเฟสก๊าซและของเหลว ขั้นตอนการไหลวนของก๊าซในคอลัมน์ควรแยกรูปแบบที่ซับซ้อนหลายเฟส สำหรับองค์ประกอบของแต่ละขนาดฟองอากาศ การตรวจสอบในสมการต่อไป ปริมาณการใช้ในการสร้างแบบจำลองการขนส่งก๊าซ ยังจะต้องประเมินสมการดักจับฟองอากาศในด้านการไหลลง Downcomer



รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของฟองอากาศที่ต่างระยะความสูง (Blažej et al., 2004)

(Sinan et al., 2013) ได้ศึกษาผลของรูปทรงหัวกระจายอากาศที่มีผลต่อสัดส่วนก๊าซและการเปลี่ยนแปลงในคอลัมน์แบบฟองอากาศด้วยอุปกรณ์หัวกระจายอากาศแผ่นพรุน การทดลองนี้ได้ดำเนินการภายใต้ความดันบรรยากาศที่มีน้ำ/อากาศในคอลัมน์เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 33 เซนติเมตร และความสูง 3 เมตร หัวกระจายก๊าซแตกต่างกันสามชนิดเป็นแผ่นพรุน เส้นผ่านศูนย์กลางรูแตกต่างกันในช่วงของ 1-3 มม. ในขณะที่พื้นไม่มีรูพรุนคิดเป็น 1.0% เปรียบเทียบข้อมูลจากงานวิจัยได้รับการวิเคราะห์ที่ผ่านมา ค่าทดลองสัดส่วนก๊าซมีการเปลี่ยนแปลง และคาดการณ์โดยทฤษฎีของ

เสถียรภาพเชิงเส้นที่ได้รับการเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา ผลกระทบของรูปทรงตัวกระจายก๊าซ ทำให้สัดส่วนของก๊าซเปลี่ยนแปลงในคอลัมน์แบบฟองอากาศ สามารถตรวจสอบการทดลองและ ทฤษฎีของเสถียรภาพเชิงเส้นที่ใช้ในการคาดการณ์ค่าสัดส่วนก๊าซ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้ ดังรูปที่ 2.21 และตารางที่ 2.10 ประกอบ



รูปที่ 2.21 แสดงจำลองการติดตั้งระบบของงานวิจัย (Sinan et al., 2013)

ตารางที่ 2-10 รายละเอียดการออกแบบของหัวกระจายก๊าซแผ่นพรุน (Sinan et al., 2013)

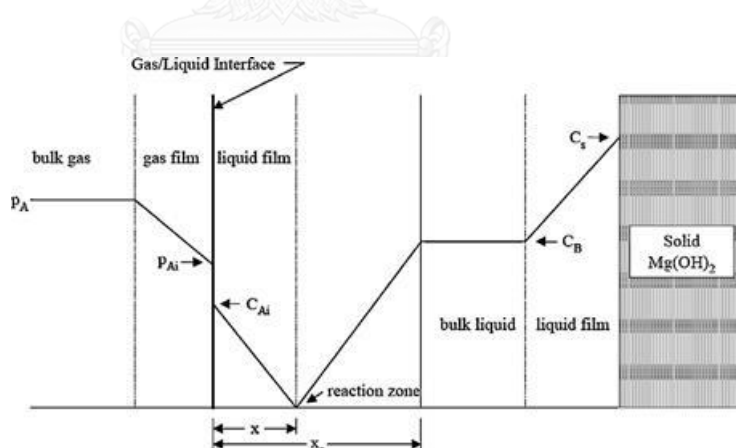
ชนิดหัวกระจายก๊าซ แผ่นพรุน	Do (mm)	N	F.A. %	Pitch	t (mm)
P1	1	817	0.98	เป็นรูปสามเหลี่ยม	6
P2	2	217	1.08	เป็นรูปสามเหลี่ยม	6
P3	3	91	1.10	เป็นรูปสามเหลี่ยม	6

1. การเพิ่มขึ้นของเส้นผ่านศูนย์กลางรูของแผ่นพรุนมีสัดส่วนของก๊าซรวมลดลงเช่นเดียวกัน
2. ความเร็วก๊าซลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูหัวกระจายอากาศ
เพิ่ม
3. เปรียบเทียบกับงานวิจัยระหว่างการสังเกตการทดลองและการคาดการณ์โดยทฤษฎีของ
เสถียรภาพเชิงเส้น ค่าการทดลองสัดส่วนของก๊าซสูงขึ้น

4. ความสัมพันธ์ของปริมาณส่วนของก๊าซ มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่ $\pm 10\%$ สามารถเทียบกับงานวิจัยของ (Kazakis et.al.,1987) และพบว่าอยู่ในช่วงที่เชื่อถือได้ คือ ความคลาดเคลื่อน ($\pm 20\%$)

2.8.3 งานวิจัยเกี่ยวกับการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย

(Cheng et al., 2013) ได้ศึกษารูปแบบการถ่ายเทมวลสารของการดูดซึมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในคอลัมน์ฟองอากาศโดยใช้แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์สารละลาย การศึกษาพบว่าประสบความสำเร็จในการกำจัด CO_2 มีประสิทธิภาพสูง แบบจำลองการดูดซึมได้รับการพัฒนาสำหรับการวิเคราะห์ระบบและการกำจัด CO_2 การวิเคราะห์ข้อมูลโดยรวมค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ และ $\text{CO}_2\text{-Mg}(\text{OH})_2$ ระบบ H_2O ได้คำนวณขึ้นในคุณสมบัติทางระบบเคมี ผลกระทบของอุณหภูมิ และการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่สมดุล การศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าคอลัมน์แบบฟองอากาศที่มีประสิทธิภาพในการกำจัด CO_2 ต่ำในช่วงแรกจากก๊าซ CO_2 ที่มีความดันภายใต้ อุณหภูมิที่ทางออกบางส่วนโดยใช้ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ FGD ประสิทธิภาพในการกำจัด CO_2 ขึ้นอยู่กับพฤติกรรมการไหลภายในคอลัมน์ และความเข้มข้นของสารละลาย $\text{Mg}(\text{OH})_2$ การกำจัด CO_2 มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่อยู่อาศัยฟองอากาศเพิ่มขึ้นและมีการเพิ่มแมกนีเซียม ปริมาณ 0.1 โมล/ลิตร $\text{Mg}(\text{OH})_2$ สามารถกำจัด CO_2 ได้ระดับสูง ภาพประกอบการทดลองดังรูปที่ 2.22

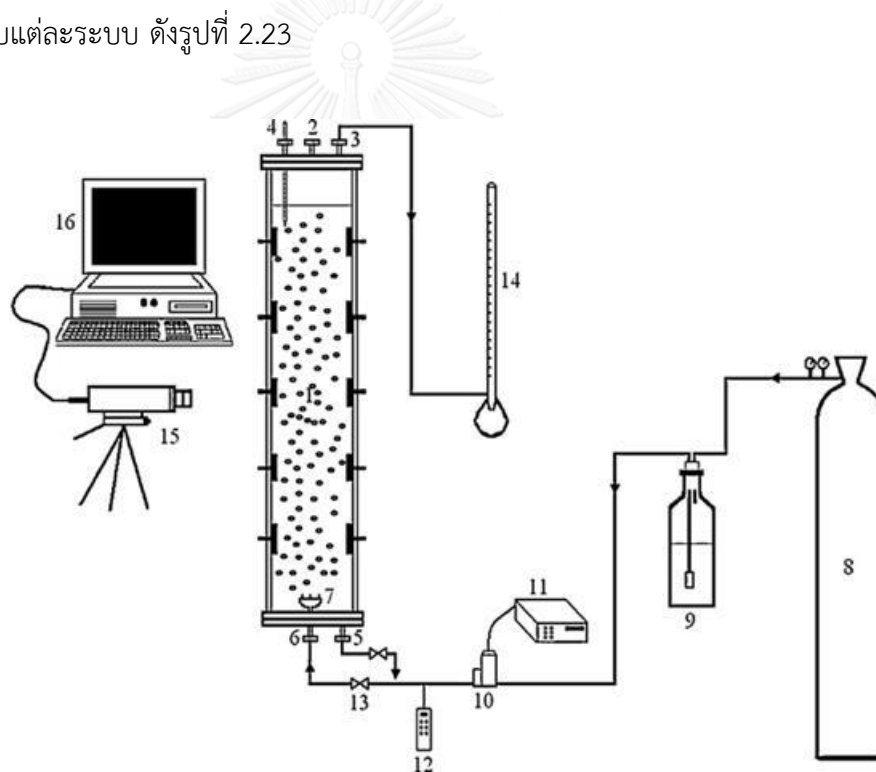


รูปที่ 2.22 แสดงปฏิกิริยาแผนผังของระบบสารละลาย $\text{CO}_2\text{-Mg}(\text{OH})_2$

คอลัมน์แบบฟองอากาศมีพื้นฐานการใช้งาน การผสมของเหลวเป็นอย่างดี และภายใต้การไหลราบเรียบ การไหลแบบ plug flow ได้รับการพัฒนาในการกำจัด CO_2 รูปแบบการติดตั้งการดูดซึมทางกายภาพระหว่าง CO_2 และสารละลาย $\text{Mg}(\text{OH})_2$ อนุภาคจะกระจายในเฟสก๊าซและของเหลวเป็นขั้นตอนของปฏิกิริยาเคมี ทฤษฎีเนื้อเยื่อฟิล์มเคยถูกนำมาใช้ในการแพร่ พบที่ความหนาของฟิล์ม

0.024 เซนติเมตร ซึ่งจะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของอัตราการถ่ายเทรวมเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

(Maceiras and Cancela, 2011) ได้ทำการศึกษาการวัดพื้นที่ผิวสัมผัสในการตรวจจับ CO₂ ด้วยสาร alkanolamines ในงานนี้เทคนิคประมวลผลถูกนำมาใช้ในการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางฟองอากาศและพื้นที่ผิวสัมผัสก๊าซเหลวในสามส่วนของคอลัมน์ฟอง วิวัฒนาการของพารามิเตอร์เหล่านี้ ในคอลัมน์ได้รับการตรวจสอบ ระบบ CO₂-alkanolamine (MEA และ MDEA) ได้รับการศึกษาที่ระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกันเอมีน (0-1 โมล) และอัตราการไหลของก๊าซ (10-25 ลิตร/ชั่วโมง) ข้อมูลใหม่ในก๊าซถือขึ้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ผิวสัมผัสจะถูกวัดการทดลองแสดงให้เห็นว่ามีความเข้มข้นเอมีนและอัตราการไหลของก๊าซมีอิทธิพลอย่างมากต่อพื้นที่ผิวสัมผัส นอกจากนี้ยังได้เสนอสมการเชิงประจักษ์ที่เกี่ยวข้องกับพื้นที่ผิวสัมผัสกับช่วงเวลาและความสูงในคอลัมน์สำหรับแต่ละระบบ ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 แสดงการตั้งค่าการทดลอง

- (1) คอลัมน์แบบฟองอากาศ (2) ทางเข้าของเหลว (3) ทางออกก๊าซ (4) เครื่องวัดอุณหภูมิ (5) ทางออกของเหลว (6) ทางเข้าก๊าซ (7) หัวกระจายอากาศ, (8) ถังก๊าซ (9) ความชื้น (10) มาตรวัดอัตราการไหล (11) เครื่องควบคุมอัตราการไหล (12) มาโนมิเตอร์แบบดิจิตอล (13) วาล์วก๊าซ (14) เครื่องวัดสบู (15) กล้องวิดีโอ และ (16) เครื่องคอมพิวเตอร์

เส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยและค่าพื้นที่ผิวสัมผัสที่ได้รับสารละลายเอมีน ครอบคลุมช่วงของความเข้มข้นและอัตราการไหลของก๊าซที่ค่าความสูงของคอลัมน์ฟองที่แตกต่างกัน ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ผิวสัมผัสในคอลัมน์ฟองได้รับอิทธิพลจากความเข้มข้นของเอมีน และอัตราการไหลของก๊าซได้รับผลกระทบโดยความสูงของคอลัมน์ เส้นผ่านศูนย์กลางฟองอากาศจะลดลงเมื่อฟองอากาศขึ้นไปพร้อมคอลัมน์แบบฟองอากาศ นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพบ่งบอกถึงความต้านทานสูงขึ้นที่การถ่ายเทมวลพร้อมอินเตอร์เฟสระหว่างเฟสก๊าซและของเหลว ดังนั้นจึงมีพื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มเป็นผลมาจากการลดลงของขนาดฟอง ดังนั้นจึงมีผลตรงข้ามกับอิทธิพลต่อบนพื้นที่ผิวสัมผัสและสัดส่วนก๊าซ สุดท้ายพื้นที่ผิวสัมผัสแตกต่างกันไปตามระยะในโซนกลางและโซนสูงมีค่ามากกว่าด้านล่างของคอลัมน์ ในระหว่างขั้นตอนการดูดซึมขนาดฟองเล็กกว่าในช่วงเริ่มต้น และสูงกว่าในช่วงท้ายกระบวนการซึ่งมีผลกระทบต่อพื้นที่ผิวสัมผัส

(Kothandaraman, 2010) ได้ศึกษาการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายและเปรียบเทียบปัจจัยด้านต่างๆของสารละลาย 3 ชนิด ได้แก่ โมโนเอทานอลามีน (MEA) แอมโมเนียเย็น (Chilled ammonia) และโพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) และได้ผลเปรียบเทียบดังตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2-7 แสดงการเปรียบเทียบระบบดูดซึมในงานวิจัย

เกณฑ์เปรียบเทียบ	โมโนเอทานอลามีน	แอมโมเนียเย็น	โพแทสเซียมคาร์บอเนต
กำลังที่ใช้ในการดูดซึม CO_2 ได้ 85%	0.0157 kWh/gmol	0.0209 kWh/gmol	0.0095 kWh/gmol
ความดัน ณ สภาวะการทำงาน	Abs: 1 atm Des: 1.7 atm	Abs: 1 atm Des: 30 atm	Abs: 15 atm Des: 1 atm
อุณหภูมิ ณ สภาวะการทำงาน	Abs: 40-60 °C Des: 115 °C	Abs: 3-10 °C Des: 130-150 °C	Abs: 90-95 °C Des: 105-110 °C
ขนาดของอุปกรณ์	หอดูดซึมมีขนาดใหญ่กว่าหอฟื้นฟูสภาพ	หอดูดซึมมีขนาดใหญ่กว่าหอดูดซึมที่ใช้ MEA	หอดูดซึมมีขนาดเท่ากับหอดูดซึมที่ใช้ MEA แต่หอฟื้นฟูสภาพมีขนาดใหญ่กว่า
การเสื่อมสภาพ และการระเหยของสารละลาย	เสื่อมสภาพที่อุณหภูมิต่ำ และระเหยได้	ระเหยได้	ไม่ระเหย ไม่เสื่อมสภาพ

หมายเหตุ: Abs = หอดูดซึม, Des = หอฟื้นฟูสภาพ

(ปกรณ ฤณอมพงษ์ชาติ, 2552) ได้ทำการศึกษาการแยกคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพ โดยการดูดซับด้วยของเหลวในคอลัมน์อัดตัว โดยใช้สารละลายทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ โมโนเอทาโนลามีน (MEA) ปูนขาว และ NaOH ที่ปริมาตรของเหลวในคอลัมน์ 3.59 ลิตร และได้ผลเปรียบเทียบดังตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2-8 แสดงการเปรียบเทียบสารละลายของระบบดูดซับงานวิจัย ปกรณ ฤณอมพงษ์ชาติ

เกณฑ์เปรียบเทียบ	โมโนเอทาโนลามีน MEA	ปูนขาว	โซเดียมไฮดรอกไซด์ NaOH
ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์	บำบัด CO ₂ เฉลี่ย 90%	บำบัด CO ₂ เฉลี่ย 78%	บำบัด CO ₂ เฉลี่ย 89%
ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์	บำบัด CO ₂ เฉลี่ย 98.5%	บำบัด CO ₂ เฉลี่ย 79%	บำบัด CO ₂ เฉลี่ย 97%
ความเข้มข้น 0.3 โมลาร์	บำบัด CO ₂ เฉลี่ย 99%	บำบัด CO ₂ เฉลี่ย 81%	บำบัด CO ₂ เฉลี่ย 98%
ปริมาณสารละลายที่เติมในคอลัมน์จนสิ้นสุด อัตราการไหล 2 l/m เวลา 18 min	1 -11% โดยปริมาตร	1 -11% โดยปริมาตร	1 -11% โดยปริมาตร
การเวียนกลับมาใช้ซ้ำ	ให้ความร้อนที่ 100 °C	การเติมและนำออก	การเติมและนำออก
ข้อจำกัดของการเวียนกลับมาใช้ซ้ำ	สิ้นเปลืองพลังงาน	ไม่เกิน 10 นาที ไม่สามารถดูดซับ CO ₂ ได้อีก และทำปฏิกิริยากับ CO ₂ เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตเกาะผิววัสดุในระบบ อุดตันได้	ไม่เกิน 10 นาที ไม่สามารถดูดซับ CO ₂ ได้อีก และทำปฏิกิริยากับ CO ₂ เป็น CaCO ₃

งานวิจัยนี้ได้ข้อสรุปคือไม่แนะนำให้นำสารละลายเวียนกลับมาใช้ซ้ำ เนื่องจากอาจจะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับ CO₂ ลดลงและไม่คุ้มทุนด้านเศรษฐศาสตร์

2.9 สิ่งที่น่าสนใจในงานวิจัย

จากข้อมูลข้างต้นที่ได้กล่าวมา ได้มีนำเสนอวิธีการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยวิธีการต่างๆ โดยการใช้การพิจารณาการนำไปปฏิบัติใช้งานได้จริงเป็นหลักและมองในมุมด้านเศรษฐศาสตร์ พื้นที่ การบำรุงรักษา ฯลฯ งานวิจัยนี้จึงสนใจการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยคอลัมน์ดูดซับแบบพองอากาศและคอลัมน์ดูดซับแบบอากาศยก โดยคอลัมน์ดูดซับทั้งสองแบบนั้น มีคุณสมบัติเด่นในแต่ละด้าน ซึ่งเรานำข้อดีมาทดลองร่วมกันเพื่อเป็นทางเลือกใหม่ โดยอ้างอิงข้อมูลงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการเลือกใช้วัสดุอุปกรณ์เพื่อได้ผลการดูดซับที่ดียิ่งขึ้น ผู้วิจัยจึงเห็นควรว่าจะทดลองการใช้หลักการ

คัดเลือกหัวกระจายอากาศแต่ละชนิด ที่ได้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด เพื่อให้ประสิทธิภาพการจัดที่ดียิ่งขึ้น จะมองถึงด้านการเพิ่มตัวกลางลงไปในห้องดูดซึม และนำมาทดลองร่วมกับสารละลาย เพื่อให้ได้ ประสิทธิภาพในการบำบัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสม จากนั้นนำอัตราส่วนผลที่ได้จากการทดลอง ดังกล่าวไปเดินระบบต่อไป และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซึมทั้งสองคอลัมน์ เพื่อศึกษาอิทธิพล ด้านกายภาพและเคมีที่มีผลต่อการถ่ายเทมวลสาร เพื่อจะนำไปปรับปรุงการบำบัด คาร์บอนไดออกไซด์ในอนาคตต่อไป

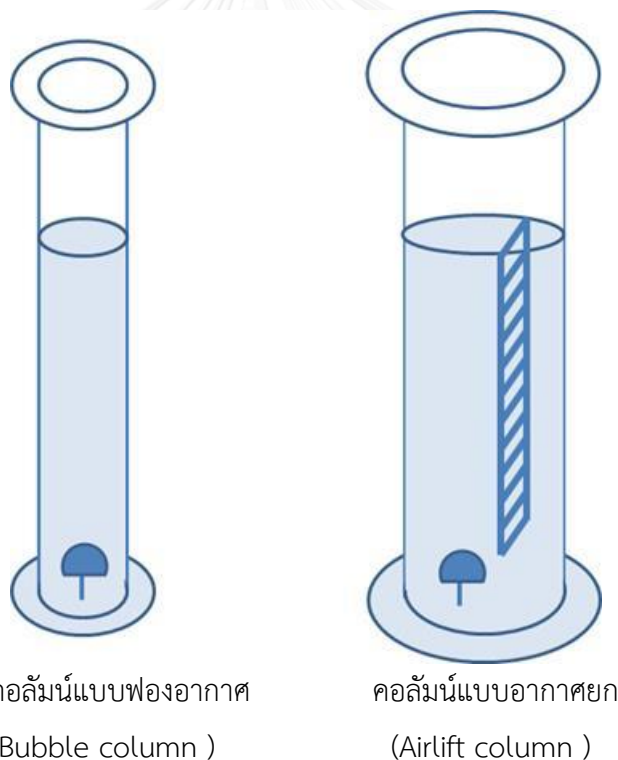


บทที่ 3

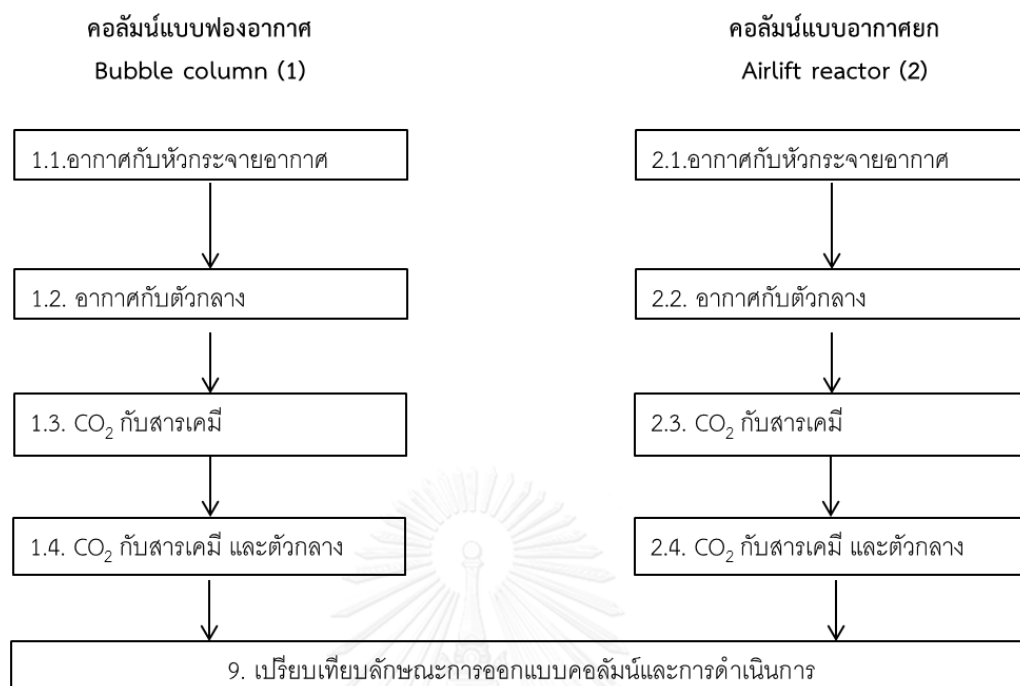
แผนการทดลองและดำเนินการวิจัย

3.1 ภาพรวมของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการวิจัยโดยใช้คอลัมน์ 2 รูปแบบ ได้แก่ คอลัมน์แบบฟองอากาศ (bubble column) และคอลัมน์แบบอากาศยก (Airlift column reactor) ดังในรูปภาพที่ 3.1 ซึ่งจะศึกษาอิทธิพลทางด้านกายภาพและเคมี ที่มีผลต่อกระบวนการดูดซึม ในที่นี้สนใจศึกษา ลักษณะของหัวกระจายอากาศ ขนาดฟองอากาศ รูปทรงของตัวกลาง ปริมาณตัวกลาง การปรับเปลี่ยนเฟสของเหลวด้วยสารละลาย เพื่อนำไปดูการปรับปรุงประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารในการบำบัดคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไป ดังที่กล่าวมานั้น งานวิจัยนี้จึงแบ่งเป็นช่วงการทดลองย่อยออกเป็น 9 ช่วงการทดลอง ดังแผนผังการไหลรูปภาพที่ 3.2 ซึ่งจะชี้แจงต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 รูปแบบคอลัมน์จำลองในการทดลองทั้งสองคอลัมน์



รูปที่ 3.2 แสดงแผนผังการไหลภาพรวมการทดลองทั้งหมด

ช่วงที่ 1.1 ทำการศึกษาอิทธิพลทางกายภาพของขนาดฟองอากาศ ด้วยหัวกระจายอากาศที่มีผลกระทบต่ออัตราการถ่ายเทมวลสารในคอลัมน์แบบฟองอากาศ อุทกพลศาสตร์ และประสิทธิภาพการดูดซึม โดยจะใช้เฟสก๊าซเป็นอากาศซึ่งจะเป็นตัวถูกดูดซึม ส่วนเฟสของเหลวที่เป็นตัวดูดซึมจะใช้น้ำประปา สิ่งที่คาดหวังจากการช่วงการทดลองนี้ คือ ศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศจากหัวกระจายอากาศที่แตกต่างกัน ซึ่งคาดการณ์ว่าขนาดฟองอากาศที่เล็กลงมากๆ จะทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้นเพื่อให้มีประสิทธิภาพการดูดซึมเพิ่มขึ้น ก่อนที่จะนำไปใช้ร่วมกับตัวกลางต่อไป

ช่วงที่ 1.2 ทำการศึกษาอิทธิพลด้านกายภาพของรูปทรงและปริมาณของตัวกลางที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจมีผลกระทบต่ออัตราการถ่ายเทมวลสารในคอลัมน์แบบฟองอากาศ อุทกพลศาสตร์ และประสิทธิภาพการดูดซึม โดยเฟสก๊าซใช้อากาศเป็นตัวถูกดูดซึม ส่วนเฟสของเหลวที่เป็นตัวดูดซึมจะใช้น้ำประปา สิ่งที่คาดหวังจากการทดลองนี้ คือ รูปทรง 4 รูปทรง กลม แท่ง สี่เหลี่ยม และทรงกระบอกกลวง และปริมาณของตัวกลางที่แตกต่างกัน คือ 2% 5% และ 10% จะทำให้ในความเป็นป่วนไปกระทบต่อฟองอากาศทำให้เพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น ซึ่งจะมีผลต่อการถ่ายเทมวลสารก่อนที่จะนำไปใช้ร่วมกับสารเคมีต่อไป

ช่วงที่ 1.3 ทำการศึกษาอิทธิพลด้านเคมีที่ความเข้มข้นต่างกัน ซึ่งจะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารในคอลัมน์แบบฟองอากาศ ประสิทธิภาพการดูดซึม โดยเฟสก๊าซจะ

ใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวดูดซับ ส่วนเฟสของเหลวที่เป็นตัวดูดซับจะใช้สารละลายโมโนเอทานอลามีน (MEA) สิ่งที่เราคาดหวังจากการช่วงการทดลองนี้ คือ เมื่อมีการปรับเปลี่ยนเฟสของเหลวด้วยสารละลาย จะทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสมีการเปลี่ยนแปลง และเป็นตัวช่วยให้การถ่ายเทมวลสารง่ายขึ้น ดูดซับได้ดีขึ้น เพื่อที่จะนำไปใช้ร่วมกับเฟสก๊าซซึ่งเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไป

ช่วงที่ 1.4 ทำการศึกษาอิทธิพลทั้งด้านกายภาพและด้านเคมี จากการทดลองช่วงที่ 1.1 – 1.3 โดยจะใช้เฟสก๊าซเป็นคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวดูดซับ ในส่วนของตัวดูดซับเฟสของเหลวจะใช้สารละลาย และตัวกลางลงไปผสมอยู่ในคอลัมน์แบบฟองอากาศด้วย

ช่วงที่ 2.1 ทำการศึกษาอิทธิพลทางกายภาพของขนาดฟองอากาศ ด้วยหัวกระจายอากาศที่มีผลกระทบต่อถ่ายเทมวลสารในคอลัมน์แบบฟองอากาศ อุทกพลศาสตร์ และประสิทธิภาพการดูดซับ โดยจะใช้เฟสก๊าซเป็นอากาศซึ่งจะเป็นตัวดูดซับ ส่วนเฟสของเหลวที่เป็นตัวดูดซับจะใช้น้ำประปา สิ่งที่เราคาดหวังจากการทดลองนี้ คือ ศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศจากหัวกระจายอากาศที่แตกต่างกัน ซึ่งคาดการณ์ว่าขนาดฟองอากาศที่เล็กลงมากๆ จะทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้นเพื่อให้มีประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้น ก่อนที่จะนำไปใช้ร่วมกับตัวกลางต่อไป

ช่วงที่ 2.2 ทำการศึกษาอิทธิพลด้านกายภาพของรูปร่างและปริมาณของตัวกลางที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจมีผลกระทบต่อถ่ายเทมวลสารในคอลัมน์แบบฟองอากาศ อุทกพลศาสตร์ และประสิทธิภาพการดูดซับ โดยเฟสก๊าซจะใช้อากาศเป็นตัวดูดซับ ส่วนเฟสของเหลวที่เป็นตัวดูดซับจะใช้น้ำประปา สิ่งที่เราคาดหวังจากการทดลองนี้ คือ รูปร่างและปริมาณของตัวกลางที่แตกต่างกัน จะทำให้ในระบบปั่นป่วนไปกระทบต่อฟองอากาศทำให้เพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น ซึ่งจะมีผลต่อการถ่ายเทมวลสารก่อนที่จะนำไปใช้ร่วมกับสารเคมีต่อไป

ช่วงที่ 2.3 ทำการศึกษาอิทธิพลด้านเคมีที่ความเข้มข้นต่างกัน ซึ่งจะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารในคอลัมน์แบบฟองอากาศ ประสิทธิภาพการดูดซับ ส่วนเฟสก๊าซเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และเฟสของเหลวที่เป็นตัวดูดซับจะใช้สารละลายโมโนเอทานอลามีน (MEA) สิ่งที่เราคาดหวังจากการช่วงการทดลองนี้ คือ เมื่อมีการปรับเปลี่ยนเฟสของเหลวด้วยสารละลาย จะทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสมีการเปลี่ยนแปลงและเป็นตัวช่วยให้การถ่ายเทมวลสารง่ายขึ้น ซึ่งจะมีผลต่อประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลสาร เพื่อที่จะนำไปใช้ร่วมกับการทดลองช่วงที่ 2.4

ช่วงที่ 2.4 ทำการศึกษาอิทธิพลทั้งด้านกายภาพและด้านเคมี จากการทดลองช่วงที่ 2.1 – 2.3 โดยจะใช้เฟสก๊าซเป็นคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวดูดซับแทนอากาศ ในส่วนของตัวดูดซับเฟสของเหลวจะใช้สารละลายและตัวกลางลงไปรวมอยู่ในคอลัมน์แบบฟองอากาศด้วย

ช่วงที่ 9 เมื่อศึกษาช่วงที่ 1.1 – 2.4 แล้วจะนำผลทดลองมาวิเคราะห์เปรียบเทียบในลักษณะเชิงการออกแบบเพื่อเลือกใช้คอลัมน์ที่เหมาะสมกับการใช้งาน และลักษณะเชิงกายภาพและเคมีที่มีอิทธิพลต่อการดำเนินการทดลองทั้ง อัตราการไหล ชนิดของหัวกระจายอากาศ ขนาดฟองอากาศ

รูปทรงของตัวกลาง ปริมาณของตัวกลาง ความเข้มข้นของสารละลาย ชนิดของสารละลาย ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารในการบำบัดคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อนำไปปรับปรุงใช้งานในอุตสาหกรรมที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ในอนาคตต่อไป

3.2 การติดตั้งระบบการทดลอง

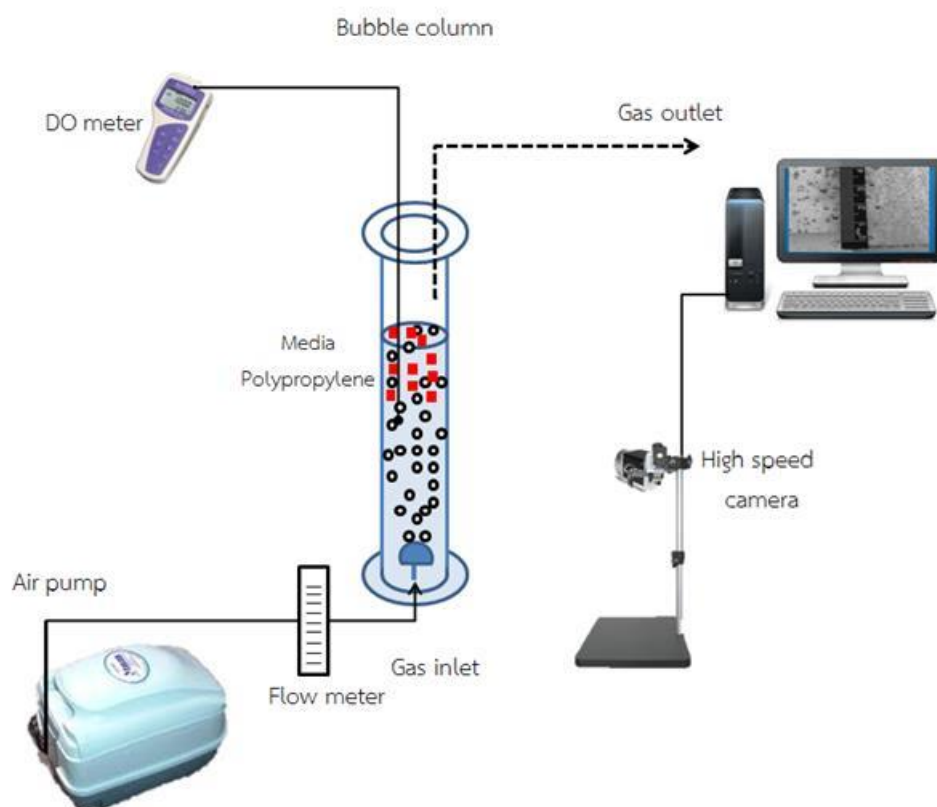
จากการค้นคว้างานวิจัยที่ผ่านมา งานวิจัยทั่วไปส่วนใหญ่จะเน้นเจาะจงด้านใดด้านหนึ่ง เช่น ชนิดหรือความเข้มข้นของสารเคมี ลักษณะเชิงกลของหวักระจายอากาศ และลักษณะรูปทรงเรขาคณิตของตัวกลาง ชนิดรูปแบบคอลัมน์ เป็นต้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงเห็นควรที่จะนำมาปรับเปลี่ยนนำประโยชน์ในแต่ละด้านมาศึกษาเพิ่มเติมและนำมาศึกษารวมกัน

การติดตั้งระบบการทดลองแบ่งเป็นคอลัมน์ 2 รูปแบบ ได้แก่ คอลัมน์แบบฟองอากาศ (Bubble column) และคอลัมน์แบบอากาศยก (Airlift reactor) ซึ่งจะอธิบายลักษณะการติดตั้งในแต่ละชนิดดังต่อไปนี้

3.2.1 การติดตั้งระบบการทดลองคอลัมน์แบบฟองอากาศ (Bubble column)

การติดตั้งระบบคอลัมน์แบบฟองอากาศศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารจากวัสดุที่อาจมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพ ในที่นี้จะใช้ หวักระจายอากาศ ตัวกลาง Poly propylene และสารเคมี ในการติดตั้งระบบการทดลองนี้เริ่มจากการสร้างคอลัมน์แบบฟองอากาศด้วยวัสดุอะคริลิกใสที่มีความหนา 3 mm. เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 10 mm. ที่ความสูง 1 m. ด้านหัวและท้ายเป็นหน้าแปลนซึ่งสามารถถอดประกอบในการปิดเปิดได้ จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นการทดลองในข้อ 3.2.1 จะแบบออกเป็น 4 ช่วงการทดลองในช่วงที่ 1 – 3 จะใช้เฟสก๊าซจากเครื่องสร้างอากาศ ซึ่งวัดในรูปออกซิเจนเป็นเฟสก๊าซที่ถูกดูดซึม ผ่านเข้าสู่ท่ออากาศที่ติดตั้งต่อเข้าเครื่องวัดอัตราการไหล ซึ่งเป็นตัวควบคุมอัตราการไหลในการทดลองนี้จะใช้ช่วง 2.5 – 12.5 ลิตรต่อนาที เมื่ออากาศที่อยู่ในท่ออากาศผ่านเครื่องวัดอัตราการไหลค่าใดค่าหนึ่งแล้วจะเข้าสู่หวักระจายอากาศ ซึ่งการทดลองเป็นแบบที่ละเท จึงใช้หวักระจายอากาศ ชนิด ของแข็ง rigid small) ไม้ และ rigid large ตามลำดับ เข้าสู่คอลัมน์แบบฟองอากาศที่มีน้ำประปาเป็นเฟสของเหลว จะวัดค่าความเปลี่ยนแปลงของออกซิเจนในเฟสของเหลวด้วยเครื่องวัดออกซิเจนละลายน้ำ (DO meter) และหาขนาดฟองอากาศโดยการถ่ายภาพฟองอากาศด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงและถูกส่งข้อมูลภาพบันทึกไปยังคอมพิวเตอร์ จบช่วงการทดลองที่ 1 ดังนั้นจะเข้าสู่การทดลองช่วงที่ 2 ต่อไป ซึ่งจะเริ่มต้นคล้ายกับการทดลองช่วงที่ 1 แต่ต่างตรงที่เพิ่มตัวกลาง PP ที่มีรูปทรงไม่เหมือนกันลงไป จะควบคุมปริมาณโดยปริมาตรที่ 2% 5% และ 10% จากนั้นก็จะวัดค่าออกซิเจนละลายและบันทึกภาพฟองอากาศเช่นเดียวกับการทดลองช่วงที่ 1 จบการทดลองช่วงที่ 2 เข้าสู่การทดลองช่วงที่ 3 ซึ่งมีข้อแตกต่างจากช่วงที่ 1 และ 2 โดยการใส่สารละลายลง

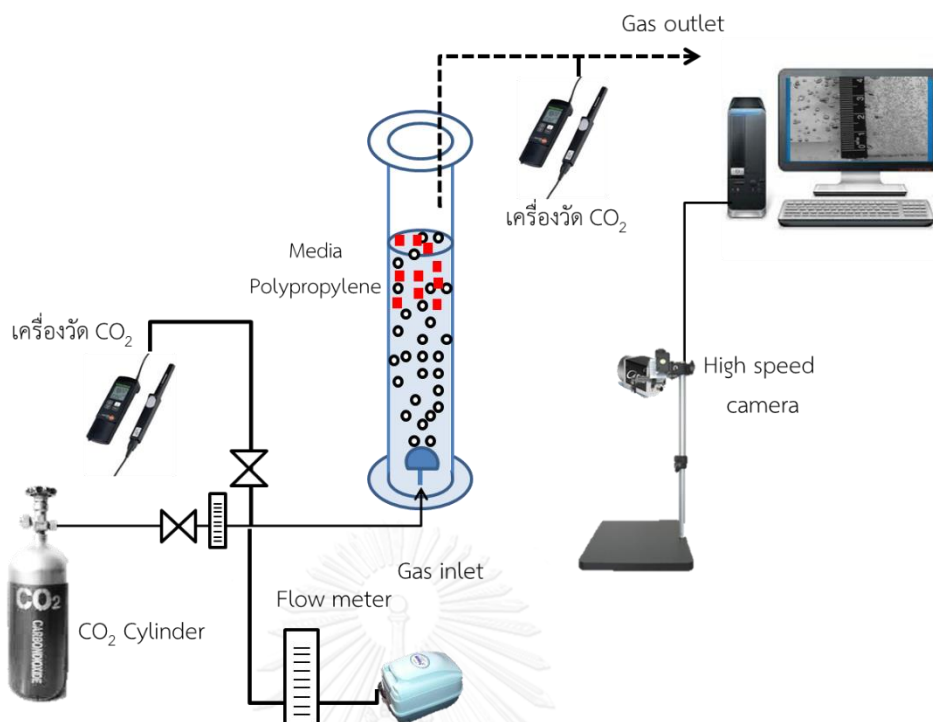
ไปในคอลัมน์ คือ MEA การเก็บข้อมูลต่างๆเช่นเดียวกับการทดลองช่วงที่ 1 และ 2 สามารถดูภาพประกอบคำอธิบายการติดตั้งการทดลองช่วงที่ 1 – 3 ได้ ดังรูปภาพที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การติดตั้งการทดลองคอลัมน์แบบฟองอากาศช่วงทดลองที่ 1 – 3

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ในการติดตั้งระบบการทดลองคอลัมน์แบบฟองอากาศช่วงที่ 4 จะเปลี่ยนเฟสก๊าซที่เป็นตัวถูกละลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์แทนอากาศ โดยจะใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในถังบรรจุจากก๊าซอุตสาหกรรมทั่วไป ไหลผ่านเข้าสู่ท่ออากาศที่มีเครื่องวัดความเข้มข้นก๊าซ CO_2 ด้วยเครื่องมือภาคสนาม testo 535 จากนั้น CO_2 ที่ถูกวัดจะไหลผ่านเข้าสู่เครื่องควบคุมอัตราการไหล ใช้ค่าเดียวกันกับการทดลองช่วงที่ 1 – 3 ผ่านไปยังหัวกระจายอากาศ เข้าสู่คอลัมน์ซึ่งมีเฟสของเหลวเป็นสารละลายอยู่ เมื่อหาค่าที่เหมาะสมได้จะเติมตัวกลางลงไปคอลัมน์และทำการวัดค่าค่าเข้มข้น CO_2 ขาออก เพื่อนำมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพต่อไป สามารถดูภาพประกอบได้ในรูปที่ 3.4



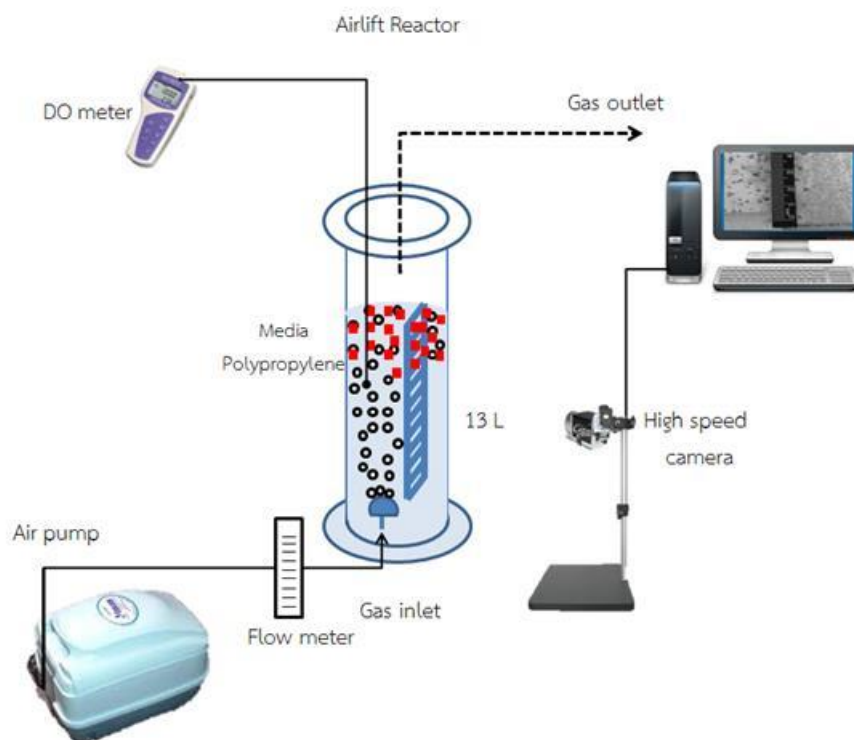
รูปที่ 3.4 การติดตั้งการทดลองคอลัมน์แบบฟองอากาศช่วงทดลองที่ 4

3.2.2 การติดตั้งระบบการทดลองคอลัมน์แบบอากาศยก (Airlift reactor)

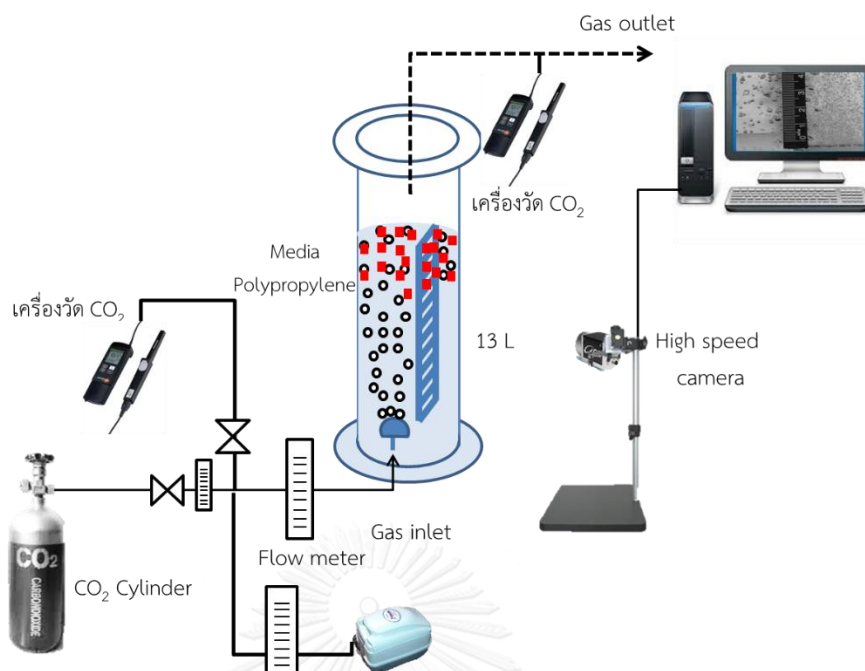
การติดตั้งระบบคอลัมน์แบบอากาศยกจะศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารจากวัสดุที่อาจมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพ ในที่นี้จะใช้ หัวกระจายอากาศ ตัวกลางโพลีโพรไพลีนจากการ และ สารเคมี ในการติดตั้งระบบการทดลองนี้เริ่มจากการสร้างคอลัมน์แบบฟองอากาศด้วยวัสดุอะคริลิกใส ที่ความหนา 5 mm. เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 15 mm. มีแผ่นอะคริลิกใสกั้นอยู่ภายในคอลัมน์ซึ่งของไหลจะเป็นการไหลวนภายในรูปคอลัมน์ ที่ความสูง 1 m. ปริมาตรของเหลวสุทธิ 13 ลิตร (Chisti et al., 1988) ด้านหัวและท้ายเป็นหน้าแปลนซึ่งสามารถถอดประกอบในการปิดเปิดได้ จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นการทดลองในข้อ 3.2.2 จะแบ่งออกเป็น 4 ช่วงการทดลองในช่วงที่ 1 – 3 จะใช้เฟสก๊าซจากเครื่องสร้างอากาศ ซึ่งวัดในรูปออกซิเจนเป็นเฟสก๊าซที่ถูกดูดซึม ผ่านเข้าสู่ท่ออากาศที่ติดตั้งต่อเข้าเครื่องวัดอัตราการไหล ซึ่งเป็นตัวควบคุมอัตราการไหลในการทดลองนี้จะใช้ช่วง 2.5 – 12.5 ลิตรต่อ นาที เมื่ออากาศที่อยู่ในท่ออากาศผ่านเครื่องวัดอัตราการไหลค่าใดค่าหนึ่งแล้วจะเข้าสู่หัวกระจายอากาศ ซึ่งการทดลองเป็นแบบที่ละเท จึ่งใช้หัวกระจายอากาศ 3 ชนิด หัวกระจายอากาศแบบ rigid ขนาดเล็ก (rigid small) ไม้ และ rigid ขนาดใหญ่ (rigid large) ตามลำดับ เข้าสู่คอลัมน์แบบฟองอากาศที่มีน้ำประปาเป็นเฟสของเหลว จะวัดค่าความเปลี่ยนแปลงของออกซิเจนในเฟสของเหลว

ด้วยเครื่องวัดออกซิเจนละลายน้ำ (DO meter) และหาขนาดฟองอากาศโดยการถ่ายภาพฟองอากาศ ด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงจะถูกส่งข้อมูลภาพบันทึกไปยังคอมพิวเตอร์ จบช่วงการทดลองที่ 1 ดังนั้นจะเข้าสู่การทดลองช่วงที่ 2 ต่อไป ซึ่งจะเริ่มต้นคล้ายกับการทดลองช่วงที่ 1 แต่ต่างตรงที่เพิ่มตัวกลาง PP ที่มีรูปทรงไม่เหมือนกันลงไป จะควบคุมปริมาณโดยน้ำหนักที่ 2% 5% และ 10% จากนั้นก็จะวัดค่าออกซิเจนละลายและบันทึกภาพฟองอากาศเช่นเดียวกับการทดลองช่วงที่ 1 จบการทดลองช่วงที่ 2 เข้าสู่การทดลองช่วงที่ 3 ซึ่งมีข้อแตกต่างจากช่วงที่ 1 และ 2 โดยการใส่สารละลายลงไป ในคอลัมน์ คือ MEA และใช้เฟสก๊าซคือคาร์บอนไดออกไซด์ การเก็บข้อมูลต่างๆเช่นเดียวกับการทดลองช่วงที่ 1 และ 2 สามารถดูภาพประกอบคำอธิบายการติดตั้งการทดลองช่วงที่ 1 – 3 ได้ ดังรูปที่ 3.5

ในการติดตั้งระบบการทดลองคอลัมน์แบบอากาศยกช่วงที่ 4 เฟสก๊าซที่เป็นตัวถูกละลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์แทนอากาศ โดยจะใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในถังบรรจุจากก๊าซอุตสาหกรรมทั่วไป ไหลผ่านเข้าสู่ท่ออากาศที่มีเครื่องวัดความเข้มข้นก๊าซ CO_2 ด้วยเครื่องมือภาคสนาม testo 535 จากนั้น CO_2 ที่ถูกวัดจะไหลผ่านเข้าสู่เครื่องควบคุมอัตราการไหล ใช้ค่าเดียวกันกับการทดลองช่วงที่ 1 – 3 ผ่านไปยังหัวกระจายอากาศ เข้าสู่คอลัมน์ซึ่งมีเฟสของเหลวเป็นสารละลายอยู่ เมื่อหาค่าที่เหมาะสมได้จะเติมตัวกลางลงไป ในคอลัมน์และทำการวัดค่าค่าเข้มข้น CO_2 ขาออก เพื่อนำมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพต่อไป สามารถดูภาพประกอบได้ในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 การติดตั้งการทดลองคอลัมน์แบบอากาศยกช่วงทดลองที่ 1 – 3



รูปที่ 3.6 การติดตั้งการทดลองคอลัมน์แบบอากาศยกช่วงทดลองที่ 4

1. คอลัมน์ดูดซึมแบบอากาศยก (Airlift reactor) อะคริลิกทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 14 เซนติเมตร สูง 1 เมตร หนา 5 มิลลิเมตร
2. คอลัมน์ดูดซึมแบบฟองอากาศ (Bubble reactor) เป็นอะคริลิกทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 9 เซนติเมตร สูง 1 เมตร หนา 5 มิลลิเมตร
3. หัวกระจายอากาศ (Sparger) 3 ชนิด ได้แก่ rigid small, ไม้ และแบบ rigid large
4. ปั๊มอากาศ (Air pump) Atman High – class Air pump รุ่น HP-12000
5. เครื่องวัดออกซิเจนละลายน้ำ (DO meter)
6. เครื่องวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ Testo 535
7. กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง Basler รุ่น acA2000 – 340 km
8. ถังคาร์บอนไดออกไซด์
9. เม็ดพลาสติก โพลีโพลีเอทิลีน

ตารางที่ 3-1 ลักษณะรูปทรงอุปกรณ์ในการทดลอง

ลำดับ	รายชื่ออุปกรณ์	รูปภาพ
1.	หัวกระจายอากาศแบบ Rigid ขนาดเล็ก (Rigid small) แบบกลมที่มีรูขนาดเล็ก ขนาด 5 cm.	
2.	หัวกระจายอากาศแบบไม่ทรงสี่เหลี่ยม	
3.	หัวกระจายอากาศแบบ Rigid ขนาดใหญ่ (Rigid Large) แบบกลม ที่มีรูขนาดใหญ่ ขนาด 6.5 cm.	
4.	เครื่องอัดอากาศ ยี่ห้อ Atman High-Class Air Pump รุ่น HP-12000 flow 35 LPM	
5.	เครื่องวัดก๊าซออกซิเจนละลาย ยี่ห้อ Eutech Instruments รุ่น CyberScan DO110	
6.	กล้องถ่ายภาพความเร็วสูงยี่ห้อ Basler รุ่น acA2000-340km	
7.	Carbon Dioxide Industrial Grade Purity 99.5% Gas content 30 kg/cyl Fill at pressure ~ 800 psig Standard Valve CGA 320 Produced by LINDE's wellgrow SAP : S241-30	

ลำดับ	รายชื่ออุปกรณ์	รูปภาพ
8.	อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซ ยี่ห้อ Dwyer รุ่น RMB-52D-SSV 2 – 30	
9.	อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซ ยี่ห้อ new flow SBC 3-S-air	
10.	เครื่องตรวจวัด CO ₂ ภาคสนาม Testo 535	
11.	ตัวกลางเม็ดพลาสติก polypropylene PP จากอุตสาหกรรม รูปทรงกระบอกแท่งสีเขียว (Rod)	
12.	ตัวกลางเม็ดพลาสติก polypropylene PP จากอุตสาหกรรม รูปทรงกลมสีขาวขุ่น (Cricle)	
13.	ตัวกลางเม็ดพลาสติก polypropylene PP จากอุตสาหกรรม รูปทรงสี่เหลี่ยมสีขาวขุ่น (Square)	
14.	ตัวกลางเม็ดพลาสติก polypropylene PP รูปทรงกระบอกกลาง (Ring)	

ตารางที่ 3.2 ลักษณะทางกายภาพของตัวกลาง

Media shape	Bed porosity, ϵ	Surface area, A (mm ²)	Volume, V (mm ³)	Particle mass, m_p (g)
กระบอกกลาง	0.68	156.69	49.48	0.047
แท่ง	0.33	40.07	20.34	0.02
ทรงกลม	0.38	43.05	26.56	0.025
สี่เหลี่ยม	0.3	38.43	17.69	0.017

3.3. องค์ประกอบอื่นๆ ที่ใช้ในงานวิจัย

1. โซเดียมซัลไฟต์ (Sodium sulphite anhydrous :Na₂SO₃) ยี่ห้อ Ajax Finechem
2. ถังคาร์บอนไดออกไซด์ Carbon Dioxide Industrial Grade Purity 99.5% Gas content 30 kg/cyl Fill at pressure ~ 800 psig Standard Valve CGA 320 Produced by LINDE
3. น้ำประปา และ DI water ที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
4. N-methyldiethanolamine (MEA)

3.4 การวิเคราะห์ตัวแปรที่ศึกษาในงานวิจัย

3.4.1 ตัวแปรด้านการถ่ายเทมวล

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม (K_{La}) ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการการดูดซึมในการทดลองในช่วงแรกซึ่งมีการใช้เฟสก๊าซเป็นออกซิเจนทั้งสองคอลัมน์ ตามหลักการเคลื่อนที่หรือแบบไดนามิกหา K_{La} ได้จากสมการต่อไปนี้

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

$$K_L = \frac{k_L a}{a} \quad 3.2$$

โดยที่ R = อัตราการดูดซึม, mg/L.s

a = พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ, m²/m³

k_L = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลย่อย, m/s

C^* = ความเข้มข้นของก๊าซละลายที่สภาวะสมดุล, mg/L

C = ความเข้มข้นของก๊าซละลายที่สภาวะใดๆ, mg/L

ในส่วนของการทดลองในช่วงที่สอง ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงเฟสก๊าซจากออกซิเจนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ อัตราการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ (Kucka et al., 2002) จะหาได้จากสมการที่ 3.3

$$R = \frac{dC}{dt} = k_L a C^* \sqrt{1 + M_H^2} \quad 3.3$$

โดยที่ R = อัตราการดูดซึม, mol/l.s

k_L = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลย่อย, m/s

a = พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ, m^2/m^3

C^* = ความเข้มข้นของก๊าซละลายที่สภาวะสมดุล, mol/l

M_H = Hatta number, ไม่มีหน่วย

เมื่อต้องการทราบอัตราการดูดซึมของคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลายที่นำมาใช้ได้แก่ MEA จะสามารถคำนวณจากสมการที่ 3.4

$$R_A = k_L a \times C_A^* \left(1 + \frac{D_B}{z \times D_A} \times \frac{C_{B0}}{C_A^*} \right) \quad 3.4$$

โดยที่ R_A = อัตราการดูดซึม, mol/l.s

k_L = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลย่อย, m/s

a = พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ, m^2/m^3

C_A^* = ความสามารถในการละลาย $kmol/m^3$

D_B = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารของสารละลาย m^2/s

D_A = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ CO_2 ในสารละลาย m^2/s

z = ค่าสัมประสิทธิ์ของปริมาณสารสัมพันธ์

C_{B0} = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย $kmol/m^3$

3.4.2 ตัวแปรด้านลักษณะทางกายภาพ

ด้านลักษณะทางกายภาพที่สนใจในการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับหวักระจ่ายฟองอากาศคือขนาดของฟองอากาศ ซึ่งจะใช้กล้องถ่ายภาพความเร็วสูงในการจับขนาดฟองอากาศและจะนำไปเข้าโปรแกรมในคอมพิวเตอร์เพื่อนำไปคำนวณขนาดพื้นที่ผิวสัมผัสต่อไป ซึ่งคำนวณได้ดังสมการที่ 3.5

$$d_B = \frac{\sum_{i=1}^N d_i}{N} \quad 3.5$$

โดยที่ d_B คือ ขนาดฟองอากาศเฉลี่ย, มิลลิเมตร

d_i คือ ขนาดฟองอากาศลำดับที่ i , มิลลิเมตร

N คือ จำนวนฟองอากาศที่สุ่ม, ไม่มีหน่วย

โดยสัดส่วนของก๊าซสามารถคำนวณได้จากสมการ 3.6 (Maldonado et al., 2008)

$$\epsilon_G = \frac{V_G}{V_G + V_L + V_S} \quad (3.6)$$

โดยที่ ϵ_G คือ สัดส่วนก๊าซ, ไม่มีหน่วย

V_G คือ ปริมาตรของก๊าซในระบบ, ลูกบาศก์เมตร

V_L คือ ปริมาตรของของเหลวดูดซึมในระบบ, ลูกบาศก์เมตร

V_S คือ ปริมาตรของตัวกลางพลาสติกในระบบ, ลูกบาศก์เมตร

3.4.3 การวิเคราะห์ CO₂ ในของเหลว

ซึ่งจะตรวจวัด 2 ทาง คือ ในก๊าซและละลายอยู่ในของเหลว ซึ่งสามารถตรวจวัดโดยใช้เครื่องมือภาคสนาม หรือการไตเตรต ในงานวิจัยนี้ตรวจวัด CO₂ ในรูปก๊าซนั้นจะใช้เครื่องมือภาคสนาม Testo 535 ส่วนในรูป CO₂ ละลายน้ำนั้นจะตรวจสอบด้วยวิธีการไตเตรตเพื่อความแม่นยำ โดยจะสุ่มบางการทดลอง ซึ่งจะอธิบายดังต่อไปนี้

ก๊าซ CO₂ จะทำปฏิกิริยากับโซเดียมคาร์บอเนต หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ในรูปโซเดียมไบคาร์บอเนต ผลยุติของการเกิดปฏิกิริยา คือ phenolphthalein จะเปลี่ยนเป็นสีชมพู ที่สมดุล pH 8.3 โดยใช้สารละลาย โซเดียมไบคาร์บอเนต Sodium bicarbonate (NaHCO₃) ที่ 0.01 N ซึ่งมี phenolphthalein เป็นอินดิเคเตอร์ในการสังเกตสีของปฏิกิริยาของจุดสิ้นสุด วิธีการไตเตรตสำหรับ CO₂ ไม่เหมาะกับน้ำตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นกรดหรือแร่เหมือนผสมอยู่ด้วย เนื่องจากการแลกเปลี่ยนไอออนบวกอาจทำให้กรดใหม่มาแทน นอกจากนี้วิธีไตเตรต CO₂ ไม่ควรใช้กับน้ำที่มีค่า TDS สูง เพราะจะทำให้ผลตรวจผิดพลาด เช่น น้ำทะเล (American Public Health Association et al., 1999)

อุปกรณ์

1. pH meter ที่สามารถอ่านค่า pH 0.05 ได้
2. บีกเกอร์ 200 ml
3. บิวเรต 10, 25 และ 50 ml
4. ขวดรูปชมพู่ 125 – 250 ml
5. Magnetic strrer
6. ปิเปต
7. ขวดปรับปริมาตร 100, 200 และ 1,000 ml

8. ขวด Polyolefin

สารเคมี

1. ขั้นตอนการเตรียม Carbon dioxide-free water โดยการนำน้ำกลั่นที่เพิ่งกลั่นใหม่ มาต้ม 15 นาที แล้วทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง โดยที่ค่า pH ควรจะอยู่ที่ ≥ 6 และค่าการนำไฟฟ้าควรอยู่ที่ $< 2 \mu\text{mhos/cm}$.

