

การเปรียบเทียบการถ่ายเทมวลสารและพลังงานที่ใช้ในการดำเนินระบบ
ของคอลัมน์แบบฟองอากาศและคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A COMPARATIVE STUDY OF BUBBLE AND PACKED COLUMN IN TERMS OF
MASS TRANSFER COEFFICIENT AND POWER CONSUMPTION



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเปรียบเทียบการถ่ายเทมวลสารและพลังงานที่ใช้ในการดำเนินระบบของคอลัมน์แบบฟองอากาศและคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง
โดย	นายนวพัฒน์ เตชะธางกูร
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ ดร.กริชชาติ ว่องไวลิขิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์ ดร.กริชชาติ ว่องไวลิขิต)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชา ขาวเขียว)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มรุตพัชร จำนงค์วงศ์)

นวพัฒน์ เตชะธางกูร : การเปรียบเทียบการถ่ายเทมวลสารและพลังงานที่ใช้ในการ
 ดำเนินระบบของคอลัมน์แบบฟองอากาศและคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง . (A
 COMPARATIVE STUDY OF BUBBLE AND PACKED COLUMN IN TERMS
 OF MASS TRANSFER COEFFICIENT AND POWER CONSUMPTION) อ.ที่ปรึกษา
 หลัก : ศ. ดร.พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล, อ.ที่ปรึกษาร่วม : อ. ดร.กริชชาติ ว่องไวลิขิต

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการถ่ายเทมวลสารของแก๊สออกซิเจนจากวัฏภาคแก๊สไปสู่ น้ำประปาที่เป็นวัฏภาคของเหลวด้วยคอลัมน์สามประเภท คือ คอลัมน์แบบฟองอากาศ คอลัมน์แบบฟองอากาศชนิดเติมตัวกลาง และคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง โดยทุกคอลัมน์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 ซม. และความสูง 80 ซม. ทั้งนี้ การทดลองจะแบ่งเป็น 4 ส่วน โดยในส่วนแรกเป็นการทดลองในคอลัมน์แบบฟองอากาศที่ใช้อัตราการไหลของแก๊สและของเหลวที่แตกต่างกันในหัวจ่ายอากาศขนาด 0.4, 0.8, และ 1.2 มม. ที่มีจำนวน 19 และ 38 รู ซึ่งพบว่า การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของแก๊สส่งผลให้การถ่ายเทมวลสารเพิ่มขึ้น โดยที่หัวจ่ายอากาศขนาด 0.4 มม. มีค่าการถ่ายเทมวลสารสูงที่สุด นอกจากนี้ การเพิ่มจำนวนรูของหัวจ่ายอากาศส่งผลให้ฟองอากาศมีขนาดเล็กและมีความเร็วในการลอยตัวช้าลง เป็นผลให้มีสัดส่วนของแก๊สและพื้นที่ผิวจำเพาะในการถ่ายเทมวลสารเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีการถ่ายเทมวลสารมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม การใช้พลังงานของหัวจ่ายขนาดเล็กจะสิ้นเปลืองมากที่สุดในการเดินระบบ การทดลองในส่วนที่ 2 เป็นการทดลองในคอลัมน์แบบฟองอากาศชนิดตัวกลาง โดยเติมตัวกลางทั้งหมด 4 ชนิด คือ พอลลิ่ง แคสเคดมินิริง อานม้าและแรสซิกริง ที่มีขนาดและเติมในปริมาตรที่แตกต่างกัน โดยพบว่า ตัวกลางพอลลิ่งขนาด 25 มม. ในปริมาตร 2.5% จะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้เกิดการถ่ายเทมวลสาร เมื่อใช้ตัวกลางกับหัวจ่ายอากาศขนาดใหญ่ แต่เมื่อใช้ตัวกลางกับหัวจ่ายอากาศขนาดเล็กจะทำให้มีค่าการถ่ายเทมวลสารลดลง ในการทดลองส่วนที่ 3 ได้ทำการทดลองการถ่ายเทมวลสารในคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง โดยพบว่า การเพิ่มอัตราการไหลของเหลวมีผลทำให้มีการถ่ายเทมวลสารดีขึ้น และตัวกลางพอลลิ่งขนาด 50 มม. สามารถทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสารดีที่สุด นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบกันแล้วนั้น คอลัมน์แบบบรรจุตัวกลางมีความสามารถในการถ่ายเทมวลสารน้อยกว่าแบบฟองอากาศ แต่มีการใช้พลังงานน้อยกว่า โดยเมื่อนำสภาวะการดำเนินการที่ดีที่สุดของแต่ละคอลัมน์ไปทำการทดสอบการดูดซับสารเบนซีนในการทดลองที่ 4 พบว่าคอลัมน์แบบฟองอากาศสามารถบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้ดีที่สุด ประมาณ 43- 75% แต่มีการใช้พลังงานที่ใช้ในระบบที่มากที่สุดเช่นเดียวกัน

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6170422421 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORD: MASS TRANSFER COEFFICIENT, HYDRODYNAMICS, POWER CONSUMPTION, BUBBLE COLUMN, PACKED COLUMN, THREE-PHASE BUBBLE COLUMN

Nawaphat Techathangkun : A COMPARATIVE STUDY OF BUBBLE AND PACKED COLUMN IN TERMS OF MASS TRANSFER COEFFICIENT AND POWER CONSUMPTION. Advisor: Prof. PISUT PAINMANAKUL, Ph.D. Co-advisor: KRITCHART WONGWAILIKHIT, Ph.D.

The purpose of this work is to study the mass transfer of oxygen from a gas phase to water in three types of columns: a bubble column, a bubble column with movable solid media, and a packed column. Every column has the same diameter and height of 20 and 80 cm, respectively. The experiment consisted of four parts; the first experiment was performed in a bubble column with different flow rates of water and gas. The orifice size and the number of the sparger were also varied in the range of 0.4-1.2 mm and 19-38 holes. The result indicated that the mass transfer of the orifice size of 0.4 mm was the highest among other orifice sizes. Besides, the higher number of holes also produced smaller bubbles having lower velocities of bubbles, leading to higher gas hold up and a larger specific interfacial area. However, when the small orifice size was used, higher power consumption was required. The second experiment was performed in a bubble column with the addition of plastic media. There were 4 types of media used in the column; pall ring, cascade mini ring, intralox saddle, and raschig ring. All of the packings were varied in sizes and concentrations at 25, 38, and 50 mm as well as 1 and 2.5 % by total liquid volume, respectively. The results indicated that the 25 mm pall ring with 2.5% by volume yield a higher mass transfer coefficient when used with large orifice size. However, when used with the small orifice size, the mass transfer coefficient decreased and a high power consumption was achieved. The third experiment was performed in a packed column where it was found that the increase of the liquid flow rate increased the mass transfer when 25 mm pall ring was used. In addition, it was also found that the packed column spent less power consumption than those of the bubble columns. Lastly, the experiment was performed using the optimal conditions of every column to treat benzene contaminated air at 1000 ppm where water was used as the liquid phase. The result indicated that the bubble column could remove VOCs at 43 -75%, which was larger than the packed column but the higher power consumption was also required.

Field of Study: Environmental Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2020

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยการสนับสนุนของศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพ็ยมณฑล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.กริชชาติ ว่องไวลิขิต อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และถ่ายทอดวิชาความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างมาก ผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทั้งสองท่านมาไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบพระคุณประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเจียร และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มรุพัชร์ จำนงค์วงศ์ ที่ได้ให้เกียรติและสละเวลาเพื่อเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ รวมถึงให้คำแนะนำและข้อชี้แนะสิ่งที่มีผลพลาตเพื่อให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณะอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ทางด้านสิ่งแวดล้อม ให้มีความรู้เพิ่มพูนอันเป็นประโยชน์ที่จะนำไปใช้ในภายภาคหน้า

ขอขอบพระคุณ พี่ ๆ น้อง ๆ และเพื่อน ๆ ทุก ๆ คนที่ให้การช่วยเหลือ แนะนำ และให้ความรู้ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ด้วยดีมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณสมาชิกทุกคนในครอบครัว ที่ให้การสนับสนุน ส่งเสริม และเป็นกำลังใจที่ดี จนทำให้การศึกษาในครั้งนี้ประสบความสำเร็จดังที่ตั้งใจ



นวพัฒน์ เตชะธางกูร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 สารอินทรีย์ระเหยง่าย	5
2.1.1 วิธีการจัดการสารอินทรีย์ระเหยง่าย.....	6
2.2 กระบวนการดูดซับ.....	10
2.2.1 ความรู้ทั่วไปที่เกี่ยวข้อง	10
2.2.2 อุปกรณ์การดูดซับ.....	14
2.3 การเลือกอุปกรณ์ที่เหมาะสมในกระบวนการดูดซับ	20
2.4 คอลัมน์แบบฟองอากาศ.....	22
2.4.1 พลศาสตร์ของไหลในคอลัมน์.....	22
2.4.2 อุทกพลศาสตร์ในคอลัมน์.....	23

2.4.3 การถ่ายเทมวลสารในคอลัมน์	28
2.4.4 การปรับปรุงทางอุทกพลศาสตร์ในคอลัมน์.....	31
2.5 คอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง	34
2.5.1 พลศาสตร์ของไหลในคอลัมน์	34
2.5.2 อุทกพลศาสตร์ในคอลัมน์.....	36
2.5.3 การถ่ายเทมวลสารในคอลัมน์	38
2.6 พลังงานที่ใช้ในระบบ	40
2.7 สรุปเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	41
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	42
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์	42
3.1.1 คอลัมน์แบบฟองอากาศ.....	42
3.1.2 คอลัมน์แบบฟองอากาศ.....	43
3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย.....	44
3.1.4 วัสดุตัวกลางที่ใช้ในงานวิจัย	45
3.1.5 สารเคมี.....	46
3.2 แผนการทดลอง	46
3.3 การดำเนินงานวิจัย.....	49
3.3.1 การเตรียมน้ำประปาสำหรับการดูดซึมออกซิเจน	49
3.3.2 การศึกษาคอลัมน์แบบฟองอากาศ	49
3.3.2.1 การศึกษาตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์.....	50
3.3.2.2 การศึกษาตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสารและพลังงานงานที่ใช้	54
3.3.3 การศึกษาคอลัมน์แบบฟองอากาศที่เติมตัวกลาง.....	57
3.3.4 การศึกษาคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง	59
3.3.4.1 การศึกษาตัวแปรทางด้านอุทกพลศาสตร์	60

3.3.4.2 การศึกษาตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสารและพลังงานงานที่ใช้	62
3.3.5 การศึกษาแนวทางการนำไปประยุกต์ใช้กับการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย	65
3.3.5.1 การศึกษาตัวแปรในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย	67
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย	71
4.1 ผลการศึกษาคอลัมน์แบบฟองอากาศ	71
4.1.1 ผลการศึกษาตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์	71
4.1.1.1 ขนาดฟองอากาศ	71
4.1.1.2 ความเร็วฟองเฉลี่ย	73
4.1.1.3 สัดส่วนของแก๊ส	75
4.1.1.4 พื้นที่ผิวจำเพาะ	77
4.1.2 ผลการศึกษาตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสารและพลังงานที่ใช้	78
4.1.2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม	78
4.1.2.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย	80
4.1.2.3 พลังงานที่ใช้ในระบบ	82
4.2 ผลการศึกษาคอลัมน์แบบฟองอากาศที่เติมตัวกลาง	84
4.2.1 ผลการศึกษาตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์	84
4.2.1.1 ขนาดฟองอากาศ	84
4.2.1.2 ความเร็วฟองเฉลี่ย	86
4.2.1.3 สัดส่วนแก๊ส	87
4.2.1.4 พื้นที่ผิวจำเพาะ	88
4.2.2 ผลการศึกษาตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสารและพลังงานที่ใช้ในระบบ	89
4.2.2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม	89
4.2.2.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย	91
4.2.2.3 พลังงานที่ใช้ในระบบ	92

4.3 ผลการศึกษาคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง	93
4.3.1 ผลการศึกษาตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์	93
4.3.1.1 สัดส่วนของเหลว	93
4.3.1.2 พื้นที่ผิวจำเพาะ	95
4.3.2 ผลการศึกษาตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสารและพลังงานที่ใช้ในระบบ	97
4.3.2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม	97
4.3.2.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย	99
4.3.2.3 พลังงานที่ใช้ในระบบ	101
4.4 ผลการศึกษาการนำไปประยุกต์ใช้กับการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย	104
4.4.1 ผลการศึกษาใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย	104
4.4.1.1 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม	104
4.4.1.2 ประสิทธิภาพในการบำบัด	105
4.4.1.3 พลังงานที่ใช้ในระบบ	105
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย	107
5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย	107
5.2 ข้อเสนอแนะ	109
ภาคผนวก.....	110
ภาคผนวก ก	111
ภาคผนวก ข	121
บรรณานุกรม.....	157
ประวัติผู้เขียน.....	164

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 เทคโนโลยีที่ใช้บำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย	9
ตารางที่ 2 กฎเฮนรีของแก๊สต่าง ๆ ในน้ำที่อุณหภูมิ 25°C.....	11
ตารางที่ 3 ชนิดและลักษณะทั่วไปของตัวกลาง.....	17
ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบคอลัมน์รูปแบบต่าง ๆ ในการถ่ายเทมวลสาร	20
ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบระหว่างคอลัมน์ต่าง ๆ ในด้านการถ่ายเทมวลสาร.....	21
ตารางที่ 6 ความสัมพันธ์ของการถ่ายเทมวลสาร.....	30
ตารางที่ 7 สรุปงานวิจัยต่าง ๆ การดูดซึมโดยเติมตัวกลางของแข็ง	33
ตารางที่ 8 ความสัมพันธ์พื้นที่ผิวจำเพาะ	38
ตารางที่ 9 ความสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม	39
ตารางที่ 10 สรุปงานวิจัยต่าง ๆ โดยวิธีการดูดซึม.....	41
ตารางที่ 11 คุณสมบัติของตัวกลางของแข็ง.....	45
ตารางที่ 12 ตัวแปรที่ศึกษาด้านอุทกพลศาสตร์ในคอลัมน์แบบพองอากาศ.....	54
ตารางที่ 13 ตัวแปรที่ศึกษาด้านการถ่ายเทมวลสารและพลังงานงานที่ใช้ในคอลัมน์พองอากาศ	56
ตารางที่ 14 ตัวแปรที่ศึกษาในคอลัมน์แบบพองอากาศโดยการเติมตัวกลาง.....	58
ตารางที่ 15 ตัวแปรที่ศึกษาด้านอุทกพลศาสตร์ในคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง	62
ตารางที่ 16 ตัวแปรที่ศึกษาด้านการถ่ายเทมวลสารและพลังงานงานที่ใช้ในคอลัมน์บรรจุตัวกลาง... ..	64
ตารางที่ 17 ตัวแปรที่ศึกษาในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยโดยใช้คอลัมน์แบบพองอากาศ	69
ตารางที่ 18 ตัวแปรที่ศึกษาในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยโดยใช้คอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง	70
ตารางที่ 19 พลังงานที่ใช้ในระบบทั้งหมด.....	92
ตารางที่ 20 การเปรียบเทียบค่าพลังงานที่ใช้กับค่าการถ่ายเทมวลสารที่คอลัมน์ประเภทต่าง ๆ.....	102

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 สารดูดซับที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม	7
รูปที่ 2 การเผาไหม้ในเตาเผา.....	8
รูปที่ 3 ระบบกรองชีวภาพ	8
รูปที่ 4 ทฤษฎีสองความต้านทาน	12
รูปที่ 5 คอลัมน์แบบฟองอากาศ	15
รูปที่ 6 คอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง.....	16
รูปที่ 7 วัสดุตัวกลางที่บรรจุ.....	16
รูปที่ 8 คอลัมน์แบบแผ่นหรือถาด.....	18
รูปที่ 9 คอลัมน์แบบโปรย.....	19
รูปที่ 10 คอลัมน์แบบกวนผสมต่อเนื่อง	19
รูปที่ 11 รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นในคอลัมน์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางและความเร็วแก๊ส.....	22
รูปที่ 12 ระบบการไหลในคอลัมน์แบบฟองอากาศ	23
รูปที่ 13 ขนาดของฟองอากาศผ่านรูช่องในคอลัมน์แบบฟองอากาศ.....	25
รูปที่ 14 รูปร่างฟองอากาศทั่วไป.....	25
รูปที่ 15 สัดส่วนของแก๊ส.....	27
รูปที่ 16 การเกิดแรงตึงผิวระหว่างฟองอากาศและตัวกลาง	32
รูปที่ 17 ชั้นส่วนต่อประสานระหว่างแก๊สและของเหลวในคอลัมน์บรรจุตัวกลาง	34
รูปที่ 18 ตัวกระจายของเหลว.....	35
รูปที่ 19 ลักษณะการไหลของหัวฉีด	35
รูปที่ 20 แสดงแผนภาพการไหลของคอลัมน์แบบฟองอากาศ	42
รูปที่ 21 แสดงแผนภาพการไหลของคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง	43

รูปที่ 22	แผนภาพการไหลทั้งสองคอลัมน์เมื่อทำการทดลองโดยใช้สารอินทรีย์ระเหยง่าย.....	44
รูปที่ 23	วัสดุตัวกลางที่ใช้ในงานวิจัย.....	45
รูปที่ 24	แผนการทดลอง.....	48
รูปที่ 25	ขั้นตอนการเตรียมน้ำก่อนเดินระบบ.....	49
รูปที่ 26	ขั้นตอนการเดินระบบในคอลัมน์แบบฟองอากาศ.....	50
รูปที่ 27	การวิเคราะห์ขนาดของฟองจากการถ่ายภาพด้วยกล้องความเร็วสูง.....	51
รูปที่ 28	ภาพจำลองของการเคลื่อนตัวของฟองอากาศและการคำนวณหาความเร็วฟอง.....	52
รูปที่ 29	สัดส่วนของแก๊ส.....	52
รูปที่ 30	ขั้นตอนการเดินระบบในคอลัมน์แบบฟองอากาศโดยการเติมตัวกลาง.....	57
รูปที่ 31	ขั้นตอนการเดินระบบในคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง.....	59
รูปที่ 32	ขั้นตอนการเดินระบบในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย.....	66
รูปที่ 33	ผลกระทบของหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ จำนวน 19 รู ต่อขนาดฟองเฉลี่ย.....	72
รูปที่ 34	ผลกระทบของหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ จำนวน 19 รู และ 38 รู.....	73
รูปที่ 35	ผลกระทบของหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ จำนวน 19 รู ต่อความเร็วฟองเฉลี่ย.....	74
รูปที่ 36	ผลกระทบของหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ จำนวน 19 รู และ 38 รู ต่อความเร็วฟอง.....	75
รูปที่ 37	ผลกระทบของหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ จำนวน 19 รู ต่อสัดส่วนของแก๊ส.....	76
รูปที่ 38	ผลกระทบของหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ จำนวน 19 รู และ 38 รู ต่อสัดส่วนแก๊ส.....	76
รูปที่ 39	ผลกระทบของหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ จำนวน 19 รู ต่อพื้นที่ผิวจำเพาะ.....	77
รูปที่ 40	ผลกระทบของหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ จำนวน 19 รู และ 38 รู ต่อพื้นที่ผิวจำเพาะ.....	78
รูปที่ 41	ผลกระทบของหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ จำนวน 19 รู ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร (ซ้าย) เปรียบเทียบกับความเร็วของแก๊ส (ขวา) เปรียบเทียบกับความเร็วของเหลว.....	79
รูปที่ 42	ผลกระทบของหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ จำนวน 19 รู และ 38 รู.....	80
รูปที่ 43	ผลกระทบของหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ จำนวน 19 รู ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ย่อย (ซ้าย) เปรียบเทียบกับความเร็วของแก๊ส (ขวา) เปรียบเทียบกับความเร็วของเหลว.....	81

รูปที่ 44 ผลกระทบของหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ จำนวน 19 รูและ 38 รู.....	82
รูปที่ 45 ผลกระทบของหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ จำนวน 19 รู ต่อพลังงานที่ใช้ในระบบ.....	83
รูปที่ 46 ผลกระทบของหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ ต่อพลังงานที่ใช้ในระบบทั้งหมด	84
รูปที่ 47 การเปรียบเทียบขนาดฟองเฉลี่ยที่เกิดจากหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ	85
รูปที่ 48 การเปรียบเทียบความเร็วฟองเฉลี่ยที่เกิดจากหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ	87
รูปที่ 49 การเปรียบเทียบสัดส่วนแก๊สที่เกิดจากหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ.....	88
รูปที่ 50 การเปรียบเทียบพื้นที่ผิวจำเพาะที่เกิดจากหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ	89
รูปที่ 51 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมที่เกิดจากหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ	90
รูปที่ 52 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยที่เกิดจากหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ....	91
รูปที่ 53 การเปรียบเทียบสัดส่วนของเหลวที่เกิดจากตัวกลางชนิดต่าง ๆ.....	94
รูปที่ 54 การเปรียบเทียบสัดส่วนของเหลวที่เกิดจากตัวกลางขนาดต่าง ๆ	95
รูปที่ 55 การเปรียบเทียบพื้นที่ผิวจำเพาะที่เกิดจากตัวกลางชนิดต่าง ๆ.....	96
รูปที่ 56 การเปรียบเทียบพื้นที่ผิวจำเพาะที่เกิดจากตัวกลางขนาดต่าง ๆ.....	97
รูปที่ 57 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมที่เกิดจากตัวกลางชนิดต่าง ๆ.....	98
รูปที่ 58 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมที่เกิดจากตัวกลางขนาดต่าง ๆ.....	99
รูปที่ 59 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยที่เกิดจากตัวกลางชนิดต่าง ๆ	100
รูปที่ 60 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยที่เกิดจากตัวกลางขนาดต่าง ๆ	101
รูปที่ 61 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยกับการใช้พลังงาน	101
รูปที่ 62 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยกับการใช้พลังงานในระบบทั้งหมด ..	102
รูปที่ 63 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมที่เกิดจากคอลัมน์ชนิดต่าง ๆ.....	104
รูปที่ 64 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดที่เกิดจากคอลัมน์ชนิดต่าง ๆ	105
รูปที่ 65 เปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในระบบที่เกิดจากคอลัมน์ชนิดต่าง ๆ	106

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน แม้ว่าอุตสาหกรรมปิโตรเคมีจะสร้างความเจริญก้าวหน้าทั้งทางด้านเศรษฐกิจ สังคม และเทคโนโลยี ในขณะที่เดียวกันอุตสาหกรรมปิโตรเคมีได้ก่อปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมหลาย ด้าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาการปนเปื้อนมลพิษทางอากาศจากปิโตรเคมีจำพวก สารอินทรีย์ระเหย ง่าย (Volatile organic compounds: VOCs) ที่เป็นกลุ่มสารอินทรีย์ที่ระเหยได้ง่ายในอุณหภูมิห้อง และความดันปกติที่สามารถกระจายตัวได้ดีไปในอากาศ โดยสารอินทรีย์ระเหยง่ายเหล่านี้ซึ่งพบได้ใน ชีวิตประจำวันในผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิดและแหล่งกำเนิด เช่น สีทาบ้าน น้ำยาซักแห้ง สารกำจัด ศัตรูพืช โรงงานอุตสาหกรรม สถานีบริการน้ำมัน เป็นต้น ซึ่งเมื่อสารอินทรีย์ระเหยง่ายกระจายตัว ออกจากแหล่งกำเนิดจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยส่งผลกระทบต่อ สุขภาพของสิ่งมีชีวิตในรูปแบบของสารก่อมะเร็ง(องค์กรอนามัยโลก) รวมไปถึงการทำลายชั้นโอโซน ของโลกที่ส่งผลทำให้เกิดสภาวะโลกร้อนอย่างต่อเนื่อง (วรารุช เสือดี, 2555)

โดยทั่วไปแล้ว สารอินทรีย์ระเหยง่ายตามโรงงานอุตสาหกรรมที่รู้ตำแหน่งการปล่อยที่ แน่นอน (Stationary source) นั้นสามารถจัดการได้สองรูปแบบ คือ การออกซิเดชัน (Oxidation) หรือ การแยกเพื่อนำกลับไปใช้ใหม่ (Recovery) ซึ่งการนำกลับไปใช้ใหม่กำลังเป็นรูปแบบที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน (Parmar และ Rao, 2008) เนื่องจากสามารถลดต้นทุนของระบบได้ โดยหนึ่งใน กระบวนการนำกลับไปใช้ใหม่ที่เหมาะสมสำหรับสารอินทรีย์ระเหยง่าย คือ การดูดซึม (Absorption) ที่เป็นการถ่ายเทมวลสารจากวัฏภาคแก๊สไปสู่วัฏภาคของเหลวโดยใช้ความแตกต่างของความเข้มข้น ของทั้งสองวัฏภาคเป็นแรงผลักดัน โดยสามารถดำเนินการได้ในอุปกรณ์หลายรูปแบบ เช่น คอลัมน์ แบบฟองอากาศ คอลัมน์ฟองอากาศแบบเติมตัวกลาง คอลัมน์กวนผสม คอลัมน์แบบโปรย คอลัมน์ แบบบรรจุตัวกลาง และคอลัมน์แบบถาด เป็นต้น (พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล, 2557)

คอลัมน์แบบฟองอากาศเป็นหนึ่งในรูปแบบของอุปกรณ์ที่นิยมใช้มากในการดูดซึมเนื่องจาก ความง่ายในการดำเนินระบบและการดูแลรักษาที่ไม่ซับซ้อน โดยยังมีงานวิจัยหลากหลายงานที่ยังคงพัฒนา ประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลสารในคอลัมน์แบบฟองอากาศอย่างต่อเนื่อง เช่น การเติมสารลดแรง ตึงผิวในวัฏภาคของเหลวเพื่อให้ฟองมีขนาดเล็กเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแก๊สกับของเหลวให้ มากขึ้น (García-Abuín และคณะ, 2012) อย่างไรก็ตามการเติมสารลดแรงตึงผิวนั้นจะส่งผลให้ค่า

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารลดลงเนื่องจากการห่อหุ้มของสารลดแรงตึงผิวที่ผิวฟอง ทำให้อัตราการถ่ายเทมวลสารรวมมีค่าลดลง (Painmanakul และคณะ, 2005 Sardeing, Painmanakul และ Hébrard, 2006) นอกจากนี้ ยังมีหลายงานวิจัยที่ใช้วิธีการเติมตัวกลางของแข็งในคอลัมน์แบบฟองอากาศ โดยผลจากการเติมตัวกลางของแข็งนั้นมีทั้งผลลัพธ์ในเชิงบวกและในเชิงลบต่ออุทกพลศาสตร์ของฟองและการถ่ายเทมวลสาร (Maldonado และคณะ, 2008) โดยจากงานวิจัยของ (Mena และคณะ, 2008) ที่ทำการเติมตัวกลางของแข็งที่สามารถเคลื่อนที่ภายในคอลัมน์ได้พบว่าการใช้ของแข็งที่แตกต่างกันมีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม ($K_L a$) ในขณะที่บางงานวิจัย (Wongwailikhit, 2018) พบผลเชิงบวกต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมเมื่อเติมตัวกลางของแข็ง ซึ่งความแตกต่างนี้อาจเกิดขึ้นจากความแตกต่างระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพของแข็งที่เติมเข้าไปในระบบ เช่น ขนาด ความหนาแน่นและปริมาณตัวกลางที่เติมเข้าไปในระบบ ซึ่ง ณ ปัจจุบันยังไม่มีข้อสรุปที่ชัดเจน ดังนั้น การศึกษาผลกระทบหลังจากเติมของแข็งลงในคอลัมน์ยังคงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้เข้าใจและใช้งานได้ดียิ่งขึ้น โดยงานวิจัยที่ผ่านมา นั้น แม้ว่าจะมีการทดลองกับตัวกลางหลากหลายชนิดและรูปร่างแต่ยังไม่มียานวิจัยที่นำตัวกลางของแข็งในรูปแบบของแพ็คเกจ (Packing) ที่มีพื้นที่ผิวสัมผัส (Surface Area) และสัดส่วนช่องว่าง (Void Fraction) สูงมาทำการทดลองเพื่อดูความเหมาะสมในการใช้เพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลสารในคอลัมน์แบบฟองอากาศ

ไม่เพียงแต่คอลัมน์แบบฟองอากาศเท่านั้น คอลัมน์แบบบรรจุตัวกลางจัดเป็นอุปกรณ์ที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากเช่นกันในการดูดซับ โดยมีการพัฒนารูปแบบของตัวกลางออกมาอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวและประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลสารให้สูงสุด (Bandyopadhyay และ Biswas, 2007 Bouaifi และคณะ, 2001 Roustan, 2003) โดยจากหลายงานวิจัยระบุว่าประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารของคอลัมน์แบบฟองอากาศและคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลางมีความใกล้เคียงกัน ทั้งในด้านพื้นที่ผิวสัมผัสและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร แต่อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมาไม่ได้คำนึงถึงพลังงานที่ใช้การดำเนินระบบเปรียบเทียบกับความสามารถในการถ่ายเทมวลสาร รวมไปถึงความแตกต่างของตัวแปรต่าง ๆ ของแต่ละระบบที่ควบคุมค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารภายในคอลัมน์

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์หลักในการพิจารณาพลังงานที่ใช้และประสิทธิภาพต่อการถ่ายเทมวลสารที่ได้ในการดำเนินระบบ โดยมุ่งเน้นศึกษาและเปรียบเทียบคอลัมน์แบบฟองอากาศ คอลัมน์แบบฟองอากาศชนิดเต็มตัวกลาง และคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลางเนื่องจากคอลัมน์ทั้งสองมีค่าการถ่ายเทมวลสารและพื้นที่ผิวสัมผัสที่ใกล้เคียงกัน แต่มีความแตกต่างด้านพลศาสตร์การไหล ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ควบคุมทั้งสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารและพลังงานที่ใช้ในการดำเนินระบบ โดยในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์ตัวแปรต่าง ๆ ที่ควบคุมแต่ละระบบ รวมถึงข้อดีและข้อเสียของแต่ละอุปกรณ์รวมถึงเสนอแนะสถานะที่เหมาะสมในการดำเนินการของแต่ละอุปกรณ์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร พื้นที่ผิวสัมผัสและตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลสารของคอลัมน์แบบฟองอากาศ คอลัมน์แบบฟองอากาศชนิดเต็มตัวกลาง และคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง

1.2.2 เพื่อให้ได้แนวทางในการเลือกใช้คอลัมน์แบบฟองอากาศ คอลัมน์แบบฟองอากาศชนิดเต็มตัวกลาง และคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลางให้เหมาะสมกับงานและมีประสิทธิภาพรวมถึงการพิจารณาค่าพลังงานที่ใช้ในระบบ

1.2.3 เพื่อให้ได้ตัวแปรที่ดีที่สุดของคอลัมน์แบบฟองอากาศ คอลัมน์แบบฟองอากาศชนิดเต็มตัวกลาง และคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ณ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และใช้อุณหภูมิห้องในงานวิจัย

1.3.2 คอลัมน์ที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบต่อเนื่อง (Continuous process) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตรและความสูง 0.8 เมตร

1.3.3 ในการทดลองเพื่อเปรียบเทียบการถ่ายเทมวลสารและพลังงานในการดำเนินระบบ ตัวถูกดูดซึมวิธภาคแก๊สคือ แก๊สออกซิเจน และตัวดูดซึมวิธภาคของเหลวคือ น้ำประปา โดยจะทำการปรับเปลี่ยนตัวดูดซึมเป็นสารอินทรีย์ระเหยง่ายในขั้นตอนการเปรียบเทียบสภาวะการดำเนินการทดลองที่ดีที่สุด

1.3.4 หัวจ่ายอากาศที่ใช้ทำมาจากวัสดุอะคริลิกใส ขนาด 0.12 เมตร เจาะรูจำนวน 19 รู และมีรูทั้งหมด 3 ขนาด คือ 0.4 0.8 และ 1.2 มิลลิเมตร

1.3.5 อัตราการไหลอากาศที่ใช้ทำการศึกษาอยู่ในช่วง 4 ถึง 24 ลิตรต่อนาที

1.3.6 หัวสเปรย์กระจายน้ำที่ใช้ทำมาจากวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) ขนาด 0.635 0.9525 และ 1.27 เซนติเมตร

1.3.7 อัตราการไหลน้ำที่ใช้ทำการศึกษาอยู่ในช่วง 25 ถึง 100 ลิตรต่อชั่วโมง

1.3.8 ตัวกลางที่ใช้ทำมาจากวัสดุพลาสติกสีขาวขุ่นคือ ชนิดแรสชิกริง (Raschig ring) ขนาด 25 และ 50 มิลลิเมตร ชนิดพอลล์ริง (Pall ring) ขนาด 25 38 และ 50 มิลลิเมตร ชนิดแคสเคดมินิริง (Cascade mini ring) ขนาด 25 38 และ 50 มิลลิเมตร ชนิดอานม้า (Intralox saddle ring) ขนาด 25 38 และ 50 มิลลิเมตร โดยทำการบรรจุตัวกลางสูง 0.6 เมตร

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทำให้ได้เรียนรู้และเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสารและตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซึมของคอลัมน์แบบฟองอากาศ คอลัมน์แบบฟองอากาศชนิดเดิมตัวกลาง และคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง

1.4.2 ทำให้เกิดข้อมูลพื้นฐานที่ได้จากการทดลองที่สามารถนำไปพัฒนาเพื่อไปเลือกประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารอินทรีย์ระเหยง่าย

สารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile organic compounds: VOCs) หมายถึง กลุ่มสารประกอบคาร์บอนที่อยู่ในรูปของของแข็งและของเหลวที่ระเหยได้ง่ายที่ความดันและอุณหภูมิปกติ เนื่องจากมีจุดเดือดที่ต่ำและมีความไวไฟ ซึ่งเมื่อระเหยออกสู่ชั้นบรรยากาศจะคงตัวอยู่ในบรรยากาศได้เป็นเวลานานและสะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อม จึงทำให้เกิดความเป็นอันตรายต่อสัตว์และมนุษย์ ความรุนแรงของผลกระทบที่เกิดขึ้นนั้นจะขึ้นกับชนิดของสาร ความเข้มข้น และระยะเวลาที่ทำการสัมผัสสารนั้น โดยสารอินทรีย์ระเหยง่ายมีทั้งแบบแหล่งกำเนิดที่ทราบตำแหน่งแน่นอนอยู่กับที่ (Point Source หรือ Stationary) แหล่งกำเนิดเคลื่อนที่ (Mobile Source) และแหล่งกำเนิดแบบพื้นที่ (Area Source) ซึ่งแหล่งกำเนิดเหล่านี้ล้วนเกิดมาจากกิจกรรมบ้านเรือน การใช้ชีวิตของมนุษย์ และอุตสาหกรรมโดยมีแหล่งกำเนิดขนาดใหญ่ เช่น โรงกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม โรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมี และแหล่งกำเนิดขนาดเล็กเช่น ร้านซักแห้ง เป็นต้น

เบนซีน(Benzene) สูตรทางเคมี C_6H_6 เป็นสารของเหลว ไม่มีสีและมีกลิ่นเฉพาะตัว สามารถละลายน้ำได้ดีที่ 1.718 กรัมต่อลิตรที่ 25 °C และไอเหยได้กลิ่นที่ความเข้มข้น 1.5 ppm จัดเป็นสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากอุตสาหกรรมปิโตรเลียมในกลุ่มอะโรเมติกไฮโดรคาร์บอน สามารถผลิตเบนซีนได้จากกระบวนการเผาถ่านหินในอุตสาหกรรมต่าง ๆ การแยกเบนซีนจากกระบวนการกลั่นปิโตรเลียม จากการสังเคราะห์เบนซีนจากจากสารตั้งต้นต่าง ๆ (ศุภวรรณ ตันตยานนท์, 2532) เบนซีนมีความเป็นพิษเฉียบพลันและความเป็นพิษเรื้อรัง โดยมาตรฐาน EPA ระบุความเป็นพิษทำให้เกิดมะเร็งในทุกส่วนของร่างกายโดยเฉพาะมะเร็งเม็ดเลือดขาว และได้แบ่งความเป็นพิษได้ 3 ระดับคือ ระดับที่ 1 หากสูดดมที่ความเข้มข้นไม่เกิน 0.1 ppm ตลอดช่วงชีวิต จะมีโอกาสเป็นมะเร็ง 1 ใน 1 ล้านคน ระดับที่ 2 หากสูดดมที่ความเข้มข้นไม่เกิน 1 ppm ตลอดช่วงชีวิต จะมีโอกาสเป็นมะเร็ง 1 ใน 1 แสนคน ระดับที่ 3 หากสูดดมที่ความเข้มข้นไม่เกิน 10 ppm ตลอดช่วงชีวิต จะมีโอกาสเป็นมะเร็ง 1 ใน 1 หมื่นคน เบนซีนถูกนำมาใช้ในประโยชน์สำหรับเป็นตัวทำละลายในการผลิตทางอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมผลิตตัวทำละลาย อุตสาหกรรมยาง อุตสาหกรรมผลิตเม็ดพลาสติก อุตสาหกรรมผลิตผงซักฟอกและผลิตภัณฑ์ซักล้าง อุตสาหกรรมเส้นใยสังเคราะห์ เป็นต้น สิ่งของเครื่องใช้ในชีวิตประจำวันส่วนมากมักจะมีเบนซีนเป็นสารตั้งต้นนั้นก็

คือ กล่องบรรจุผลิตภัณฑ์ อิเล็กทรอนิกส์ ของเล่น เฟอร์นิเจอร์ กาว ชิ้นส่วนรถยนต์ กระเป๋า ท่อ ยางรถยนต์ ไนล่อน และสายยาง เป็นต้น (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2552) ดังนั้นเบนซินมีความเป็นพิษต่อร่างกายและสิ่งแวดล้อม แต่ยังคงนำมาใช้มากในการผลิตผลิตภัณฑ์เครื่องใช้มากมาย จึงทำให้เกิดความสนใจนำสารอินทรีย์ระเหยง่ายเบนซินมาบำบัดเพื่อเป็นการลดปัญหาที่จะเกิดขึ้นกับมนุษย์และสิ่งแวดล้อม

2.1.1 วิธีการจัดการสารอินทรีย์ระเหยง่าย

วิธีการจัดการโดยทั่วไปจะทำการจัดการหรือควบคุมที่แหล่งกำเนิดที่ทราบตำแหน่งแน่นอนอยู่กับที่ ความแตกต่างระหว่างเทคโนโลยีที่ใช้ในการจัดการที่แหล่งกำเนิดสารอินทรีย์มี 2 ประเด็นคือระบบการกำจัดหรือทำลาย (Destroy) และการนำกลับมาใช้ (Recovery) การนำไปใช้นั้นจะขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายในกระแสแก๊สและประสิทธิภาพที่ต้องการ โดยสามารถแบ่งประเภทของการจัดการสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้ 4 ประเภทใหญ่ ๆ คือ การดูดซับ การดูดซึม การเผาทำลาย และการกรองชีวภาพ เป็นต้น โดยแสดงดังตารางที่ 1 ที่แสดงถึงเทคโนโลยีที่ใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย ที่จะบ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการบำบัด ความเข้มข้นที่ใช้และข้อได้เปรียบเสียเปรียบ (วรารุช เสือดี, 2555)

1.) การดูดซึม (Absorption)

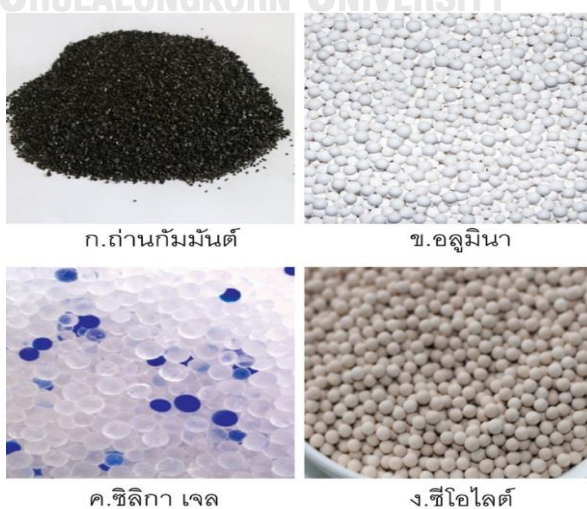
การดูดซึมเป็นการทำให้แก๊สเปลี่ยนรูปไปอยู่ในของเหลวจะเกิดขึ้น เมื่อปริมาณความเข้มข้นของเหลวน้อยกว่าปริมาณที่จะทำให้เกิดความสมดุลความเข้มข้นของแก๊ส ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นจริงและความเข้มข้นสมดุล จึงทำให้เกิดแรงขับเคลื่อนของการดูดซึม อัตราการดูดซึมจะขึ้นอยู่กับสถานะของการดูดซึม เช่น อัตราการไหลของแก๊ส อัตราการไหลของเหลว และอุณหภูมิ กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิต่ำ จะทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น สัดส่วนแก๊สและของเหลวสูงขึ้น ความเข้มข้นของแก๊สมากขึ้นก็จะส่งผลให้การดูดซึมดีขึ้น และยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น การแพร่กระจาย สถานะของตัวดูดซึม ความหนาแน่น ความเร็ว เป็นต้น การดูดซึมจะเกิดขึ้นทั้งแบบทางกายภาพและทางเคมี การดูดซึมแบบทางกายภาพจะเกิดขึ้นเมื่อแก๊สถูกดูดซึมละลายเข้าสู่ตัวทำละลายและการดูดซึมแบบเคมีจะเกิดขึ้นหากเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างแก๊สที่ถูกดูดซึมกับตัวทำละลาย ประสิทธิภาพการบำบัดจะมีประสิทธิภาพสูงได้เนื่องจากแก๊สที่ปนเปื้อนที่จะนำมาดูดซึมจะต้องละลายน้ำได้ดี เพราะถ้าละลายน้ำได้ไม่ดีจะต้องมีการเติมสารเคมีเพิ่มไปในระบบเพื่อให้สารเคมีช่วยให้แก๊สปนเปื้อนละลายได้ดีมากขึ้น การเลือกคุณสมบัติของเหลวในการดูดซึม

ควรพิจารณาถึงประสิทธิภาพที่ต้องการและราคาของสารเคมีที่จะต้องใช้เติมในระบบ ซึ่งโดยทั่วไปมักใช้เป็นน้ำ เนื่องจากน้ำสามารถหาได้ง่ายราคาถูกและแก๊สที่ปนเปื้อนสามารถละลายน้ำได้

2.) การดูดซับ (Adsorption)

ระบบการดูดซับเป็นระบบที่นำไปใช้กันแพร่หลายมากที่สุดและเป็นระบบที่นำมากำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายนั้นมีทั้งแบบที่สามารถนำมาฟื้นฟูสภาพได้ (Regenerable) และแบบที่ไม่สามารถนำมาฟื้นฟูสภาพได้ (Non regenerable) โดยกระบวนการดูดซับนั้น สารอินทรีย์ระเหยง่ายถูกจับอยู่บนผิวของตัวกลางของแข็งที่มีความพรุนนั่นก็คือ ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ซึ่งจะเป็นสารดูดซับ (Adsorbent) และอนุภาคของแก๊สจะถูกดูดซับโดยการถูกดูดติดกับผิวตัวกลาง ซึ่งโมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับจะเรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate)