2. เตรียมสารละลาย Potassium hydrogen phthalate ที่ 0.05 N โดยนำ $\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$ มาบดขยี้ 15-20 g จากนั้นนำไปผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาด 100 mesh และทำให้แห้งโดยการอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้ให้เย็นที่เดซิเคเตอร์ จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนัก $10.0 \pm 0.5 \text{ g}$ เติมน้ำในขวดปรับปริมาตร 1 L และเติมน้ำกลั่นลงไปให้ได้ 1,000 ml.

3. เตรียม Standard sodium hydroxide titrant ที่ 0.1 N ด้วยการนำ NaOH ที่ 11 g มาละลายน้ำกลั่น 10 ml และนำไปกรองผ่าน Gooch crucible หรือกระดาษกรอง กลั้วด้วยน้ำกลั่น 5.45 ml จนไม่มี NaOH ค้างบนผิวแผ่นกรอง จากนั้นนำไปปรับปริมาตรให้ได้ 1 L แล้วบรรจุลงในขวด Polyolefin เพื่อป้องกัน CO_2 จากบรรยากาศด้านนอก ด้วย soda lime tube หรือ tight cap

4. ทำ Standardize ด้วยการไตเตรตสารละลาย $\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$ จากข้อ 2 ปริมาณ 40 ml ใช้บิวเรต 25 ml นำมาไตเตรตกับ NaOH ที่เตรียมไว้ จุดสิ้นสุดคือค่า pH 8.7 โดยสามารถคำนวณในรูปแบบ NaOH ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Normality} = \frac{A \times B}{204.2 \times C} \quad 3.7$$

เมื่อ A น้ำหนักของ $\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$ ในขวด 1 L มีหน่วยเป็น g
 B ปริมาณสารละลาย $\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$ ที่ใช้ในการไตเตรต
 C ปริมาณสารละลาย NaOH ที่ใช้ไป

ในการคำนวณเพิ่มเติมหรือปรับค่าให้ 0.1000 N; 1 ml = 5.00 mg CaCO_3

5. การเตรียม Standard sodium hydroxide titrant ที่ 0.02 N เจือจางด้วย 200 ml ของ 0.1 N NaOH ที่ 1,000 ml และนำไปบรรจุในขวด Polyolefin เพื่อป้องกัน CO_2 จากบรรยากาศด้านนอก ด้วย soda lime tube หรือ tight cap จากนั้นนำมาเทียบกับ Standardize $\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$ ที่ได้จากข้อ 4 โดยจะใช้สารละลาย $\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$ 15.00 ml กับบิวเรต 50 ml และใช้สมการคำนวณเหมือนกับข้อที่ 4 โดยที่ 1 ml = 1.00 mg CaCO_3

6. การเตรียม Sodium thiosulfate 0.1 N ด้วย Hydrogen peroxide (H₂O₂) 30% ใช้ methy orange กับ phenolphthalein เป็นอินดิเคเตอร์ นำ Na₂S₂O₃·5H₂O 25 g มาเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 1,000 mL.

7. การเลือกใช้ขนาดปริมาณน้ำตัวอย่าง

a. สำหรับกลุ่มตัวอย่างที่มีความเป็นกรดน้อยกว่าปริมาณ 1,000 มิลลิกรัมของ แคลเซียมคาร์บอเนต / ลิตร ให้เลือกใช้ปริมาณน้อยกว่า 50 มิลลิกรัมเทียบเท่า CaCO₃ และไทเทรตกับ 0.02N NaOH

b. สำหรับกลุ่มตัวอย่างที่มีความเป็นกรดมากกว่าปริมาณ 1,000 มิลลิกรัมของ แคลเซียมคาร์บอเนต / ลิตร ให้เลือกใช้ปริมาณน้อยกว่า 250 มิลลิกรัมเทียบเท่า CaCO₃ และไทเทรตกับ 0.1 N NaOH

ถ้าจำเป็นให้ไทเทรตเบื้องต้นตามค่ากำหนดปริมาณตัวอย่างที่เหมาะสมและหรือเป็นปกติของ ไตเตรท

1. ขั้นตอนการสังเกตการณ์เปลี่ยนสี หลังจากเลือกขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมจากข้อ 7 แล้ว นำปิเปตดูด Na₂S₂O₃ 0.1 N ปริมาณ 0.05 ml เพื่อกำจัดสารคลอรีนอิสระที่อาจจะตกค้างบ้าง หรือนำไปย่อยทำลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต จากนั้นเติมอินดิเคเตอร์ 2 หยด ไตเตรตจากสีขาวจนเปลี่ยนสีเป็นสีชมพู และค่า pH ล้นสุดอยู่ที่ 8.3 สามารถคำนวณหาค่า CO₂ ได้จาก

$$\text{mg CO}_2/\text{L} = \frac{A \times N \times 44,000}{\text{mL sample}} \quad 3.8$$

เมื่อ A ปริมาณที่ไตเตรต mL
N normality ของ NaOH

3.4.4 ประสิทธิภาพการดูดซึม

ในการวิเคราะห์กระบวนการการดูดซึมในการทดลองในช่วงแรกซึ่งมีการใช้เฟสก๊าซเป็นออกซิเจนทั้งสองคอลัมน์ ดังนั้นการหาประสิทธิภาพ (%Eff) หาได้จากสมการที่ 3.9

$$\text{Eff} = \frac{\text{ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนละลายที่เวลาใดๆ mg/L}}{\text{ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนละลายที่จุดสมดุล mg/L}} \times 100 \quad 3.9$$

ในส่วนของการทดลองช่วงที่ 2 ที่คอลัมน์ทั้งสองชนิด ซึ่งจะใช้เครื่อง biogas 5000 วัดค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งขาเข้าและขาออก ดังนั้นการหาประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Eff) จะหาได้จากสมการที่ 4.9

$$\text{Eff} = \frac{C_{\text{CO}_2,\text{in}} - C_{\text{CO}_2,\text{out}}}{C_{\text{CO}_2,\text{in}}} \times 100 \quad 3.10$$

โดยที่ $C_{\text{CO}_2,\text{in}}$ = ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่วัดได้ตรงขาเข้า, mol/l
 $C_{\text{CO}_2,\text{out}}^*$ = ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่วัดได้ตรงขาออก, mol/l

3.5 วิธีการทดลอง

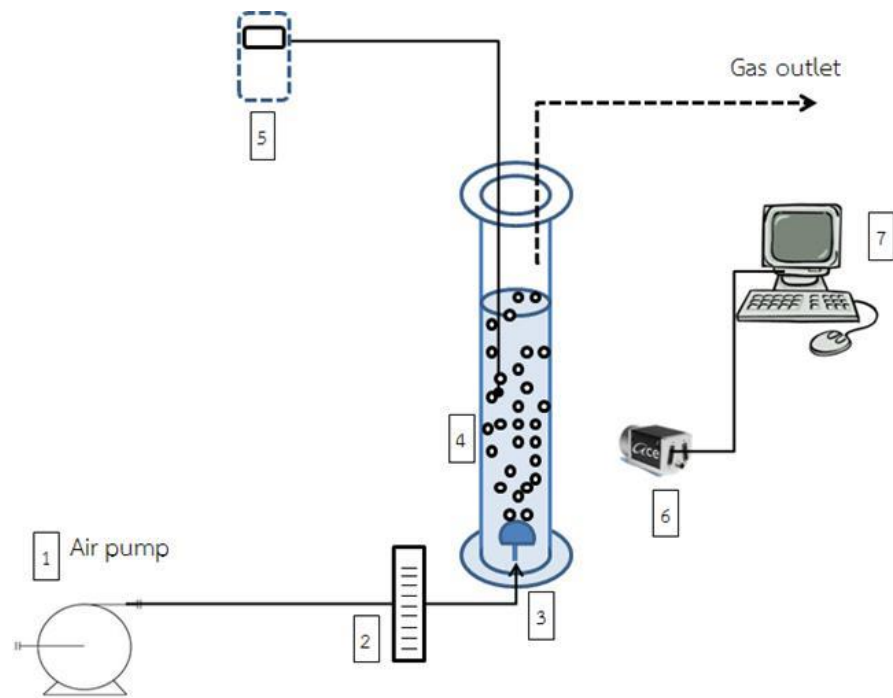
การทดลองนี้จะทดลองแบบทีละเทหรือแบบแบท (batch) จะแบ่งเป็น 2 คอลัมน์ ใ้แก่ คอลัมน์แบบฟองอากาศและคอลัมน์แบบอากาศยก โดยจะอธิบายทีละคอลัมน์

3.5.1 วิธีการทดลองคอลัมน์แบบฟองอากาศ

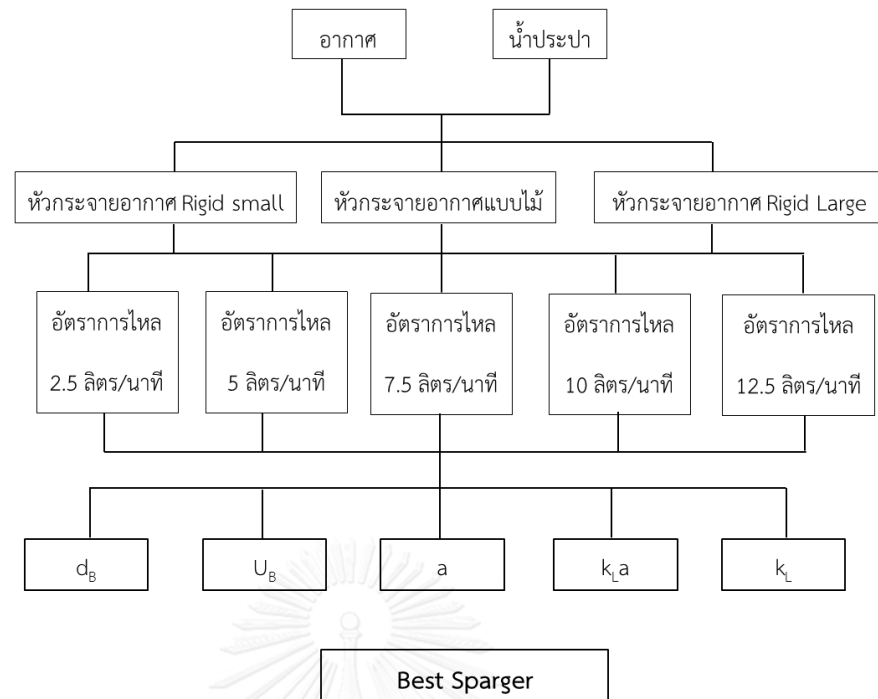
ซึ่งจะแบ่งเป็น 4 ช่วงการทดลอง ดังต่อไปนี้

3.5.1.1 วิธีการทดลองคอลัมน์แบบฟองอากาศในการทดลองช่วงที่หนึ่ง

ในการทดลองคอลัมน์ฟองอากาศในการทดลองช่วงที่หนึ่งจะศึกษาอิทธิพลด้าน ภายภาพของหัวกระจายอากาศที่ให้ผลขนาดฟองอากาศมีผลต่อการถ่ายเทมวลสาร ซึ่งจะอธิบาย ดังต่อไปนี้โดยมีรูปภาพที่ 3.7 เป็นรูปแบบจำลองวิธีการทดลอง ในการทดลองนี้ในส่วนของเฟสก๊าซจะ ใช้อากาศโดยจะกำหนดค่าออกซิเจนเริ่มต้นให้เป็นศูนย์ด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ อากาศจะถูก สร้างด้วยปั๊มอากาศดังหมายเลขที่ 1 แล้วจะไหลผ่านท่ออากาศซึ่งมีการควบคุมและกำหนดอัตราการ ไหลที่ 2.5 5 7.5 10 และ 12.5 ลิตรต่อนาที ตามลำดับดังหมายเลข 2 จากนั้นผ่านสู่ท่ออากาศเข้า สู่หัวกระจายอากาศหมายเลข 3 ซึ่งจะมีการเปรียบเทียบหัวกระจายอากาศครั้งละชนิดจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ หัวกระจายอากาศแบบ rigid small หัวกระจายอากาศแบบไม้ และหัวกระจายอากาศแบบ rigid large เพื่อหาผลแตกต่างจากขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้นกับหัวกระจายอากาศในคอลัมน์ หมายเลขที่ 4 มีปริมาตรน้ำ 5 ลิตร โดยจะอ่านค่าเปลี่ยนแปลงออกซิเจนละลายน้ำด้วยเครื่องวัด ออกซิเจนละลายน้ำ (DO meter) หมายเลข 5 โดยขนาดฟองอากาศถูกบันทึกภาพด้วยกล้องถ่ายภาพ ความเร็วสูงซึ่งจุดโฟกัสภาพห่างจากคอลัมน์ 30 เซนติเมตรหมายเลข 6 โดยจะแสดงผลเข้าสู่หน้า จอคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรมหมายเลข 7 เพื่อนำไปศึกษาอิทธิพลทางกายภาพเพื่อเปรียบเทียบกับ ลักษณะขนาดฟองอากาศจากทั้ง 3 หัวกระจายอากาศ สิ่งที่คาดหวังคือ หัวกระจายอากาศที่ให้ขนาด ฟองอากาศเล็กที่สุด ซึ่งจะมีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารที่เปลี่ยนไป สามารถดูภาพแผนผัง การไหลได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 รูปแบบจำลองวิธีการทดลองคอลัมน์ฟองอากาศในการทดลองช่วงที่หนึ่ง



รูปที่ 3.8 แผนผังวิธีการทดลองคอลัมน์ฟองอากาศช่วงที่หนึ่ง

ปัจจัยของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการทดลองคอลัมน์แบบฟองอากาศช่วงที่ 1

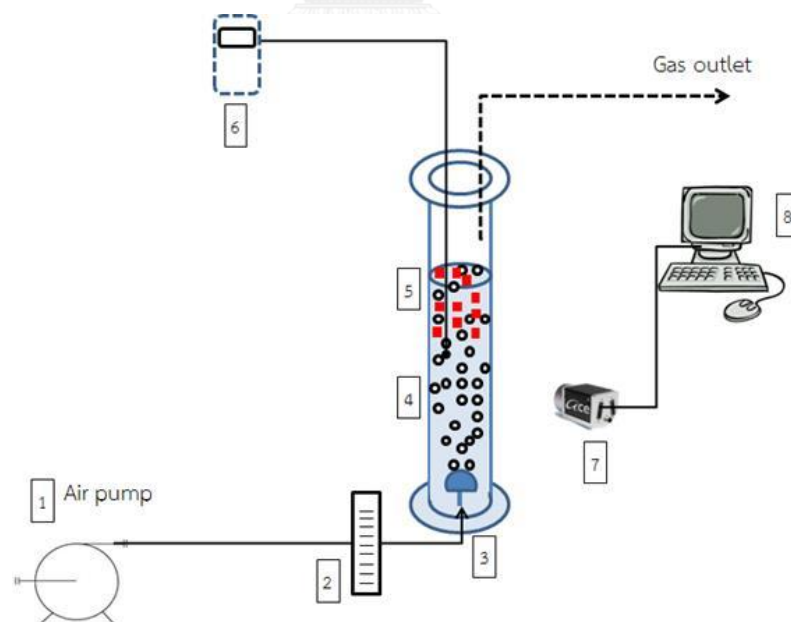
1. ตัวแปรควบคุม
 - เฟสก๊าซ คือ อากาศ
 - เฟสของเหลว คือน้ำประปา ปริมาณ 10 ลิตร
2. ตัวแปรต้น
 - อัตราการไหล ที่ 2.5 5 7.5 10 และ 12.5 ลิตรต่อนาที
3. หัวกระจายฟองอากาศ 3 ชนิด คือ หัวกระจายอากาศแบบ rigid small หัวกระจายอากาศแบบไม้ และหัวกระจายอากาศแบบ rigid large ตัวแปรตาม

พารามิเตอร์ที่ได้ใช้ ได้แก่ ขนาดของฟองอากาศ (d_B) ความเร็วของฟองอากาศ (U_B) พื้นที่ผิวสัมผัส (a) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม ($k_L a$) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลย่อย (k_L) และค่าออกซิเจนละลาย

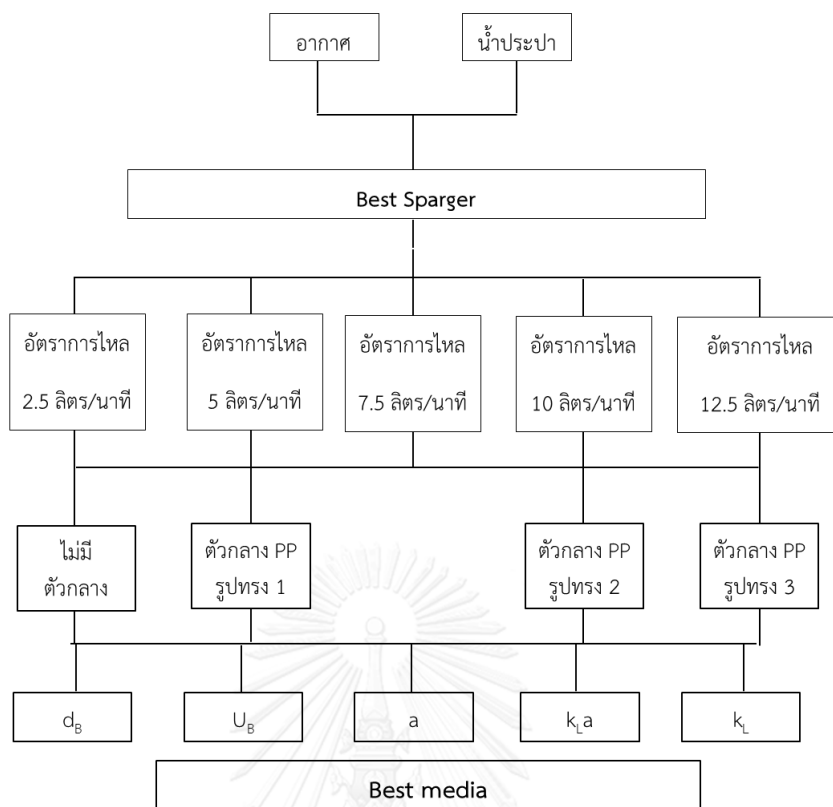
3.5.1.2 วิธีการทดลองคอลัมน์แบบฟองอากาศในการทดลองช่วงที่สอง

ในการทดลองคอลัมน์แบบฟองอากาศในการทดลองช่วงที่สองจะศึกษาอิทธิพลด้านกายภาพของรูปทรงของตัวกลาง และปริมาณของตัวกลาง ร่วมกับหัวกระจายอากาศที่ได้จากการทดลองช่วงที่หนึ่ง ที่มีผลต่อการถ่ายเทมวลสาร ซึ่งจะอธิบายดังต่อไปนี้โดยมีรูปภาพที่ 3.9 เป็น

รูปแบบจำลองวิธีการทดลอง ในการทดลองนี้ในส่วนของเฟสก๊าซจะใช้อากาศโดยจะกำหนดค่าออกซิเจนเริ่มต้นให้เป็นศูนย์ด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ อากาศจะถูกสร้างด้วยปั๊มอากาศตั้งหมายเลขที่ 1 แล้วจะไหลผ่านท่ออากาศซึ่งมีการควบคุมและกำหนดอัตราการไหลที่ 2.5 5 7.5 10 และ 12.5 ลิตรต่อนาที ตามลำดับตั้งหมายเลข 2 จากนั้นผ่านสู่อากาศเข้าสู่หัวกระจายอากาศหมายเลข 3 ซึ่งจะมีการเปรียบเทียบหัวกระจายอากาศครั้งละชนิดจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ หัวกระจายอากาศแบบ rigid small หัวกระจายอากาศแบบไม้ และหัวกระจายอากาศแบบ rigid large เพื่อหาผลแตกต่างจากขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้นกับหัวกระจายอากาศในคอลัมน์หมายเลขที่ 4 มีปริมาตรน้ำ 5 ลิตร จากนั้นมีการเติมตัวกลาง PP ตามรูปทรงต่างๆ หมายเลข 5 ทั้ง 3 รูปทรง ได้แก่ ทรงกระบอกสี่เหลี่ยม ทรงกลม และทรงกระบอกกลาง ที่ปริมาตร 2% 5% และ 10% โดยจะอ่านค่าเปลี่ยนแปลงออกซิเจนละลายน้ำด้วยเครื่องวัดออกซิเจนละลายน้ำ (DO meter) หมายเลข 6 โดยขนาดฟองอากาศถูกบันทึกภาพด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงซึ่งจุดโฟกัสภาพห่างจากคอลัมน์ 30 เซนติเมตรหมายเลข 7 โดยจะแสดงผลเข้าสู่หน้าจอคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรมหมายเลข 8 สิ่งที่คาดหวังจากการทดลองช่วงนี้คือ รูปทรงและปริมาณของตัวกลางที่ทำให้ผลการดูดซึมน้ำที่ดีที่สุด เพื่อนำไปศึกษาอิทธิพลทางกายภาพเพื่อเปรียบเทียบกับลักษณะขนาดฟองอากาศ ประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารที่เปลี่ยนไปสามารถดูภาพแผนผังการไหลได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 รูปแบบจำลองวิธีการทดลองคอลัมน์ฟองอากาศในการทดลองช่วงที่สอง



รูปที่ 3.10 แผนผังวิธีการทดลองคอลัมน์ฟองอากาศช่วงที่สอง

ปัจจัยของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการทดลองคอลัมน์แบบฟองอากาศช่วงที่ 2

1. ตัวแปรควบคุม

- เฟสก๊าซ คือ อากาศ
- เฟสของเหลว คือน้ำประปา ปริมาณ 10 ลิตร

2. ตัวแปรต้น

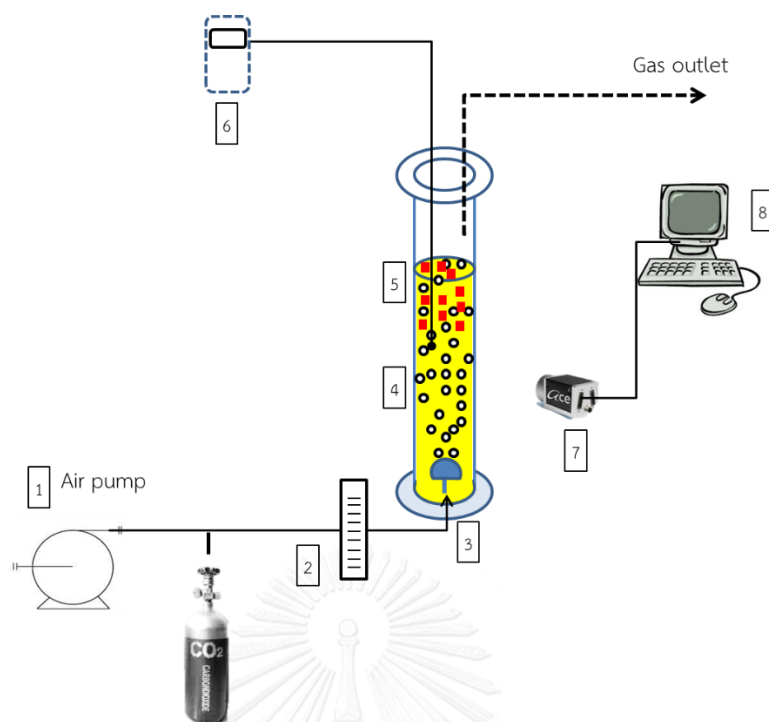
- หัวกระจายฟองอากาศ 3 ชนิด คือ หัวกระจายอากาศแบบ rigid small หัวกระจายอากาศแบบไม้ และหัวกระจายอากาศแบบ rigid large
- อัตราการไหล ที่ 2.5 5 7.5 10 และ 12.5 ลิตรต่อนาที
- รูปทรงของตัวกลาง ได้แก่ ทรงกลม ทรงกระบอก สี่เหลี่ยม
- ปริมาณตัวกลาง 2% 5% และ 10%

3. ตัวแปรตาม

พารามิเตอร์ที่ได้ใช้ ได้แก่ ขนาดของฟองอากาศ (d_B) ความเร็วของฟองอากาศ (U_B) พื้นที่ผิวสัมผัส (a) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม ($k_L a$) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลย่อย (k_L) และ ค่าออกซิเจนละลาย

3.5.1.3 วิธีการทดลองคอลัมน์แบบฟองอากาศในการทดลองช่วงที่สาม

ในการทดลองคอลัมน์แบบฟองอากาศในการทดลองช่วงที่สามจะศึกษาอิทธิพลด้านเคมีของสารละลายที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน โดยทดลองร่วมกับหัวกระจายอากาศ และตัวกลางที่ได้จากการทดลองช่วงที่หนึ่งและสอง เพื่อสังเกตการปรับเปลี่ยนเฟสของเหลวที่มีผลต่อการถ่ายเทมวลสาร ซึ่งจะอธิบายดังต่อไปนี้โดยมีรูปภาพที่ 3.11 เป็นรูปแบบจำลองวิธีการทดลอง ในการทดลองนี้ในส่วนของเฟสก๊าซจะใช้คาร์บอนไดออกไซด์จากถังอุตสาหกรรมมาเจือจางกับอากาศ เพื่อให้ได้ค่าความเข้มข้นประมาณ 7,500 ppm โดยอากาศจะถูกสร้างด้วยปั๊มอากาศดังหมายเลขที่ 1 แล้วจะไหลผ่านท่ออากาศซึ่งมีการควบคุมและกำหนดอัตราการไหลที่ 2.5 5 7.5 10 และ 12.5 ลิตรต่อนาทีตามลำดับดังหมายเลข 2 จากนั้นผ่านสู่ท่ออากาศเข้าสู่หัวกระจายอากาศหมายเลข 3 ซึ่งจะมีการเปรียบเทียบหัวกระจายอากาศครั้งละชนิดจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ หัวกระจายอากาศแบบ rigid small หัวกระจายอากาศแบบไม้ และหัวกระจายอากาศแบบ rigid large เพื่อหาผลแตกต่างจากขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้นกับหัวกระจายอากาศในคอลัมน์หมายเลขที่ 4 มีปริมาตรน้ำ 5 ลิตร จากนั้นมีการเติมตัวกลาง PP ตามรูปทรงต่างๆ หมายเลข 5 ทั้ง 3 รูปทรง ได้แก่ ทรงกระบอก สีเหลี่ยม ทรงกลม และทรงกระบอกกลวง ที่ปริมาณ 2% 5% และ 10% ในส่วนนี้เฟสของเหลวจะเติมสารละลายลงไป ได้แก่ MEA เพื่อศึกษาความเข้มข้นของของเหลวที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ โดยการใช้สาร MEA ที่ความเข้มข้น ดังนี้ 5% 1% และ 0.3% โดยจะอ่านค่าเปลี่ยนแปลงออกซิเจนละลายน้ำด้วยเครื่องวัดออกซิเจนละลายน้ำ (DO meter) หมายเลข 6 โดยขนาดฟองอากาศถูกบันทึกภาพด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงซึ่งจุดโฟกัสภาพห่างจากคอลัมน์ 30 เซนติเมตรหมายเลข 7 โดยจะแสดงผลเข้าสู่หน้าจอคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรมหมายเลข 8 สิ่งที่เราคาดหวังจากการทดลองนี้คือ ความเข้มข้นของสารละลาย MEA ที่มีผลต่อการดูดซึม CO_2 โดยวิเคราะห์ลักษณะขนาดฟองอากาศ ประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารที่เปลี่ยนไป สามารถดูภาพแผนผังการไหลได้ดังรูปที่ 3.12

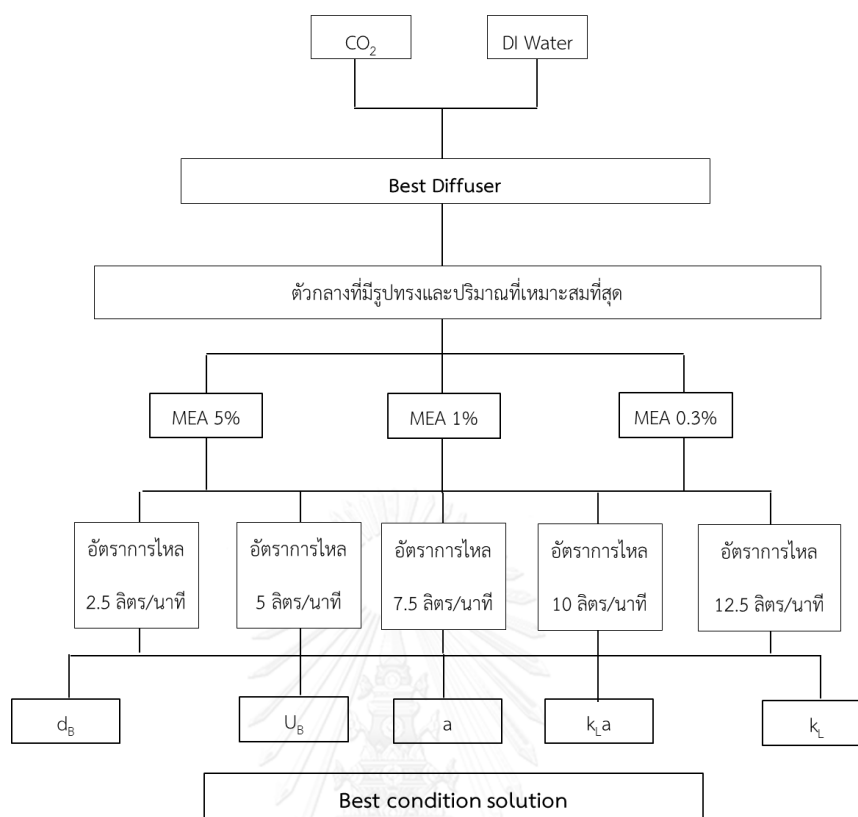


รูปที่ 3.11 รูปแบบจำลองวิธีการทดลองคอลัมน์ฟองอากาศในการทดลองช่วงที่สาม

ปัจจัยของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการทดลองคอลัมน์แบบฟองอากาศช่วงที่ 3

1. ตัวแปรควบคุม
 - เฟสก๊าซ คือ อากาศ
 - เฟสของเหลว คือน้ำประปา ปริมาณ 10 ลิตร
2. ตัวแปรต้น
 - หัวกระจายฟองอากาศ 3 ชนิด คือ หัวกระจายอากาศแบบ rigid small หัวกระจายอากาศแบบไม้ และหัวกระจายอากาศแบบ rigid large
 - อัตราการไหล ที่ 2.5, 5, 7.5, 10 และ 12.5 ลิตรต่อนาที
 - รูปทรงของตัวกลาง ได้แก่ ทรงกลม ทรงกระบอก สี่เหลี่ยม
 - ปริมาณตัวกลาง 2% 5% และ 10%
 - ความเข้มข้นของสารละลายในเฟสของเหลว โมโน เอทานอลามีนที่ 0.3 – 5%
3. ตัวแปรตาม

พารามิเตอร์ที่ใช้ ได้แก่ ขนาดของฟองอากาศ (d_B) ความเร็วของฟองอากาศ (U_B) พื้นที่ผิวสัมผัส (a) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม ($k_L a$) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลย่อย (k_i) และประสิทธิภาพการดูดซึม (E_{ff}) และค่าออกซิเจนละลาย

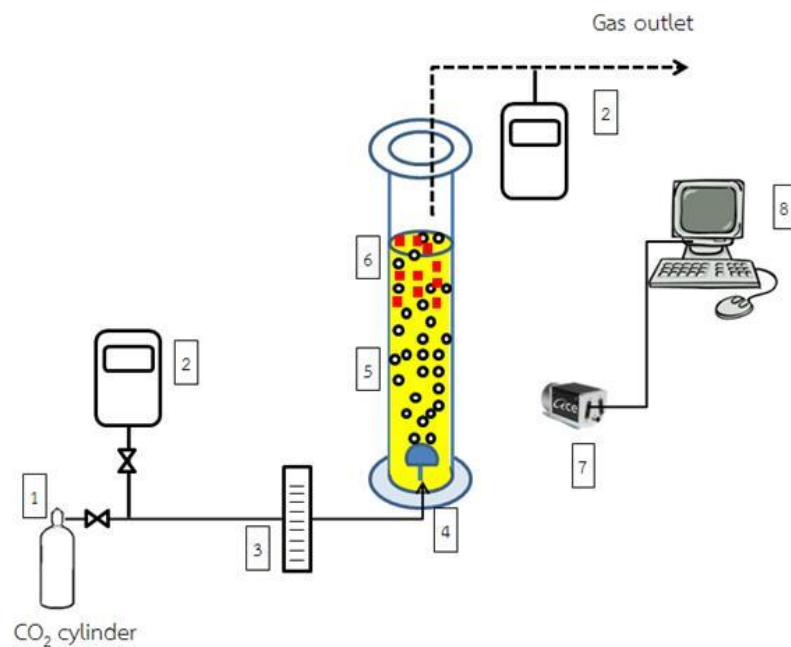


รูปที่ 3.12 แผนผังวิธีการทดลองคอลัมน์ฟองอากาศช่วงที่สาม

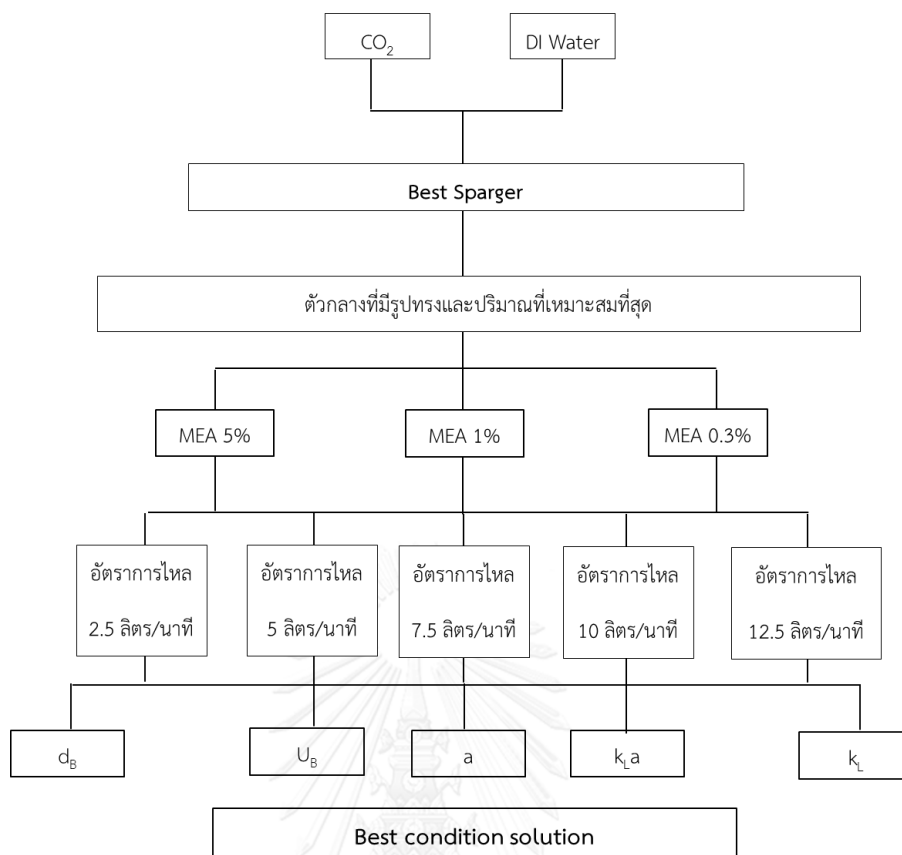
3.5.1.4 วิธีการทดลองคอลัมน์แบบฟองอากาศในการทดลองช่วงที่สี่

ในการทดลองคอลัมน์แบบฟองอากาศในการทดลองช่วงที่สี่จะศึกษาอิทธิพลด้านกายภาพของหัวกระจายอากาศ รูปทรงของตัวกลางรวมถึงปริมาณของตัวกลาง และด้านเคมีด้วยการปรับเปลี่ยนเฟสของเหลวด้วย MEA ที่ได้จากการทดลองช่วงที่ 1 – 3 ที่มีผลต่อการถ่ายเทมวลสาร ซึ่งจะอธิบายดังต่อไปนี้โดยมีรูปที่ 3.13 เป็นรูปแบบจำลองวิธีการทดลอง ในการทดลองนี้ในส่วนของเฟสก๊าซจะใช้คาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ชนิดถังอุตสาหกรรมหมายเลขที่ 1 แล้วจะไหลผ่านท่ออากาศซึ่งมีการควบคุมและกำหนดอัตราการไหลที่ 2.5 5 7.5 10 และ 12.5 ลิตรต่อนาที ตามลำดับดังหมายเลข 3 จากนั้นผ่านสู่ท่ออากาศเข้าสู่หัวกระจายอากาศหมายเลข 4 ซึ่งจะมีการเปรียบเทียบหัวกระจายอากาศครั้งละชนิดจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ หัวกระจายอากาศแบบ rigid small หัวกระจายอากาศแบบไม้ และหัวกระจายอากาศแบบ rigid large เพื่อหาผลแตกต่างจากขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้นกับหัวกระจายอากาศในคอลัมน์หมายเลขที่ 5 มีปริมาตรน้ำ 5 ลิตร ในการทดลองนี้จะทดลองระหว่างเฟสก๊าซคือคาร์บอนไดออกไซด์กับเฟสของเหลวซึ่งเป็น MEA ที่ความเข้มข้น 0.3% 1% และ 5% ก่อน เมื่อได้ค่าที่เหมาะสม จะเพิ่มตัวกลาง PP หมายเลข 6 ลงไปใน

คอลัมน์ ทั้ง 3 รูปทรง ได้แก่ ทรงกระบอก สีเหลี่ยม ทรงกลม และทรงกระบอก ที่ปริมาณ 2% 5% และ 10% ในส่วนนี้เฟสของเหลวจะเติมสารละลายลงไป ได้แก่ MEA เพื่อศึกษาความเข้มข้นของเหลวที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ โดยการใช้สาร MEA ที่ความเข้มข้น ดังนี้ 0.3% 1% และ 5% ซึ่งจะตรวจวัดค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เข้าและขาออกหมายเลข 2 โดยขนาดฟองอากาศถูกบันทึกภาพด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงซึ่งจุดโฟกัสภาพห่างจากคอลัมน์ 30 เซนติเมตรแสดงโดยหมายเลข 7 โดยจะแสดงผลเข้าสู่หน้าจอคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรมหมายเลข 8 เพื่อนำไปศึกษาอิทธิพลทางกายภาพ และเคมี เพื่อเปรียบเทียบกับลักษณะขนาดฟองอากาศ ประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารที่เปลี่ยนไป สามารถดูภาพแผนผังการไหลได้ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.13 รูปแบบจำลองวิธีการทดลองคอลัมน์ฟองอากาศในการทดลองช่วงที่สี่



รูปที่ 3.14 แผนผังการไหลวิธีการทดลองคอลัมน์ฟองอากาศช่วงที่สี่

ปัจจัยของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการทดลองคอลัมน์แบบฟองอากาศช่วงที่ 4

1. ตัวแปรควบคุม
 - เฟสก๊าซ คือ คาร์บอนไดออกไซด์ ความเข้มข้น 1.91 mol/L
 - เฟสของเหลว คือน้ำประปา ปริมาณ 10 ลิตร
2. ตัวแปรต้น
 - หัวกระจายฟองอากาศ 3 ชนิด คือ หัวกระจายอากาศแบบ rigid small หัวกระจายอากาศแบบไม้ และหัวกระจายอากาศแบบ rigid large
 - อัตราการไหล ที่ 2.5 5 7.5 10 และ 12.5 ลิตรต่อนาที
 - รูปทรงของตัวกลาง ได้แก่ ทรงกลม ทรงกระบอก สี่เหลี่ยม และ ทรงกระบอกกลวง
 - ปริมาณตัวกลาง 2% 5% และ 10%
 - ความเข้มข้นของสารละลายในเฟสของเหลว โมโน เอทานอลามีนที่ 0.3 – 5%

3. ตัวแปรตาม

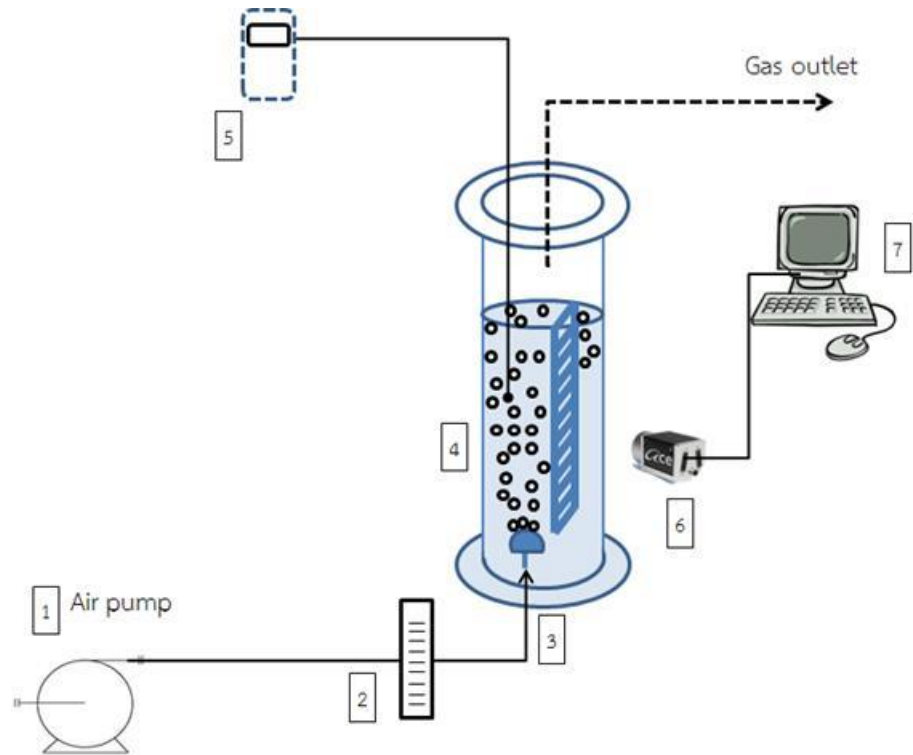
- พารามิเตอร์ที่ใช้ได้แก่ ขนาดของฟองอากาศ (d_B) ความเร็วของฟองอากาศ (U_B) พื้นที่ผิวสัมผัส (a) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม ($k_L a$) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลย่อย (k_L) และประสิทธิภาพการดูดซึม (E_{ff}) ค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์

3.5.2 วิธีการทดลองคอลัมน์แบบอากาศยก

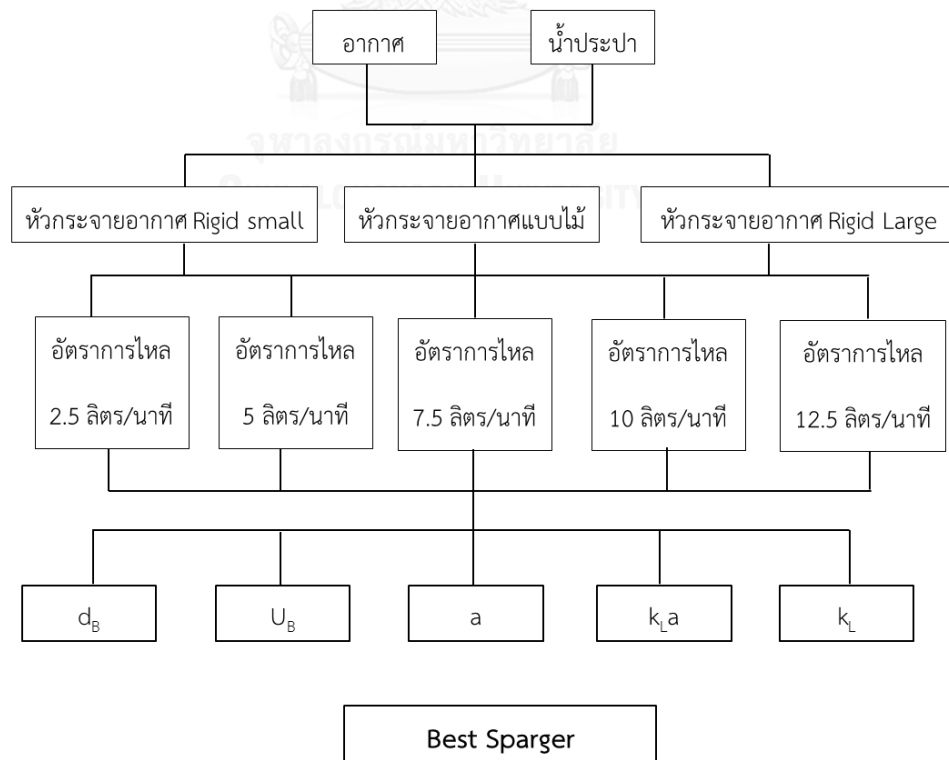
ซึ่งจะแบ่งเป็น 4 ช่วงการทดลอง ดังต่อไปนี้

3.5.2.1 วิธีการทดลองคอลัมน์แบบอากาศยกในการทดลองช่วงที่หนึ่ง

ในการทดลองคอลัมน์แบบอากาศยกในการทดลองช่วงที่หนึ่งจะศึกษาอิทธิพลด้านกายภาพของหัวกระจายอากาศที่ให้ผลขนาดฟองอากาศมีผลต่อการถ่ายเทมวลสาร ซึ่งจะอธิบายดังต่อไปนี้โดยมีรูปภาพที่ 3.15 เป็นรูปแบบจำลองวิธีการทดลอง ในการทดลองนี้ในส่วนของเฟสก๊าซจะใช้อากาศโดยจะกำหนดค่าออกซิเจนเริ่มต้นให้เป็นศูนย์ด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ อากาศจะถูกสร้างด้วยปั๊มอากาศดังหมายเลขที่ 1 แล้วจะไหลผ่านท่ออากาศซึ่งมีการควบคุมและกำหนดอัตราการไหลที่ 2.5 5 7.5 10 และ 12.5 ลิตรต่อนาที ตามลำดับดังหมายเลข 2 จากนั้นผ่านสู่ท่ออากาศเข้าสู่หัวกระจายอากาศหมายเลข 3 ซึ่งจะมีการเปรียบเทียบหัวกระจายอากาศครั้งละชนิดจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ หัวกระจายอากาศแบบ rigid small หัวกระจายอากาศแบบไม้ และหัวกระจายอากาศแบบ rigid large เพื่อหาผลแตกต่างจากขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้นกับหัวกระจายอากาศในคอลัมน์หมายเลขที่ 4 มีปริมาตรน้ำ 13 ลิตร โดยจะอ่านค่าเปลี่ยนแปลงออกซิเจนละลายน้ำด้วยเครื่องวัดออกซิเจนละลายน้ำ (DO meter) หมายเลข 5 โดยขนาดฟองอากาศถูกบันทึกภาพด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงซึ่งจุดโฟกัสภาพห่างจากคอลัมน์ 30 เซนติเมตรหมายเลข 6 โดยจะแสดงผลเข้าสู่หน้าจอคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรมหมายเลข 7 สิ่งที่คาดหวังจากการทดลองช่วงนี้ คือ หัวกระจายอากาศที่ให้ขนาดฟองอากาศที่เล็กที่สุดซึ่งจะมีผลต่อการดูดซึม เพื่อนำไปศึกษาอิทธิพลทางกายภาพเพื่อเปรียบเทียบกับลักษณะขนาดฟองอากาศ ประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารที่เปลี่ยนไป สามารถดูภาพแผนผังการไหลได้ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.15 รูปแบบจำลองวิธีการทดลองคอลัมน์แบบอากาศยกการทดลองช่วงที่หนึ่ง



รูปที่ 3.16 แผนผังวิธีการทดลองคอลัมน์แบบอากาศยกช่วงที่หนึ่ง

ปัจจัยของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการทดลองคอลัมน์แบบอากาศยกช่วงที่ 1

1. ตัวแปรควบคุม

- เฟสก๊าซ คือ อากาศ
- เฟสของเหลว คือน้ำประปา ปริมาณ 10 ลิตร

2. ตัวแปรต้น

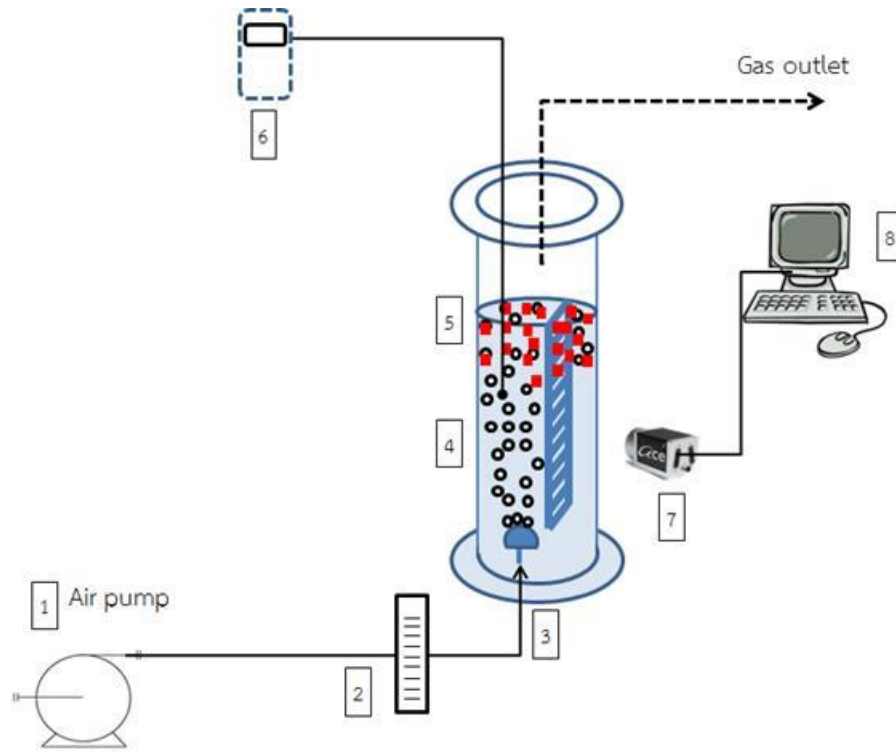
- อัตราการไหล ที่ 2.5 5 7.5 10 และ 12.5 ลิตรต่อนาที
- หัวกระจายฟองอากาศ 3 ชนิด คือ หัวกระจายอากาศแบบ rigid small หัวกระจายอากาศแบบไม้ และหัวกระจายอากาศแบบ rigid large

3. ตัวแปรตาม

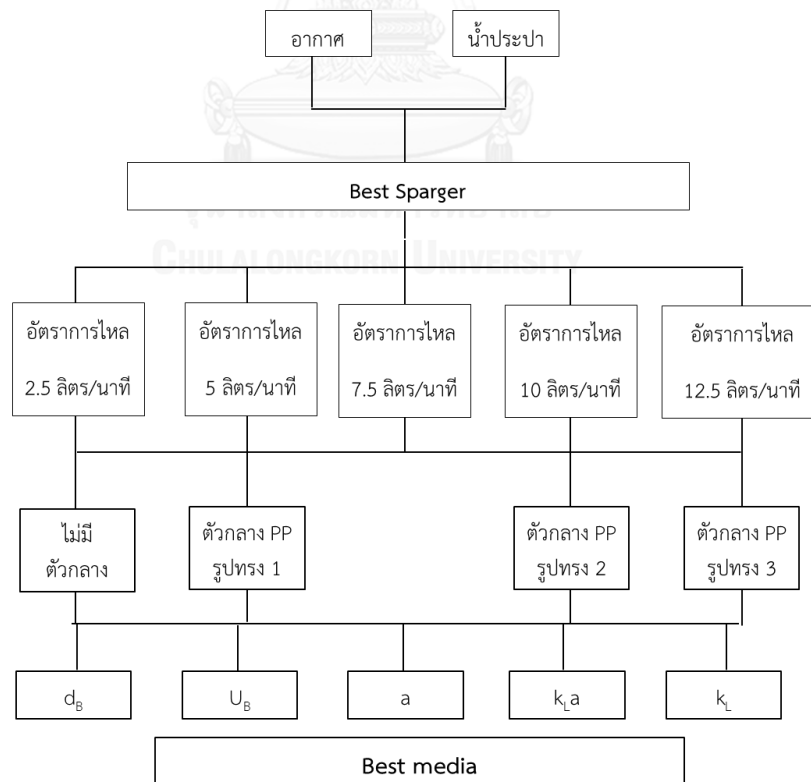
พารามิเตอร์ที่ใช้ ได้แก่ ขนาดของฟองอากาศ (d_b) ความเร็วของฟองอากาศ (U_b) พื้นที่ผิวสัมผัส (a) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม ($k_L a$) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลย่อย (k_L)

3.5.2.2 วิธีการทดลองคอลัมน์แบบอากาศยกในการทดลองช่วงที่สอง

ในการทดลองคอลัมน์แบบอากาศยกในการทดลองช่วงที่สองจะศึกษาอิทธิพลด้านกายภาพของรูปทรง และปริมาณของตัวกลางรวมไปถึงหัวกระจายอากาศที่ได้จากการทดลองช่วงที่หนึ่ง ซึ่งผลต่อการถ่ายเทมวลสาร ซึ่งจะอธิบายดังต่อไปนี้โดยมีรูปที่ 3.17 เป็นรูปแบบจำลองวิธีการทดลอง ในการทดลองนี้ในส่วนของเฟสก๊าซจะใช้อากาศโดยจะกำหนดค่าออกซิเจนเริ่มต้นให้เป็นศูนย์ด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ อากาศจะถูกสร้างด้วยปั๊มอากาศตั้งหมายเลขที่ 1 แล้วจะไหลผ่านท่ออากาศซึ่งมีการควบคุมและกำหนดอัตราการไหลที่ 2.5 5 7.5 10 และ 12.5 ลิตรต่อนาที ตามลำดับตั้งหมายเลข 2 จากนั้นผ่านสู่ท่ออากาศเข้าสู่หัวกระจายอากาศหมายเลข 3 ซึ่งจะมีการเปรียบเทียบหัวกระจายอากาศครั้งละชนิดจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ หัวกระจายอากาศแบบ rigid small หัวกระจายอากาศแบบไม้ และหัวกระจายอากาศแบบ rigid large เพื่อหาผลแตกต่างจากขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้นกับหัวกระจายอากาศในคอลัมน์หมายเลขที่ 4 มีปริมาตรน้ำ 13 ลิตร จากนั้นมีการเติมตัวกลาง PP ตามรูปทรงต่างๆ หมายเลข 5 ทั้ง 4 รูปทรง ได้แก่ ทรงกระบอก สีเหลี่ยม ทรงกลม และทรงกระบอกกลวง ที่ปริมาณ 2% 5% และ 10% โดยจะอ่านค่าเปลี่ยนแปลงออกซิเจนละลายน้ำด้วยเครื่องวัดออกซิเจนละลายน้ำ (DO meter) หมายเลข 6 โดยขนาดฟองอากาศถูกบันทึกภาพด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงซึ่งจุดโฟกัสภาพห่างจากคอลัมน์ 30 เซนติเมตรหมายเลข 7 โดยจะแสดงผลเข้าสู่หน้าจocomพิวเตอร์ผ่านโปรแกรมหมายเลข 8 สิ่งที่คาดหวังจากการทดลองนี้คือรูปทรงและปริมาณของตัวกลางที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซึมได้ดีที่สุด เพื่อนำไปศึกษาอิทธิพลทางกายภาพเพื่อเปรียบเทียบกับลักษณะขนาดฟองอากาศ ประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารที่เปลี่ยนไป สามารถดูภาพแผนผังการไหลได้ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.17 รูปแบบจำลองวิธีการทดลองคอลัมน์แบบอากาศยการทดลองช่วงที่สอง



รูปที่ 3.18 แผนผังวิธีการทดลองคอลัมน์แบบอากาศยการทดลองช่วงที่สอง

ปัจจัยของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการทดลองคอลัมน์แบบอากาศยกช่วงที่ 2

1. ตัวแปรควบคุม

- เฟสก๊าซ คือ อากาศ
- เฟสของเหลว คือน้ำประปา ปริมาณ 10 ลิตร

2. ตัวแปรต้น

- หัวกระจายฟองอากาศ 3 ชนิด คือ หัวกระจายอากาศแบบ rigid small หัวกระจายอากาศแบบไม้ และหัวกระจายอากาศแบบ rigid large

- อัตราการไหล ที่ 2.5 5 7.5 10 และ 12.5 ลิตรต่อนาที
- รูปทรงของตัวกลาง ได้แก่ ทรงกลม ทรงกระบอก สี่เหลี่ยม และ ทรงกระบอกกลวง
- ปริมาณตัวกลาง 2% 5% และ 10%

3. ตัวแปรตาม

พารามิเตอร์ที่ใช้ ได้แก่ ขนาดของฟองอากาศ (d_b) ความเร็วของฟองอากาศ (U_b) พื้นที่ผิวสัมผัส (a) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม ($k_L a$) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลย่อย (k_L)

3.5.2.3 วิธีการทดลองคอลัมน์แบบอากาศยกในการทดลองช่วงที่สาม

ในการทดลองคอลัมน์แบบอากาศยกในการทดลองช่วงที่สามจะศึกษาอิทธิพลด้านเคมีของสารละลายที่ความเข้มข้นต่างกัน รวมไปถึงการศึกษาทางกายภาพที่ได้จากการทดลองที่ 1- 2 โดยการปรับเปลี่ยนเฟสของเหลวจะมีผลต่อการถ่ายเทมวลสาร ซึ่งจะอธิบายดังต่อไปนี้โดยมีรูปภาพที่ 3.19 เป็นรูปแบบจำลองวิธีการทดลอง ในการทดลองนี้ในส่วนของเฟสก๊าซจะใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่เจือจางด้วยอากาศเพื่อให้ได้ความเข้มข้น CO_2 ที่ประมาณ 7,500 ppm อากาศจะถูกสร้างด้วยปั๊มอากาศดังหมายเลขที่ 1 แล้วจะไหลผ่านท่ออากาศซึ่งมีการควบคุมและกำหนดอัตราการไหลที่ 2.5 5 7.5 10 และ 12.5 ลิตรต่อนาที ตามลำดับดังหมายเลข 2 จากนั้นผ่านสู่ท่ออากาศเข้าสู่หัวกระจายอากาศหมายเลข 3 ซึ่งจะมีการเปรียบเทียบหัวกระจายอากาศครั้งละชนิดจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ หัวกระจายอากาศแบบ rigid small หัวกระจายอากาศแบบไม้ และหัวกระจายอากาศแบบ rigid large เพื่อหาผลแตกต่างจากขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้นกับหัวกระจายอากาศในคอลัมน์หมายเลขที่ 4 มีปริมาตรน้ำ 13 ลิตร จากนั้นมีการเติมตัวกลาง PP ตามรูปทรงต่างๆ หมายเลข 5 ทั้ง 4 รูปทรง ได้แก่ ทรงกระบอก สี่เหลี่ยม ทรงกลม และทรงกระบอก ที่ปริมาณ 2% 5% และ 10% ในส่วนนี้เฟสของเหลวจะเติมสารละลายลงไป ได้แก่ MEA เพื่อศึกษาความเข้มข้นของของเหลวที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ โดยการใช้สาร MEA ที่ความเข้มข้น ดังนี้ 1% 5% และ 10% โดยจะอ่านค่าเปลี่ยนแปลงออกซิเจนละลายน้ำด้วยเครื่องวัดออกซิเจนละลายน้ำ (DO meter) หมายเลข 6 โดยขนาดฟองอากาศถูกบันทึกภาพด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงซึ่งจุดโฟกัสภาพห่างจากคอลัมน์ 30

เซนติเมตรหมายเลข 7 โดยจะแสดงผลเข้าสู่หน้าจอคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรมหมายเลข 8 สิ่งทีคาดหวังจากการทดลองนี้ คือ ความเข้มข้นของสารละลาย MEA ที่ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซึ่มดีที่สุด เพื่อนำไปศึกษาอิทธิพลทางเคมี และกายภาพ ด้วยการเปรียบเทียบกับลักษณะขนาดฟองอากาศ ประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารที่เปลี่ยนไป สามารถดูภาพแผนผังการไหลได้ดังรูปที่ 3.20

ปัจจัยของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการทดลองคอลัมน์แบบอากาศยกช่วงที่ 3

1. ตัวแปรควบคุม

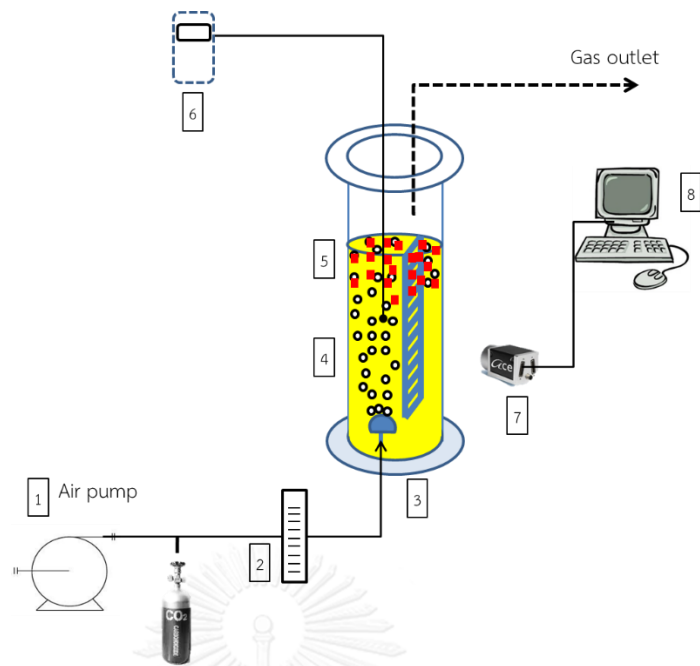
- เฟสก๊าซ คือ อากาศ
- เฟสของเหลว คือน้ำประปา ปริมาณ 10 ลิตร

2. ตัวแปรต้น

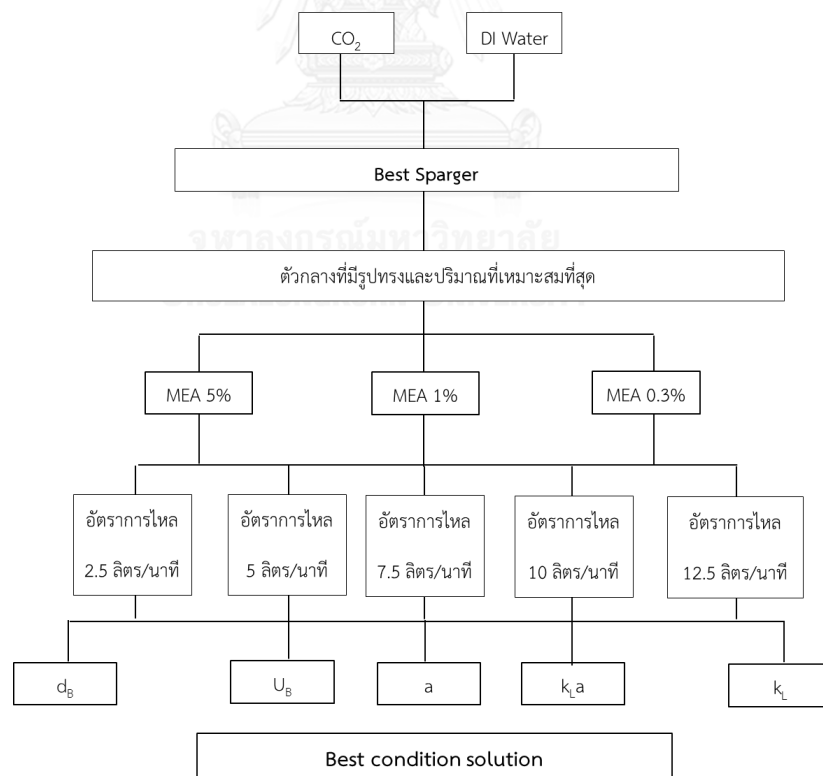
- หัวกระจายฟองอากาศ 3 ชนิด คือ หัวกระจายอากาศแบบ rigid small หัวกระจายอากาศแบบไม้ และหัวกระจายอากาศแบบ rigid large
- อัตราการไหล ที่ 2.5 5 7.5 10 และ 12.5 ลิตรต่อนาที
- รูปทรงของตัวกลาง ได้แก่ ทรงกลม ทรงกระบอก สี่เหลี่ยม และ ทรงกระบอกกลวง
- ปริมาณตัวกลาง 2% 5% และ 10%
- ความเข้มข้นของสารละลายในเฟสของเหลว โมโน เอทานอลามีนที่ 0.3 – 5%

3. ตัวแปรตาม

พารามิเตอร์ที่ใช้ ได้แก่ ขนาดของฟองอากาศ (d_b) ความเร็วของฟองอากาศ (U_b) พื้นที่ผิวสัมผัส (a) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม ($k_L a$) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลย่อย (k_L) และประสิทธิภาพการดูดซึ่ม (Eff)



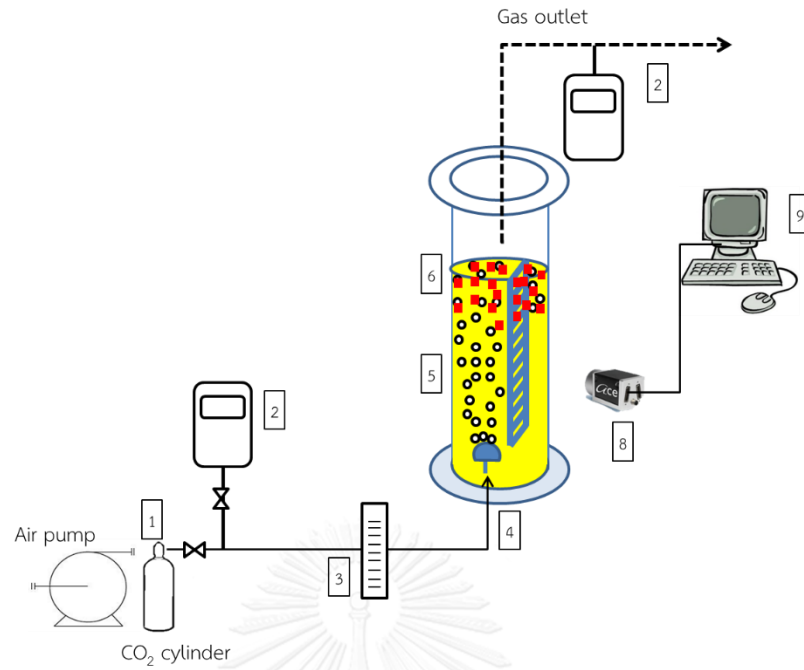
รูปที่ 3.19 รูปแบบจำลองวิธีการทดลองคอลัมน์แบบอากาศยกการทดลองช่วงที่สาม



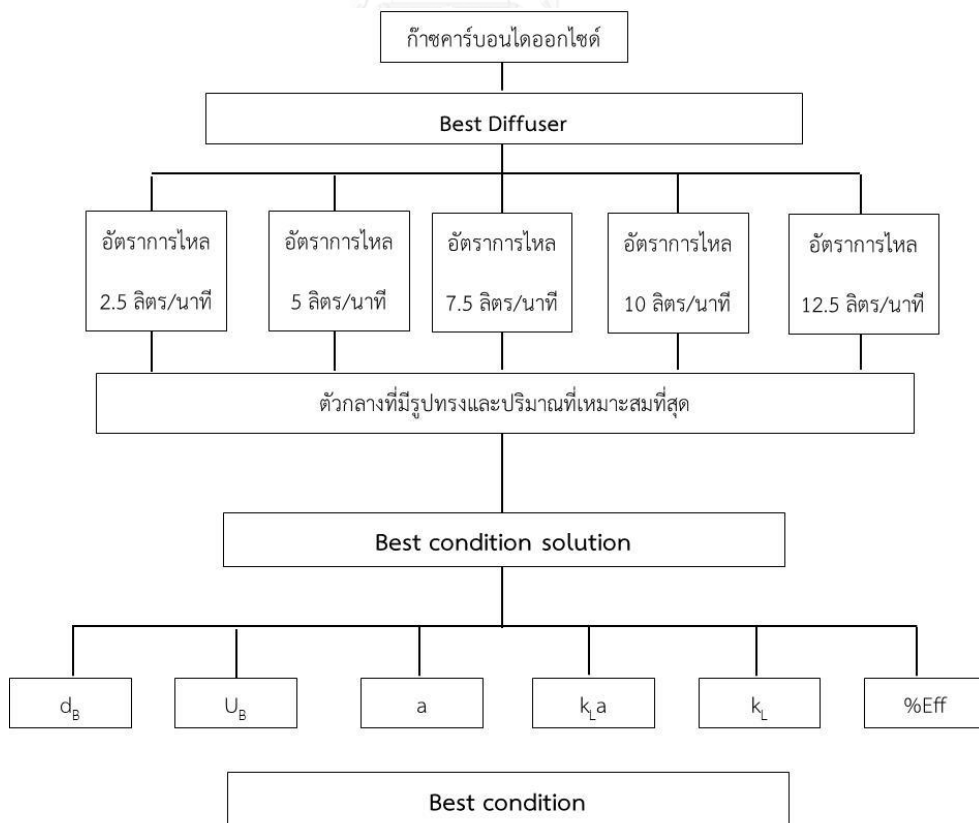
รูปที่ 3.20 แผนผังวิธีการทดลองคอลัมน์แบบอากาศยกช่วงที่สาม

3.5.2.4 วิธีการทดลองคอลัมน์แบบอากาศยกในการทดลองช่วงที่สี่

ในการทดลองคอลัมน์แบบอากาศยกในการทดลองช่วงที่สี่จะศึกษาอิทธิพลด้านกายภาพของหัวกระจายอากาศ รูปทรงของตัวกลางรวมถึงปริมาณของตัวกลาง และด้านเคมีด้วยการปรับเปลี่ยนเฟสของเหลว MEA ที่มีผลต่อการถ่ายเทมวลสาร ซึ่งจะอธิบายดังต่อไปนี้โดยมีรูปภาพที่ 3.21 เป็นรูปแบบจำลองวิธีการทดลอง ในการทดลองนี้ในส่วนของเฟสก๊าซจะใช้คาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ชนิดถังอุตสาหกรรมหมายเลขที่ 1 แล้วจะไหลผ่านท่ออากาศซึ่งมีการควบคุมและกำหนดอัตราการไหลที่ 2.5 5 7.5 10 และ 12.5 ลิตรต่อนาที ตามลำดับดังหมายเลข 3 จากนั้นผ่านสู่ท่ออากาศเข้าสู่หัวกระจายอากาศหมายเลข 4 ซึ่งจะมีการเปรียบเทียบหัวกระจายอากาศครั้งละชนิดจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ หัวกระจายอากาศแบบ rigid small หัวกระจายอากาศแบบไม้ และหัวกระจายอากาศแบบ rigid large เพื่อหาผลแตกต่างจากขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้นกับหัวกระจายอากาศในคอลัมน์หมายเลขที่ 5 มีปริมาตรน้ำ 13 ลิตร ในการทดลองนี้จะทดลองระหว่างเฟสก๊าซคือคาร์บอนไดออกไซด์กับเฟสของเหลวซึ่งเป็น MEA ที่ความเข้มข้น 0.3% 1% และ 5% ก่อนเมื่อได้ค่าที่เหมาะสม จะเพิ่มตัวกลาง PP หมายเลข 6 ลงไปในคอลัมน์ ทั้ง 4 รูปทรง ได้แก่ ทรงกระบอก สี่เหลี่ยม ทรงกลม และทรงกระบอกกลวง ที่ปริมาณ 2% 5% และ 10% ในส่วนนี้เฟสของเหลวจะเติมสารละลายลงไป ได้แก่ MEA เพื่อศึกษาความเข้มข้นของของเหลวที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ โดยการใช้สาร MEA ที่ความเข้มข้น ดังนี้ 0.3% 1% และ 5% ซึ่งจะมีตรวจวัดค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ขาเข้าและขาออก หมายเลข 2 โดยขนาดฟองอากาศถูกบันทึกภาพด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงซึ่งจุดโฟกัสภาพห่างจากคอลัมน์ 30 เซนติเมตรหมายเลข 7 โดยจะแสดงผลเข้าสู่หน้าจคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรมหมายเลข 8 เพื่อนำไปศึกษาอิทธิพลทางกายภาพ และเคมี เพื่อเปรียบเทียบกับลักษณะขนาดฟองอากาศ ประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารที่เปลี่ยนไป สามารถดูภาพแผนผังการไหลได้ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.21 รูปแบบจำลองวิธีการทดลองคอลัมน์แบบอากาศยกการทดลองช่วงที่สี่



รูปที่ 3.22 แสดงแผนผังการไหลวิธีการทดลองคอลัมน์แบบอากาศยกช่วงที่สี่

ปัจจัยของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการทดลองคอลัมน์แบบอากาศยก ช่วงที่ 4

1. ตัวแปรควบคุม

- เฟสก๊าซ คือ อากาศ
- เฟสของเหลว คือน้ำประปา ปริมาณ 10 ลิตร

2. ตัวแปรต้น

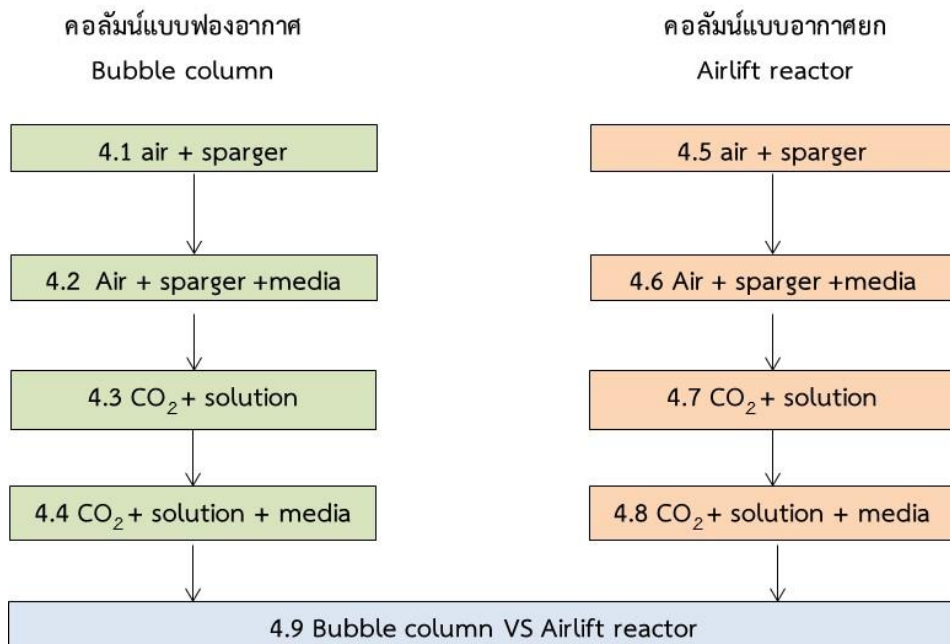
- หัวกระจายฟองอากาศ 3 ชนิด คือ หัวกระจายอากาศแบบ rigid small หัวกระจายอากาศแบบไม้ และหัวกระจายอากาศแบบ rigid large
- อัตราการไหล ที่ 2.5 5 7.5 10 และ 12.5 ลิตรต่อนาที
- รูปทรงของตัวกลาง ได้แก่ ทรงกลม ทรงกระบอก สี่เหลี่ยม และ ทรงกระบอกกลวง
- ปริมาณตัวกลาง 2% 5% และ 10%
- ความเข้มข้นของสารละลายในเฟสของเหลว โมโน เอทานอลามีนที่ 0.3 – 5%

3. ตัวแปรตาม

พารามิเตอร์ที่ใช้ ได้แก่ ขนาดของฟองอากาศ (d_b) ความเร็วของฟองอากาศ (U_b) พื้นที่ผิวสัมผัส (a) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม ($k_L a$) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลย่อย (k_L) และ ประสิทธิภาพการดูดซึม (Eff) ค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อทำการทดลองครบทั้งสองคอลัมน์ จะนำผลการทดลองมาวิเคราะห์เปรียบเทียบในเชิงด้านการออกแบบและปัจจัยด้านการดำเนินการทดลอง เพื่อหาแนวทางเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซึม CO_2 ต่อไป

บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์กลไกการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีปัจจัยเกี่ยวข้อง ได้แก่ อัตราการไหลก๊าซ ขนาดหัวกระจายฟองอากาศ รูปทรงตัวกลาง ปริมาณตัวกลาง ชนิดของเหลวดูดซับ และความเข้มข้นของเหลวดูดซับ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลต่อตัวแปรด้านการถ่ายเทมวล และตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ โดยงานวิจัยนี้ได้ผลการดำเนินงานวิจัยคอลัมน์ 2 ชนิด ได้แก่ คอลัมน์แบบชนิดฟองอากาศ และคอลัมน์แบบอากาศยก โดยสรุปภาพรวมงานวิจัยดังรูปที่ 4.1 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 ภาพรวมสรุปงานผลวิจัย

4.1 คอลัมน์แบบฟองอากาศ (Bubble column reactor : BCR)

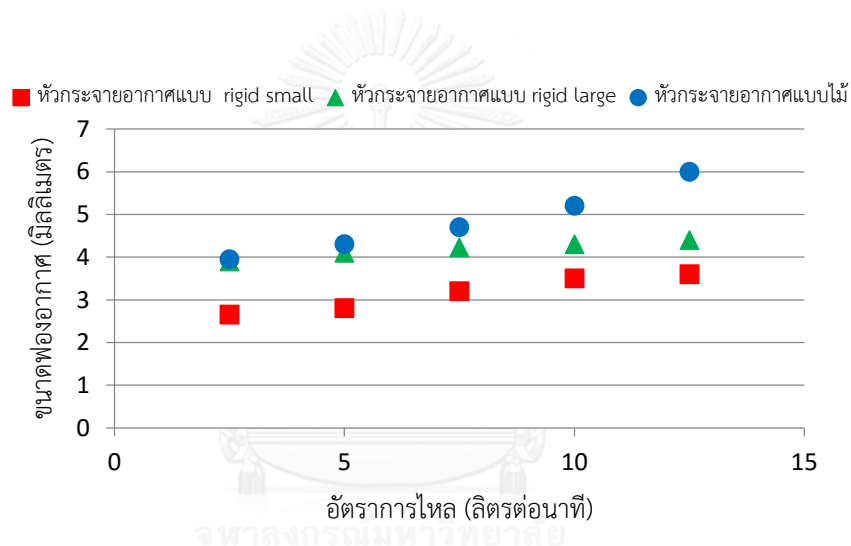
ผลจากการใช้หัวกระจายฟองอากาศแบบไม้ หัวกระจายอากาศ rigid ขนาดเล็ก หัวกระจายอากาศ rigid ขนาดใหญ่ เมื่อไม่ใช้ตัวกลางพลาสติก

4.1.1 ขนาดฟองอากาศ

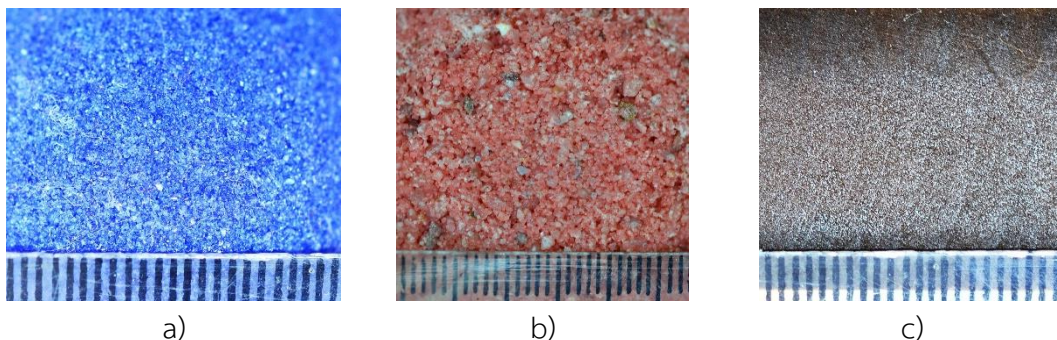
จากรูปที่ 4.2 แสดงผลของขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้นจากหัวกระจายฟองอากาศทั้ง 3 แบบ ได้แก่ หัวกระจายฟองอากาศแบบไม้ หัวกระจายฟองอากาศ rigid small และหัวกระจายอากาศ rigid large เมื่อเดินระบบในคอลัมน์แบบไม้ไม่ใช้ตัวกลางพลาสติก จะเห็นได้ว่า ขนาดฟองอากาศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลก๊าซเพิ่มขึ้น และเห็นได้ชัดว่าหัวกระจายอากาศแบบไม้มีขนาด

ฟองอากาศใหญ่มากที่สุด รองลงมาคือหัวกระจายอากาศแบบ rigid large และหัวกระจายอากาศแบบ rigid small มีขนาดฟองอากาศเล็กสุด ซึ่งอาจมาจากลักษณะของรูบนหัวกระจายอากาศส่งผลต่อขนาดของฟองอากาศ ดังรูปที่ 4.3 ส่วนหัวกระจายอากาศแบบไม้นั้นลักษณะภายนอกอาจจะดูละเอียด ซึ่งน่าจะให้ขนาดฟองอากาศที่เล็ก แต่เมื่อทดลองกลับพบว่า ลักษณะหน้าตัดของหัวกระจายอากาศแบบไม้ที่เป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งมีรูที่ฟองอากาศออกได้เพียง 2 พื้นผิวเท่านั้น และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซแล้วทำให้ฟองอากาศขึ้นไปรวมตัวกันหรือชนกัน ทำให้มีขนาดใหญ่ ดูได้จากภาพประกอบที่ 4.4

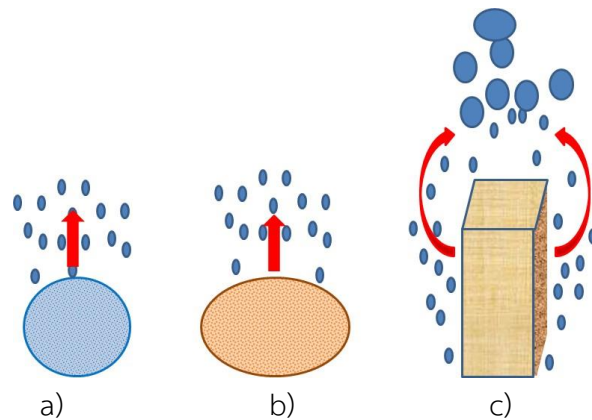
ทั้งนี้ทั้งนั้น เมื่อเพิ่มอัตราการไหลที่สูงขึ้น ในคอลัมน์จะเกิดการไหลของฟองอากาศที่ปั่นป่วนมากขึ้นทำ อาจทำให้การชนกันของฟองอากาศมีโอกาสมากขึ้นเป็นผลให้มีขนาดฟองอากาศที่ใหญ่ขึ้น



รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบขนาดฟองอากาศที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบไม้ แบบ rigid ขนาดเล็ก และแบบ rigid ขนาดใหญ่ เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก



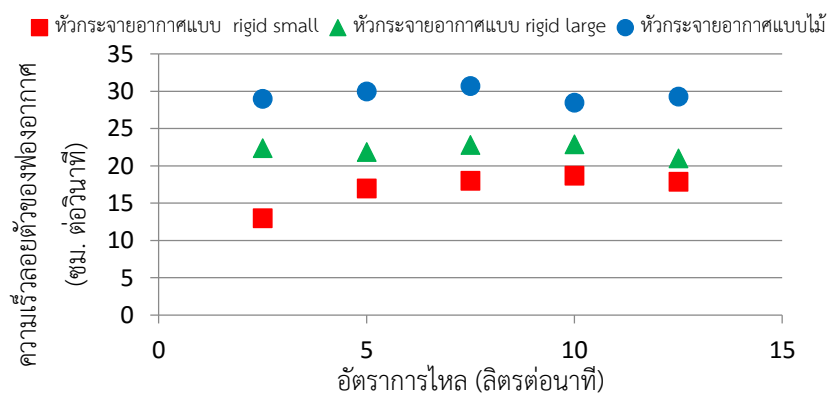
รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายแสดงลักษณะรูและผิวของหัวกระจายอากาศ a) rigid ขนาดเล็ก b) แบบ rigid ขนาดใหญ่ และ c) แบบ แบบไม้ (scale มิลลิเมตร)



รูปที่ 4.4 แสดงทิศทางการไหลของฟองอากาศ a) rigid ขนาดเล็ก b) แบบ rigid ขนาดใหญ่ และ c) แบบ แบบไม้

4.1.2 ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าความเร็วลอยตัวของฟองอากาศที่เกิดขึ้นจากหัวกระจายฟองอากาศทั้ง 3 แบบ ได้แก่ หัวกระจายฟองอากาศแบบไม้ หัวกระจายฟองอากาศ rigid small และ หัวกระจายฟองอากาศ rigid large เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก เมื่อเพิ่มอัตราการไหลสูงขึ้นความเร็วลอยตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากเมื่อเพิ่มอัตราการไหลจะทำให้ภายในระบบมีการปั่นป่วนมากขึ้น ฟองอากาศจึงไม่ได้เคลื่อนที่เป็นแนวตั้งการไหลเป็นแบบ Heterogeneous และพบว่าขนาดฟองอากาศมีผลต่อความเร็วลอยตัว ดังสมการที่ 4.1 โดยที่ขนาดฟองอากาศเล็กกว่าจะมีความเร็วลอยตัวช้ากว่า หัวกระจายฟองอากาศแบบไม้ให้ขนาดฟองอากาศใหญ่ที่สุดจึงทำให้มีความเร็วลอยตัวมากที่สุด รองลงมาคือหัวกระจายแบบ rigid large และหัวกระจายฟองอากาศแบบ rigid small มีความเร็วต่ำสุดเนื่องจากมีขนาดฟองอากาศเล็กที่สุด ซึ่งทั้ง 3 หัวกระจายฟองอากาศแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05



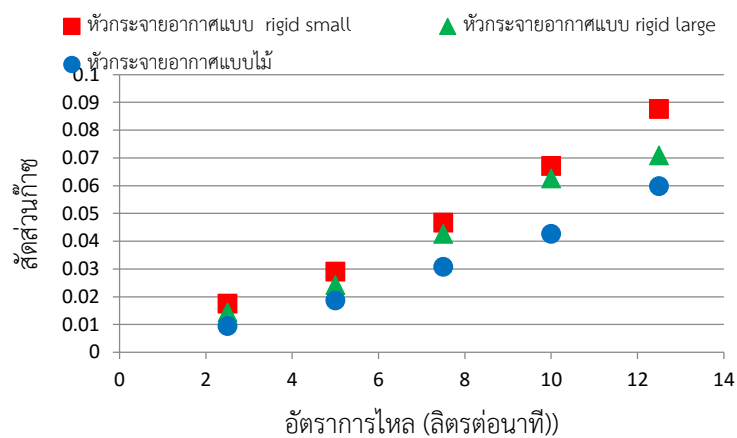
รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบความเร็วลอยตัวของฟองอากาศที่เกิดจากหัวกระจายฟองอากาศแบบไม้ แบบ rigid ขนาดเล็ก และแบบ rigid ขนาดใหญ่ เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก

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

- 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 สัดส่วนก๊าซ

สัดส่วนก๊าซวัดจากปริมาณความสูงของฟองอากาศที่เพิ่มขึ้นจากจุดที่ไม่มีการเติมอากาศสู่ระบบจากนั้นนำไปคำนวณสมการ 3.6 จากรูปที่ 4.6 สัดส่วนก๊าซที่เกิดขึ้นจากหัวกระจายฟองอากาศทั้ง 3 แบบ ได้แก่ หัวกระจายฟองอากาศแบบไม้ หัวกระจายฟองอากาศ rigid small และหัวกระจายฟองอากาศ rigid large เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก ค่าสัดส่วนก๊าซใกล้เคียงกันที่อัตราการไหล 2.5 ลิตรต่อวินาที และมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซ โดยที่สัดส่วนก๊าซจากหัวกระจายฟองอากาศแบบ rigid small มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือหัวกระจายฟองอากาศ rigid large และหัวกระจายฟองอากาศแบบไม้ ซึ่งอาจมีผลมาจากขนาดฟองอากาศที่มีขนาดแตกต่างกัน ดังสมการที่ 4.2 ที่ขนาดฟองอากาศใหญ่กว่าอาจจะลอยตัวได้เร็วกว่าและทำให้แตกตัวเร็วกว่าเมื่อเจอผิวอากาศด้านบน ทำให้มีค่าสัดส่วนก๊าซที่น้อยกว่าหัวกระจายฟองอากาศที่ให้ขนาดฟองอากาศเล็กกว่า



รูปที่ 4.6 สัดส่วนก๊าซที่เกิดขึ้นจากหัวกระจายฟองอากาศแบบไม้ แบบ rigid ขนาดเล็ก และแบบ rigid ขนาดใหญ่ เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก

$$a = \frac{6\epsilon_g}{d_s} \quad 4.2$$

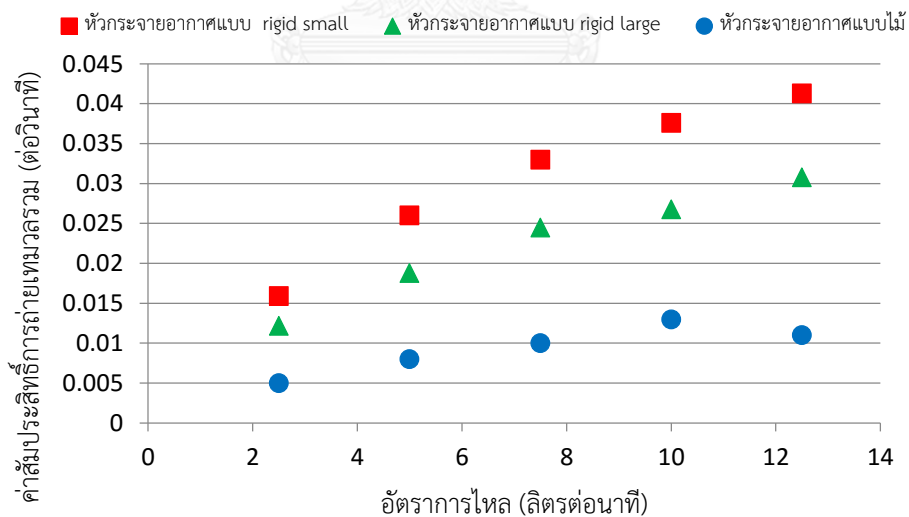
เมื่อ a คือ พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (ต่อเมตร)

ϵ_g คือ สัดส่วนก๊าซ

d_s คือ ค่าเฉลี่ยขนาดฟองอากาศ (เมตร)

4.1.5 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม

จากรูปที่ 4.7 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมที่เกิดขึ้นจากหัวกระจายฟองอากาศทั้ง 3 แบบ ได้แก่ หัวกระจายฟองอากาศแบบไม้ หัวกระจายฟองอากาศ rigid small และหัวกระจายฟองอากาศ rigid large เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่อัตราการไหลเพิ่มขึ้น โดยที่หัวกระจายฟองอากาศ rigid small มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมสูงกว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมจากหัวกระจายฟองอากาศ rigid large และหัวกระจายฟองอากาศแบบไม้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมต่ำสุด ซึ่งสอดคล้องกับค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ ทั้งนี้งานวิจัยนี้ใช้น้ำประปาเป็นเฟสของเหลวเป็นผลให้สมบัติทางกายภาพในเฟสของเหลวไม่แปรผันมากนัก ซึ่งทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในเฟสของเหลวของน้ำประปาค่อนข้างคงที่ อยู่ในช่วง $(1 - 4) \times 10^{-4}$ เมตรต่อวินาที (Sardeing et al., 2006)



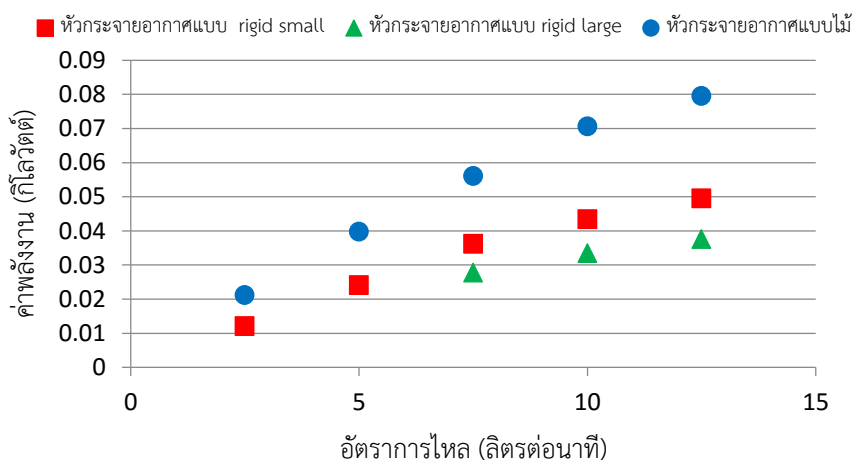
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมที่เกิดจากหัวกระจายฟองอากาศแบบไม้ แบบ rigid ขนาดเล็ก และแบบ rigid ขนาดใหญ่ เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก

4.1.6 ค่าการใช้พลังงาน

จากรูปที่ 4.8 แสดงค่าการใช้พลังงานที่เกิดขึ้นในสมการที่ 4.3 จากหัวกระจายฟองอากาศทั้ง 3 แบบ ได้แก่ หัวกระจายฟองอากาศแบบไม้ หัวกระจายฟองอากาศ rigid small และหัวกระจายอากาศ rigid large เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก จะเห็นได้ว่าค่าพลังงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่อัตราการไหลเพิ่มขึ้น โดยที่หัวกระจายอากาศแบบไม้ มีค่าการใช้พลังงานมากกว่าค่าพลังงานกระจายอากาศ rigid small และมากกว่าค่าพลังงานหัวกระจายอากาศ rigid large (0.023 – 0.079 kw) (0.012- 0.049 kw) และ (0.027 -0.037 kw) ตามลำดับ โดย หัวกระจายอากาศ rigid large ที่อัตราไหลต่ำไม่สามารถอ่านค่าจากเกจวัดความดันได้ ทั้งนี้เนื่องมาจากหัวกระจายอากาศแบบไม้มีรูขนาดเล็ก และมีพื้นที่ปล่อยอากาศเพียง 2 ด้านจึงต้องการพลังงานสูง และหัวกระจายฟองอากาศ rigid small มีรูขนาดเล็กกว่าจึงมีค่าพลังงานสูงกว่าหัวกระจายอากาศ rigid large ดังนั้นขนาดรู และพื้นที่ผิวของหัวกระจายอากาศมีผลต่อค่าการใช้พลังงาน

$$P_w = \frac{w \times R \times T_1}{29.7 \times n \times e} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{0.283} - 1 \right] \quad 4.3$$

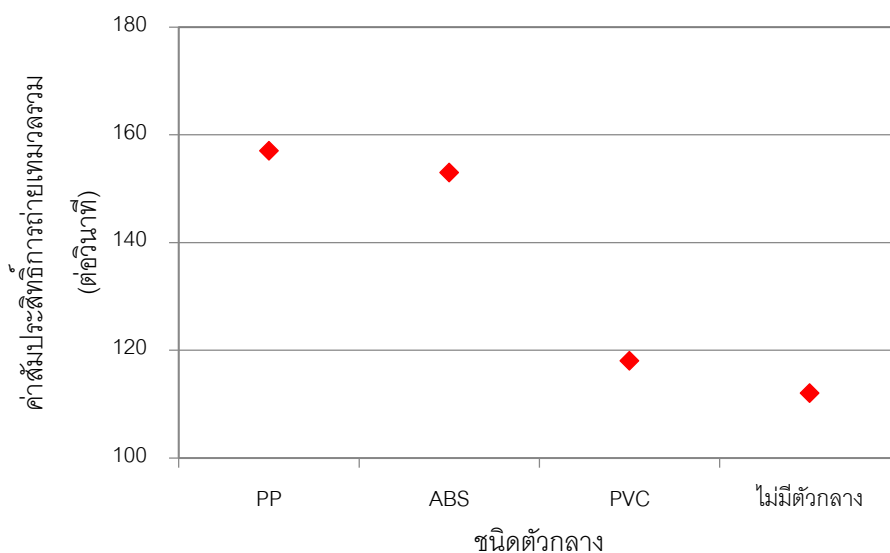
เมื่อ	P_w	คือ กำลังที่จำเป็นในกระบวนการเติมอากาศ หน่วย กิโลวัตต์
	w	คือ น้ำหนักอากาศที่เติมให้กับระบบ หน่วย กก./วินาที
	R	คือ ค่าคงที่ทางวิศวกรรมของอากาศเท่ากับ 8.314 กิโลจูล/กิโลโมล-เคลวิน
	T_1	คือ อุณหภูมิของอากาศขาเข้า หน่วย เคลวิน
	n	คือ ค่าคงที่ของอากาศเท่ากับ 0.283
	e	คือ ประสิทธิภาพเครื่องเป่าอากาศ ประมาณร้อยละ 70 ถึง 90
	p_1	คือ ความดันของอากาศขาเข้า หน่วย บรรยากาศ
	p_2	คือ ความดันของอากาศขาออก หน่วย บรรยากาศ
	P_G	คือ กำลังที่จำเป็นในกระบวนการเติมอากาศ หน่วย วัตต์
	ΔP_{Total}	คือ ความดันลดโดยรวม หน่วย ปาสคาล



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานที่เกิดจากหวักระจ่ายอากาศแบบไม้ แบบ rigid ขนาดเล็ก และแบบ rigid ขนาดใหญ่ เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก

ดังนั้น จากการเปรียบเทียบผลขนาดฟองอากาศ ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ สัดส่วนก๊าซ พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม ที่เกิดจากหวักระจ่ายอากาศแบบไม้ แบบ rigid ขนาดเล็ก และแบบ rigid ขนาดใหญ่ เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก สรุปได้ว่าหวักระจ่ายฟองอากาศ แบบ rigid small และปล่อยฟองอากาศในทิศทางอิสระดังรูปในภาคผนวก ข ดีกว่าหวักระจ่ายอากาศ rigid large ซึ่งมีพื้นที่ผิวรูขนาดใหญ่กว่า และหวักระจ่ายฟองอากาศแบบไม้นั้น แม้จะมีผิวรูขนาดเล็กแต่ปล่อยฟองอากาศได้แค่ 2 ด้าน มีผิวหน้าตัดไม้ขวางกัน จึงเป็นผลให้ผลการวิจัยต่ำกว่าหวักระจ่ายอากาศแบบ rigid ทั้งสองขนาด ทั้งนี้ทั้งนั้นเมื่อพิจารณาในการเลือกชนิดหวักระจ่ายอากาศเพื่อนำไปใช้งานจริงนั้น นอกจากจะดูประสิทธิภาพแล้วค่าพลังงานก็เป็นส่วนสำคัญที่ต้องคำนึงถึง เพื่อรักษาสิ่งแวดล้อม และค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ