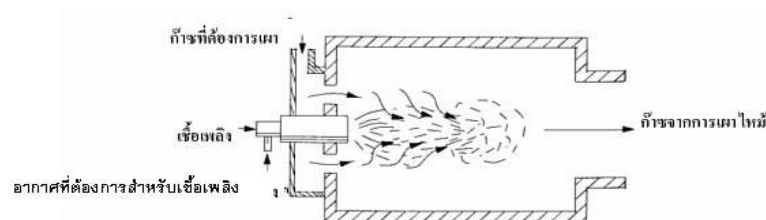
กระบวนการดูดซับจะมี 2 กระบวนการ คือ กระบวนการทางกายภาพและกระบวนการทางเคมี อย่างไรก็ตาม เมื่อกระบวนการดูดซับทำหน้าที่ในการดูดซับแก๊สเข้าไปอยู่ในตัวกลางของแข็งจนอิ่มตัวไปด้วยแก๊ส จะต้องทำการไล่แก๊สที่ถูกดูดซับออกจากตัวกลางเรียกว่า กระบวนการฟื้นฟูสภาพ (Regenerate) ซึ่งทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ตัวดูดซับ จนทำให้โมเลกุลของตัวถูกดูดซับหลุดออกจากผิวของตัวดูดซับ จากนั้นลดอุณหภูมิลงจนเกิดการกลั่นตัวเป็นของเหลวที่สามารถนำไปใช้ได้ใหม่หรือกำจัดโดยวิธีที่เหมาะสม ประสิทธิภาพการดูดซับจะขึ้นอยู่กับขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ อุณหภูมิ ความดัน ค่าพีเอช เป็นต้น โดยสารดูดซับส่วนใหญ่ที่ถูกใช้ในอุตสาหกรรมคือ ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) อลูมินา (Activated alumina) ซิลิกาเจล (Silica gel) ซีโอไลต์ (Zeolites) ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 สารดูดซับที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม

3.) การเผาทำลาย (Incineration)

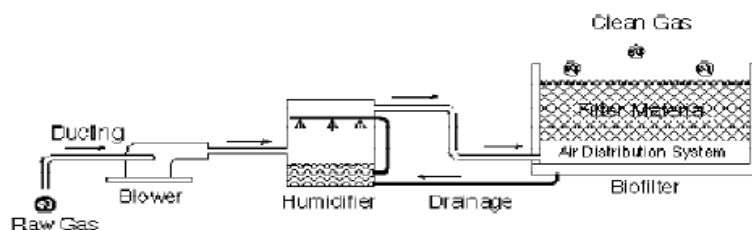
เตาเผาคือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมคุณภาพอากาศอย่างหนึ่งที่มีหลักการทำงานคือ การให้ความร้อนแก่อากาศที่มีสารอินทรีย์ระเหยง่ายอยู่ จนทำให้อุณหภูมิของแก๊สสูงขึ้นจนเพียงพอที่ทำให้สารอินทรีย์ระเหยง่ายทำปฏิกิริยากับออกซิเจน สุดท้ายแล้วกลายเป็น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ไอน้ำ (H_2O) และพลังงานซึ่งอยู่ในรูปของพลังงานความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2 ประสิทธิภาพในการเผาจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้และระยะเวลาที่ใช้ในการเผา เตาเผาแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ เตาเผาแบบใช้ความร้อนโดยตรงและเตาเผาแบบที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 2 การเผาไหม้ในเตาเผา

4.) การกรองชีวภาพ (Biofiltration)

ระบบการกรองแบบชีวภาพเป็นการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายออกจากอากาศ โดยที่อากาศนั้นมียอดประกอบของแก๊สที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยจุลชีพ (Microorganism) โดยที่จะควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ ทำให้จุลชีพสามารถอาศัยอยู่ในชั้นกรองชีวภาพและสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์จนกลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ซึ่งระบบนี้จะสามารถควบคุมกลิ่นของสารอินทรีย์ระเหยง่าย อย่างไรก็ตาม ในระบบนี้จะใช้ได้กับความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายไม่เกิน 1000 พีพีเอ็ม ประสิทธิภาพโดยทั่วไปจะมากกว่าร้อยละ 90 และยังมีค่าใช้จ่ายในการเดินระบบที่ไม่แพง จึงทำให้เป็นข้อได้เปรียบกว่าระบบอื่น ๆ ในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย ในกรณีที่ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ไม่สูงมาก ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ระบบกรองชีวภาพ

ตารางที่ 1 เทคโนโลยีที่ใช้บำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย

วิธีการควบคุม	ประสิทธิภาพ	ความเข้มข้น พีพีเอ็ม	ข้อได้เปรียบ	ข้อเสียเปรียบ
การดูดซึม	90%	250	-บำบัดก๊าซอินทรีย์ที่มีสถานะเป็นกรดได้ดี	-มีข้อจำกัดในการใช้งาน
	95%	1,000		
	98%	5,000		
การดูดซับ	50%	250	-สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ดี	-ประสิทธิภาพขึ้นกับความชื้นและอุณหภูมิ
	90-95%	1,000		
	98%	5,000		
การเผา	95%	20	-ทำลายโครงสร้างได้สูง	-สารอินทรีย์ไม่สามารถนำกลับมาได้
โดยใช้ความร้อนโดยตรง	99%	100	-สามารถนำพลังงานความร้อนกลับมาใช้ใหม่ได้อีก	-ราคาในการบำบัดสูง
การเผา	90%	50	-ทำลายโครงสร้างทางเคมีได้สูง	-สารอินทรีย์ไม่สามารถนำกลับมาได้
โดยใช้ตัวเร่ง				
การกรองชีวภาพ	>90%	1000	-ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบไม่สูงมาก	-บำบัดได้ด้วยความเข้มข้นไม่สูงมาก
การควบแน่น	50%	500	-ดีสำหรับสารที่ต้องการนำกลับมาใช้ใหม่	-มีข้อจำกัดในการใช้งาน
	95%	10,000		
หอเผาทิ้ง (Flares)	>95%	100	-ราคาไม่สูงมาก	-มีข้อจำกัดในการใช้งาน
	>98%		-ทำลายโครงสร้างทางเคมีได้สูง	-สารอินทรีย์ไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้ -ฝุ่นละอองสูง

ที่มา : Seader และHenley, 2006

2.2 กระบวนการดูดซึม

กระบวนการดูดซึม (Absorption process) คือ การถ่ายเทมวลสารจากวัฏภาคแก๊สไปสู่วัฏภาคของเหลว เนื่องจากทั้ง 2 วัฏภาคนั้นมีความเข้มข้นที่ต่างกัน (Concentration gradient) ที่ผิวของเหลวและแก๊สเป็นแรงดัน (Driving force) กล่าวได้ว่า ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นจริงกับความเข้มข้นสมดุลทำให้เกิดแรงขับเคลื่อนจึงทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสาร นอกจากนี้ พื้นที่ผิวสัมผัสมาก การปั่นป่วน และสัมประสิทธิ์การแพร่มวลสูงก็มีผลในการช่วยให้การถ่ายเทมวลเกิดขึ้นได้เร็วขึ้น ซึ่งหลักการเหล่านี้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ เช่น การบำบัดมลพิษอากาศ การเติมอากาศ เป็นต้น

2.2.1 ความรู้ทั่วไปที่เกี่ยวข้อง

1.) กฎของเฮนรี (Henry's law)

โดยทั่วไปกฎของเฮนรีจะสามารถบอกการละลายของแก๊สที่ละลายอยู่ในวัฏภาคของเหลวว่าแก๊สนั้นจะสามารถละลายน้ำได้น้อยหรือมาก การละลายของแก๊สจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความดัน และลักษณะจำเพาะของการละลาย ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นในวัฏภาคแก๊สและวัฏภาคของเหลว ดังแสดงในสมการที่ 2-1 กฎของเฮนรีมีหลายรูปแบบแต่ทุกรูปแบบมีค่าคงที่เฮนรีที่แตกต่างกันเนื่องจากเป็นหน่วยที่แตกต่างกัน แสดงในตารางที่ 2

$$P = K_H C \quad \text{มหาวิทยาลัย} \quad (2-1)$$

CHULALONGKORN UNIVERSITY

เมื่อ P = ค่าความดันบรรยากาศย่อยของระบบ (บรรยากาศ)

K_H = ค่าคงที่เฮนรี (โมลต่อลิตรต่อความดันบรรยากาศ)

C = ความเข้มข้นของแก๊สที่ละลายน้ำ (โมลต่อลิตร)

ตารางที่ 2 กฎเฮนรีของแก๊สต่าง ๆ ในน้ำที่อุณหภูมิ 25°C

สมการ:	$K_H=P/C$	$K_H=C/P$	$K_H=P/x$	$K_H=C_{aq}/C_{แก๊ส}$
หน่วย:	$[L_{soln} \cdot atm / mol_{gas}]$	$[mol_{gas} / L_{soln} \cdot atm]$	$[atm \cdot mol_{soln} / mol_{gas}]$	(มิติ)
O ₂	770	1.3×10^{-3}	4.3×10^4	3.2×10^{-2}
H ₂	1300	7.8×10^{-4}	7.1×10^4	1.9×10^{-2}
CO ₂	29	3.4×10^{-2}	1.6×10^3	8.3×10^{-1}
N ₂	1600	6.1×10^{-4}	9.1×10^4	1.5×10^{-2}
He	2700	3.7×10^{-4}	1.5×10^5	9.1×10^{-3}
Ne	2200	4.5×10^{-4}	1.2×10^5	1.1×10^{-2}
Ar	710	1.4×10^{-3}	4.0×10^4	3.4×10^{-2}
CO	1100	9.5×10^{-4}	5.8×10^4	2.3×10^{-2}

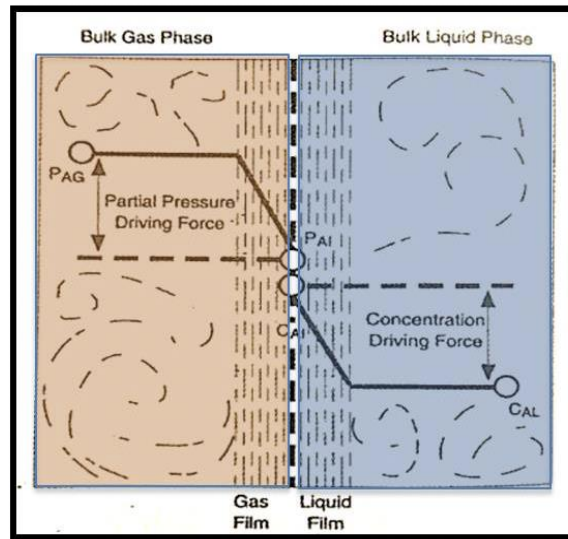
* L_{soln} คือลิตรของสารละลาย, C_{aq} คือโมลของแก๊สต่อลิตรสารละลาย, x คือโมลของแก๊สในสารละลาย
ที่มา : Sander, 2015

2.) ทฤษฎีสองความต้านทาน (Two-film theory)

ทฤษฎีสองความต้านทาน (Two-film theory) คือ พื้นฐานของการถ่ายเทมวลสารในกระบวนการดูดซึม ที่ Whitman ได้เสนอไว้ในปี 1923 ซึ่งได้อธิบายการถ่ายเทมวลของสารจากวัฏภาคหนึ่งไปสู่อีกขอบเขตวัฏภาคหรือบริเวณผิวสัมผัสจากนั้นการโอนถ่ายจะเข้าสู่วัฏภาคที่สองต่อไป ซึ่งลักษณะการถ่ายเทมวลโดยแรงขับทำให้เกิดมีการเคลื่อนย้ายผ่านฟิล์มบาง ๆ จนกระทั่งความเข้มข้นของทั้งสองวัฏภาคเข้าสู่สมดุล สามารถอธิบายได้ 3 ขั้นตอน ดังนี้

- (1) การถ่ายเทมวลสารจากวัฏภาคหนึ่งไปยังบริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาค
- (2) การถ่ายเทมวลสารข้ามผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาค
- (3) การถ่ายเทมวลสารจากบริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคไปสู่วัฏภาคที่สอง

โดยสมมติว่า ไม่มีความต้านทานการแพร่ระหว่างผิวสัมผัสและอัตราการถ่ายเทมวลจะถูกควบคุมในการแพร่ผ่านในแต่ละวัฏภาค



รูปที่ 4 ทฤษฎีสองความต้านทาน

ที่มา : นพภาพร พานิช, 2550

นพภาพร พานิช, 2550 จากรูปที่ 4 ทฤษฎีฟิล์มสองความต้านทานได้มีการสมมติไว้ว่า แก๊สและของเหลวสามารถแยกออกจากกันและมีการผสมกันอย่างสมบูรณ์ โดยมีความสมดุลของการถ่ายเทมวลสารทั้งทางเข้าและทางออก จากรูปจะเห็นได้ว่า ในระบบจะมีการถ่ายเทมวลสารของสาร A ที่เคลื่อนผ่านทะลุฟิล์มสองชั้นที่กั้นระหว่างแก๊สและของเหลว ซึ่งเริ่มต้นจากความเข้มข้นของสาร A ในวัฏภาคแก๊ส (P_{AG}) จะเปลี่ยนไปเป็นความเข้มข้นของสาร A ในวัฏภาคแก๊สที่บริเวณใกล้ผิวสัมผัส (P_{AI}) จากนั้นความเข้มข้นของสาร A ในวัฏภาคของเหลวที่บริเวณผิวสัมผัส (C_{AI}) จะเปลี่ยนไปเป็นความเข้มข้นของสาร A ในวัฏภาคของเหลว (C_{AL})

อัตราการถ่ายเทมวลสารในหน่วยความเข้มข้นต่อเวลา คือ ผลคูณระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมกับความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสาร A ในวัฏภาคและความเข้มข้นของสาร A ในชั้นฟิล์ม ของทั้งวัฏภาคแก๊สและวัฏภาคของเหลว การถ่ายเทมวลสารในชั้นฟิล์มแก๊สดังสมการที่ 2-2 และการถ่ายเทมวลสารในชั้นฟิล์มของเหลวดังสมการที่ 2-3

$$R_A = k_{Ag}a (P_{AG} - P_{AI}) \quad (2-2)$$

$$R_A = k_{Al}a (C_{AI} - C_{AL}) \quad (2-3)$$

เมื่อ R_A = อัตราการถ่ายเทมวลสารของสาร A (โมลต่อลูกบาศก์เมตร-วินาที)
 k_{Ag} = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยของสาร A ในชั้นฟิล์มแก๊ส (โมลต่อตารางเมตร-ปาสคาล-วินาที)

k_{Al} = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยของสาร A
ในชั้นฟิล์มของเหลว (เมตรต่อวินาที)

a = พื้นที่ผิวจำเพาะ (เมตร⁻¹)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร k_{Ag} และ k_{Al} แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการถ่ายเทมวลสารของสาร A ผ่านชั้นฟิล์มของแก๊สและชั้นฟิล์มของเหลว สมการที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับการควบคุมวิภาคที่ใช้งาน เนื่องจากในความเป็นจริงไม่สามารถตรวจวัดความเข้มข้นของสาร A ที่ระหว่างวิภาคทั้งสองได้ (P_{Al} และ C_{Al}) จึงทำได้แค่อธิบายถึงการถ่ายเทมวลสารที่สารเข้าสู่สภาวะสมดุลและมีการรวมค่าความต้านทานของแต่ละฟิล์ม ดังสมการที่จะแสดงต่อไปนี้

$$R_A = K_{AG} a (P_{AG} - P_{A^*}) \quad (2-4)$$

$$R_A = K_{AL} a (C_{A^*} - C_{AL}) \quad (2-5)$$

เมื่อ P_{A^*} = ความดันย่อยที่จุดสมดุลของสาร A ในวิภาคแก๊ส (ปาสคาล)

C_{A^*} = ความเข้มข้นระหว่างจุดสมดุลของสาร A ในวิภาคของเหลว
(โมลต่อลูกบาศก์เมตร)

K_{AG} = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมของสาร A
ในวิภาคแก๊ส (โมลต่อตารางเมตร-ปาสคาล-วินาที)

K_{AL} = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมของสาร A
ในวิภาคของเหลว (เมตรต่อวินาที)

เมื่อองค์ประกอบของสารเข้าสู่สภาวะสมดุล ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในวิภาคแก๊สและวิภาคของเหลว (K_{AG} และ K_{AL}) มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย (k_{Ag} และ k_{Al}) ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{1}{K_{AG}} = \frac{1}{k_{Ag}} + \frac{H_A}{k_{Al}} \quad (2-6)$$

$$\frac{1}{K_{AL}} = \frac{1}{k_{Ag}} + \frac{1}{H_A k_{Ag}} \quad (2-7)$$

จากสมการที่ 2-6 เมื่อค่าของเฮนรีสาร A สามารถละลายน้ำได้ดีในของเหลว เนื่องจากมีค่าของ H_A ที่น้อยมาก ดังนั้น $K_{AG} \approx K_{Ag}$ และการถ่ายเทมวลสารที่เกิดขึ้นจะถูกควบคุมโดยกระบวนการที่เกิดขึ้นในชั้นฟิล์มแก๊ส และในทางตรงกันข้ามกันจากสมการที่ 2-7 ถ้า H_A มีค่าของเฮนรีมากแสดงว่าสาร A สามารถละลายน้ำได้น้อยในของเหลว ดังนั้น $K_{AL} \approx K_{Al}$ และการถ่ายเทมวลสารถูกควบคุมด้วย

กระบวนการที่เกิดขึ้นในของเหลว ได้สมการใหม่เป็น 2-8 จากการรวมสมการที่ 2-6 และ สมการที่ 2-7 อัตราการดูดซึมจะขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในวัฏภาคของเหลว พื้นที่ผิวจำเพาะ และความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลในวัฏภาคของเหลว($C_{A^*} - C_{AL}$)

$$R_A = K_{AL} a (C_{A^*} - C_{AL}) \quad (2-8)$$

3.) อุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamics)

เป็นการศึกษาของไหลขณะที่มีการเคลื่อนที่ในของไหลจะมีความดันในทิศทางขนานกับผิวสัมผัส ซึ่งในทางอุทกพลศาสตร์จะเกี่ยวข้องกับอัตราการไหลของแก๊สและอัตราการไหลของเหลว ความเร็วของแก๊ส ความเร็วของเหลวและความดัน ที่จะส่งผลต่อการถ่ายเทมวลสาร โดยที่ตัวแปรทางด้านอุทกพลศาสตร์ที่ทำการศึกษาก็จะมีความแตกต่างกันไปตามชนิดของอุปกรณ์ เช่น คอลัมน์แบบฟองอากาศจะทำการศึกษา ขนาดของฟองอากาศ ความเร็วฟอง สัดส่วนของแก๊ส พื้นที่ผิวจำเพาะ เป็นต้น และคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลางจะทำการศึกษา สัดส่วนของเหลว พื้นที่ผิวจำเพาะ พื้นที่ทั้งหมดของส่วนต่อประสานแก๊สกับของเหลวในการบรรจุ เป็นต้น

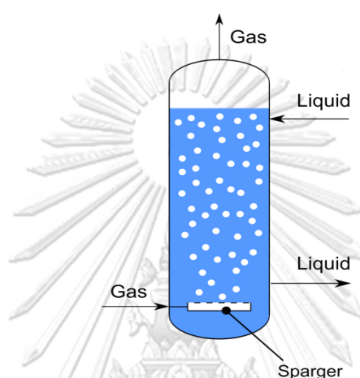
2.2.2 อุปกรณ์การดูดซึม

อุปกรณ์การดูดซึม (Absorption equipment) เป็นการใช้งานของอุปกรณ์แต่ละประเภทที่มีวัตถุประสงค์ เพื่อสร้างผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคของแก๊สและวัฏภาคของเหลวให้ได้มากที่สุด ส่งผลให้เกิดอัตราเร็วในการถ่ายเทมวลสารและประสิทธิภาพของระบบ ในทางปฏิบัติจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ อุปกรณ์ที่วัฏภาคแก๊สเคลื่อนที่ในรูปของฟองอากาศในของเหลว (Equipment with gas dispersed in liquid phase) คือ คอลัมน์แบบฟองอากาศ (Bubble column) และอุปกรณ์ที่วัฏภาคของเหลวเคลื่อนที่ในรูปของฟิล์มหรือหยดของเหลวในวัฏภาคแก๊ส (Equipment with liquid dispersed in gas phase) คือ คอลัมน์แบบแผ่นเพลตหรือถาด (Tray column) คอลัมน์แบบโปรย (Spray column) คอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง (Packed column) สามารถกล่าวถึงอุปกรณ์การดูดซึมได้ดังต่อไปนี้ (Pisut painmanakul, 2014)

1.) คอลัมน์แบบฟองอากาศ (Bubble column)

คอลัมน์แบบฟองอากาศ เป็นถึงปฏิกิริยาระหว่างวัฏภาคแก๊สและวัฏภาคของเหลว โดยแก๊สจะถูกทำให้เป็นฟองเล็ก ๆ ซึ่งขนาดของฟองแก๊สจะขึ้นอยู่กับขนาดของรูหัวจ่ายแก๊ส อัตราการไหล

ของแก๊สและอื่น ๆ ที่ทำให้เกิดการกระจายตัวของแก๊สในวัฏภาคของเหลว ยิ่งขนาดของฟองแก๊สเล็กมาก ๆ จะทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทมวลสารดีมากขึ้น จากรูปที่ 5 เป็นการไหลแบบสวนทางกัน (Counter current flow) โดยจะมีหัวจ่ายแก๊สจ่ายแก๊สจากด้านล่างและแก๊สจะออกทางด้านบน ส่วนของเหลวจะไหลจากด้านบนและออกทางด้านล่าง การถ่ายเทมวลสารจะเกิดขึ้น เมื่อฟองแก๊สเคลื่อนที่ผ่านของเหลวและการเคลื่อนที่จะช่วยลดแรงต้านทานในวัฏภาคของเหลว คอลัมน์แบบฟองอากาศจึงเหมาะกับระบบที่วัฏภาคของเหลวเป็นตัวควบคุมการถ่ายเทมวลสาร จึงถูกนำมาใช้อย่างมากในถังเติมอากาศ (Aeration tank) ในระบบบำบัดน้ำเสีย



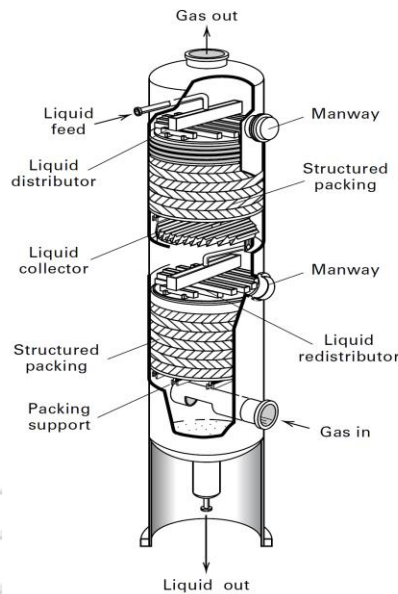
รูปที่ 5 คอลัมน์แบบฟองอากาศ
ที่มา : Shimizu และคณะ, 2000

2.) คอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง (Packed column)

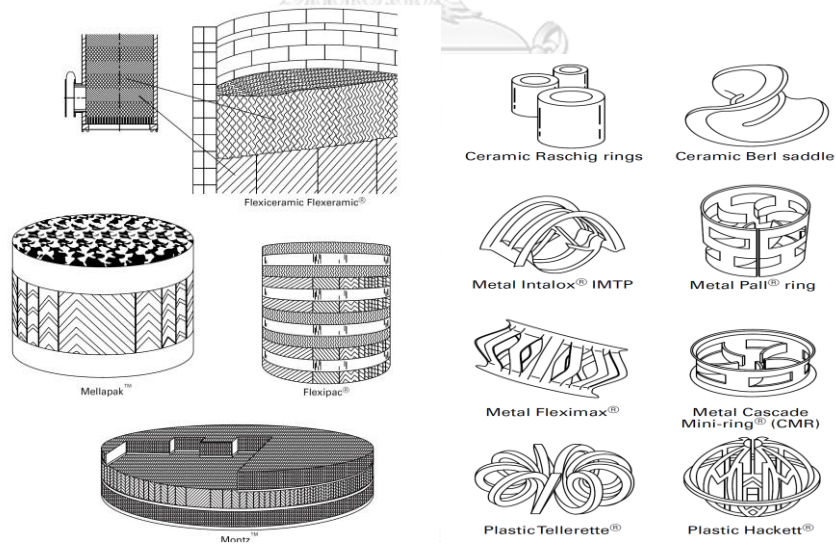
คอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง ดังแสดงในรูปที่ 6 จะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกภายในจะบรรจุไปด้วยวัสดุตัวกลาง (Packing materials) หรือเบด (Bed) ส่วนมากมักจะเป็นพลาสติก เซรามิกส์ หรือโลหะรูปแบบต่าง ๆ การเลือกใช้จะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับงานนั้น ๆ เช่น อุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง เป็นต้น วัสดุตัวกลางสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่คือ แบบโครงสร้าง (Structured packing) และแบบสุ่ม (Random packing) ดังแสดงในรูปที่ 7 และลักษณะทั่วไปของตัวกลางแบบสุ่มดังแสดงในตารางที่ 3

หลักการทำงานของคอลัมน์คือ ทิศทางการไหลจะสวนทางกันโดยที่ของเหลวจะไหลจากด้านบน โดยการฉีดผ่านหัวฉีดหรือตัวกระจายน้ำเหนือชั้นวัสดุและไหลลงมาปกคลุมพื้นที่ผิวตัวกลาง เกิดเป็นฟิล์มบาง ๆ ของของเหลวเคลือบวัสดุตัวกลางไว้เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส และแก๊สจะไหลผ่านจากทางด้านล่างของถังขึ้นสู่ด้านบน ทำให้แก๊สเกิดการกระบวนถ่ายเทมวลสารที่ส่วนต่อประสานของ

ฟิล์มของเหลว ประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับ การกระจายตัวของของแก๊สและของเหลว คอลัมน์ประเภทนี้ ไม่เหมาะกับการไหลของของเหลวที่ต่ำมากเนื่องจากจะเป็นการลดพื้นที่ผิวสัมผัส



รูปที่ 6 คอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง
ที่มา : Perry และDW, 2007



รูปที่ 7 วัสดุตัวกลางที่บรรจุ

รูปซ้าย : แบบโครงสร้าง (Structured packing) รูปขวา : แบบสุ่ม (Random packing)

ที่มา : Perry และDW, 2007

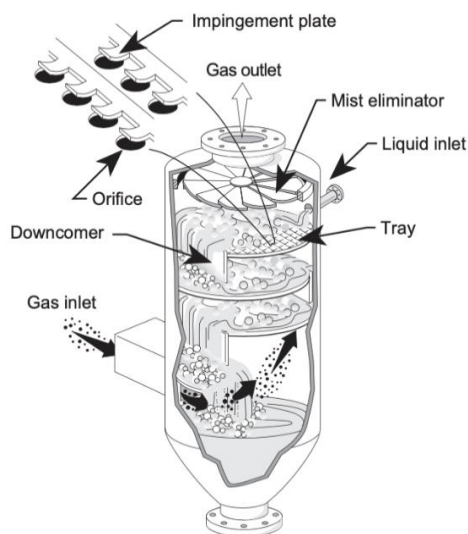
ตารางที่ 3 ชนิดและลักษณะทั่วไปของตัวกลาง

ชนิดตัวกลาง	ลักษณะ
Raschig ring	มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก ทำจากพลาสติก เหล็ก เซรามิกและคาร์บอน มีประสิทธิภาพต่ำกว่าแบบอื่น ๆ ราคาถูก
Berl saddle	มีลักษณะที่ดีกว่า Raschig ring เนื่องจากมีการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วย ความดันลดสูง
Intalox saddle	มีประสิทธิภาพสูงดราคาราคาแพง ให้ลักษณะของเบดที่สม่ำเสมอจึงมีพื้นที่ปิดกั้นการไหลของเหลวและแก๊สน้อย
Pall ring	มีลักษณะคล้าย Raschig ring แต่ผนังด้านข้างเปิด ให้อัตราการถ่ายเทมวลที่สูงกว่า ราคาแพง
Tellerette	มีความดันลดต่ำมาก มักใช้ในการบำบัดมลพิษทางอากาศ

ที่มา : Strigle Jr, 1994

3.) คอลัมน์แบบแผ่นหรือถาด (Tray column)

คอลัมน์แบบแผ่นหรือถาด ดังแสดงในรูปที่ 8 จะประกอบไปด้วยคอลัมน์ทรงกระบอกที่ด้านบนจะมีแผ่นหรือถาดเป็นชั้น ๆ ที่ขนาดถาดออกแบบมาเพื่อรองรับอัตราการไหลของแก๊สและอัตราการไหลของของเหลว โดยที่ของเหลวจะถูกป้อนเข้าสู่ด้านบนของถาดและไหลไปตามถาดในแต่ละชั้นจนลงสู่ด้านล่าง ส่วนแก๊สจะถูกป้อนเข้าสู่ด้านล่างไหลไปตามช่องว่างหรือรูของแต่ละถาดก่อนไหลผ่านไปยังส่วนบนของถาดทำให้เกิดการสัมผัสระหว่างวัฏภาคของเหลวและเกิดการถ่ายเทมวลสาร คอลัมน์ประเภทนี้มักถูกใช้สำหรับการกลั่นแบบดูดซับแก๊ส-ของเหลวและการสกัดของเหลว-ของเหลว



รูปที่ 8 คอลัมน์แบบแผ่นหรือถาด

ที่มา : Richards, 2000

4.) คอลัมน์แบบโปรย (Spray column)

คอลัมน์แบบโปรยที่แสดงในรูปที่ 9 จะประกอบไปด้วยตัวถังหรือคอลัมน์ขนาดใหญ่และมีหัวฉีด (Nozzle) ที่จะทำหน้าที่สร้างละอองของเหลวขนาดเล็ก ๆ จำนวนมาก แต่ถ้าขนาดเล็กเกินไปก็ จะทำให้ละอองของเหลวหลุดไปกับกระแสอากาศได้ โดยที่แก๊สจะไหลผ่านเข้าสู่ด้านล่างของตัวถังซึ่ง จะสวนทางกับของเหลวที่จะถูกพ่นจากด้านบนลงสู่ด้านล่าง ละอองเล็ก ๆ ที่เกิดขึ้นจะมีพื้นที่ผิวสัมผัส ระหว่างวัฏภาคทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสาร อัตราการเทมวลจะขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ทั้งสองวัฏภาค ได้สัมผัสกันและระยะทางของละอองน้ำที่ตกลงสู่ด้านล่าง คอลัมน์แบบโปรยจะเหมาะ เมื่อแก๊สละลาย ในของเหลวได้ดีหรือความต้านทานต่อการถ่ายเทมวลอยู่ในวัฏภาคแก๊ส

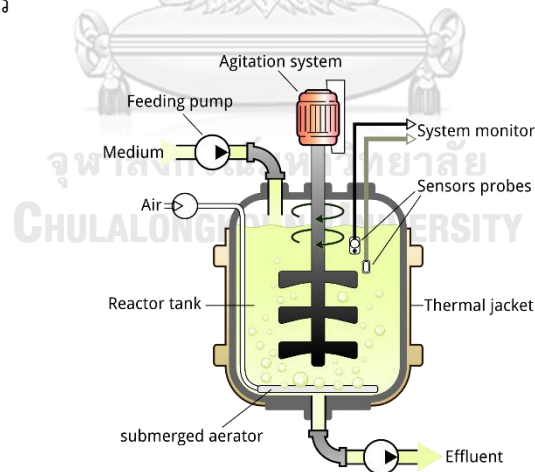


รูปที่ 9 คอลัมน์แบบโปรย

ที่มา : Richards, 2000

5.) คอลัมน์แบบกวนผสม (Stirred tank)

คอลัมน์แบบกวนผสม ในรูปที่ 10 เป็นถังที่มีการติดตั้งมอเตอร์ใบพัดไว้ด้านบน ใบพัดในถังจะช่วยให้การกวนผสมให้ฟองอากาศได้สัมผัสกับวัฏภาคของเหลว เนื่องจากส่วนด้านล่างของถังมีการติดตั้งเครื่องเติมอากาศที่ช่วยในการสร้างฟอง ดังนั้นในถังจึงเกิดความปั่นป่วน (Turbulent) ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสาร



รูปที่ 10 คอลัมน์แบบกวนผสมต่อเนื่อง

ที่มา : Nić และคณะ, 2009

2.3 การเลือกอุปกรณ์ที่เหมาะสมในกระบวนการดูดซึม

(Comparison of parameters for various gas-liquid contactors)

เมื่อพิจารณาถึงการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการถ่ายเทมวลสารในคอลัมน์รูปแบบต่าง ๆ จะแสดงคุณสมบัติสรุปได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบคอลัมน์รูปแบบต่าง ๆ ในการถ่ายเทมวลสาร

คอลัมน์	วัฏภาค กระจายตัว	พื้นที่การ ถ่ายเทมวล สาร	พื้นที่ผิว จำเพาะ (m^2/m^3)	สัดส่วน ของวัฏภาค (%)	ค่าสัมประสิทธิ์ การถ่ายเทมวล สาร (m/s)
แบบฟองอากาศ	แก๊ส	ฟองอากาศ	50 - 400	1 - 30	$1 - 5 \times 10^{-4}$
แบบกวนผสม	แก๊ส	ฟองอากาศ	50 - 300	1 - 20	$1 - 5 \times 10^{-4}$
แบบบรรจุตัวกลาง	ของเหลว	พื้นที่เปียกของ วัสดุตัวกลาง	50 - 300	4 - 15	$0.5 - 4 \times 10^{-4}$
แบบโปรย	ของเหลว	หยดละออง	10 - 100	1 - 10	$1 - 4 \times 10^{-4}$

ที่มา : Roustan, 2003

จากตารางจะเห็นได้ว่า วัฏภาคที่ใช้ในการกระจายตัวในแต่ละคอลัมน์มีความแตกต่างกัน เนื่องจากระบบการไหลที่ต่างกันภายในคอลัมน์ แต่คอลัมน์แบบฟองอากาศจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะ และมีสัดส่วนของวัฏภาคมากที่สุด คอลัมน์แบบกวนผสมจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่คล้ายคลึงกับคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง แต่จะมีความแตกต่างกันที่สัดส่วนของวัฏภาคที่คอลัมน์แบบบรรจุตัวกลางจะมีค่าน้อยกว่า คอลัมน์แบบโปรยจะมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและสัดส่วนของวัฏภาคน้อยที่สุด ในการเลือกใช้คอลัมน์ชนิดต่าง ๆ ควรพิจารณาถึงประเภทการใช้งานและพลังงานที่จะสามารถช่วยได้ในการตัดสินใจเลือกใช้คอลัมน์ให้เหมาะสมกับงาน

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบระหว่างคอลัมน์ต่าง ๆ ในด้านการถ่ายเทมวลสาร
สำหรับการใช้พลังงานที่ต่ำกว่า 100 W/m^3

การทดลอง	คอลัมน์แบบ ฟองอากาศ (Wongwailikhit, 2018)	คอลัมน์แบบ โพรย (Wongwailikhit, 2018)	คอลัมน์แบบบรรจุ ตัวกลาง (Seader, Henley และ Roper, 2010)	คอลัมน์แบบ กวนผสม (Bouaifi และคณะ, 2001)
ลักษณะจำเพาะ	ฟองอากาศ	หยดละออง	พื้นที่เปียก	ฟองอากาศ
สัดส่วน (%)	0.5 - 2.0	0.01 - 0.1	0.5 - 1.0	0.5 - 2.0
พื้นที่ผิวจำเพาะ (a, m^{-1})	10 - 25	0.1 - 2.0	15 - 40	10 - 22
$K_L(\text{m/s})$	$1 - 4 \times 10^{-4}$	$1 - 4 \times 10^{-3}$	$1 - 2 \times 10^{-4}$	$1 - 3 \times 10^{-4}$
$K_L a, \text{s}^{-1}$	$1 - 4 \times 10^{-3}$	$0.3 - 1.5 \times 10^{-3}$	$1.5 - 4.0 \times 10^{-3}$	$1.0 - 3.5 \times 10^{-3}$
ตัวแปรที่ควบคุม การถ่ายเทมวล	อัตราการไหล แก๊ส, หัวกระจาย	อัตราการไหล ของเหลว, หัวฉีด	อัตราการไหล ของเหลว, ตัวกลาง	อัตราการไหลแก๊ส, ความเร็วการกวน, หัวกระจาย, ใบพัด
วัฏภาคที่ใช้ พลังงานหลัก	แก๊ส	ของเหลว	แก๊ส	แก๊ส
ตัวแปรที่ควบคุม การใช้พลังงาน	อัตราการไหล แก๊ส, หัวกระจาย	อัตราการไหล ของเหลว, หัวฉีด	อัตราการไหล ของเหลว, ตัวกลาง	อัตราการไหลแก๊ส, ความเร็วการกวน, หัวกระจาย, ใบพัด

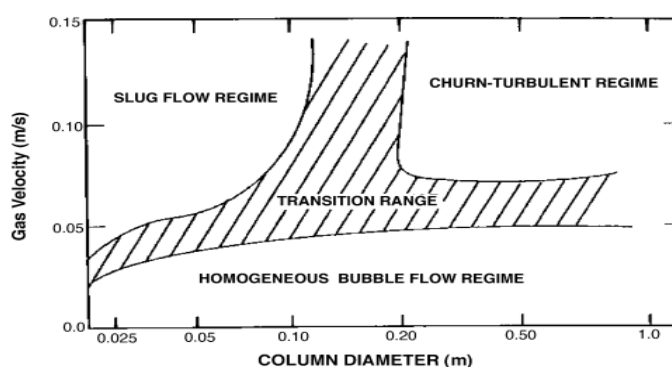
ที่มา : Wongwailikhit, 2018

จากทั้ง 2 ตารางจะเห็นได้ว่า คอลัมน์แบบฟองอากาศจะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมที่ใกล้เคียงกันกับคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง จึงทำให้เกิดความสนใจที่จะทำงานวิจัยเกี่ยวกับทั้ง 2 คอลัมน์ โดยจะมีการเปรียบเทียบในคอลัมน์แบบฟองอากาศที่เติมตัวกลางของแข็ง เพราะมีงานวิจัยเกี่ยวข้องบ่งบอกว่า ตัวกลางของแข็งสามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม

2.4 คอลัมน์แบบฟองอากาศ

2.4.1 พลศาสตร์ของไหลในคอลัมน์

พลศาสตร์การไหล (Fluid dynamic) จะส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในถังระบบการไหล (Flow regime) ส่วนมากจะขึ้นกับขนาดของคอลัมน์และความเร็วในการไหลตามผิว (superficial gas velocity) โดยความเร็วในการไหลตามผิวสามารถคำนวณได้จาก อัตราการไหลของแก๊ส (gas flow rate) หารด้วยพื้นที่หน้าตัด (flow cross-sectional area) ดังแสดงในรูปที่ 11 ทำให้เกิดรูปแบบการไหลภายในคอลัมน์ 3 ประเภทคือ



รูปที่ 11 รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นในคอลัมน์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางและความเร็วแก๊ส

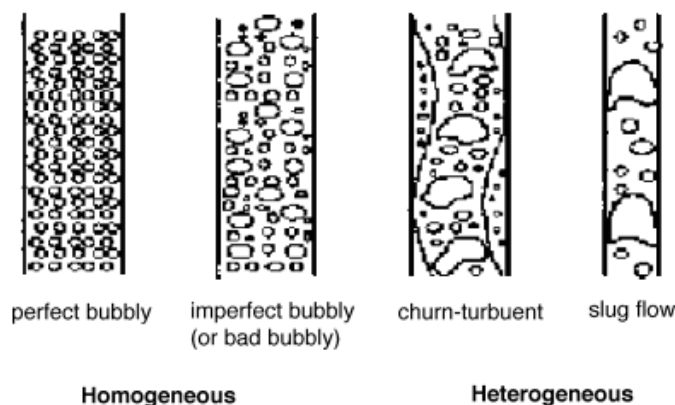
ที่มา : Kantarci, Borak และUlgen, 2005

1.) ระบบการไหลที่เป็นเนื้อเดียวกันหรือเป็นฟอง (Homogeneous or Bubbly flow regime) สำหรับการไหลในระบบนี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อความเร็วของแก๊สต่ำกว่า 5 เซนติเมตรต่อวินาที จึงทำให้เกิดฟองแก๊สขนาดเล็กและสม่ำเสมอตลอดทั้งคอลัมน์และมีโอกาสน้อยที่จะเกิดการรวมตัวกันของฟองเล็กจนเป็นฟองขนาดใหญ่ ระบบนี้จึงสำคัญที่สุดสำหรับการใช้งานจริง

2.) ระบบการไหลที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันหรือปั่นป่วน (Heterogeneous or Churn-turbulent regime) เป็นระบบที่ความเร็วในการไหลสูงกว่าฟองอากาศที่ไหลอยู่ในคอลัมน์จึงทำให้เกิดความปั่นป่วนและผลที่ตามมา นั่นคือ การหมุนเวียนของฟองมีโอกาสที่ให้ฟองเกิดการรวมตัวเป็นฟองขนาดใหญ่ แต่ก็ยังเพิ่มโอกาสในการทำให้ฟองแตกเป็นฟองเล็ก ๆ ระบบนี้ใช้ในการดูดซึมในอุตสาหกรรม

3.) ระบบการไหลที่มีการรวมของแก๊สจนได้ฟองขนาดใหญ่ (Slug flow regime) เป็นระบบที่เกิดการรวมตัวกันของฟองอากาศจนทำให้เป็นฟองอากาศขนาดใหญ่ เนื่องจากความเร็วแก๊สที่สูง

มากหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ที่น้อยเกินไป ระบบนี้ไม่เหมาะแก่การดูดซึมเพราะว่ามีพื้นที่ที่มี การประสานระหว่างของเหลวและแก๊สที่ต่ำเกินไป ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 ระบบการไหลในคอลัมน์แบบฟองอากาศ
ที่มา : Hebrard, Bastoul และRoustan, 1996

2.4.2 อุทกพลศาสตร์ในคอลัมน์

1.) ขนาดของฟองอากาศ (Bubble diameter: d_b)

ฟองอากาศจะถูกสร้างหรือกำหนดขึ้นโดยผ่านช่องรู (orifices) วัสดุอาจทำมาจากวัสดุที่มีความยืดหยุ่นหรือวัสดุที่ทำมาจากของแข็ง จะขึ้นอยู่กับวิธีการเลือกใช้งานและเงื่อนไขที่เหมาะสมของงานประเภทนั้น ๆ ที่ตำแหน่งของรูทางออกขนาดฟองอากาศอาจมีการเปลี่ยนแปลงตามคุณสมบัติของของเหลวและการเคลื่อนไหวของของเหลวที่เกิดจากการกระแสน้ำของแก๊สที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้เกิดความปั่นป่วนเกิดขึ้นภายในคอลัมน์และการเปลี่ยนแปลงของลักษณะฟอง ขนาดฟองอาจเพิ่มขึ้นตามความสูงของของเหลว เนื่องจากการรวมตัวกันหรือลดลงจากการแตกของฟอง

Hinze, 1955 ได้นำเสนอการแตกของฟองอากาศผ่านแรงดันทางไดนามิกและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของฟองในรูปแบบการไหลของเหลวที่แตกต่างกัน เมื่อแรงทางอุทกพลศาสตร์ในของเหลวสูงกว่าแรงตึงผิวฟองจะทำให้แตกเป็นฟองขนาดเล็ก ๆ กลไกนี้สามารถวัดปริมาณได้จาก (Werber number, We) ซึ่งแสดงในสมการที่ 2-9 เมื่อค่าเลขเวเบอร์มีค่ามากกว่าค่าวิกฤตฟองจะไม่เสถียรและแตกสลายตัว โดยที่ ρ_L คือความหนาแน่นน้ำ u_b คือความเร็วฟอง d_b คือขนาดฟอง σ คือแรงตึงผิว

$$We = \frac{\rho_L u_b d_B}{\sigma} \quad (2-9)$$

Hughmark, 1967 พบว่า เมื่อใช้แรงดันทางไดนามิกเพื่อจะสร้างขนาดของฟองให้คงที่ภายในคอลัมน์จะได้ขนาดของฟองที่สมดุล ดังแสดงในสมการที่ 2-10 เมื่อการไหลของแก๊สที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้เกิดความปั่นป่วนในของเหลวและการแตกของฟองอากาศจะเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามที่อัตราการไหลของแก๊สที่สูงมากจะมีความสมดุลระหว่างการแตกตัวและการรวมตัวกันของฟอง