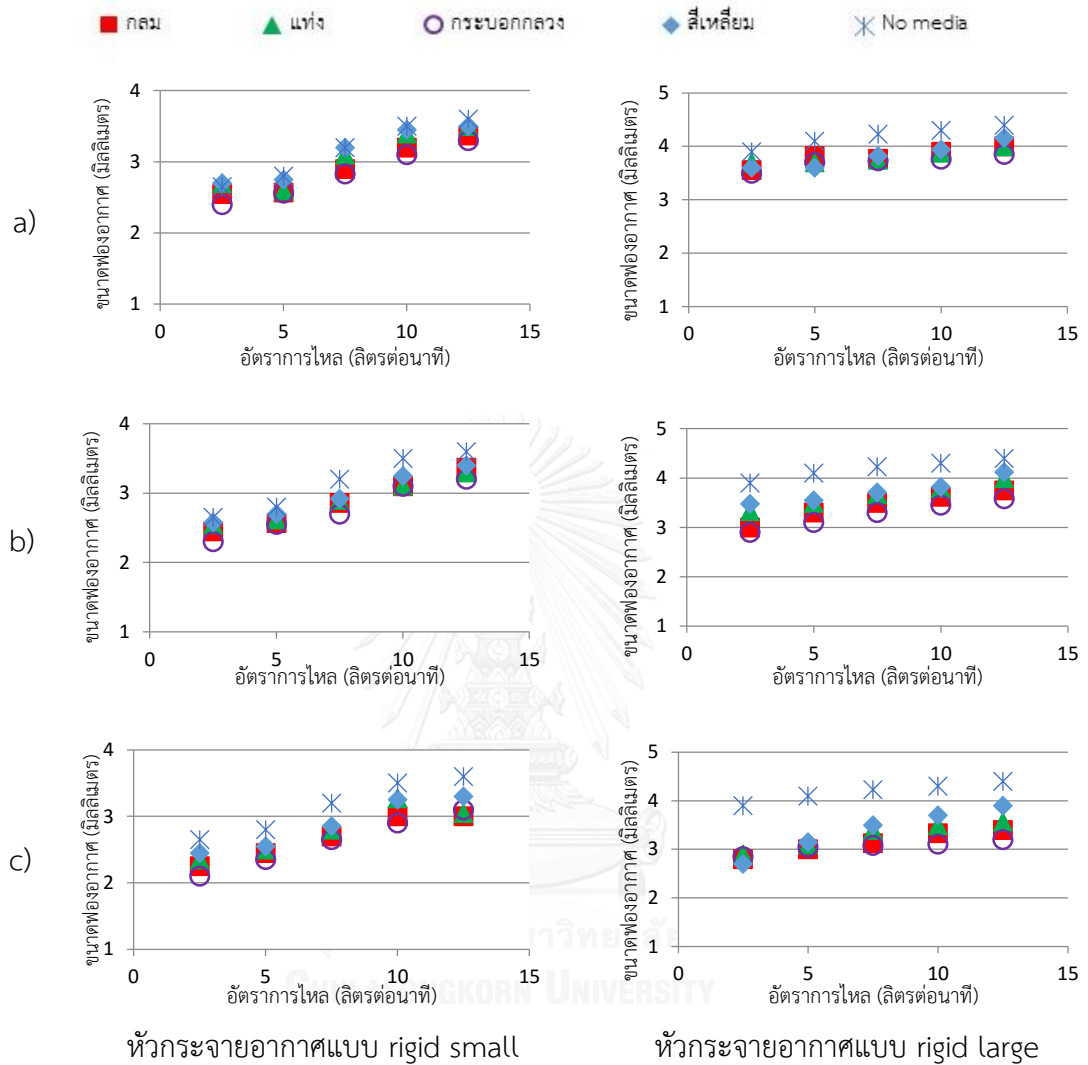
ในงานวิจัยนี้มีความสนใจในการพัฒนาประสิทธิภาพของกลไกการดูดซึม จึงพิจารณาเห็นว่า หากมีการปรับปรุงในคอลัมน์โดยการเพิ่มสมบัติกายภาพภายในระบบด้วยตัวกลางพลาสติกในระบบ และขออ้างอิงผลการวิจัยของ (วราลี วิศาลโกเศ et al., 2556) ซึ่งได้ศึกษาผลจากการใช้ตัวกลาง พลาสติกแตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ พอลิโพรไพลีน (PP) อะคริโลไนไตรล์บิวทาไดอีนสไตรีน (ABS) และพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) เมื่อนำมาทดลองสรุปได้ว่าตัวกลางพลาสติกชนิดพอลิโพรไพลีน (PP) ทำให้เกิดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมสูงสุด ดังรูปที่ 4.9 งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาตัวกลาง พลาสติกชนิด พอลิโพรไพลีน (PP) ที่มีรูปทรงแตกต่างกัน ดังในหัวข้อที่ 4.2



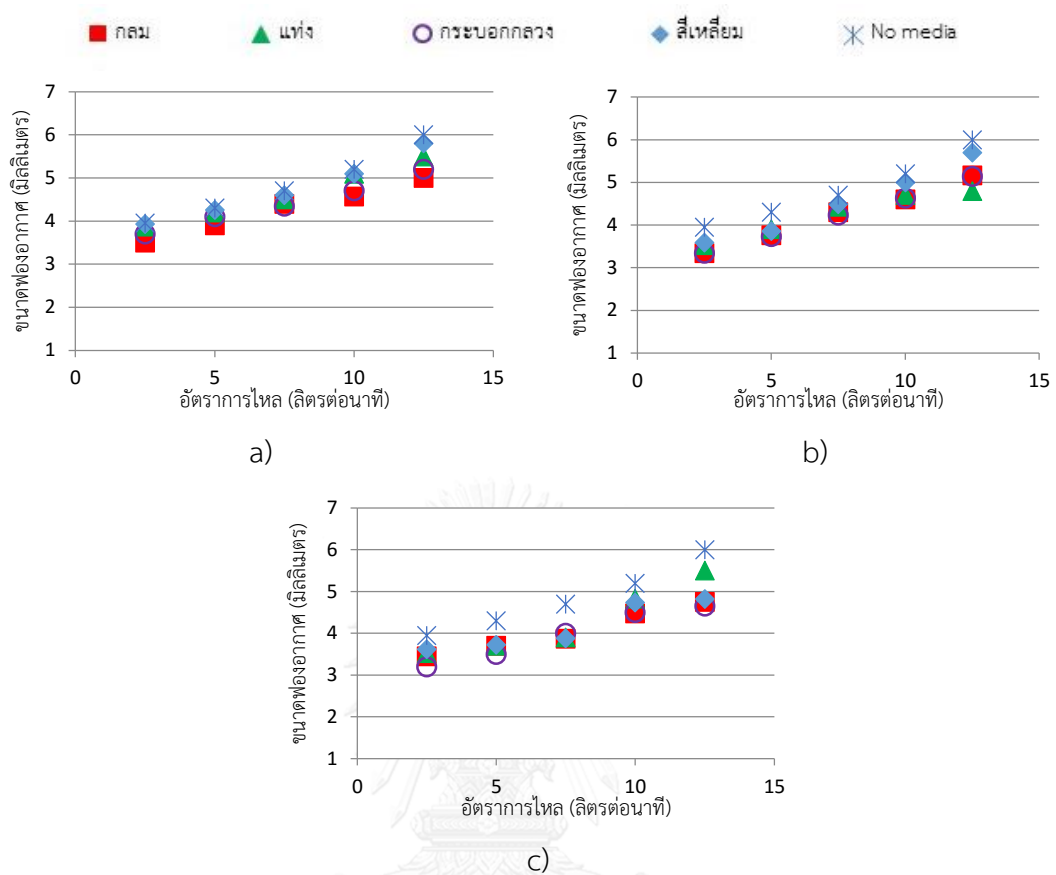
รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมจากการใช้ตัวกลาง 3 ชนิด พลาสติก พอลิโพรไพลีน (PP) อะคริโลไนไตรล์บิวทาไดอีนสไตรีน (ABS) และพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC)

4.2 ผลจากการใช้ตัวกลางพลาสติกกับหัวกระจายฟองอากาศทั้ง 3 ชนิด

4.2.1 ขนาดฟองอากาศ



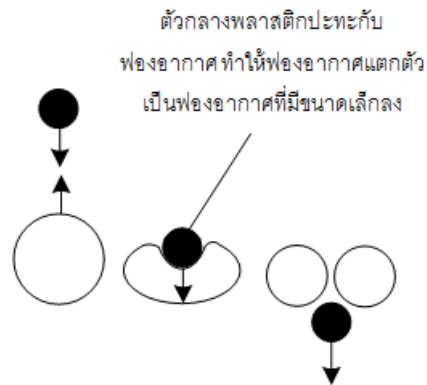
รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบขนาดฟองอากาศที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบ rigid ขนาดเล็ก และแบบ rigid ขนาดใหญ่ เมื่อมีตัวกลางพลาสติก เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ a) 2 % b) 5 % และ c) 10 % โดยปริมาตร



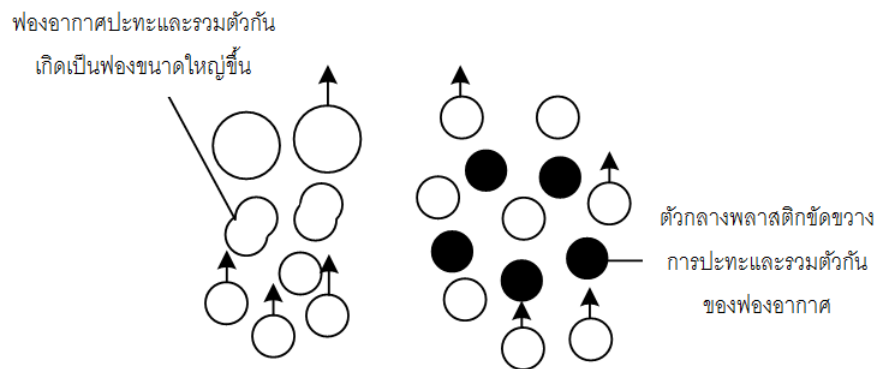
รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบขนาดฟองอากาศที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบไม้ เมื่อมีตัวกลางพลาสติก เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ a) 2 % b) 5 % และ c) 10 % โดยปริมาตร

จากรูปที่ 4. 10-11 การเปรียบเทียบเปรียบเทียบขนาดฟองอากาศที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบไม้ แบบ rigid ขนาดเล็ก และแบบ rigid ขนาดใหญ่ เมื่อมีตัวกลางพลาสติก เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ 2% - 10% โดยปริมาตร จะเห็นได้ว่าการเติมตัวกลางลงไปในระบบเป็นผลให้ค่าขนาดฟองอากาศมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน และแปรผันตามปริมาณตัวกลางที่เพิ่มลงไป ส่วนในด้านของขนาดหรือรูปร่างตัวกลางนั้นยังไม่ผลต่างมีชัดเจน ทั้งนี้หัวกระจาย rigid large ที่ปริมาณ 5% และ 10% มีขนาดฟองอากาศลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05 เมื่อเปรียบเทียบกับไม่ใช้ตัวกลาง

ทั้งนี้ การที่ขนาดฟองอากาศมีขนาดเล็กลงนั้น อาจเป็นผลมาจากตัวกลางเม็ดพลาสติกเข้าไปขัดขวางการปะทะหรือชนกันเองของฟองอากาศ ดังรูปที่ 4.12 ทำให้ฟองอากาศไม่สามารถรวมตัวกันและเพิ่มขนาดขึ้นได้ จึงมีขนาดเล็กกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับไม่มีตัวกลาง (Linder et al., 1988) และอีกสาเหตุ คือ ตัวกลางพลาสติกปะทะกับฟองอากาศทำให้ฟองอากาศแตกและมีขนาดเล็กลง (Lou, 1993) ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.12 การแตกตัวของฟองอากาศโดยตัวกลางพลาสติก (ที่มา ภาสกร วรรณวงษ์ 2558)



รูปที่ 4.13 การขัดขวางการปะทะและรวมตัวกันของฟองอากาศด้วยตัวกลางพลาสติก (ที่มา: (ภาสกร วรรณวงษ์, 2558))

นอกจากนี้จากรูปที่ 4.10 ยังเห็นได้ชัดว่าหัวกระจายฟองอากาศแบบ rigid large เมื่อใช้ร่วมกับตัวกลางพลาสติกทำให้ขนาดฟองอากาศเล็กลงมากกว่าหัวกระจายฟองอากาศแบบ rigid small อาจเนื่องมาจากหัวกระจายฟองอากาศที่มีขนาดฟองอากาศใหญ่กว่า (ก่อนเพิ่มตัวกลางพลาสติก) มีโอกาสปะทะกับตัวกลางมากกว่าฟองอากาศขนาดเล็ก ส่วนหัวกระจายอากาศแบบไม่ในขณะที่ใช้ตัวกลางมีขนาดฟองอากาศใหญ่สุดแต่ เมื่อใส่ตัวกลางทำให้มีขนาดฟองอากาศใหญ่กว่าหัวกระจายแบบ rigid large นั้น เพราะว่าเมื่อปะทะกับตัวกลางแล้วทำให้ฟองอากาศแตก แต่ฟองอากาศนั้นมีขนาดใหญ่และรวมตัวกันหนาแน่นทำให้ขนาดฟองอากาศเล็กลงแต่ไม่มากนัก

4.2.2 ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ

จากรูปที่ 4.14-15 จะเห็นได้ว่ารูปทรงและปริมาณตัวกลางพลาสติกมีผลต่อค่าความเร็วลอยตัวไม่เหมือนกัน โดยที่หัวกระจายอากาศแบบ small rigid นั้น รูปทรงของตัวกลางสี่เหลี่ยม มีค่า

ความเร็วสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับไม่มีตัวกลาง ส่วนตัวกลางพลาสติกแบบทรงกลมและแบบแท่งค่าความเร็วลอยตัวใกล้เคียงกันและไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อเทียบกับไม่มีตัวกลาง ส่วนพลาสติกแบบทรงกระบอกกลางมีผลทำให้ความเร็วลอยตัวลดลง และเมื่อเพิ่มปริมาณตัวกลางพลาสติกมีผลให้ค่าความเร็วลอยตัวของฟองอากาศมีค่าลดลง ในกรณีที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบ rigid large จะเห็นได้ว่ารูปทรงสี่เหลี่ยมมีค่าความเร็วลอยตัวสูงสุด ส่วนรูปทรงกลมและแท่งมีค่าความเร็วลอยตัวใกล้เคียงกัน และรูปทรงทรงกระบอกกลางมีค่าความเร็วลอยตัวต่ำสุด ทั้งนี้เมื่อเพิ่มปริมาณตัวกลางส่งผลให้ค่าความเร็วลอยตัวลดลงอย่างชัดเจน และนอกจากนี้เมื่อใช้หัวกระจายอากาศแบบไม้ พบว่าตัวกลางรูปทรงสี่เหลี่ยมมีค่าความเร็วลอยตัวสูงสุด รองลงมาคือ ตัวกลางรูปทรงแบบแท่ง ตัวกลางแบบกลม และตัวกลางแบบกระบอกกลางมีค่าความเร็วลอยตัวต่ำสุด ทั้งนี้เมื่อเพิ่มปริมาณตัวกลาง พบว่า ค่าความเร็วลอยตัวของฟองอากาศจะต่ำลงเมื่อปริมาณตัวกลางพลาสติกเพิ่มขึ้น

ทั้งนี้ทั้งนั้น ค่าความเร็วลอยตัวของฟองอากาศมีผลกับรูปทรงตัวกลางและปริมาณ อาจเนื่องจาก ช่องว่างที่ฟองอากาศแทรกผ่านความพรุนของ (Interstitial velocity) และความเร็วผิว (Superficial velocity) ดังแสดงในสมการ 4.4 (Subagyo et al., 1998) และสมการ 4.5 (Cohen and Metzner, 1981)

$$V_i = \frac{V_s}{\epsilon} \quad 4.4$$

$$V_s = \frac{Q_g}{A} \quad 4.5$$

โดยที่ V_i คือ ความเร็วแทรกผ่านระหว่างตัวกลาง, เมตรต่อวินาที

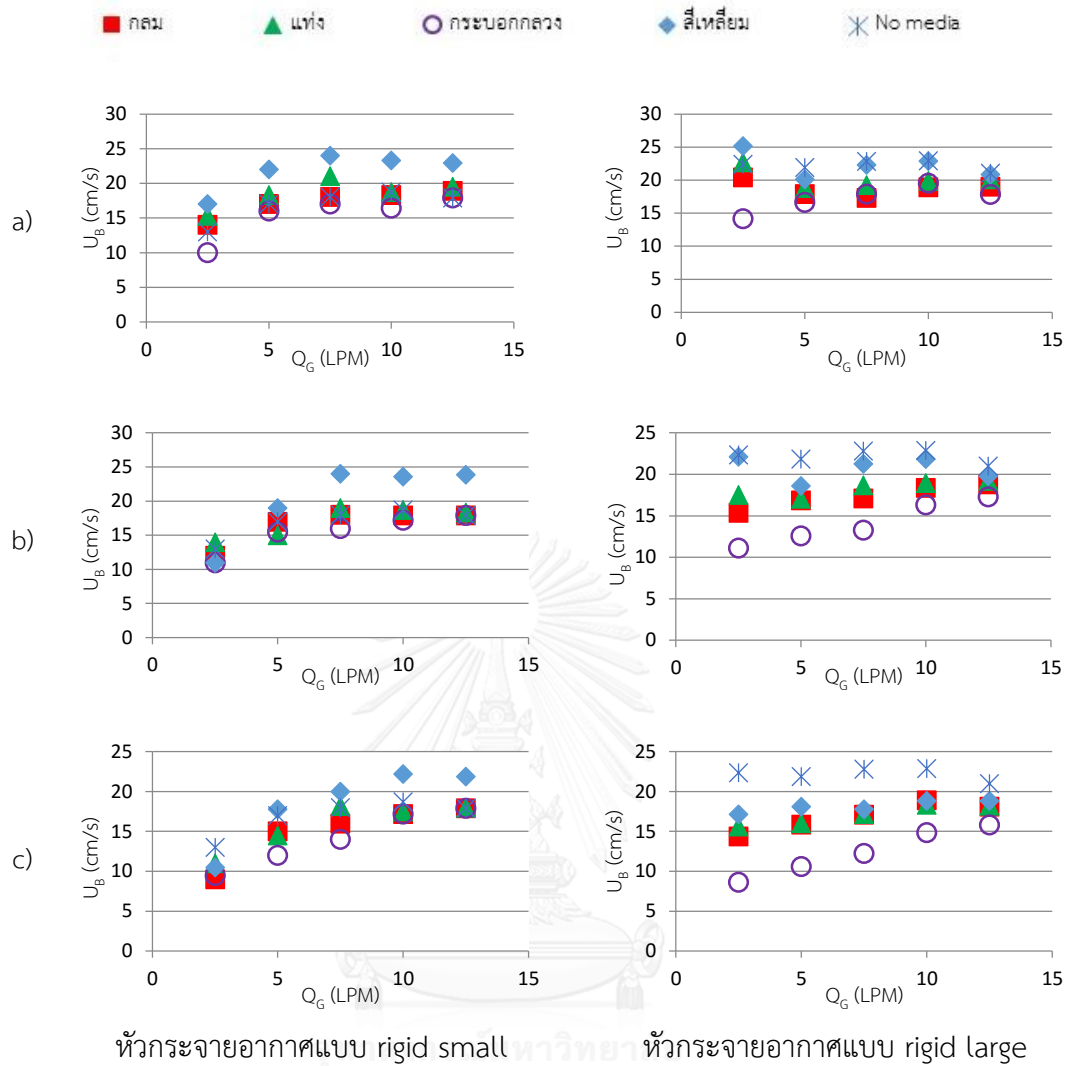
V_s คือ ความเร็วผิว, เมตรต่อวินาที

ϵ คือ ความพรุนของชั้นตัวกลาง, ไม่มีหน่วย

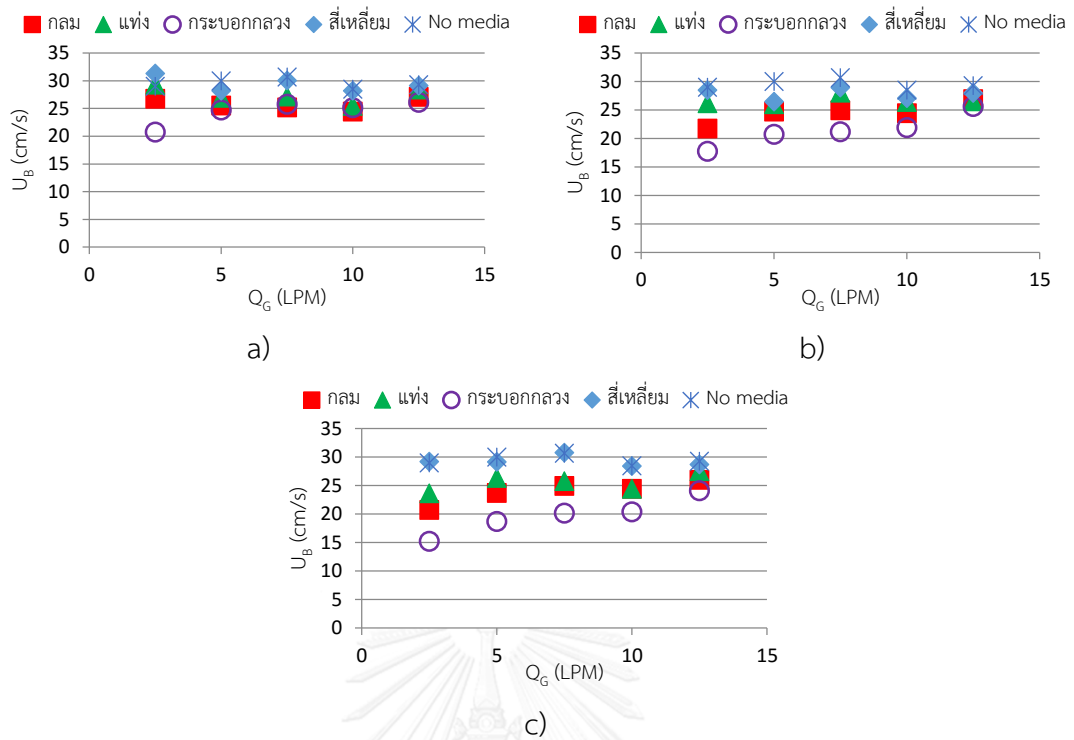
Q_g คือ อัตราการไหลก๊าซ, ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

A คือ พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์, ตารางเมตร

จากสมการที่ 4.4 – สมการที่ 4.5 สรุปได้ว่า รูปทรงสี่เหลี่ยมมีค่าความพรุน ($\epsilon = 0.30$) ซึ่งน้อยสุด ส่งผลให้ค่าความเร็วลอยตัวสูงสุด รองลงมาคือตัวกลางแบบแท่งและกลมที่มีค่าความพรุนใกล้เคียงกัน ($\epsilon = 0.35$ และ $\epsilon = 0.38$ ตามลำดับ) เป็นเหตุให้ค่าความเร็วลอยตัวฟองอากาศมีค่าใกล้เคียงกัน และตัวกลางรูปทรงกระบอกกลางที่มีค่าความพรุน ($\epsilon = 0.68$) มากที่สุด ทำให้ค่าความเร็วลอยตัวฟองอากาศต่ำสุด

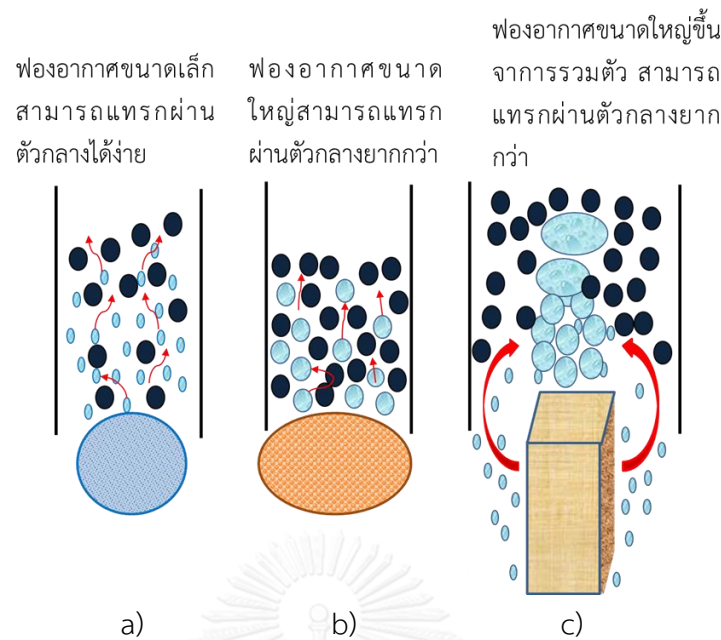


รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบความเร็วลอยตัวของฟองอากาศที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบ rigid ขนาดเล็ก และแบบ rigid ขนาดใหญ่ เมื่อมีตัวกลางพลาสติก เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ a) 2 % b) 5 % และ c) 10 % โดยปริมาตร



รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบความเร็วลอยตัวของฟองอากาศที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบไม้ เมื่อมีตัวกลางพลาสติก เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ a) 2 % b) 5 % และ c) 10 % โดยปริมาตร (ต่อ)

เมื่อเปรียบเทียบหัวกระจายอากาศทั้ง 3 ชนิด พบว่าค่าความเร็วลอยตัวของฟองอากาศลดลงเมื่อใช้กับหัวกระจายอากาศที่ให้ขนาดฟองอากาศ (D_B) ใหญ่ โดยหัวกระจายอากาศที่ให้ขนาดฟองอากาศ (D_B) ใหญ่ที่สุดคือ หัวกระจายอากาศแบบไม้ หัวกระจายฟองอากาศแบบ rigid large และหัวกระจายอากาศแบบ rigid small ตามลำดับ ซึ่งขนาดฟองอากาศใหญ่อาจส่งผลให้มีโอกาสแทรกผ่านช่องว่างของตัวกลางพลาสติกได้ช้ากว่าฟองอากาศที่มีขนาดเล็กกว่า และฟองอากาศขนาดใหญ่หากเกิดการรวมตัวปะทะกันก็จะส่งผลให้ฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้นอีก ดังแสดงในรูปที่ 4.16

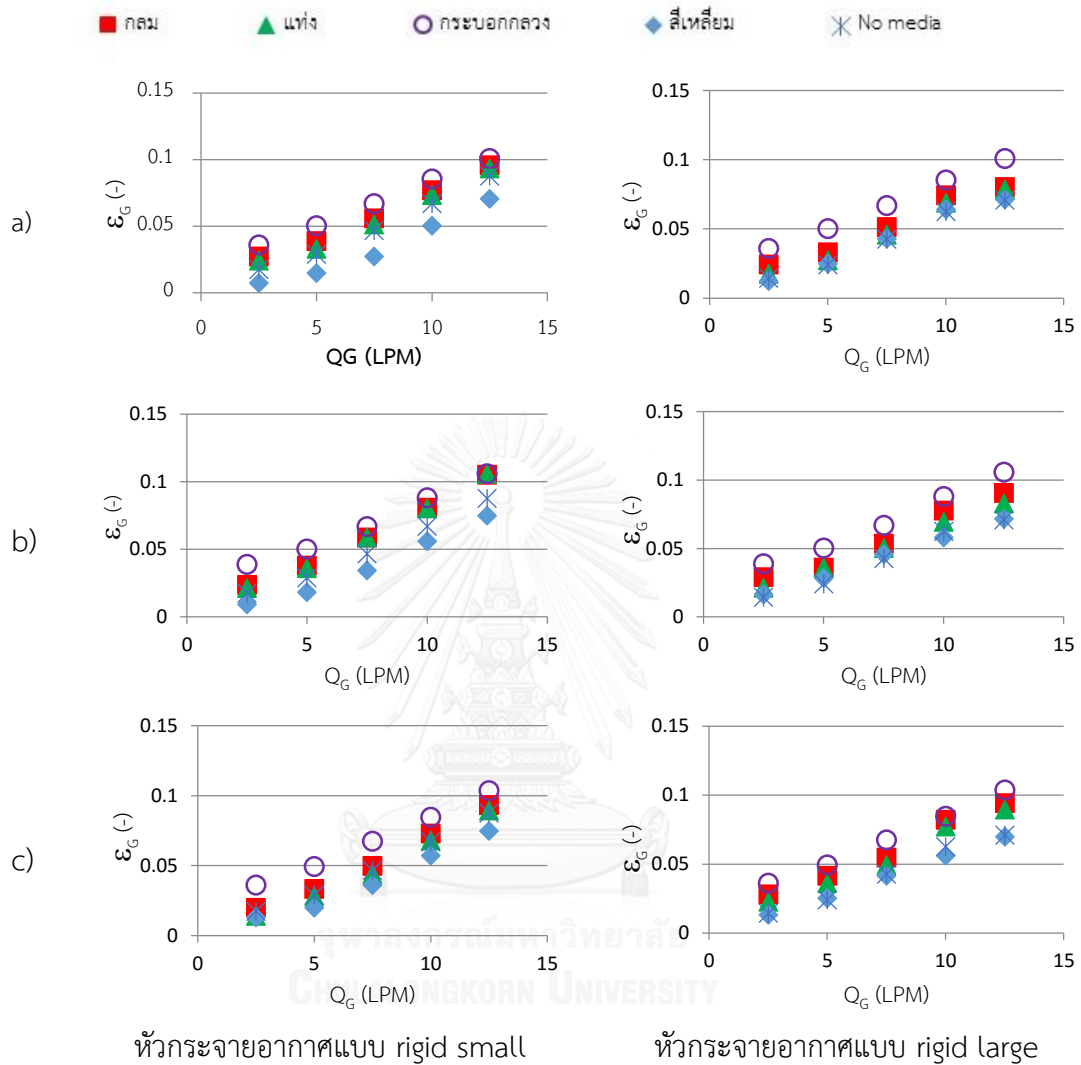


รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่แทรกผ่านตัวกลางพลาสติกของฟองอากาศ จากหัวกระจาย อากาศแบบ a) rigid ขนาดเล็ก b) แบบ rigid ขนาดใหญ่ และ c) แบบ แบบไม้

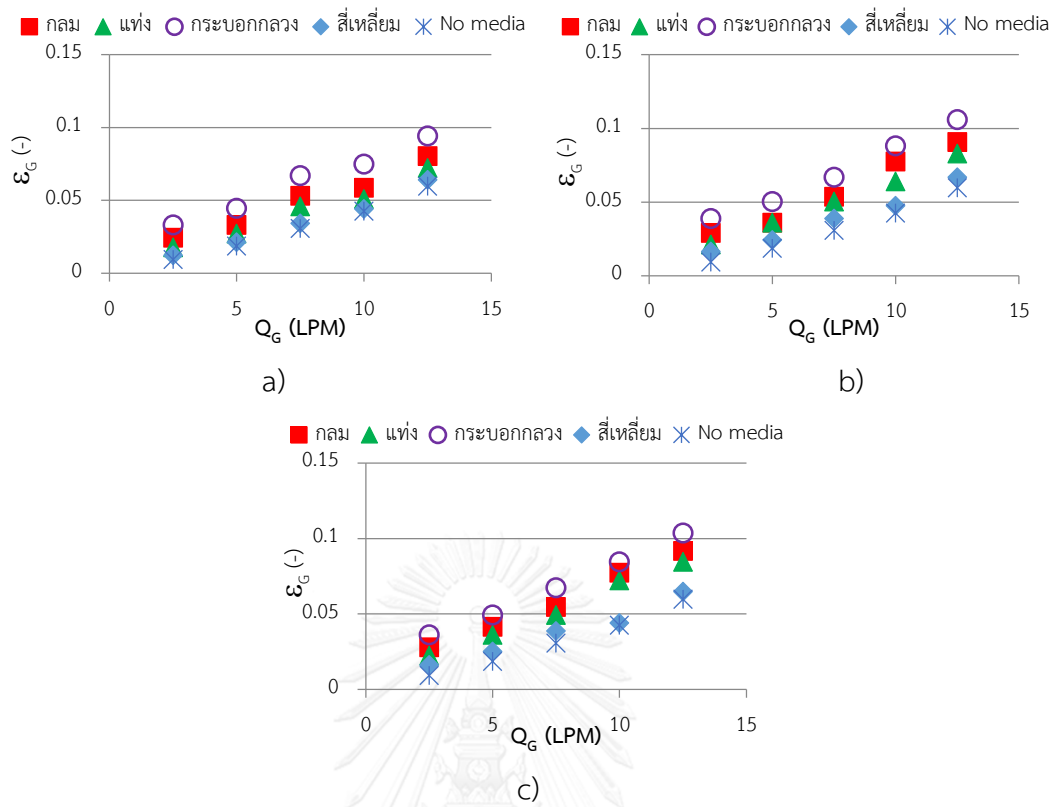
4.2.3 สัตส่วนก๊าซ

จากรูปที่ 4.17-18 จะเห็นได้ว่ารูปทรงของตัวกลางมีผลต่อค่าสัตส่วนก๊าซ โดยที่เมื่อใช้หัว กระจายอากาศแบบ rigid small พบว่าเมื่อเติมตัวกลางแบบสีเหลืองในคอลัมน์ทำให้มีค่าสัตส่วนก๊าซ ลดลง ส่วนตัวกลางรูปทรงแท่งและกลมไม่เกิดความแตกต่างมากนัก และเมื่อเติมตัวกลางทรงกระบอก ส่งผลให้ค่าสัตส่วนก๊าซเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน ในกรณีที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบ rigid large พบว่าค่าสัตส่วนก๊าซมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเติมตัวกลางพลาสติกในระบบ โดยตัวกลางรูปทรงกระบอก ให้ค่าสัตส่วนก๊าซสูงสุด รองลงมาคือตัวกลางทรงกลมและแบบแท่ง และตัวกลางแบบสีเหลืองมีค่า สัตส่วนก๊าซต่ำสุด และในกรณีที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบไม้ พบว่า ค่าสัตส่วนก๊าซมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับหัวกระจายแบบ rigid large ทั้งนี้สรุปได้ว่าหัวกระจายอากาศทั้ง 3 ชนิด มีแนวโน้มค่า สัตส่วนก๊าซเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณตัวกลางในระบบ ซึ่งสอดคล้องกับค่าความเร็วลอยตัว ดังในหัวข้อ ที่ 4.2.2. เมื่อความเร็วลอยตัวของฟองอากาศสูงจะทำให้ฟองอากาศหลุดออกจากระบบได้เร็วเป็นเหตุ ให้เกิดการสะสมก๊าซน้อย ดังตัวกลางรูปทรงสีเหลืองที่มีความเร็วลอยตัวสูงสุด จึงทำให้ก๊าซออกจาก ระบบเร็วและสะสมก๊าซในระบบน้อย ค่าสัตส่วนก๊าซจึงต่ำสุด ส่วนตัวกลางรูปทรงกลมและแท่งมีความ เร็วลอยตัวไม่แตกต่างกันมากนักจึงมีค่าสัตส่วนก๊าซแตกต่างกันเล็กน้อย และตัวกลาง ทรงกระบอกกลวงมีค่าความเร็วลอยตัวก๊าซต่ำ ซึ่งเคลื่อนที่ได้ช้าส่งผลให้เกิดการสะสมก๊าซไว้นาน กว่าจึงมีค่าสัตส่วนก๊าซสูงสุด นอกจากนี้ยังพบว่าตัวกลางทรงกระบอกกลวง ยังสามารถดักจับ

ฟองอากาศไว้ในช่องว่างกลวงเช่นกัน ดังภาพที่ 4.19 ซึ่งอาจส่งผลให้สะสมก๊าซในระบบนานกว่า
ตัวกลางรูปทรงชนิดอื่น

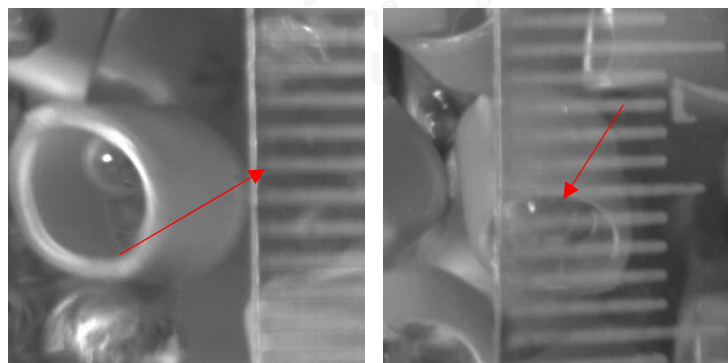


รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบสัดส่วนก๊าซที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบ rigid ขนาดเล็ก และแบบ rigid
ขนาดใหญ่ เมื่อมีตัวกลางพลาสติก เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ a) 2 % b) 5 % และ c) 10 %
โดยปริมาตร



รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบสัดส่วนก๊าซที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบไม้ เมื่อมีตัวกลางพลาสติก เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ a) 2 % b) 5 % และ c) 10 % โดยปริมาตร (ต่อ)

ฟองอากาศติด
อยู่ในตัวกลาง
ทรงกระบอก
กลาง

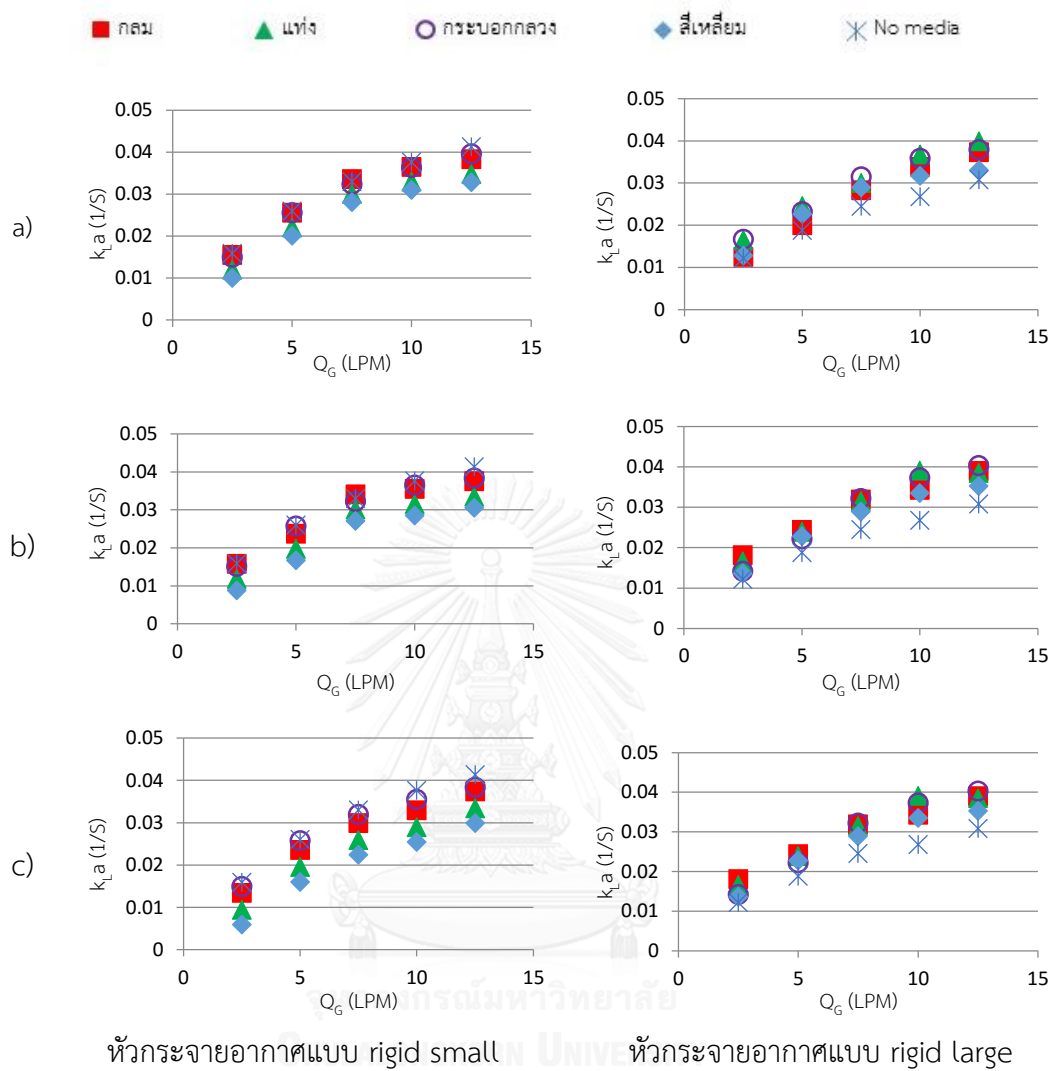


รูปที่ 4.19 การดักจับฟองอากาศของตัวกลางทรงกระบอกกลาง

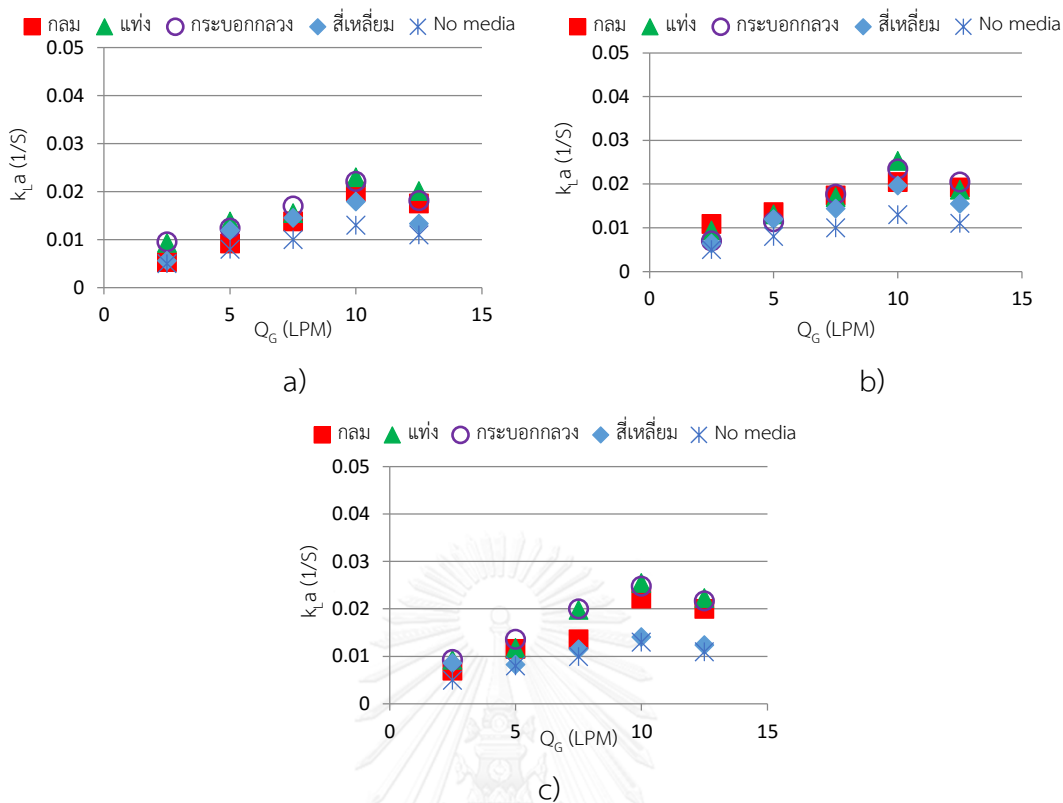
4.2.4 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม

จากรูปที่ 4. 20-21 จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมเมื่อเติมตัวกลางพลาสติกในคอลัมน์ให้ผลที่ไม่เหมือนกัน โดยที่เมื่อใช้หัวกระจายฟองอากาศแบบ rigid small พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมมีแนวโน้มลดลง ซึ่งตัวกลางรูปทรงสี่เหลี่ยมให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมต่ำสุด รองลงมาคือ รูปทรงแบบแท่งและกลมมีค่าใกล้เคียงกัน ตามลำดับ และตัวกลางทรงกระบอกกวางให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมสูงสุด ในกรณีที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบ rigid large พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยที่ตัวกลางรูปทรงกระบอกให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมสูงสุด รองลงมาคือตัวกลางรูปทรงกลมและแบบแท่งซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน และตัวกลางทรงสี่เหลี่ยมให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมต่ำสุด ทั้งนี้ เมื่อใช้หัวกระจายอากาศแบบไม้ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทิศทางเดียวกับหัวกระจายแบบ rigid large เพิ่มขึ้น โดยที่ตัวกลางรูปทรงกระบอกให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมสูงสุด รองลงมาคือตัวกลางรูปทรงกลมและแบบแท่งซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน และตัวกลางทรงสี่เหลี่ยมให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมต่ำสุด นอกจากนี้ยังพบว่าไม่ว่าจะใช้หัวกระจายอากาศชนิดใด ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันเมื่อเพิ่มปริมาณตัวกลางพลาสติกในคอลัมน์

ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมได้รับอิทธิมาจากพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะโดยตัวกลางพลาสติกที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมสูงสุด จะให้ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะสูงสุดเช่นกัน คือ ตัวกลางทรงกระบอกกวาง และตัวกลางพลาสติกที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมต่ำสุด จะให้ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะต่ำสุดด้วย คือตัวกลางทรงสี่เหลี่ยม



รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบ rigid ขนาดเล็ก และแบบ rigid ขนาดใหญ่ เมื่อมีตัวกลางพลาสติก เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ a) 2 % b) 5 % และ c) 10 % โดยปริมาตร

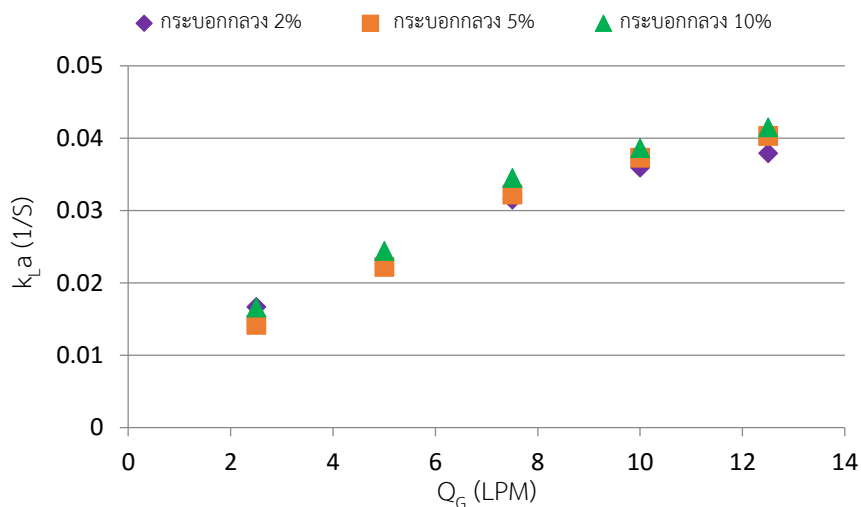


รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบไม้ เมื่อมีตัวกลางพลาสติก เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ a) 2 % b) 5 % และ c) 10 % โดยปริมาตร (ต่อ)

ทั้งนี้ทั้งนั้น การวิจัยที่ผ่านมาถือว่าเสร็จสิ้นกระบวนการศึกษาการดูดซึมด้านกายภาพแล้ว ซึ่งมาถึงช่วงของการพิจารณาเลือกใช้สภาวะที่เหมาะสม โดยคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. อัตราการไหลก๊าซ

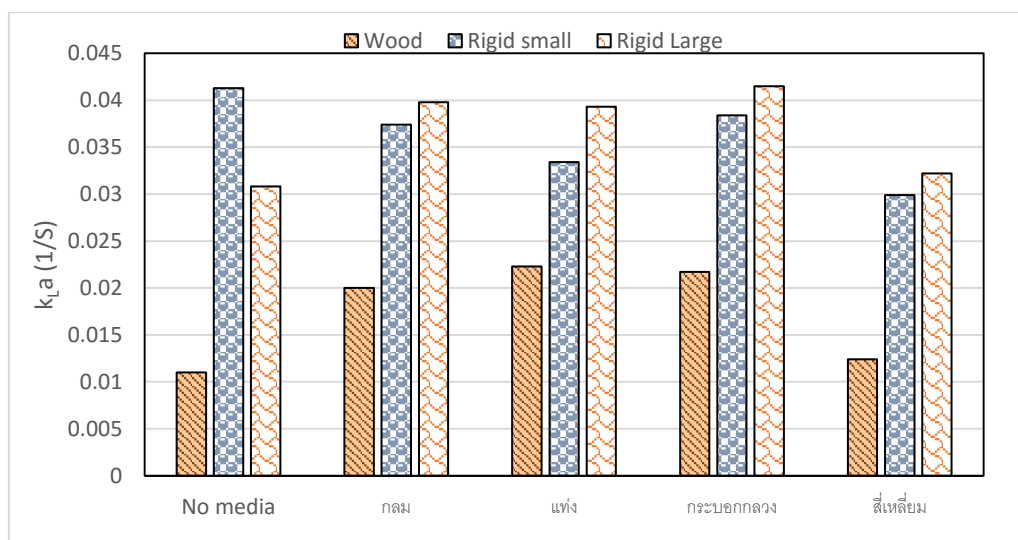
จากผลการวิจัยที่กล่าวมาพบว่า ตัวกลางรูปทรงพลาสติกมีผลที่ดีช่วยในการให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จึงเลือกมาพิจารณา จากรูปที่ 4.22 จะเห็นได้ว่าที่อัตราเร็ว 12.5 ลิตรต่อนาที ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมสูงสุด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกอัตราการไหลก๊าซเข้าที่ 12.5 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบผลกระทบของอัตราการไหลก๊าซต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของตัวกลางทรงกระบอกกลาง

2. ขนาดหัวกระจายฟองอากาศ

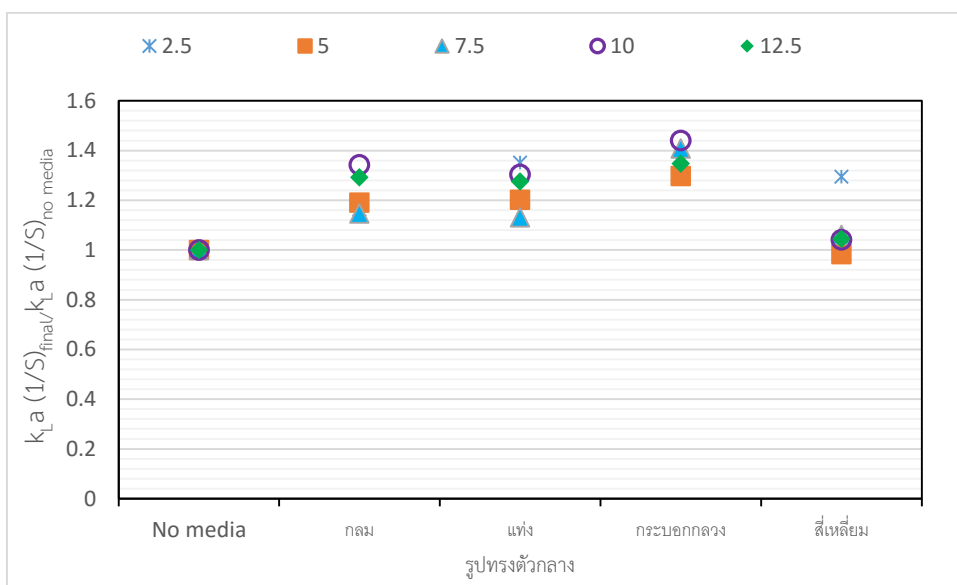
ในกรณีที่ใช้หัวกระจายอากาศร่วมกับตัวกลางพลาสติกพบว่า เมื่อเติมตัวกลางพลาสติกในระบบ ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมกับหัวกระจายอากาศแบบ rigid large มีแนวโน้มสูงกว่าเมื่อเทียบกับใช้หัวกระจายฟองอากาศแบบ rigid small และแบบไม้ ทั้งนี้ ในรูปที่ 4.9 หากมองในด้านการใช้พลังงาน พบว่า การเลือกใช้หัวกระจายอากาศแบบ rigid large จะประหยัดพลังงานมากที่สุด จากรูปที่ 4.23 เป็นการนำเสนอเปรียบเทียบการใช้หัวกระจายอากาศทั้ง 3 แบบ ที่ทดลองกับตัวกลาง 2 % ที่อัตราการไหลเดียวกัน 12.5 ลิตรต่อนาที จึงเป็นเกณฑ์ในการพิจารณาเลือกใช้ หัวกระจายอากาศแบบ rigid large ในการทดลองช่วงต่อไป



รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบผลกระทบของหัวกระจายฟองอากาศต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม

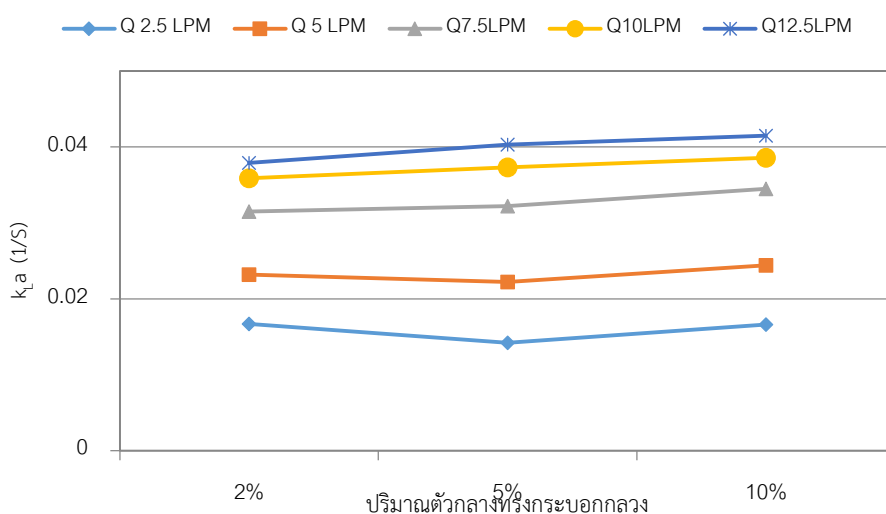
3. รูปทรงและปริมาณของตัวกลางพลาสติก

จากรูปที่ 4.24 จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมเมื่อใช้ตัวกลาง ($k_{La_{final}}$) เทียบกับสัดส่วนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมเมื่อไม่ใช้ตัวกลาง ($k_{La_{no\ media}}$) ที่อัตราการไหลต่าง 2.5 – 12.5 ลิตรต่อนาที พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมสูงสุดเมื่อใช้ตัวกลางทรงกระบอกกลาง และรูปที่ 4. 25 พบว่าปริมาณตัวกลางทรงกระบอกกลางให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมที่อัตราการไหล 12.5 LPM ที่ปริมาณตัวกลางทรงกระบอกกลาง 10%โดยปริมาตร สูงสุด



รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบผลกระทบของรูปทรงตัวกลางต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบผลกระทบของปริมาณตัวกลางต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม

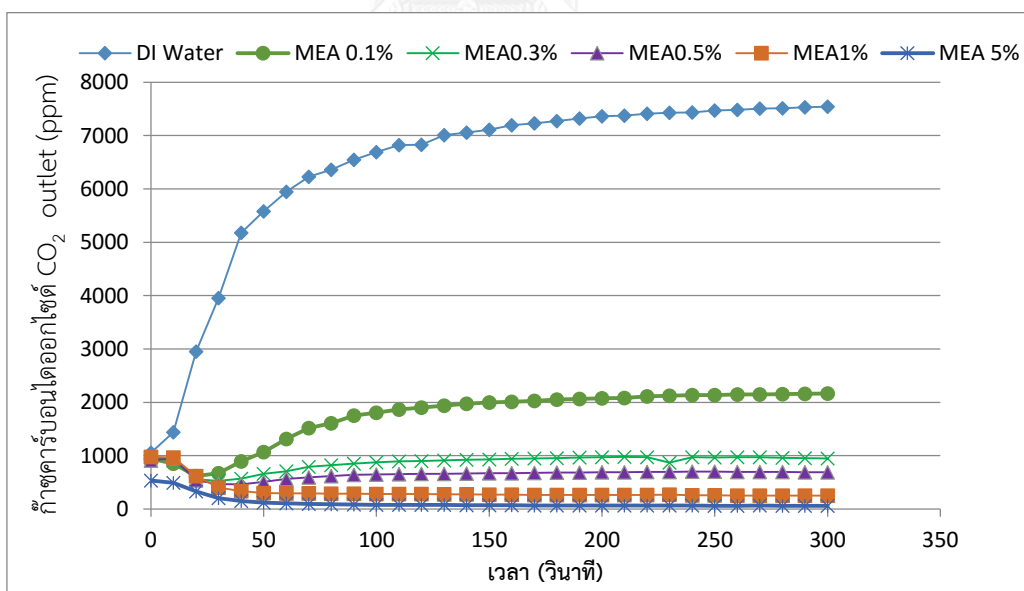
4.3 การพิจารณาเลือกใช้ของเหลวดูดซึมนำในการดูดซึมทางเคมี