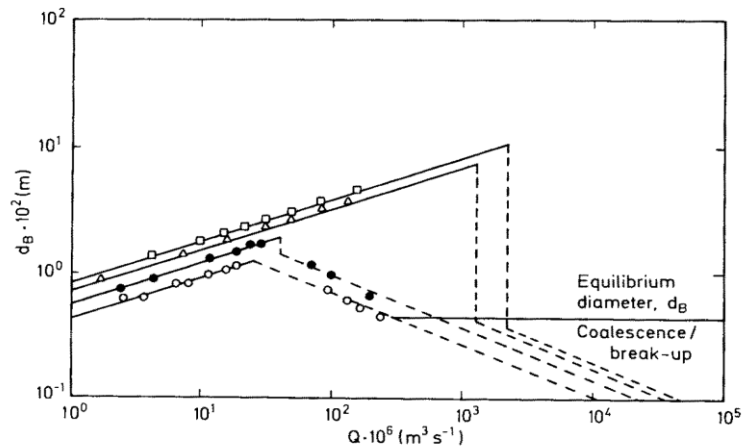
$$d_{Be} = 0.7 \frac{\sigma^{0.6}}{\left(\frac{P}{V}\right)^{0.4} \rho_L^{0.2}} \left(\frac{\mu_L}{\mu_g}\right)^{0.1} \quad (d_{Be} \text{ in } m) \quad (2-10)$$

Luo และคณะ, 1999 พิจารณาถึงแรงเฉือนโดยแรงเหวี่ยงที่เกิดขึ้นภายในคอลัมน์และนำเสนอความไม่แน่นอนของฟองอากาศนำไปสู่ความสัมพันธ์กับขนาดของฟองในสมการที่ 2-11 และสำหรับสภาวะที่มีการแขวนลอยของเหลวและของแข็งในสมการที่ 2-12

$$d_{b,max} = 2.53 \sqrt{\frac{\sigma}{g\rho_g}} \quad \text{for liquid phase} \quad (2-11)$$

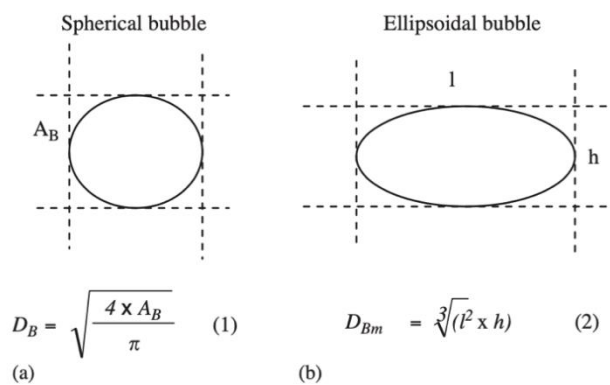
$$d_{b,max} = 3.27 \sqrt{\frac{\sigma}{g\rho_g}} \quad \text{for liquid - solid suspension} \quad (2-12)$$

Bhavaraju, Mashelkar และBlanch, 1978 พบว่า ความสมดุลของเส้นผ่านศูนย์กลางกลางแตกต่างกันไปตามคุณสมบัติของเหลว เมื่อน้ำถูกใช้เป็นวัฏภาคของเหลว ที่อัตราการไหลของแก๊สเพิ่มขึ้นเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่เกิดความปั่นป่วนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองได้ลดลงจากการแตกออกของฟองอากาศ อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มสารที่สร้างความเข้มข้นจนเป็นเนื้อเจล (Carbapol) ก็สามารถลดความปั่นป่วนในคอลัมน์และลดการแตกของฟองอากาศส่งผลให้ขนาดฟองใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ ดังแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 ขนาดของฟองอากาศผ่านรูช่องในคอลัมน์แบบฟองอากาศ
 ๐น้ำ ● 0.10% Carbopol ▲ 0.15% Carbopol, □ 0.20% Carbopol
 ที่มา : Bhavaraju, Mashelkar และBlanch, 1978

Painmanakul และคณะ, 2005 พบว่า การหาขนาดฟองได้จากการทดลอง โดยการถ่ายภาพฟองอากาศที่เกิดขึ้นภายในคอลัมน์ ฟองอากาศที่มีลักษณะกลมจะเกิดจากอัตราการไหลของแก๊สที่ต่ำ (พื้นที่ของฟองคือ A_B) ดังแสดงในรูปที่ 14 (a) แต่ฟองที่มีลักษณะเป็นวงรีจะเกิดจากอัตราการไหลที่สูง (ความยาวคือ l และ ความสูงคือ h) ดังแสดงในรูปที่ 14 (b) แต่ในทางปฏิบัติส่วนมากจะเกิดฟองที่เป็นวงรีจึงต้องใช้สมการในรูปที่ 14 (b) ในการคำนวณหาขนาดฟองอากาศ



รูปที่ 14 รูปร่างฟองอากาศทั่วไป
 ที่มา : Painmanakul และคณะ, 2005

2.) ความเร็วฟอง (Bubble velocity: u_b)

ความเร็วฟองสามารถบ่งบอกถึงการถ่ายเทมวลสารในคอลัมน์ เนื่องจากการแสดงถึงเวลาที่ฟองอากาศใช้อยู่ในคอลัมน์ที่มีการถ่ายเทมวลสาร มีการเสนอความสัมพันธ์หลายอย่างในสภาวะที่ต่างกัน แสดงในสมการที่ 2-13 เมื่อฟองอากาศมีการไหลแบบราบเรียบ(Laminar regime) ที่ $Re < 1$ และความเร็วฟองใช้สมการของ Stoke's

$$C_d = \frac{24}{Re} \quad (2-13)$$

เมื่อ C_d คือแรงต้านทาน Re คือ Reynolds number ที่แสดงด้วยสมการที่ 2-14

$$Re = \frac{\rho_L u_b d_b}{\mu_L} \quad (2-14)$$

เมื่อ ρ_g คือความหนาแน่นแก๊ส ρ_L คือความหนาแน่นน้ำ d_b คือขนาดฟอง g คือแรงโน้มถ่วง μ_L คือความหนืดของของเหลว สามารถแสดงในสมการที่ 2-15

$$u_b = \frac{g(\rho_L - \rho_g)d_b^2}{18\mu_L} \quad (2-15)$$

นอกจากนี้สำหรับ σg แรงตึงผิวแก๊สที่สามารถหาความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศสามารถหาได้จากสมการของ Davies-Taylor ดังแสดงในสมการที่ 2-16

$$u_b = \left(\frac{1.6\sigma g}{\rho_g} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2-16)$$

Painmanakul และคณะ, 2005 ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศสามารถหาได้จากการถ่ายภาพโดยใช้กล้องถ่ายรูปฟองอากาศขณะลอยขึ้นเพื่อทำการหาระยะทางที่ฟองอากาศลอยตัว (ΔD) โดยค่าความเร็วฟองสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-17 โดยที่ u_b คือความเร็วในการลอยตัวของฟอง (มิลลิเมตรต่อวินาที) ΔD คือ ระยะทางที่ฟองลอยขึ้น (มิลลิเมตร) t_{flame} คือช่วงเวลาที่เก็บภาพจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง (วินาที)

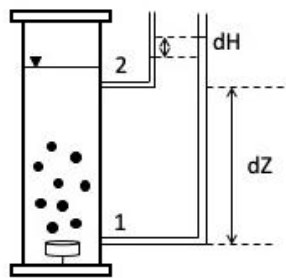
$$u_b = \frac{\Delta D}{t_{flame}} \quad (2-17)$$

3.) สัดส่วนของแก๊ส (Gas holdup: ϵ_g)

เป็นสัดส่วนของแก๊สในคอลัมน์ต่อปริมาตรของคอลัมน์ทั้งหมด โดยตัวแปรนี้มักขึ้นอยู่กับขนาดของฟอง ปริมาณฟองและความเร็วในการลอยตัวของฟองที่อยู่ในคอลัมน์แสดงในสมการที่ 2-18 โดยที่ V_g คือปริมาตรแก๊ส(ลิตร) V_L คือปริมาตรของเหลว(ลิตร) และ V_s คือปริมาตรของแข็ง (ลิตร)

$$\epsilon_g = \frac{V_g}{V_g + V_L + V_s} \quad (2-18)$$

สัดส่วนแก๊สสามารถหาได้จากความแตกต่างของความดันที่ด้านบนและด้านล่างของคอลัมน์ ดังแสดงในสมการที่ 2-19 โดย dH คือ ความแตกต่างของความสูงของระดับน้ำที่วัดภายในท่อวัดความดัน และ dZ คือ ระดับความสูงที่แตกต่างกันของทั้งสองท่อวัดความดัน ดังแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 สัดส่วนของแก๊ส

ที่มา : Wongwailikhit, 2018

$$\epsilon_g = \frac{dH}{dZ} \quad (2-19)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.) พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific interfacial area: a)

พื้นที่ผิวจำเพาะเป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแก๊สและของเหลวต่อปริมาตร ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่มีความสำคัญต่อการถ่ายเทมวลสาร โดยพื้นที่ผิวจำเพาะสามารถคำนวณได้จากสัดส่วนแก๊ส และขนาดของฟองอากาศ โดยที่ d_b คือขนาดฟอง(เมตร) ϵ_g คือสัดส่วนของแก๊ส และ ϵ_s คือสัดส่วนของแข็ง ดังแสดงในสมการ 2-20

$$a = \frac{6}{d_b} \cdot \frac{\epsilon_g}{1 - \epsilon_g - \epsilon_s} \quad (2-20)$$

ในขณะที่สัดส่วนของแข็ง(\mathcal{E}_s) สามารถหาได้จากสมการที่ 2-21 โดยที่มีปริมาตรของเหลว (V) ปริมาตรของแก๊ส(V_g) และปริมาตรของแข็ง (V_s)

$$\mathcal{E}_s = \frac{V_s}{V_g + V_l + V_s} \quad (2-21)$$

สามารถหาได้จากสมการที่ 2-22 โดยที่มีจำนวนฟองที่เกิดขึ้น (N_B) พื้นที่ผิวของฟองทั้งหมด(S_B)และปริมาตรของเหลว(V_L)

$$a = \frac{N_B \cdot S_B}{V_L} \quad (2-22)$$

อีกวิธีที่สามารถหาพื้นที่ผิวจำเพาะได้ขึ้นอยู่กับขนาดฟอง ความเร็ว และเวลาที่ฟองอยู่ในคอลัมน์ โดยที่ Q_g คืออัตราการไหลแก๊ส u_b คือความเร็วของฟอง d_b คือขนาดฟอง และ A คือพื้นที่หน้าตัดคอลัมน์ ดังแสดงในสมการที่ 2-23

$$a = \frac{6 \cdot Q_g}{d_b \cdot u_b \cdot A} \quad (2-23)$$

2.4.3 การถ่ายเทมวลสารในคอลัมน์

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในของเหลว (Volumetric liquid side mass transfer coefficient, $K_L a$) จากความต้านทานในวัฏภาคของเหลวเป็นตัวควบคุมกลไก การถ่ายเทมวลสารจากออกซิเจนเข้าไปในของเหลวจะถูกใช้โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม ($K_L a$) เนื่องจากการวัดค่า a ทำการวิเคราะห์ยาก จึงมักนิยมนรวมค่า K_L และ a ไว้ด้วยกัน หน่วยต่อเวลา วิธีมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับในการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในน้ำสะอาดโดยวิธี ASCE standard ของ (Stenstrom, Leu และ Jiang, 2006) ดังสมการที่ 2-24 เมื่อ C เป็นค่าความเข้มข้นออกซิเจนที่ละลายและ C^* เป็นค่าความเข้มข้นอิ่มตัวไขกฏของเฮนรี่

$$O_2 \text{ transferred rate} = \frac{Q_g(C_{in} - C_{out})}{V} = K_L a (C^* - C) \quad (2-24)$$

ในสมการที่ 2-25 เมื่อ Q_L เป็นอัตราการไหลของเหลว (ลิตรต่อนาที) C เป็นความเข้มข้นทางเข้าและความเข้มข้นทางออกหน่วย (mol/L) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย ($K_L, m/s$) พื้นที่ผิวจำเพาะ (a, m^{-1}) ปัจจัยการเพิ่มประสิทธิภาพ ($E, -$) และความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นแบบเฉลี่ยลอการิทึม ($\Delta C_{In,mean}$, mol/L) จากสมการที่ 2-26

$$Q_L(C_{O_2,out} - C_{O_2,in}) = EK_L a \Delta C_{In,mean} V_{Total} \quad (2-25)$$

$$\Delta C_{In,mean} = \frac{(C_{O_2}^* - C_{O_2,in}) - (C_{O_2}^* - C_{O_2,out})}{\ln\left(\frac{C_{O_2}^* - C_{O_2,in}}{C_{O_2}^* - C_{O_2,out}}\right)} \quad (2-26)$$

ความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนสามารถหาได้จากกฎของเฮนรีในสมการที่ 2-27 H คือค่าเฮนรีซึ่งสามารถดูได้จากตาราง และ P คือค่าความดันของแก๊สออกซิเจน

$$C_{O_2}^* = H_{O_2} P_{O_2} \quad (2-27)$$

ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นแบบเฉลี่ยลอการิทึม ($\Delta C_{In,mean}$) ในคอลัมน์แบบฟองอากาศจะมีค่า ΔC_{In} ในสมการที่ 2-26 เนื่องจากคอลัมน์ประเภทนี้จะทำให้เกิดการผสมสมบูรณ์ ความเข้มข้นในคอลัมน์ทุกจุดมีความเข้มข้นเท่ากัน ดังนั้นความเข้มข้นอิ่มตัวทางเข้า $C_{O_2,in}$ จะมีค่าเท่ากับความเข้มข้นทางออก $C_{O_2,out}$ ได้สมการใหม่คือสมการที่ 2-28 C^* คือค่าออกซิเจนอิ่มตัว (มก./ล.) $C_{O_2,in}$ คือค่าออกซิเจนละลายน้ำขาเข้า $C_{O_2,out}$ คือค่าออกซิเจนละลายน้ำขาออก Q_L คืออัตราการไหลของน้ำ (ลิตรต่อนาที) V คือ ปริมาตรคอลัมน์ (ลิตร)

$$K_L a = \frac{(C_{O_2,out} - C_{O_2,in}) \times Q_L}{(C^* - C_{O_2,out}) / V} \quad (2-28)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย (Liquid-side mass transfer coefficient: K_L) ซึ่งแสดงถึงอัตราการถ่ายเทผ่านพื้นที่เชื่อมต่อประสาน ที่อธิบายอยู่ในทฤษฎีสองความต้านทาน K_L มักถูกแสดงในการถ่ายเทมวลสารสำหรับแก๊สที่มีความสามารถในการละลายต่ำ จากสมการที่ 2-28 สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยได้จากการค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมและพื้นที่ผิวจำเพาะ ดังแสดงในสมการที่ 2-29

$$K_L = \frac{K_L a}{a} \quad (2-29)$$

การถ่ายเทมวลสารในคอลัมน์แบบฟองอากาศสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 แบบ (Sardeing, Painmanakul และ Hébrard, 2006) สำหรับฟองที่มีขนาดเล็กกว่า 1.5 มิลลิเมตร พื้นที่ผิวของฟองจะมีความแข็งแรงเนื่องจาก แรงดันภายในฟอง สามารถหาได้จากสมการที่ 2-30 ของ Frossling, 1938 และสมการที่ 2-31 ของ Calderbank และ Moo-Young, 1961 เมื่อ D คือสัมประสิทธิ์การแพร่ (ตร.ม/วินาที) และ Sc คือ Schmidt number หาได้จากสมการที่ 2-32

$$k_L = \frac{D}{d_b} (2 + 0.6Re^{1/2}Sc^{1/3}) \quad (2-30)$$

$$k_L = 0.31 \left(\frac{g\mu_L}{\rho_L} \right)^{1/3} Sc^{-2/3} \quad (2-31)$$

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D} \quad (2-32)$$

สำหรับพองที่มีขนาดใหญ่กว่า 3.5 มิลลิเมตร พื้นที่ผิวของพองมีลักษณะเป็นวงรี สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารได้จากสมการที่ 2-33 เมื่อ Sh คือ Sherwood number และ Pe คือ Péclet number ดังสรุปไว้ในตารางที่ 6

$$Sh = \frac{k_L d_b}{D} \quad (2-33)$$

ตารางที่ 6 ความสัมพันธ์ของการถ่ายเทมวลสาร

เลขเรย์โนลด์	ความสัมพันธ์
$Re < 1$	$0.65 Pe^{0.5}$
$10 < Re < 100$	$Sh = 0.65 Pe^{0.5} \left(1 + \frac{Re}{2} \right)^{0.5}$
$100 < Re < 1000$	$Sh = 1.13 \left(1 - \frac{2.9}{Re^{0.5}} \right)^{0.5} Pe^{0.5}$
$Re > 1000$	$Sh = 1.13 Pe^{0.5}$

ที่มา : Hadamard, 1911

พัชรพร ประจักษ์สูตร, 2551 งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการดูดซึมสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดที่ละลายน้ำได้น้อยคือ เบนซีนและชนิดที่ละลายน้ำได้มากคือ เมทานอล ศึกษาตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ ด้านการถ่ายเทมวลสาร และประสิทธิภาพในการบำบัดในคอลัมน์แบบพองอากาศ โดยใช้น้ำประปาและสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดแก๊สเมทานอลมีค่าสูง ร้อยละ 86.53 – 97.96 และประสิทธิภาพในการบำบัดเบนซีนมีค่าต่ำ ร้อยละ 5.57 – 8.50 ขนาดของรูไม่ได้มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการบำบัดของสารทั้งสอง พองของแก๊สสามารถทำให้เลือกอัตราการไหลที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพในการบำบัดที่สูงและไม่เกิดผลเสียจากความปั่นป่วนซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด

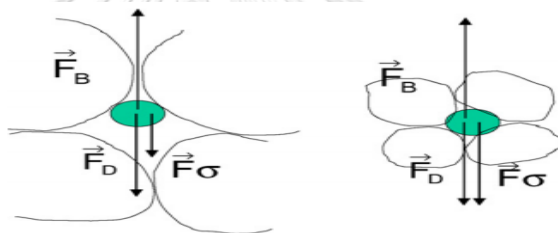
Wongwailikhit, 2018 ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการศึกษาการดูดซึมในคอลัมน์แบบพองอากาศและคอลัมน์แบบโปรยที่มีตัวกลางของแข็ง โดยมีจุดประสงค์ที่ต้องการจะเปรียบเทียบพลศาสตร์การไหลและการถ่ายเทมวลสารที่เกิดขึ้นภายในคอลัมน์ทั้งสอง พร้อมทั้งเปรียบเทียบ

พลังงานจำเพาะที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย โดยจากการทดลองสรุปได้ว่าคอลัมน์แบบฟองอากาศมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่มากกว่าคอลัมน์แบบโพรยเมื่อดำเนินในอัตราแก๊สที่ต่ำ โดยในสภาวะดังกล่าว การดำเนินใช้พลังงานจำเพาะที่เท่ากัน คอลัมน์แบบฟองอากาศจะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารที่มากกว่าคอลัมน์แบบโพรย แต่เมื่อดำเนินในอัตราการไหลแก๊สที่สูง คอลัมน์แบบโพรยจะมีความเหมาะสมมากกว่า เพราะคอลัมน์แบบฟองอากาศจะใช้พลังงานที่มากกว่าในการสร้างฟอง การศึกษาผลของการเติมตัวกลางลงในคอลัมน์แบบฟองอากาศขนาดเล็ก พบว่า การชนระหว่างฟองอากาศและตัวกลางจะทำให้การถ่ายเทมวลสารนั้นลดลง อันเนื่องมาจากความเร็วของฟองที่ลดลงโดยฟองที่ขนาดเล็กจะสูญเสียความเร็วได้ง่ายมากเมื่อชนกับตัวกลาง เมื่อเติมตัวกลางพลาสติก ความเร็วของฟองลดลงส่งผลให้ฟองอยู่ในคอลัมน์ได้นาน ทำให้เกิดการเพิ่มเวลาในการสัมผัสระหว่างแก๊สและของเหลว ส่งผลมีสัดส่วนของแก๊สเพิ่มขึ้นและพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะมากขึ้น ดังนั้นการเติมตัวกลางในสภาวะที่เหมาะสมก็จะสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าการลดลงของการถ่ายเทมวลสาร สภาวะที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้ เมื่อใช้ของแข็งที่เคลื่อนที่ได้รูปร่างวงแหวนในคอลัมน์แบบฟองอากาศและใช้หัวจ่ายอากาศขนาดใหญ่

2.4.4 การปรับปรุงทางอุทกพลศาสตร์ในคอลัมน์

Moustiri, Hebrard และRoustan, 2002 ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาผลกระทบของตัวกลางของแข็งที่มีผลต่อตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ในคอลัมน์แบบฟองอากาศ สรุปได้ว่า การใช้ตัวกลางสามารถทำให้เกิดการหน่วงระบบการไหลและสามารถทำให้เกิดการไหลที่เป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อความเร็วของแก๊สสูง และได้พบว่า ฟองอากาศจะมีขนาดเล็กลงเมื่อเติมตัวกลางลงไปคอลัมน์ เนื่องจากฟองอากาศลอยตัวและชนเข้ากับตัวกลางส่งผลให้ฟองอากาศเล็กลง เมื่อใช้ความเร็วแก๊สที่น้อยกว่า 1 เซนติเมตรต่อวินาที ตัวกลางจะทำให้เกิดช่องว่างในการเคลื่อนที่ของฟองอากาศในคอลัมน์ ส่งผลให้ความเร็วแก๊สสูงขึ้นและสัดส่วนของแก๊สในคอลัมน์ลดน้อยลง แต่เมื่อใช้ความเร็วแก๊สที่สูงกว่า 1 เซนติเมตรต่อวินาที ตัวกลางจะทำหน้าที่ในการขัดขวางฟองอากาศทำให้ความเร็วในการลอยตัวของแก๊สลดลง ทำให้ฟองอยู่ในคอลัมน์นานขึ้นและสัดส่วนของแก๊สก็เพิ่มขึ้นในระบบที่ไม่มีตัวกลาง ช่วงการเปลี่ยนระบบการไหลจากการไหลเป็นเนื้อเดียวกันไปสู่การไหลไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ความเร็วแก๊สจะอยู่ประมาณ 4 เซนติเมตรต่อวินาที แต่ในระบบที่มีตัวกลางจะพบช่วงการเปลี่ยนการไหลที่ความเร็วแก๊สประมาณ 6 เซนติเมตรต่อวินาที

Maldonado และคณะ, 2008 ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการดูดซึมออกซิเจนและน้ำประปาในคอลัมน์แบบฟองอากาศ โดยใช้ตัวกลางลักษณะต่าง ๆ ในการทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์และด้านการถ่ายเทมวลสาร โดยพบว่า ชนิดของตัวกลางที่แตกต่างกันไม่ได้ส่งผลต่อขนาดของฟองอากาศ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมสูงขึ้นตามความเร็วของแก๊สที่สูงขึ้นแต่ขนาดของตัวกลางที่เล็กมีความพรุนน้อยส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมมีค่าต่ำ สัดส่วนของแก๊สที่เพิ่มมากขึ้นตามความเร็วของแก๊สที่สูงขึ้น แต่สัดส่วนของแก๊สจะลดลงเมื่อใช้ตัวกลางที่มีความพรุนมากขึ้นหรือมีขนาดใหญ่ เนื่องจากขนาดและความพรุนของตัวกลางทำให้เกิดพื้นที่สัมผัสระหว่างฟองอากาศและตัวกลางจะน้อยเกิดแรงตึงผิวน้อย แต่เมื่อตัวกลางมีความพรุนต่ำหรือขนาดเล็กพื้นที่สัมผัสระหว่างฟองกับตัวกลางจะมากเกิดแรงตึงผิวมากทำให้ฟองอากาศสามารถลอยตัวอยู่ในคอลัมน์ได้นาน ส่งผลให้สัดส่วนของแก๊สมาก ดังแสดงในรูปที่ 16



รูปที่ 16 การเกิดแรงตึงผิวระหว่างฟองอากาศและตัวกลาง

ตัวกลางที่มีความพรุนมาก(รูปซ้าย) และตัวกลางที่มีความพรุนน้อย(รูปขวา)

จุพาลทิมา : Maldonado และคณะ, 2008

ภาสกร วรรณวงศ์, 2558 ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในคอลัมน์แบบฟองอากาศ โดยทำการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการใช้ตัวกลางพลาสติก โดยทำการเติมตัวกลางแบ่งตามปริมาตร 2.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และมีรูปทรงต่าง ๆ และใช้สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้น 15 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีการเติมสารเร่งปฏิกิริยาแอลอาร์จินีน สรุปได้ดังนี้ ตัวกลางพลาสติกที่มีความพรุนมาก ๆ จะสามารถเพิ่มอัตราการดูดซึมและการเติมตัวกลางในปริมาณที่มากพอจะสามารถขัดขวางฟองอากาศให้อยู่ในคอลัมน์ได้นาน ซึ่งเป็นการช่วยเพิ่มเวลาสัมผัส และยังพบว่า การถ่ายเทมวลสารที่ดีเกิดขึ้นจากที่อัตราการไหลของแก๊สสูงขึ้นและฟองอากาศขนาดใหญ่มีการถ่ายเทมวลสารที่ดีมากกว่าฟองอากาศขนาดเล็ก

การเติมตัวกลางของแข็งลงในคอลัมน์แบบฟองอากาศมีหลากหลายงานวิจัยดังแสดงในตารางที่ 7 ที่จะแสดงถึงสถานะในการทดลอง ผลของการเติมตัวกลางต่อการเปลี่ยนแปลงร้อยละทางพารามิเตอร์ทางอุทกพลศาสตร์และการถ่ายเทมวลสาร

ตารางที่ 7 สรุปงานวิจัยต่าง ๆ การดูดซึมโดยเติมตัวกลางของแข็ง

ผู้วิจัย	ความเร็วในการไหลตามผิว (m/s)	ประเภทตัวกลางของแข็ง	ความหนาแน่น (kg/m ³)	ขนาด (mm)	ความเข้มข้นตัวกลาง (%v/v)	การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนแก๊ส (%)	การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม (%)
Choi et al., (1996)	0.08	Glass beads	2517	0.069	0-5	-6 to 0 %	-
Garcia-Ochoa et al., (1997)	0.004-0.132	Glass beads and Pyrite	2400 and 4500	0.039-0.160	-	-10 to +42 %	-
Behkish et al., (2002)	0.01-0.16	Glass beads	2500	0.011	0-36	-	-72 to 0 %
Moustiri et al., (2002)	0.005-0.10	High-void Packing	-	-	0.092	-5 to + 45%	-
Bhatia et al., (2004)	0.005-0.10	High-void Packing	-	-	0.092	0 to +70%	0% to +5 %
Maldonado et al., (2008)	0.0012-0.0033	Glass cells	65-1576	1.8-10	Packed	บวกและลบ	-
Ferreira et al., (2010)	0-0.0072	EPS, PVC	1040,1350	0.210-0.549	0-5	-	-42 to 0 %
Mena et al., (2011)	0-0.0027	EPS	1040	0.5-1.1	0-30	-	-80 to 0%

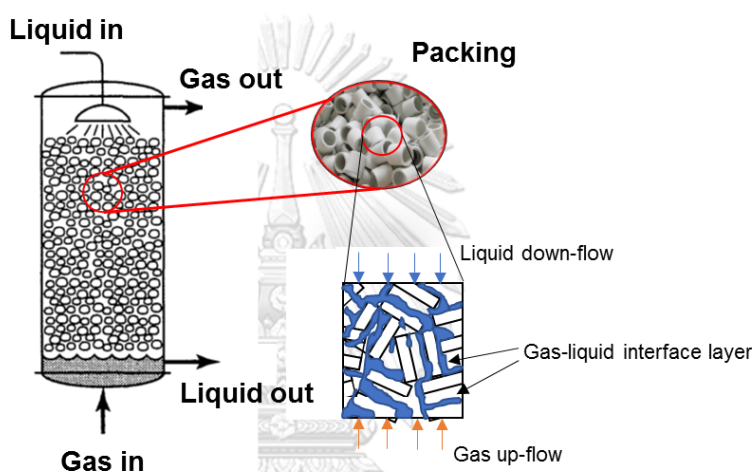
ที่มา : Wongwailikhit, 2018

จากตารางที่ 7 การเติมตัวกลางของแข็งลงในคอลัมน์สามารถทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงในเรื่องของสัดส่วนของแก๊สและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมที่สามารถทำให้เพิ่มขึ้นและลดลงที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในคอลัมน์ ซึ่งควรนำมาพิจารณาเลือกใช้ให้เหมาะสม

2.5 คอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง

2.5.1 พลศาสตร์ของไหลในคอลัมน์

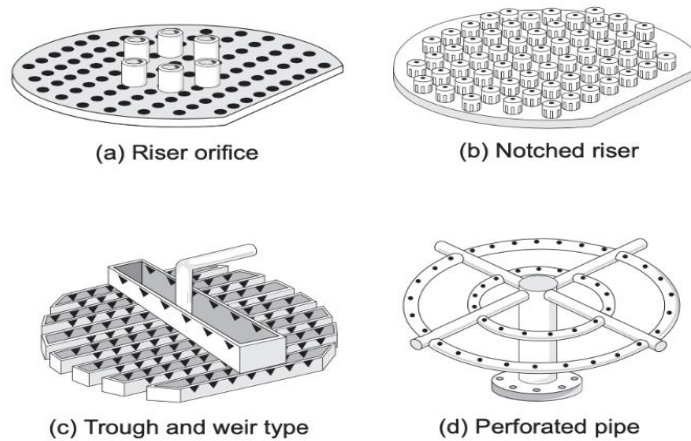
พลศาสตร์การไหลในคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง (Fluid dynamic) ของเหลวจะไหลจากด้านบนผ่านตัวกลางพลาสติกลงไปสู่ด้านล่างและแก๊สไหลสวนกระแสขึ้นสู่ด้านบน ระหว่างที่ของเหลวไหลผ่านตัวกลางจะเกิดเป็นชั้นฟิล์มบาง ๆ ที่จะเป็พื้นที่ให้เกิดการสัมผัสระหว่างแก๊สและของเหลว (Gas-liquid interface layer) ซึ่งมีการถ่ายเทมวลสารระหว่าง 2 วัฏภาค ดังแสดงในรูปที่ 17



รูปที่ 17 ชั้นส่วนต่อประสานระหว่างแก๊สและของเหลวในคอลัมน์บรรจุตัวกลาง

ที่มา : Wongwailikhit, 2018

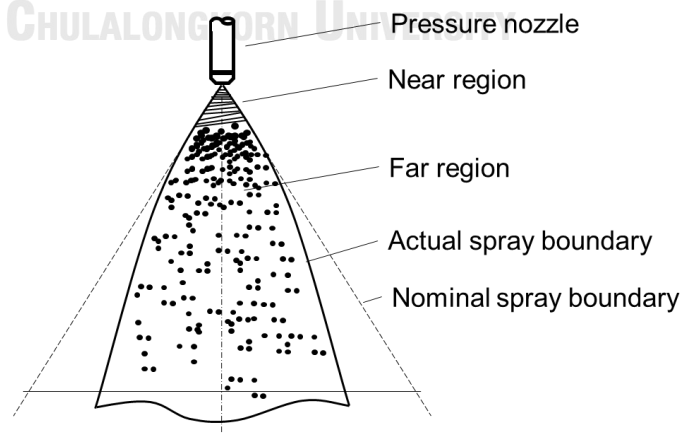
สำหรับคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง การถ่ายเทมวลสารจะเกิดขึ้นที่ พื้นที่ที่ตัวกลางเปียกจริง หรือพื้นที่ทั้งหมดของส่วนประสานระหว่างแก๊สและของเหลวในตัวกลาง (Total area of the gas-liquid interface in the packing, $m^2 : A$) การที่มีพื้นที่เปียกจริงมากอาจทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสารมาก แต่อัตราการไหลมากทำให้พื้นที่เปียกมากเกินไปอาจส่งผลให้เกิดน้ำท่วมและความดันลดลงเกิดมากขึ้นในคอลัมน์ สามารถควบคุมพื้นที่เปียกจริงได้โดยการเลือกใช้ตัวกระจายของเหลว (Liquid distributor) ที่จะทำหน้าที่กระจายของเหลวบนตัวกลางให้เกิดความสม่ำเสมอและทั่วถึงทั้งคอลัมน์ การเลือกขนาดและชนิดของตัวกระจายของเหลวนี้จะขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์ ถ้าใช้คอลัมน์ขนาดใหญ่และมีอัตราการไหลของเหลวมากควรเลือกใช้อุปกรณ์จำพวกเวียร์ (Weir) หรือจำพวกออริฟิส (Orifice) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 18 แต่ถ้าใช้คอลัมน์ขนาดเล็กและมีอัตราการไหลน้อยควรเลือกใช้หัวฉีด (Spray nozzle) ดังแสดงในรูปที่ 19



รูปที่ 18 ตัวกระจายของเหลว

ที่มา : Richards, 2000

พลศาสตร์การไหลในคอลัมน์ขนาดเล็กโดยใช้ตัวกระจายน้ำเป็นหัวฉีด (Spray nozzle) สามารถอธิบายได้ดังแสดงในรูปที่ 19 ของเหลวจะถูกป้อนเข้าสู่หัวฉีดจากทางด้านบนและจะถูกการลดพื้นที่หน้าตัดภายในหัวฉีด ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานและของเหลวไหลออกทางทางด้านล่าง หัวฉีดแตกเป็นหยดน้ำเล็ก ๆ หลายหยด รูปทรงของรัศมีหยดน้ำที่เกิดขึ้น ขึ้นอยู่กับประเภทของหัวฉีดที่มีหลายรูปแบบให้เลือกใช้ แต่ในการถ่ายเทมวลสารจำเป็นต้องใช้การฉีดหยดน้ำที่ครอบคลุมทั่วทุกพื้นที่ในคอลัมน์โดยใช้รูปแบบกรวยเต็มรูป (Full-cone)



รูปที่ 19 ลักษณะการไหลของหัวฉีด

ที่มา : Wongwailikhit, 2018

2.5.2 อุทกพลศาสตร์ในคอลัมน์

1.) สัดส่วนของเหลว (Liquid holdup: ϵ_l)

เป็นสัดส่วนของเหลวที่อยู่ในระบบทั้งหมดอยู่ในระหว่างดำเนินการ ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2-34 โดยที่ V_l คือปริมาตรของเหลว(ลิตร) V_g คือปริมาตรของแก๊ส(ลิตร) V_s คือปริมาตรของแข็ง(ลิตร)

$$\epsilon_l = \frac{V_l}{V_l + V_g + V_s} \quad (2-34)$$

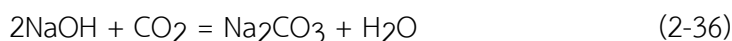
สามารถหาได้จากปริมาณของเหลวที่ไหลค้างอยู่ในคอลัมน์ผ่านตัวกลาง โดยเมื่อทำการหยุดการไหลของเหลวที่เข้าสู่ระบบและทำการวัดปริมาตรของเหลวที่ไหลออกจากคอลัมน์ทั้งหมดนับตั้งแต่เวลาที่ปิดระบบ (V_l) และเมื่อทำการหาอัตราส่วนระหว่าง (V_l) และปริมาตรทั้งหมดของคอลัมน์ (V_{Total}) จะสามารถคำนวณสัดส่วนของเหลวได้ตามสมการ 2-35

$$\epsilon_l = \frac{V_l}{V_{Total}} \quad (2-35)$$

2.) พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแก๊สและของเหลว (Total area of the gas-liquid interface in the packing, m² : A)

คือพื้นที่ที่ตัวกลางที่แก๊สและของเหลวสัมผัสกันในระบบบนพื้นที่ผิวที่เปียกของแพ็คกิ้ง (Wet area) ซึ่งเป็นพื้นที่ที่เกิดการถ่ายเทมวลสาร ค่านี้ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลาง สภาพการใช้งาน และคุณสมบัติของแก๊สและของเหลว วิธีการพิจารณาพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแก๊สและของเหลวสามารถใช้วิธีทางกายภาพจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของแก๊สและของเหลวและวิธีทางเคมีจะขึ้นอยู่กับพื้นฐานทางปฏิกิริยากับจลนพลศาสตร์

Yang และคณะ, 2011 ทำการศึกษาหาพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแก๊สและของเหลวในตัวกลาง โดยการศึกษาใช้วิธีทางเคมี NaOH-CO₂ ที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง เมื่อเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มากเกินไปเกิดปฏิกิริยา ดังสมการที่ 2-36



จากสมการที่ 2-36 สามารถหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาตามสมการของ Danckwerts' mass transfer model สามารถแสดงดังสมการที่ 2-37 โดยที่ N_i คืออัตราการดูดซึมของคาร์บอนไดออกไซด์(kmol/m²s) D คือ การแพร่กระจายของคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลาย

(m²/s) k_1 คือปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง(s⁻¹) k_L คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร(m/s) A คือพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแก๊สและของเหลว(m²) c_i คือความเข้มข้น Na₂CO₃ (mol/L)

$$N_i = \sqrt{Dk_1 + k_L^2}Ac_i \quad (2-37)$$

กระบวนการถ่ายเทมวลสารของการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ ควบคุมด้วยฟิล์มของเหลว ตามกฎของเฮนรีดังสมการที่ 2-38

$$c_i = HP_i = HP_{CO_2} \quad (2-38)$$

แทนสมการที่ 2-38 ในสมการที่ 2-37 โดยที่ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วไม่ส่งผลต่อค่า k_L จึงมีค่าน้อยมาและไม่ถูกนำมาคิดในสมการที่ 2-40

$$\left(\frac{N_i}{HP_{CO_2}}\right)^2 = A^2 Dk_1 \quad (2-29)$$

$$A = \frac{N_i}{\sqrt{Dk_1}c_i} \quad (2-40)$$

3.) พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific interfacial area: a)

พื้นที่ผิวจำเพาะเป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสทั้งหมด (A) และปริมาตรทั้งหมด (V) โดยสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 2-41 ซึ่งเป็นตัวแปรที่สามารถใช้เปรียบเทียบได้โดยตรงระหว่างคอลัมน์แบบฟองอากาศและคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง

$$a = \frac{A}{V} \quad (2-41)$$

สำหรับพื้นที่ผิวจำเพาะจะขึ้นกับประสิทธิภาพของเหลวที่ไหลครอบคลุมพื้นที่ผิวของตัวกลางที่สามารถประเมินประสิทธิภาพได้จากสมการของ Onda (Onda, Takeuchi และ Okumoto, 1968) ได้ดังสมการที่ 2-42 โดยที่ a_w คือประสิทธิภาพของพื้นที่ผิวจำเพาะ(m⁻¹) a คือพื้นที่ความแตกต่างและการถ่ายเทจริง (m⁻¹) σ_c คือแรงตึงผิววิกฤตของวัสดุ(N/m) σ_L คือแรงตึงผิวของของเหลว(N/m) L_w^* คือ การไหลของมวลของเหลวต่อพื้นที่หน้าตัด(kg/m².s) ρ_L คือความหนาแน่นของเหลว(kg/m³) μ_L คือความหนืดของเหลว(Pa.s)ความสัมพันธ์กับงานวิจัยหลายฉบับที่ทำการศึกษพื้นที่ผิวจำเพาะ โดยนักวิจัยได้สรุปดังตารางที่ 8

$$\frac{a_w}{a} = 1 - \exp[-1.45 \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_L}\right)^{0.75} \left(\frac{L_w^*}{a\mu_L}\right)^{0.1} \left(\frac{L_w^{*2}a}{\rho_L^2g}\right)^{-0.05} \left(\frac{L_w^{*2}}{\rho_L\sigma_L a}\right)^{0.2}] \quad (2-42)$$

ตารางที่ 8 ความสัมพันธ์พื้นที่ผิวจำเพาะ

ความสัมพันธ์	นักวิจัย
$\frac{a_w}{a} = 1 - \exp[-1.45 \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_L}\right)^{0.75} (Re_L)^{0.1} (Fr_L)^{-0.05} (We_L)^{0.2}]$	Onda และคณะ
$\frac{a_w}{a} = 1.5(a \cdot d_h)^{-0.5} \left(\frac{\rho_L u_L d_h}{\mu_L}\right)^{-0.2} \left(\frac{\rho_L u_L^2 d_h}{\sigma_L}\right)^{0.75} \left(\frac{u_L^2}{\omega^2 r d_h}\right)^{-0.45}$	Billet และคณะ
$\frac{a_w}{a} = 11906(Re_L)^{-1.8070} (Fr_L)^{-0.0601} (We_L)^{0.9896}$	Rajan และคณะ
* $Re = du\rho/\mu$ $Fr = Q^2/a_c^2(2\pi rh)^2 d_p$ $We = L^2/\rho a \sigma$	

ที่มา : Wang และคณะ, 2019

2.5.3 การถ่ายเทมวลสารในคอลัมน์

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในของเหลว (Volumetric liquid side mass transfer coefficient, $K_L a$) ซึ่งจะแสดงถึงอัตราการถ่ายเทมวลสารผ่านพื้นที่เชื่อมต่อระหว่างวัฏภาค ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารยังทำหน้าที่เป็น คุณสมบัติระหว่างแก๊ส - ของเหลว พื้นที่หน้าตัดของไหล ความเร็วของไหล เป็นต้น สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม ($K_L a$) จากสมการที่ 2-43 และสมการที่ 2-45 โดยที่ Q_L คืออัตราการไหล(ลิตรต่อนาที) $C_{O_2,in}$ คือความเข้มข้นออกซิเจนทางเข้า(โมลต่อลิตร) $C_{O_2,out}$ คือความเข้มข้นออกซิเจนทางออก(โมลต่อลิตร) K_L คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย(เมตรต่อวินาที) a คือพื้นที่ผิวจำเพาะ(เมตร⁻¹) E คือปัจจัยการเพิ่มประสิทธิภาพ(-) V คือปริมาตรของคอลัมน์(ลิตร) $\Delta C_{In,mean}$ คือความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นแบบเฉลี่ยลอการิทึม(โมลต่อลิตร) ที่สามารถหาได้จากสมการที่ 2-44 และมีงานวิจัยแสดงความสัมพันธ์ดังสรุปในตารางที่ 9

$$Q_L(C_{O_2,out} - C_{O_2,in}) = EK_L a \Delta C_{In,mean} V_{Total} \quad (2-43)$$

$$\Delta C_{In,mean} = \frac{(C_{O_2}^* - C_{O_2,in}) - (C_{O_2}^* - C_{O_2,out})}{\ln\left(\frac{C_{O_2}^* - C_{O_2,in}}{C_{O_2}^* - C_{O_2,out}}\right)} \quad (2-44)$$

$$K_L a = \frac{Q_L(C_{O_2,out} - C_{O_2,in})}{\Delta C_{In,mean} \cdot V_{Total}} \quad (2-45)$$