ในการทดลองหัวข้อนี้ เพื่อศึกษากลไกการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) โดยใช้เฟส ก๊าซคือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และเฟสของเหลวคือสารละลายโมโนเอทาโนลามีน (MEA) และน้ำ DI โดยจะทดลองเพื่อหาเฟสของเหลวที่ใช้สารละลายโมโนเอทาโนลามีนที่สภาวะเหมาะสมก่อน เพื่อ ความคุ้มค่าของต้นทุน

4.3.1 การเลือกความเข้มข้นของสารละลายโมโนเอทาโนลามีน (MEA) ที่เหมาะสม

การทดลองนี้เป็นการวิเคราะห์การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโมโนเอทาโนลามีน (MEA) ซึ่งจากงานวิจัยของ นายภาสกร วรรณวงศ์ ที่ทดลองดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน ได้แก่ 1 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในคอลัมน์แบบฟองอากาศขนาดใหญ่กว่าพบว่าค่าความเข้มข้นที่ดีที่สุด คือ 1% เพื่อเป็นการใช้ สารละลายอย่างคุ้มค่า การทดลองนี้จึงทดลองที่ความเข้มข้น 1% 0.5% 0.3% และ 0.1% เปรียบเทียบกับการดูดซึมด้วยน้ำ DI ซึ่งผลการทดลองดังรูปที่ 4.26 วัดค่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากระบบ และรูปที่ 4.27 หาปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมในของเหลวด้วยสมการ 4.7

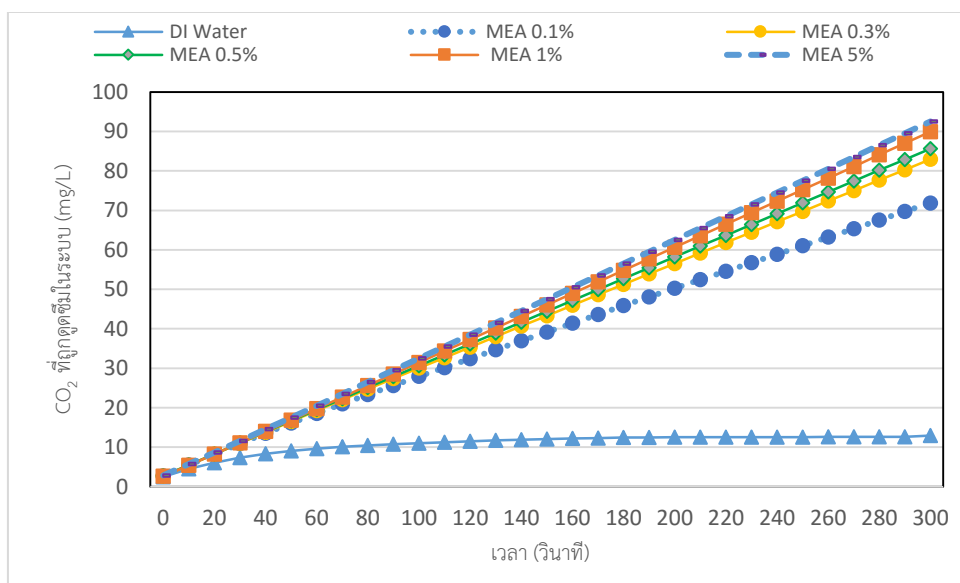
$$C_{L,t} = \frac{Q_G}{V_L} (C_{G,in} \times t - \int C_{G,out}(t) dt) \quad 4.7$$



รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบค่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากระบบที่วัดได้

จากรูปที่ 4.26 จะเห็นได้ว่า เมื่อใช้เฟสของเหลวเป็น น้ำ DI พบว่าความเข้มข้นของ CO₂ สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว อาจเนื่องมาจากปฏิกิริยาทางเคมีเกิดช้า เกิดขึ้นน้อย หรือไม่เกิดขึ้นเลย แตกต่าง

จากการใช้เฟสของเหลวด้วยสารละลาย MEA ซึ่งส่งผลให้ค่าความเข้มข้นของ CO₂ ขาออกจากระบบ ลดลงตามความเข้มข้นที่ใส่ในระบบ ยิ่งเพิ่มความเข้มข้นสารละลาย MEA มาก ความเข้มข้น คาร์บอนไดออกไซด์ขาออกจากระบบยิ่งลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าภายในระบบมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น โดยที่ความเข้มข้นสารละลาย MEA 0.1% ให้ค่าค่าความเข้มข้นของ CO₂ ขาออกสูงสุด รองลงมาคือ 0.3% 0.5% 1% และ 5% ให้ค่าค่าความเข้มข้นของ CO₂ ขาออกต่ำสุด



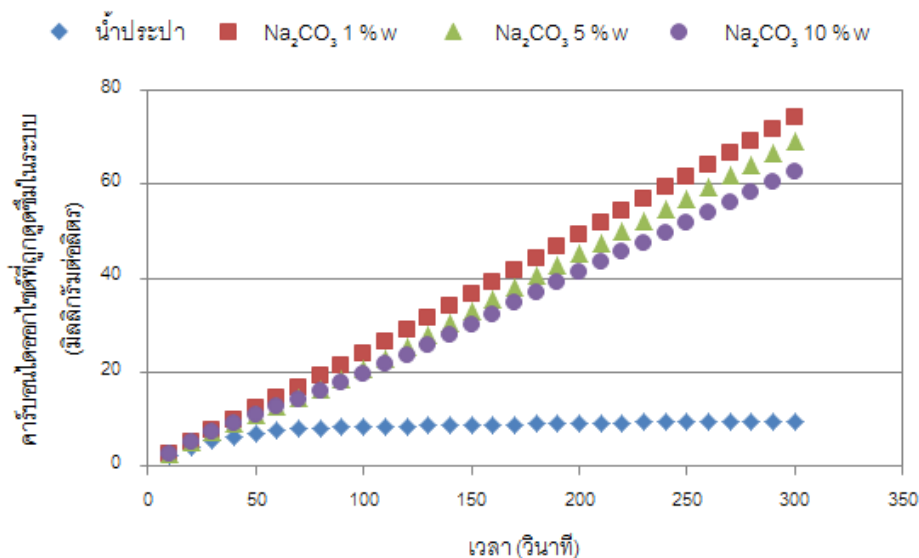
รูปที่ 4.27 ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับด้วยสารละลาย MEA ที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากรูปที่ 4.27 จะเห็นได้ว่าเมื่อปรับเปลี่ยนเฟสของเหลวด้วยสารละลายโมโนเอทานอลามีน พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเฟสของเหลว น้ำ DI และประสิทธิภาพในการดูดซับ CO₂ ยิ่งสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารละลายโมโนเอทานอลามีน ทั้งนี้ จะเห็นได้ว่าสารละลายโมโนเอทานอลามีนที่ความเข้มข้น 1% และ 5% มีค่าการดูดซับ คาร์บอนไดออกไซด์แตกต่างกันไม่มากนัก อยู่ที่ 2-3% ถึงแม้ว่ายิ่งเพิ่มความเข้มข้นสารละลายจะยิ่ง ทำให้ประสิทธิภาพสูงก็ตาม แต่นั่นหมายถึงความสิ้นเปลืองของสารเคมีหากในปริมาณที่มากเกินไปจนเกินไป จำเป็น เมื่อมองในหลักการใช้งานจริง

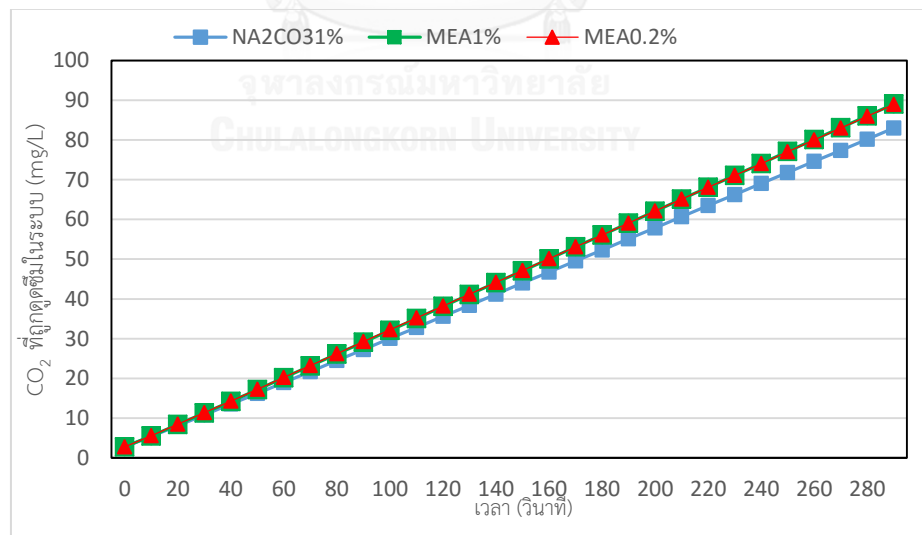
4.3.2 การเปรียบสารถละลายระหว่างสารละลายโมโนเอทานอลามีนและสารละลายโซเดียม คาร์บอเนต

จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.3.1 ประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย สารละลายโมโนเอทานอลามีนสูงสุดที่ค่าความเข้มข้นสารละลายโมโนเอทานอลามีนที่ 5% 1% และ 0.3% ตามลำดับ ทั้งนี้จากงานวิจัยของ ภาสกร วรณูวงศ์ 2558 ที่เลือกใช้ความเข้มข้นสารละลาย

โซเดียมคาร์บอเนตในการดูดซึม พบว่าความเข้มข้นสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่ 1% โดยปริมาตร ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพในการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด ดังรูปที่ 4.28 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเปรียบเทียบสารละลาย 2 ชนิด เข้มข้น 1%



รูปที่ 4.28 ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมในของเหลวดูดซึมต่างๆ (ภาสกร วรัญญวงศ์ 2558)

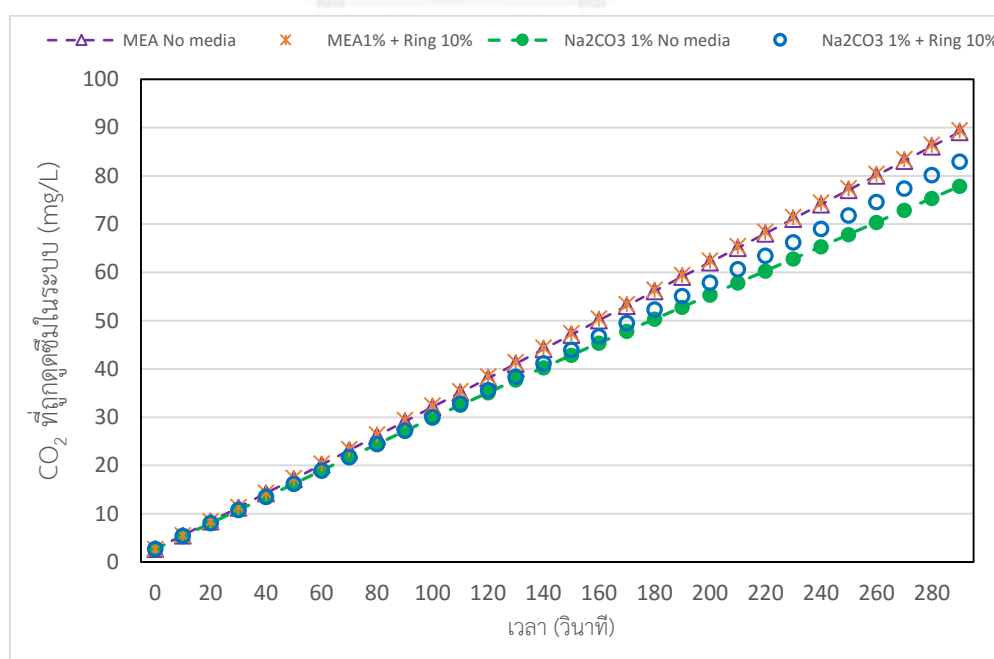


รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมระหว่างสารละลาย 2 ชนิด โมโนเอทาโนลามีนและสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต

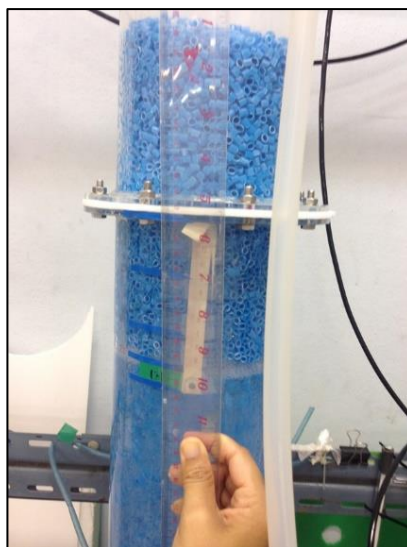
จากรูปที่ 4.29 จะเห็นได้ว่า เมื่อปรับเปลี่ยนเฟสของเหลวเป็นสารละลายทั้ง 2 ชนิด ทำให้ค่าประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น โดยที่สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 1 % โดยปริมาตร ให้ค่าประสิทธิภาพในการดูดซับ CO_2 ต่ำกว่าเมื่อใช้เฟสของเหลวสารละลายโมโนเอทานอลามีนที่ความเข้มข้น 1 % เท่ากัน ทั้งนี้หากมองในด้านเศรษฐศาสตร์ ราคาของสารเคมีของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ถูกกว่าสารละลายโมโนเอทานอลามีนอยู่พอสมควร ดังนั้นจึงวิจัยโดยลดสารความเข้มข้นสารละลายโมโนเอทานอลามีนที่ 0.2% พบว่าให้ค่าประสิทธิภาพในการดูดซับ CO_2 สูงกว่าสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 1 % เช่นกัน

4.4 การทดลองสารละลายร่วมกับตัวกลาง

จากรูปที่ 4.30 จะเห็นได้เมื่อเติมตัวกลางพลาสติกทรงกระบอกกลงลงในระบบทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ CO_2 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในกรณีที่ใช้สารละลายโมโนเอทานอลามีนพบว่า เมื่อใส่ตัวกลางทรงกระบอกลงที่ 10% ให้ค่าค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ CO_2 เพิ่มขึ้นไม่มากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับไม่ใช้ตัวกลาง อาจเนื่องมาจากค่าความหนาแน่นในเฟสของเหลวเปลี่ยนไป ทำให้ตัวกลางลอยขึ้นเหนือผิวน้ำเป็นปริมาณมาก ดังรูปที่ 4.31 เมื่อตัวกลางลอยอยู่ด้านบนเป็นปริมาณมากจึงทำให้โอกาสการปะทะกันระหว่างฟองอากาศเกิดขึ้นได้น้อย ส่วนในกรณีที่ใช้สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต พบว่าเมื่อเติมตัวกลางทรงกระบอกลงในระบบที่ 10% พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ CO_2 เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณตัวกลางอยู่ในระบบมากกว่าลอยสู่ผิวด้านบนน้อยกว่าสารละลายโมโนเอทานอลามีน



รูปที่ 4.30 เปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับระหว่างสารละลาย 2 ชนิด กับตัวกลาง



รูปที่ 4.31 การลอยตัวเหนือระบบของตัวกลาง เมื่อใช้เฟสของเหลวสารละลายโมโนเอทานอลามีน

จากการทดลองเมื่อนำไปวิเคราะห์ด้านอุทกพลศาสตร์ พบว่า ขนาดฟองอากาศ สัดส่วนก๊าซ พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ และความเร็วลอยตัว ของเฟสของเหลวที่ใช้สารละลายโมโนเอทานอลามีนแบบใช้ตัวกลางและไม่ใช้ตัวกลางแตกต่างกันไม่มากนัก เมื่อใช้สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตแทนเฟสของเหลว พบว่า ใช้ร่วมกับตัวกลางจะทำให้ประสิทธิภาพดีกว่าเมื่อไม่ใช้ตัวกลาง

ตารางที่ 4-1 ตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์

ระบบดูดซึมทางเคมี	ขนาดฟองอากาศ (มิลลิเมตร)	สัดส่วนก๊าซ (-)	พื้นที่ผิวสัมผัส จำเพาะ (ต่อเมตร)	ความเร็วลอยตัว ของฟองอากาศ (เซนติเมตรต่อวินาที)
น้ำ DI	3.18	0.103	145.88	15.03
MEA 1%	2.78	0.1619	160.32	12.44
MEA 1% + ตัวกลาง	2.80	0.1623	163.73	12.78
Na ₂ CO ₃ 1%	3.07	0.1297	150.32	14.15
Na ₂ CO ₃ 1% + ตัวกลาง	2.90	0.1501	154.73	13.05

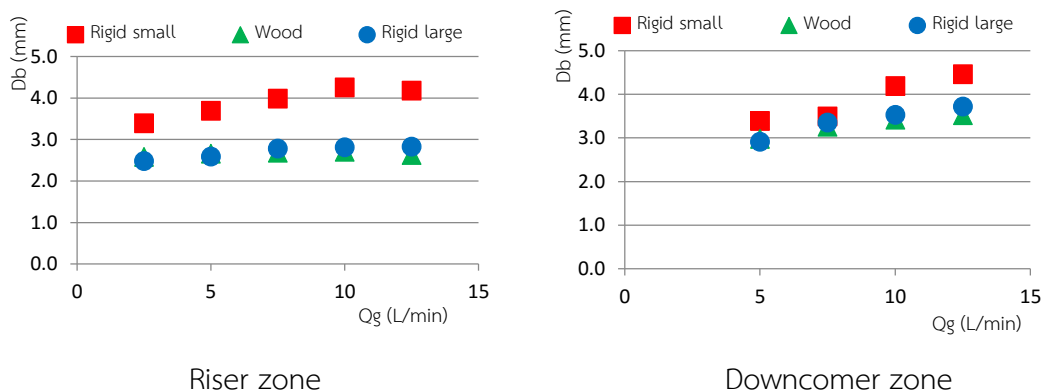
4.5 คอลัมน์แบบอากาศยาน (Internal airlift reactor : IALR)

ผลจากการใช้หัวกระจายฟองอากาศแบบไม้ หัวกระจายอากาศ rigid ขนาดเล็ก หัวกระจายอากาศ rigid ขนาดใหญ่ เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก

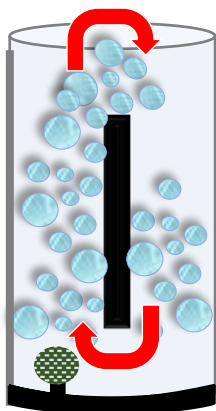
4.5.1 ขนาดฟองอากาศ

จากรูปที่ 4.32 แสดงผลของขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้นจากหัวกระจายฟองอากาศทั้ง 3 แบบ ได้แก่ หัวกระจายฟองอากาศแบบไม้ หัวกระจายฟองอากาศ rigid small และหัวกระจายฟองอากาศ rigid large เมื่อเดินระบบในคอลัมน์แบบไม้ใช้ตัวกลางพลาสติก จะเห็นได้ว่า ทางฝั่ง riser zone ในกรณีที่ใช้หัวกระจายอากาศ rigid small พบว่า ขนาดฟองอากาศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลก๊าซเพิ่มขึ้น และเห็นได้ชัดว่าหัวกระจายอากาศแบบ rigid small มีขนาดฟองอากาศใหญ่สุด ขนาดฟองอากาศรองลงมา คือ หัวกระจายอากาศแบบ rigid large และหัวกระจายอากาศแบบไม้ มีขนาดฟองอากาศใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ พบว่าขนาดฟองอากาศมีความแตกต่างจากผลทดลองคอลัมน์แบบฟองอากาศ BCR อาจเนื่องมาจากคอลัมน์แบบอากาศยานมีการหมุนวนของฟองอากาศในระบบจึงทำให้หัวกระจายอากาศที่มีรูขนาดใหญ่กว่า ผลักดันให้ฟองอากาศเล็กกว่าหมุนวนในคอลัมน์ ดังรูปที่ 4.33

นอกจากนี้ ผลขนาดฟองอากาศฝั่ง downcomer zone พบว่าขนาดฟองอากาศส่วนใหญ่มีแนวโน้มสูงกว่าฝั่ง riser zone อาจเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของฟองอากาศไหลทวนกระแสจึงทำให้มีการชะลอการไหลและเกิดการรวมตัวกันของฟองอากาศ ในกรณีที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบ rigid small พบว่าให้ค่าขนาดฟองอากาศใหญ่สุด รองลงมาคือหัวกระจายอากาศแบบ rigid large และแบบไม้ที่มีขนาดฟองอากาศใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ขนาดของฟองอากาศ downcomer zone มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้น



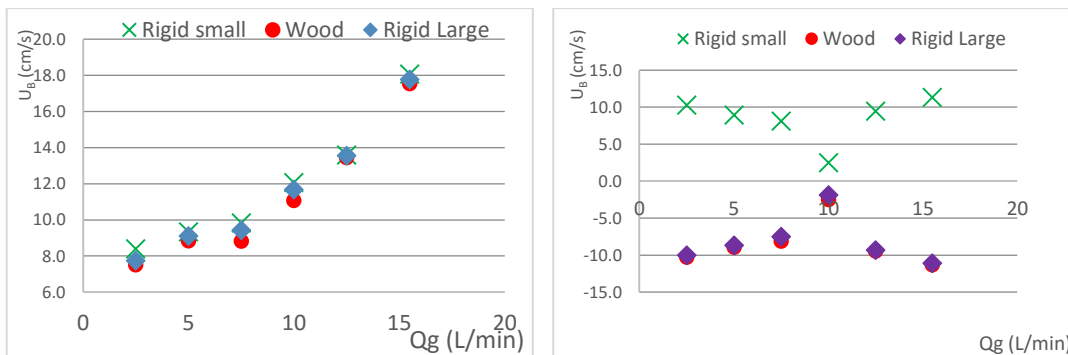
รูปที่ 4.32 เปรียบเทียบขนาดฟองอากาศที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบไม้ แบบ rigid ขนาดเล็ก และแบบ rigid ขนาดใหญ่ เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก



รูปที่ 4.33 การเคลื่อนที่ของฟองอากาศในคอลัมน์แบบอากาศยก

4.5.2 ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ

จากรูปที่ 4.34 จะเห็นได้ว่า ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศที่เกิดขึ้นจากหัวกระจายฟองอากาศทั้ง 3 แบบ ได้แก่ หัวกระจายฟองอากาศแบบไม้ หัวกระจายฟองอากาศ rigid small และ หัวกระจายฟองอากาศ rigid large เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก ด้านฝั่ง riser zone พบว่าความเร็วลอยตัวของฟองอากาศไม่แตกต่างกันมากนัก โดยที่หัวกระจายฟองอากาศแบบ rigid small มีค่าความเร็วลอยตัวสูงสุด รองลงมาคือ หัวกระจายฟองอากาศแบบ rigid large และแบบไม้ที่มีค่าใกล้เคียงกัน อาจเป็นเพราะขนาดฟองของทั้ง 2 หัวกระจายฟองอากาศมีขนาดใกล้เคียงกัน และไม่ว่าจะใช้หัวกระจายฟองอากาศแบบใด เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ความเร็วลอยตัวเพิ่มขึ้นเช่นกัน ส่วนในด้าน downcomer zone พบว่าค่าความเร็วลอยตัวของหัวกระจายฟองอากาศมีค่าแตกต่างกัน โดยกรณีที่ใช้หัวกระจายฟองอากาศแบบ rigid small มีค่าความเร็วลอยตัวสูงสุด อาจเนื่องมาจากหัวกระจายฟองอากาศแบบ rigid small ให้ฟองอากาศขนาดใหญ่ที่สุด จึงทำให้ฟองใหญ่เคลื่อนที่ได้เร็วและอาจหลุดออกจากระบบเร็ว โอกาสที่จะวนกลับมาด้าน down comer มีน้อย หรือไม่มีเลยที่อัตราการไหลต่ำๆ ส่วนหัวกระจายฟองอากาศแบบ rigid large และแบบไม้ มีความเร็วลอยตัวใกล้เคียงกัน ซึ่งสอดคล้องกับขนาดของฟองอากาศที่ใกล้เคียงกันและเล็กกว่าหัวกระจายฟองอากาศแบบ rigid small จึงมีโอกาที่จะเกิดการเคลื่อนที่แบบวนกลับในระบบได้มากกว่า นอกจากนี้ฝั่ง downcomer zone จะเห็นได้ว่าที่อัตราการไหล 10 ลิตรต่อนาทีที่มีค่าเข้าใกล้สภาวะหยุดนิ่งมากที่สุด อาจเนื่องมาจากที่อัตราการไหล 10 ลิตรต่อนาที ฟองอากาศมีการไหลวนกลับที่ไม่ช้าหรือเร็วเกินไป ทำให้ฟองอากาศอยู่ในฝั่ง down comer นานกว่าอัตราการไหลอื่น



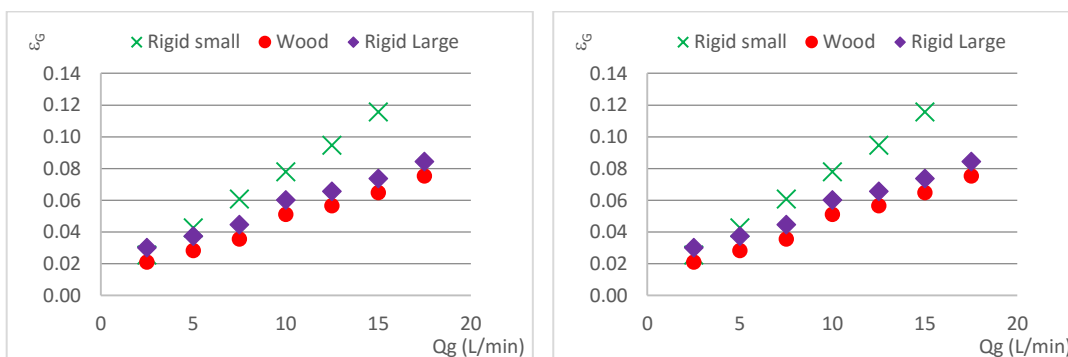
Riser zone

Downcomer zone

รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบความเร็วลอยตัวของฟองอากาศที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบไม้ แบบ rigid ขนาดเล็ก และแบบ rigid ขนาดใหญ่ เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก

4.5.3 สัดส่วนก๊าซ

จากรูปที่ 4.35 สัดส่วนก๊าซที่เกิดขึ้นจากหัวกระจายฟองอากาศทั้ง 3 แบบ ได้แก่ หัวกระจายฟองอากาศแบบไม้ หัวกระจายฟองอากาศ rigid small และหัวกระจายอากาศ rigid large เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก ค่าสัดส่วนก๊าซมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของก๊าซสูงขึ้น โดยที่สัดส่วนก๊าซจากหัวกระจายฟองอากาศแบบ rigid small มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือหัวกระจายอากาศ rigid large และหัวกระจายฟองอากาศแบบไม้ที่มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งอาจมีผลมาจากขนาดฟองอากาศที่มีขนาดแตกต่างกัน ที่ขนาดฟองอากาศใหญ่กว่าอาจจะลอยตัวได้เร็วกว่าและทำให้แตกตัวเร็วกว่าเมื่อเจอผิวอากาศด้านบน ทำให้มีค่าสัดส่วนก๊าซที่น้อยกว่าหัวกระจายอากาศที่ให้ขนาดฟองอากาศเล็กกว่า ในฝั่ง Riser และ Downcomer zone มีค่าเท่ากันเนื่องจากวัดที่ผิวฟองอากาศด้านบนของคอลัมน์ ลักษณะการไหลวนไม่มีผลต่อสัดส่วนก๊าซ



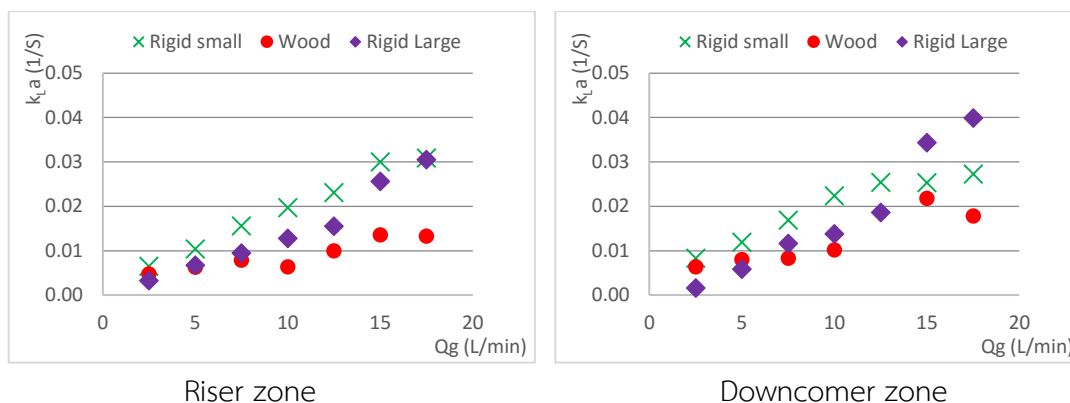
Riser zone

Downcomer zone

รูปที่ 4.35 แสดงสัดส่วนก๊าซที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบไม้ แบบ rigid ขนาดเล็ก และแบบ rigid ขนาดใหญ่ เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก

4.5.4 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม

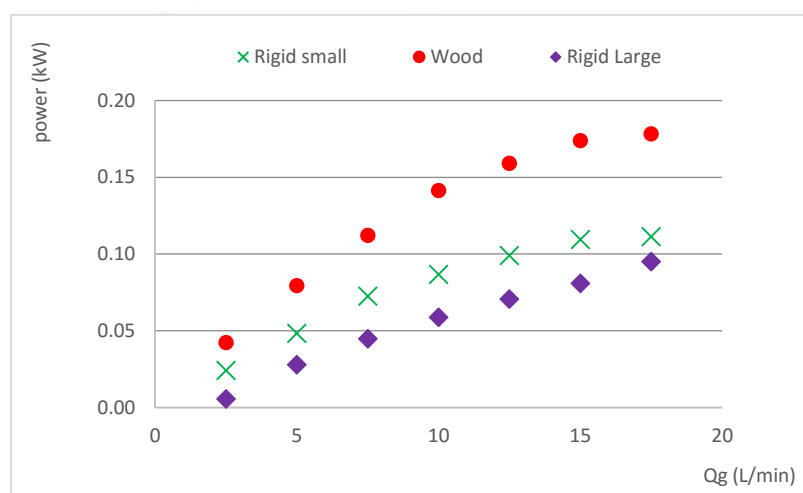
จากรูปที่ 4.36 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมที่เกิดขึ้นจากหวักระจายฟองอากาศ ทั้ง 3 แบบ ได้แก่ หวักระจายฟองอากาศแบบไม้ หวักระจายฟองอากาศ rigid small และหวักระจายอากาศ rigid large เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมมีแนวโน้มที่ไม่เหมือนกัน ในขณะที่ฝั่ง riser zone หวักระจายอากาศแบบ rigid small มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่อัตราการไหลสูงขึ้น และมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมสูงสุด รองลงมา คือ หวักระจายอากาศ rigid large ที่มีแนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเพิ่มขึ้นเช่นกัน และเมื่อทดลองเพิ่มอัตราการไหลที่มากกว่า 12.5 ลิตรต่อนาที พบว่า ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมที่ใกล้เคียงกลับ หวักระจายอากาศแบบ rigid small ส่วนหวักระจายอากาศแบบไม้พบว่าให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลต่ำสุด และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลที่มากกว่า 12.5 ลิตรต่อนาที กลับไม่ได้ช่วยให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเพิ่มขึ้นตาม ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากที่อัตราการไหลสูงๆ หวักระจายอากาศแบบไม้เกิดการไหลปั่นป่วนมากขึ้นการรวมตัวของฟองอากาศเพิ่มขึ้น เนื่องจากฟองอากาศออกจากหวักระจายอากาศเพียง 2 ฝั่งในแนวตั้ง ทำให้รวมตัวกันและมีฟองอากาศขนาดใหญ่ และทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมลดลง ในขณะที่ฝั่ง downcomer zone นั้น พบว่าหวักระจายอากาศแบบ rigid large มีแนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารสูงขึ้นที่อัตราการไหลสูงขึ้น และมีค่ามากกว่าหวักระจายอากาศแบบ rigid small ที่อัตราการไหลมากกว่า 12.5 ลิตรต่อนาที ส่วนหวักระจายอากาศแบบ rigid small ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสูงขึ้นตามอัตราการไหลและเริ่มคงที่ที่อัตราการไหลมากกว่า 12.5 ลิตรต่อนาที ในขณะที่หวักระจายแบบไม้ มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมต่ำสุด และมีแนวโน้มลดลงที่อัตราการไหลสูงขึ้น ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมทั้ง 2 ฝั่ง riser และ down comer zone พบว่า ฝั่ง downcomer zone มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมที่สูงกว่าฝั่ง riser zone อาจเนื่องมาจากค่าความเร็วลอยตัวของฟองอากาศทางฝั่ง downcomer zone ช้ากว่า ซึ่งส่งผลให้ฟองอากาศค้างอยู่ทางฝั่ง downcomer zone นานกว่ามีเวลาในการถ่ายเทมวลสารได้นานกว่าจึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารสูงขึ้น



รูปที่ 4.36 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบไม้ แบบ rigid ขนาดเล็ก และแบบ rigid ขนาดใหญ่ เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก

4.5.5 ค่าการใช้พลังงาน

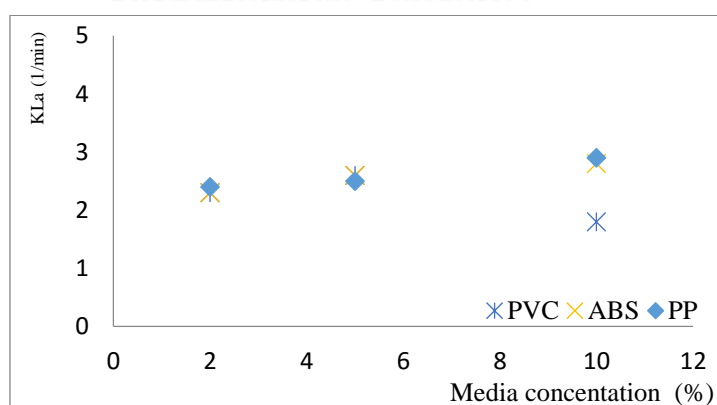
จากรูปที่ 4.37 แสดงค่าการใช้พลังงานที่เกิดขึ้นจากหัวกระจายฟองอากาศทั้ง 3 แบบ ได้แก่ หัวกระจายฟองอากาศแบบไม้ หัวกระจายฟองอากาศ rigid small และหัวกระจายอากาศ rigid large เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก จะเห็นได้ว่าค่าพลังงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่อัตราการไหลเพิ่มขึ้น โดยที่หัวกระจายอากาศแบบไม้ มีค่าการใช้พลังงานมากกว่าค่าพลังงานกระจายอากาศ rigid small และมากกว่าค่าพลังงานหัวกระจายอากาศ rigid large ทั้งนี้เนื่องมาจากหัวกระจายอากาศแบบไม้มีรูขนาดเล็ก และมีพื้นที่ปล่อยอากาศเพียง 2 ด้าน จึงต้องการพลังงานสูง และหัวกระจายฟองอากาศ rigid small มีรูขนาดเล็กกว่าจึงมีค่าพลังงานสูงกว่าหัวกระจายอากาศ rigid large ดังนั้นขนาดรู และพื้นที่ผิวของหัวกระจายอากาศมีผลต่อค่าการใช้พลังงาน



รูปที่ 4.37 เปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบไม้ แบบ rigid ขนาดเล็ก และแบบ rigid ขนาดใหญ่ เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก

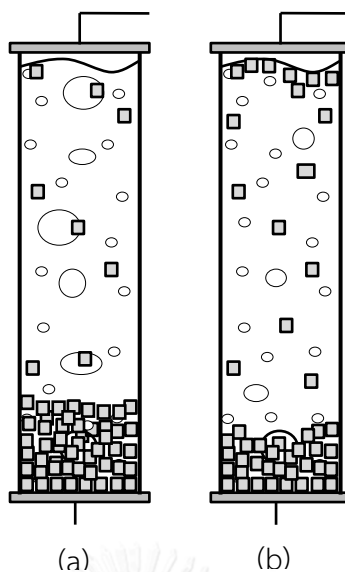
ดังนั้น จากการเปรียบเทียบผลขนาดฟองอากาศ ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ สัดส่วนก๊าซ พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม ที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบไม้ แบบ rigid ขนาดเล็ก และแบบ rigid ขนาดใหญ่ เมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก สรุปได้ว่าหัวกระจายฟองอากาศ แบบ rigid small และหัวกระจายอากาศ rigid large ปลอ่ยฟองอากาศในทิศทางอิสระดีกว่าหัวกระจายอากาศแบบไม้ ซึ่งมีพื้นที่ผิวรูขนาดใหญ่กว่า และหัวกระจายฟองอากาศแบบไม้นั้น แม้จะมีผิวรูขนาดเล็กแต่ปลอ่ยฟองอากาศได้เพียง 2 ด้าน มีผิวหน้าตัดไม้ขวางกัน จึงเป็นผลให้ผลการวิจัยต่ำกว่าหัวกระจายอากาศแบบ rigid ทั้งสองขนาด ทั้งนี้ทั้งนั้น เมื่อพิจารณาในการเลือกชนิดหัวกระจายอากาศเพื่อนำไปใช้งานจริงนั้น นอกจากจะดูประสิทธิภาพสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ขนาดฟองอากาศ พื้นที่ผิวสัมผัสผิวจำเพาะแล้ว ค่าพลังงานก็เป็นส่วนสำคัญที่ต้องคำนึงถึง เพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม การใช้พลังงานอย่างยั่งยืน และค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ

ในงานวิจัยนี้มีความสนใจในการพัฒนาประสิทธิภาพของกลไกการดูดซึม จึงพิจารณาเห็นว่าหากมีการปรับปรุงในคอลัมน์โดยการเพิ่มสมบัติกายภาพภายในระบบด้วยตัวกลางพลาสติกในระบบและขออ้างอิงผลการวิจัยของ (Nawaporn, 2013) ซึ่งศึกษาผลจากการใช้ตัวกลางพลาสติกแตกต่างกัน 3 ชนิดในคอลัมน์แบบอากาศยก ได้แก่ พอลิโพรไพลีน (PP) อะคริโลไนไตรล์บิวทาไดอีนสไตรีน (ABS) และพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) สรุปได้ว่าตัวกลางพลาสติกชนิดพอลิโพรไพลีน (PP) และอะคริโลไนไตรล์บิวทาไดอีนสไตรีน (ABS) ทำให้เกิดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมสูงสุด ดังรูปที่ 4.38 แต่เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณของตัวกลางกลับพบว่า อะคริโลไนไตรล์บิวทาไดอีนสไตรีน (ABS) มีการจมตัวอยู่ด้านล่างของคอลัมน์ส่งผลให้ขัดขวางการการถ่ายเทมวลสารระหว่างเฟสของเหลวและเฟสก๊าซได้ ดังรูปที่ 4.39 งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาตัวกลางพลาสติกชนิด พอลิโพรไพลีน (PP) ที่มีรูปทรงแตกต่างกัน



รูปที่ 4.38 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมจากการใช้ตัวกลาง 3 ชนิด พลาสติกพอลิโพรไพลีน (PP) อะคริโลไนไตรล์บิวทาไดอีนสไตรีน (ABS) และพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC)

นวพร ทาเพชร และคณะ (2557)

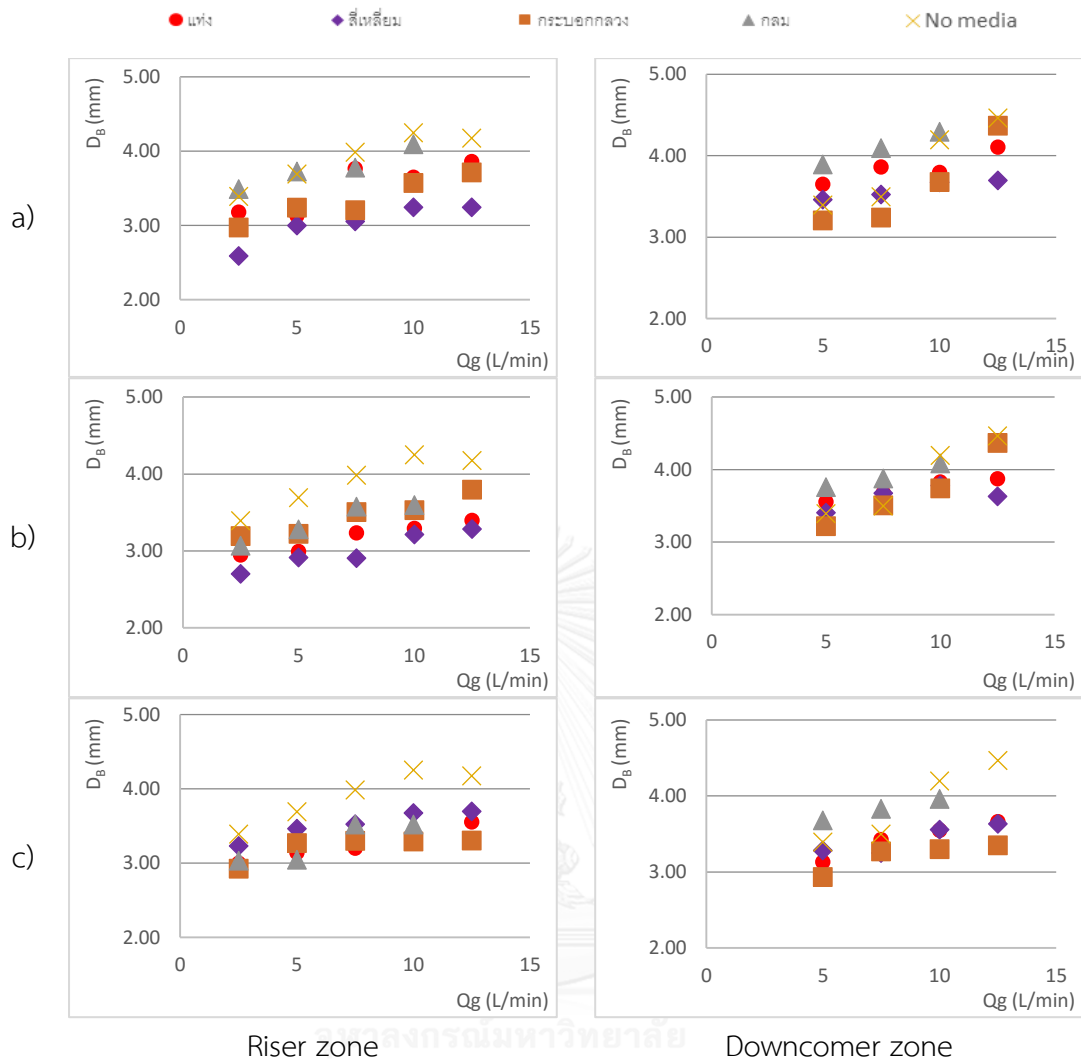


รูปที่ 4.39 การจมตัวของตัวกลาง (a) PVC, และ (b) ABS)

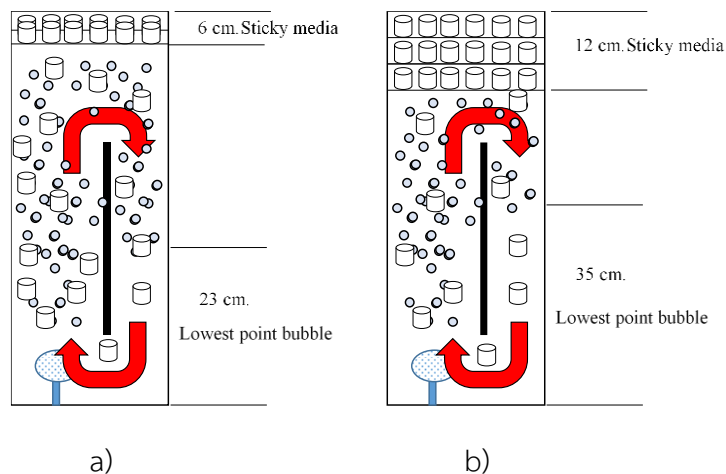
4.6 ผลจากการใช้ตัวกลางพลาสติกกับหัวกระจายฟองอากาศทั้ง 3 ชนิด

4.6.1 ขนาดฟองอากาศ

จากรูปที่ 4. 40 การเปรียบเทียบขนาดฟองอากาศที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบ rigid ขนาดเล็ก เมื่อมีตัวกลางพลาสติก เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ 2% - 10% โดยปริมาตร ในฝั่ง riser zone พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวกลางส่งผลให้ขนาดฟองอากาศมีแนวโน้มลดลง และแปรผันตามปริมาณตัวกลางที่เพิ่มลงไป ส่วนในด้านของขนาดหรือรูปร่างของตัวกลางนั้นยังไม่ผลต่างที่ชัดเจน ทั้งนี้ การที่ขนาดฟองอากาศมีขนาดเล็กลงนั้น อาจเป็นผลมาจากตัวกลางเม็ดพลาสติกเข้าไปขัดขวางกันปะทะหรือชนกันเองของฟองอากาศ ทำให้ฟองอากาศไม่สามารถรวมตัวกันและเพิ่มขนาดขึ้นได้ จึงมีขนาดที่เล็กกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับไม่มีตัวกลาง ในขณะที่ฝั่ง downcomer zone ที่ปริมาณตัวกลาง 2-5 % ในด้านของขนาดหรือรูปร่างของตัวกลางนั้นยังไม่ผลต่างที่ชัดเจน ส่วนปริมาณตัวกลางพลาสติกที่ 10% พบว่าตัวกลางทรงกระบอกกลวง แห้ง และสีเหลืองมีแนวโน้มขนาดฟองอากาศเล็กลงที่อัตราการไหลสูงขึ้น ในการทดลองพบว่าปริมาณตัวกลางและอัตราการไหลมีผลทำให้ขนาดฟองอากาศแตกต่างกัน โดยที่ปริมาณตัวกลางน้อยที่อัตราการไหลต่ำๆ พบว่า ตัวกลางมีการเคลื่อนที่ด้านทิศทางการไหลพยายามจะลอยขึ้น จึงอาจไม่เกิดการไหลวนภายในระบบ ทำให้การไปสัมผัสหรือปะทะกับตัวกลางเกิดขึ้นได้น้อย ดังรูปที่ 4.41 (a) ในขณะที่เติมปริมาณตัวกลางมากๆ ที่อัตราการไหลต่ำๆ พบว่ามีการลอยค้างของตัวกลางอยู่ผิวด้านบนของระบบดังรูปที่ 4.41 (b) ทำให้โอกาสการเกิดปะทะชนกันและฟองอากาศแตกตัวให้มีขนาดเล็กลงเกิดขึ้นได้น้อย



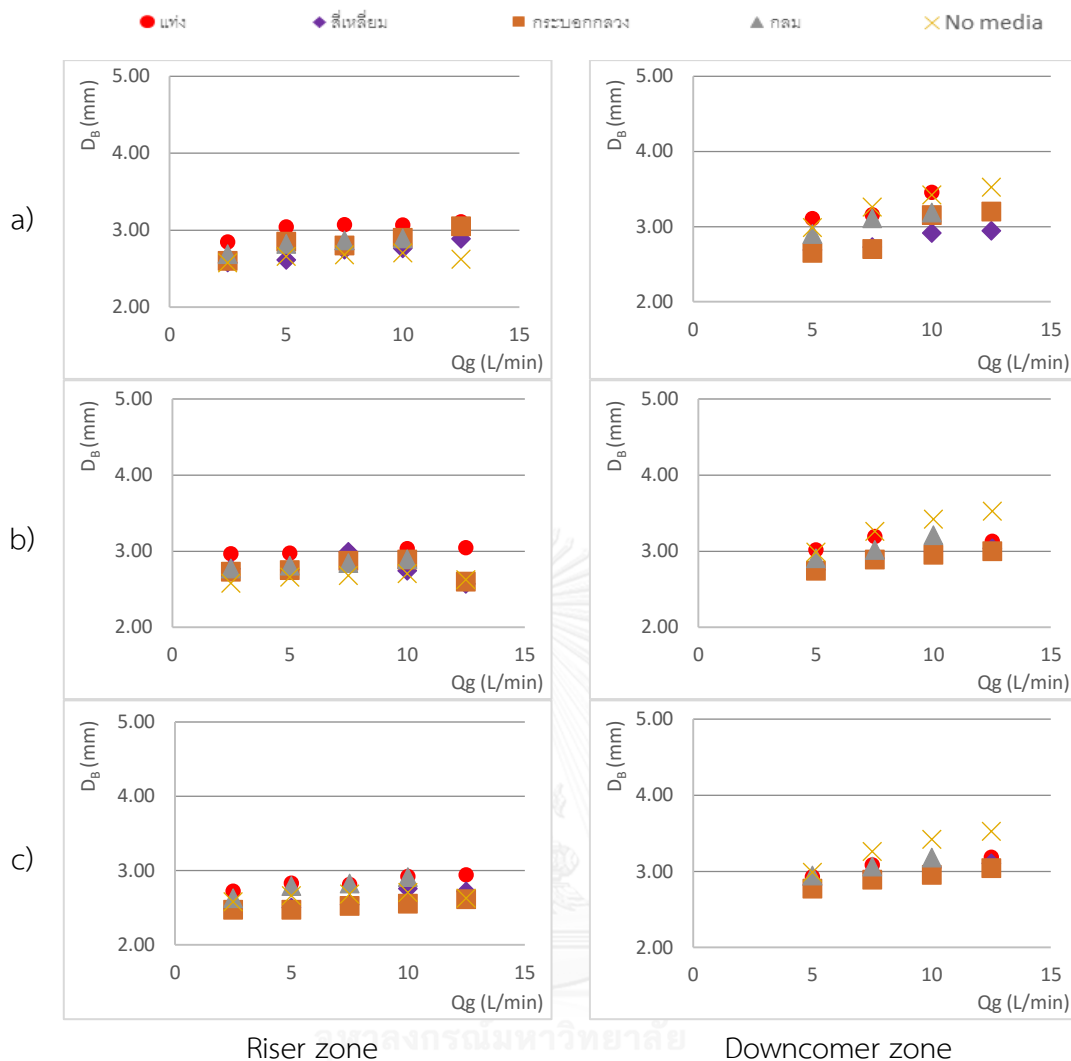
รูปที่ 4.40 เปรียบเทียบขนาดฟองอากาศที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบ rigid ขนาดเล็ก เมื่อใช้
 ตัวกลางพลาสติกปริมาณ a) 2 % b) 5 % และ c) 10 % โดยปริมาตร