ตารางที่ 9 ความสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม

ความสัมพันธ์	นักวิจัย
$\frac{K_L d_p}{D_L a_t} (1 - 0.93 \frac{V_o}{V_t} - 1.13 \frac{V_i}{V_t}) = 0.65 (Sc_L)^{0.5} (Re_L)^{0.17} (Gr_L)^{0.3} (We_L)^{0.3}$	Chen และคณะ
$\frac{K_L d_p}{D_L a_t} (1 - 0.93 \frac{V_o}{V_t} - 1.13 \frac{V_i}{V_t}) = 0.35 (Sc_L)^{0.5} (Re_L)^{0.17} (Gr_L)^{0.3} (We_L)^{0.3} \left(\frac{a_t}{a_p}\right)^{-0.5} \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_w}\right)^{0.14}$	Chen และคณะ

ที่มา : Wang และคณะ, 2019

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย (Liquid-side mass transfer coefficient: K_L) ซึ่งได้จากอัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมและพื้นที่ผิวจำเพาะ ดังสมการที่ 2-46 ตัวแปรนี้จะทำให้เข้าใจตัวแปรที่ควบคุมกลไกการดูดซึมต่าง ๆ เช่น สมบัติของเหลว ความเร็วแก๊ส สมบัติของฟองอากาศ ลักษณะการกำเนิดของฟองอากาศ ที่เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม

$$K_L = \frac{K_L a}{a} \quad (2-46)$$

TUNG และ MAH, 1985 ซึ่งได้ทำวิจัยหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยจากสมการที่ 2-47 โดยที่ d_p คือประสิทธิภาพเส้นผ่านศูนย์กลางตัวกลาง (เมตร) D_L คือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเหลว (ตารางเมตรต่อวินาที) a_t คือพื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร) a คือพื้นที่เชื่อมประสาน (ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร)

$$\frac{K_L d_p}{D_L} = 0.919 (Sc_L)^{0.5} (Re_L)^{0.33} (Gr_L)^{0.16} \left(\frac{a_t}{a}\right)^{0.33} \quad (2-47)$$

เมื่อ $Sc_L = \frac{\mu}{\rho D}$; Schmidt number

$Re_L = \frac{d u \rho}{\mu}$; Reynold number

$Gr_L = \frac{d_p^3 \rho a_c}{\mu^2}$; Grashof number

Aroonwilas, Tontiwachwuthikul และ Chakma, 2001 ในงานวิจัยนี้เกี่ยวกับการศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเดินระบบในการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง ได้พบว่า การเพิ่มอัตราการไหลทำให้มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลสารมากขึ้น พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางสูงจะมีผลทำให้การถ่ายเทมวลสารมากได้ดีที่สุด การจัดเรียงตัวกันของตัวกลาง 45 และ 90 องศา มีการกระจายน้ำที่สม่ำเสมอส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลสารมากกว่าการจัดเรียง 0 องศา และตัวกระจายของน้ำมีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารมาน้อย

Senol, 2001 เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทมวลสารของคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลางที่มีการจัดเรียงตัวแบบสุ่มของตัวกลาง ใช้ตัวกลางชนิดเรสซิงริง ขนาด 6.25 9 และ 10.8 มิลลิเมตร โดยใช้คอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 9 เซนติเมตร สูง 1.90 เมตร ใช้การกระจายน้ำจากทางด้านบน จากการวิจัยพบว่า การถ่ายเทมวลสารและพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแก๊สกับของเหลว และสัดส่วนของเหลว เมื่อมีพื้นที่ผิวมากขึ้น ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสารได้ดีขึ้น

2.6 พลังงานที่ใช้ในระบบ

พลังงานที่ใช้ในระบบ (Power consumption) สามารถหาได้จากความดันลด (Pressure drop) เป็นตัวแปรที่สำคัญที่จะสามารถบ่งบอกถึงการใช้พลังงานได้ โดยทั่วไปจะขึ้นกับอัตราการไหลแก๊สและอัตราการไหลของเหลวในคอลัมน์ที่จะทำให้เกิดการสูญเสียแรงดันภายในคอลัมน์ซึ่งนำไปสู่การใช้พลังงานจำนวนมากในระบบ สามารถหาได้จากสมการที่ 2-48 (Bouaifi และคณะ, 2001)

$$P/V_{Total} = (P/V)_{gas} + (P/V)_{liquid} \quad (2-48)$$

$$(P/V)_{gas} = Q_g \cdot \Delta P_g / V \quad (2-49)$$

$$(P/V)_{liquid} = Q_l \cdot \Delta P_l / V \quad (2-50)$$

เมื่อ	P/V_{Total}	=	พลังงานที่ใช้ทั้งหมดในระบบ (วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร)
	$(P/V)_{gas}$	=	ค่าพลังงานที่ใช้ของแก๊ส (วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร)
	Q_g	=	อัตราการไหลของแก๊ส (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)
	ΔP_g	=	ความดันลดของแก๊ส (นิวตันต่อตารางเมตร)
	$(P/V)_{liquid}$	=	ค่าพลังงานที่ใช้ของของเหลว (วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร)
	Q_l	=	อัตราการไหลของของเหลว (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)
	ΔP_l	=	ความดันลดของของเหลว (นิวตันต่อตารางเมตร)
	V	=	ปริมาตรของคอลัมน์ (ลูกบาศก์เมตร)

2.7 สรุปเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตารางที่ 10 สรุปงานวิจัยต่าง ๆ โดยวิธีการดูดซึม

ผู้ทำวิจัย	ประเภทคอลัมน์	ตัวกลางที่ใช้	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม(s^{-1})	พื้นที่ผิวจำเพาะ(m^{-1})	สัดส่วน (%)	พลังงานที่ใช้ในระบบ (W/m^3)
ภาสกร, 2558	ฟองอากาศ	ทรงกระบอก ทรงกลม ทรงรี	0.0051- 0.0636	16.27- 136.63	1.02-6.36	ไม่พบข้อมูล
Kritchart, 2018	ฟองอากาศ แบบโปรย	ทรงวงแหวน ทรงรี	$1.0-4.0 \times 10^{-3}$	10-25	0.5-2.0	14-93
		ทรงกลม ทรงกระบอก	$0.3-1.5 \times 10^{-3}$	0.1-2.0	0.01-0.1	1-54
Bouaifi และคณะ, 2001	แบบกวนผสม	-	$1.0-3.5 \times 10^{-3}$	10-22	0.5-2.0	17-71
Seader และคณะ, 2010	บรรจุตัวกลาง	1.5 นิ้ว พอลีสไตรีน	$1.5-4.0 \times 10^{-3}$	15-40	0.5-1.0	ไม่พบข้อมูล

จากงานวิจัยต่าง ๆ พบว่า มีการศึกษาวิจัยในคอลัมน์แบบฟองอากาศที่ทำการศึกษาถึงค่าการถ่ายเทมวลสารและค่าทางอุทกพลศาสตร์และมีการปรับปรุงประสิทธิภาพ โดยมีการเติมตัวกลางที่แตกต่างทั้งขนาดและรูปร่าง ผลของการเติมตัวกลางลงไปคอลัมน์สามารถทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสารที่ดีขึ้นและลดลงขึ้นอยู่กับตัวแปรต่าง ๆ ที่นำมาใช้ทำการศึกษาด้านการถ่ายเทมวลสารและทางอุทกพลศาสตร์ และยังมีกรนำคอลัมน์แบบฟองอากาศไปประยุกต์ใช้ในการเติมอากาศและการบำบัดมลพิษทางอากาศ นอกจากนี้ มีการทำการศึกษาวิจัยในคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลางที่ใช้ตัวกลางที่เป็นขนาดและชนิดที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาผลทางด้านถ่ายเทมวลสารและทางอุทกพลศาสตร์ แต่จุดประสงค์หลักเพื่อนำมาบำบัดสารเคมีต่าง ๆ ในมลพิษทางอากาศจากโรงงานอุตสาหกรรมและจากงานวิจัยที่หลากหลาย ทำให้ทราบว่า งานวิจัยต่าง ๆ ทำการศึกษาเป็นประเภทคอลัมน์ โดยไม่มีการนำมาเกี่ยวข้องหรือนำมาศึกษาเปรียบเทียบร่วมกัน หรือมีงานวิจัยน้อยมากที่นำมาเปรียบเทียบ ทั้ง ๆ ที่ทั้งสองคอลัมน์นี้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารและพื้นที่ผิวสัมผัสที่ใกล้เคียงกัน และยังไม่มีการเปรียบเทียบทางด้านการใช้พลังงานของคอลัมน์ประเภทต่าง ๆ กับการเลือกใช้คอลัมน์ให้เหมาะสม โดยคำนึงถึงการถ่ายเทมวลสารและการใช้พลังงาน เพื่อเป็นตัวเลือกให้กับโรงงานอุตสาหกรรมที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้เหมาะสม อีกทั้งยังมีการเสนอข้อดีและข้อเสียของแต่ละอุปกรณ์รวมถึงเสนอแนะสภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการของแต่ละอุปกรณ์

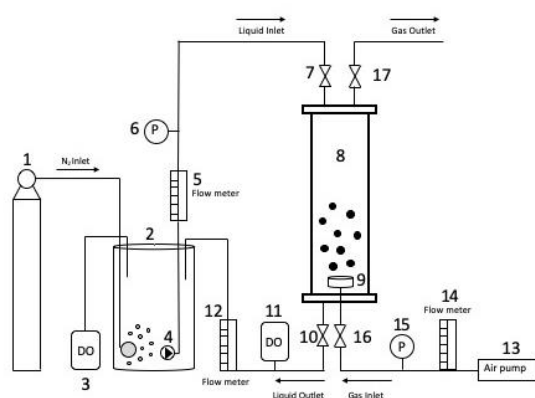
บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากลไกการดูดซับจากวัฏภาคแก๊สไปสู่วัฏภาคของเหลว โดยทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่าง 2 คอลัมน์ ได้แก่ คอลัมน์แบบฟองอากาศและคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง โดยพิจารณาการถ่ายเทมวลสาร อุทกพลศาสตร์และพลังงานที่ใช้ในแต่ละคอลัมน์ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย(VOCs) ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.1.1 คอลัมน์แบบฟองอากาศ

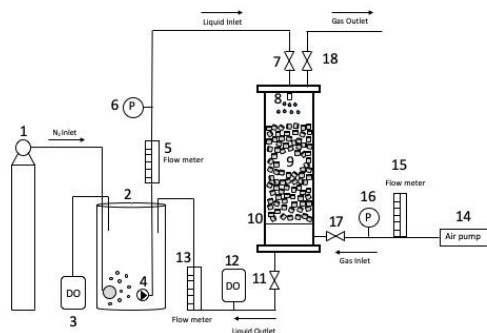


รูปที่ 20 แสดงแผนภาพการไหลของคอลัมน์แบบฟองอากาศ

- | | |
|--------------------------------|--------------------------------|
| 1. ถังไนโตรเจน | 2. ถังบรรจุน้ำ 80 ลิตร |
| 3. เครื่องวัดออกซิเจนละลายน้ำ | 4. เครื่องสูบน้ำ |
| 5. มาตรวัดอัตราการไหลน้ำเข้า | 6. เกจวัดความดัน |
| 7. วาล์วเปิด-ปิดน้ำเข้า | 8. คอลัมน์ฟองอากาศ |
| 9. หัวจ่ายอากาศ | 10. วาล์วเปิด-ปิดน้ำออก |
| 11. เครื่องวัดออกซิเจนละลายน้ำ | 12. มาตรวัดอัตราการไหลน้ำออก |
| 13. ปั๊มลม | 14. มาตรวัดอัตราการไหลแก๊สเข้า |
| 15. เกจวัดความดัน | 16. วาล์วเปิด-ปิดแก๊สเข้า |
| 17. วาล์วเปิด-ปิดแก๊สออก | |

ในงานวิจัยนี้ ทำการทดลองในคอลัมน์แบบฟองอากาศที่ทำจากอะคริลิกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตรและความสูง 0.8 เมตร เป็นการเดินระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous process) ดังแสดงในรูปที่ 20 โดยใช้หัวจ่ายอากาศที่ทำด้วยอะคริลิกขนาด 0.12 เมตร และเจาะรูขนาด 0.4 0.8 และ 1.2 มิลลิเมตร จำนวน 19 และ 38 รู และแบ่งการทดลองในคอลัมน์แบบฟองอากาศออกเป็น 2 ช่วงคือ การทดลองแบบไม่เติมตัวกลางและการทดลองแบบเติมตัวกลาง โดยในการเดินระบบคอลัมน์แบบฟองอากาศจะทำการปรับอัตราการไหลของน้ำ อัตราการไหลของแก๊สชนิดของหัวจ่ายอากาศ และชนิดของตัวกลางของแข็ง เพื่อศึกษาที่ค่าออกซิเจนละลายที่เปลี่ยนแปลงไปจากก่อนและหลังเข้าสู่คอลัมน์โดยใช้เครื่องวัดออกซิเจนละลายน้ำของบริษัทHariba DO120 และบริษัทLutron DO-5512SD เพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร รวมถึงเก็บภาพการเคลื่อนตัวของฟองอากาศ เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ทางด้านด้านอุทกพลศาสตร์

3.1.2 คอลัมน์แบบฟองอากาศ



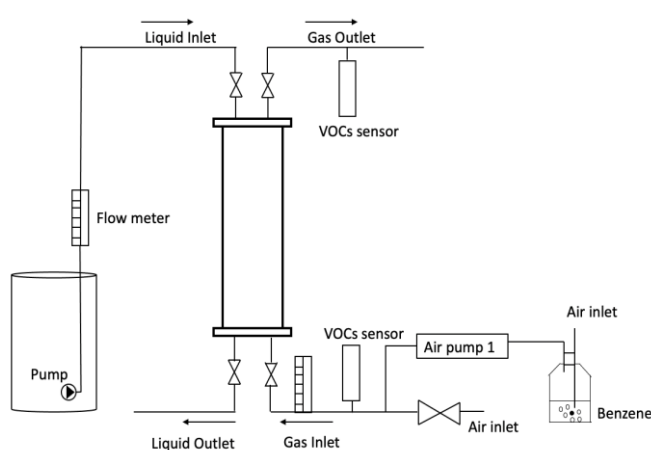
รูปที่ 21 แสดงแผนภาพการไหลของคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง

- | | |
|--------------------------------|--------------------------------|
| 1. ถังไนโตรเจน | 2. ถังบรรจุน้ำ 80 ลิตร |
| 3. เครื่องวัดออกซิเจนละลายน้ำ | 4. เครื่องสูบน้ำ |
| 5. มาตรวัดอัตราการไหลน้ำเข้า | 6. เกจวัดความดัน |
| 7. วาล์วเปิด-ปิดน้ำเข้า | 8. หัวกระจายน้ำ |
| 9. ตัวกลาง | 10. คอลัมน์ |
| 11. วาล์วเปิด-ปิดน้ำออก | 12. เครื่องวัดออกซิเจนละลายน้ำ |
| 13. มาตรวัดอัตราการไหลน้ำออก | 14. ปั๊มลม |
| 15. มาตรวัดอัตราการไหลแก๊สเข้า | 16. เกจวัดความดัน |
| 17. วาล์วเปิด-ปิดแก๊สเข้า | 18. วาล์วเปิด-ปิดแก๊สออก |

ในการทดลองนี้เป็นการทดลองคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลางที่ทำด้วยอะคริลิกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตรและความสูง 0.8 เมตร เช่นเดียวกับคอลัมน์แบบฟองอากาศ โดยทำการเดินระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous process) ดังแสดงในรูปที่ 21 โดยทดลอง การเดินระบบคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลางจะศึกษาตัวกลาง (Packing) ทั้งหมด 4 ชนิด 3 ขนาดคือ พอลลิ่ง อานม้า แคสเคด มินิริง ที่มีขนาด 25 38 และ 50 มิลลิเมตรและแรสซิกริ่ง ที่มีขนาดขนาด 25 และ 50 มิลลิเมตร พร้อมทั้งศึกษาหัวกระจายน้ำ (Liquid Distributor) 3 ขนาดคือ 0.635 0.9525 และ 1.27 เซนติเมตร พร้อมทั้งศึกษาอัตราส่วนของอัตราการไหลของน้ำและอัตราการไหลของแก๊สที่เหมาะสม เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ทางด้าน การถ่ายเทมวลสารและด้านอุทกพลศาสตร์

3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายใช้อุปกรณ์ชุดเดียวกับคอลัมน์แบบฟองอากาศและคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง แต่มีอุปกรณ์ที่เพิ่มเติมมาก็คือ ปั๊มลม (Air pump) และชุดตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs sensor) ของบริษัท RAE SYSTEMS SPAIN รุ่น MiniRAE Lite+ โดยการทำงานของเครื่องจะใช้หลักการ Photo-Ionization Detection (PID) ที่จะทำการฉายแสงที่ทำให้ สารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) แตกตัวและวัดค่าพลังงานไฟฟ้าจากการแตกตัวของสารอินทรีย์ระเหยง่าย โดยจะทำการติดตั้งดังแสดงในรูปที่ 22



รูปที่ 22 แผนภาพการไหลทั้งสองคอลัมน์เมื่อทำการทดลองโดยใช้สารอินทรีย์ระเหยง่าย

3.1.4 วัสดุตัวกลางที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุตัวกลางที่ใช้คือ ตัวกลางพลาสติก (Plastic packing media) ที่มีขนาดและรูปร่างต่างกัน 4 ชนิด ดังนี้ (1) แรสซิกริง (Raschig ring) ขนาด 25 และ 50 มิลลิเมตร (2) พอลล์ริง (Pall ring) (3) อานม้า (Intralox saddle ring) (4) แคสเคดมินิริง (Cascade mini ring) ที่มีขนาด 25 38 และ 50 มิลลิเมตร โดยวัสดุตัวกลางเหล่านี้เป็นตัวกลางมาตรฐานที่ใช้ในอุตสาหกรรม ดังแสดงในรูปที่ 23 และมีคุณสมบัติของตัวกลางดังแสดงใน ตารางที่ 11



รูปที่ 23 วัสดุตัวกลางที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 11 คุณสมบัติของตัวกลางของแข็ง

ชนิดตัวกลาง	ขนาด ตัวกลาง (mm)	พื้นที่ผิว (m^2/m^3)	ช่องว่าง (%)	น้ำหนัก (kg/m^3)	ปัจจัย ตัวกลาง (m^{-1})	จำนวน ($Pc./m^3$)
พอลล์ริง	25	210	91	82	239	54600
	38	140	94	54	220	13500
	50	100	95	51	154	6300
แรสซิกริง	25	210	86	231	137	51000
	50	100	92	200	57	6500
แคสเคดมินิ ริง	25	228	90	97.8	312.8	81500
	38	132.5	91	57.5	175.8	27200
	50	114.2	92.7	54.8	143.1	10740
อานม้า	25	288	84.7	102	473	97680
	38	265	95	63	405	25200
	50	250	96	75.2	332	9400

ที่มา : Pingxiang zhongying packing, 2010

3.1.5 สารเคมี

การทดลองในช่วงแรกใช้สารที่ใช้ในการดูดซึมน้ำคือ น้ำประปา และสารที่ถูกดูดซึมน้ำคือ แก๊สออกซิเจนในอากาศ โดยมีการใช้แก๊สไนโตรเจนเพื่อใช้ในการไล่แก๊สออกซิเจนออกจากน้ำในการเตรียมน้ำก่อนเข้าคอลัมน์ นอกจากนี้ คอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง จะมีการใช้โซเดียมซัลไฟต์ (Na_2SO_3) เพื่อใช้ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและตัวเร่งปฏิกิริยา โคบอลต์ซัลเฟต (CoSO_4) ในการหาค่าพื้นที่ผิวการถ่ายเทมวลสารระหว่างแก๊สและของเหลว (A)

ในขณะที่การทดลองการถ่ายเทมวลสารโดยใช้สารอินทรีย์ระเหยง่าย จะใช้สารเคมี เบนซีน (Benzene) เป็นตัวถูกดูดซึม เนื่องจากเป็นสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีผลต่อสุขภาพและพบได้ทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งในตัวทำละลายประเภทต่าง ๆ

3.2 แผนการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ของคอลัมน์แบบฟองอากาศและคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลางทั้ง 2 คอลัมน์เป็นการเดินระบบแบบต่อเนื่อง และมีแผนการทดลองดังแสดงในรูปที่ 24 โดยมีการทดลองแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

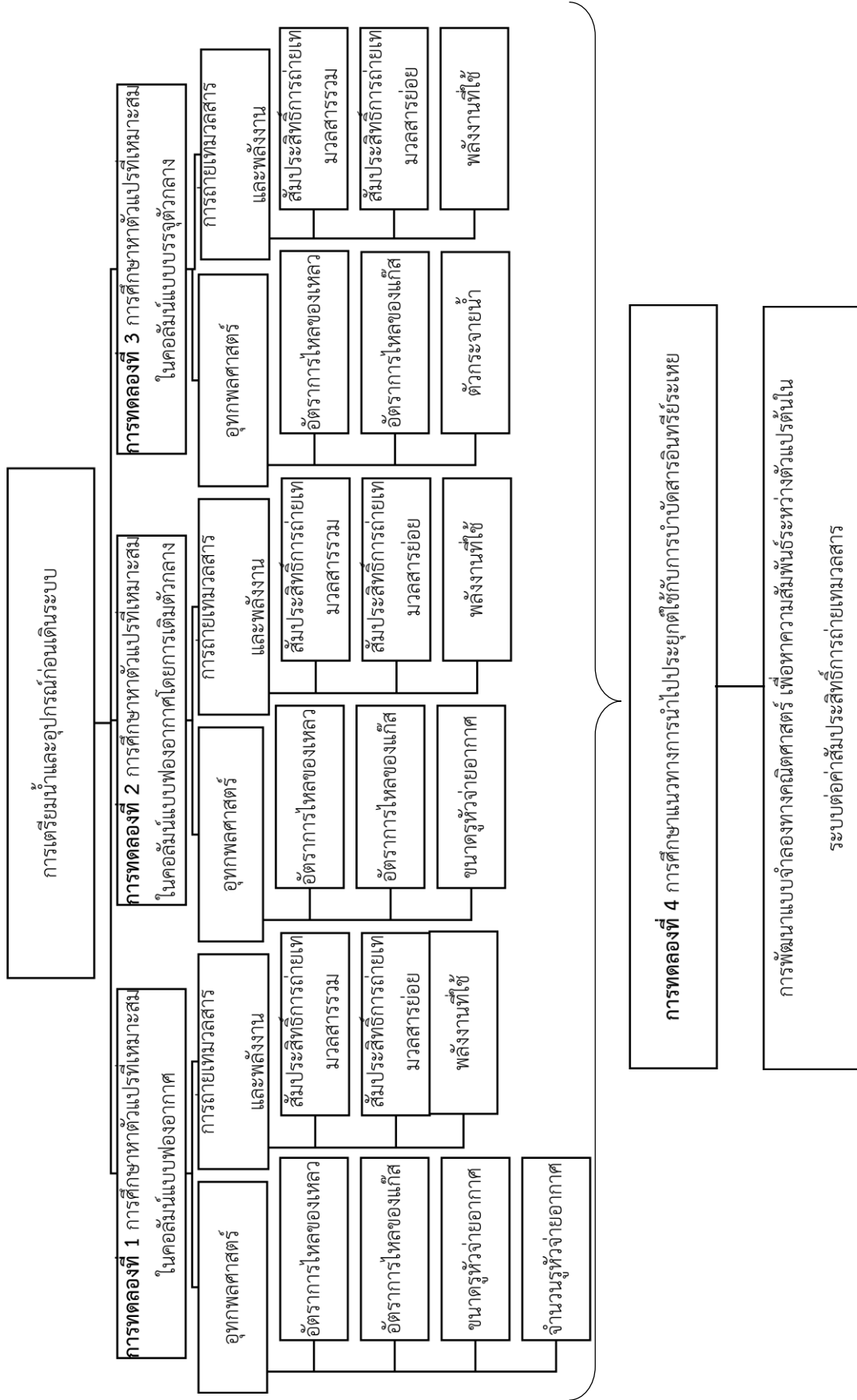
การทดลองที่ 1 การศึกษาหาตัวแปรที่เหมาะสมในคอลัมน์แบบฟองอากาศ ทำการป้อนน้ำที่มีค่าออกซิเจนละลายน้ำเข้าใกล้เคียง 0 มิลลิกรัมต่อลิตร เข้าสู่คอลัมน์แบบฟองอากาศ โดยทำการทดลองที่รูของหัวจ่ายอากาศ 3 ขนาดคือ 0.4 0.8 และ 1.2 มิลลิเมตร ซึ่งทุกขนาดมีจำนวน 19 และ 38 รู โดยการศึกษาอัตราการไหลของน้ำอยู่ในช่วง 25 ถึง 100 ลิตรต่อชั่วโมงและอัตราการไหลของแก๊สอยู่ในช่วง 4 ถึง 24 ลิตรต่อนาที และหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร สัดส่วนของแก๊สขนาดฟอง และความเร็วในการลอยตัวของฟอง เพื่อใช้ในการพิจารณาภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมสำหรับคอลัมน์แบบฟองอากาศที่ไม่เติมตัวกลาง

การทดลองที่ 2 การศึกษาหาตัวแปรที่เหมาะสมในคอลัมน์แบบฟองอากาศโดยการเติมตัวกลาง ซึ่งจากการทดลองที่ 2 ได้เลือกอัตราการไหลของน้ำ 50 และ 100 ลิตรต่อชั่วโมง และอัตราการไหลของแก๊ส คือ 12 และ 24 ลิตรต่อนาที และโดยใช้หัวจ่ายอากาศทั้ง 3 ขนาด และเติมตัวกลางชนิดพอลลิ่ง ชนิดอานม้า ชนิดชนิดแคสเคดมินิริง ซึ่งมีขนาด 25 38 และ 50 มิลลิเมตร และชนิดแรสซิงริง ซึ่งมีขนาด 25 และ 50 มิลลิเมตร โดยทำการบรรจุ 1% และ 2.5% ของปริมาตรคอลัมน์

ตามลำดับ โดยทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร สัดส่วนของแก๊ส ขนาดฟอง และความเร็วในการลอยตัวของฟอง เพื่อพิจารณาผลของตัวกลางของแข็งที่มีต่อการถ่ายเทมวลสารและอุทกพลศาสตร์

การทดลองที่ 3 การศึกษาหาตัวแปรที่เหมาะสมในคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง ทำการป้อนน้ำที่มีค่าออกซิเจนละลายน้ำเข้าใกล้เคียง 0 มิลลิกรัมต่อลิตร เข้าสู่คอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง โดยการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำ อัตราการไหลของอากาศ และชนิดตัวกลางของแข็งที่มีต่อการถ่ายเทมวลสาร สัดส่วนของของเหลว และพื้นที่ผิวสัมผัส โดยในการทดลองนี้ จะใช้ตัวกลางทั้งหมด 4 ชนิดคือ ชนิดพอลลิ่ง ชนิดอานม้า ชนิดแคสเคดมินิริง ที่มีขนาด 25 38 และ 50 มิลลิเมตร และชนิดแรสซิกริง ซึ่งมีขนาด 25 และ 50 มิลลิเมตร และมีตัวกระจายน้ำรูปแบบหัวสเปร์ย 3 ขนาดคือ 0.635 0.9525 และ 1.27 เซนติเมตร

การทดลองที่ 4 การศึกษาแนวทางการนำไปประยุกต์ใช้กับการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย โดยนำตัวแปรที่ดีที่สุด จากการทดลองที่ 1 2 และ 3 เพื่อเป็นแนวทางในการนำคอลัมน์ทั้ง 2 แบบไปใช้งานในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายนั่นก็คือ เบนซีน และสามารถนำค่าพลังงานที่ใช้ในระบบที่ได้จากการทดลองไปพิจารณาในการออกแบบและเลือกใช้ตัวแปรที่เหมาะสมและเพียงพอต่อการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

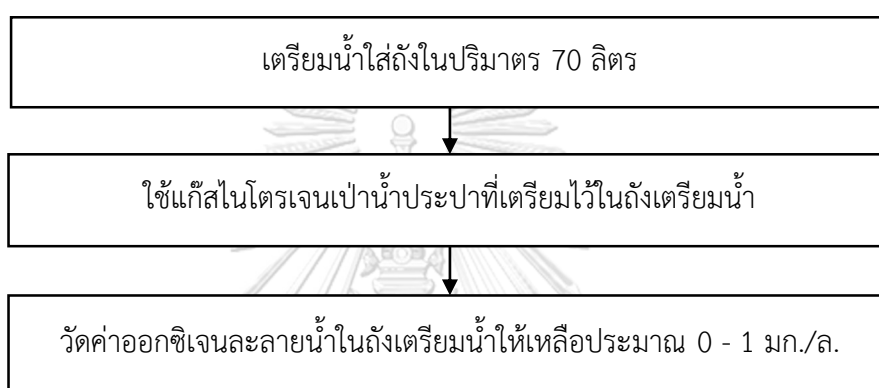


รูปที่ 24 แผนการทดลอง

3.3 การดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การเตรียมน้ำประปาสำหรับการดูดซึมออกซิเจน

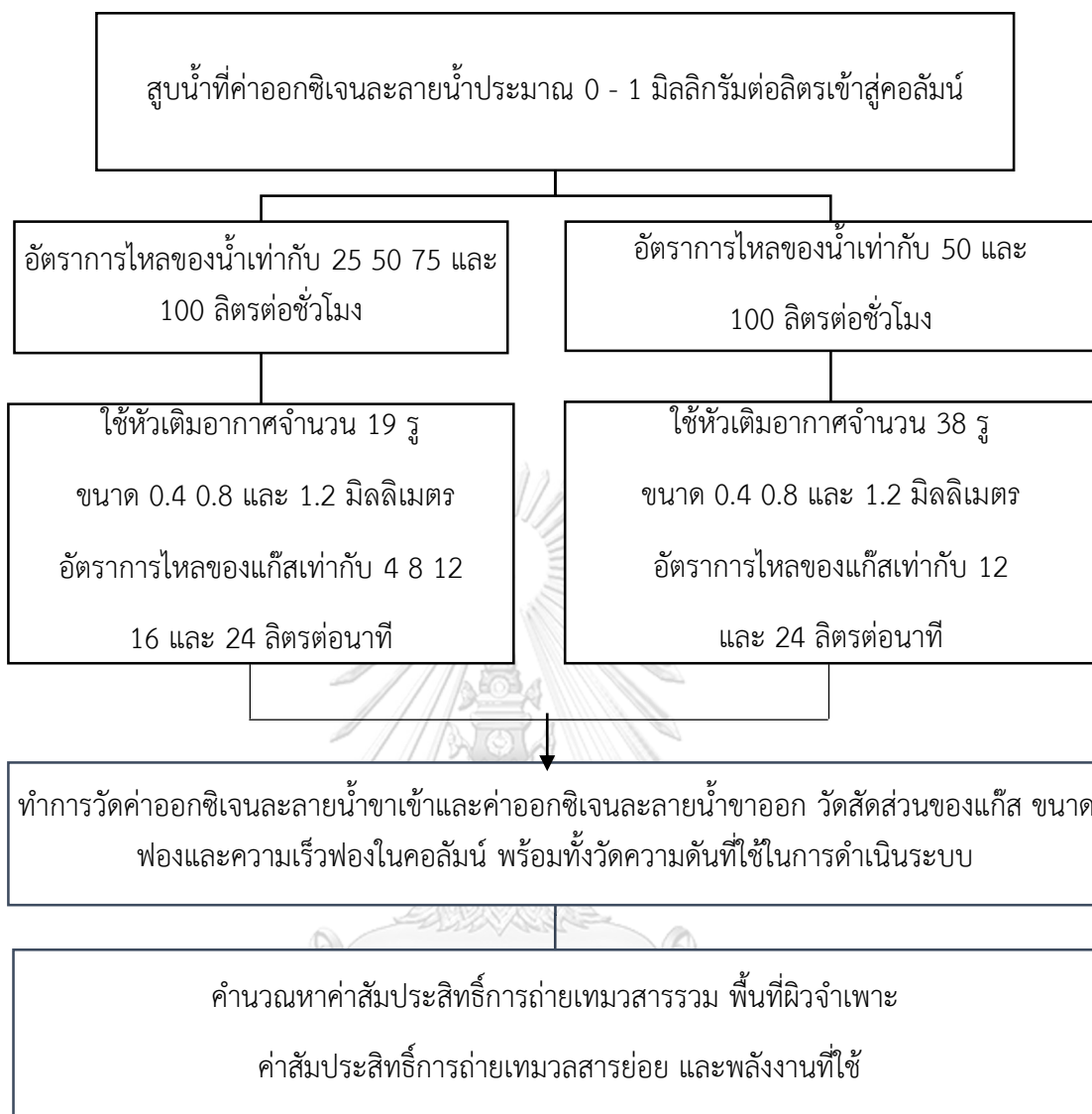
การเตรียมน้ำและอุปกรณ์ก่อนเดินระบบเพื่อศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของคอลัมน์แบบฟองอากาศและคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง สามารถทำได้โดยการเตรียมน้ำที่มีค่าออกซิเจนละลายใกล้เคียง 0 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการเป่าน้ำด้วยไนโตรเจน (Nitrogen Stripping) แล้วจึงทำการวัดความแตกต่างของค่าออกซิเจนละลายก่อนและหลังการถ่ายเทมวลสาร โดยได้มีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 25



รูปที่ 25 ขั้นตอนการเตรียมน้ำก่อนเดินระบบ

3.3.2 การศึกษาคอลัมน์แบบฟองอากาศ

การทดสอบหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมในคอลัมน์แบบฟองอากาศนั้นก็คือ จะศึกษาโดยใช้หัวจ่ายอากาศต่างขนาดกันคือ 0.4 0.8 และ 1.2 มิลลิเมตร ที่แต่ละหัวมีจำนวน 19 รู และ 38 รู โดยใช้อัตราการไหลของแก๊ส 4 8 12 16 และ 24 ลิตรต่อนาที และใช้อัตราการไหลของน้ำ 25 50 75 และ 100 ลิตรต่อชั่วโมง โดยทำการศึกษาและวิเคราะห์ตัวแปรการถ่ายเทมวลสาร ตัวแปรทางด้านอุทกพลศาสตร์ และพลังงานที่ใช้ในการดำเนินระบบ ดังแสดงในรูปที่ 26



รูปที่ 26 ขั้นตอนการเดินระบบในคอลัมน์แบบฟองอากาศ

3.3.2.1 การศึกษาตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์

การศึกษาตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์มีความสำคัญต่อกลไกการดูดซึมเนื่องจากตัวแปรเหล่านี้สามารถไปคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (a) ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย (k_L) โดยตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ที่ศึกษาในคอลัมน์แบบฟองอากาศ คือ สัดส่วนแก๊ส ขนาดฟอง ความเร็วการลอยตัวของฟอง และพื้นที่ผิวจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (a)

1.) ขนาดฟองอากาศ (Bubble diameter: d_b) ที่อยู่ในคอลัมน์แบบฟองอากาศ โดยส่วนมากมักขึ้นกับขนาดของรูหัวจ่ายอากาศและอัตราการไหลของแก๊ส โดยการหาขนาดฟองอากาศสามารถทำได้โดยการถ่ายรูปด้วยกล้องความเร็วสูง 240 ภาพต่อวินาที แล้วจึงนำภาพที่ถ่ายได้มาผ่านการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมอิมเมจเจ (ImageJ) ดังแสดงในรูปที่ 27 เพื่อวิเคราะห์หาความกว้าง (l) และความสูงของฟอง (h) ของฟองแต่ละฟอง แล้วจึงหาขนาดฟองเทียบเท่า (Equivalent diameter) ตามสมการ 3-1 จำนวน 100 ฟองเป็นอย่างน้อยต่อหนึ่งสภาวะการทดลอง เพื่อให้ขนาดฟองที่วิเคราะห์ได้มีความน่าเชื่อถือตามหลักสถิติ

$$d_b = \sqrt[3]{l^2 \times h} \quad (3-1)$$

โดยที่

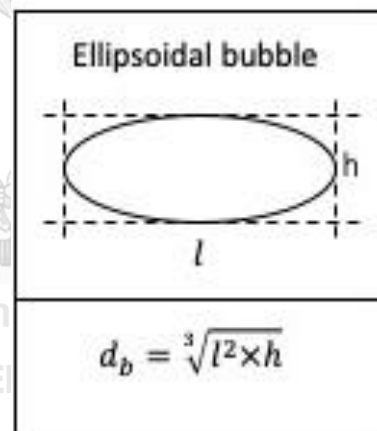
d_b = ขนาดฟองอากาศ (มิลลิเมตร)

l = ความกว้างของฟอง (มิลลิเมตร)

h = ความสูงของฟอง (มิลลิเมตร)



(ก)



(ข)

รูปที่ 27 การวิเคราะห์ขนาดของฟองจากการถ่ายภาพด้วยกล้องความเร็วสูง

(ก) ภาพถ่ายฟองอากาศ (ข) รูปแบบของฟองอากาศลักษณะวงรี

2.) ความเร็วฟอง (Bubble velocity: u_b) คือ การเคลื่อนตัวของฟองภายในคอลัมน์ โดยในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม ImageJ เป็นตัวช่วยในการวิเคราะห์จากรูปถ่ายที่ได้จากกล้องความเร็วสูง โดยนำมาวิเคราะห์หาการเคลื่อนที่ของฟองในแนวแกน x และ y เพื่อหาระยะทางที่เปลี่ยนแปลงไป (ΔD) ดังแสดงในรูปที่ 28 แล้วจึงคำนวณหาความเร็วของฟอง ตามสมการที่ 3-2



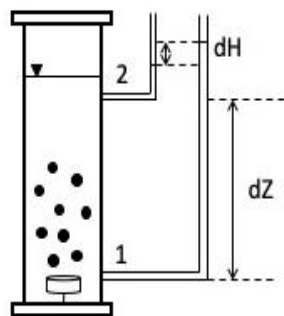
รูปที่ 28 ภาพจำลองของการเคลื่อนตัวของฟองอากาศและการคำนวณหาความเร็วฟอง

$$u_b = \frac{\Delta D}{t_{flame}} \quad (3-2)$$

โดยที่

u_b	=	ความเร็วในการลอยตัวของฟอง (มิลลิเมตรต่อวินาที)
ΔD	=	ระยะทางที่ฟองลอยขึ้น (มิลลิเมตร)
t_{flame}	=	ช่วงเวลาที่เก็บภาพจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง (วินาที)

3.) สัดส่วนของแก๊ส (Gas holdup: ϵ_g) ที่เป็นสัดส่วนของแก๊สในคอลัมน์ต่อปริมาตรของคอลัมน์ทั้งหมด โดยตัวแปรนี้มักขึ้นอยู่กับขนาดของฟอง ปริมาณฟอง และความเร็วในการลอยตัวของฟองที่อยู่ในคอลัมน์ โดยสัดส่วนแก๊สสามารถหาได้จากความแตกต่างของความดันที่ด้านบนและด้านล่างของคอลัมน์ ดังแสดงในสมการที่ 3-3 โดย dH คือความแตกต่างของความสูงของระดับน้ำที่วัดภายในท่อวัดความดัน และ dZ คือระดับความสูงที่แตกต่างกันของทั้งสองท่อวัดความดัน ดังแสดงในรูปที่ 29 (Wongwailikhit, 2018)



รูปที่ 29 สัดส่วนของแก๊ส

$$\varepsilon_g = \frac{dH}{dZ} \quad (3-3)$$

โดยที่	ε_g	=	สัดส่วนของแก๊ส
	dH	=	ความต่างของระดับน้ำในท่อ (มิลลิเมตร)
	dZ	=	ความต่างระดับของจุดปล่อยน้ำ (มิลลิเมตร)

4.) พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific interfacial area: a) เป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแก๊สและของเหลวต่อปริมาตร ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่มีความสำคัญต่อการถ่ายเทมวลสาร โดยพื้นที่ผิวจำเพาะสามารถคำนวณได้จากสัดส่วนแก๊ส และขนาดฟองอากาศ ดังแสดงในสมการที่ 3-4 (Wongwailikhit, 2018)

$$a = \frac{6}{d_b} \cdot \frac{\varepsilon_g}{1 - \varepsilon_g - \varepsilon_s} \quad (3-4)$$

โดยที่	a	=	พื้นที่ผิวจำเพาะ (เมตร ⁻¹)
	d_b	=	ขนาดฟอง (เมตร)
	ε_g	=	สัดส่วนของแก๊ส
	ε_s	=	สัดส่วนของแข็ง

โดยในการทดลองในส่วนนี้ได้มีตัวแปรต้น คือ ขนาดรูหัวจ่ายอากาศ จำนวนรูหัวจ่ายอากาศ อัตราการไหลของน้ำ และอัตราการไหลของแก๊ส แล้วทำการศึกษาสัดส่วนของแก๊ส ขนาดฟอง ความเร็วฟอง และพื้นที่ผิวจำเพาะ โดยควบคุมความสูงของน้ำให้คงที่ ดังที่สรุปไว้ดังที่ตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ตัวแปรที่ศึกษาด้านอุทกพลศาสตร์ในคอลัมน์แบบฟองอากาศ

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
ขนาดรูหัวจ่ายอากาศ	0.4 0.8 1.2 มิลลิเมตร
จำนวนรูหัวจ่ายอากาศ	19 38 รู
อัตราการไหลของน้ำ	25 50 75 100 ลิตรต่อชั่วโมง
อัตราการไหลของแก๊ส	4 8 12 16 24 ลิตรต่อนาที
ตัวแปรตาม	วิธีการศึกษา
ขนาดฟอง	คำนวณหาขนาดฟองตามสมการ 3-1
ความเร็วฟอง	คำนวณหาความเร็วฟองตามสมการที่ 3-2
สัดส่วนของแก๊ส	การหาสัดส่วนแก๊สตามสมการที่ 3-3
พื้นที่ผิวจำเพาะ	การหาพื้นที่ผิวจำเพาะตามสมการ 3-4
ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการทดลอง
ขนาดคอลัมน์	เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตร สูง 0.8 เมตร
ความสูงน้ำ	0.7 เมตร
ตัวดูดซึม	น้ำประปา
ตัวถูกดูดซึม	แก๊สออกซิเจน

3.3.2.2 การศึกษาตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสารและพลังงานงานที่ใช้

การศึกษ้อัตราการถ่ายเทมวลสารสามารถทำได้โดยการวัดความแตกต่างของออกซิเจนก่อนและหลังการถ่ายเทมวลสาร โดยใช้เครื่องมือวัดออกซิเจนละลายน้ำ ซึ่งความเข้มข้นเริ่มต้นของออกซิเจนจะมีค่าใกล้เคียง 0 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากน้ำประปาด้านขาเข้าจะถูกเป่าด้วยไนโตรเจน โดยจากสมมติฐานการกวนผสมอย่างสมบูรณ์ในวัฏภาคของเหลว จะสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมจากสมการ 3-5

$$K_L a = \frac{(C_{out} - C_{in}) \times Q_L}{(C^* - C_{out}) / V} \quad (3-5)$$

โดยที่	$K_L a$	=	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม (วินาที ⁻¹)
	C^*	=	ค่าออกซิเจนที่จุดอิ่มตัว (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	C_{in}	=	ค่าออกซิเจนละลายน้ำขาเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	C_{out}	=	ค่าออกซิเจนละลายน้ำขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	Q_L	=	อัตราการไหลของเหลว (ลิตรต่อนาที)
	V	=	ปริมาตรคอลัมน์ (ลิตร)

นอกจากนี้ ยังสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย ได้จาก อัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมและพื้นที่ผิวจำเพาะ ดังแสดงในสมการที่ 3-6

$$K_L = \frac{K_L a}{a} \quad (3-6)$$

โดยที่	K_L	=	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย (เมตรต่อวินาที)
	$K_L a$	=	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม (วินาที ⁻¹)
	a	=	พื้นที่ผิวจำเพาะ (เมตร ⁻¹)

ทั้งนี้ พลังงานที่ใช้ในระบบจำเพาะ (Specific Power Consumption, P/V) จะสามารถคำนวณได้จากอัตราการไหลของของเหลว อัตราการไหลของแก๊ส และความดันก่อนเข้าสู่ระบบของทั้งแก๊สและของเหลว ดังแสดงในสมการที่ 3-8 และ 3-9 โดยสามารถคำนวณหาพลังงานที่ใช้ในระบบรวมได้จาก $(P/V)_{Total}$ ผลรวมของพลังงานที่ใช้ในวัฏภาคแก๊สและของเหลว ดังแสดงในสมการที่ 3-7 (Bouaifi และคณะ, 2001)

$$P/V_{Total} = (P/V)_{gas} + (P/V)_{liquid} \quad (3-7)$$

$$(P/V)_{gas} = Q_g \cdot \Delta P_g / V \quad (3-8)$$

$$(P/V)_{liquid} = Q_l \cdot \Delta P_l / V \quad (3-9)$$

โดยที่	P/V_{Total}	=	พลังงานที่ใช้ในระบบรวม (วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร)
	$(P/V)_{gas}$	=	ค่าพลังงานที่ใช้ของแก๊ส (วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร)
	Q_g	=	อัตราการไหลของแก๊ส (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)
	ΔP_g	=	ความดันลดของแก๊ส (นิวตันต่อตารางเมตร)
	$(P/V)_{liquid}$	=	ค่าพลังงานที่ใช้ของของเหลว (วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร)

Q_i	=	อัตราการไหลของของเหลว (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)
ΔP_i	=	ความดันลดของของเหลว (นิวตันต่อตารางเมตร)
V	=	ปริมาตรของคอลัมน์ (ลูกบาศก์เมตร)

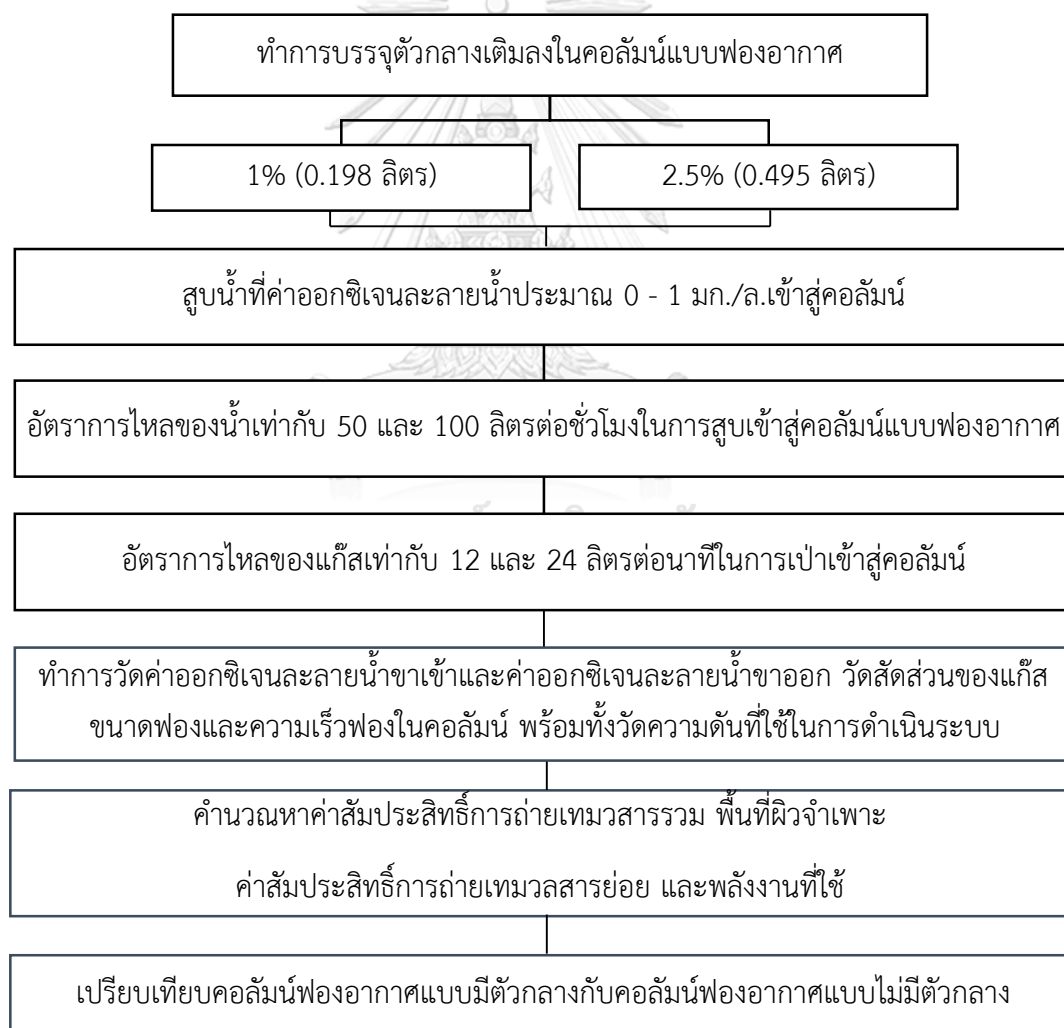
โดยในการทดลองในส่วนนี้ได้มีตัวแปรต้น คือ ขนาดรูหัวจ่ายอากาศ จำนวนรูหัวจ่ายอากาศ อัตราการไหลของน้ำ และอัตราการไหลของแก๊ส แล้วทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยและพลังงานที่ใช้ในระบบ โดยควบคุมความสูงของน้ำให้คงที่ ดังที่สรุปไว้ดังที่ตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ตัวแปรที่ศึกษาด้านการถ่ายเทมวลสารและพลังงานงานที่ใช้ในคอลัมน์ฟองอากาศ

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
ขนาดรูหัวจ่ายอากาศ	0.4 0.8 1.2 มิลลิเมตร
จำนวนรูหัวจ่ายอากาศ	19 38 รู
อัตราการไหลของน้ำ	25 50 75 100 ลิตรต่อชั่วโมง
อัตราการไหลของแก๊ส	4 8 12 16 24 ลิตรต่อนาที
ตัวแปรตาม	วิธีการศึกษา
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม	เครื่องวัดออกซิเจนละลายน้ำและสมการ 3-5
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย	ศึกษาตามสมการที่ 3-6
ค่าพลังงานที่ใช้ในระบบ	ศึกษาตามสมการที่ 3-7 3-8 และ 3-9
ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการทดลอง
ขนาดคอลัมน์	เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตร สูง 0.8 เมตร
ความสูงน้ำ	0.7 เมตร
ตัวดูดซึม	น้ำประปา
ตัวถูกดูดซึม	แก๊สออกซิเจน

3.3.3 การศึกษาคอถัมภ์แบบพองอากาศที่เติมตัวกลาง

การทดลองนี้เป็นการเติมตัวกลางคือชนิดพอลลิ่ง ชนิดอานม้า ชนิดชนิดแคสเคดมินิริง ซึ่งมีขนาด 25 38 และ 50 มิลลิเมตร และชนิดแรสซิงริง ซึ่งมีขนาด 25 และ 50 มิลลิเมตร โดยจะมีการเติมตัวกลาง 1% และ 2.5% ของปริมาตรคอถัมภ์ โดยในการทดลองนี้ใช้หัวจ่ายอากาศที่มีรูขนาด 0.4 0.8 และ 1.2 มิลลิเมตร โดยใช้อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 50 และ 100 ลิตรต่อชั่วโมง และใช้อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 12 และ 24 ลิตรต่อนาที และทำการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมและตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์เพื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ 1 ที่ไม่มีการเติมตัวกลาง โดยข้อมูลตัวแปรต้น ตัวแปรตาม และตัวแปรควบคุมในการทดลองนี้ ได้สรุปไว้ในตารางที่ 14 โดยมีแผนการทำงานในการทดลองส่วนนี้ ดังที่สรุปไว้ในรูปที่ 30



รูปที่ 30 ขั้นตอนการเดินระบบในคอถัมภ์แบบพองอากาศโดยการเติมตัวกลาง

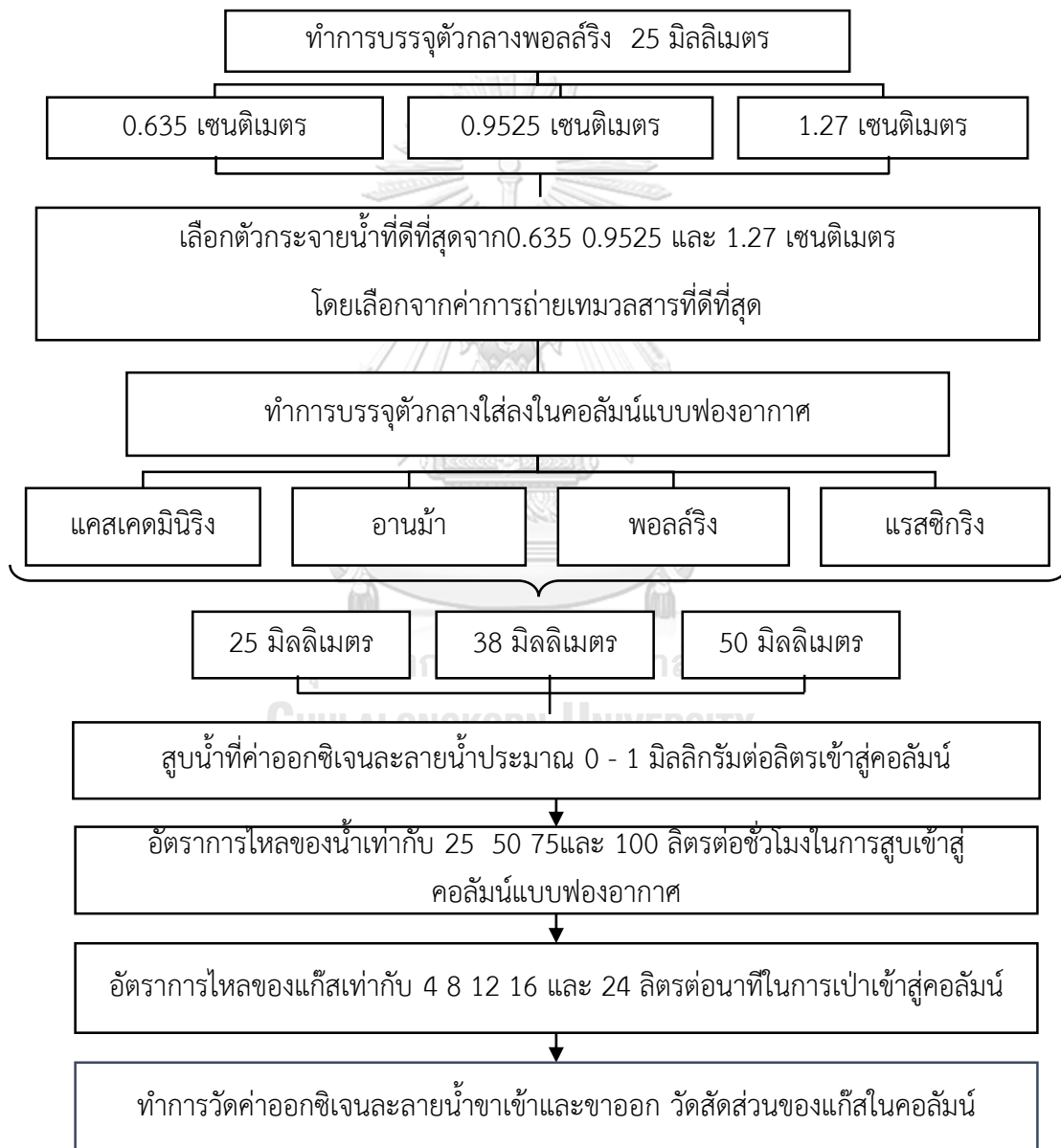
โดยในการทดลองในส่วนนี้ได้มีตัวแปรต้น คือ ขนาดรูหัวจ่ายอากาศ อัตราการไหลของน้ำ อัตราการไหลของแก๊ส ปริมาตรตัวกลางที่ใส่ในคอลัมน์ ขนาดของตัวกลาง และใช้ตัวกลางชนิด พอลลิ่ง อานม้า แคลสเคดมินิริง แรสซิกริง แล้วทำการศึกษาค่าทางด้านอุทกพลศาสตร์ การถ่ายเทมวลสารและพลังงานที่ใช้ในระบบ โดยควบคุมความสูงของน้ำให้คงที่ ดังที่สรุปไว้ดังที่ตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ตัวแปรที่ศึกษาในคอลัมน์แบบฟองอากาศโดยการเติมตัวกลาง

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
ขนาดรูหัวจ่ายอากาศ	0.4 0.8 1.2 มิลลิเมตร
อัตราการไหลของน้ำ	50 100 ลิตรต่อชั่วโมง
อัตราการไหลของแก๊ส	12 24 ลิตรต่อนาที
ปริมาตรตัวกลางที่ใส่ในคอลัมน์	1% 2.5% โดยปริมาตรของเหลวทั้งหมด
ชนิดของตัวกลาง	พอลลิ่ง อานม้า แคลสเคดมินิริง แรสซิกริง
ขนาดของตัวกลาง	25 38 50 มิลลิเมตร
ตัวแปรตาม	วิธีการศึกษา
ตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์	
ขนาดฟอง	คำนวณหาขนาดฟองตามสมการ 3-1
ความเร็วฟอง	คำนวณหาความเร็วฟองตามสมการที่ 3-2
สัดส่วนของแก๊ส	การหาสัดส่วนแก๊สตามสมการที่ 3-3
พื้นที่ผิวจำเพาะ	การหาพื้นที่ผิวจำเพาะตามสมการ 3-4
ตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสารและพลังงาน	
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม	เครื่องวัดออกซิเจนละลายน้ำและสมการ 3-5
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย	ศึกษาตามสมการที่ 3-6
ค่าพลังงานที่ใช้ในระบบ	ศึกษาตามสมการที่ 3-7 3-8 และ 3-9
ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการทดลอง
ขนาดคอลัมน์	เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตร สูง 0.8 เมตร
ความสูงน้ำ	0.7 เมตร
ตัวดูดซึมและตัวถูกดูดซึม	น้ำประปา แก๊สออกซิเจน
ชนิดของตัวกลาง	ชนิดพอลลิ่ง
จำนวนรูหัวเติมอากาศ	ที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 1

3.3.4 การศึกษาคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง

การศึกษาในคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลางจะทำการศึกษาทั้งตัวแปรทางด้านอุทกพลศาสตร์ที่สำคัญของตัวกลางแบบแพ็ค คือ สัดส่วนของเหลวภายในคอลัมน์ (ϵ_L) พื้นที่การถ่ายเทมวลสาร (A) และพื้นที่ผิวจำเพาะ (a) ในขณะที่การศึกษาการถ่ายเทมวลสารจะศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม ($K_L a$) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย (K_L) รวมถึงศึกษาพลังงานที่ใช้ในการดำเนินระบบ ดังแสดงในรูปที่ 31



รูปที่ 31 ขั้นตอนการเดินระบบในคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง

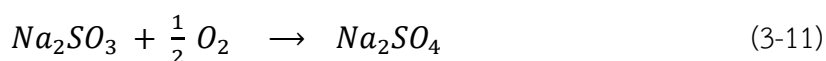
3.3.4.1 การศึกษาตัวแปรทางด้านอุทกพลศาสตร์

การศึกษาตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ในคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลางเพื่อให้ทำให้ได้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่จะเป็นตัวแปรที่สามารถนำไปคำนวณหาค่าการถ่ายเทมวลสารซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญอย่างหนึ่งในการทดลองนี้

1.) สัดส่วนของเหลว (ϵ_l) เป็นสัดส่วนของเหลวที่อยู่ในระบบทั้งหมดระหว่างการดำเนินการ ซึ่งสามารถหาได้จากปริมาณของเหลวที่ไหลค้างอยู่ในคอลัมน์ผ่านตัวกลาง โดยเมื่อทำการหยุดการไหลของเหลวที่เข้าสู่ระบบและทำการวัดปริมาตรของเหลวที่ไหลออกจากคอลัมน์ทั้งหมดนับตั้งแต่วันที่ปิดระบบ (V_l) และเมื่อทำการหาอัตราส่วนระหว่าง (V_l) และปริมาตรทั้งหมดของคอลัมน์ (V_{Total}) จะสามารถคำนวณสัดส่วนของเหลวได้ตามสมการ 3-10

$$\epsilon_l = \frac{V_l}{V_{Total}} \quad (3-10)$$

2.) พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแก๊สและของเหลว (Total area of the gas-liquid interface in the packing, $m^2 : A$) คือพื้นที่ที่ตัวกลางที่แก๊สและของเหลวสัมผัสกันในระบบบนพื้นที่ผิวที่เปียกของแพ็คเกจ (Wet area) ซึ่งเป็นพื้นที่ที่เกิดการถ่ายเทมวลสาร โดยพื้นที่ผิวสัมผัสนี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3-14 โดยทำให้ระบบมีการเกิดการปฏิกิริยาทางเคมีที่ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาที่สูง (k_1) เพื่อให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร (k_L) เป็นค่าที่น้อยมากจนไม่ถูกนำมาคำนวณในสมการ โดยพื้นที่ผิวสัมผัส (A) จะสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3-15 ทั้งนี้ปฏิกิริยาทางเคมีที่ใช้ในระบบคือ ปฏิกิริยาระหว่าง โซเดียมซัลไฟด์และออกซิเจน ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์ซัลเฟต ดังแสดงในสมการที่ 3-11 โดยสมการนี้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี ดังแสดงในสมการที่ 3-12 (Yagi และInoue, 1962)



$$\frac{d[O_2]}{dt} = -1.4(1 + 1.46 \times 10^7 [CoSO_2]) \times [O_2][Na_2SO_3] \text{ g mol/l.sec} \quad (3-12)$$

โดยค่าการถ่ายเทมวลสารของออกซิเจน (N_{O_2}) สามารถคำนวณได้จากการวัดออกซิเจนใน ภาวอากาศหลังการถ่ายเทมวลสาร โดยการหักลบกับความเข้มข้นออกซิเจนขาเข้า ดังแสดงในสมการ 3-13 และนำไปรวมสมการของ (Danckwerts, 1970) Danckwerts' mass-

transfer model ดังแสดงในสมการที่ 3-14 ได้สมการใหม่เพื่อหาค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแก๊สและของเหลว ดังแสดงในสมการที่ 3-15

$$N_{O_2} = C_{O_2,in} - C_{O_2,out} \quad (3-13)$$

$$N_{O_2} = \sqrt{Dk_1 + k_L^2} AC_{O_2} \quad (3-14)$$

$$A = \frac{N_{O_2}}{\sqrt{Dk_1} C_{O_2}} \quad (3-15)$$

โดยที่	A	=	พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแก๊สและของเหลว (ตารางเมตร)
	N_{O_2}	=	อัตราการดูดซึมออกซิเจน (โมลต่อวินาที)
	D	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ออกซิเจนในน้ำ (ตารางเมตรต่อวินาที)
	k_1	=	ปฏิกิริยาเคมีอันดับหนึ่ง (วินาที ⁻¹)
	k_L	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร (เมตรต่อวินาที)
	C_{O_2}	=	ความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจน (โมลต่อลิตร)

3.) พื้นที่ผิวจำเพาะ (a) คือ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสทั้งหมด (A) และปริมาตรทั้งหมด (V) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3-16 ซึ่งเป็นตัวแปรที่สามารถใช้เปรียบเทียบได้โดยตรงระหว่างคอลัมน์แบบฟองอากาศและคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง

$$a = \frac{A}{V} \quad (3-16)$$

การทดลองนี้จะมีการบรรจุตัวกลางลงในคอลัมน์ 4 ชนิดคือ ชนิดแรสชิกริง (Raschig ring) ขนาด 25 มม. 50 มม. ชนิดพอลลิ่งริง (Pall ring) ชนิดอานม้า (Intralox saddle ring) ชนิดแคสเคดมินิริง (Cascade mini ring) ที่มีขนาด 25 38 และ 50 มิลลิเมตร ซึ่งจะทำการบรรจุครั้งละ 1 ชนิด และ 1 ขนาด บรรจุตัวกลางสูง 60 เซนติเมตร ก่อนจะทำการเดินระบบ โดยการหาตัวแปรที่เหมาะสมจากการใช้อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 4 8 12 16 และ 24 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 25 50 75 และ 100 ลิตรต่อชั่วโมง เพื่อพิจารณาค่าทางอุทกพลศาสตร์ ดังที่สรุปไว้ในตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ตัวแปรที่ศึกษาด้านอุทกพลศาสตร์ในคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
อัตราการไหลของน้ำ	25 50 75 100 ลิตรต่อชั่วโมง
อัตราการไหลของแก๊ส	4 8 12 16 24 ลิตรต่อนาที
ชนิดของตัวกลาง	แอสซิงกริง พอลลิ่งริง อานม้า แคสเคดมินิริง
ขนาดของตัวกลาง	25 38 50 มิลลิเมตร
ตัวแปรตาม	วิธีการศึกษา
สัดส่วนของเหลว	ศึกษาตามสมการที่ 3-10
พื้นที่ถ่ายเทมวลสารระหว่างวัฏภาค	ศึกษาตามสมการที่ 3-15
พื้นที่ผิวจำเพาะ	ศึกษาตามสมการที่ 3-16
ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการทดลอง
ขนาดคอลัมน์	เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตร สูง 0.8 เมตร
ความสูงของตัวกลาง	0.6 เมตร
ตัวดูดซึม	น้ำประปา
ตัวถูกดูดซึม	แก๊สออกซิเจน
ตัวกระจายน้ำ	เลือกตัวกระจายน้ำที่ดีที่สุดจาก 0.635 ซม. 0.9525 ซม. และ 1.27 ซม.

3.3.4.2 การศึกษาตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสารและพลังงานงานที่ใช้

การศึกษาอัตราการถ่ายเทมวลสารสามารถทำได้โดยการวัดความแตกต่างของออกซิเจนก่อนและหลังการถ่ายเทมวลสาร โดยใช้เครื่องมือวัดออกซิเจนละลายน้ำ ซึ่งความเข้มข้นเริ่มต้นของออกซิเจนจะมีค่าใกล้เคียง 0 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากน้ำประปาด้านขาเข้าจะถูกเป่าด้วยไนโตรเจน จะสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมจากสมการ 3-17

$$K_L a = \frac{Q_L(C_{out} - C_{in})}{\Delta C_{in, mean} \cdot V_{Total}} \quad (3-17)$$

C_{in} = ค่าออกซิเจนละลายน้ำขาเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_{out} = ค่าออกซิเจนละลายน้ำขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$$\begin{aligned}
 Q_L &= \text{อัตราการไหลของเหลว (ลิตรต่อวินาที)} \\
 V &= \text{ปริมาตรคอลัมน์ (ลิตร)} \\
 \Delta C_{In,mean} &= \text{ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นแบบเฉลี่ยลอการิทึม} \\
 \Delta C_{In,mean} &= \frac{(C_{in}^* - C_{out}) - (C_{out}^* - C_{in})}{\ln\left(\frac{C_{in}^* - C_{out}}{C_{out}^* - C_{in}}\right)} \quad (3-18)
 \end{aligned}$$

นอกจากนี้ ยังสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย ได้จากอัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมและพื้นที่ผิวจำเพาะ ดังแสดงในสมการที่ 3-19

$$K_L = \frac{K_L a}{a} \quad (3-19)$$

$$\begin{aligned}
 \text{โดยที่ } K_L &= \text{ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย (เมตร/วินาที)} \\
 K_L a &= \text{ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม (วินาที}^{-1}\text{)} \\
 a &= \text{พื้นที่ผิวจำเพาะ (เมตร}^{-1}\text{)}
 \end{aligned}$$

ทั้งนี้ พลังงานที่ใช้ในระบบจำเพาะ (Specific Power Consumption, P/V) จะสามารถคำนวณได้จากอัตราการไหลของของเหลว อัตราการไหลของแก๊ส และความดันก่อนเข้าสู่ระบบของทั้งแก๊สและของเหลว ดังแสดงในสมการที่ 3-21 และ 3-22 โดยสามารถคำนวณหาพลังงานที่ใช้ในระบบรวมได้จากผลรวมของพลังงานที่ใช้ในเฟสแก๊สและของเหลว ดังแสดงในสมการที่ 3-20

$$P/V_{Total} = (P/V)_{gas} + (P/V)_{liquid} \quad (3-20)$$

$$(P/V)_{gas} = Q_g \cdot \Delta P_g / V \quad (3-21)$$

$$(P/V)_{liquid} = Q_l \cdot \Delta P_l / V \quad (3-22)$$

$$\begin{aligned}
 \text{โดยที่ } P/V_{Total} &= \text{พลังงานที่ใช้ในระบบรวม (วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร)} \\
 (P/V)_{gas} &= \text{ค่าพลังงานที่ใช้ของแก๊ส (วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร)} \\
 Q_g &= \text{อัตราการไหลของแก๊ส (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)} \\
 \Delta P_g &= \text{ความดันลดของแก๊ส (นิวตันต่อตารางเมตร)} \\
 (P/V)_{liquid} &= \text{ค่าพลังงานที่ใช้ของของเหลว (วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร)} \\
 Q_l &= \text{อัตราการไหลของของเหลว (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)} \\
 \Delta P_l &= \text{ความดันลดของของเหลว (นิวตันต่อตารางเมตร)} \\
 V &= \text{ปริมาตรของคอลัมน์ (ลูกบาศก์เมตร)}
 \end{aligned}$$

การทดลองนี้จะมีการบรรจุตัวกลางลงในคอลัมน์ 4 ชนิดคือ ชนิดแรสซิกริง (Raschig ring) ขนาด 25 และ 50 มิลลิเมตร ชนิดพอลล์ริง (Pall ring) ชนิดอานม้า (Intralox saddle ring) ชนิดแคสเคดมินิริง (Cascade mini ring) ที่มีขนาด 25 38 และ 50 มิลลิเมตร ซึ่งจะมีการบรรจุ ครั้งละ 1 ชนิด และ 1 ขนาด บรรจุตัวกลางสูง 60 เซนติเมตร ก่อนจะทำการเดินระบบ โดยการหาตัวแปรที่เหมาะสมจากการใช้อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 4 8 12 16 และ 24 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 25 50 75 และ 100 ลิตรต่อชั่วโมง เพื่อพิจารณาค่าทางด้านการถ่ายเทมวลสารและพลังงานงานที่ใช้ ดังที่สรุปไว้ในตารางที่ 16

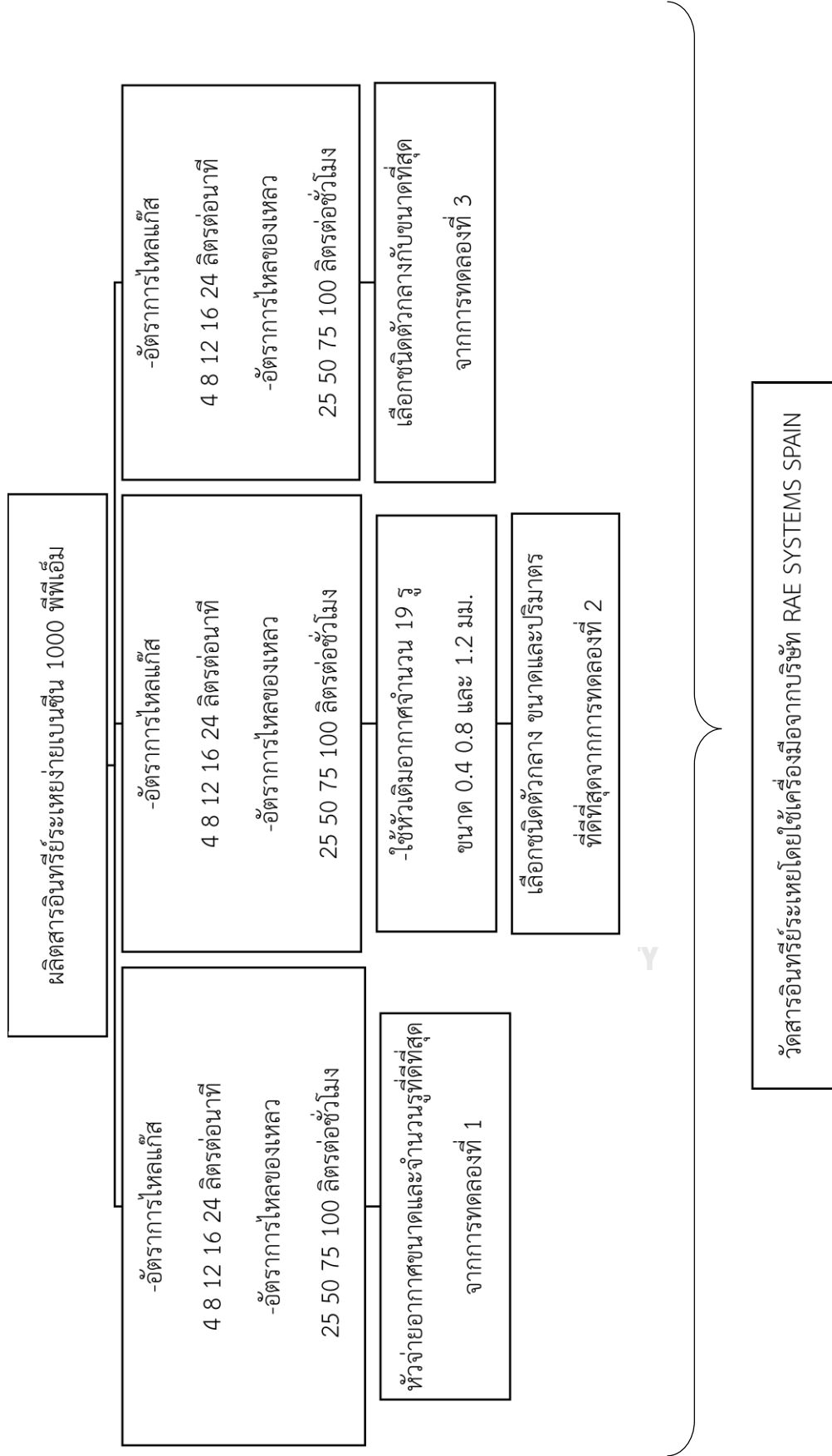
ตารางที่ 16 ตัวแปรที่ศึกษาด้านการถ่ายเทมวลสารและพลังงานงานที่ใช้ในคอลัมน์บรรจุตัวกลาง

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
อัตราการไหลของน้ำ	25 50 75 100 ลิตรต่อชั่วโมง
อัตราการไหลของแก๊ส	4 8 12 16 24 ลิตรต่อนาที
ชนิดของตัวกลาง	แรสซิกริง พอลล์ริง อานม้า แคสเคดมินิริง
ขนาดของตัวกลาง	25 38 50 มิลลิเมตร
ตัวแปรตาม	วิธีการศึกษา
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม	ศึกษาตามสมการที่ 3-17
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย	ศึกษาตามสมการที่ 3-19
พลังงานที่ใช้ในระบบ	ศึกษาตามสมการที่ 3-20
ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการทดลอง
ขนาดคอลัมน์	เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตร สูง 0.8 เมตร
ความสูงของตัวกลาง	0.6 เมตร
ตัวดูดซึม	น้ำประปา
ตัวถูกดูดซึม	แก๊สออกซิเจน
ตัวกระจายน้ำ	เลือกตัวกระจายน้ำที่ดีที่สุดจาก 0.635 0.9525 และ 1.27 เซนติเมตร

3.3.5 การศึกษาแนวทางการนำไปประยุกต์ใช้กับการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย

การทดลองนี้เป็นการใช้คอลัมน์แบบฟองอากาศ คอลัมน์แบบฟองอากาศชนิดเติมตัวกลาง และคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง ในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายเบนซีน (Benzene) ด้วยความเข้มข้น 1000 พีพีเอ็ม โดยจะใช้อัตราการไหลของแก๊สและอัตราการไหลของเหลวที่ดีที่สุด จากการทดลองที่ 1 2 และ 3 ทำการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม (Mass transfer coefficient: $K_L a$) ค่าพลังงานที่ใช้ในระบบ (Power consumption) และประสิทธิภาพในการบำบัด (Treatment efficiency) ดังแสดงในรูปที่ 32





รูปที่ 32 ขั้นตอนการเดินระบบในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย

3.3.5.1 การศึกษาตัวแปรในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย

การศึกษาตัวแปรในการทดลองนี้จะศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการถ่ายเทมวลสารที่จะเกิดในคอลัมน์ที่สามารถบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายจากความเข้มข้น 1000 พีพีเอ็ม เป็นการดูดซึมจากวัฏภาคของอินทรีย์ระเหยสู่วัฏภาคของน้ำจนถึงจุดความสามารถที่จะดูดซึมได้

1.) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม (Mass transfer coefficient: $K_L a$) ของทั้งสองคอลัมน์สามารถหาโดยสมการที่ 3-23 โดยที่คอลัมน์แบบฟองอากาศจะหาค่าความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นแบบเฉลี่ยลอการิทึมในสมการที่ 3-24 และคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลางใช้สมการที่ 3-25

$$K_L a = \frac{Q_g(C_{in} - C_{out})}{\Delta C_{In,mean} \cdot V_{Total}} \quad (3-23)$$

$$\Delta C_{In,mean} = \frac{(C_{in}^* - C_{out}) - (C_{out}^* - C_{out})}{\ln\left(\frac{C_{in}^* - C_{out}}{C_{out}^* - C_{out}}\right)} \quad (3-24)$$

$$\Delta C_{In,mean} = \frac{(C_{out}^* - C_{in}) - (C_{in}^* - C_{out})}{\ln\left(\frac{C_{out}^* - C_{in}}{C_{in}^* - C_{out}}\right)} \quad (3-25)$$

โดยที่	Q_g	=	อัตราการไหลของแก๊ส (ลิตรต่อนาที)
	C_{in}^*	=	ความเข้มข้นอิ่มตัวเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	C_{out}^*	=	ความเข้มข้นอิ่มตัวออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	C_{in}	=	ความเข้มข้นออกซิเจนขาเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	C_{out}	=	ความเข้มข้นออกซิเจนขาเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	V_{Total}	=	ปริมาตรของคอลัมน์
	$\Delta C_{In,mean}$	=	ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นแบบเฉลี่ยลอการิทึม

2.) ค่าพลังงานที่ใช้ในระบบ (Power consumption) จะสามารถคำนวณได้จาก อัตราการไหลของของเหลว อัตราการไหลของแก๊ส และความดันก่อนเข้าสู่ระบบของทั้งแก๊สและของเหลว ดังแสดงในสมการที่ 3-27 และ 3-28 โดยสามารถคำนวณหาพลังงานที่ใช้ในระบบรวมได้จาก (P/V_{Total}) ผลรวมของพลังงานที่ใช้ในวัฏภาคแก๊สและของเหลว ดังแสดงในสมการที่ 3-26

$$P/V_{Total} = (P/V)_{gas} + (P/V)_{liquid} \quad (3-26)$$

$$(P/V)_{gas} = Q_g \cdot \Delta P_g / V \quad (3-27)$$

$$(P/V)_{liquid} = Q_l \cdot \Delta P_l / V \quad (3-28)$$

โดยที่	P/V_{Total}	=	พลังงานที่ใช้ในระบบรวม (วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร)
	$(P/V)_{gas}$	=	ค่าพลังงานที่ใช้ของแก๊ส (วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร)
	Q_g	=	อัตราการไหลของแก๊ส (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)
	ΔP_g	=	ความดันลดของแก๊ส (นิวตันต่อตารางเมตร)
	$(P/V)_{liquid}$	=	ค่าพลังงานที่ใช้ของของเหลว (วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร)
	Q_l	=	อัตราการไหลของของเหลว (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)
	ΔP_l	=	ความดันลดของของเหลว (นิวตันต่อตารางเมตร)
	V	=	ปริมาตรของคอลัมน์ (ลูกบาศก์เมตร)

3.) ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Treatment efficiency) คำนวณได้จากสมการที่ 3-29 เป็นตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดขึ้นในคอลัมน์

$$Eff (\%) = \frac{C_{inlet} - C_{outlet}}{C_{inlet}} \times 100 \quad (3-29)$$

โดยที่	$Eff (\%)$	=	ประสิทธิภาพในการบำบัด
	C_{inlet}	=	ความเข้มข้นสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่เข้าระบบ
	C_{outlet}	=	ความเข้มข้นสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ออกจากระบบ

โดยในการทดลองคอลัมน์แบบฟองอากาศในส่วนนี้ได้มีตัวแปรต้น คือ อัตราการไหลของน้ำ และอัตราการไหลของแก๊ส และมีตัวแปรควบคุมที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 1 และ 2 คือ ขนาดรูหัวจ่ายอากาศ จำนวนรูของหัวจ่ายอากาศ ขนาดของตัวกลาง และชนิดของตัวกลางนำมาใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายเบนซีน (Benzene) ด้วยความเข้มข้น 1000 พีพีเอ็ม แล้วทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม พลังงานที่ใช้ในระบบและประสิทธิภาพในการบำบัด ดังที่สรุปไว้ดังที่ตารางที่ 17

ตารางที่ 17 ตัวแปรที่ศึกษาในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยโดยใช้คอลัมน์แบบฟองอากาศ

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
อัตราการไหลของเหลว	25 50 75 100 ลิตรต่อชั่วโมง
อัตราการไหลของแก๊ส	4 8 12 16 24 ลิตรต่อนาที
ตัวแปรตาม	วิธีการศึกษา
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม	ศึกษาตามสมการที่ 3-23
พลังงานที่ใช้ในระบบ	ศึกษาตามสมการที่ 3-26
ประสิทธิภาพในการบำบัด	ศึกษาตามสมการที่ 3-29
ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการทดลอง
ขนาดคอลัมน์	เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตร สูง 0.8 เมตร
ความสูงของน้ำ	0.7 เมตร
ตัวดูดซึม	น้ำประปา
ตัวถูกดูดซึม	เบนซีน 1000 พีพีเอ็ม
ขนาดรูหัวจ่ายอากาศ	เลือกที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 1
จำนวนรูของหัวจ่ายอากาศ	เลือกที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 1
ชนิดของตัวกลาง	เลือกที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 2
ขนาดของตัวกลาง	เลือกที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 2
ปริมาตรตัวกลางที่ใส่ในคอลัมน์	เลือกที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 2

โดยในการทดลองคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลางในส่วนนี้ได้มีตัวแปรต้น คือ อัตราการไหลของน้ำ และอัตราการไหลของแก๊ส และมีตัวแปรควบคุมที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3 คือ ตัวกระจายน้ำ ขนาดของตัวกลาง และชนิดของตัวกลางนำมาใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย เบนซีน (Benzene) ด้วยความเข้มข้น 1000 พีพีเอ็ม แล้วทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม พลังงานที่ใช้ในระบบและประสิทธิภาพในการบำบัด ดังที่สรุปไว้ดังที่ตารางที่ 18

ตารางที่ 18 ตัวแปรที่ศึกษาในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยโดยใช้คอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
อัตราการไหลของเหลว	25 50 75 100 ลิตรต่อชั่วโมง
อัตราการไหลของแก๊ส	4 8 12 16 24 ลิตรต่อนาที
ตัวแปรตาม	วิธีการศึกษา
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม	ศึกษาตามสมการที่ 3-23
พลังงานที่ใช้ในระบบ	ศึกษาตามสมการที่ 3-26
ประสิทธิภาพในการบำบัด	ศึกษาตามสมการที่ 3-29
ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการทดลอง
ขนาดคอลัมน์	เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตร สูง 0.8 เมตร
ความสูงของตัวกลาง	0.6 เมตร
ตัวดูดซึม	น้ำประปา
ตัวถูกดูดซึม	เบนซีน 1000 พีพีเอ็ม
ตัวกระจายน้ำ	เลือกที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3
ชนิดของตัวกลาง	เลือกที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3
ขนาดของตัวกลาง	เลือกที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการดูดซึมแก๊สออกซิเจนในคอลัมน์แบบพองอากาศ คอลัมน์แบบพองอากาศชนิดเต็มตัวกลาง และคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง โดยจะมีการศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ อัตราการไหลแก๊ส อัตราการไหลของเหลว ขนาดหัวจ่ายอากาศ ชนิดตัวกลาง รูปร่างตัวกลาง ปริมาณตัวกลาง ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะมีผลต่อตัวแปรทางด้านอุทกพลศาสตร์ การถ่ายเทมวลสาร และพลังงานที่ใช้ในการดำเนินระบบ นอกจากนี้ยังนำตัวแปรที่ดีที่สุดในแต่ละคอลัมน์มาประยุกต์ใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายเบนซีน โดยงานวิจัยนี้ได้ผลดำเนินงานวิจัย และแบ่งเป็นหัวข้อ ดังต่อไปนี้

4.1 ผลการศึกษาคอลัมน์แบบพองอากาศ

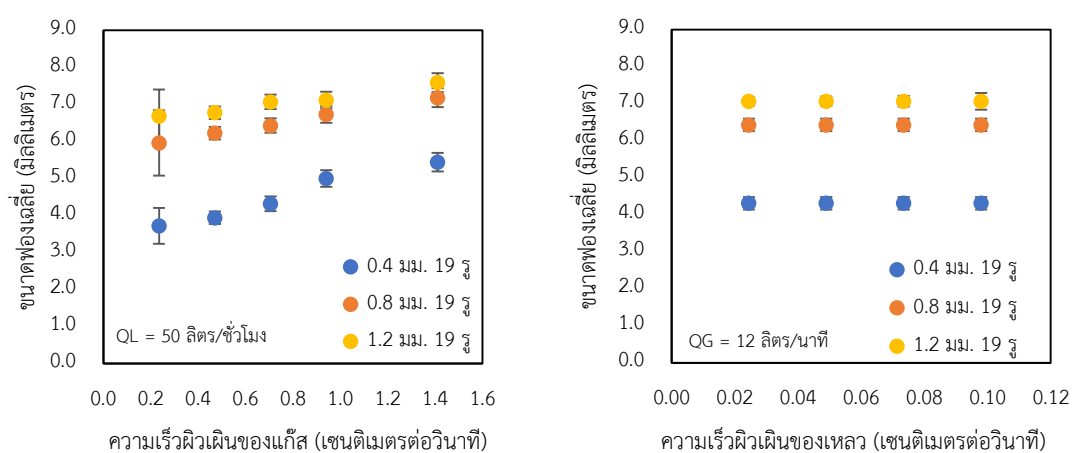
ผลจากการศึกษาคอลัมน์แบบพองอากาศเป็นการศึกษาตัวแปร โดยใช้หัวจ่ายอากาศที่มีขนาด 0.4 0.8 และ 1.2 มิลลิเมตร ซึ่งหัวจ่ายอากาศแต่ละขนาดจะมี 19 และ 38 รู ที่ใช้อัตราการไหลของแก๊สและอัตราการไหลของเหลวที่แตกต่างกัน ที่มีผลต่อตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ ตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสารและพลังงานที่ใช้ ดังต่อไปนี้