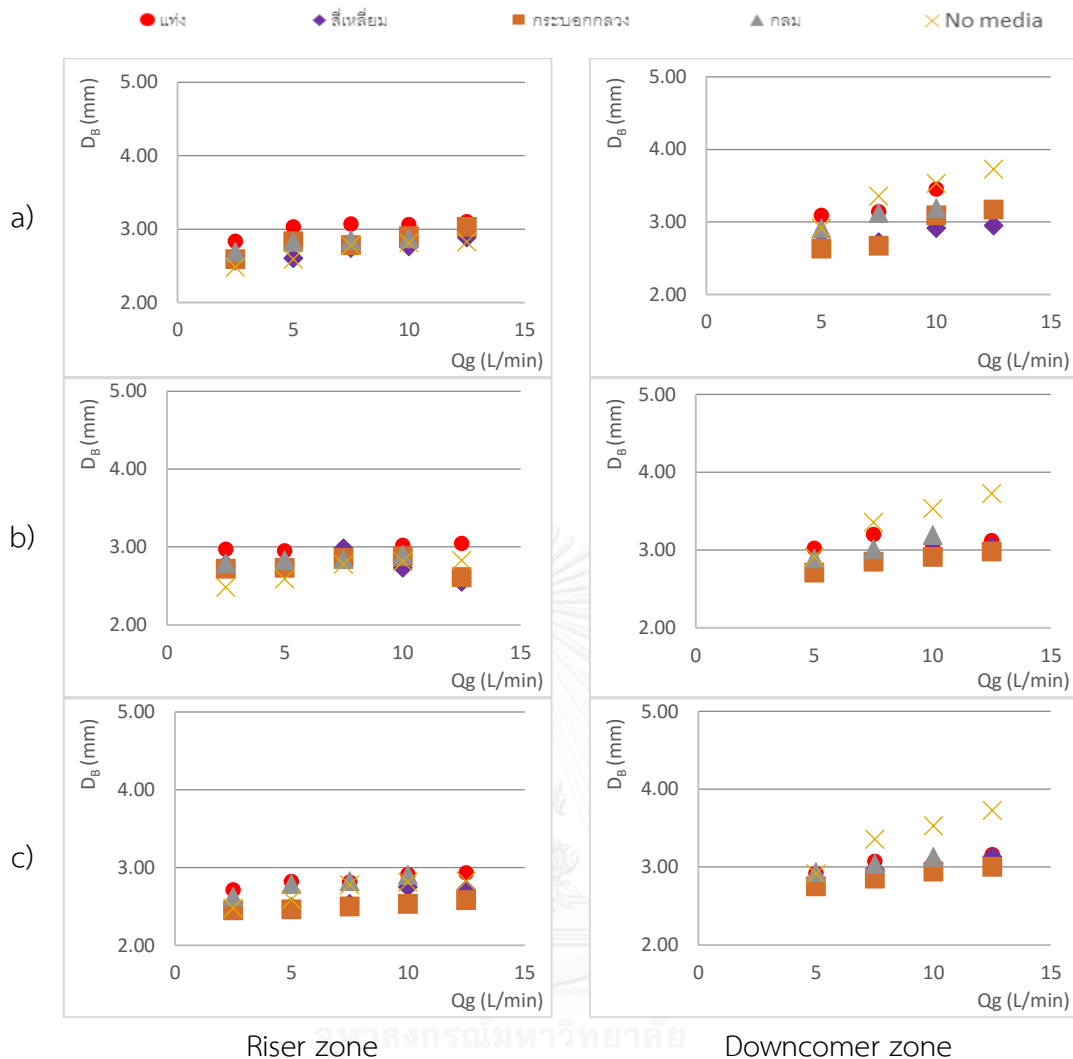
รูปที่ 4.41 แสดงทิศทางการไหลวนภายในระบบของคอลัมน์ที่มีปริมาณตัวกลางต่างๆ

a) ตัวกลางปริมาณน้อย b) ตัวกลางปริมาณมาก

จากรูปที่ 4.42 การเปรียบเทียบเปรียบเทียบขนาดฟองอากาศที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบไม้ เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติก ปริมาณ 2% - 10% โดยปริมาตร ในฝั่ง riser zone พบว่าเมื่อเติมปริมาณตัวกลางพลาสติกลงไปในระบบขนาดของฟองอากาศไม่มีผลมากนัก โดยที่ปริมาณตัวกลาง 2% ส่งผลให้ขนาดฟองอากาศใหญ่ขึ้นมากที่สุด รองลงมาคือขนาดฟองอากาศที่ปริมาณ 5 % และที่ปริมาณตัวกลาง 10% มีแนวโน้มขนาดฟองอากาศลดลงใกล้เคียงกับขนาดฟองอากาศเมื่อไม่มีตัวกลางพลาสติก ทั้งนี้รูปทรงของฟองอากาศไม่ส่งผลให้เห็นความแตกต่างของฟองอากาศ และมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่ฝั่ง downcomer zone พบว่าการที่เพิ่มตัวกลางพลาสติกลงในระบบช่วยให้ขนาดฟองอากาศมีแนวโน้มลดลง และรูปทรงของฟองอากาศไม่ส่งผลให้ขนาดฟองอากาศแตกต่างกัน มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งสาเหตุที่เป็นเช่นนี้ อาจเพราะว่า หัวกระจายอากาศแบบไม้มีการรวมตัวกันของฟองอากาศได้ง่ายกว่าหัวกระจายแบบอื่น และเมื่ออัตราการไหลสูงกลับยิ่งมีการปั่นป่วนในระบบสูง การเคลื่อนที่เกิดขึ้นได้เร็ว สอดคล้องกับค่าสัดส่วนก๊าซที่มีค่าต่ำสุด ซึ่งทำให้ฟองอากาศลอยขึ้นไปยังผิวระบบออกไปได้ง่าย



รูปที่ 4.42 เปรียบเทียบขนาดฟองอากาศที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบไม่ เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติก ปริมาณ a) 2 % b) 5 % และ c) 10 % โดยปริมาตร



รูปที่ 4.43 เปรียบเทียบขนาดฟองอากาศที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบ rigid ขนาดใหญ่ เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ a) 2 % b) 5 % และ c) 10 % โดยปริมาตร

จากรูปที่ 4.43 การเปรียบเทียบเปรียบเทียบขนาดฟองอากาศที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบ rigid large เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติก ปริมาณ 2% - 10% โดยปริมาตร ในฝั่ง riser zone พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวกลางพลาสติกในระบบพบว่าขนาดของฟองอากาศมีแนวโน้มลดลงแต่ไม่มากนัก โดยที่ปริมาณตัวกลาง 2% โดยปริมาตรทำให้ขนาดฟองอากาศเพิ่มขึ้น ส่วนในด้านรูปทรงของตัวกลางไม่มีผลที่แตกต่างอย่างชัดเจน ในขณะที่ปริมาณตัวกลาง 5% พบว่าที่อัตราการไหลสูงขนาดฟองอากาศเริ่มมีแนวโน้มที่จะลดลง ส่วนที่ปริมาณตัวกลาง 10% พบว่า ขนาดของฟองอากาศลดลงมากขึ้น โดยเฉพาะตัวกลางทรงกระบอกกลวง แต่ไม่ชัดเจนมากนัก นอกจากนี้ขนาดตัวกลางฝั่ง

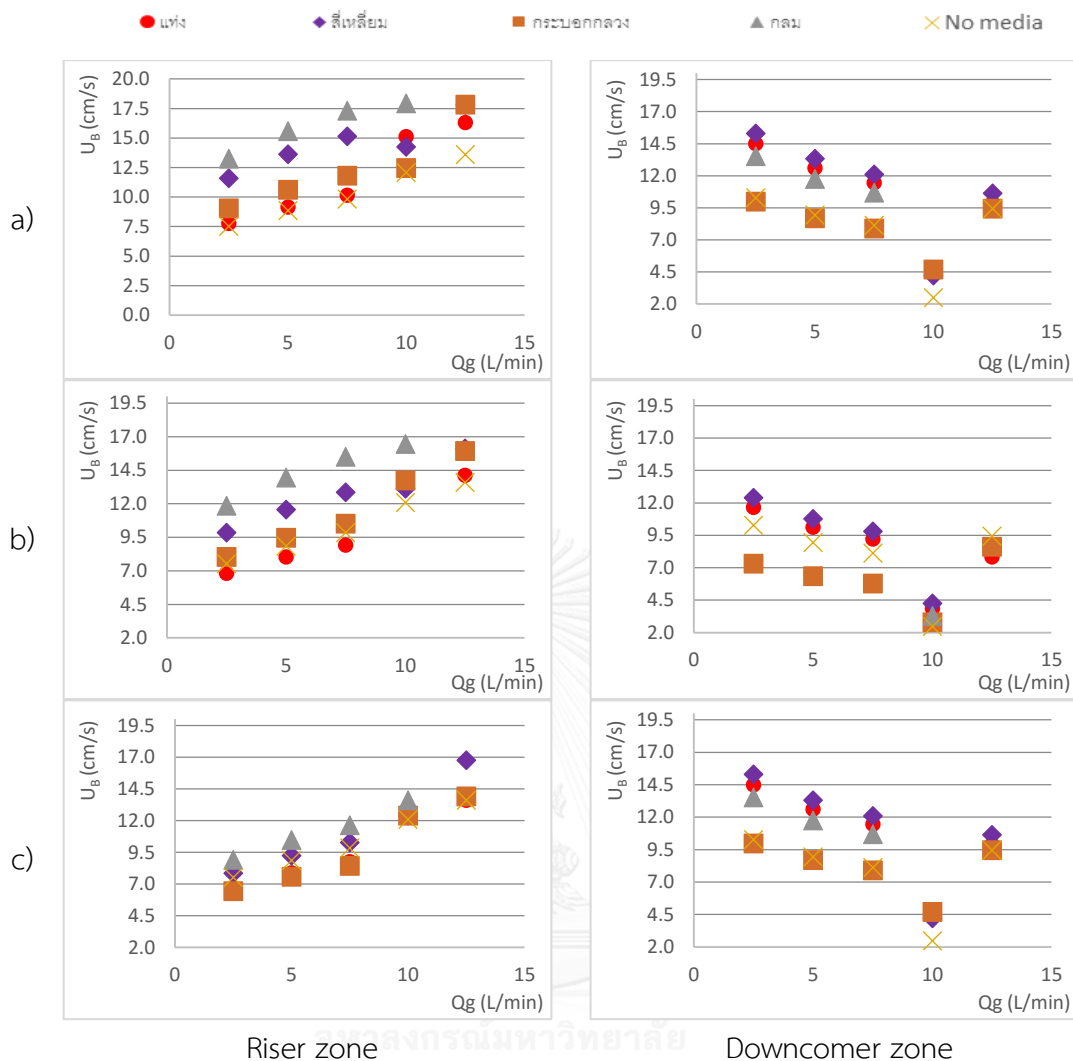
downcomer zone พบว่าการเพิ่มปริมาณตัวกลางมีแนวโน้มที่จะทำให้ขนาดฟองอากาศลดลงเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้น

นอกจากนี้ยังได้ชี้ว่าหัวกระจายฟองอากาศแบบ rigid small เมื่อใช้ร่วมกับตัวกลางพลาสติกทำให้ขนาดฟองอากาศเล็กลงกว่าหัวกระจายฟองอากาศแบบ rigid large และแบบไม้ อาจเนื่องมาจากมีขนาดฟองอากาศใหญ่กว่า (ก่อนเพิ่มตัวกลางพลาสติก) มีโอกาสปะทะกับตัวกลางมากกว่าฟองอากาศขนาดเล็ก ส่วนหัวกระจายอากาศแบบไม้ในขณะที่ก่อนใช้ตัวกลางมีขนาดฟองอากาศเล็กสุดแต่ เมื่อใส่ตัวกลางทำให้มีขนาดฟองอากาศใหญ่กว่าหัวกระจายแบบ rigid ทั้ง 2 แบบนั้น เพราะว่าฟองอากาศเกิดการรวมตัวกันทำให้ไม่ส่งผลต่อขนาดฟองอากาศมากนัก

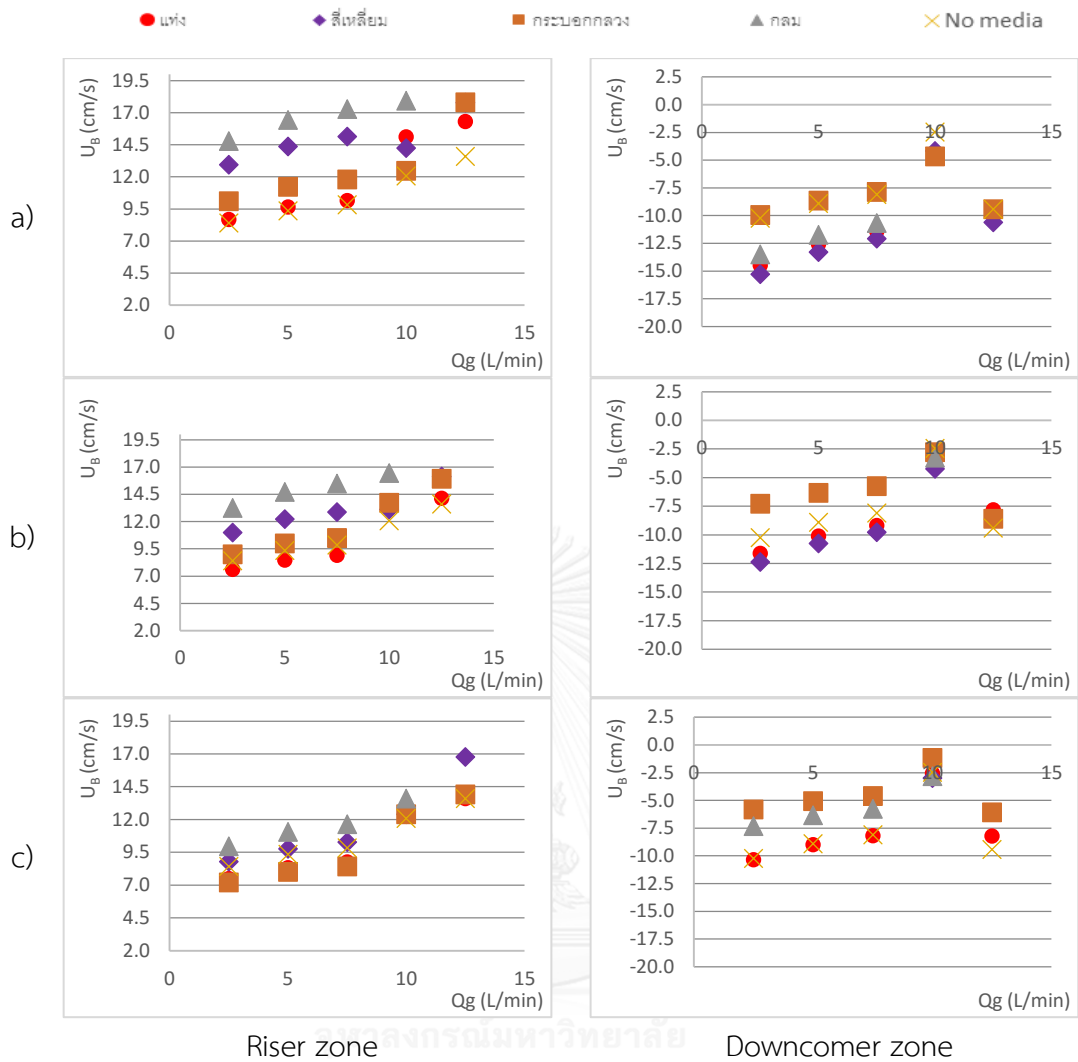
4.6.2 ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ

จากรูปที่ 4.44 จะเห็นได้ว่ารูปทรงและปริมาณตัวกลางพลาสติกมีผลต่อค่าความเร็วลอยตัวไม่เหมือนกัน โดยที่หัวกระจายอากาศแบบ small rigid นั้น ในฝั่ง riser zone ที่ปริมาณตัวกลาง 2 % ค่าความเร็วลอยตัวมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเติมตัวกลางพลาสติก โดยที่รูปทรงของตัวกลางทรงกลม ให้ค่าความเร็วลอยตัวสูงสุด รองลงมาคือทรงสี่เหลี่ยม กระบอกกลวง และทรงกลมตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณตัวกลาง 5% โดยน้ำหนักพบว่า ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศเป็นไปตามทิศทางเดียวกับปริมาณตัวกลางที่ 2 % แต่เริ่มจะมีบางรูปทรงของตัวกลางที่จะมีความเร็วลอยตัวต่ำกว่าแบบไม่ใช้ตัวกลาง ได้แก่ รูปทรงแท่ง และทรงกระบอก ส่วนปริมาณตัวกลางที่ 10% โดยปริมาตร พบว่าความเร็วลอยตัวของฟองอากาศที่รูปทรงกระบอกกลวงลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการแทรกผ่านตัวกลางของฟองอากาศที่มีปริมาณตัวกลางหนาแน่นมากขึ้น ย่อมเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าปริมาณตัวกลางที่เปอร์เซ็นต์ต่ำกว่า ในกรณีด้าน downcomer zone พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวกลางที่ 2% โดยปริมาตรทำให้ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศเพิ่มขึ้น โดยที่รูปทรงสี่เหลี่ยมมีค่าความเร็วลอยตัวสูงสุด รองลงมาคือ ทรงแท่ง ทรงกลม และทรงกระบอกซึ่งมีค่าความเร็วลอยตัวเปลี่ยนไปน้อยสุด ใกล้เคียงกับแบบไม่มีตัวกลาง และที่ปริมาณตัวกลาง 5-10% พบว่าความเร็วลอยตัวมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณตัวกลางที่เพิ่มในระบบ และเป็นตัวกลางทรงกระบอกที่มีความเร็วลอยตัวต่ำสุด

ดังนั้น เมื่อปริมาณตัวกลางเพิ่มขึ้น พื้นที่ว่างในระบบสำหรับการเคลื่อนที่ของฟองอากาศลดลง การแทรกผ่านตัวกลางของฟองอากาศที่มีปริมาณตัวกลางหนาแน่นมากขึ้น ย่อมเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าปริมาณตัวกลางที่เปอร์เซ็นต์ต่ำกว่า และตัวกลางอาจทำปะทะกับฟองอากาศเป็นเหตุให้ฟองอากาศมีขนาดเล็กลง ย่อมเคลื่อนที่ได้ช้าลงเช่นกัน



รูปที่ 4.44 เปรียบเทียบความเร็วลอยตัวที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบ rigid ขนาดเล็ก เมื่อใช้
 ตัวกลางพลาสติกปริมาณ a) 2 % b) 5 % และ c) 10 % โดยปริมาตร

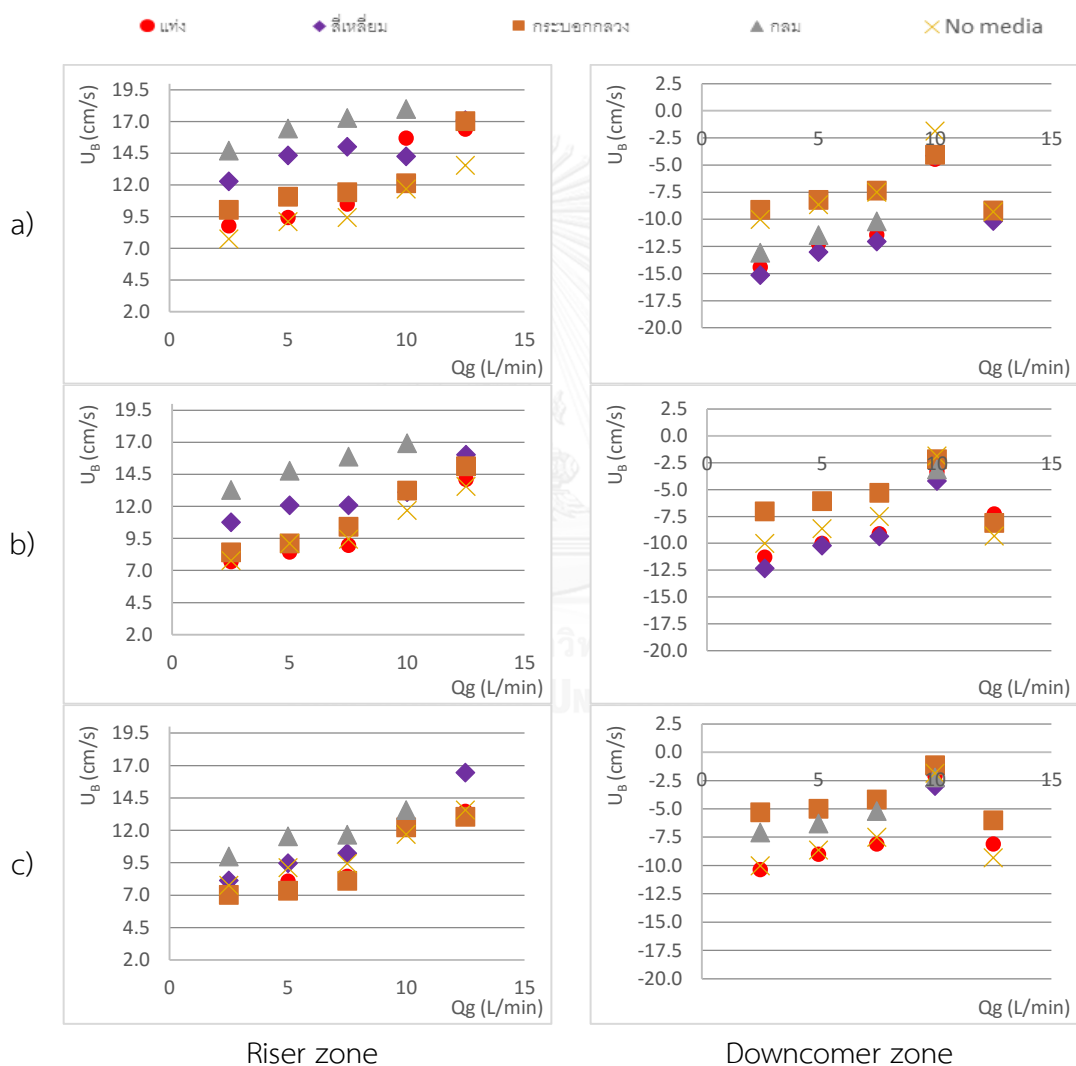


รูปที่ 4.45 เปรียบเทียบความเร็วลอยตัวที่เกิดจากห้วงกระจายอากาศแบบไม่ เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติก ปริมาณ a) 2 % b) 5 % และ c) 10 % โดยปริมาตร

จากรูปที่ 4.45 เปรียบเทียบความเร็วลอยตัวที่เกิดจากหวักระจ่ายอากาศแบบไม่ เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ (a) 2 % (b) 5 % และ (c) 10 % โดยปริมาตร ในด้าน riser zone จะเห็นได้ว่าการเติมตัวกลางพลาสติกในระบบทำให้ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศเพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มลดลงที่ปริมาณตัวกลางพลาสติกเพิ่มขึ้น โดยที่ความเร็วลอยตัวของปริมาณตัวกลาง 2% สูงสุด รองลงมาคือ 5% และ 10% โดยปริมาตร ตามลำดับ ในขณะที่รูปทรงของตัวกลางมีผลต่อความเร็วลอยตัวของฟองอากาศเช่นกัน คือ รูปทรงกลมให้ค่าความเร็วลอยตัวสูงสุด รองลงมา คือ สีเหลี่ยม และทรงกระบอกและแบบแท่งมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนในด้าน downcomer zone พบว่าความเร็วลอยตัวยิ่งเข้าใกล้ค่า 0 cm/s เมื่อใดนั้นหมายความว่า การเคลื่อนที่ของฟองอากาศเข้าใกล้สภาวะหยุดนิ่งหรือคงที่ คือการกักตัวของฟองอากาศอยู่ในระบบเพื่อถ่ายเทมวลสารได้นานขึ้น ดังนั้น ผลการทดลอง พบว่า ด้วยลักษณะทางกายภาพหรือความหนาแน่นใกล้เคียงกับน้ำ ปริมาณตัวกลางที่ 10% ให้ค่าความเร็วลอยตัวเข้าใกล้สภาวะหยุดนิ่งมากที่สุด รองลงมาคือ ปริมาณตัวกลางที่ 5% และ 2% ตามลำดับ ในด้านรูปทรงตัวกลางพบว่า ทรงกระบอกกลวงมีค่าเข้าใกล้สภาวะหยุดนิ่งมากที่สุด รองลงมาคือทรงกลม ทรงแท่งส่วนทรงสี่เหลี่ยมเคลื่อนเคลื่อนวนกลับได้รวดเร็วมากห่างจากสภาวะหยุดนิ่งมากที่สุด

ผลการทดลองในรูปที่ 4.46 เปรียบเทียบความเร็วลอยตัวที่เกิดจากหวักระจ่ายอากาศแบบ rigid large เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ (a) 2 % (b) 5 % และ (c) 10 % โดยปริมาตร ในด้าน riser zone จะเห็นได้ว่าการเติมตัวกลางพลาสติกในระบบทำให้ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศเพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มลดลงที่ปริมาณตัวกลางพลาสติกเพิ่มขึ้น โดยที่ความเร็วลอยตัวของปริมาณตัวกลาง 2% สูงสุด รองลงมาคือ 5% และ 10% โดยปริมาตร ตามลำดับ ในขณะที่รูปทรงของตัวกลางมีผลต่อความเร็วลอยตัวของฟองอากาศเช่นกัน คือ รูปทรงกลมให้ค่าความเร็วลอยตัวสูงสุด รองลงมา คือ สีเหลี่ยม และทรงกระบอกและแบบแท่งมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนในด้าน downcomer zone พบว่าความเร็วลอยตัวยิ่งเข้าใกล้ค่า 0 cm/s เมื่อใดนั้นหมายความว่า การเคลื่อนที่ของฟองอากาศเข้าใกล้สภาวะหยุดนิ่งหรือคงที่ คือการกักตัวของฟองอากาศอยู่ในระบบเพื่อถ่ายเทมวลสารได้นานขึ้น ดังนั้น ผลการทดลอง พบว่า ปริมาณตัวกลางที่ 10% ให้ค่าความเร็วลอยตัวเข้าใกล้สภาวะหยุดนิ่งมากที่สุด รองลงมาคือ ปริมาณตัวกลางที่ 5% และ 2% ตามลำดับ ในด้านรูปทรงตัวกลางพบว่า ทรงกระบอกกลวงมีค่าเข้าใกล้สภาวะหยุดนิ่งมากที่สุด รองลงมาคือทรงกลม ทรงแท่งส่วนทรงสี่เหลี่ยมเคลื่อนเคลื่อนวนกลับได้รวดเร็วมากห่างจากสภาวะหยุดนิ่งมากที่สุด

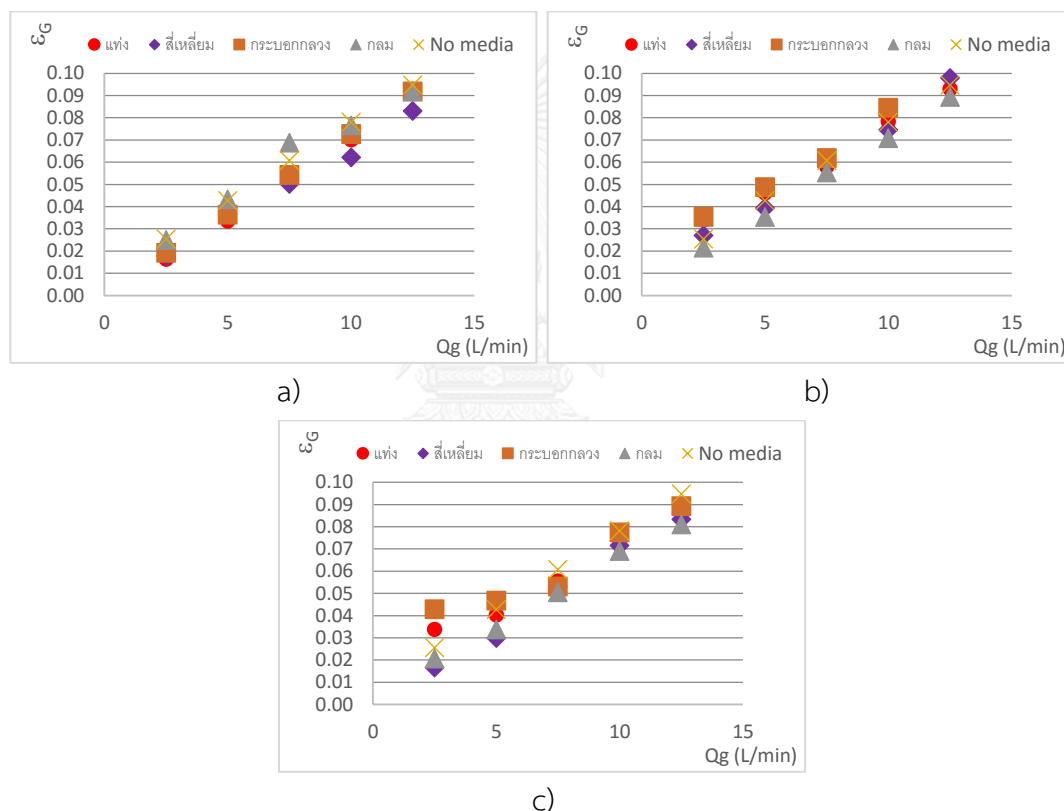
ทั้งนี้ สรุปได้ว่าในด้าน riser zone ของทั้ง 3 แบบของหัวกระจายอากาศ พบว่าที่ปริมาณตัวกลางมากๆ ทำให้ค่าความเร็วลอยตัวฟองอากาศต่ำลง เนื่องจากการที่ฟองอากาศต้องแทรกผ่านช่องว่างหรือความพรุนของตัวกลาง และรูปทรงกระบอกกลางที่ปริมาณมากๆ ทำให้ฟองอากาศต่ำลงมากที่สุด ในขณะที่ฝั่ง downcomer zone นั้น พบว่าที่ปริมาณจำนวนตัวกลางพลาสติกมากๆ ทำให้ฟองอากาศถูกดักไว้ในระบบฝั่ง down comer นานกว่า และตัวกลางรูปทรงกระบอกกลางส่งผลทำให้ฟองอากาศเคลื่อนที่เข้าใกล้สภาวะหยุดนิ่งมากที่สุด



รูปที่ 4.46 เปรียบเทียบความเร็วลอยตัวที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบ rigid ขนาดใหญ่ เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ a) 2 % b) 5 % และ c) 10 % โดยปริมาตร

4.6.3 สัดส่วนก๊าซ

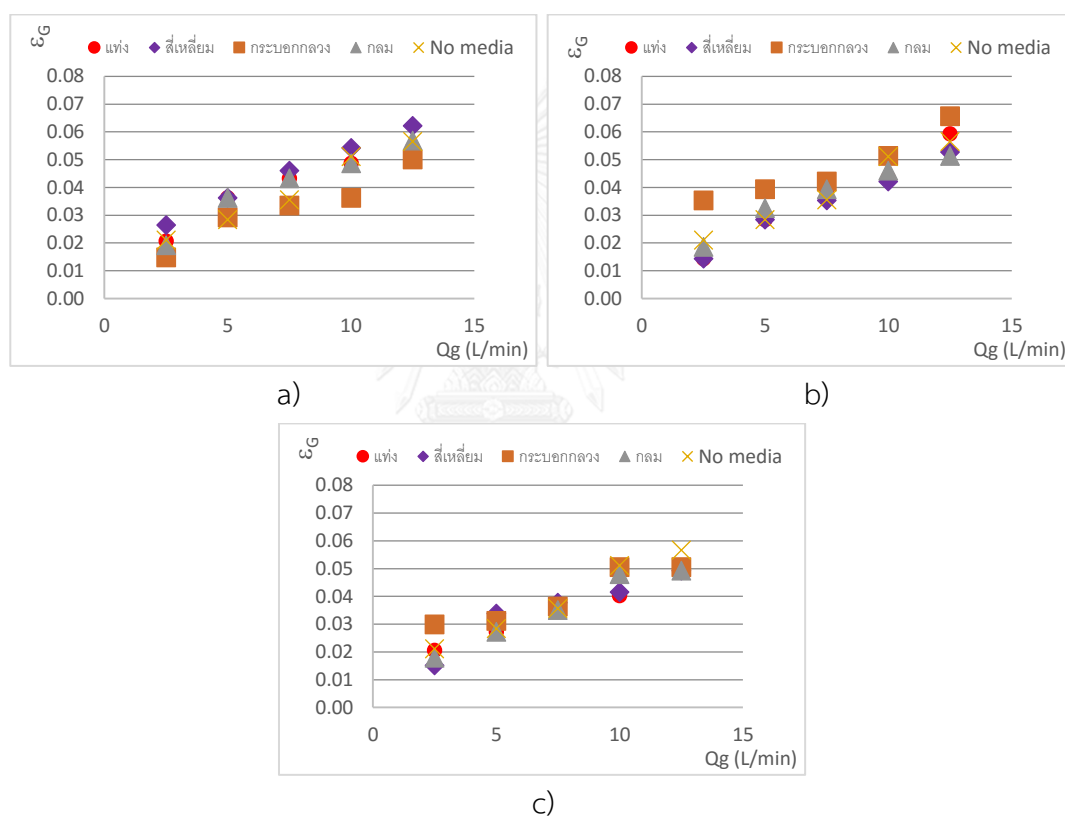
จากรูปที่ 4.47 เปรียบเทียบค่าสัดส่วนก๊าซที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบ rigid small จะเห็นได้ว่าการหาค่าสัดส่วนก๊าซโดยการวัดปริมาณฟองอากาศผิวด้านบนของระบบซึ่งลอยขึ้นเท่ากันทั้งหมด ดังนั้นในฝั่งด้าน riser zone และ downcomer zone จึงมีค่าเดียวกัน ค่าสัดส่วนก๊าซเมื่อใช้หัวกระจายอากาศแบบ rigid small พบว่าที่ปริมาณตัวกลาง 2-5% โดยปริมาตร มีค่าสัดส่วนก๊าซเปลี่ยนแปลงน้อยและใกล้เคียงกันมากเมื่อเทียบกับค่าสัดส่วนก๊าซที่ไม่ใช้ตัวกลาง และที่ปริมาณตัวกลาง 10% พบว่ารูปทรงกระบอกกลางให้ค่าสัดส่วนก๊าซเพิ่มขึ้นที่อัตราการไหลต่ำ และที่อัตราการไหลสูงการเปลี่ยนแปลงของค่าสัดส่วนก๊าซใกล้เคียงกัน



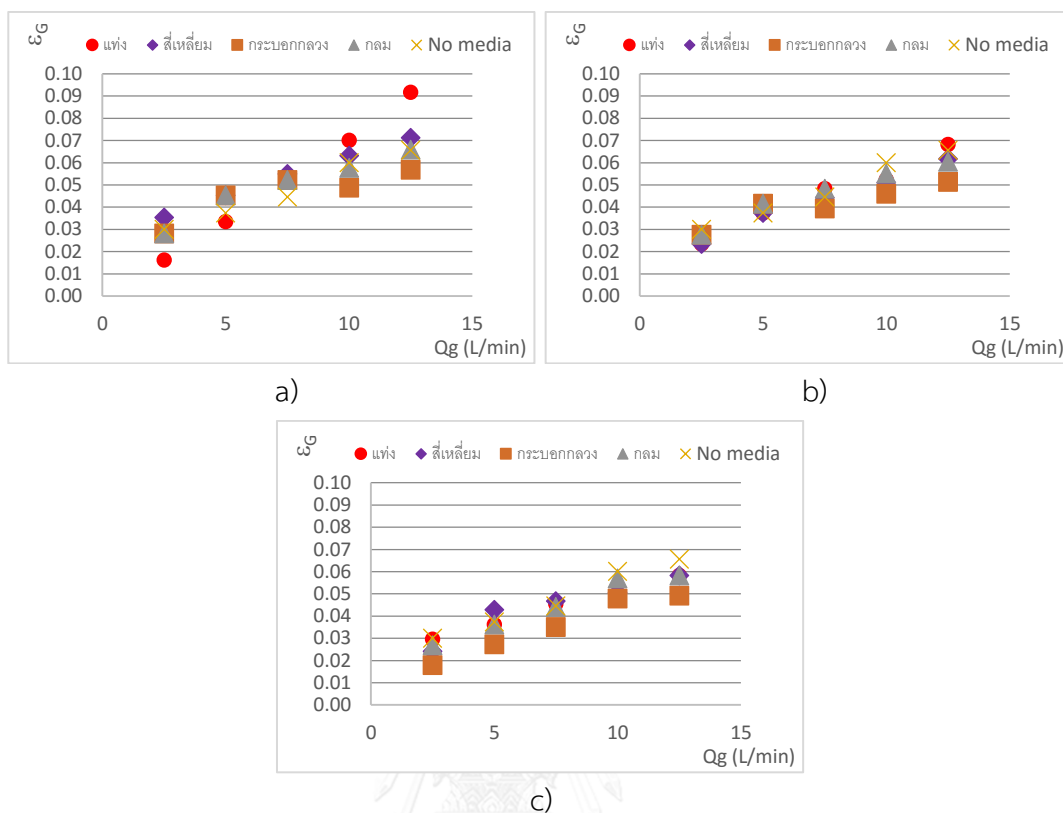
รูปที่ 4.47 เปรียบเทียบสัดส่วนก๊าซที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบ rigid ขนาดเล็ก เมื่อมีตัวกลางพลาสติก เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ a) 2 % b) 5 % และ c) 10 % โดยปริมาตร

จากรูปที่ 4.48 เปรียบเทียบค่าสัดส่วนก๊าซที่เกิดจากหัวกระจายอากาศไม้ จะเห็นได้ว่าการหาค่าสัดส่วนก๊าซโดยการวัดปริมาณฟองอากาศผิวด้านบนของระบบซึ่งลอยขึ้นเท่ากันทั้งหมด ดังนั้นในฝั่งด้าน riser zone และ downcomer zone จึงมีค่าเดียวกัน ค่าสัดส่วนก๊าซเมื่อใช้หัวกระจายอากาศแบบไม้ พบว่าที่ปริมาณตัวกลาง 2% โดยปริมาตร มีค่าสัดส่วนก๊าซมีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อ

เทียบกับค่าสัดส่วนก๊าซที่ไม่ใช้ตัวกลาง และรูปทรงกระบอกกลวงให้ค่าสัดส่วนก๊าซต่ำสุด ใกล้เคียงกับค่าสัดส่วนก๊าซแบบไม่มีตัวกลาง และที่ปริมาณตัวกลาง 5% พบว่ารูปทรงกระบอกกลวงให้ค่าสัดส่วนก๊าซเพิ่มขึ้นที่อัตราการไหลต่ำ และที่อัตราการไหลสูงการเปลี่ยนแปลงของค่าสัดส่วนก๊าซใกล้เคียงกัน ส่วนค่าสัดส่วนก๊าซที่ปริมาณ 10% กับอัตราการไหลต่ำทำให้ค่าสัดส่วนก๊าซของตัวกลางรูปทรงกระบอกมีค่าเพิ่มขึ้น และที่อัตราการไหลสูงขึ้นค่าสัดส่วนก๊าซของตัวกลางทุกรูปทรงใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากตัวกลางรูปทรงกระบอกกลวงมีความพรุนมาก เมื่อทดลองใช้ตัวกลางปริมาณสูงๆ กับอัตราการไหลต่ำ จะทำให้เกิดการคั่งตัวของตัวกลางด้านบนผิวได้



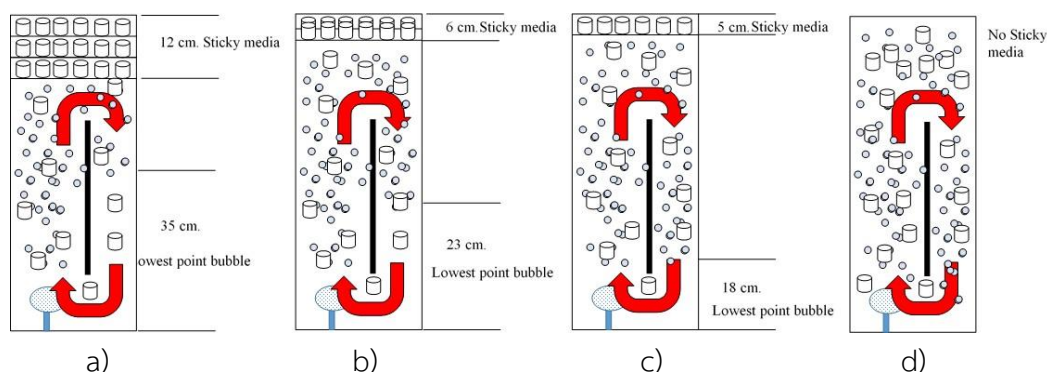
รูปที่ 4.48 เปรียบเทียบสัดส่วนก๊าซที่เกิดจากหวักระจายอากาศแบบไม่ เมื่อมีตัวกลางพลาสติก เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ a) 2 % b) 5 % และ c) 10 % โดยปริมาตร



รูปที่ 4.49 เปรียบเทียบสัดส่วนก๊าซที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบ rigid ขนาดใหญ่ เมื่อมีตัวกลางพลาสติก เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ a) 2 % b) 5 % และ c) 10 % โดยปริมาตร

จากรูปที่ 4.49 เปรียบเทียบสัดส่วนก๊าซที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบ rigid ขนาดใหญ่ (large) จะเห็นได้ว่าการหาค่าสัดส่วนก๊าซโดยการวัดปริมาณฟองอากาศผิวด้านบนของระบบซึ่งลอยขึ้นเท่ากันทั้งหมด ดังนั้นในฝั่งด้าน riser zone และ downcomer zone จึงมีค่าเดียวกัน ค่าสัดส่วนก๊าซที่ปริมาณตัวกลาง 2-5% โดยปริมาตร มีค่าสัดส่วนก๊าซมีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับค่าสัดส่วนก๊าซที่ไม่ใช้ตัวกลาง และรูปทรงกระบอกให้ค่าสัดส่วนก๊าซต่ำสุด ที่อัตราการไหลสูงๆ ส่วนค่าสัดส่วนก๊าซที่ปริมาณ 10% กับอัตราการไหลต่ำทำให้ค่าสัดส่วนก๊าซของตัวกลางมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเทียบกับค่าสัดส่วนก๊าซที่ไม่มีตัวกลาง และที่อัตราการไหลสูงขึ้นค่าสัดส่วนก๊าซของตัวกลางทุกรูปทรงมีค่าลดลง และรูปทรงตัวกลางทรงกระบอกกลวงมีค่าสัดส่วนก๊าซต่ำสุด

ทั้งนี้ สรุปค่าสัดส่วนก๊าซของหัวกระจายอากาศทั้ง 3 แบบได้ว่า ที่อัตราการไหลต่ำๆ พบว่าเกิดการค้างตัวของตัวกลางพลาสติกบนผิวของระบบ ส่วนที่อัตราการไหลสูงปริมาณตัวกลางจะค้างที่ผิวด้านบนลดลงหรือไม่ค้างผิวด้านบนเลย และการไหลวนของฟองอากาศที่อัตราการไหลต่ำๆก็น้อยเช่นกัน ดังรูปที่ 4.50

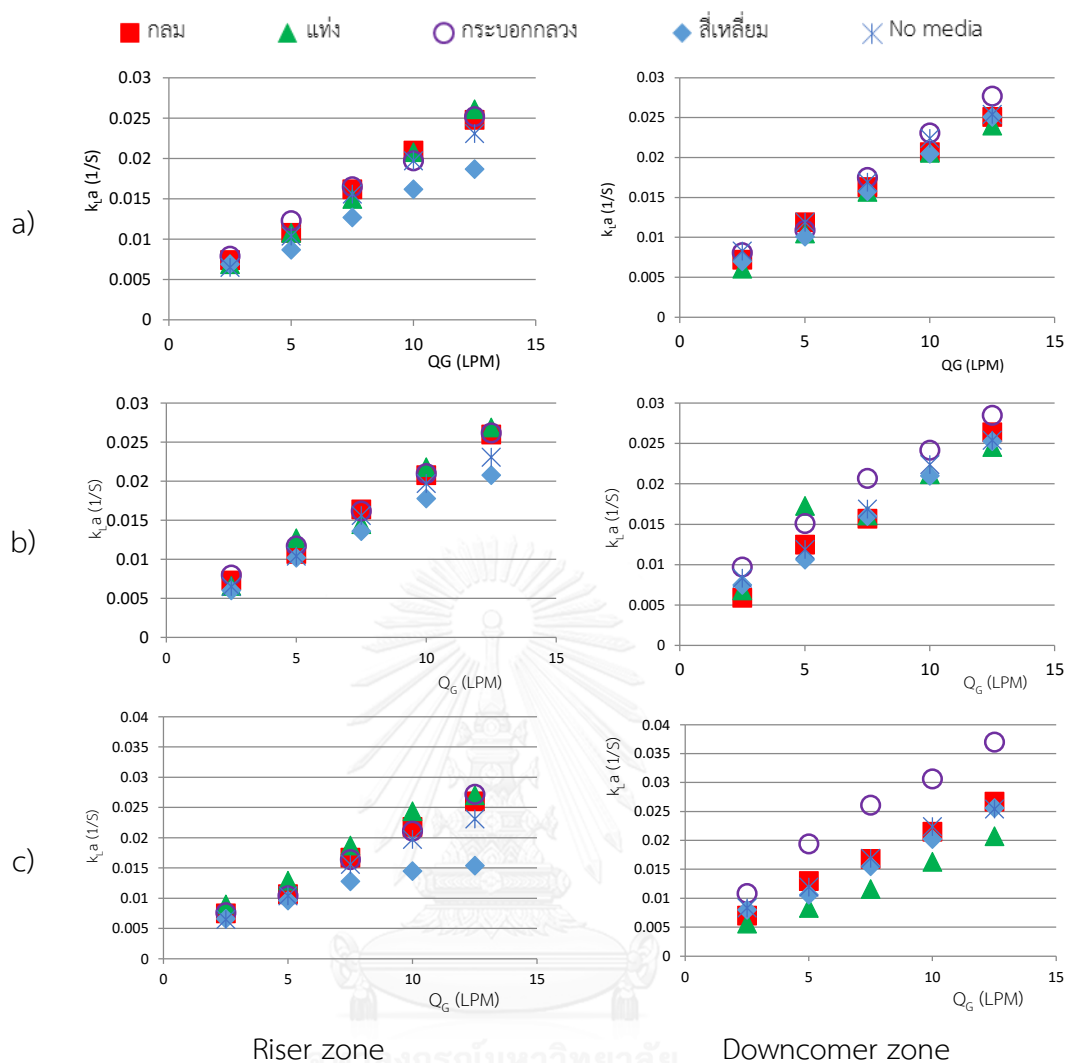


รูปที่ 4.50 จำลองลักษณะการค้ำตัวของตัวกลางพลาสติกที่อัตราการไหลต่างๆ

a) 2.5 LPM b) 5 LPM c) 7.5 -10 LPM และ d) 12.5 LPM

4.6.4 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม

จากรูปที่ 4. 51 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบ rigid ขนาดเล็ก เมื่อมีตัวกลางพลาสติก ในฝั่ง riser zone จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมเมื่อเติมตัวกลางพลาสติกในคอลัมน์ให้ผลที่ไม่เหมือนกัน โดยที่เมื่อใช้หัวกระจายฟองอากาศแบบ rigid small กับตัวกลางรูปทรงสี่เหลี่ยม พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมมีแนวโน้มลดลง ซึ่งตัวกลางรูปทรงสี่เหลี่ยมให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมต่ำสุด ส่วนตัวกลางรูปทรงอื่นให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมที่ใกล้เคียงกัน เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณตัวกลางและเพิ่มอัตราการไหล ส่วนในด้านฝั่ง downcomer zone พบว่าที่ปริมาณตัวกลาง 2% ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมไม่แตกต่างกันเมื่อเปรียบเทียบกับไม่มีตัวกลางพลาสติก ในขณะที่ปริมาณตัวกลาง 5% พบว่าตัวกลางรูปทรงกระบอกกลวงมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน ส่วนตัวกลางรูปทรงที่เหลี่ยมมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมใกล้เคียงกัน และเมื่อเพิ่มปริมาณตัวกลางเป็น 10% กลับพบว่าตัวกลางรูปทรงกระบอกให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมสูงสุด รองลงมาคือทรงกลมและทรงกระบอกมีค่าใกล้เคียงกันไม่แตกต่างจากแบบไม่มีตัวกลาง และตัวกลางรูปทรงแบบแท่งให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความพรุนของตัวกลาง รูปทรง อาจทำให้เกิดการพาฟองอากาศไหลวนไปพร้อมๆกับความเร็วในระบบ เพราะความเร็วลอยตัวของฟองอากาศรูปทรงแท่งที่ปริมาณตัวกลาง 10% มีค่าสูงสุด จึงทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมต่ำสุด และตัวกลางทรงกระบอกกลวงที่ 10% มีค่าความเร็วลอยตัวต่ำสุด และยังพบการเข้าไปแทรกตัวของฟองอากาศในตัวกลางทรงกระบอกเช่นเดียวกับคอลัมน์แบบฟองอากาศที่กล่าวไปแล้วเบื้องต้น จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมสูงสุด



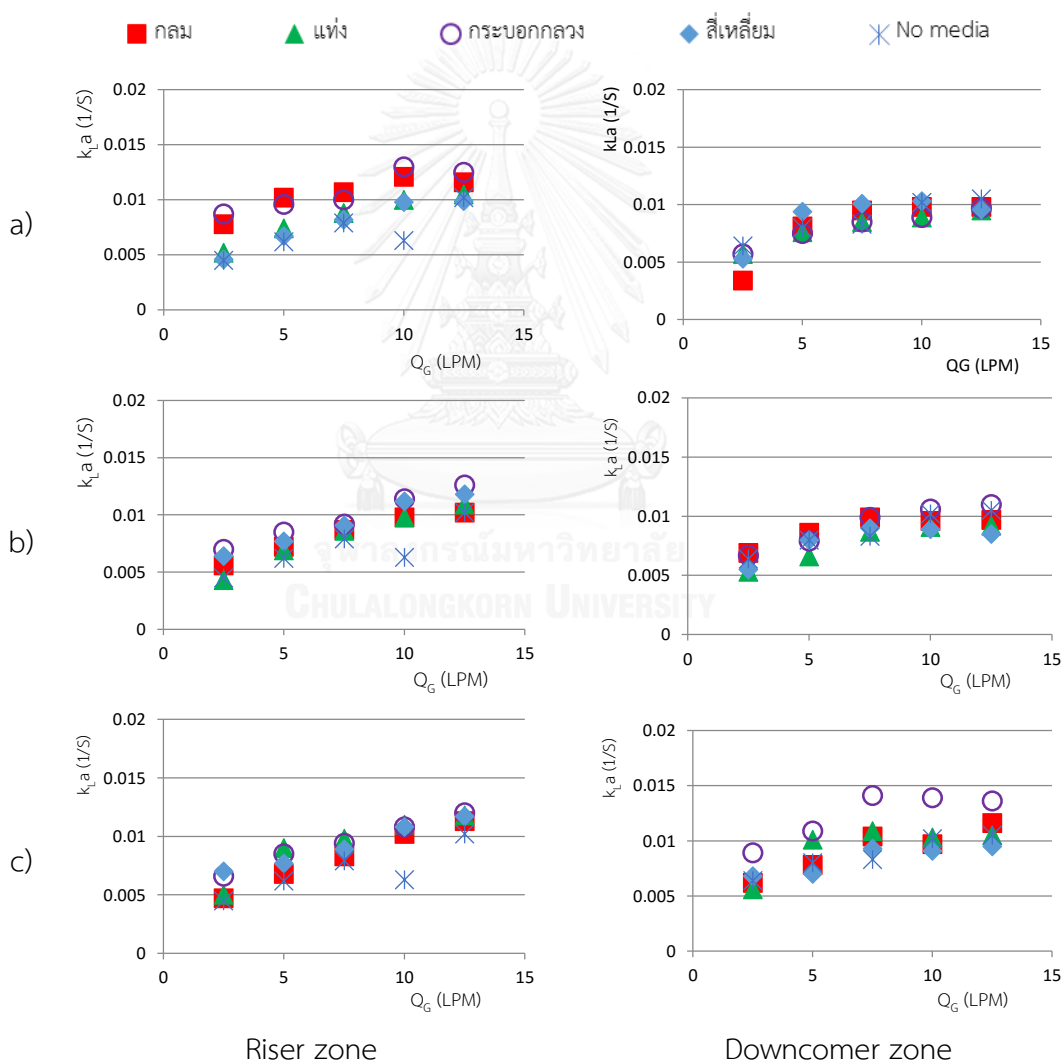
รูปที่ 4.51 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบ rigid

ขนาดเล็ก เมื่อมีตัวกลางพลาสติก เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ

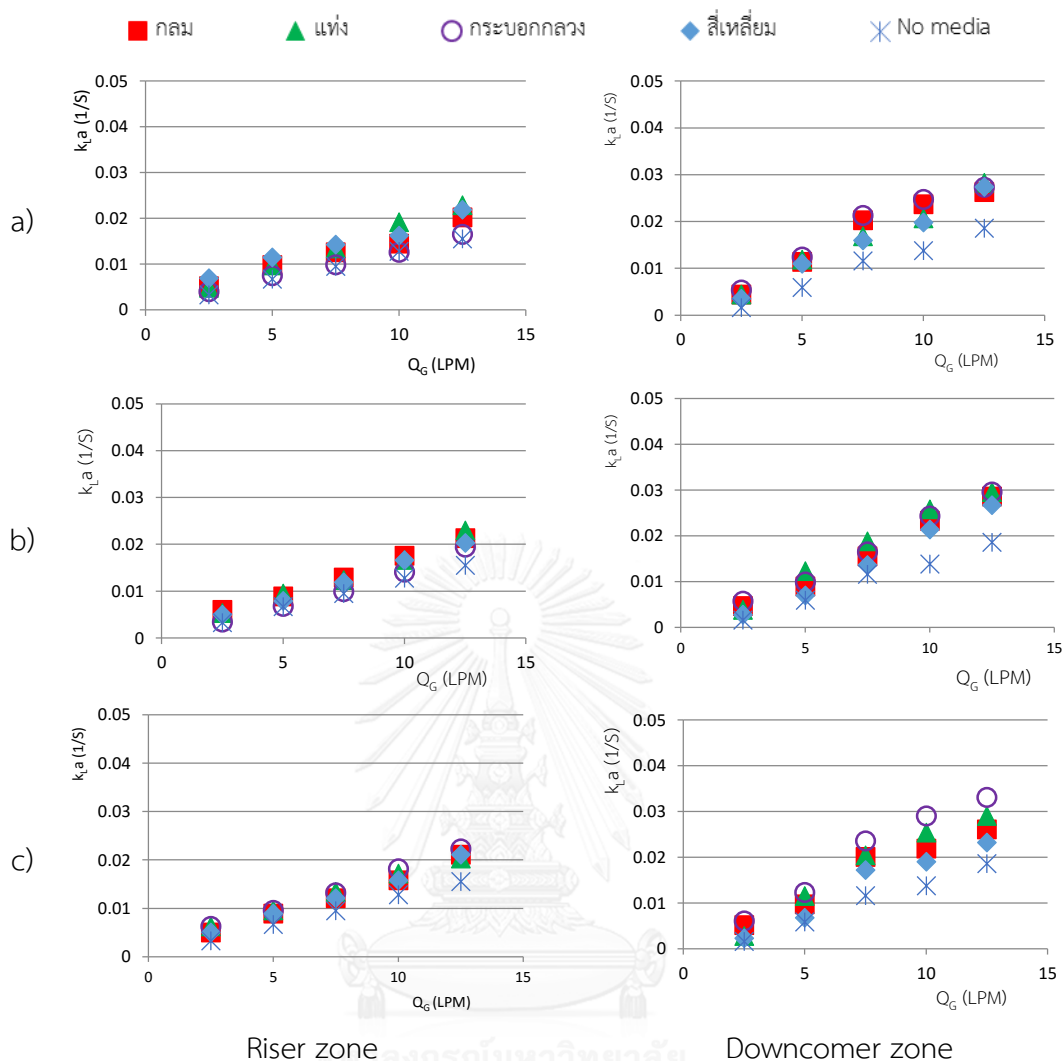
a) 2 % b) 5 % และ c) 10 % โดยปริมาตร

จากรูปที่ 4.52 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบไม้ เมื่อมีตัวกลางพลาสติก ในฝั่ง riser zone พบว่าการใส่ตัวกลางพลาสติกลงในคอลัมน์จะช่วยให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมเพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณตัวกลาง 2% โดยปริมาตร ตัวกลางทรงกระบอกกลางและทรงกลมให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมสูงขึ้นและใกล้เคียงกัน ในขณะที่ตัวกลางแบบสี่เหลี่ยมและแบบแท่งให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมไม่แตกต่างและใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบกับไม่ใส่ตัวกลาง ส่วนปริมาณตัวกลางที่ 5-10% โดยปริมาตรรูปทรงตัวกลางไม่มีความแตกต่างในการช่วยให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมเพิ่มขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเท

มวลรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมไม่มีความแตกต่างกันในแต่ละรูปทรงของตัวกลาง เมื่อพิจารณาในฝั่ง down comer zone ที่ปริมาณตัวกลาง 2-5% โดยปริมาตร ด้านรูปทรงและปริมาณตัวกลางไม่พบความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมเมื่อเทียบกับแบบไม่ใส่ตัวกลาง แต่ในขณะที่เพิ่มปริมาณตัวกลางเป็น 10% พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของตัวกลางทรงกระบอกกลวงเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยที่ตัวกลางรูปทรงอื่นๆมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมเกิดจากขนาดของฟองอากาศและความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ ซึ่งช่วยดักฟองอากาศไว้ในระบบได้นานเพื่อให้เกิดการถ่ายเทมวล



รูปที่ 4.52 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบไม้ เมื่อมีตัวกลางพลาสติก เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ a) 2 % b) 5 % และ c) 10 % โดยปริมาตร



รูปที่ 4.53 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบ rigid ขนาดใหญ่ เมื่อมีตัวกลางพลาสติก เมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกปริมาณ a) 2 % b) 5 % และ c) 10 % โดยปริมาตร

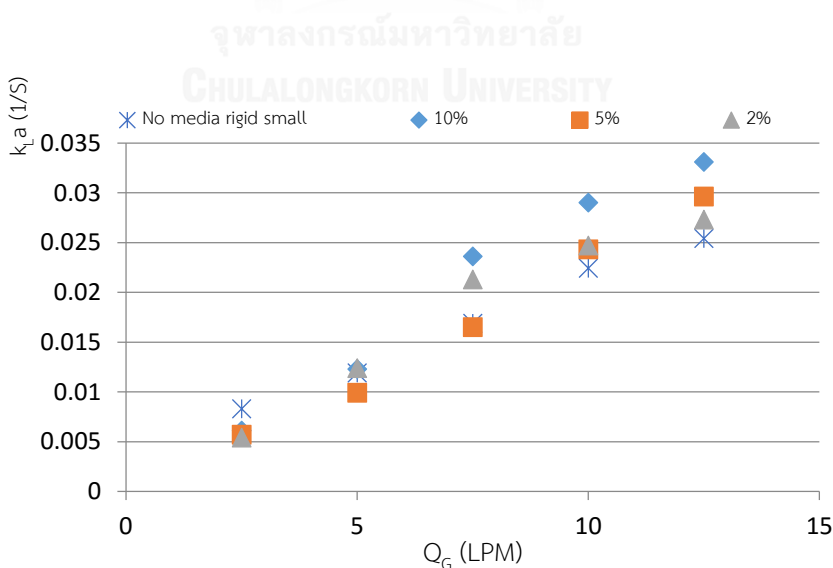
จากรูปที่ 4.53 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบ rigid large เมื่อมีตัวกลางพลาสติก ในฝั่ง riser zone พบว่าการเพิ่มปริมาณตัวกลางส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมเพิ่มขึ้นโดยที่ปริมาณตัวกลาง 10% ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมสูงสุด รองลงมาคือปริมาณตัวกลางที่ 5% และประมาณตัวกลางที่ 2% ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมต่ำสุดเกือบไม่ค้อยพบว่าแตกต่าง ส่วนในด้านของรูปทรงตัวกลางนั้นไม่พบว่ามึผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม เมื่อมาพิจารณาในด้าน downcomer zone พบว่าการเพิ่มปริมาณตัวกลางมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม โดยที่ปริมาณตัวกลางพลาสติกที่ 10% ให้ค่า

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมสูงสุด รองลงมาคือ 5% และ 2% ตามลำดับ โดยที่ตัวกลางรูปทรงกระบอกกลวงให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมสูงสุด รองลงมาคือตัวกลางทรงแท่งและกลมมีค่าใกล้เคียงกัน ตัวกลางรูปทรงสี่เหลี่ยมมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมต่ำสุด

ทั้งนี้ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมขึ้นอยู่กับค่าขนาดของฟองอากาศ ความเร็วลอยตัวพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ ระยะเวลาการเคลื่อนที่คงตัวในระบบหรือการเคลื่อนที่แบบเข้าใกล้สภาวะเข้าใกล้ความเร็วเป็นศูนย์ ซึ่งผลการวิจัยที่กล่าวมาเบื้องต้น จะนำมาพิจารณาการเลือกใช้สภาวะที่เหมาะสมเพื่อช่วยให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมมีการเปลี่ยนแปลงในแนวโน้มที่ดีขึ้น และเกณฑ์ในการพิจารณานั้นจะมองถึงการใช้งานได้จริงในเชิงการอนุรักษ์พลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืนรวมถึงด้านเศรษฐศาสตร์ ซึ่งสรุปได้ดังหัวข้อดังต่อไปนี้

1. อัตราการไหลก๊าซ

จากผลการวิจัยที่กล่าวมาพบว่า ตัวกลางพลาสติกรูปทรงกระบอกกลวง มีผลที่ดีช่วยในการให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการดักจับฟองอากาศให้ค้างอยู่ในระบบได้นาน จึงเลือกมาพิจารณา ซึ่งจากผลค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมแบบไม่มีตัวกลางพบว่า หัวกระจายแบบ rigid small ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมสูงสุด แต่เนื่องจากเมื่อเพิ่มอัตราการไหลให้กับหัวกระจายอากาศแบบ rigid large ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมสูงกว่า และนอกจากนี้หัวกระจายแบบ rigid large ประหยัดพลังงานที่ใช้มากกว่า และเมื่อทดลองใส่ตัวกลางพลาสติกลงไป ดังรูปที่ 4.54 จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของหัวกระจายอากาศแบบ rigid large สูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของหัวกระจายอากาศแบบ rigid small

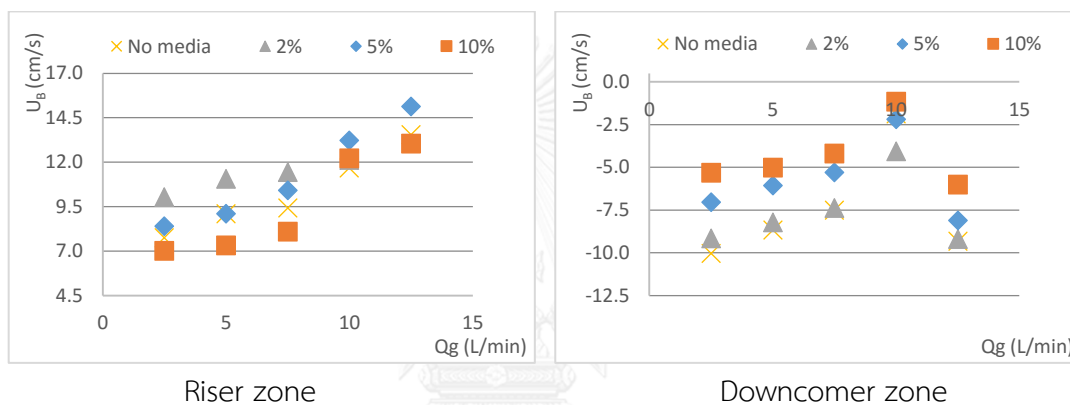


รูปที่ 4.54 ผล k_{La} จากการใส่ตัวกลางทรงกระบอกกลวงในหัวกระจายอากาศ rigid large เปรียบเทียบกับผล k_{La} หัวกระจายอากาศ rigid small แบบไม่มีตัวกลาง

จะเห็นได้ว่าการใช้หัวกระจายอากาศแบบ rigid large ที่อัตราเร็ว 12.5 ลิตรต่อนาที ที่ปริมาณตัวกลางพลาสติก 10% ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมสูงสุด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกอัตราการไหลก๊าซเข้าที่ 12.5 ลิตรต่อนาที และพิจารณาปริมาณตัวกลางทรงกระบอกกลางที่ 10% โดยปริมาตร ร่วมกับหัวกระจายอากาศแบบ rigid large

2. ความเร็วลอยตัว และปริมาณตัวกลาง

ซึ่งรูปที่ 4.55 จะบ่งบอกว่าค่าความเร็วลอยตัวของทรงกระบอกกลางที่ปริมาณ 10% เคลื่อนที่อยู่ในระบบช้าที่สุด จึงเหมาะสมกับการพิจารณาเลือกใช้



รูปที่ 4.55 ผล U_B จากการใส่ตัวกลางทรงกระบอกกลางในหัวกระจายอากาศ rigid large ปริมาณต่างๆ

3. พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ

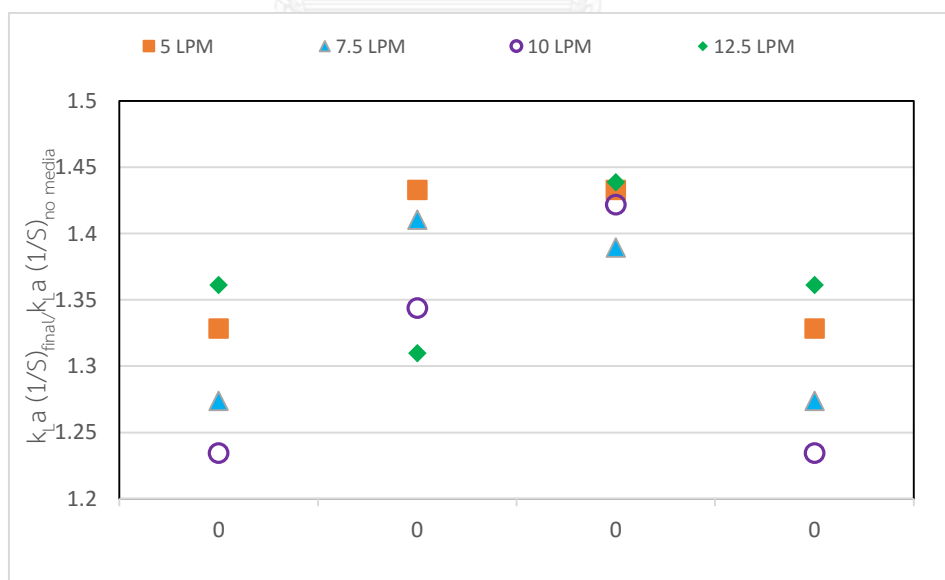


รูปที่ 4.56 พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะกับหัวกระจายอากาศต่างๆ

จากรูปที่ 4.56 พบว่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะที่ อัตราการไหล 12.5 ลิตรต่อนาที ทางฝั่ง downcomer zone โดยใช้ปริมาณตัวกลาง 10% โดยน้ำหนัก มีค่าสูงสุดที่ตัวกลางทรงกระบอกกลวง ซึ่งหัวกระจายอากาศแบบ rigid large และแบบไม้ มีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะใกล้เคียงกัน แต่หากมองในด้านพลังงาน และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารแล้ว พบว่าหัวกระจายแบบไม้ต่ำกว่า ดังนั้นจึงพิจารณาเลือกใช้หัวกระจายอากาศแบบ rigid large ร่วมกับตัวกลางรูปทรงกระบอกกลวง ซึ่งสอดคล้องกับผลความเร็วลอยตัวและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร

4. รูปทรงของตัวกลางพลาสติก

จากรูปที่ 4.57 จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมเมื่อใช้ตัวกลาง ($k_{La,final}$) เทียบกับสัดส่วนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมเมื่อไม่ใช้ตัวกลาง ($k_{La,no\ media}$) ที่อัตราการไหลต่าง 2.5 – 12.5 ลิตรต่อนาที พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมสูงสุดเมื่อใช้ตัวกลางทรงกระบอกกลวง และมีรูปทรงแท่งรองลงมา แต่เนื่องจากตัวกลางรูปทรงแท่งมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลลดลงในบางการทดลอง และก็มีที่อัตราการไหลต่างกันประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลรวมที่เหมาะสมที่สุดคือ ตัวกลางรูปทรงกระบอกกลวงที่ อัตราการไหล 12.5 ลิตรต่อนาที ซึ่งทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมสูงสุด ทั้งนี้จะไม่นำค่าอัตราการไหลที่ 2.5 ลิตรต่อนาทีมาเป็นเกณฑ์พิจารณา เนื่องจากด้าน downcomer zone ฟองอากาศไม่เกิดการไหลวนในระบบ



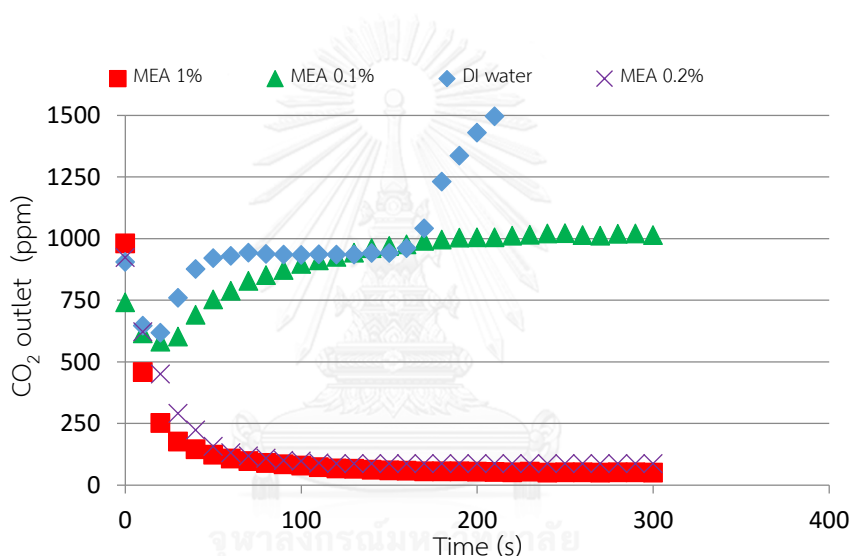
รูปที่ 4.57 เปรียบเทียบผลกระทบของรูปทรงตัวกลางต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม

4.7 การพิจารณาเลือกใช้ของเหลวดูดซึมในการดูดซึมทางเคมี

ในการทดลองหัวข้อนี้ เพื่อศึกษากลไกการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โดยใช้เฟส ก๊าซคือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และเฟสของเหลวคือสารละลายโมโนเอทานอลามีน (MEA) และน้ำ DI โดยจะทดลองเพื่อหาเฟสของเหลวที่ใช้สารละลายโมโนเอทานอลามีนที่สภาวะเหมาะสมก่อน เพื่อ ความคุ้มค่าของต้นทุน

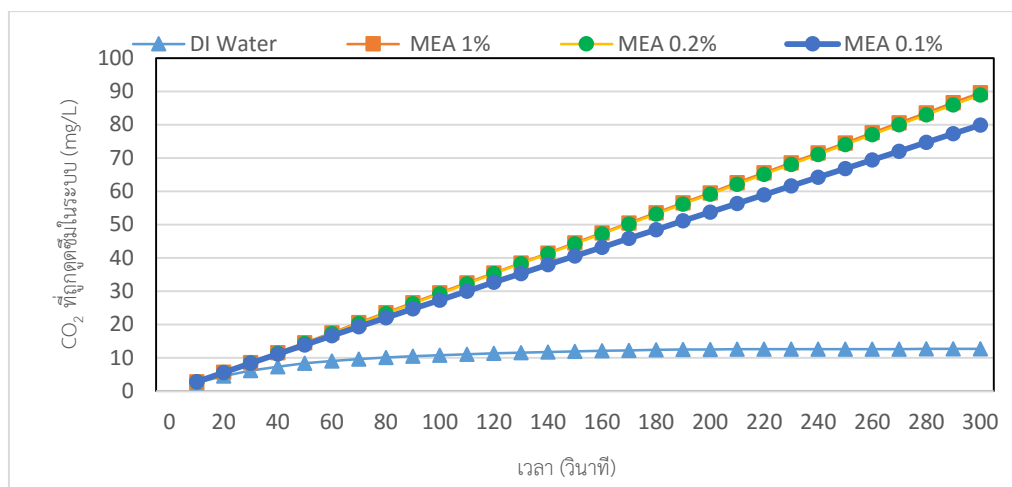
4.7.1 การเลือกความเข้มข้นของสารละลายโมโนเอทานอลามีน (MEA) ที่เหมาะสม

การทดลองนี้เป็นการวิเคราะห์การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโมโนเอทานอลามีน (MEA) ซึ่งจะใช้สัดส่วนเดียวกันกับการทดลองคอลัมน์แบบฟองอากาศในหัวข้อที่ 4.3 ซึ่งจะ เลือกใช้สัดส่วนเดียวกันกับการทดลองในส่วนของคอลัมน์แบบฟองอากาศ



รูปที่ 4.58 เปรียบเทียบค่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากระบบที่วัดได้

จากรูปที่ 4.58 จะเห็นได้ว่า เมื่อใช้เฟสของเหลวเป็น น้ำ DI พบว่าความเข้มข้นของ CO_2 สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว อาจเนื่องมาจากปฏิกิริยาทางเคมีเกิดช้า เกิดขึ้นน้อย หรือไม่เกิดขึ้นเลย แตกต่างจากการใช้เฟสของเหลวด้วยสารละลาย MEA ซึ่งส่งผลให้ค่าความเข้มข้นของ CO_2 ขาออกจากระบบ ลดลงตามความเข้มข้นที่ใส่ในระบบ ยิ่งเพิ่มความเข้มข้นสารละลาย MEA มาก ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกจากระบบยิ่งลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าภายในระบบมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น โดยที่ความเข้มข้นสารละลาย MEA 0.1% ให้ค่าค่าความเข้มข้นของ CO_2 ขาออกสูงสุด รองลงมาคือ 0.2% และ 0.1% ให้ค่าค่าความเข้มข้นของ CO_2 ขาออกต่ำสุด

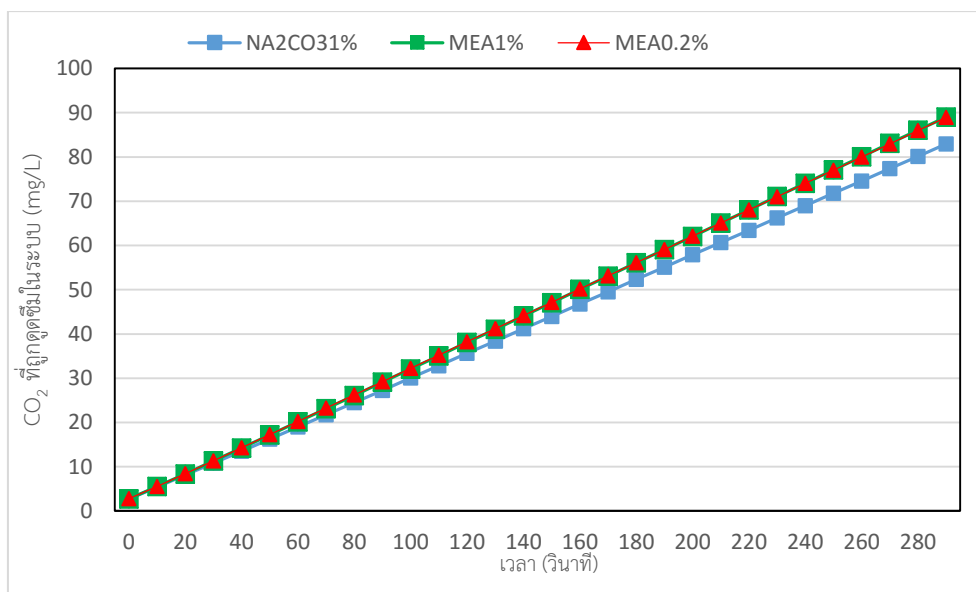


รูปที่ 4.59 ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับด้วยสารละลาย MEA ที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากรูปที่ 4.59 จะเห็นได้ว่าเมื่อปรับเปลี่ยนเฟสของเหลวด้วยสารละลายโมโนเอทานอลามีน พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเฟสของเหลวน้ำ DI และประสิทธิภาพในการดูดซับ CO_2 ยิ่งสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารละลายโมโนเอทานอลามีน ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าสารละลายโมโนเอทานอลามีนที่ความเข้มข้น 1% และ 0.2% มีค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์แตกต่างกันไม่มากนัก อยู่ที่ 1-3% ถึงแม้ว่ายิ่งเพิ่มความเข้มข้นสารละลายจะยิ่งทำให้ประสิทธิภาพสูงก็ตาม แต่นั่นหมายถึงความเสี่ยงของสารเคมีหากในปริมาณที่มากเกินไป ความจำเป็น เมื่อมองในหลักการใช้งานจริง

4.7.2 การเปรียบเทียบสารละลายระหว่างสารละลายโมโนเอทานอลามีนและสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต

จากการทดลองนี้ใช้ความเข้มข้นเช่นเดียวกับการทดลองกับคอลัมน์แบบฟองอากาศ ที่เลือกใช้ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตและสารละลายโมโนเอทานอลามีน ในการดูดซับเปรียบเทียบสารละลาย 2 ชนิด ที่ความเข้มข้น 1%



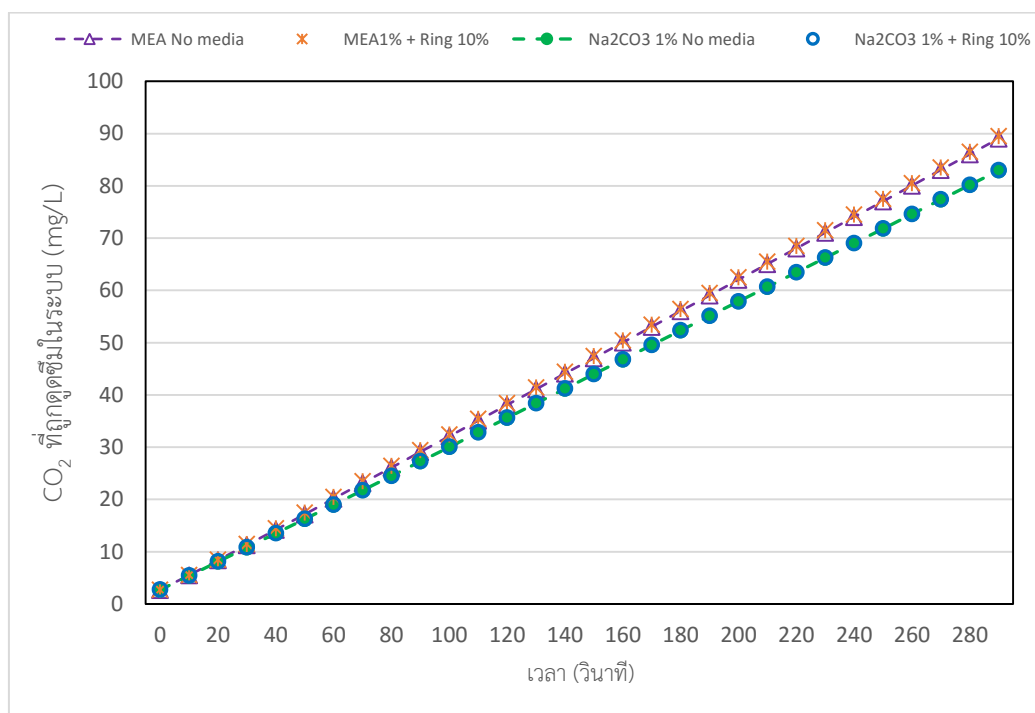
รูปที่ 4.60 เปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับระหว่างสารละลาย 2 ชนิด โมโนเอทานอลามีนและสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต

จากรูปที่ 4.60 จะเห็นได้ว่า เมื่อปรับเปลี่ยนเฟสของเหลวเป็นสารละลายทั้ง 2 ชนิด ทำให้ค่าประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น โดยที่สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 1 % โดยปริมาตร ให้ค่าประสิทธิภาพในการดูดซับ CO_2 ต่ำกว่าเมื่อใช้เฟสของเหลวสารละลายโมโนเอทานอลามีนที่ความเข้มข้น 1 % เท่ากัน ทั้งนี้หากมองในด้านเศรษฐศาสตร์ ราคาของสารเคมีของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ถูกกว่าสารละลายโมโนเอทานอลามีนอยู่พอสมควร ดังนั้นจึงวิจัยโดยลดสารความเข้มข้นสารละลายโมโนเอทานอลามีนที่ 0.2% พบว่าให้ค่าประสิทธิภาพในการดูดซับ CO_2 สูงกว่าสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 1 % เช่นกัน

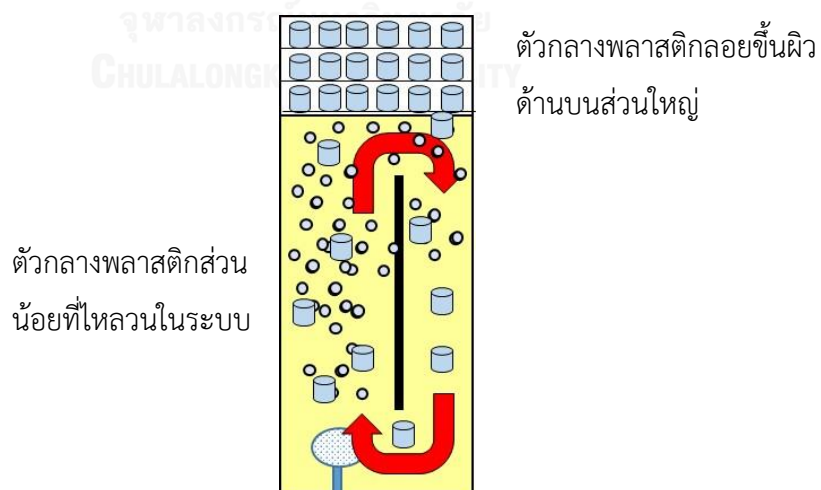
4.8 การทดลองสารละลายร่วมกับตัวกลาง

จากรูปที่ 4.61 จะเห็นได้เมื่อเติมตัวกลางพลาสติกทรงกระบอกกลงลงในระบบทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ CO_2 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในกรณีที่ใส่สารละลายโมโนเอทานอลามีนพบว่า เมื่อใส่ตัวกลางทรงกระบอกกลงที่ 10% ให้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ CO_2 เพิ่มขึ้นไม่มากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับไม่ใช้ตัวกลาง อาจเนื่องมาจากค่าความหนาแน่นในเฟสของเหลวเปลี่ยนไป ทำให้ตัวกลางลอยขึ้นเหนือผิวน้ำเป็นปริมาณมาก ดังรูปที่ 4.62 เมื่อตัวกลางลอยอยู่ด้านบนเป็นปริมาณมากจึงทำให้โอกาสการปะทะกันระหว่างฟองอากาศเกิดขึ้นได้น้อย ส่วนในกรณีที่ใส่สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต พบว่าเมื่อเติมตัวกลางทรงกระบอกกลงในระบบที่ 10% พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์

การดูดซึม CO_2 เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณตัวกลางอยู่ในระบบมากกว่าลอยสู่ผิวด้านบน
น้อยกว่าสารละลายโมโนเอทานอลามีน



รูปที่ 4.61 เปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมระหว่างสารละลาย 2 ชนิด กับตัวกลาง

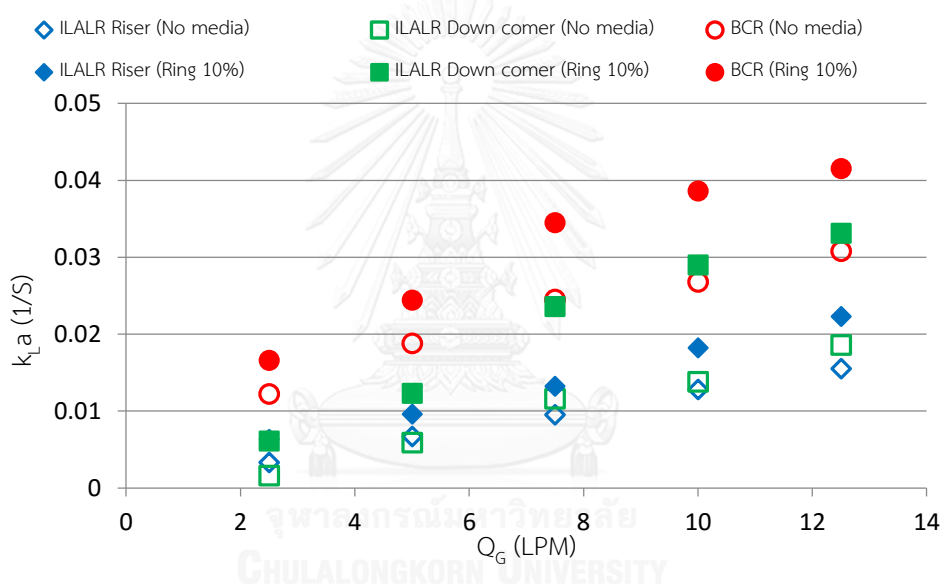


รูปที่ 4.62 การลอยตัวเหนือระบบของตัวกลาง เมื่อใช้เฟสของเหลวสารละลายโมโนเอทานอลามีน

4.9 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพคอลัมน์แบบฟองอากาศ BCR และคอลัมน์แบบอากาศยก IALR

จากการทดลองที่กล่าวมาทั้ง 2 คอลัมน์เราจะนำมาเปรียบเทียบกันเพื่อเสนอเป็นทางเลือกใช้สภาวะสัดส่วนต่างที่เหมาะสม โดยการนำข้อมูลที่ได้จากการวิจัยจากสภาวะที่ดีที่สุดที่เลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ โดยคำนึงถึงประสิทธิภาพของระบบในแต่ละคอลัมน์ ซึ่งปัจจัยหลักของประสิทธิภาพของระบบ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม ($k_L a$) ขนาดของฟองอากาศ (D_B) พิจารณากับคอลัมน์แบบฟองอากาศ (BCR) และคอลัมน์แบบอากาศยก (IALR) เลือกใช้หัวกระจายอากาศแบบ rigid large ร่วมกับตัวกลางพลาสติกทรงกระบอกกลางที่ปริมาณ 10% โดยปริมาตร ด้วยเฟสของเหลวเป็นน้ำประปา ซึ่งอธิบายได้ดังต่อไปนี้

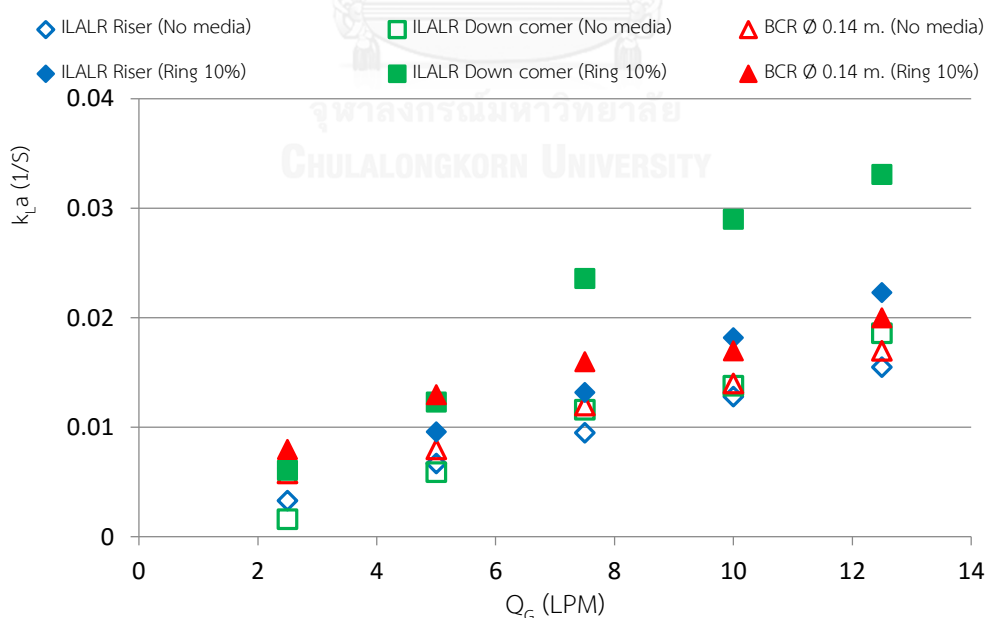
- ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม ($k_L a$)



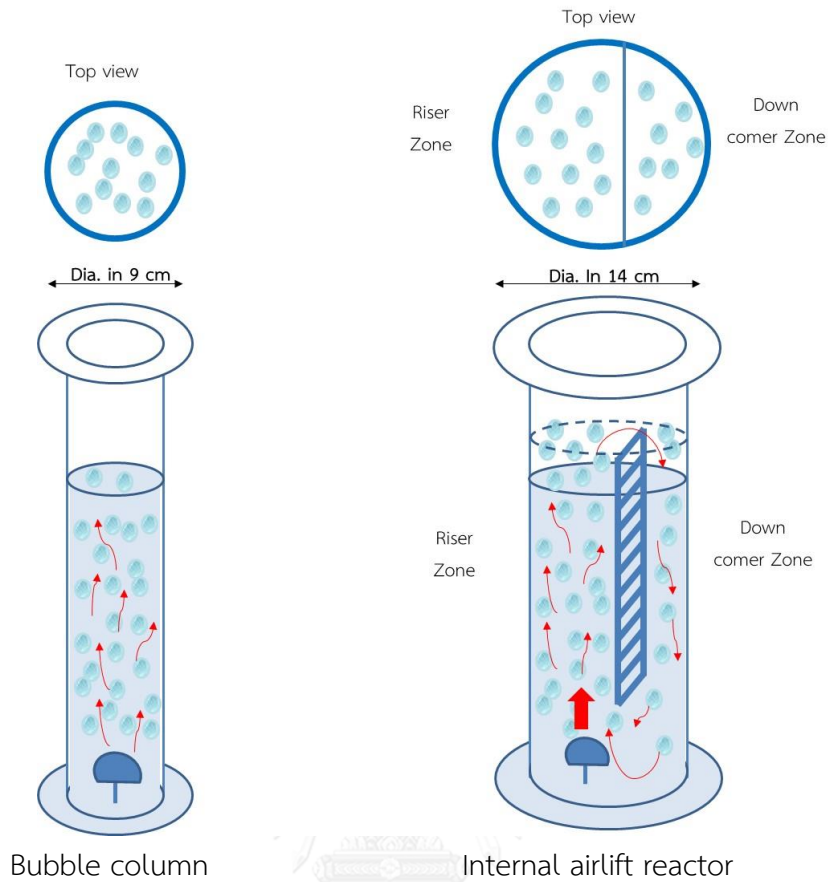
รูปที่ 4.63 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมระหว่างคอลัมน์แบบ BCR และ IALR

จากรูปที่ 4.63 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมระหว่างคอลัมน์แบบฟองอากาศ (BCR) และคอลัมน์แบบอากาศยก (IALR) จะเห็นได้ว่า เมื่อไม่มีตัวกลางค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของคอลัมน์แบบฟองอากาศสูงกว่าคอลัมน์แบบอากาศยกทั้งด้าน riser และ downcomer zone อย่างเห็นได้ชัด และเมื่อเพิ่มตัวกลางทรงกระบอกกลางที่ปริมาณ 10% ในระบบ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของคอลัมน์แบบฟองอากาศสูงกว่าคอลัมน์แบบอากาศยกทั้งด้าน riser และ downcomer zone เช่นกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบแบบไม่มีตัวกลางกับมีตัวกลางทั้ง 2 คอลัมน์ กลับพบว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นคอลัมน์แบบอากาศยกที่เติมตัวกลางพลาสติกทรงกระบอกกลาง 10% ด้านฝั่ง downcomer zone ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล

รวมสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมในคอลัมน์แบบฟองอากาศที่ไม่มีตัวกลาง ดังนั้นการเติมตัวกลางพลาสติกทรงกระบอกทรงกลมมีส่วนช่วยให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมสูงขึ้น ทั้งนี้เมื่อมองในด้านรูปทรงของคอลัมน์ จะเห็นได้ว่า ขนาดพื้นที่หน้าตัดอาจส่งผลให้กับประสิทธิภาพในระบบ โดยที่พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์แบบฟองอากาศเท่ากับ 0.0063 ตารางเมตร ในขณะที่พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์แบบอากาศยกแบ่งเป็น 2 ด้าน ฝั่ง riser และ downcomer zone เท่ากับ 0.0113 และ 0.0032 ตารางเมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.65 ซึ่งพื้นที่หน้าตัดมีผลต่อความเร็วของก๊าซเช่นกัน จึงอาจทำให้การถ่ายเทมวลสารระหว่างเฟสก๊าซและเฟสของเหลวแตกต่างกัน นอกจากนี้ หากมองที่คอลัมน์เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากันทั้ง 2 คอลัมน์ โดยที่ ILALR และ BCR ต่างมีรูปทรงภายนอกทุกประการเหมือนกัน เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 0.14 เมตรเหมือนกัน กลับพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมคอลัมน์แบบอากาศยกนั้นให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมที่สูงกว่าคอลัมน์แบบฟองอากาศ ดังรูปที่ 4.64 ซึ่งอ้างอิงผลการทดลองคอลัมน์แบบฟองอากาศของภาสกร วรรณวงษ์ 2558 ดังนั้นสรุปได้ว่า ภายใต้การออกแบบคอลัมน์ที่มีลักษณะรูปทรงแบบเดียวกัน หากนำไปประยุกต์เพิ่มเติมภายในระบบ เพื่อปรับเปลี่ยนทิศทางการไหลภายในระบบ และเพิ่มระยะเวลาให้ฟองอากาศไหลวนได้นานยิ่งขึ้น คอลัมน์แบบอากาศยกน่าจะเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการนำไปใช้งาน

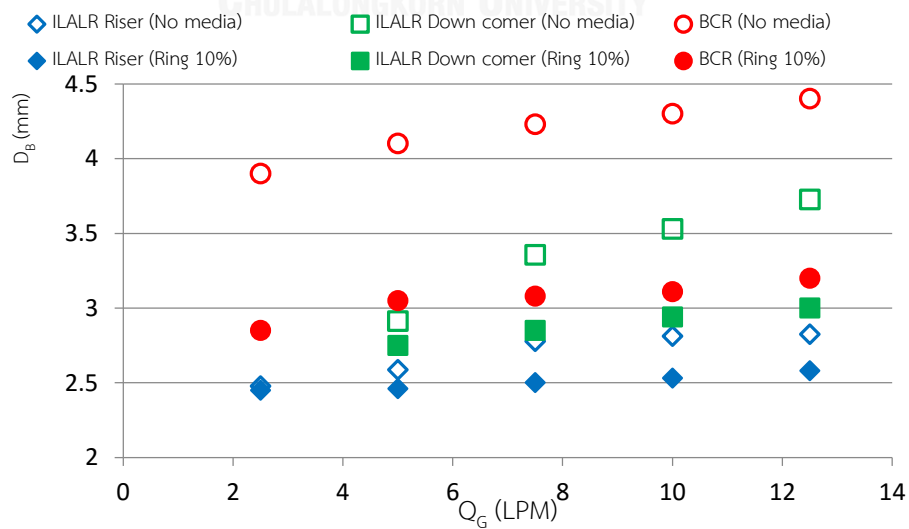


รูปที่ 4.64 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมระหว่างคอลัมน์แบบ BCR และ ILALR ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 0.14 เมตร



รูปที่ 4.65 เปรียบเทียบภาพตัดขวางคอลัมน์ BCR และ ILALR

● ขนาดของฟองอากาศ (D_B)

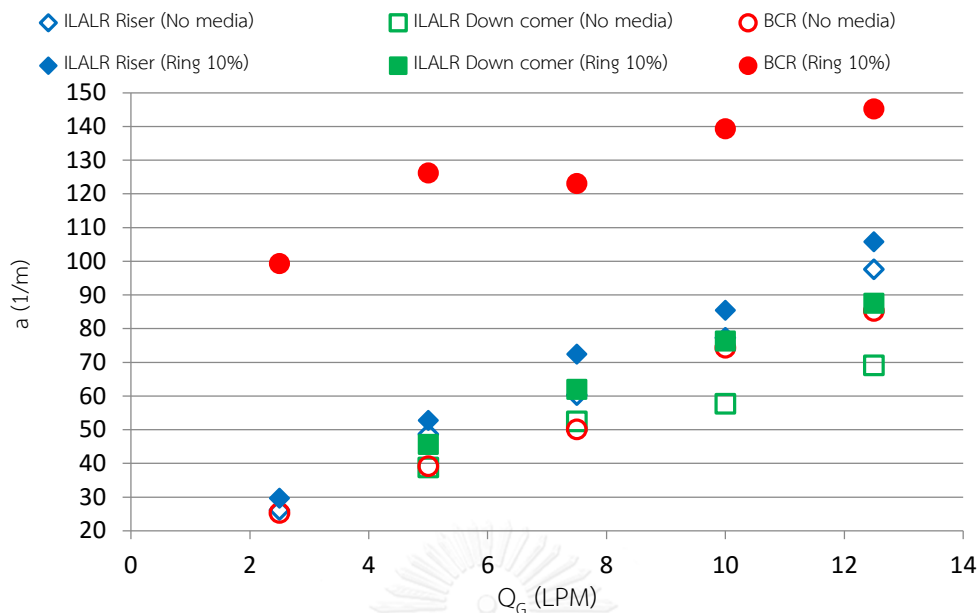


รูปที่ 4.66 เปรียบเทียบขนาดฟองอากาศระหว่างคอลัมน์แบบ BCR และ ILALR

จากรูปที่ 4.66 เปรียบเทียบขนาดฟองอากาศทั้ง 2 คอลัมน์ พบว่า เมื่อไม่ใส่ตัวกลางคอลัมน์แบบฟองอากาศมีขนาดฟองอากาศใหญ่กว่าคอลัมน์แบบอากาศยกทั้ง 2 ฝั่ง riser และ downcomer zone และเมื่อพิจารณาแบบมีตัวกลางพลาสติกทรงกระบอกกลวงที่ 10% พบว่าคอลัมน์แบบฟองอากาศมีขนาดฟองอากาศที่ใหญ่กว่าคอลัมน์แบบอากาศยกทั้ง 2 ฝั่ง riser และ downcomer zone ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก คอลัมน์แบบฟองอากาศมีพื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์แคบ จึงส่งผลให้การปล่อยก๊าซที่อัตราการไหลเดียวกัน ฟองอากาศมีโอกาสเกิดการชนปะทะกันสูงกว่าคอลัมน์แบบอากาศยกที่ในช่วงปล่อยก๊าซอยู่ในฝั่ง riser ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดมากกว่าคอลัมน์แบบฟองอากาศ การชนปะทะอาจส่งผลให้ฟองอากาศรวมตัวกันและมีขนาดใหญ่ขึ้น

- พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (a)

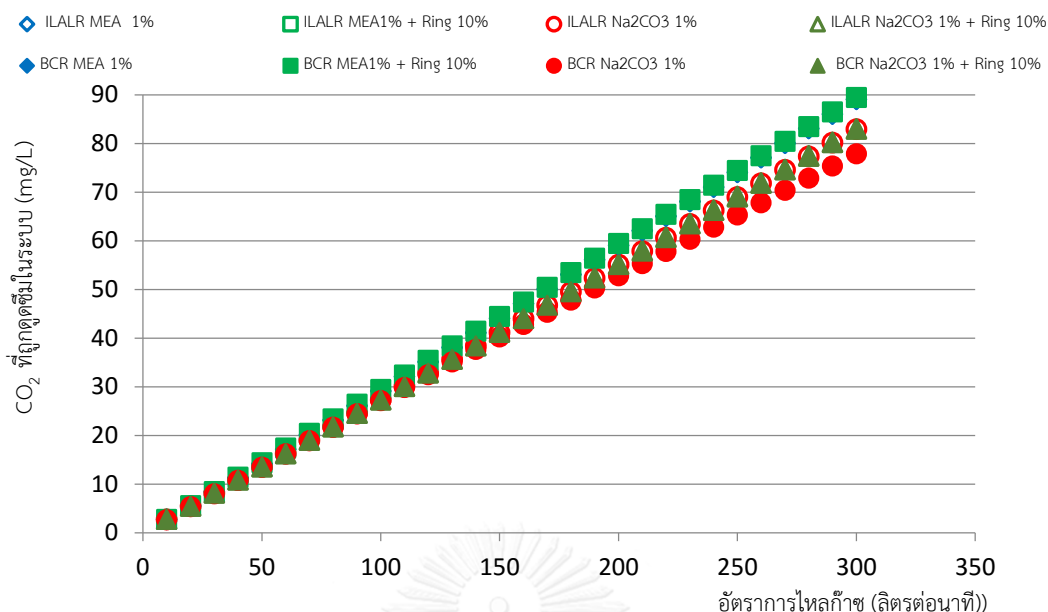
จากรูปที่ 4.67 การเปรียบเทียบพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะระหว่างคอลัมน์ทั้ง 2 แบบ จะเห็นได้ว่า เมื่อไม่มีตัวกลางพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะของคอลัมน์แบบอากาศยกฝั่ง riser มีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะสูงสุด รองลงมาคือค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะของคอลัมน์แบบฟองอากาศ และคอลัมน์แบบอากาศยกฝั่ง downcomer zone มีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะต่ำสุด ในขณะที่เมื่อเติมตัวกลางพลาสติกทรงกระบอกกลวง 10% โดยปริมาตรในระบบ พบว่า ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะคอลัมน์แบบฟองอากาศมีค่าสูงสุด รองลงมาคือค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะของคอลัมน์แบบอากาศยกฝั่ง riser zone และ downcomer zone ตามลำดับ ทั้งนี้อาจสรุปได้ว่า พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะมีผลจากขนาดฟองอากาศ คอลัมน์แบบฟองอากาศมีขนาดฟองอากาศใหญ่กว่าคอลัมน์แบบอากาศยก ทำให้เมื่อเติมตัวกลางลงในระบบทำให้ไปปะทะหรือชนกับฟองอากาศได้ง่ายเนื่องจากมีขนาดใหญ่กว่า และนอกจากนี้ ตัวฟองอากาศต้องเคลื่อนที่แทรกผ่านตัวกลางที่มีปริมาณ 10% โอกาสชนกันแล้วเกิดการแตกตัวทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะจึงเพิ่มขึ้นได้สูงกว่า



รูปที่ 4.67 เปรียบเทียบพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะระหว่างคอลัมน์แบบ BCR และ ILALR

4.9.1 ประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย ด้วยคอลัมน์แบบฟองอากาศ (BCR) และคอลัมน์แบบอากาศยก (IALR) เลือกใช้หัวกระจายอากาศแบบ rigid large ร่วมกับตัวกลางพลาสติกทรงกระบอกกลวงที่ปริมาณ 10% โดยปริมาตร ด้วยเฟสของเหลวเป็นสารละลายโมโนเอทานอลามีน และโซเดียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นทั้งสองสารละลายเท่ากับ 1% ซึ่งอธิบายได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.68 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับ CO₂ ระหว่างคอลัมน์แบบ BCR และ ILALR

จากรูปที่ 4.68 พบว่า ไม่ว่าจะทดลองกับคอลัมน์แบบใดสารละลายโมโนเอทานอลามีนให้ประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ส่วนที่สารละลายชนิดเดียวกันมีค่าประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ใกล้เคียงกันทั้ง 2 คอลัมน์ และการเติมตัวกลางพลาสติกทรงกระบอกกลวง 10% ลงในระบบ เห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความหนาแน่นของเฟสของเหลวเปลี่ยนไปทำให้ตัวกลางพลาสติกลอยสู่ด้านบน และขนาดฟองอากาศเล็กลงด้วยแรงตึงผิวลดลงจากการเติมสารละลายจึงทำให้ การเติมตัวกลางไม่เกิดผลต่อขนาดฟองอากาศมากนัก

จากการเปรียบเทียบข้อมูลการทดลองระหว่าง 2 คอลัมน์ สามารถนำไปพิจารณาเลือกใช้สภาวะหรือออกแบบเพื่อเหมาะสมต่อการใช้งาน โดยสรุปได้ดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4.2 สรุปสัดส่วนผลเปรียบเทียบกับระบบพองอากาศและคอลัมน์อากาศ

พารามิเตอร์	คอลัมน์แบบพองอากาศ BCR						คอลัมน์แบบพองอากาศ ILALR						หมายเหตุ
	Riser zone			Down comer zone			Riser zone			Down comer zone			
	ทรงกลม	ทรงแหง	ทรงกระบอก	สี่เหลี่ยม	ทรงกลม	ทรงแหง	ทรงกระบอก	สี่เหลี่ยม	ทรงกลม	ทรงแหง	ทรงกระบอก	สี่เหลี่ยม	
K_d	↑ ที่ Q_G ↑ ↑ ที่ ปริมาณ ↑	≈ ที่ Q_G ↓ ↑ ที่ Q_G ↑	↑ ที่ Q_G ↑ $Q_G > 17.5$ LPM ≈	$Q > 7.5$ LPM ↑	≈ ที่ Q_G ↓ ↑ ที่ Q_G ↑	≈ ที่ Q_G ↓ ↑ ที่ Q_G ↑	≈ ที่ Q_G ↓ ↑ ที่ Q_G ↑	≈ ที่ Q_G ↓ ↑ ที่ Q_G ↑	↑ ที่ Q_G ↑ ≈ ที่ $> 5\%$ media	↑ ที่ Q_G ↑ ≈ ที่ $> 5\%$ media	↑ ที่ Q_G ↑ ↑ ที่ % media ↑	↓ ที่ Q_G ↓ ↓ ที่ %	
D_{50}	↓ ที่ % media ↑ ↑ ที่ % media ↑	↓ ที่ % media ↑ ↑ ที่ % media ↑	↓ ที่ % media ↑ ↑ ที่ % media ↑	↓ ที่ % media ↑ ↑ ที่ % media ↑	↑ ที่ % media ↑ ↑ ที่ Q_G ↑	≈ ที่ % media ↑ ↑ ที่ Q_G ↑	≈ ที่ % media ↑ ↑ ที่ Q_G ↑	≈ ที่ % media ↑ ↑ ที่ Q_G ↑	≈ ที่ % media ↓ ↑ ที่ % media ↑	≈ ที่ % media ↓ ↑ ที่ % media ↑	↓ ที่ % media ↑ ↑ ที่ % media ↑	≈ ที่ % media ↓ ↑ ที่ % media ↑	
C_{50}	↓ ที่ % media ↑ ↑ ที่ $Q_G > 7.5$ LPM	≈ ที่ 2% media ↓ ↑ ที่ % media ↑	↓ ที่ % media ↑ ↑ ที่ % media ↑	↑ ที่ <2% media ≈ ≈ ที่ % media ↑	↑ ที่ Q_G ↑ ↓ ที่ % media ↑	≈ ที่ Q_G ↑ ↓ ที่ % media ↑	≈ ที่ Q_G ↑ ↓ ที่ % media ↑	↑ ที่ Q_G ↑ ≈ ที่ % media ↑	< 0 cm/s % media ↑ ≈ 0 cm/s % media ↑	≈ 0 cm/s % media ↑ ↑ ที่ Q_G ↑ ≈ 0 cm/s % media ↑	≈ 0 cm/s % media ↑ ↑ ที่ % media ↑ ≈ 0 cm/s % media ↑	< 0 cm/s % media ↑ ↑	↑ = เพิ่มขึ้นมาก ↓ = ลดลง/น้อย ≈ = ไม่เปลี่ยน > = มากกว่า < = น้อยกว่า
ρ	↑ ที่ Q_G ↑	↑ ที่ Q_G ↑	↑ ที่ Q_G ↑	↑ ที่ Q_G ↑	↓ at low Q_G ↑ at high Q_G	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈	
K_L	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈	

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาระบบการดูดซับอากาศและคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยคอลัมน์แบบ ฟองอากาศและคอลัมน์แบบอากาศยกในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม (k_{La}) โดยศึกษา ผลกระทบจากหัวกระจายอากาศ 3 ชนิดร่วมกับตัวกลางพลาสติกและสารละลายในเฟสของเหลว ทั้งนี้ เลือกใช้หัวกระจายอากาศ 3 แบบ ได้แก่หัวกระจายฟองอากาศแบบไม้ (Wood) หัวกระจาย อากาศแบบ rigid ขนาดเล็ก (Rigid small) และหัวกระจายอากาศ rigid ขนาดใหญ่ (Rigid large) ร่วมตัวกลางพลาสติกโพลีไฟโพรีน (PP) ที่ปริมาณ 2% 5% และ 10% โดยปริมาตร ที่รูปทรงแตกต่างกันได้แก่ ทรงกลม (Cricle) ทรงแท่ง (Rod) ทรงกระบอกกลวง (Ring) และทรงสี่เหลี่ยม (Sqaure) และสารละลายโมโนเอทานอลามีนกับสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 1% โดย ปริมาตร ซึ่งมีข้อสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. การเลือกใช้หัวกระจายอากาศ โดยทั่วไป ประสิทธิภาพการดูดซับที่ดีจะมีค่าสัมประสิทธิ์ การถ่ายเทมวลรวมที่สูง และยิ่งมีฟองอากาศขนาดเล็กจะทำให้ค่า k_{La} สูงขึ้นเช่นกัน ดังนั้นหัวกระจาย อากาศที่มีรูขนาดเล็กยอมให้ขนาดฟองอากาศที่เล็ก แต่หัวกระจายอากาศที่มีรูขนาดเล็กเท่าไรก็จะต้อง การค่าแรงดันสูงนั่นหมายถึงการใช้พลังงานที่สูงขึ้นเช่นกัน และฟองอากาศควรออกจากหัว กระจายอากาศได้ทั่วทุกรอบผิวของหัวกระจายอากาศ

2. การเลือกใช้ตัวกลางพลาสติกที่เหมาะสม ควรเป็นตัวกลางที่มีความพรุนสูงๆ มีความ หนาแน่นใกล้เคียงกับเฟสของเหลวที่ใช้ และปริมาณที่เหมาะสมกับค่าอัตราการไหลของก๊าซ เพื่อเป็น การชะลอการเคลื่อนที่ของก๊าซให้อยู่ในระบบได้นานพอที่ถ่ายเทมวลระหว่างเฟสก๊าซและเฟส ของเหลว ทั้งนี้ตัวกลางพลาสติกที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีส่วนช่วยให้ค่า k_{La} สูงขึ้นเมื่อใช้ร่วมกับหัวกระจาย อากาศที่ให้ฟองขนาดใหญ่ เนื่องจากฟองอากาศขนาดใหญ่มีโอกาสเกิดการปะทะกับตัวกลางแล้วแตก ตัวให้มีขนาดฟองเล็กลง และตัวกลางช่วยขัดขวางการรวมตัวกันของฟองอากาศอีกด้วย

3. สารละลายโมโนเอทานอลามีน (MEA) เมื่อใช้ศึกษาร่วมกับเฟสก๊าซที่เป็นคาร์บอนได ออกไซด์ พบว่ายิ่งใช้ปริมาณความเข้มข้นสูงยิ่งส่งผลให้ระบบการดูดซับดีขึ้นไม่มากนัก และหากใช้ ปริมาณที่น้อยไปก็จะส่งผลให้ระบบการดูดซับลดลงเช่นกัน ทั้งนี้เมื่อเพิ่มสารละลายลงไปในระบบ ส่งผลให้ระบบการดูดซับดีขึ้น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายในเฟสของเหลวง่ายขึ้น เนื่องจากมีสภาวะ เฟสของเหลวเป็นต่าง ค่าแรงตึงผิวก็ลดลงเช่นกัน

4. สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีเช่นกัน เพียงแต่ประสิทธิภาพน้อยกว่าสารละลายโมโนเอทาโนลามีน ทั้งนี้เกณฑ์ในการเลือกใช้สารละลายนั้น ควรคำนึงราคาของสารเคมีที่ใช้และค่าความเป็นพิษต่อผู้ทดลองหรือระบบสิ่งแวดล้อมเช่นกัน

5. การทดลองสารละลายร่วมกับตัวกลางพลาสติก พบว่าตัวกลางพลาสติกมีส่วนช่วยให้ประสิทธิภาพการดูดซึมน้ำดีขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเฟสของเหลวมีแรงตึงผิวหรือความหนาแน่นเปลี่ยนไปทำให้ตัวกลางที่เลือกใช้จากการทดลองในเฟสของเหลวที่เหมาะสมกับน้ำประปา เมื่อใช้กับเฟสของเหลวที่เป็นสารละลายตัวกลางจึงเกิดการลอยตัวขึ้น

6. การเปรียบเทียบระหว่างคอลัมน์แบบฟองอากาศและคอลัมน์แบบอากาศยก พบว่าคอลัมน์ทั้งสองแบบมีการช่วยให้ประสิทธิภาพการดูดซึมน้ำดีขึ้นเมื่อใช้ร่วมกับตัวกลางที่เหมาะสมและสารเคมี คอลัมน์แบบฟองอากาศอาจจะเหมาะในการใช้งานกับระบบที่ใช้อัตราการไหลต่ำๆ เนื่องจากฟองอากาศสามารถเคลื่อนที่ได้อิสระและมีทั่วถึงมากกว่า ส่วนคอลัมน์แบบอากาศยกเหมาะสมกับการใช้งานกับระบบที่ต้องการอัตราการไหลของก๊าซสูงๆ เพื่อที่จะให้ฟองอากาศเคลื่อนที่ไหลวนได้ทั้งระบบ ทั้งนี้ ในการพิจารณาในการใช้งานจริง หากมีพื้นที่ในการติดตั้งระบบจำกัด ต้องการให้เฟสก๊าซอยู่ในระบบนานๆและมีอัตราการไหลของก๊าซที่สูง การเลือกใช้คอลัมน์แบบอากาศยกน่าจะเหมาะสมกับการนำไปพิจารณา

ทั้งนี้สามารถสรุปผลการวิจัยพอสังเขปได้ดังตารางที่ 5.1 ต่อไปนี้

ตารางที่ 5-1 สรุปสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากผลการวิจัยนี้

ข้อมูลแนะนำ	คอลัมน์แบบฟองอากาศ (BCR)	คอลัมน์แบบอากาศยก (ILALR)	ข้อจำกัด
1. อัตราการไหลก๊าซที่เหมาะสม	Q_G ไม่เกิน 7.5 LPM	Q_G มากกว่า 7.5 LPM	
2. หัวกระจายอากาศ rigid small	Q_G ไม่ควรเกิน 12.5 LPM	Q_G 7.5 - 12.5 LPM	อัตราการไหลสูงสุดที่เคยทดสอบ Q_G 17.5 LPM
3. หัวกระจายอากาศ rigid largel	Q_G ไม่ควรเกิน 12.5 LPM	Q_G มากกว่า 12.5 LPM	อัตราการไหลสูงสุดที่เคยทดสอบ Q_G 17.5 LPM
4. หัวกระจายอากาศแบบไม้	ไม่แนะนำ	ไม่แนะนำ	
5. ตัวกลางทรงกระบอกกลวง	เริ่มที่ 2% โดยปริมาตร ขึ้นไป	5 - 10% โดยปริมาตร	ปริมาณที่เคยทดสอบ 15 %
6. สารละลายโมโนเอทาโนลามีน	0.2 - 1% โดยปริมาตร	0.2 - 1% โดยปริมาตร	ในกรณีที่มีค่าใช้จ่ายจำกัด
7. สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต	1% โดยน้ำหนัก	1% โดยน้ำหนัก	

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การพิจารณาหัวกระจายอากาศที่ให้ฟองอากาศขนาดใหญ่และใช้พลังงานน้อยในการเดินระบบ อาจมีความคุ้มค่าและน่าสนใจเมื่อมีตัวช่วยขัดขวางการรวมตัวของฟองอากาศ ซึ่งต้องพิจารณาปริมาณตัวกลางพลาสติก และหัวกระจายอากาศที่ใช้พลังงานน้อยๆ

2. ศึกษาตัวกลางที่มีค่าความพรุนสูงๆ ร่วมกับหัวกระจายอากาศที่ให้ฟองอากาศขนาดใหญ่ขึ้น

3. ศึกษาความสัมพันธ์ตัวกลางพลาสติกร่วมกับเฟสของเหลวที่สามารถคงตัวอยู่ในระบบได้มากขึ้น อาจมองในเรื่องความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกับเฟสของเหลวที่เป็นสารละลายเพิ่มเติม

4. การเลือกใช้สารละลายมีต้นทุนเป็นปัจจัยหลัก ควรศึกษาร่วมกับระบบที่สามารถนำสารละลายกลับมาใช้ซ้ำได้ และศึกษาประสิทธิภาพการดูดซึมควบคู่กัน

5. ศึกษาอัตราการไหลของก๊าซที่ต่ำๆ กับคอลัมน์แบบฟองอากาศ



รายการอ้างอิง

- ฐานข้อมูลของศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์ กรมควบคุมมลพิษ. 2556. [ออนไลน์],
แหล่งที่มา http://www.pcd.go.th/info_serv/hazardous.html
- นพภาพร พานิช และคณะ. 2550. ตำราระบบบำบัดมลพิษอากาศ. พิมพ์ครั้งที่
ปกรณ์ ถนอมพงษ์ชาติ. 2552. การแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซชีวภาพโดยการดูดซับด้วย
ของเหลวในคอลัมน์อัดตัว. วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ภาสกร วรัญญวงศ์. 2558. การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยคอลัมน์แบบฟองอากาศร่วมกับการใช้
ตัวกลางพลาสติก. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รศ.ปิติ พูนไชยศรีและคณะ. 2544. การจัดการและควบคุมมลพิษทางอากาศจากอุตสาหกรรม พิมพ์
ครั้งที่ 2.
- วราลี วิศาลโกตะ, สุริยพงศ์ ศศิวรรณพงศ์, ประจักษ์ ศาสตร์เวช, เรวดี ดำมี, นราพงศ์ หงส์ประสิทธิ์,
& เพ็ญมนกุล, พ. 2556. ผลกระทบของตัวกลางพลาสติกต่อตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์และ
การถ่ายเทมวลสารในคอลัมน์แบบฟองอากาศ. พิมพ์ครั้งที่ การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อม
แห่งชาติครั้งที่ 12, 27-29 มีนาคม 2556 โรงแรมพูลแมน ขอนแก่น สมาคมวิศวกรรม
สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2556. [ออนไลน์], มิถุนายน 2556.
แหล่งที่มา http://www.stri.cmu.ac.th/DB_Article/articleDetail.php?id=10
- สุภาภรณ์ มานะรังสรรค์. 2545. กระบวนการถ่ายเทมวลสาร พิมพ์ครั้งที่
Acquired Engineering 360 by IEEE. 2016. [ออนไลน์], แหล่งที่มา
[http://www.globalspec.com/learnmore/manufacturing_process_equipment/air
_quality/scrubbers](http://www.globalspec.com/learnmore/manufacturing_process_equipment/air_quality/scrubbers)
- American Public Health Association, AWWA (American Water Works Association), &
Water Environment Federation. 1999. Standard methods for the examination
of water and wastewater. nd.
- Antti, H., Pertti, O., & Juhani, A. 2006. Measurements of local bubble size distributions
from various flexible membrane diffusers. Chemical Engineering and
Processing. 45: 291–302.

- Audrey, D., & Martine, M.-P. 2009. A mathematical approach for oxygenation using micro bubbles
Application to the micro-oxygenation of wine. Chemical Engineering Science. 64: 1909--1917.
- Bhatia, B., Nigam, K. D. P., Auban, D., & 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: 1371–1380.
- Bhatia, B., Nigam, K. D. P., Auban, D., & 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.
- Billet, R., & Schultes, M. 1999. Prediction of mass transfer columns with dumped and arranged packings. Chemical Engineering Research and Design. 77: 498-504.
- Blažej, M., Cartland Glover, G. M., Generalis, S. C., & Markoš, J. 2004. Gas–liquid simulation of an airlift bubble column reactor. Chemical Engineering and Processing. 43: 137–144.
- Bouaifi, M., Hebrard, G., Bastoul, D., & 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. 40: 97–111.
- Cheng, L., Li, T., Keener, T. C., & Lee, J. Y. 2013. A mass transfer model of absorption of carbon dioxide in a bubble column reactor by using magnesium hydroxide slurry. International Journal of Greenhouse Gas Control. 17: 240–249.
- Chisti, M. Y., Halard, B., & Moo-Young, M. 1988. Liquid circulation in airlift reactors. 43: 451-457.
- CO2CRC. 2014a. [ออนไลน์], June 2014. แหล่งที่มา
(<http://www.co2crc.com.au/imagelibrary3/capture.php>)
- CO2CRC. 2014b. [ออนไลน์], June 2014. แหล่งที่มา
<http://www.co2crc.com.au/gallery/capture/>
- Cohen, Y., & Metzner, A. B. 1981. Wall effects in laminar flow of fluids through packed beds. AIChE Journal. 27(5): 705-715.

- Cormos, A.-M., & Gaspar, J. 2012. Assessment of mass transfer and hydraulic aspects of CO₂ absorption in packed columns. International Journal of Greenhouse Gas Control. 6: 201–209.
- Cormos, C.-C. 2015. Assessment of chemical absorption/adsorption for post-combustion CO₂ capture from Natural Gas Combined Cycle (NGCC) power plants. Applied Thermal Engineering. 82: 120-128.
- CSIRO. [ออนไลน์], 8 December 2014. แหล่งที่มา http://www.cfd.com.au/cfd_conf99/papers/033TANI.PDF
- Haibo, J., Suohe, Y., Guangxiang, H., Delin, L., Zemin, T., & Jianhua, Z. 2014. Gas–Liquid Mass Transfer Characteristics in a Gas–Liquid–Solid Bubble Column under Elevated Pressure and Temperature. Chinese Journal of Chemical Engineering. 22: 955–961.
- Kothandaraman, A. 2010. Carbondioxide capture by chemical absorption: A solvent comparison study. Chemical Engineering, Massachusetts Institute of Technology.
- Linder, D., Werner, M., & Schumpe, A. 1988. Hydrogen transfer in slurries of carbon supported catalyts. AIChE Journal. 34(10): 1691-1697.
- Lou, H. 1993. Coalescence, Breakup and Liquid Circulation in bubble Column Reactors Trondheim: Noway. ภูมิภาควิทยาลัย
- Maceiras, R., & Cancela, Á. 2011. Measurement of the interfacial area during CO₂ capture with alkanolamines. Chemical Engineering Journal. 172: 335– 340.
- Nawaporn, T. 2013. Effect of plastic media on mass transfer and bubble hydrodynamic parameter in bubble column and airlift reactor. Science program in Environmental managment (Interdisciplinary program) Chulalongkorn University.
- Nigar, K., Fahir, B., & Kutlu, O. U. 2005. Bubble column reactors. Process Biochemistry. 40: 2263-2268.
- Praxair Safety Data Sheet. 2015. [ออนไลน์], แหล่งที่มา <http://www.praxair.com/-/media/praxairus/documents/sds/carbon-dioxide/carbon-dioxide-medipure-co2-safety-data-sheet-sds-p4574.pdf?la=en>

- Sardeing, R., Painmanakul, P., & Hebrard, 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.
- Sinan, S., Omer, F. G., & Mustafa, O. 2013. The effect of sparger geometry on gas holdup and regime transitionpoints in a bubble column equipped with perforated plate spargers. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. 70: 259– 266.
- Snoeyink, V. L., & Jenkins, D. 1980. Water Chemistry
- Snoeyink, V. L., & Jenkins, D. 2002. water chemistry (Based on standard state concentrations give in units of bars and moles per liter at 20 0C). John Wiley & Sons Inc.
- Subagyo, Standish, N., & 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.
- Tainyi chemical. 2015.
- Treybel. 1981a. [ออนไลน์], แหล่งที่มา
https://en.wikipedia.org/wiki/Theoretical_plate#/media/File:Bubble_Cap_Trays.PNG
- Treybel. 1981b. Mass-Transfer Operations
- Zhao, X., Smith, K. H., Simioni, M. A., Tao, W., Kentish, S. E., Fei, W., & Stevens, G. W. 2011. Comparison of several packings for CO2 chemical absorption in a packed column. International Journal of Greenhouse Gas Control. 5: 1163– 1169.



ภาคผนวก ก
ผลการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ผลการทดลองคอลัมน์แบบพองอากาศ

ตารางที่ ก .1 ผลขนาดพองอากาศ (มิลลิเมตร)

Q (LPM)	No media	หัวกระจายอากาศแบบไม้											
		กลม			แท่ง			กระบอกกลวง			สี่เหลี่ยม		
		2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%
2.5	3.95	3.5	3.34	3.45	3.87	3.53	3.53	3.7	3.34	3.2	3.93	3.59	3.62
5	4.3	3.9	3.76	3.7	4.2	3.9	3.7	4.1	3.73	3.5	4.26	3.86	3.73
7.5	4.7	4.4	4.3	3.87	4.5	4.43	3.9	4.35	4.23	4	4.6	4.49	3.88
10	5.2	4.57	4.6	4.48	5.1	4.71	4.83	4.7	4.634	4.5	5.1	5	4.74
12.5	6	5	5.167	4.75	5.5	4.8	5.5	5.2	5.14	4.65	5.8	5.7	4.82

Q (LPM)	No media	หัวกระจายอากาศแบบ rigid small											
		กลม			แท่ง			กระบอกกลวง			สี่เหลี่ยม		
		2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%
2.5	2.65	2.55	2.45	2.25	2.7	2.55	2.35	2.4	2.3	2.1	2.7	2.58	2.45
5	2.8	2.57	2.57	2.45	2.6	2.62	2.5	2.56	2.55	2.35	2.75	2.7	2.55
7.5	3.2	2.9	2.86	2.7	3.1	2.9	2.8	2.83	2.7	2.65	3.2	2.92	2.85
10	3.5	3.2	3.1	3	3.4	3.11	3.27	3.1	3.1	2.9	3.45	3.25	3.25
12.5	3.6	3.37	3.37	3	3.5	3.3	3.05	3.3	3.2	3.1	3.5	3.4	3.3

Q (LPM)	No media	หัวกระจายอากาศแบบ rigid large											
		กลม			แท่ง			กระบอกกลวง			สี่เหลี่ยม		
		2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%
2.5	3.9	3.56	3	2.8	3.7	3.33	2.9	3.5	2.9	2.85	3.6	3.48	2.7
5	4.1	3.82	3.3	3	3.7	3.5	3.1	3.7	3.1	3.05	3.6	3.55	3.15
7.5	4.23	3.77	3.5	3.13	3.75	3.68	3.4	3.73	3.3	3.08	3.82	3.71	3.5
10	4.3	3.9	3.62	3.33	3.88	3.8	3.5	3.76	3.45	3.11	3.94	3.82	3.7
12.5	4.4	4	3.75	3.4	4	4	3.57	3.85	3.58	3.2	4.16	4.12	3.9

ตารางที่ ก .2 ค่าความเร็วลอยตัวของพองอากาศ (เซนติเมตรต่อวินาที)

LPM	No media	หัวกระจายอากาศแบบไม้											
		กลม			แท่ง			กระบอกกลวง			สี่เหลี่ยม		
		2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%
2.5	29	26.77	21.77	20.77	29.28	26.17	23.67	20.77	17.77	15.27	31.32	28.5	29.24
5	30	25.53	24.73	23.73	26.9	26.01	26.35	24.73	20.73	18.73	28.2	26.48	29.17
7.5	30.7	25.17	24.97	24.97	27.13	28.05	25.83	25.77	21.17	20.17	30.03	28.93	30.8
10	28.5	24.44	24.44	24.44	25.48	26.43	24.44	25.14	21.94	20.44	28.17	27.1	28.46
12.5	29.3	27.12	26.92	26.02	28.41	26.5	27.53	26.12	25.62	24.12	29.12	27.97	28.74

LPM	No media	หัวกระจายอากาศแบบ rigid small											
		กลม			แท่ง			กระบอกกลวง			สี่เหลี่ยม		
		2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%
2.5	13	14	12	9	15.3	14	11	10	11	9.5	17	11	10.5
5	17	17	17	15	18.3	15	14.5	16	15.5	12	22	19	17.8
7.5	18	18	18	16	21	19	18.2	17	16	14	24	24	20
10	18.7	18.3	17.9	17.2	18.7	18.7	17.5	16.4	17.2	17.2	23.3	23.6	22.2
12.5	17.9	18.9	17.9	17.9	19.5	18.33	18	17.9	17.9	17.9	22.9	23.9	21.9

LPM	No media	หัวกระจายอากาศแบบ rigid large											
		กลม			แท่ง			กระบอกกลวง			สี่เหลี่ยม		
		2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%
2.5	22.37	20.37	15.37	14.37	22.65	17.54	15.61	14.14	11.14	8.64	25.14	22.14	17.14
5	21.87	17.87	16.87	15.87	18.77	17.08	16.04	16.6	12.6	10.6	20.1	18.6	18.1
7.5	22.8	17.3	17.1	17.1	19.23	18.68	17.2	17.87	13.27	12.27	22.27	21.27	17.77
10	22.9	18.9	18.4	18.9	19.88	18.95	18.36	19.54	16.34	14.84	22.84	21.84	18.84
12.5	21	19	18.8	18.1	20.11	19.23	18.24	17.82	17.32	15.82	20.82	19.82	18.82

ตารางที่ ก.3 สัดส่วนก๊าซ (-)

LPM	No media	หัวกระจายอากาศแบบไม้											
		กลม			แท่ง			กระบอกกลวง			สี่เหลี่ยม		
		2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%
2.5	0.0095	0.0243	0.0291	0.0281	0.0178	0.0214	0.0226	0.0332	0.0390	0.0362	0.0123	0.0166	0.0165
5.0	0.0187	0.0332	0.0361	0.0416	0.0273	0.0361	0.0362	0.0447	0.0503	0.0495	0.0214	0.0243	0.0254
7.5	0.0308	0.0531	0.0537	0.0547	0.0458	0.0503	0.0495	0.0669	0.0669	0.0674	0.0343	0.0390	0.0389
10.0	0.0426	0.0587	0.0777	0.0774	0.0509	0.0642	0.0724	0.0750	0.0882	0.0847	0.0441	0.0475	0.0442
12.5	0.0598	0.0803	0.0907	0.0919	0.0723	0.0829	0.0847	0.0943	0.1059	0.1037	0.0642	0.0669	0.0649

LPM	No media	หัวกระจายอากาศแบบ rigid small											
		กลม			แท่ง			กระบอกกลวง			สี่เหลี่ยม		
		2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%
2.5	0.0175	0.0273	0.0237	0.0198	0.0243	0.0214	0.0143	0.0361	0.0390	0.0362	0.0074	0.0093	0.0131
5.0	0.0290	0.0390	0.0379	0.0335	0.0332	0.0361	0.0281	0.0503	0.0503	0.0495	0.0147	0.0184	0.0198
7.5	0.0467	0.0559	0.0587	0.0500	0.0515	0.0587	0.0442	0.0669	0.0669	0.0674	0.0273	0.0343	0.0362
10.0	0.0671	0.0771	0.0808	0.0729	0.0734	0.0803	0.0679	0.0856	0.0882	0.0847	0.0503	0.0559	0.0572
12.5	0.0876	0.0959	0.1052	0.0933	0.0933	0.1059	0.0895	0.1009	0.1059	0.1037	0.0707	0.0750	0.0749

LPM	No media	หัวกระจายอากาศแบบ rigid large											
		กลม			แท่ง			กระบอกกลวง			สี่เหลี่ยม		
		2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%
2.5	0.0144	0.0243	0.0291	0.0281	0.0178	0.0214	0.0226	0.0361	0.0390	0.0362	0.0123	0.0166	0.0131
5.0	0.0242	0.0332	0.0361	0.0416	0.0273	0.0361	0.0362	0.0503	0.0503	0.0495	0.0249	0.0285	0.0254
7.5	0.0426	0.0515	0.0537	0.0547	0.0458	0.0503	0.0495	0.0669	0.0669	0.0674	0.0430	0.0458	0.0416
10.0	0.0626	0.0745	0.0777	0.0823	0.0691	0.0696	0.0774	0.0856	0.0882	0.0847	0.0642	0.0582	0.0562
12.5	0.0709	0.0803	0.0907	0.0943	0.0787	0.0829	0.0895	0.1009	0.1059	0.1037	0.0712	0.0718	0.0699

ตารางที่ ก .4 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม (k_{La}) (ต่อวินาที)

Q(LPM)	No media	หัวกระจายอากาศแบบไม้											
		กลม			แท่ง			กระบอกกลวง			สี่เหลี่ยม		
		2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%
2.5	0.005	0.0053	0.0109	0.007	0.0093	0.0094	0.0093	0.0095	0.007	0.0094	0.0056	0.0064	0.0086
5	0.008	0.0092	0.0136	0.0116	0.0138	0.0131	0.0118	0.0124	0.0114	0.0136	0.0119	0.012	0.0083
7.5	0.01	0.0138	0.0174	0.0136	0.0155	0.017	0.0198	0.017	0.0177	0.02	0.0145	0.0144	0.0115
10	0.013	0.02	0.0205	0.0222	0.023	0.0253	0.0255	0.0221	0.0235	0.0248	0.0179	0.0197	0.0141
12.5	0.011	0.0175	0.0192	0.02	0.0201	0.0187	0.0223	0.0181	0.0205	0.0217	0.0133	0.0155	0.0124
Q(LPM)	No media	หัวกระจายอากาศแบบ rigid small											
		กลม			แท่ง			กระบอกกลวง			สี่เหลี่ยม		
		2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%
2.5	0.0159	0.0155	0.0158	0.0134	0.012	0.0118	0.0094	0.015	0.0151	0.0149	0.01	0.0088	0.0059
5	0.026	0.0256	0.0237	0.0235	0.0221	0.0197	0.0195	0.0256	0.0257	0.0257	0.0201	0.0167	0.016
7.5	0.033	0.0336	0.0341	0.0299	0.0301	0.0301	0.0259	0.0324	0.0322	0.0319	0.0281	0.0271	0.0224
10	0.0376	0.0365	0.0355	0.0329	0.033	0.0315	0.0289	0.0363	0.0365	0.0355	0.031	0.0285	0.0254
12.5	0.0413	0.0383	0.0375	0.0374	0.0348	0.0335	0.0334	0.0396	0.0384	0.0384	0.0328	0.0305	0.0299
Q(LPM)	No media	หัวกระจายอากาศแบบ rigid large											
		กลม			แท่ง			กระบอกกลวง			สี่เหลี่ยม		
		2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%
2.5	0.0122	0.0125	0.0181	0.0142	0.0165	0.0166	0.0165	0.0167	0.0142	0.0166	0.0128	0.0136	0.0158
5	0.0188	0.02	0.0244	0.0224	0.0246	0.0239	0.0226	0.0232	0.0222	0.0244	0.0227	0.0228	0.0185
7.5	0.0245	0.0283	0.0319	0.0281	0.03	0.0315	0.0343	0.0315	0.0322	0.0345	0.029	0.0289	0.026
10	0.0268	0.0338	0.0343	0.036	0.0368	0.0391	0.0393	0.0359	0.0373	0.0386	0.0317	0.0335	0.0279
12.5	0.0308	0.0373	0.039	0.0398	0.0399	0.0385	0.0393	0.0379	0.0403	0.0415	0.0331	0.0353	0.0322

ตารางที่ ก .5 ประสิทธิภาพการดูดซึม CO₂ ด้วยสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

Time (s)	ประสิทธิภาพการดูดซึม CO ₂						
	DI Water	MEA 5%	MEA 1%	MEA 0.5%	MEA 0.3%	MEA 0.1%	Na ₂ CO ₃ 1%
0							
10	4.48	5.71	5.40	5.44	5.42	5.45	5.42
20	6.07	8.63	8.21	8.24	8.21	8.19	8.11
30	7.32	11.58	11.07	11.06	11.00	10.89	10.81
40	8.29	14.54	13.96	13.88	13.78	13.52	13.52
50	9.04	17.52	16.87	16.70	16.54	16.07	16.24
60	9.62	20.51	19.78	19.51	19.28	18.54	18.97
70	10.08	23.51	22.70	22.30	21.99	20.95	21.72
80	10.45	26.51	25.62	25.08	24.69	23.31	24.49
90	10.76	29.50	28.54	27.85	27.37	25.62	27.26
100	11.03	32.50	31.46	30.62	30.03	27.91	30.04
110	11.27	35.50	34.38	33.38	32.69	30.17	32.82
120	11.49	38.50	37.29	36.13	35.34	32.43	35.61
130	11.69	41.50	40.21	38.89	37.99	34.68	38.40
140	11.88	44.49	43.12	41.65	40.64	36.93	41.18
150	12.05	47.49	46.04	44.40	43.29	39.17	43.97
160	12.20	50.49	48.96	47.16	45.95	41.40	46.75
170	12.32	53.49	51.88	49.92	48.60	43.63	49.54
180	12.42	56.49	54.80	52.67	51.24	45.85	52.32
190	12.49	59.49	57.72	55.43	53.89	48.05	55.10
200	12.53	62.50	60.64	58.18	56.54	50.24	57.88
210	12.56	65.50	63.57	60.93	59.18	52.41	60.66
220	12.57	68.51	66.50	63.67	61.82	54.58	63.45
230	12.57	71.51	69.42	66.42	64.45	56.73	66.23
240	12.57	74.52	72.35	69.16	67.09	58.89	69.02
250	12.57	77.52	75.27	71.91	69.73	61.04	71.80
260	12.59	80.52	78.19	74.65	72.37	63.21	74.59
270	12.61	83.52	81.12	77.40	75.01	65.38	77.37
280	12.63	86.53	84.04	80.15	77.66	67.55	80.15
290	12.61	89.53	86.97	82.90	80.30	69.71	82.94
300	12.91	92.54	89.90	85.65	82.95	71.87	85.72

ผลการทดลองคอลัมน์แบบอากาศยก

ตารางที่ ก .6 ผลขนาดฟองอากาศ riser zone (มิลลิเมตร)

Rigid small diffuser													
Qg	No med	PP cir			PP gre			PP squ			PP rin		
		2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%
2.5	3.39	3.49	3.07	3.03	3.18	2.95	3.00	2.59	2.70	3.23	2.97	3.19	2.92
5	3.69	3.72	3.28	3.04	3.13	2.99	3.14	3.00	2.91	3.46	3.24	3.22	3.27
7.5	3.98	3.78	3.57	3.52	3.76	3.23	3.20	3.05	2.90	3.52	3.20	3.50	3.30
10	4.25	4.09	3.60	3.52	3.65	3.29	3.36	3.24	3.21	3.67	3.57	3.53	3.29
12.5	4.17	4.30	3.65	3.78	3.86	3.39	3.55	3.24	3.28	3.69	3.71	3.79	3.30
Wood diffuser													
Qg	No med	PP กลม			PP แท่ง			PP สี่เหลี่ยม			PP ทรงกระบอก		
		2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%
2.5	2.58	2.69	2.77	2.62	2.84	2.96	2.72	2.58	2.77	2.48	2.60	2.73	2.47
5	2.66	2.82	2.81	2.79	3.04	2.97	2.83	2.61	2.75	2.50	2.85	2.75	2.47
7.5	2.68	2.87	2.84	2.82	3.07	2.98	2.81	2.75	2.99	2.54	2.80	2.87	2.52
10	2.70	2.89	2.89	2.91	3.07	3.03	2.92	2.76	2.74	2.76	2.90	2.89	2.55
12.5	2.62	3.02	2.97	2.92	3.11	3.04	2.94	2.89	2.57	2.71	3.05	2.60	2.61
Rigid large diffuser													
Qg	No med	PP กลม			PP แท่ง			PP สี่เหลี่ยม			PP ทรงกระบอก		
		2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%
2.5	2.48	2.69	2.79	2.62	2.83	2.97	2.71	2.57	2.77	2.47	2.59	2.72	2.45
5	2.59	2.82	2.83	2.79	3.03	2.95	2.82	2.60	2.77	2.49	2.83	2.73	2.46
7.5	2.78	2.85	2.84	2.82	3.07	2.97	2.81	2.74	2.98	2.53	2.78	2.86	2.50
10	2.81	2.87	2.90	2.91	3.06	3.02	2.91	2.76	2.73	2.75	2.90	2.88	2.53
12.5	2.83	3.05	2.99	2.92	3.10	3.04	2.93	2.89	2.55	2.71	3.03	2.61	2.58

ตารางที่ ก .7 ผลขนาดฟองอากาศ downcomer zone (มิลลิเมตร)

Rigid small diffuser													
Qg	No med	PP กลม			PP แท่ง			PP สี่เหลี่ยม			PP ทรงกระบอก		
		2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%
2.5													
5	3.39	3.89	3.75	3.68	3.65	3.55	3.13	3.46	3.40	3.28	3.20	3.22	2.93
7.5	3.49	4.09	3.88	3.83	3.86	3.68	3.43	3.52	3.67	3.25	3.24	3.50	3.27
10	4.20	4.29	4.08	3.96	3.79	3.83	3.55	3.67	3.78	3.55	3.67	3.74	3.30
12.5	4.46	4.37	4.13	4.09	4.10	3.87	3.66	3.69	3.63	3.63	4.37	4.37	3.35

Wood diffuser													
Qg	No med	PP กลม			PP แฉ่ง			PP สี่เหลี่ยม			PP ทรงกระบอก		
		2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%
2.5													
5	2.98	2.90	2.90	2.94	3.10	3.01	2.93	2.69	2.75	2.82	2.65	2.74	2.77
7.5	3.26	3.11	3.01	3.06	3.15	3.19	3.08	2.73	2.91	2.98	2.70	2.89	2.89
10	3.42	3.19	3.21	3.18	3.46	3.05	3.05	2.91	2.99	3.04	3.15	2.95	2.95
12.5	3.52	3.27	3.36	3.24	3.19	3.13	3.18	2.94	3.03	3.11	3.20	3.00	3.04
Rigid large diffuser													
Qg	No med	PP กลม			PP แฉ่ง			PP สี่เหลี่ยม			PP ทรงกระบอก		
		2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%
2.5													
5	2.91	2.91	2.89	2.93	3.09	3.02	2.92	2.70	2.74	2.81	2.63	2.71	2.75
7.5	3.36	3.12	3.01	3.04	3.14	3.20	3.07	2.72	2.91	2.97	2.67	2.85	2.85
10	3.53	3.19	3.19	3.13	3.45	3.05	3.05	2.91	2.98	3.04	3.09	2.91	2.94
12.5	3.73	3.25	3.35	3.20	3.18	3.12	3.16	2.95	3.04	3.13	3.17	2.98	3.00

ตารางที่ ก .8 ความเร็วลอยตัว Riser zone (เซนติเมตรต่อวินาที)

Rigid small diffuser													
Qg	No media	PP กลม			PP แฉ่ง			PP สี่เหลี่ยม			PP ทรงกระบอก		
		2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%
2.5	7.52	13.23	11.85	8.90	7.76	6.82	6.69	11.57	9.83	7.85	9.02	8.03	6.43
5	8.84	15.56	13.94	10.47	9.13	8.02	7.87	13.61	11.57	9.23	10.61	9.45	7.57
7.5	9.83	17.29	15.49	11.64	10.15	8.91	8.75	15.12	12.85	10.26	11.79	10.50	8.41
10	12.07	17.92	16.43	13.59	15.10	13.81	12.61	14.24	13.11	12.39	12.46	13.72	12.38
12.5	13.59	19.61	18.07	13.21	16.30	14.11	13.59	17.79	16.11	16.74	17.80	15.91	13.90

Wood diffuser													
Qg	No media	PP กลม			PP แท่ง			PP สี่เหลี่ยม			PP ทรงกระบอก		
		2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%
2.5	8.40	14.78	13.24	9.95	8.68	7.62	7.48	12.93	10.99	8.77	10.08	8.97	7.19
5	9.34	16.43	14.71	11.05	9.64	8.46	8.31	14.36	12.21	9.75	11.20	9.97	7.99
7.5	9.83	17.29	15.49	11.64	10.15	8.91	8.75	15.12	12.85	10.26	11.79	10.50	8.41
10	12.07	17.92	16.43	13.59	15.10	13.81	12.61	14.24	13.11	12.39	12.46	13.72	12.38
12.5	13.59	19.61	18.07	13.21	16.30	14.11	13.59	17.79	16.11	16.74	17.80	15.91	13.90

Rigid large diffuser													
Qg	No media	PP กลม			PP แท่ง			PP สี่เหลี่ยม			PP ทรงกระบอก		
		2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%
2.5	7.75	14.72	13.28	9.98	8.78	7.67	7.46	12.28	10.75	8.12	10.04	8.40	7.02
5	9.11	16.47	14.76	11.54	9.42	8.44	8.08	14.34	12.08	9.46	11.07	9.11	7.33
7.5	9.43	17.30	15.87	11.65	10.50	8.95	8.46	15.01	12.09	10.22	11.44	10.41	8.10
10	11.67	17.99	16.92	13.55	15.70	13.13	12.09	14.25	13.10	12.32	12.14	13.23	12.23
12.5	13.55	19.69	18.68	13.95	16.40	14.11	13.45	17.11	16.01	16.45	17.04	15.13	13.04

ตารางที่ ก .9 ความเร็วลอยตัว Downcomer zone (เซนติเมตรต่อวินาที)

Rigid small diffuser													
Qg	No media	PP กลม			PP แท่ง			PP สี่เหลี่ยม			PP ทรงกระบอก		
		2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%
2.5	10.26	13.51	109.52	7.32	14.48	11.63	10.37	15.30	12.38	88.65	9.97	7.29	5.84
5	8.92	11.75	95.24	6.37	12.59	10.11	9.01	13.30	10.76	77.09	8.67	6.34	5.08
7.5	8.11	10.68	86.58	5.79	11.45	9.19	8.19	12.09	9.78	70.08	7.88	5.77	4.62
10	2.47	43.29	3.28	2.82	4.68	3.83	2.58	4.19	4.25	3.00	4.67	2.79	1.17
12.5	9.43	95.05	8.59	7.90	9.85	7.83	8.22	10.62	91.24	81.42	9.43	8.61	6.10

Wood diffuser													
Qg	No media	PP กลม			PP แท่ง			PP สี่เหลี่ยม			PP ทรงกระบอก		
		2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%
2.5	-10.26	-13.51	-109.52	-7.32	-14.48	-11.63	-10.37	-15.30	-12.38	-88.65	-9.97	-7.29	-5.84
5	-8.92	-11.75	-95.24	-6.37	-12.59	-10.11	-9.01	-13.30	-10.76	-77.09	-8.67	-6.34	-5.08
7.5	-8.11	-10.68	-86.58	-5.79	-11.45	-9.19	-8.19	-12.09	-9.78	-70.08	-7.88	-5.77	-4.62
10	-2.47	-43.29	-3.28	-2.82	-4.68	-3.83	-2.58	-4.19	-4.25	-3.00	-4.67	-2.79	-1.17
12.5	-9.43	-95.05	-8.59	-7.90	-9.85	-7.83	-8.22	-10.62	-91.24	-81.42	-9.43	-8.61	-6.10
Rigid large diffuser													
Qg	No media	PP กลม			PP แท่ง			PP สี่เหลี่ยม			PP ทรงกระบอก		
		2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%
2.5	-10.03	-13.09	-109.22	-7.08	-14.41	-11.31	-10.36	-15.16	-12.35	-88.07	-9.15	-	-5.31
5	-8.66	-11.47	-95.24	-6.31	-12.22	-10.01	-9.00	-13.04	-10.21	-77.04	-8.21	-	-5.01
7.5	-7.51	-10.19	-86.19	-5.19	-11.44	-9.11	-8.11	-12.04	-9.38	-70.03	-7.38	-	-4.19
10	-1.87	-43.21	-3.12	-2.22	-4.48	-3.33	-2.09	-4.14	-4.22	-3.00	-4.06	-	-1.15
12.5	-9.32	-95.03	-8.04	-7.02	-9.13	-7.29	-8.10	-10.15	-91.02	-81.20	-9.19	-	-6.01

ตารางที่ ก .10 สัดส่วนก๊าซ

LPM	No media	หัวกระจายอากาศแบบไม้											
		กลม			แท่ง			กระบอกกลาง			สี่เหลี่ยม		
		2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%
2.5	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.04	0.03	0.03	0.01	0.02
5	0.03	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.03
7.5	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04
10	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04
12.5	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.07	0.05	0.06	0.05	0.05
LPM	No media	หัวกระจายอากาศแบบ Rigid small											
		กลม			แท่ง			กระบอกกลาง			สี่เหลี่ยม		
		2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%
2.5	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.04	0.04	0.02	0.03	0.02
5	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03
7.5	0.06	0.07	0.06	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05	0.06	0.05	0.05	0.06	0.05
10	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.08	0.07	0.07	0.08	0.08	0.06	0.07	0.07
12.5	0.09	0.09	0.09	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.09	0.08	0.10	0.08

LPM	No media	หัวกระจายอากาศแบบ rigid large											
		กลม			แท่ง			กระบอกกลวง			สี่เหลี่ยม		
		2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%
2.5	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.04	0.02	0.02
5	0.04	0.05	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.05	0.04	0.03	0.05	0.04	0.04
7.5	0.04	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.06	0.04	0.05
10	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05
12.5	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05	0.07	0.06	0.06

ตารางที่ ก .11 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม Riser zone

LPM	No media	หัวกระจายอากาศแบบไม่มี											
		กลม			แท่ง			กระบอกกลวง			สี่เหลี่ยม		
		2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%
2.5	0.0045	0.0078	0.0056	0.0047	0.0052	0.0043	0.005	0.00871	0.007	0.0066	0.0046	0.0064	0.007
5	0.0062	0.0102	0.0072	0.0068	0.0074	0.0069	0.009	0.0096	0.0085	0.0085	0.0067	0.0077	0.0077
7.5	0.0079	0.0107	0.0087	0.0083	0.0088	0.0086	0.0098	0.01	0.0092	0.0094	0.0082	0.0091	0.0089
10	0.0063	0.0121	0.0098	0.0102	0.01	0.0098	0.011	0.01301	0.0114	0.0108	0.0098	0.0112	0.0108
12.5	0.0102	0.0116	0.0102	0.0113	0.0105	0.0109	0.0118	0.01251	0.0126	0.012	0.0099	0.0118	0.0117
LPM	No media	หัวกระจายอากาศแบบ Rigid small											
		กลม			แท่ง			กระบอกกลวง			สี่เหลี่ยม		
		2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%
2.5	0.0065	0.0074	0.0073	0.0075	0.0069	0.0066	0.009	0.0079	0.008	0.0076	0.0069	0.006	0.0066
5	0.0104	0.0108	0.0107	0.0107	0.0108	0.0127	0.0129	0.0123	0.0117	0.0104	0.0087	0.0102	0.0096
7.5	0.0156	0.0162	0.0164	0.0167	0.015	0.0145	0.0187	0.0165	0.0162	0.0164	0.0127	0.0136	0.0128
10	0.0197	0.021	0.0208	0.0218	0.0208	0.0218	0.0244	0.0197	0.021	0.0211	0.0162	0.0178	0.0145
12.5	0.0231	0.0248	0.026	0.026	0.0261	0.0269	0.027	0.0252	0.0262	0.0272	0.0187	0.0208	0.0154
LPM	No media	หัวกระจายอากาศแบบ Rigid large											
		กลม			แท่ง			กระบอกกลวง			สี่เหลี่ยม		
		2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%
2.5	0.0033	0.0052	0.006	0.005	0.0048	0.0053	0.0063	0.004	0.0034	0.0063	0.0069	0.005	0.005
5	0.0067	0.0098	0.0089	0.0089	0.0097	0.0095	0.0096	0.0075	0.0068	0.0096	0.0115	0.0079	0.0089
7.5	0.0095	0.0126	0.0129	0.0121	0.0134	0.0124	0.0134	0.0099	0.0099	0.0132	0.0143	0.0119	0.0121
10	0.0128	0.0145	0.0176	0.0158	0.0192	0.0167	0.0172	0.0126	0.0141	0.0182	0.0162	0.0166	0.0158
12.5	0.0155	0.0202	0.0213	0.0211	0.0229	0.023	0.0203	0.0165	0.0194	0.0223	0.0219	0.0203	0.0211

ตารางที่ ก .12 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม Downcomer zone

LPM	No media	หัวกระจายอากาศแบบไม้											
		กลม			แท่ง			กระบอกกลาง			สี่เหลี่ยม		
		2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%
2.5	0.0064	0.0034	0.0069	0.0062	0.0057	0.0053	0.0056	0.0057	0.0067	0.0089	0.0053	0.0055	0.0068
5	0.008	0.0081	0.0086	0.0078	0.0076	0.0066	0.0101	0.0075	0.0079	0.0109	0.0094	0.008	0.007
7.5	0.0083	0.0095	0.0099	0.0104	0.0085	0.0087	0.0109	0.0085	0.0099	0.0141	0.0101	0.009	0.0093
10	0.0102	0.0098	0.0096	0.0097	0.0089	0.0091	0.0103	0.0089	0.0106	0.0139	0.0103	0.0089	0.0091
12.5	0.0105	0.0098	0.0097	0.0116	0.0095	0.0092	0.0105	0.0097	0.011	0.0136	0.0096	0.0085	0.0095
LPM	No media	หัวกระจายอากาศแบบ rigid small											
		กลม			แท่ง			กระบอกกลาง			สี่เหลี่ยม		
		2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%
2.5	0.0083	0.0072	0.0059	0.007	0.0061	0.0068	0.0056	0.0081	0.0097	0.0108	0.007	0.0075	0.008
5	0.0119	0.0119	0.0125	0.013	0.0105	0.0173	0.0083	0.0109	0.0151	0.0194	0.0101	0.0106	0.0106
7.5	0.0169	0.0163	0.0157	0.0168	0.0157	0.0161	0.0116	0.0175	0.0207	0.0261	0.0158	0.016	0.0155
10	0.0224	0.0207	0.0316	0.0215	0.0206	0.0212	0.0163	0.0231	0.0242	0.0306	0.0205	0.021	0.0202
12.5	0.0254	0.0251	0.0264	0.0267	0.024	0.0246	0.0207	0.0277	0.0285	0.037	0.0251	0.0253	0.0256
LPM	No media	หัวกระจายอากาศแบบ rigid large											
		กลม			แท่ง			กระบอกกลาง			สี่เหลี่ยม		
		2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%	2%	5%	10%
2.5	0.0016	0.0044	0.0047	0.0052	0.0044	0.0038	0.0028	0.0054	0.0057	0.0061	0.0035	0.0028	0.0023
5	0.0059	0.0114	0.0089	0.0097	0.0119	0.0123	0.0115	0.0124	0.0099	0.0123	0.011	0.007	0.0068
7.5	0.0116	0.0203	0.0155	0.0201	0.0169	0.0188	0.0204	0.0213	0.0165	0.0236	0.016	0.0136	0.0172
10	0.0138	0.0237	0.0233	0.0219	0.0207	0.0258	0.0254	0.0247	0.0243	0.029	0.0198	0.0214	0.019
12.5	0.0186	0.0263	0.0286	0.0261	0.0283	0.0296	0.029	0.0273	0.0296	0.0331	0.0274	0.0267	0.0232

ตารางที่ ก .13 ประสิทธิภาพการดูดซับ CO₂ ด้วยสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

Time (s)	MEA No media	MEA1% + Ring 10%	Na ₂ CO ₃ 1% No media	Na ₂ CO ₃ 1% + Ring 10%
0				
10	2.72	2.74	2.72	2.81
20	5.53	5.60	5.42	5.51
30	8.39	8.54	8.11	8.20
40	11.29	11.51	10.81	10.90
50	14.22	14.51	13.52	13.61
60	17.18	17.50	16.24	16.33
70	20.14	20.50	18.97	19.06
80	23.12	23.49	21.72	21.81
90	26.11	26.48	24.49	24.58
100	29.10	29.46	27.26	27.35
110	32.09	32.45	30.04	30.13
120	35.08	35.44	32.82	32.91
130	38.08	38.44	35.61	35.70
140	41.07	41.44	38.40	38.49
150	44.07	44.45	41.18	41.27
160	47.07	47.46	43.97	44.06
170	50.07	50.47	46.75	46.84
180	53.07	53.48	49.54	49.63
190	56.07	56.50	52.32	52.41
200	59.07	59.51	55.10	55.19
210	62.07	62.51	57.88	57.97
220	65.06	65.52	60.66	60.75
230	68.06	68.52	63.45	63.54
240	71.06	71.52	66.23	66.32
250	74.06	74.52	69.02	69.11
260	77.06	77.52	71.80	71.89
270	80.06	80.53	74.59	74.68
280	83.06	83.55	77.37	77.46
290	86.06	86.57	80.15	80.24
300	89.06	89.57	82.94	83.03

ปริมาณ CO₂ ในก๊าซชีวภาพในหน่วย ppm

ในก๊าซชีวภาพ มีปริมาณ CO₂ 30 – 40% โดยก๊าซชีวภาพมีความหนาแน่น 1.15 kg/m³
(Peter Jacob Jørgensen, PlanEnergi and Researcher for a Day, 2009) และความหนาแน่น
CO₂ 1.77 kg/m³ ที่ 30 °C

คำนวณ 40% CO₂ เป็น ppm

$$\frac{40 \text{ L}_{\text{CO}_2}}{100 \text{ L}_{\text{Biogas}}} \times \frac{1.77 \text{ g}_{\text{CO}_2} / \text{L}_{\text{CO}_2}}{1.15 \text{ g}_{\text{Biogas}} / \text{L}_{\text{Biogas}}}$$

$$= 0.616$$

$$= 61.6\%$$

$$= 616,000 \text{ ppm}$$

คำนวณความหนาแน่น CO₂ ที่ 30 °C 1 atm

$$PV = nRT$$

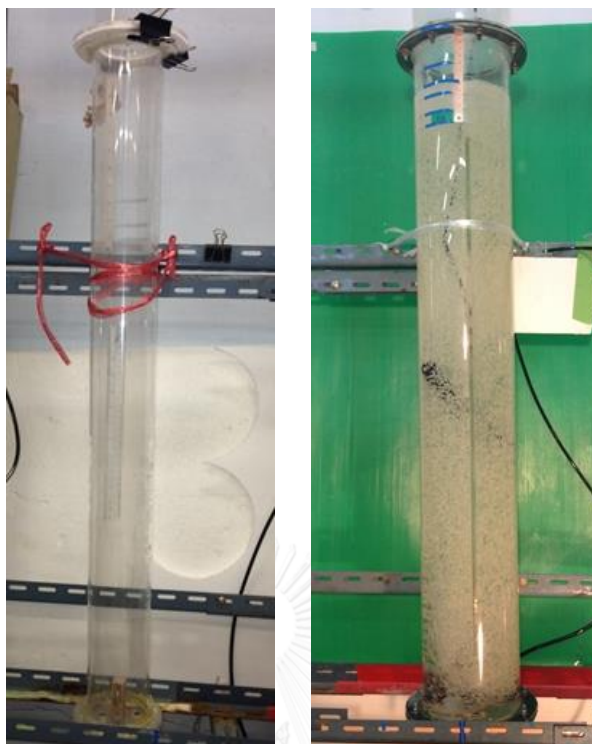
$$PV = \frac{m}{M} RT$$

$$\frac{PM}{RT} = \frac{M}{V}$$

$$\frac{1 \times 44.01}{0.08206 \times 303} = \text{density}$$

$$\text{density} = 1.77 \text{ kg/m}^3$$





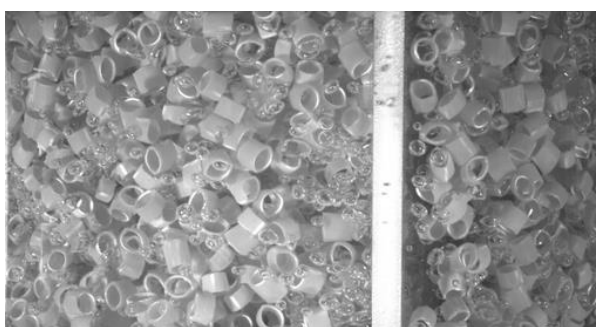
รูปที่ ข.1 ซ้าย คอลัมน์แบบฟองอากาศ ขวา คอลัมน์แบบอากาศยก



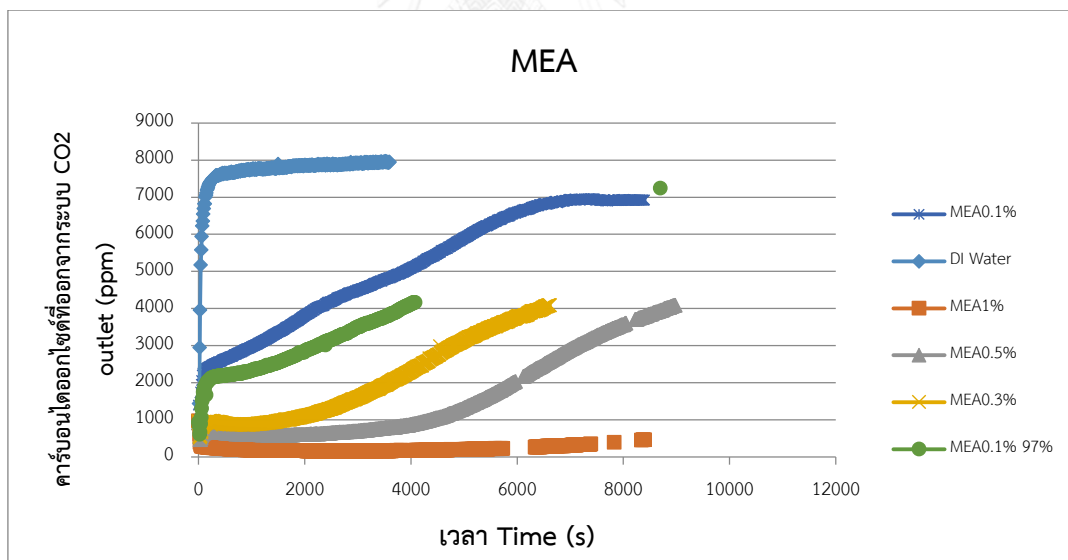
รูปที่ ข.2 คอลัมน์จำลองสำหรับใช้สารละลายกับ CO_2 ก่อนใช้งานกับคอลัมน์ขนาดจริง



รูปที่ ข.3 ภาพถ่ายขนาดฟองอากาศจากคอลัมน์แบบฟองอากาศ



รูปที่ ข.4 ภาพถ่ายขนาดฟองอากาศจากคอลัมน์แบบอากาศยก



รูปที่ ข.5 ผลทดสอบตัวอย่างคอลัมน์ขนาด 1 ลิตร วัด CO₂ ใช้ออกจากระบบ

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวเรวดี ต่ามี เกิดเมื่อวันที่ 3 กันยายน พ.ศ. 2530 ที่จังหวัดนครศรีธรรมราช สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในปีการศึกษา 2552 ปริญญาสาธารณสุขศาสตรบัณฑิต (อาชีวอนามัยและความปลอดภัย) มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ในปีการศึกษา 2557 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556

ผลงานวิจัยส่วนหนึ่งจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้เผยแพร่ในงานประชุม “The 1st International Conference on Environment, Livelihood, and Services”: Environment for Lite. ที่โรงแรมเซ็นทาราแกรนด์ เซ็นทรัลเวิลด์ กรุงเทพมหานคร วันที่ 2-5 พฤศจิกายน 2558 ในชื่อหัวข้อ Effect of Gas Sparger and Plastic Media on Mass Transfer and Hydrodynamic Parameter in Airlift Reactor

นอกจากนี้ ยังมีผลงานทางวิชาการด้านอื่นๆ อีก เช่น

Passaworn Warunyuwong, Rewadee Damee, Kritchart Wongwailikhit, Prajak Sastaravet, Nattawin Chawaloeshonisiya 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.

งานประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 15 ประจำปี 2559 ระหว่างวันที่ 11-13 พฤษภาคม 2559 ที่โรงแรมทวินทาวเวอร์ กรุงเทพมหานคร หัวข้อ ผลกระทบของตัวกลางพลาสติกต่อกระบวนการดูดซับด้วยถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก ด้านการถ่ายเทมวลสารละอองทกพลศาสตร์