4.1.1 ผลการศึกษาตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์

4.1.1.1 ขนาดพองอากาศ

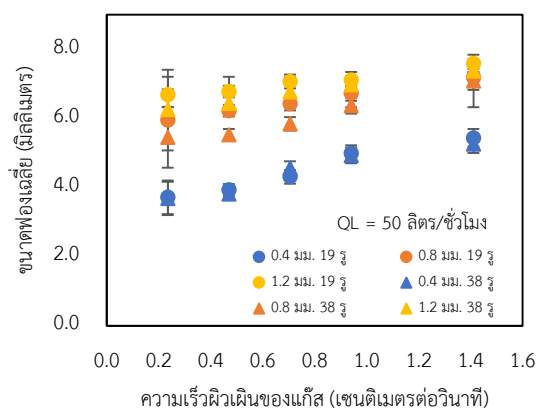
จากรูปที่ 33 แสดงถึงขนาดของพองอากาศเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจากหัวจ่ายอากาศที่มีขนาด 0.4 0.8 และ 1.2 มิลลิเมตร จำนวน 19 รู เมื่อทำการเปรียบเทียบกับความเร็วผิวผิวนของแก๊สที่อยู่ในช่วง 0.24 – 1.41 เซนติเมตรต่อวินาที พบว่า หัวจ่ายอากาศขนาด 0.4 มิลลิเมตร จำนวน 19 รูสามารถสร้างพองเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในคอลัมน์ได้เล็กที่สุดอยู่ในช่วง $3.72 - 5.44 \pm 0.22$ มิลลิเมตร ซึ่งได้ค่า P-value ที่ได้จาก Anova มีค่าเท่ากับ 6.8×10^{-31} หัวจ่ายอากาศขนาด 0.8 มิลลิเมตร จำนวน 19 รู สามารถสร้างขนาดพองเฉลี่ยอยู่ในช่วง $5.96 - 7.18 \pm 0.4$ มิลลิเมตร ซึ่งได้ค่า P-value ที่ได้จาก Anova มีค่าเท่ากับ 1.03×10^{-16} และหัวจ่ายอากาศขนาด 1.2 มิลลิเมตร จำนวน 19 รู สามารถสร้างขนาดพองเฉลี่ยที่ใหญ่ที่สุดอยู่ในช่วง $6.68 - 7.59 \pm 0.3$ มิลลิเมตร ซึ่งได้ค่า P-value ที่ได้จาก Anova มีค่าเท่ากับ 0.027 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 ซึ่งแสดงถึงการแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญของขนาดพองเมื่อมีการเปลี่ยนความเร็วผิวผิวน

ทั้งนี้ การเพิ่มขึ้นของความเร็วผิวเดินของแก๊สที่ส่งผลต่อการเพิ่มขนาดของฟองเป็นผลมาจากแรงตึงผิวบริเวณรูหัวจ่ายอากาศของหัวจ่ายขนาดใหญ่มีความตึงผิวน้อยกว่าหัวจ่ายขนาดเล็ก ซึ่งได้ผลเหมือนกันกับ (Yang, Du และ Fan, 2007) ความเร็วของแก๊สที่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้ขนาดของฟองใหญ่กว่าฟองที่เกิดจากความเร็วน้อยกว่า นอกจากนี้ จำนวนฟองอากาศที่มากขึ้นจะส่งผลให้ฟองสามารถรวมตัวกันได้ในช่วงการลอยตัว และทำให้ฟองใหญ่มากขึ้น (Kumar และคณะ, 1976) นอกจากนี้ เมื่อทำการเปรียบเทียบกับความเร็วผิวเดินของเหลวที่อยู่ในช่วง 0.02 – 0.1 เซนติเมตรต่อวินาที พบว่า การเพิ่มความเร็วผิวเดินของเหลวที่หัวจ่ายอากาศทุกขนาดไม่มีผลกระทบต่อขนาดฟองเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในคอลัมน์



รูปที่ 33 ผลกระทบของหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ จำนวน 19 รู ต่อขนาดฟองเฉลี่ย (ซ้าย) เปรียบเทียบกับความเร็วของแก๊ส (ขวา) เปรียบเทียบกับความเร็วของเหลว

นอกจากนี้ เมื่อทำการเปรียบเทียบขนาดฟองในคอลัมน์เมื่อใช้จำนวนรูที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 34 สำหรับหัวจ่ายอากาศขนาด 0.4 0.8 และ 1.2 มิลลิเมตร ที่มีจำนวนรู 19 รู และ 38 รู พบว่า หัวจ่ายอากาศขนาด 0.4 มิลลิเมตร จำนวน 38 รูสามารถสร้างฟองเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในคอลัมน์อยู่ในช่วง $3.69 - 5.26 \pm 0.34$ มิลลิเมตร หัวจ่ายอากาศขนาด 0.8 มิลลิเมตร จำนวน 38 รูสามารถสร้างฟองเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในคอลัมน์อยู่ในช่วง $5.46 - 7.08 \pm 0.46$ มิลลิเมตร และหัวจ่ายอากาศขนาด 1.2 มิลลิเมตร จำนวน 38 รูสามารถสร้างฟองเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในคอลัมน์อยู่ในช่วง $6.26 - 7.37 \pm 0.37$ มิลลิเมตร ดังนั้นการเปรียบเทียบจำนวนรูของหัวจ่ายอากาศ 38 รู มีขนาดฟองที่เล็กกว่าหัวจ่ายอากาศที่มีจำนวนรู 19 รู เพียงเล็กน้อย ซึ่งไม่แตกต่างกันแบบมีนัยสำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับหัวจ่ายอากาศขนาด 0.4 มิลลิเมตร

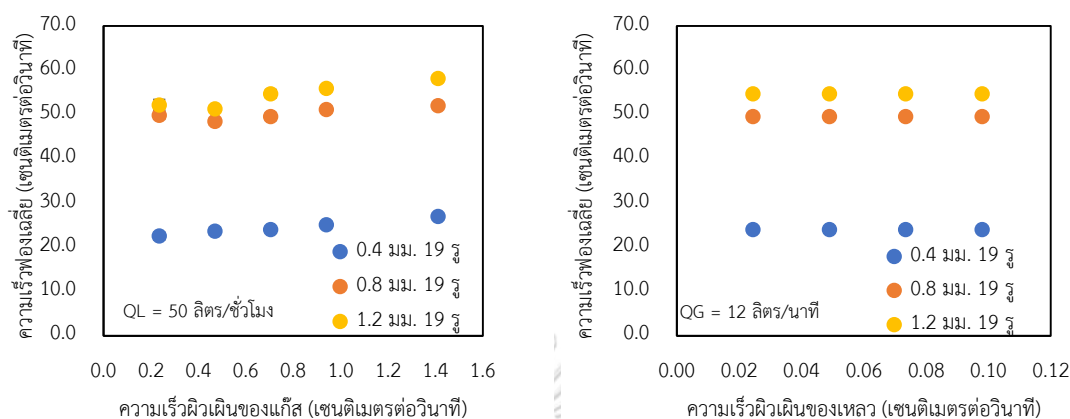


รูปที่ 34 ผลกระทบของหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ จำนวน 19 รูและ 38 รู ต่อขนาดฟองเฉลี่ยที่อัตราการไหลของเหลว 50 ลิตร/ชั่วโมง

4.1.1.2 ความเร็วฟองเฉลี่ย

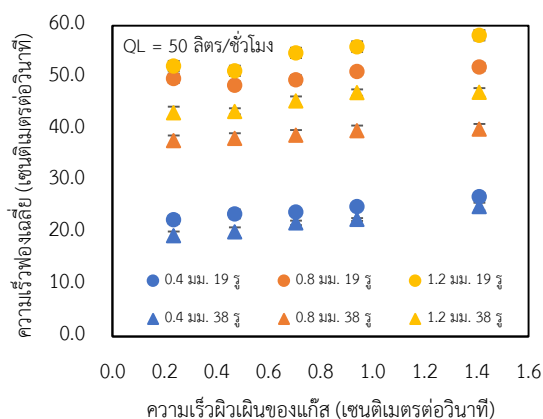
จากรูปที่ 35 แสดงถึงความเร็วของฟองอากาศเฉลี่ยในการลอยตัวที่เกิดจากหัวจ่ายอากาศขนาด 0.4 0.8 และ 1.2 มิลลิเมตร จำนวน 19 รู เมื่อทำการเปรียบเทียบกับความเร็วของแก๊ส พบว่าความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลงในแต่ละหัวจ่ายอากาศ โดยที่ ฟองขนาดเล็กที่เกิดจากหัวจ่ายอากาศขนาด 0.4 มิลลิเมตร จะมีความเร็วฟองเฉลี่ยน้อยที่สุดอยู่ในช่วง $22.55 - 26.97 \pm 0.72$ เซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งได้ค่า P-value ที่ได้จาก Anova มีค่าเท่ากับ 2.49×10^{-9} ซึ่งมิต้าน้อยกว่า 0.05 ที่หมายความว่ามีผลแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ความเร็วฟองอากาศที่เกิดจากหัวจ่ายขนาด 0.8 มิลลิเมตร มีความเร็วฟองเฉลี่ยอยู่ในช่วง $49.82 - 52.01 \pm 0.76$ เซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งได้ค่า P-value ที่ได้จาก Anova มีค่าเท่ากับ 9.47×10^{-6} ซึ่งมิต้าน้อยกว่า 0.05 ที่หมายความว่ามีผลแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ และความเร็วฟองอากาศที่เกิดจากหัวจ่ายขนาด 1.2 มิลลิเมตร มีความเร็วฟองเฉลี่ยอยู่มากที่สุดในช่วง $52.19 - 58.13 \pm 0.52$ เซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งได้ค่า P-value ที่ได้จาก Anova มีค่าเท่ากับ 1.9×10^{-10} ซึ่งมิต้าน้อยกว่า 0.05 ที่หมายความว่ามีผลแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการเพิ่มความเร็วของแก๊สและการเพิ่มของขนาดรูหัวจ่ายอากาศจะเป็นการเพิ่มจำนวนฟองอากาศในคอลัมน์ในเกิดการรวมตัวกันมากขึ้นฟองใหญ่จะมีความเร็วเพิ่มขึ้นและจะออกจากระบบได้อย่างรวดเร็ว และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับความเร็วผิวเผินของเหลวที่อยู่ในช่วง 0.02 - 0.1 เซนติเมตรต่อวินาที พบว่า การเพิ่มความเร็วของเหลวที่หัวจ่ายอากาศทุกขนาดไม่มีผลกระทบต่อขนาดฟองเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในคอลัมน์ ดังนั้น

ขนาดของฟองเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในแต่ละหัวจ่ายอากาศได้รับผลกระทบโดยตรงจากขนาดของรูหัวจ่ายอากาศในแต่ละหัวจ่ายอากาศ



รูปที่ 35 ผลกระทบของหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ จำนวน 19 รู ต่อความเร็วฟองเฉลี่ย (ซ้าย) เปรียบเทียบกับความเร็วของแก๊ส (ขวา) เปรียบเทียบกับความเร็วของเหลว

จากรูปที่ 36 แสดงให้เห็นถึงความเร็วฟองเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในหัวจ่ายอากาศขนาด 0.4 0.8 และ 1.2 มิลลิเมตร ที่มีจำนวนรู 19 รู และ 38 รู พบว่า การเพิ่มจำนวนรูเป็น 38 รู ในทุกหัวจ่ายอากาศจะทำความเร็วเฉลี่ยของฟองอากาศมีความเร็วลดลงกว่าความเร็วที่เกิดขึ้นในหัวจ่ายอากาศที่มีจำนวน 19 รู โดยหัวจ่ายอากาศขนาด 0.4 มิลลิเมตร 38 รู มีความเร็วฟองเฉลี่ยอยู่ในช่วง $19.46 - 25.06 \pm 0.65$ เซนติเมตรต่อวินาที หัวจ่ายอากาศขนาด 0.8 มิลลิเมตร 38 รู มีความเร็วฟองเฉลี่ยอยู่ในช่วง $37.78 - 40.05 \pm 0.69$ เซนติเมตรต่อวินาที และหัวจ่ายอากาศขนาด 1.2 มิลลิเมตร 38 รู มีความเร็วฟองเฉลี่ย $43.19 - 47.11 \pm 0.55$ เซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งการเพิ่มจำนวนรูในหัวจ่ายอากาศจะทำให้ฟองมีขนาดเล็กกว่าเดิมซึ่งฟองที่มีขนาดเล็กจะมีความเร็วที่ช้าและลอยตัวอยู่ในระบบได้นานขึ้น (Longo, 2006)

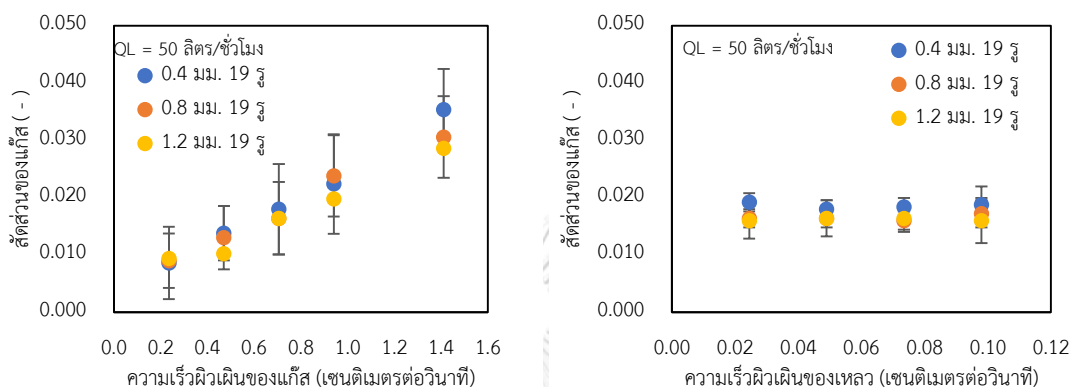


รูปที่ 36 ผลกระทบของหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ จำนวน 19 รูและ 38 รู ต่อความเร็วฟองที่อัตราการไหลของเหลว 50 ลิตร/ชั่วโมง

4.1.1.3 สัดส่วนของแก๊ส

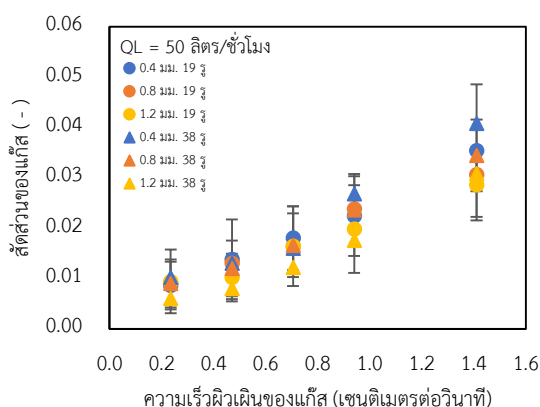
จากรูปที่ 37 แสดงถึงสัดส่วนของแก๊สที่เกิดจากหัวจ่ายอากาศขนาด 0.4 0.8 และ 1.2 มิลลิเมตร จำนวน 19 รู เทียบกับความเร็วของของแก๊สที่อยู่ในช่วง 0.24 – 1.41 เซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สัดส่วนของแก๊สในหัวจ่ายอากาศทุกขนาดมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น เมื่อความเร็วผิวเผินของแก๊สเพิ่มขึ้น โดยหัวจ่ายอากาศขนาด 0.4 มิลลิเมตร มีสัดส่วนของแก๊สอยู่ในช่วง $0.0086 - 0.0354 \pm 0.0041$ ซึ่งได้ค่า P-value ที่ได้จาก Anova มีค่าเท่ากับ 0.0062 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่หมายความว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ หัวจ่ายอากาศขนาด 0.8 มิลลิเมตร มีสัดส่วนของแก๊สอยู่ในช่วง $0.009 - 0.0306 \pm 0.0048$ ซึ่งได้ค่า P-value ที่ได้จาก Anova มีค่าเท่ากับ 2.8×10^{-5} ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่หมายความว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญและหัวจ่ายอากาศขนาด 1.2 มิลลิเมตร มีสัดส่วนของแก๊สอยู่ในช่วง $0.0094 - 0.0286 \pm 0.0055$ ซึ่งได้ค่า P-value ที่ได้จาก Anova มีค่าเท่ากับ 0.00034 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่หมายความว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการเพิ่มความเร็วของแก๊สจะมีความสอดคล้องกับขนาดของฟองและความเร็วฟอง โดยที่หัวจ่ายอากาศขนาดใหญ่จะสร้างฟองที่มีขนาดใหญ่ทำให้ความเร็วฟองอากาศลอยตัวออกจากระบบได้อย่างรวดเร็ว จึงให้มีการกักเก็บแก๊สไว้ในระบบได้น้อยกว่าหัวจ่ายที่มีรูขนาดเล็กจะสามารถสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก ซึ่งส่งผลให้ฟองมีความเร็วลอยตัวอยู่ในระบบได้นานขึ้น ที่สอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ (Wongwailikhit, 2018) จึงทำให้มีสัดส่วนของแก๊สมากที่สุด

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วผิวผื่นของเหลว พบว่า การเพิ่มความเร็วของเหลวไม่มีผลกระทบต่อสัดส่วนของแก๊ส (Akita และ Yoshida, 1973) เนื่องจากสัดส่วนแก๊สที่เกิดขึ้นในแต่ละหัวจ่ายอากาศได้รับผลกระทบโดยตรงจากขนาดของรูหัวจ่ายอากาศในแต่ละหัวจ่ายอากาศและคอลัมน์แบบฟองอากาศถูกควบคุมด้วยวิฤภาคของแก๊สเป็นหลัก



รูปที่ 37 ผลกระทบของหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ จำนวน 19 รู ต่อสัดส่วนของแก๊ส (ซ้าย) เปรียบเทียบกับความเร็วของแก๊ส (ขวา) เปรียบเทียบกับความเร็วของเหลว

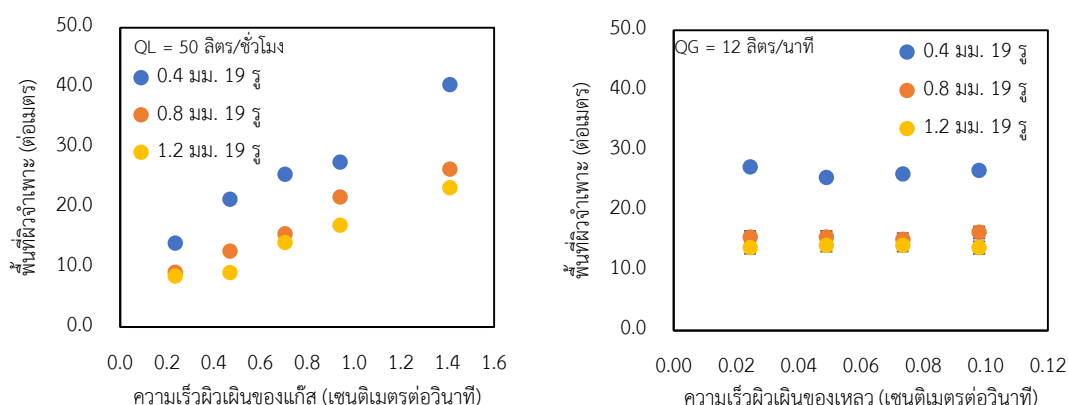
จากรูปที่ 38 แสดงถึงผลกระทบของหัวจ่ายอากาศขนาด 0.4 0.8 และ 1.2 มิลลิเมตร ที่มีจำนวนรู 19 รู และ 38 รู พบว่า การเพิ่มจำนวนรูมีแนวโน้มทำให้สัดส่วนของแก๊สเพิ่มขึ้นและลดลง โดยที่หัวจ่ายอากาศขนาด 0.4 มิลลิเมตร จำนวน 38 รู มีสัดส่วนของแก๊สสูงสุดอยู่ในช่วง $0.0106 - 0.0412 \pm 0.0069$ หัวจ่ายอากาศขนาด 0.8 มิลลิเมตร จำนวน 38 รู มีสัดส่วนของแก๊สอยู่ในช่วง $0.0096 - 0.0348 \pm 0.0055$ หัวจ่ายอากาศขนาด 1.2 มิลลิเมตร จำนวน 38 รู มีสัดส่วนของแก๊สน้อยสุดอยู่ในช่วง $0.0078 - 0.0314 \pm 0.0062$ ซึ่งผลของการเพิ่มจำนวนรูของหัวจ่ายอากาศ ทำให้ฟองมีขนาดเล็กและความเร็วฟองต่ำ จึงทำให้สัดส่วนของแก๊สเพิ่มขึ้น



รูปที่ 38 ผลกระทบของหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ จำนวน 19 รู และ 38 รู ต่อสัดส่วนแก๊ส

4.1.1.4 พื้นที่ผิวจำเพาะ

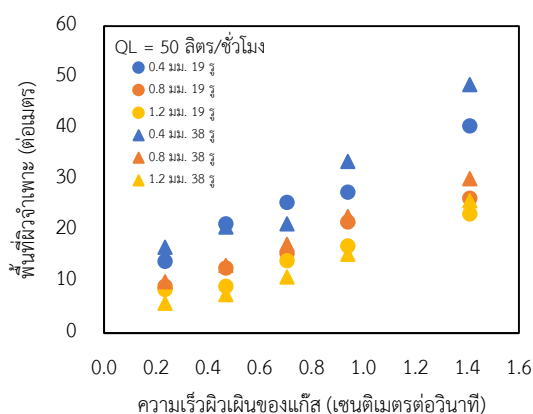
จากรูปที่ 39 แสดงถึงพื้นที่ผิวจำเพาะที่เกิดจากหัวจ่ายอากาศขนาด 0.4 0.8 และ 1.2 มิลลิเมตร ที่มีจำนวนรู 19 รู เทียบกับความเร็วผิวเดินของของแก๊สที่อยู่ในช่วง 0.24 – 1.41 เซนติเมตรต่อวินาที พบว่า หัวจ่ายอากาศขนาด 0.4 มิลลิเมตร มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุดอยู่ในช่วง $13.99 - 40.48 \pm 0.047$ ต่อเมตร ซึ่งได้ค่า P-value ที่ได้จาก Anova มีค่าเท่ากับ 1×10^{-45} ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่หมายความว่ามีผลแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ หัวจ่ายอากาศขนาด 0.8 มิลลิเมตร มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง $9.14 - 26.37 \pm 0.031$ ต่อเมตร ซึ่งได้ค่า P-value ที่ได้จาก Anova มีค่าเท่ากับ 1.6×10^{-44} ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่หมายความว่ามีผลแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ และหัวจ่ายอากาศขนาด 1.2 มิลลิเมตร มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง $8.51 - 23.27 \pm 0.032$ ต่อเมตร ซึ่งได้ค่า P-value ที่ได้จาก Anova มีค่าเท่ากับ 2.1×10^{-42} ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่หมายความว่ามีผลแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการเพิ่มความเร็วของแก๊สทำให้ปริมาณฟองอากาศในระบบและสัดส่วนของแก๊สสูงขึ้นที่จะส่งผลให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงขึ้น ดังการคำนวณในสมการที่ 3-20 และเมื่อเพิ่มขนาดของรูจ่ายอากาศจะทำให้ฟองอากาศมีขนาดใหญ่ ความเร็วมากขึ้น สัดส่วนของแก๊สลดลง ดังนั้นพื้นที่ผิวจำเพาะจึงลดลง และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับความเร็วผิวเดินของเหลวที่อยู่ในช่วง 0.02 – 0.1 เซนติเมตรต่อวินาที พบว่า การเพิ่มความเร็วของเหลวที่หัวจ่ายอากาศทุกขนาดไม่มีผลกระทบต่อพื้นที่ผิวจำเพาะที่เกิดขึ้นภายในคอลัมน์ ดังนั้นสัดส่วนแก๊สที่เกิดขึ้นในแต่ละหัวจ่ายอากาศได้รับผลกระทบโดยตรงจากขนาดของรูหัวจ่ายอากาศในแต่ละหัวจ่ายอากาศ และคอลัมน์แบบฟองอากาศถูกควบคุมด้วยวิฏภาคของแก๊สเป็นหลัก



รูปที่ 39 ผลกระทบของหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ จำนวน 19 รู ต่อพื้นที่ผิวจำเพาะ

(ซ้าย) เปรียบเทียบกับความเร็วของแก๊ส (ขวา) เปรียบเทียบกับความเร็วของเหลว

จากรูปที่ 40 ผลกระทบของหัวจ่ายอากาศทั้ง 3 ขนาดที่แต่ละหัวจ่ายอากาศมีจำนวน 19 รู และ 38 รู พบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะของหัวจ่ายอากาศที่มีจำนวนรู 38 รู มีพื้นที่ผิวจำเพาะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยที่ หัวจ่ายขนาด 0.4 มิลลิเมตร มีจำนวนรู 38 รู มีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง $16.76 - 48.55 \pm 0.055$ ต่อเมตร หัวจ่ายขนาด 0.8 มิลลิเมตร มีจำนวนรู 38 รู มีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง $9.99 - 30.19 \pm 0.04$ ต่อเมตร และหัวจ่ายขนาด 1.2 มิลลิเมตร มีจำนวนรู 38 รู มีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง $5.78 - 25.86 \pm 0.047$ ต่อเมตร อย่างไรก็ตามการมีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นนั้น เนื่องมาจากการเพิ่มจำนวนรูที่หัวจ่ายอากาศสามารถสร้างฟองขนาดเล็กจึงทำให้ความเร็วฟองลดลงและมีสัดส่วนของแก๊สอยู่ในระบบนาน



รูปที่ 40 ผลกระทบของหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ จำนวน 19 รูและ 38 รู ต่อพื้นที่ผิวจำเพาะที่อัตราการไหลของเหลว 50 ลิตร/ชั่วโมง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

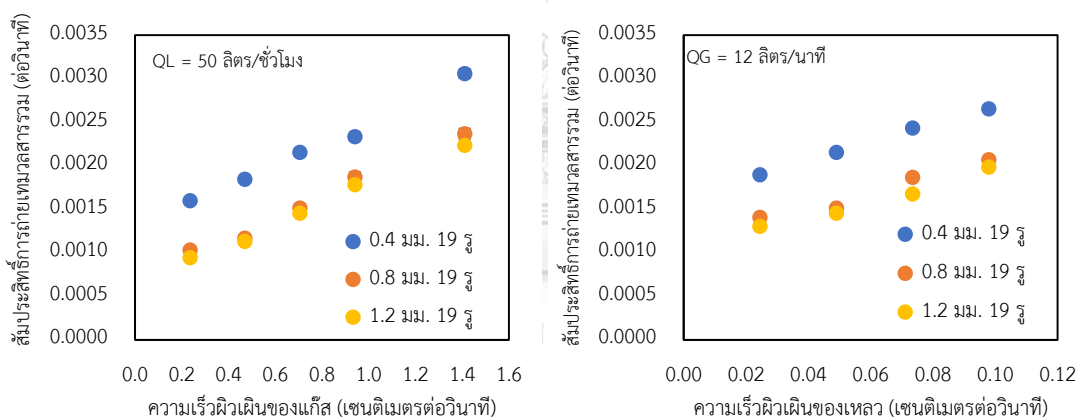
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.1.2 ผลการศึกษาตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสารและพลังงานที่ใช้

4.1.2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม

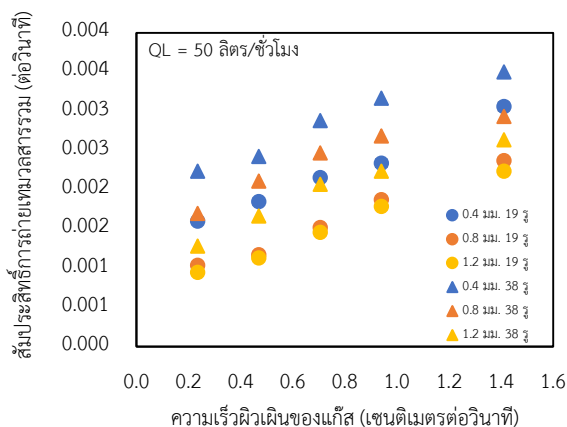
จากรูปที่ 41 (ซ้าย) แสดงถึงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมที่เกิดขึ้นในหัวจ่ายอากาศขนาด 0.4 0.8 และ 1.2 มิลลิเมตร ที่มีจำนวนรู 19 รู กับความเร็วของแก๊ส พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วผิวผิวของแก๊สจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่หัวจ่ายทุกขนาด โดยที่หัวจ่ายอากาศขนาด 0.4 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมอยู่ในช่วง $0.00199 - 0.00338 \pm 3.1 \times 10^{-5}$ ต่อวินาที ซึ่งได้ค่า P-value ที่ได้จาก Anova มีค่าเท่ากับ 5.2×10^{-22} ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่หมายความว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ หัวจ่ายอากาศขนาด 0.8 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมอยู่ในช่วง 0.00162 – 0.00309

$\pm 3.2 \times 10^{-5}$ ต่อวินาที ซึ่งได้ค่า P-value ที่ได้จาก Anova มีค่าเท่ากับ 4.6×10^{-27} ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่หมายความว่ามี ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ และหัวจ่ายอากาศขนาด 1.2 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมอยู่ในช่วง $0.00136 - 0.00263 \pm 4.7 \times 10^{-5}$ ต่อวินาที ซึ่งได้ค่า P-value ที่ได้จาก Anova มีค่าเท่ากับ 1.9×10^{-20} ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่หมายความว่ามี ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเร็วแก๊สจะทำให้ปริมาณฟองที่กักเก็บในระบบสูงขึ้นส่งผลให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมเพิ่มขึ้น และจากรูปที่ 4.9 (ขวา) เป็นการเปรียบเทียบกับความเร็วผิวเฉือนของเหลวที่อยู่ในช่วง 0.02 – 0.1 เซนติเมตรต่อวินาที พบว่า เมื่อเพิ่มความเร็วของเหลวทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากของเหลวที่ไหลผ่านสร้างความปั่นป่วนเกิดเป็นแรงเฉือนแบบปั่นป่วนที่สามารถลดขนาดฟองเพิ่มพื้นที่เชื่อมประสานระหว่างแก๊สและของเหลว (Yang, Chen และ McMillan, 1986) และการไหลของของเหลวยังทำให้ความเร็วฟองสัมพันธ์เพิ่มขึ้นเกิดความปั่นป่วนถ่ายเทมวลสารได้ดี



รูปที่ 41 ผลกระทบของหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ จำนวน 19 รู ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร (ซ้าย) เปรียบเทียบกับความเร็วของแก๊ส (ขวา) เปรียบเทียบกับความเร็วของเหลว

จากรูปที่ 42 แสดงถึงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมกับความเร็วผิวเฉือนของแก๊ส ที่หัวจ่ายอากาศทั้ง 3 ขนาดซึ่งแต่ละหัวจ่ายอากาศมีจำนวนรู 19 รู และ 38 รู พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมของหัวจ่ายอากาศทุกขนาดที่มีจำนวน 38 รู มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากหัวจ่ายอากาศทุกขนาดที่มีจำนวน 19 รู ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากการเพิ่มจำนวนรูเป็นการทำให้ขนาดฟองเล็กลงทำให้มีความเร็วในการลอยตัวต่ำอยู่ในระบบได้นาน ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะมากขึ้นและเกิดการถ่ายเทมวลสารดีขึ้น

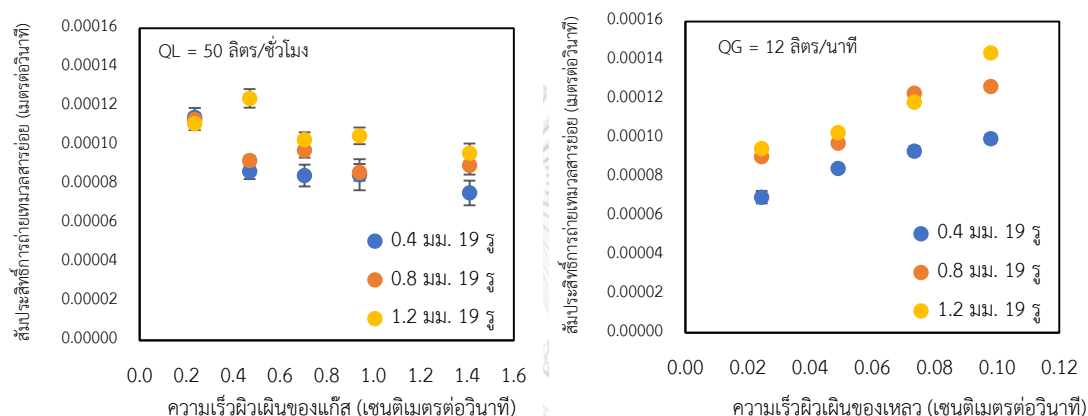


รูปที่ 42 ผลกระทบของหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ จำนวน 19 รูและ 38 รู ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมที่อัตราการไหลของเหลว 50 ลิตร/ชั่วโมง

4.1.2.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย

จากรูปที่ 43 (ซ้าย) แสดงถึงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยกับความเร็วของแก๊ส ที่หัวจ่ายอากาศขนาด 0.4 0.8 และ 1.2 มิลลิเมตร ที่มีจำนวน 19 รู พบว่า เมื่อมีการเพิ่มความเร็วผิวเดินของแก๊สจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยลดลง เนื่องจากขนาดฟองที่เล็กจะมีความเร็วลดลง จึงทำให้สัดส่วนของแก๊สเพิ่มขึ้น โดยที่หัวจ่ายอากาศขนาด 0.4 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยลดลงจาก $0.000142 - 0.0000835 \pm 4.7 \times 10^{-6}$ เมตรต่อวินาที ซึ่งได้ค่า P-value ที่ได้จาก Anova มีค่าเท่ากับ 4.9×10^{-8} ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่หมายความว่ามี ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ หัวจ่ายอากาศขนาด 0.8 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยลดลงจาก $0.000177 - 0.000117 \pm 3.1 \times 10^{-6}$ เมตรต่อวินาที ซึ่งได้ค่า P-value ที่ได้จาก Anova มีค่าเท่ากับ 6.9×10^{-9} ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่หมายความว่ามี ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ และหัวจ่ายอากาศขนาด 1.2 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยลดลงจาก $0.00016 - 0.000113 \pm 3.2 \times 10^{-6}$ เมตรต่อวินาที ซึ่งได้ค่า P-value ที่ได้ จาก Anova มีค่าเท่ากับ 2.3×10^{-8} ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่หมายความว่ามี ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากสมการของฮิกบี้(Higbie) $k_L = 2 \sqrt{\frac{DU_b}{\pi d_b}}$ จะมีการเกี่ยวข้องกับสัมประสิทธิ์การแพร่, ความเร็วของฟองและขนาดของฟอง จึงทำให้การเพิ่มความเร็วของฟองส่งผลให้ความเร็วฟองเพิ่มขึ้น แต่ขนาดของฟองอากาศเพิ่มขึ้นมากกว่าจึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยลดลง และการเพิ่มขนาดรูหัวจ่ายอากาศทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยลดลง เนื่องจากหัวจ่ายขนาด

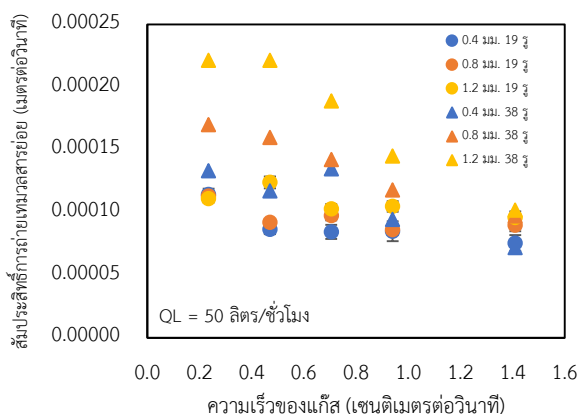
ใหญ่จะมีขนาดของฟองที่เกิดขึ้นใหญ่ความเร็วฟองสูง แต่ค่าขนาดของฟองอากาศมีมากกว่าความเร็วฟอง รูปที่ 4.11 (ขวา) เป็นการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยกับความเร็วผิวเผินของเหลว พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเร็วของเหลว เนื่องจากความปั่นป่วนของเหลวทำให้เกิดแรงเฉือน(Yang, Chen และMcMillan, 1986) และการเพิ่มขึ้นของความเร็วของเหลวทำให้ขนาดฟองอากาศเท่าเดิมแต่การไหลสวนทางทำให้ความเร็วสัมพัทธ์ของฟองอากาศสูงขึ้นจึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยเพิ่มขึ้น



รูปที่ 43 ผลกระทบของหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ จำนวน 19 รู ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย (ซ้าย) เปรียบเทียบกับความเร็วของแก๊ส (ขวา) เปรียบเทียบกับความเร็วของเหลว

จากรูปที่ 44 แสดงถึงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยกับความเร็วของแก๊สที่อัตราการไหลของเหลว 100 ลิตรต่อนาที โดยมีหัวจ่ายอากาศขนาด 0.4 0.8 และ 1.2 มิลลิเมตรที่แต่ละขนาดมี 19 รูและ 38 รู พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยมีแนวโน้มที่ลดลงทุกหัวจ่ายอากาศ ซึ่งเกิดจากการฟองอากาศขนาดเล็กลง ความเร็วจึงลดลง จึงทำให้การถ่ายเทมวลสารได้ช้า (Higbie, 1935)

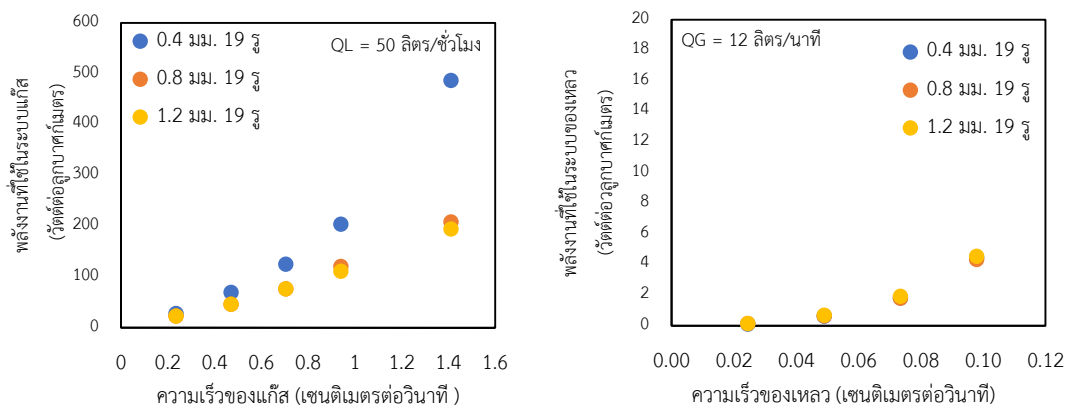
เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการใช้น้ำประปาเป็นตัวดูดซึม ที่จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในวัฏภาคของเหลวที่มีค่อนข้างคงที่ จึงทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยอยู่ในช่วง $1 - 5 \times 10^{-4}$ เมตรต่อวินาที (Roustan, 2003)



รูปที่ 44 ผลกระทบของหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ จำนวน 19 รู และ 38 รู ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยที่อัตราการไหลของเหลว 100 ลิตร/ชั่วโมง

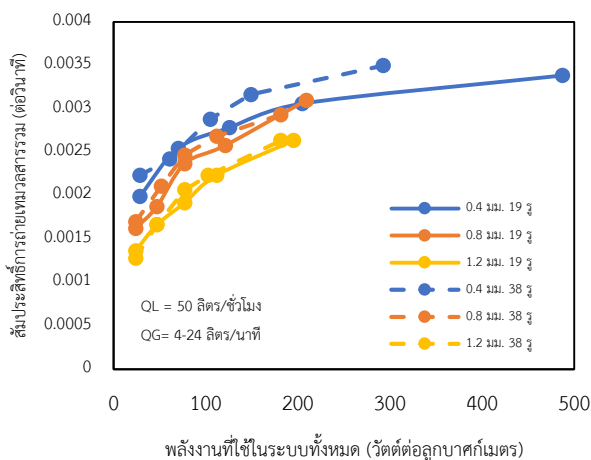
4.1.2.3 พลังงานที่ใช้ในระบบ

จากรูปที่ 45 (ซ้าย) แสดงถึงการเปรียบเทียบความเร็วของแก๊สกับพลังงานที่ใช้ในระบบแก๊ส พบว่า หัวจ่ายอากาศขนาด 0.4 มิลลิเมตรที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมสูงที่สุดและใช้พลังงานในระบบแก๊สอยู่ในช่วง 27.79 – 486.37 วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร หัวจ่ายอากาศขนาด 0.8 มิลลิเมตร ใช้พลังงานในระบบแก๊สอยู่ในช่วง 23.16 – 208.44 วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร และหัวจ่ายอากาศขนาด 1.2 มิลลิเมตร ใช้พลังงานในระบบแก๊สอยู่ในช่วง 23.16 – 194.54 วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร จากรูปที่ 4.13 (ขวา) การเปรียบเทียบความเร็วของเหลวกับพลังงานที่ใช้ในระบบของเหลว พบว่า หัวจ่ายอากาศขนาด 0.4 มิลลิเมตร ใช้พลังงานในระบบของเหลวอยู่ในช่วง 0.103 – 4.46 วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร หัวจ่ายอากาศขนาด 0.8 มิลลิเมตร ใช้พลังงานในระบบของเหลวอยู่ในช่วง 0.137 – 4.32 วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร หัวจ่ายอากาศขนาด 1.2 มิลลิเมตร ใช้พลังงานในระบบของเหลวอยู่ในช่วง 0.137 – 4.53 วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร ดังนั้นพลังงานที่ใช้ส่วนใหญ่จะถูกใช้มากที่พลังงานในระบบแก๊สที่จะเกิดการสูญเสียแรงดันเพื่อไปสร้างฟองอากาศ



รูปที่ 45 ผลกระทบของหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ จำนวน 19 รู ต่อพลังงานที่ใช้ในระบบ (ซ้าย) การเปรียบเทียบความเร็วของแก๊สกับพลังงานที่ใช้ในระบบแก๊ส (ขวา) การเปรียบเทียบความเร็วของเหลวกับพลังงานที่ใช้ในระบบของเหลว

รูปที่ 46 แสดงถึงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมกับพลังงานที่ใช้ในระบบทั้งหมด พบว่า หัวจ่ายอากาศขนาด 0.4 มิลลิเมตรจำนวน 19 รู ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมสูงที่สุดจะใช้พลังงานในระบบแก๊สอยู่ในช่วง 28.41 – 486.98 วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร หัวจ่ายอากาศขนาด 0.8 มิลลิเมตรจำนวน 19 รู ใช้พลังงานในระบบแก๊สอยู่ในช่วง 23.81 – 209.09 วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร และหัวจ่ายอากาศขนาด 1.2 มิลลิเมตรจำนวน 19 รู ใช้พลังงานในระบบแก๊สอยู่ในช่วง 23.84 – 195.23 วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร หัวจ่ายอากาศขนาด 0.4 มิลลิเมตร จำนวน 38 รู มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารที่สูงกว่าหัวจ่ายอากาศ 19 รู เล็กน้อย และยังมีค่าพลังงานที่ใช้ในระบบทั้งหมดที่น้อยกว่าอยู่ในช่วง 28.41- 292.44 วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร หัวจ่ายอากาศขนาด 0.8 มิลลิเมตร จำนวน 38 รู มีค่าพลังงานที่ใช้ในระบบทั้งหมดอยู่ในช่วง 23.81- 181.3 วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร หัวจ่ายอากาศขนาด 1.2 มิลลิเมตร จำนวน 38 รู มีค่าพลังงานที่ใช้ในระบบทั้งหมดอยู่ในช่วง 23.84- 181.33 วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร ดังนั้นขนาดของรูจ่ายอากาศลดลงจะทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมสูงขึ้นและมีการใช้พลังงานในระบบมาก เนื่องจากหัวจ่ายขนาดเล็กจะสูญเสียความดันมากในการสร้างฟองอากาศ และการเพิ่มจำนวนรูของหัวจ่ายอากาศจะเป็นการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมโดยเป็นการลดใช้พลังงานเนื่องจากการเพิ่มจำนวนรูหัวจ่ายอากาศจะมีการสูญเสียความดันน้อย จากรูปนี้จึงเลือกหัวจ่ายอากาศขนาด 0.4 มิลลิเมตร ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมสูงที่สุดไปใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย



รูปที่ 46 ผลกระทบของหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ ต่อพลังงานที่ใช้ในระบบทั้งหมด

4.2 ผลการศึกษาคอลัมน์แบบพองอากาศที่เติมตัวกลาง

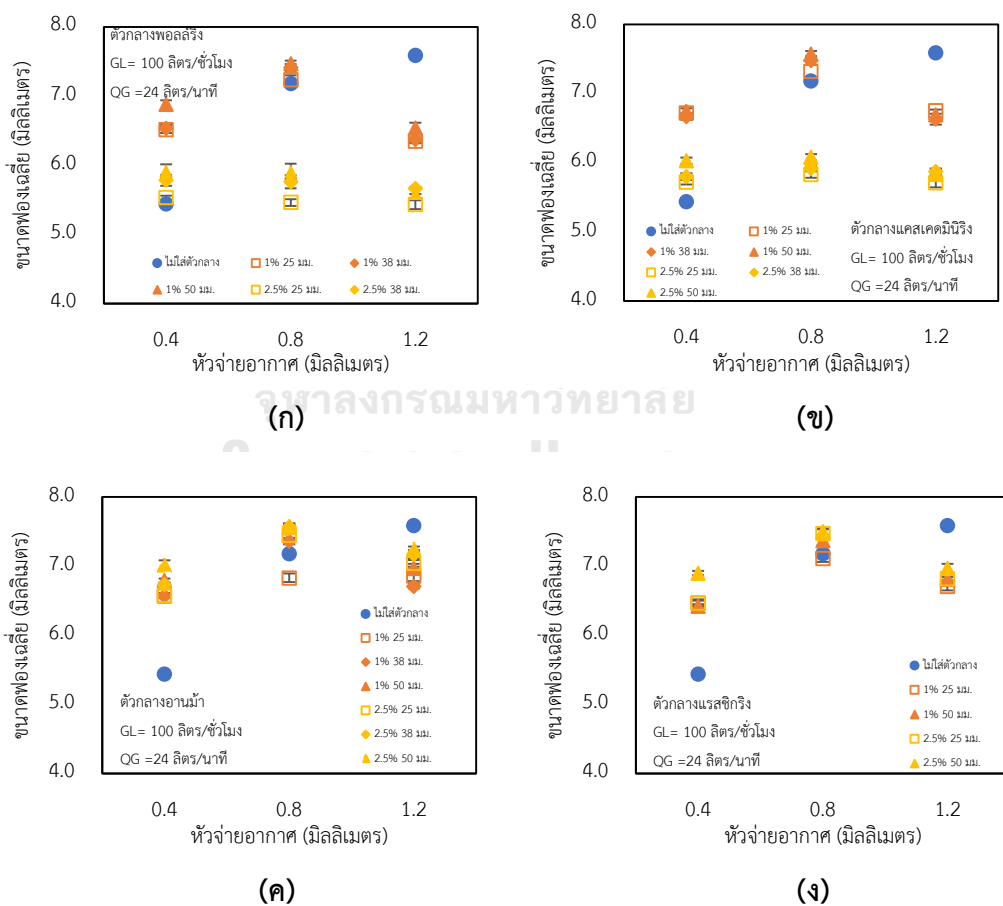
ผลจากการศึกษาคอลัมน์แบบพองอากาศชนิดเติมตัวกลางเป็นการศึกษาตัวแปร โดยใช้หัวจ่ายอากาศที่มีขนาด 0.4 0.8 และ 1.2 มิลลิเมตร ที่มีจำนวนรู 19 รู และมีการเติมตัวกลางที่มีชนิดพอลลิ่ง แคดเคดมินริง อานม้า ที่มีขนาด 25 38 และ 50 มิลลิเมตรและแรสซิกริง และขนาด 25 และ 50 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นการใช้อัตราการไหลของแก๊สอยู่ในช่วง 12 - 24 ลิตรต่อนาทีและอัตราการไหลของเหลวอยู่ในช่วง 50 - 100 ลิตรต่อชั่วโมง ที่จะส่งผลต่อตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ ตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสารและพลังงานที่ใช้ ดังต่อไปนี้

4.2.1 ผลการศึกษาตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์

4.2.1.1 ขนาดพองอากาศ

จากรูปที่ 47 การเปรียบเทียบขนาดพองเฉลี่ยที่เกิดจากหัวจ่ายอากาศขนาด ต่าง ๆ เมื่อเติมตัวกลางพลาสติกพอลลิ่ง แคดเคดมินริง อานม้า ที่มีขนาด 25 38 และ 50 มิลลิเมตรและแรสซิกริง และขนาด 25 และ 50 มิลลิเมตร ที่อัตราการไหลของแก๊สที่ 24 ลิตรต่อนาทีและอัตราการไหลของเหลวที่ 100 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่า การไม่เติมตัวกลางลงในคอลัมน์ เมื่อหัวจ่ายอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้ขนาดของพองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้น การเติมตัวกลางพอลลิ่งที่ 1% โดยปริมาตร ที่หัวจ่ายอากาศขนาด 0.4 และ 0.8 มิลลิเมตร จะทำให้พองอากาศใหญ่ขึ้นเนื่องจากพองอากาศสามารถเกิดการรวมตัวกันได้และที่หัวจ่ายอากาศขนาด 1.2 มิลลิเมตร การเติมตัวกลางสามารถช่วยให้พองอากาศมีขนาดเล็กลง และการเติมตัวกลางพอลลิ่งที่ 2.5% โดยปริมาตร ที่หัวจ่ายอากาศขนาด 0.4 มิลลิเมตร พองอากาศที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ที่หัวจ่ายขนาด 0.8 และ 1.2 มิลลิเมตร จะทำ

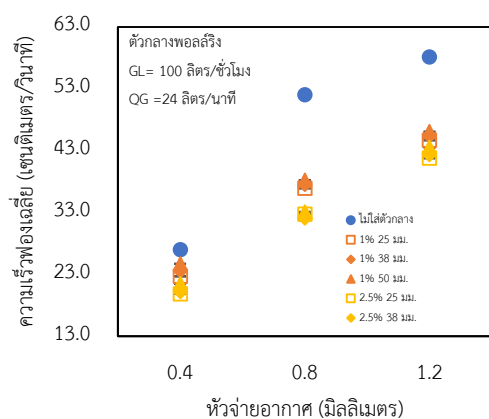
ให้ฟองอากาศเล็กลงเนื่องหัวจ่ายอากาศขนาดใหญ่จะเกิดฟองขนาดใหญ่ซึ่งจะมีโอกาสมากในการชนกับตัวกลางและจะแตกเป็นฟองเล็ก ๆ จำนวนมาก อาจเนื่องมาจาก 2 สาเหตุ คือ 1.ฟองอากาศปะทะกับตัวกลางพลาสติกจึงทำให้ฟองมีขนาดเล็กลง(Luo,1993) และสาเหตุที่ 2.เมื่อฟองอากาศลอยตัวจะมีการปะทะและรวมตัวกันทำให้ฟองใหญ่ขึ้นในกรณีที่ไม่เติมตัวกลาง แต่เมื่อมีการเติมตัวกลางในคอลัมน์ ตัวกลางจะทำหน้าที่ยับยั้งไม่ให้ฟองรวมตัวกันจึงทำให้ขนาดฟองมีขนาดเล็กกว่าการไม่เติมตัวกลาง (Lindner, Werner และSchumpe, 1988) ที่ขนาดของตัวกลางพบว่าตัวกลางขนาด 25 มิลลิเมตรสามารถทำให้ได้ฟองอากาศขนาดเล็กกว่าตัวกลางขนาด 38 มิลลิเมตร และ50 มิลลิเมตรตามลำดับ เนื่องจากตัวกลางขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวมากกว่าตัวกลางขนาดใหญ่ และชนิดของตัวกลางพบว่า ตัวกลางพอลลิ่งมีฟองอากาศขนาดเล็กกว่าชนิดแคสเคดมินิริง,อานม้าและแรสซิกริงตามลำดับ เนื่องจากตัวกลางพอลลิ่งและแคสเคดมินิริงมีช่องว่างของตัวกลางที่มากและตัวกลางอานม้ากับแรสซิกริงมีน้ำหนักตัวกลางมากจึงทำให้เกิดการเคลือบตัวที่ช้า



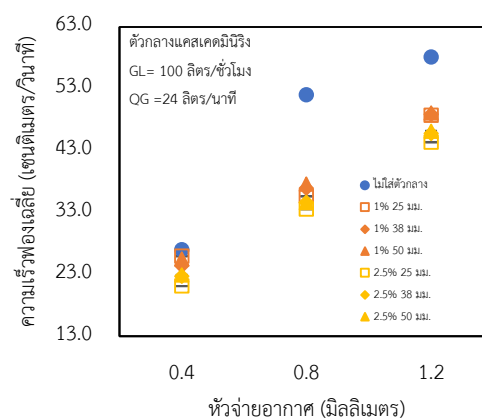
รูปที่ 47 การเปรียบเทียบขนาดฟองเฉลี่ยที่เกิดจากหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ เมื่อเติมตัวกลางพลาสติก (ก) พอลลิ่ง (ข) แคสเคดมินิริง (ค) อานม้า (ง) แรสซิกริง

4.2.1.2 ความเร็วฟองเฉลี่ย

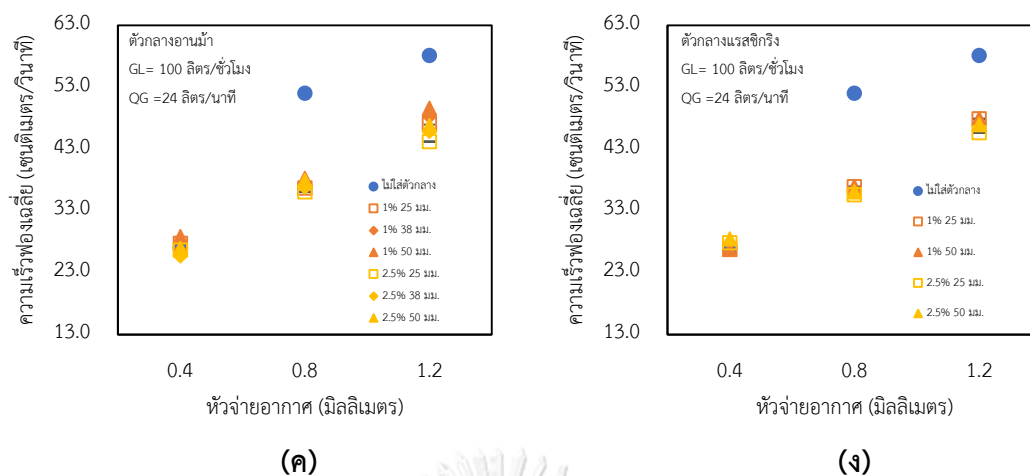
จากรูปที่ 48 การเปรียบเทียบความเร็วฟองเฉลี่ยที่เกิดจากหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ เมื่อเติมตัวกลางพอลีสไตรีน แคลสเคดมินีริง อานม้า และแรสซิกริง ซึ่งผลแสดงให้เห็นได้ว่าการไม่เติมตัวกลางลงในคอลัมน์ เมื่อหัวจ่ายอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้ความเร็วของฟองเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อมีการเติมตัวกลาง 1% และ 2.5% ลงในคอลัมน์พบว่า ตัวกลางสามารถชะลอความเร็วของฟองอากาศให้ช้าลงและอยู่ในระบบได้นานขึ้น โดยจะเห็นได้ชัดโดยการใช้ตัวกลางกับหัวจ่ายขนาด 0.8 และ 1.2 มิลลิเมตร และยังพบว่า การเพิ่มปริมาตรของตัวกลางพลาสติกก็สามารถทำให้ความเร็วฟองเฉลี่ยในการลอยตัวช้าลง ดังนั้นเมื่อมีการใช้ตัวกลาง ความเร็วในการลอยตัวของฟองนั้นลดลง อาจเนื่องมาจาก ตัวกลางที่มีความพรุนจะมาขัดขวางทิศทางการลอยตัวของฟอง จึงทำให้ความเร็วฟองนั้นช้าลง (Cohen และ Metzner, 1981) และขนาดตัวกลาง 25 มิลลิเมตรสามารถทำให้ได้ฟองอากาศขนาดเล็กกว่าตัวกลางขนาด 38 มิลลิเมตร และ 50 มิลลิเมตร เนื่องจากตัวกลางขนาดเล็กจะมีช่องว่างของตัวกลางมากกว่าตัวกลางขนาดใหญ่ แต่ความเร็วที่เกิดขึ้นจากชนิดของตัวกลางยังไม่มี ความชัดเจนที่จะสามารถบอกได้ว่าชนิดตัวกลางใดดีกว่า เนื่องจากความเร็วที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงเดียวกัน



(ก)



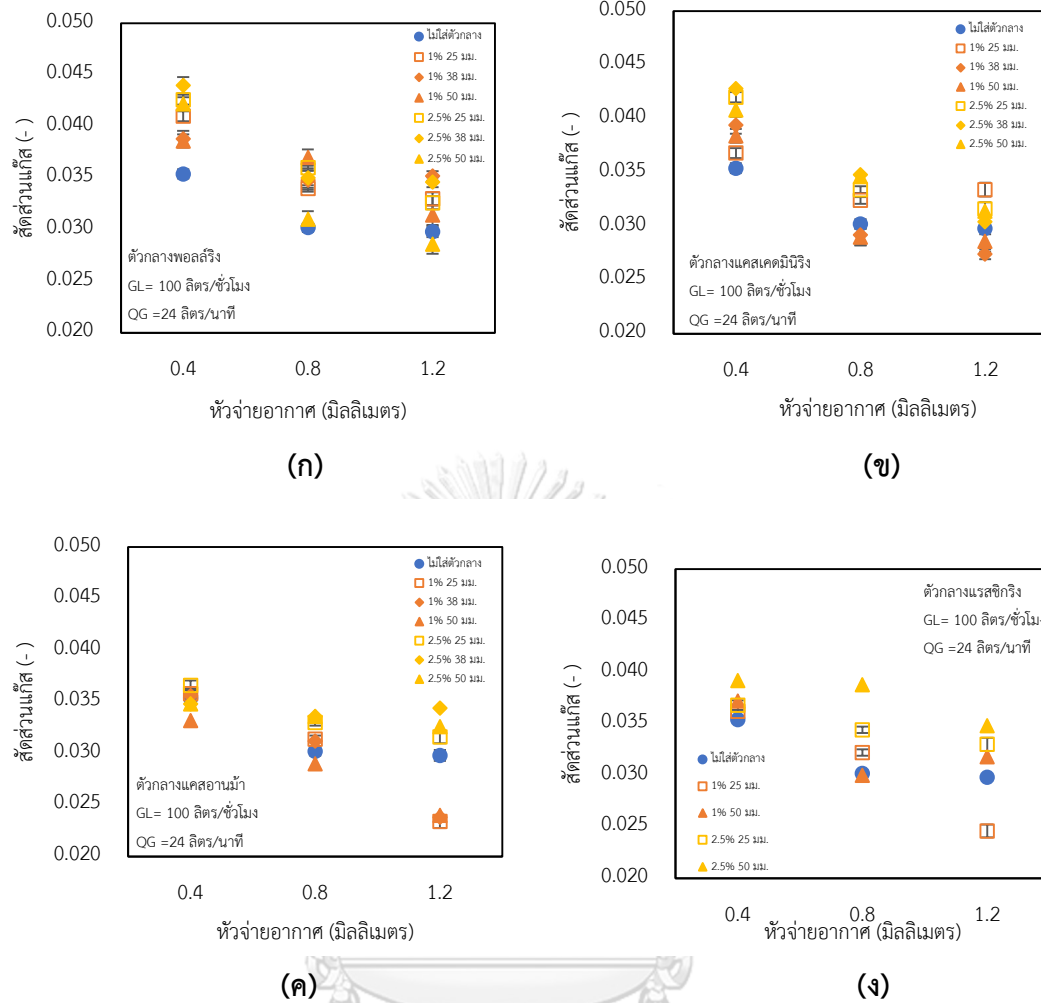
(ข)



รูปที่ 48 การเปรียบเทียบความเร็วพองเฉลี่ยที่เกิดจากหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ เมื่อเติมตัวกลางพลาสติก (ก) พอลลิ่งริง (ข) แคสเคดมินิริง (ค) อานม้า (ง) แรสซิกริง

4.2.1.3 สัตส่วนแก๊ส

รูปที่ 49 การเปรียบเทียบสัดส่วนแก๊สที่เกิดจากหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ เมื่อเติมตัวกลางพอลลิ่งริง แคสเคดมินิริง อานม้า และแรสซิกริง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การไม่เติมตัวกลางในคอลัมน์ เมื่อหัวจ่ายอากาศขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้สัดส่วนของแก๊สลดลง แต่การเติมตัวกลาง 1% และ 2.5% ลงในหัวจ่ายอากาศทุกขนาดพบว่า สามารถทำให้สัดส่วนของแก๊สเพิ่มขึ้น เนื่องจากตัวกลางจะทำหน้าที่ขัดขวางการลอยตัวของพองอากาศทำให้อยู่ในระบบได้นานขึ้นและตัวกลางจะทำหน้าที่ให้พองอากาศแตกตัวมากกว่าการรวมตัว และตัวกลางขนาด 25 มิลลิเมตรสามารถทำให้ได้พองอากาศขนาดเล็กกว่าตัวกลางขนาด 38 มิลลิเมตร และ 50 มิลลิเมตร ตามลำดับ เนื่องจากตัวกลางขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวมากกว่าตัวกลางขนาดใหญ่ และชนิดของตัวกลางพบว่า ตัวกลางพอลลิ่งริงมีพองอากาศขนาดเล็กกว่าชนิดแคสเคดมินิริง อานม้าและแรสซิกริงตามลำดับ เนื่องจากตัวกลางพอลลิ่งริงและแคสเคดมินิริงมีช่องว่างของตัวกลางที่มากและตัวกลางอานม้ากับแรสซิกริงมีน้ำหนักตัวกลางมากจึงทำให้เกิดการเคลื่อนตัวที่ช้า และยังอีกพบว่า การเติมตัวกลางทุกชนิดในปริมาตรที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้สัดส่วนของแก๊สเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามสัดส่วนแก๊สที่เกิดขึ้น เมื่อมีการเติมตัวกลางพลาสติกสอดคล้องกับความเร็วลอยตัว กล่าวคือ เมื่อความเร็วพองสูงจะสามารถออกจากระบบได้เร็ว จึงทำให้สัดส่วนของแก๊สน้อย (ภาสวร วรรณวงษ์, 2558)

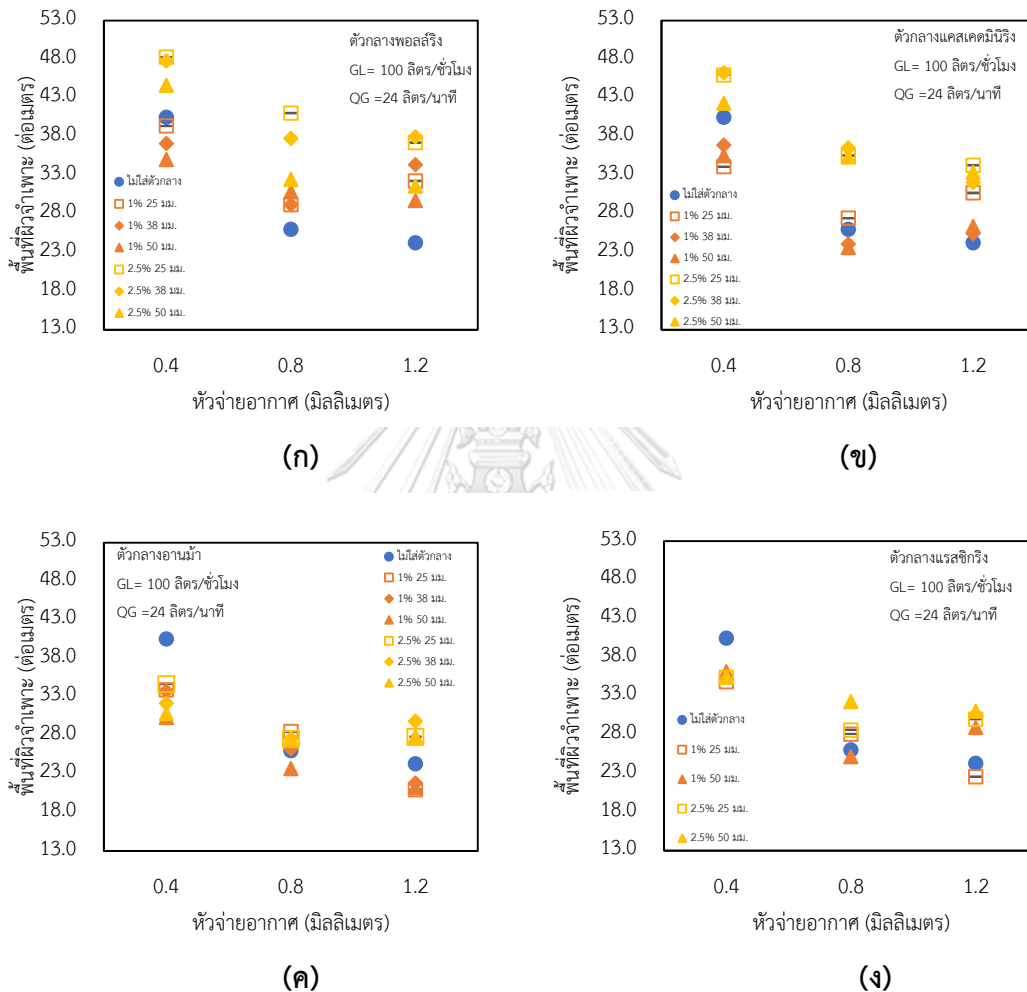


รูปที่ 49 การเปรียบเทียบสัดส่วนแก๊สที่เกิดจากหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ เมื่อเติมตัวกลางพลาสติก (ก) พอลัสติค (ข) แคสเคตมินิริง (ค) อานม้ (ง) แรสซิกริง

4.2.1.4 พื้นที่ผิวจำเพาะ

จากรูปที่ 50 การเปรียบเทียบพื้นที่ผิวจำเพาะที่เกิดจากหัวจ่ายอากาศขนาด ต่าง ๆ เมื่อเติมตัวกลางพอลัสติค แคสเคตมินิริง อานม้ และแรสซิกริง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การไม่เติมตัวกลาง เมื่อหัวจ่ายอากาศขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะลดลง แต่การเติมตัวกลางปริมาตร 1% และ 2.5% ที่หัวจ่ายอากาศขนาด 0.4 มิลลิเมตรสามารถทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะจากสมการที่ 3-20 การเติมตัวกลางทำให้ขนาดของฟองใหญ่ขึ้นและมีสัดส่วนของแก๊สเพิ่ม เป็นการรักษาสอดคล้องระหว่างกันซึ่งทำให้ที่ 1% มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่า 2.5% และที่หัวจ่ายขนาด 0.8 และ 1.2 มิลลิเมตร เนื่องจากการเติมตัวกลางทำให้ขนาดฟองเล็กลงและมีสัดส่วนของแก๊สเพิ่มจึงทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่ม และตัวกลางขนาด 25 มิลลิเมตรสามารถทำให้ได้ฟองอากาศขนาด

เล็กกว่าตัวกลางขนาด 38 มิลลิเมตร และ 50 มิลลิเมตร ตามลำดับ เนื่องจากตัวกลางขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวมากกว่าตัวกลางขนาดใหญ่ และชนิดของตัวกลางพบว่า ตัวกลางพอลลิ่งมีฟองอากาศขนาดเล็กกว่าชนิดแคสเคดมินิริง, อานม้า และแรสซิกริงตามลำดับ เนื่องจากเป็นผลมาจากขนาดของฟองละอองของแก๊สที่เพิ่มขึ้น



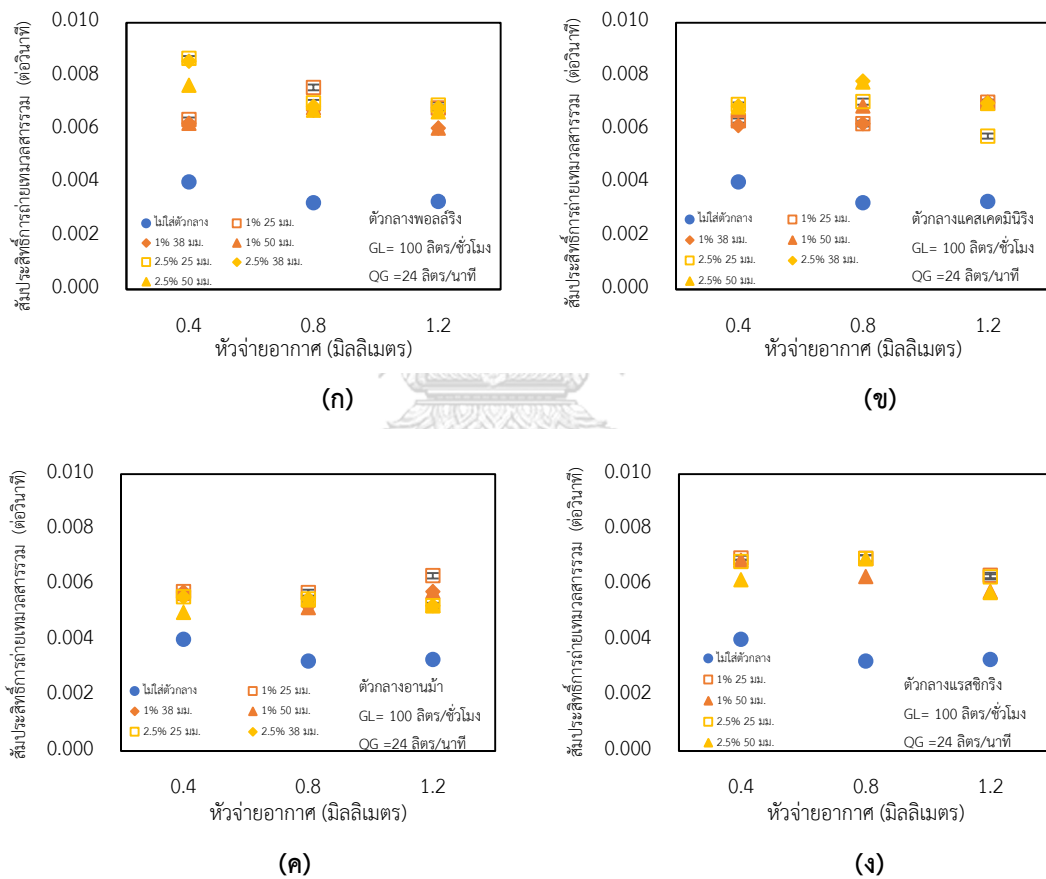
รูปที่ 50 การเปรียบเทียบพื้นที่ผิวจำเพาะที่เกิดจากหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ เมื่อเติมตัวกลางพลาสติก (ก) พอลลิ่ง (ข) แคสเคดมินิริง (ค) อานม้า (ง) แรสซิกริง

4.2.2 ผลการศึกษาตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสารและพลังงานที่ใช้ในระบบ

4.2.2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม

จากรูปที่ 51 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมที่เกิดจากหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ เมื่อมีการเติมตัวกลางชนิดพอลลิ่ง แคสเคดมินิริง อานม้า และแรสซิกริง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การไม่เติมตัวกลาง เมื่อหัวจ่ายอากาศขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม

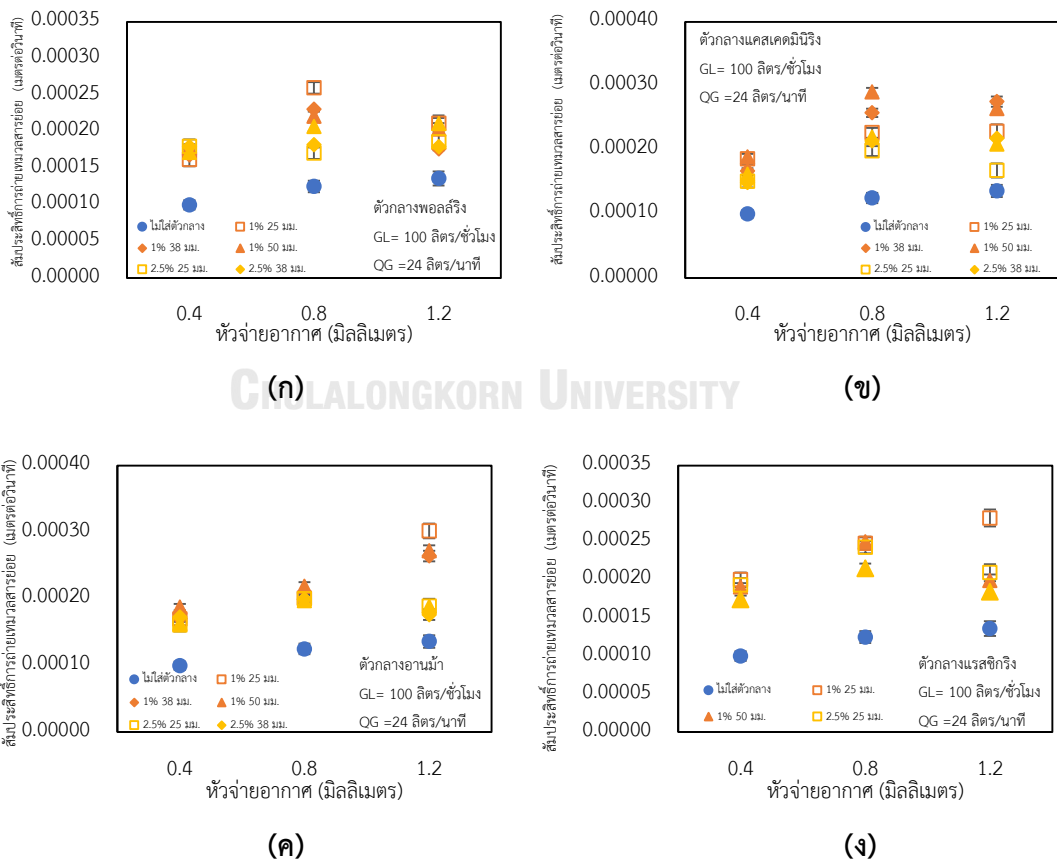
ลดลง และเมื่อมีการเติมตัวกลาง 1% และ 2.5% ที่หัวจ่ายขนาดทุกขนาดจะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมเพิ่มขึ้น เนื่องจากขนาดของฟองอากาศที่เล็กลงและการเติมตัวกลางมีสัดส่วนของแก๊สที่สูงขึ้นจึงทำให้มีค่าของพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ที่ส่งผลเกี่ยวเนื่องมาถึงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมเพิ่มขึ้น และตัวกลางขนาด 25 มิลลิเมตรสามารถทำให้ได้ฟองอากาศขนาดเล็กกว่าตัวกลางขนาด 38 มิลลิเมตร และ 50 มิลลิเมตร ตามลำดับ เนื่องจากตัวกลางขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวมากกว่าตัวกลางขนาดใหญ่ และชนิดของตัวกลางพบว่า ตัวกลางพอลลิ่งมีฟองอากาศขนาดเล็กกว่าชนิดแคสเคดมินริง, อานม้า และ แรสซิกริงตามลำดับ เนื่องจากเป็นผลมาจากขนาดของฟองละออสัดส่วนของแก๊สที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 51 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมเกิดจากหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ เมื่อเติมตัวกลางพลาสติก (ก) พอลลิ่ง (ข) แคสเคดมินริง (ค) อานม้า (ง) แรสซิกริง

4.2.2.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย

จากรูปที่ 52 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยที่เกิดจากหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ เมื่อมีการเติมตัวกลางชนิดพอลลิ่ง แคสเคดมินิริง อานม้า และแรสซิกริง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การไม่เติมตัวกลาง เมื่อหัวจ่ายอากาศใหญ่ขึ้นจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยเพิ่มขึ้น และการเติมตัวกลาง 1% และ 2.5% ที่หัวจ่ายขนาดทุกขนาดจะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยเพิ่มขึ้น เนื่องจากสมการของฮิกบี้(Higbie) $k_L = 2 \sqrt{\frac{DU_b}{\pi d_b}}$ ที่เมื่อมีการเติมตัวกลางลงไปจะทำให้ขนาดของฟองอากาศเล็กลงและความเร็วฟองสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้นจากสมการของฮิกบี้จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยลดลงเนื่องจากการใส่ตัวกลาง และตัวกลางขนาด 25 มิลลิเมตรสามารถทำให้ได้ฟองอากาศขนาดเล็กกว่าตัวกลางขนาด 38 มิลลิเมตร และ 50 มิลลิเมตร ตามลำดับ เนื่องจากตัวกลางขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวมากกว่าตัวกลางขนาดใหญ่ และชนิดของตัวกลางพบว่า ตัวกลางพอลลิ่งมีฟองอากาศขนาดเล็กกว่าชนิดแคสเคดมินิริง อานม้าและแรสซิกริงตามลำดับ เนื่องจากเป็นผลมาจากขนาดของฟองละออสั้นส่วนของแก๊สที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 52 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยเกิดจากหัวจ่ายอากาศขนาดต่าง ๆ เมื่อเติมตัวกลางพลาสติก (ก) พอลลิ่ง (ข) แคสเคดมินิริง (ค) อานม้า (ง) แรสซิกริง

4.2.2.3 พลังงานที่ใช้ในระบบ

จากตารางที่ 19 ค่าการใช้พลังงานในระบบทั้งหมด ที่จะแสดงให้เห็นว่า หัวจ่ายอากาศขนาด 0.4 มิลลิเมตร จะมีการใช้พลังงานในระบบทั้งหมดมากที่สุดอยู่ในช่วง 125 – 490 วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร ที่จะทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมสูงที่สุดอยู่ในช่วง 0.0062 – 0.00973 ต่อวินาที และการเติมตัวกลางลงไป หัวจ่ายอากาศขนาด 0.4 มิลลิเมตรมีค่าการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นมาเล็กน้อยอยู่ในช่วง 111 – 505 วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตรแต่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมที่ลดลงอยู่ในช่วง 0.00531 - 0.00867 ต่อวินาที ในกรณีที่ใช้กับหัวจ่ายอากาศขนาด 0.8 มิลลิเมตร มีการใช้พลังงานในระบบทั้งหมดอยู่ในช่วง 81 – 213 วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตรและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมอยู่ในช่วง 0.00474 – 0.00685 ต่อวินาที ซึ่งการเติมตัวกลางลงไปมีค่าการใช้พลังงานในระบบเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 95 – 213 วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 0.0056 – 0.007 ต่อวินาที และในกรณีที่ใช้กับหัวจ่ายอากาศขนาด 1.2 มิลลิเมตร มีการใช้พลังงานในระบบทั้งหมดอยู่ในช่วง 81 – 199 วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตรและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมอยู่ในช่วง 0.0041 – 0.00523 ต่อวินาที ซึ่งการเติมตัวกลางลงไปมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 0.0047 – 0.00691 ต่อวินาที จากตารางนี้จึงพิจารณานำหัวจ่ายอากาศขนาด 0.4 มิลลิเมตร การเติมตัวกลางขนาด 25 มิลลิเมตร ที่ปริมาตร 2.5% ไปใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมสูงที่สุดในการทดลองนี้

ตารางที่ 19 พลังงานที่ใช้ในระบบทั้งหมด

หัวจ่ายอากาศ	ชนิดตัวกลาง	ขนาด (มม.)	ปริมาณ %	Q_G (ลิตร/นาที)	P/V_L (W/m^3)	P/V_G (W/m^3)	P/V_{Tota} (W/m^3)	K_a (ต่อวินาที)
0.4	ไม่เติม	ไม่เติม	0%	24	4.46	486.4	490.8	0.00973
	พอลลิ่ง	25	1%	24	4.46	500.3	504.7	0.00638
		25	2.5%	24	4.46	514.2	518.6	0.00867
0.8	ไม่เติม	ไม่เติม	0%	24	4.46	208.4	212.8	0.00685
	พอลลิ่ง	25	1%	24	4.46	208.4	212.9	0.00758
		25	2.5%	24	4.46	208.4	212.9	0.00700
1.2	ไม่เติม	ไม่เติม	0%	24	4.46	194.5	199.1	0.00523
	พอลลิ่ง	25	1%	24	4.46	180.7	185.1	0.00680
		25	2.5%	24	4.46	194.5	199.0	0.00691

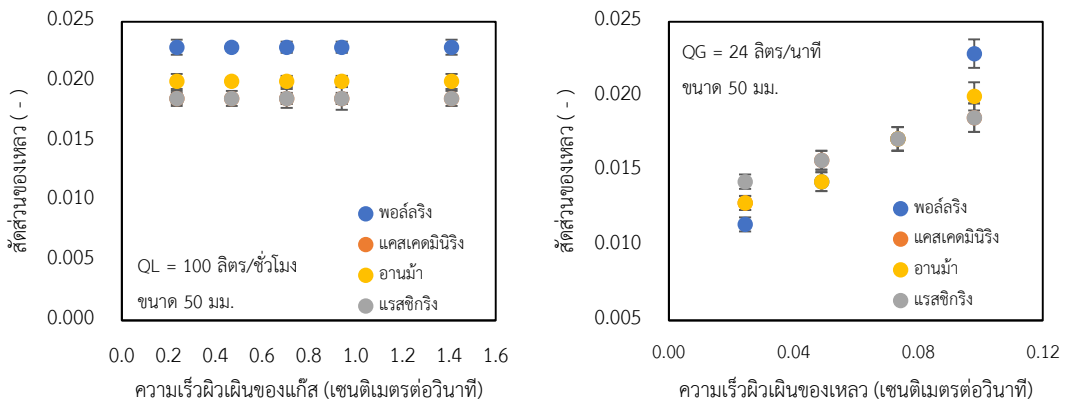
4.3 ผลการศึกษาคอรัลมันแบบบรรจุตัวกลาง

ผลจากการศึกษาคอรัลมันแบบบรรจุตัวกลางเป็นการศึกษาตัวแปร โดยมีการเติมตัวกลางที่มีชนิดพอลลิ่ง แคตเคดมินิริง อานม่า ที่มีขนาด 25 38 และ 50 มิลลิเมตรและแรสซิกริง และขนาด 25 และ 50 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นการใช้อัตราการไหลของแก๊สอยู่ในช่วง 4 - 24 ลิตรต่อนาทีและอัตราการไหลของเหลวอยู่ในช่วง 25 - 100 ลิตรต่อชั่วโมง ที่จะส่งผลต่อตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ ตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสารและพลังงานที่ใช้ ดังต่อไปนี้

4.3.1 ผลการศึกษาตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์

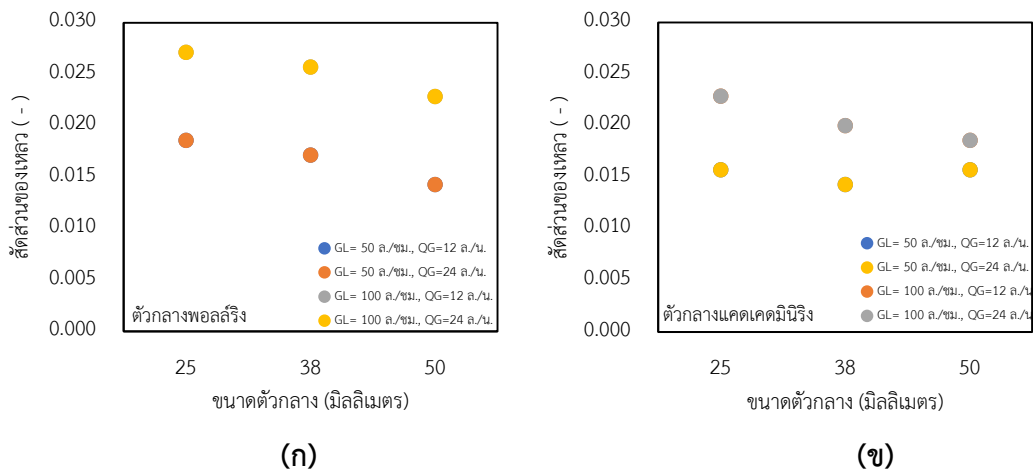
4.3.1.1 สัดส่วนของเหลว

รูปที่ 53 การเปรียบเทียบสัดส่วนของเหลวที่เกิดจากตัวกลางชนิดต่าง ๆ (ซ้าย) เปรียบเทียบกับความเร็วผิวผิวนของแก๊สพบว่า การเพิ่มความเร็วผิวผิวนของแก๊สไม่มีผลกระทบต่อสัดส่วนของเหลว เนื่องจากความเร็วแก๊สจะไหลสวนทางจากด้านล่างคอรัลมันจึงไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนของเหลว และรูป(ขวา) เป็นการเปรียบเทียบกับความเร็วผิวผิวนของเหลวพบว่า ตัวกลางชนิดพอลลิ่งมีสัดส่วนของเหลวอยู่ในช่วง $0.0114 - 0.023 \pm 0.00047$ ซึ่งได้ค่า P-value ที่ได้จาก Anova มีค่าเท่ากับ 2.36×10^{-6} ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่หมายความว่ามี ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ตัวกลางแคสเคดมินิริงมีสัดส่วนของเหลวอยู่ในช่วง $0.0128 - 0.0185 \pm 0.00063$ ซึ่งได้ค่า P-value ที่ได้จาก Anova มีค่าเท่ากับ 2.38×10^{-8} ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่หมายความว่ามี ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ตัวกลางอานมามีสัดส่วนของเหลวอยู่ในช่วง $0.0128 - 0.02 \pm 0.00046$ ซึ่งได้ค่า P-value ที่ได้จาก Anova มีค่าเท่ากับ 1.59×10^{-9} ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่หมายความว่ามี ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ตัวกลางแรสซิกริงมีสัดส่วนของเหลวอยู่ในช่วง $0.0144 - 0.0185 \pm 0.00053$ ซึ่งได้ค่า P-value ที่ได้จาก Anova มีค่าเท่ากับ 3.6×10^{-7} ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่หมายความว่ามี ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า เมื่อมีการเพิ่มความเร็วของเหลวส่งผลให้มีสัดส่วนของเหลวเพิ่มขึ้น เนื่องจากคอรัลมันแบบบรรจุตัวกลางถูกควบคุมด้วยวัฏภาคของเหลวความเร็วของเหลวที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้มีปริมาณของเหลวค้างอยู่ในระบบตัวกลางได้มากขึ้น



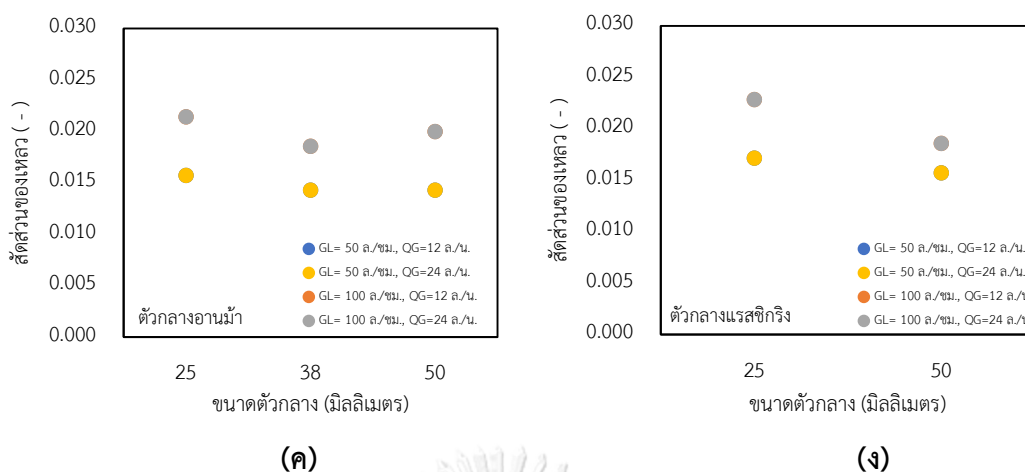
รูปที่ 53 การเปรียบเทียบสัดส่วนของเหลวที่เกิดจากตัวกลางชนิดต่าง ๆ (ซ้าย) เปรียบเทียบกับความเร็วของแก๊ส (ขวา) เปรียบเทียบกับความเร็วของเหลว

จากรูปที่ 54 การเปรียบเทียบสัดส่วนของเหลวที่เกิดจากตัวกลางชนิดต่าง ๆ ที่มีขนาด 25 38 50 มิลลิเมตร พบว่า ขนาดของตัวกลาง 25 มิลลิเมตร มีสัดส่วนของเหลวที่มากกว่าขนาด 38 และ 50 มิลลิเมตร เนื่องจากตัวกลางขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวมากกว่าตัวกลางขนาดใหญ่ อีกทั้งยังมีช่องว่างตัวกลางที่มากกว่าตัวกลางขนาดใหญ่ จึงทำให้สามารถกักเก็บปริมาณของเหลวให้ค้างอยู่ในระบบได้มาก และชนิดของตัวกลางพบว่า ตัวกลางพอลีสไตรีนมีสัดส่วนของเหลวมากกว่าตัวกลางแอสเคตมินีนริง ตัวกลางอานม้าและตัวกลางแรสซิกริง ตามลำดับ เนื่องจากการที่มีช่องว่างของตัวกลางมาก



(ก)

(ข)

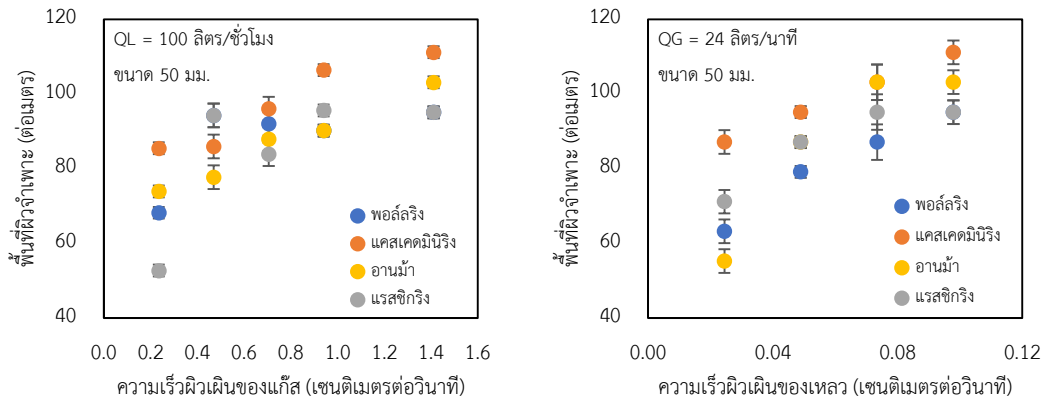


รูปที่ 54 การเปรียบเทียบสัดส่วนของเหลวที่เกิดจากตัวกลางขนาดต่าง ๆ ชนิดตัวกลางพลาสติก (ก) พอลีลิ่ง (ข) แคลสเคดมินิริง (ค) อานม้า (ง) แรสซิกริง

4.3.1.2 พื้นที่ผิวจำเพาะ

จากรูปที่ 55 การเปรียบเทียบพื้นที่ผิวจำเพาะที่เกิดจากตัวกลางชนิดต่าง ๆ (ซ้าย) เปรียบเทียบกับความเร็วแก๊สพบว่า การเพิ่มความเร็วผิวเดินของแก๊สมีผลกระทบทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นตาม ซึ่งได้ผลเหมือนกันกับ (Luo และคณะ, 2017) ที่กล่าวไว้ว่า ความเร็วของแก๊สที่เพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดความปั่นป่วนมากในเฟสของเหลวทำให้กระจายตัวได้มากขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวจำเพาะ และรูป(ขวา) เป็นการเปรียบเทียบกับความเร็วผิวเดินของเหลวพบว่า การเพิ่มความเร็วของเหลวทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น โดยที่ตัวกลางพอลีลิ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง $63.2 - 95.1 \pm 1.58$ ต่อเมตร ซึ่งได้ค่า P-value ที่ได้จาก Anova มีค่าเท่ากับ 5.8×10^{-9} ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่หมายความว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ตัวกลางแคลสเคดมินิริงมีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง $87.1 - 111.1 \pm 2.32$ ต่อเมตร ซึ่งได้ค่า P-value ที่ได้จาก Anova มีค่าเท่ากับ 1.5×10^{-11} ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่หมายความว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ตัวกลางอานม้ามีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง $55.2 - 103.1 \pm 1.97$ ต่อเมตรซึ่งได้ค่า P-value ที่ได้จาก Anova มีค่าเท่ากับ 1.9×10^{-11} ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่หมายความว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ และตัวกลางแรสซิกริงมีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง $71.1 - 95.1 \pm 2.87$ ต่อเมตร ซึ่งได้ค่า P-value ที่ได้จาก Anova มีค่าเท่ากับ 4×10^{-8} ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่หมายความว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า (Luo และคณะ, 2017) การเพิ่มสามารถเพิ่มพื้นที่ผิว

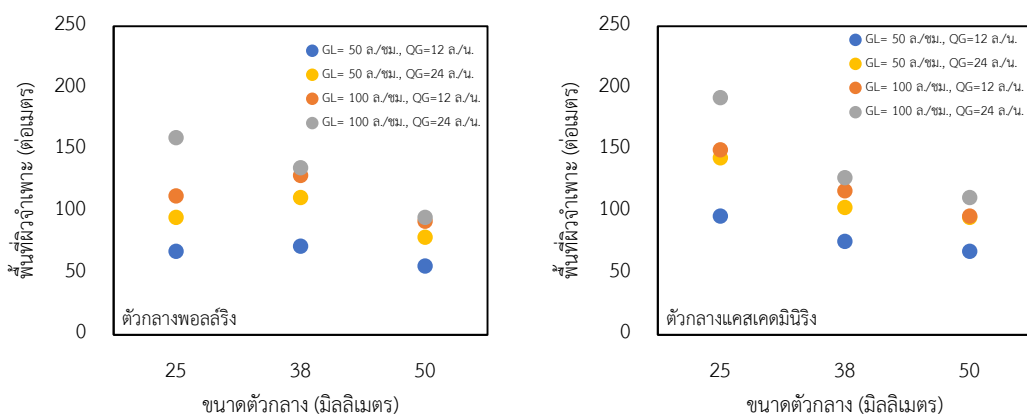
จำเพาะ เนื่องจากการเพิ่มความเร็วของเหลวสูงขึ้นทำให้เกิดความปั่นป่วนมากในวัฏภาคของแก๊สและของเหลวกระจายตัวได้ดีขึ้น ที่เกิดทั้งหยดน้ำและชั้นฟิล์มมากขึ้น



รูปที่ 55 การเปรียบเทียบพื้นที่ผิวจำเพาะที่เกิดจากตัวกลางชนิดต่าง ๆ

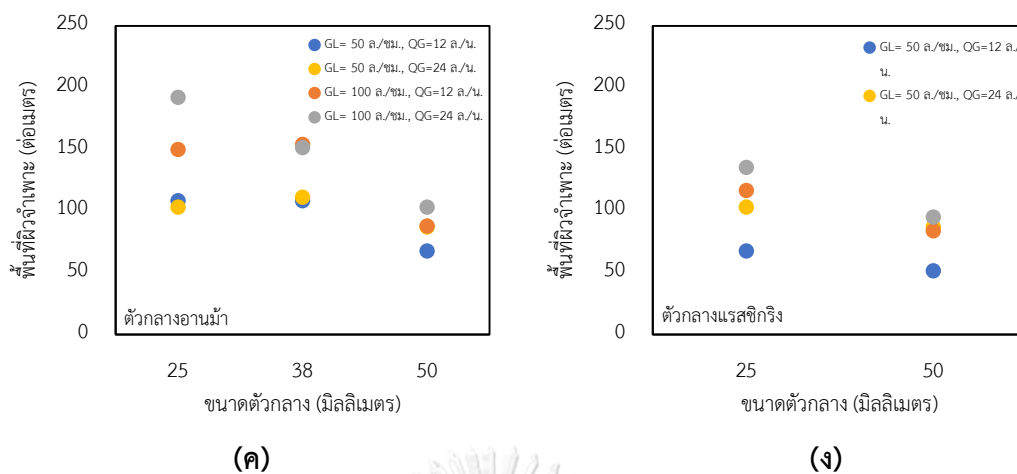
(ซ้าย) เปรียบเทียบกับความเร็วของแก๊ส (ขวา) เปรียบเทียบกับความเร็วของเหลว

รูปที่ 56 การเปรียบเทียบพื้นที่ผิวจำเพาะที่เกิดจากตัวกลางชนิดต่าง ๆ ที่มีขนาด 25 38 50 มิลลิเมตร พบว่า ขนาดของตัวกลาง 25 มิลลิเมตร มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่มากกว่าขนาด 38 และ 50 มิลลิเมตร เนื่องจากตัวกลางขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวมากกว่าตัวกลางขนาดใหญ่ อีกทั้งยังมีช่องว่างตัวกลางที่มากกว่าตัวกลางขนาดใหญ่ จึงทำให้สามารถกักเก็บปริมาณของเหลวให้ค้างอยู่ในระบบได้มาก และชนิดของตัวกลางพบว่า ตัวกลางพอลลิ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าตัวกลางแคลสเคตมินิริง, ตัวกลางอานม้า และตัวกลางแรสซิกริง ตามลำดับ เนื่องจากการพื้นที่เปียก/พื้นที่ผิวตัวกลาง (a_w/a_{total}) ของตัวกลางพอลลิ่งมีมากกว่าตัวกลางชนิดอื่น ๆ นั้นหมายความว่าปริมาณของเหลวไหลเกือบจะทั่วทุกบริเวณของตัวกลางที่ทำการบรรจุลงไปนั่นเอง



(ก)

(ข)



รูปที่ 56 การเปรียบเทียบพื้นที่ผิวจำเพาะที่เกิดจากตัวกลางขนาดต่าง ๆ

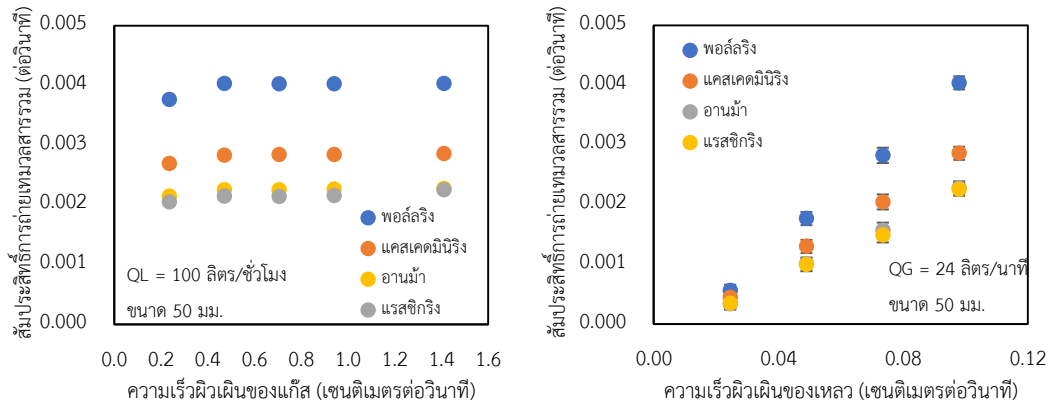
ชนิดตัวกลางพลาสติก (ก) พอลลิ่งริง (ข) แคสเคดมินิริง (ค) อานม้า (ง)แรสซิกริง

4.3.2 ผลการศึกษาตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสารและพลังงานที่ใช้ในระบบ

4.3.2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม

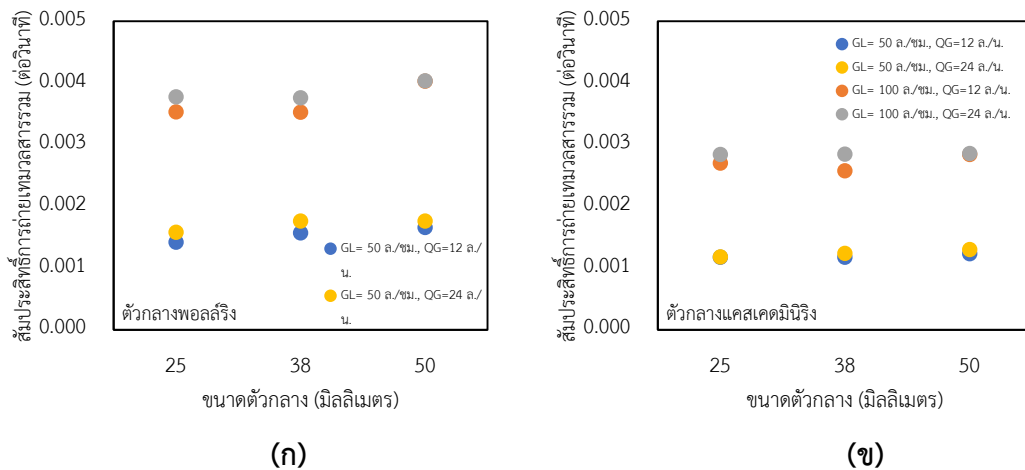
จากรูปที่ 57 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมที่เกิดจากตัวกลางชนิดต่าง ๆ (ซ้าย) เปรียบเทียบกับความเร็วผิวเฉือนของแก๊สพบว่า การเพิ่มความเร็วของแก๊สไม่มีผลกระทบในค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม เนื่องจากแบบจำลองของ Onda และ Sherwood-Hollowat แสดงให้เห็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารไม่ขึ้นกับอัตราการไหลแก๊ส และรูป(ขวา) เป็นการเปรียบเทียบกับความเร็วผิวเฉือนของเหลวพบว่า ตัวกลางพอลลิ่งริงมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมสูงที่สุดอยู่ในช่วง $0.000564 - 0.00403 \pm 9.4 \times 10^{-5}$ ต่อวินาที ซึ่งได้ค่า P-value ที่ได้จาก Anova มีค่าเท่ากับ 7.2×10^{-15} ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่หมายความว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ตัวกลางแคสเคดมินิริงมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมอยู่ในช่วง $0.000446 - 0.00285 \pm 1.1 \times 10^{-4}$ ต่อวินาที ซึ่งได้ค่า P-value ที่ได้จาก Anova มีค่าเท่ากับ 5.2×10^{-13} ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่หมายความว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ตัวกลางอานม้ามีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมอยู่ในช่วง $0.000338 - 0.00227 \pm 1.2 \times 10^{-4}$ ต่อวินาทีซึ่งได้ค่า P-value ที่ได้จาก Anova มีค่าเท่ากับ 7.2×10^{-12} ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่หมายความว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ตัวกลางแรสซิกริงมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมอยู่ในช่วง $0.000346 - 0.00225 \pm 1.4 \times 10^{-4}$ ต่อวินาที ซึ่งได้ค่า P-value ที่ได้จาก Anova มีค่าเท่ากับ 9.4×10^{-12} ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่หมายความว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเพิ่มความเร็ว

ของเหลวสามารถทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเพิ่มขึ้น เนื่องจากคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง จะถูกควบคุมโดยวิฤภาคของเหลวและแบบจำลองของ Onda ยังสามารถทำนายผลของอัตราการไหล ของเหลวต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารได้ดี (Roberts และคณะ, 1985)



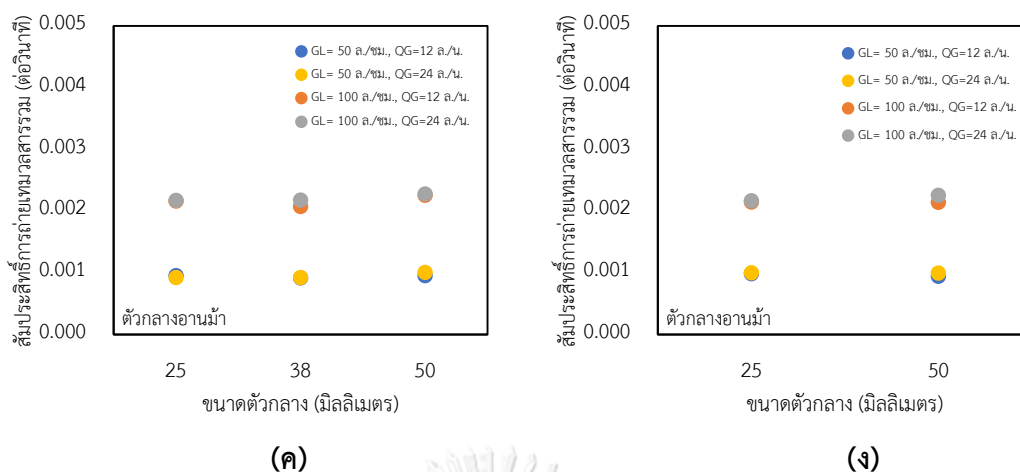
รูปที่ 57 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมที่เกิดจากตัวกลางชนิดต่าง ๆ (ซ้าย) เปรียบเทียบกับความเร็วของแก๊ส (ขวา) เปรียบเทียบกับความเร็วของเหลว

จากรูปที่ 58 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมที่เกิดจากตัวกลางชนิดต่าง ๆ ที่มีขนาด 25 38 50 มิลลิเมตร พบว่า ขนาดของตัวกลาง 50 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมที่มากกว่าขนาด 38 และ 25 มิลลิเมตร เนื่องจากตัวกลางขนาดใหญ่จะสามารถกระจายวิฤภาคของแก๊สและของเหลวได้ดีกว่าตัวกลางขนาดเล็ก (Luo และคณะ, 2017) จากการทดลองนี้จึงนำตัวกลางพอลีสตีร์ขนาด 50 มิลลิเมตร ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารสูงที่สุด ไปใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย



(ก)

(ข)

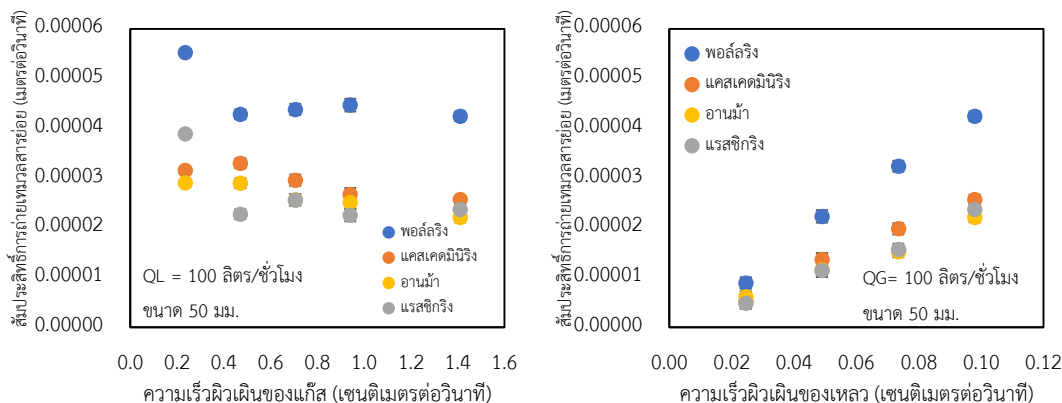


รูปที่ 58 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมที่เกิดจากตัวกลางขนาดต่าง ๆ ชนิดตัวกลางพลาสติก (ก) พอลล์ริง (ข) แคลสเคดมินิริง (ค) อานม้า (ง) แรสซิกริง

4.3.2.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย

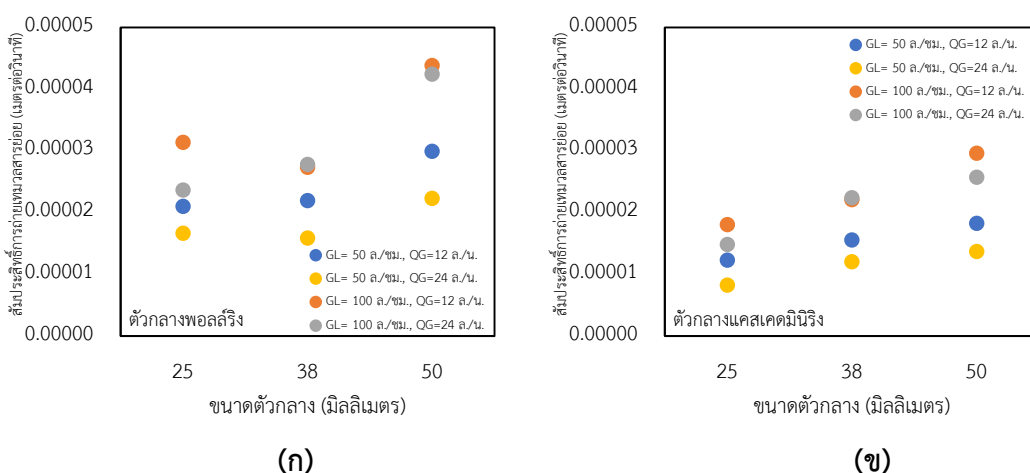
จากรูปที่ 59 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยที่เกิดจากตัวกลางชนิดต่าง ๆ (ซ้าย) เปรียบเทียบกับความเร็วผิวเดินแก๊สพบว่า การเพิ่มความเร็วของแก๊สมีผลกระทบในค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยลดลง เนื่องจากความเร็วของแก๊สที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการปั่นป่วนมากในวัฏภาคของเหลวทำให้เกิดการกระจายตัวได้มากขึ้น ทำให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น แต่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยลดลง และรูป(ขวา) เป็นการเปรียบเทียบกับความเร็วผิวเดินของเหลวพบว่า ตัวกลางพอลล์ริงมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยอยู่ในช่วง $8.9 \times 10^{-6} - 4.24 \times 10^{-5} \pm 1 \times 10^{-5}$ เมตรต่อวินาที ซึ่งได้ค่า P-value ที่ได้จาก Anova มีค่าเท่ากับ 1.3×10^{-14} ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่หมายความว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ตัวกลางแคลสเคมินิริงมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยอยู่ในช่วง $5.1 \times 10^{-6} - 2.3 \times 10^{-5}$ เมตรต่อวินาที ซึ่งได้ค่า P-value ที่ได้จาก Anova มีค่าเท่ากับ 4.6×10^{-12} ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่หมายความว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ตัวกลางอานม้ามีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยอยู่ในช่วง $6.1 \times 10^{-6} - 3.3 \times 10^{-5}$ เมตรต่อวินาที ซึ่งได้ค่า P-value ที่ได้จาก Anova มีค่าเท่ากับ 1.2×10^{-10} ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่หมายความว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ตัวกลางแรสซิกริงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยอยู่ในช่วง $4.86 \times 10^{-6} - 4.3 \times 10^{-5}$ เมตรต่อวินาทีซึ่งได้ค่า P-value ที่ได้จาก Anova มีค่าเท่ากับ 1.7×10^{-11} ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่หมายความว่ามีความ

แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากความเร็วในการไหลที่ไหลลงมามากขึ้นทำให้เกิดการปั่นป่วน ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยเพิ่มขึ้น



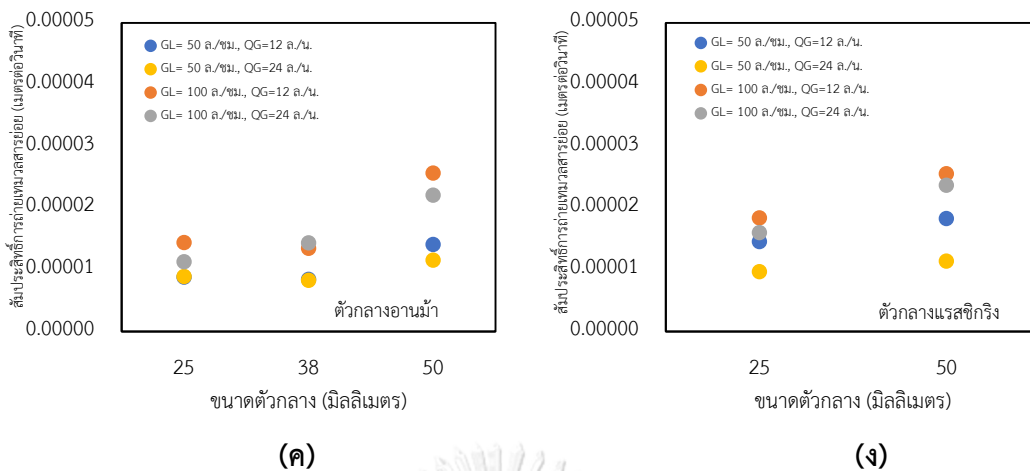
รูปที่ 59 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยที่เกิดจากตัวกลางชนิดต่าง ๆ (ซ้าย) เปรียบเทียบกับความเร็วของแก๊ส (ขวา) เปรียบเทียบกับความเร็วของเหลว

จากรูปที่ 60 28 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยที่เกิดจากตัวกลางชนิดต่าง ๆ ที่มีขนาด 25 38 50 มิลลิเมตร พบว่า ขนาดของตัวกลาง 50 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยที่มากกว่าขนาด 38 และ 25 มิลลิเมตร เนื่องจากตัวกลางขนาดใหญ่มีพื้นที่ผิวจำตัวกลางน้อยส่งผลต่อพื้นที่ผิวจำเพาะลดลง และชนิดของตัวกลางพบว่า ตัวกลางพอลีสไตรีนมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยมากกว่าตัวกลางแคสเซีย, ตัวกลางอานม้าและตัวกลางเรซิน เนื่องจากความเร็วในการไหลที่ไหลลงมามากขึ้นทำให้เกิดการปั่นป่วน ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยเพิ่มขึ้น



(ก)

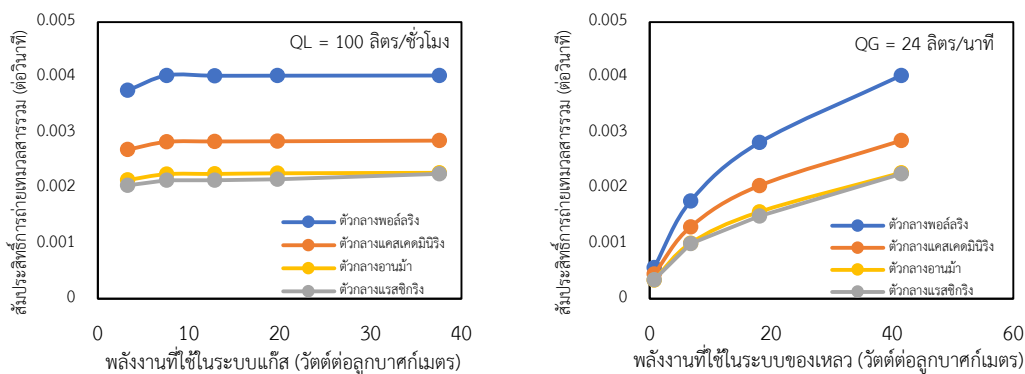
(ข)



รูปที่ 60 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยที่เกิดจากตัวกลางขนาดต่าง ๆ ชนิดตัวกลางพลาสติก (ก) พอลล์ริง (ข) แคสเคดมินิริง (ค) อานม้า (ง)แรสซิกริง

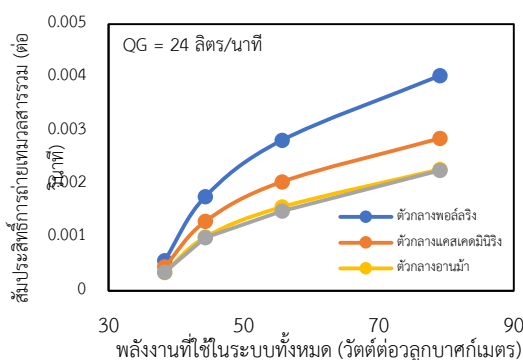
4.3.2.3 พลังงานที่ใช้ในระบบ

จากรูปที่ 61 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมที่เกิดขึ้นจากตัวกลางชนิดต่าง ๆ (ซ้าย)เปรียบเทียบกับพลังงานที่ใช้ในระบบแก๊ส พบว่า การเพิ่มพลังงานของแก๊สไม่มีผลกระทบต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม ซึ่งมีค่าการใช้พลังงานในระบบของแก๊สในทุกตัวกลางจะอยู่ในช่วง 3.29 – 37.56 วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร รูป(ขวา)เปรียบเทียบกับพลังงานที่ใช้ในของเหลว พบว่า เมื่อการเพิ่มพลังงานในระบบของเหลวมีแนวโน้มทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมเพิ่มขึ้นและตัวกลางพอลล์ริงมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมสูงสุด ซึ่งมีค่าการใช้พลังงานในระบบของเหลวอยู่ในช่วง 0.72 -41.49 วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 61 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยกับการใช้พลังงาน (ซ้าย)พลังงานที่ใช้ในระบบแก๊ส (ขวา)พลังงานที่ใช้ในระบบของเหลว เปลี่ยนกราฟ

จากรูปที่ 62 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมกับพลังงานที่ใช้ในระบบทั้งหมดพบว่า เมื่อมีการเพิ่มพลังงานในระบบทั้งหมดจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมสูงขึ้นตาม โดยตัวกลางพอลีลิ่งจะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารสูงที่สุด และมีค่าการใช้พลังงานอยู่ในช่วง 38.28 – 79.06 วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งจะเห็นได้ว่ากราฟรูปที่ 62 มีรูปร่างเหมือนกันกับกราฟพลังงานที่ใช้ในของเหลวรูปที่ 61(ขวา) กล่าวคือ ภูมิภาคของเหลวเป็นตัวควบคุมการเกิดการถ่ายเทมวลสารในคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง



รูปที่ 62 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยกับการใช้พลังงานในระบบทั้งหมด

ตารางที่ 20 การเปรียบเทียบค่าพลังงานที่ใช้กับค่าการถ่ายเทมวลสารที่คอลัมน์ประเภทต่าง ๆ

คอลัมน์	หัวจ่าย (มม.)	ตัวกลาง	ขนาด	F_L (LPH)	F_G (LPM)	a (m^{-1})	$K_L a$ (s^{-1})	P/V Total
ฟองอากาศ	0.4	-	-	50	12	25.5	0.00278	125.7
				50	24	40.5	0.00338	487.0
				100	12	26.7	0.00620	129.5
ฟองอากาศชนิดเต็ม	0.4	พอลีลิ่ง	ปริมาตร	50	12	33.9	0.00286	111.8
				50	24	47.3	0.00314	514.8
				100	12	35.4	0.00694	115.6
บรรจุตัวกลาง	-	พอลีลิ่ง	50 มม.	100	24	48.3	0.00867	518.6
				50	12	55.6	0.00166	19.6
				50	24	79.2	0.00177	44.3
บรรจุตัวกลาง	-	พอลีลิ่ง	50 มม.	100	12	92.0	0.00403	54.3
				100	24	95.1	0.00404	79.1

จากตารางที่ 4-2 จะเห็นได้ว่า คอลัมน์แบบพองอากาศที่ใช้กับหัวจ่ายอากาศขนาด 0.4 มิลลิเมตร ที่อัตราการไหลของเหลวอยู่ในช่วง 50 – 100 ลิตรต่อชั่วโมงและอัตราการไหลของแก๊สอยู่ในช่วง 12 – 24 ลิตรต่ออนาที มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยที่มีผลทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารสูง ซึ่งการที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมสูงก็จะต้องใช้พลังงานมากในการสร้างพองขนาดเล็กที่จะช่วยการถ่ายเทมวลสารได้ดี

คอลัมน์แบบพองอากาศขนาดเต็มตัวกลางที่ใช้กับหัวจ่ายอากาศขนาด 0.4 มิลลิเมตร มีการเติมตัวกลางชนิดพอล์ลิ่ง ขนาด 25 มิลลิเมตร ปริมาตร 2.5% อัตราการไหลของเหลวอยู่ในช่วง 50 – 100 ลิตรต่อชั่วโมงและอัตราการไหลของแก๊สอยู่ในช่วง 12 – 24 ลิตรต่ออนาที ซึ่งการเติมตัวกลางในคอลัมน์ส่งผลให้มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลงจากการไม่เติมตัวกลางและมีการใช้พลังงานที่สูงเนื่องจากใช้หัวจ่ายขนาด 0.4 มิลลิเมตร อย่างไรก็ตามการเติมตัวกลางจะใช้ได้มีประสิทธิภาพเมื่อใช้กับหัวจ่ายขนาด 1.2 มิลลิเมตร เพราะตัวกลางจะทำหน้าที่ให้พองขนาดใหญ่ที่เกิดจากหัวจ่ายอากาศขนาดใหญ่นั้นแตกตัวเป็นพองขนาดเล็กและอยู่ในระบบได้นานขึ้น ส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมสูงขึ้นจากการไม่เติมตัวกลาง โดยจะเป็นการประหยัดพลังงานเนื่องจากการใช้หัวจ่ายอากาศขนาดใหญ่

คอลัมน์แบบบรรจุตัวกลางเป็นการบรรจุตัวกลางพอล์ลิ่ง ขนาด 50 มิลลิเมตรอัตราการไหลของเหลวอยู่ในช่วง 50 – 100 ลิตรต่อชั่วโมงและอัตราการไหลของแก๊สอยู่ในช่วง 12 – 24 ลิตรต่ออนาที ซึ่งจะเห็นได้ว่าคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลางจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าคอลัมน์แบบพองอากาศ แต่การมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าไม่ได้ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารที่ดีกว่า แม้ว่าจะมีการถ่ายเทมวลสารไม่สูงนัก แต่ก็มีการใช้พลังงานที่ต่ำกว่าคอลัมน์แบบพองอากาศ

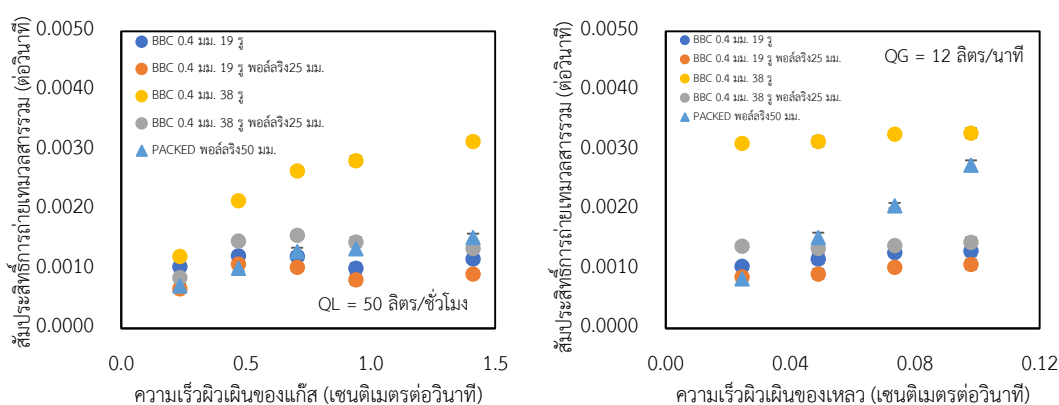
4.4 ผลการศึกษาการนำไปประยุกต์ใช้กับการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย

ผลจากการศึกษาคอลัมน์แบบฟองอากาศที่ใช้กับหัวจ่ายอากาศ 0.4 มิลลิเมตร ที่มีจำนวน 19 และ 38 รู คอลัมน์แบบฟองอากาศชนิดเติมตัวกลางที่ใช้กับหัวจ่ายอากาศ 0.4 มิลลิเมตร ที่มีจำนวน 19 และ 38 รู ที่มีการเติมตัวกลางพอลีสไตรีนขนาด 25 มิลลิเมตรในปริมาตร 2.5% และคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลางเติมตัวกลางพอลีสไตรีนขนาด 50 มิลลิเมตร ในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายเบนซีน (Benzene) ด้วยความเข้มข้น 1000 พีพีเอ็ม ซึ่งเป็นการใช้อัตราการไหลของแก๊สอยู่ในช่วง 4 - 24 ลิตรต่อนาทีและอัตราการไหลของเหลวอยู่ในช่วง 25 - 100 ลิตรต่อชั่วโมง ที่จะส่งผลต่อตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสาร พลังงานที่ใช้ในระบบและประสิทธิภาพในการบำบัด ดังต่อไปนี้

4.4.1 ผลการศึกษาใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย

4.4.1.1 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม

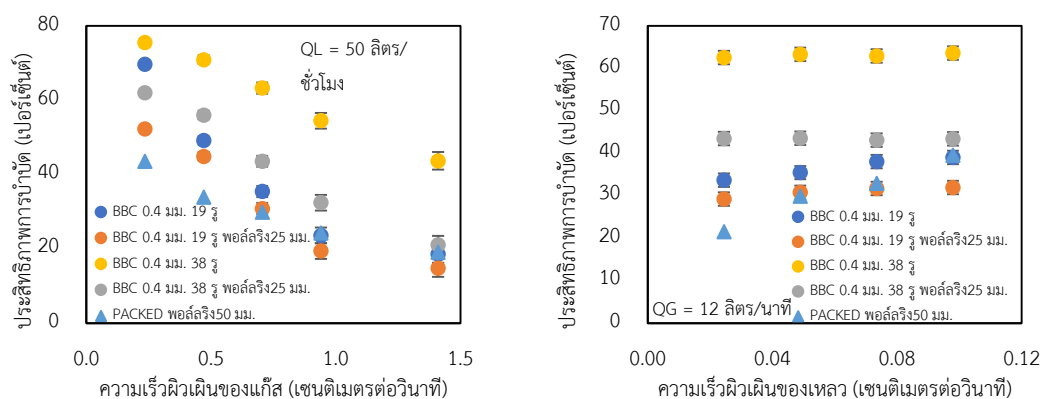
จากรูปที่ 63 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมที่เกิดขึ้นในคอลัมน์ประเภทต่าง ๆ ที่ใช้บำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย รูป(ซ้าย) เปรียบเทียบกับความเร็วผิวผิวนของแก๊สพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในคอลัมน์แบบฟองอากาศ ใช้กับหัวจ่ายอากาศ 0.4 มิลลิเมตร จำนวน 38 เนื่องจากคอลัมน์ถูกควบคุมด้วยวิฎภาคของแก๊ส แต่การเพิ่มขึ้นของเบนซีนยังไม่เท่ากับการทดลองกับออกซิเจนเนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์ในการแพร่ที่แตกต่างกัน รูป(ขวา) เปรียบเทียบกับความเร็วผิวผิวนของเหลวพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลางเนื่องจากคอลัมน์ถูกควบคุมด้วยวิฎภาคของเหลว



รูปที่ 63 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมที่เกิดจากคอลัมน์ชนิดต่าง ๆ (ซ้าย) เปรียบเทียบกับความเร็วของแก๊ส (ขวา) เปรียบเทียบกับความเร็วของเหลว

4.4.1.2 ประสิทธิภาพในการบำบัด

จากรูปที่ 64 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายเบนซีน รูป (ซ้าย) เปรียบเทียบกับความเร็วผิวเดินแก๊สพบว่า เมื่อเพิ่มความเร็วผิวเดินแก๊สทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงในทุกคอลัมน์ เนื่องจากความเข้มข้นเบนซีนที่เข้าไปในระบบมากและไม่สามารถถ่ายเทมวลสารได้อีกจึงทำให้ประสิทธิภาพลดลง ซึ่งได้ผลเหมือนกันกับ (Zhang และคณะ, 2020) รูป(ขวา) เปรียบเทียบกับความเร็วผิวเดินของเหลวพบว่า การเพิ่มความเร็วของเหลวในคอลัมน์แบบฟองอากาศไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดได้ แต่การเพิ่มความเร็วของเหลวสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดของคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลางได้ คอลัมน์แบบฟองอากาศสามารถบำบัดได้มากที่สุด $76 \pm 1.1 \%$ และคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลางสามารถบำบัดได้มากที่สุด $56 \pm 1.4 \%$



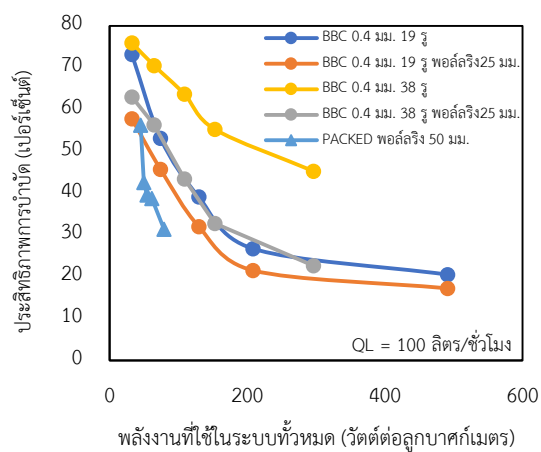
รูปที่ 64 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดที่เกิดจากคอลัมน์ชนิดต่าง ๆ

(ซ้าย) เปรียบเทียบกับความเร็วของแก๊ส (ขวา) เปรียบเทียบกับความเร็วของเหลว

4.4.1.3 พลังงานที่ใช้ในระบบ

จากรูปที่ 65 การเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในระบบที่เกิดจากคอลัมน์ชนิดต่าง ๆ ที่ใช้บำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย รูป(ซ้าย)เป็นการเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม พบว่า เมื่อมีการใช้ค่าของพลังงานที่เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยคอลัมน์แบบฟองอากาศที่ใช้กับหัวจ่ายอากาศ 0.4 มิลลิเมตร จำนวน 38 รู มีการใช้พลังงานมากที่สุดและมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมสูงที่สุด อย่างไรก็ตามคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลางมีการใช้พลังงานในระบบน้อยและมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมเท่า ๆ กันกับหรือมีค่ามากกว่าคอลัมน์แบบฟองอากาศชนิดเต็มตัวกลางในทุกหัวจ่ายอากาศ รูป(ขวา)เป็นการเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการบำบัด จะเห็นได้ว่า คอลัมน์แบบฟองอากาศสามารถบำบัดได้ดีที่สุดและมีการใช้พลังงานสูง ซึ่งแตกต่างจากคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลางที่ใช้ค่าพลังงานในระบบต่ำ จึงสรุป

ได้ว่าถ้ามีการใช้ในงานที่ปริมาณแก๊สมาก ๆ ควรใช้คอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง แต่ถ้ามีการใช้ปริมาณของเหลวมาก ๆ ควรใช้คอลัมน์แบบฟองอากาศ เนื่องจากการพิจารณาเรื่องการใช้พลังงานเข้ามาเกี่ยวข้อง



รูปที่ 65 เปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในระบบที่เกิดจากคอลัมน์ชนิดต่าง ๆ
ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการถ่ายเทมวลสารของภูมิภาคแก๊สออกซิเจนไปสู่ภูมิภาคของเหลว น้ำประปาด้วยคอลัมน์แบบฟองอากาศ คอลัมน์แบบฟองอากาศชนิดเติมตัวกลาง และคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลางในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งจะมีการนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย เบนซีน โดยศึกษาคอลัมน์แบบฟองอากาศจะศึกษาผลกระทบจากอัตราการไหลของเหลว อัตราการไหลของแก๊ส หัวจ่ายอากาศขนาด 0.4 0.8 และ 1.2 มิลลิเมตร ที่มีจำนวน 19 และ 38 รู การศึกษา คอลัมน์แบบฟองอากาศชนิดเติมตัวกลางจะศึกษาผลกระทบจากอัตราการไหลของเหลว อัตราการไหลของแก๊ส หัวจ่ายอากาศ ตัวกลางพอลีสไตรีน แคลสเคดมินิริง อานม้า แรสซิกริง ที่มีขนาด 25 38 50 มิลลิเมตร และปริมาตรตัวกลางที่เติมมี 1 และ 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลางที่จะศึกษาผลกระทบจากอัตราการไหลของเหลว อัตราการไหลของแก๊ส ตัวกลางพอลีสไตรีน แคลสเคดมินิริง อานม้า แรสซิกริง ที่มีขนาด 25 38 50 มิลลิเมตร ซึ่งจากผลการทดลองสามารถสรุปงานวิจัยได้ดังนี้

1. คอลัมน์แบบฟองอากาศจะสามารถถ่ายเทมวลสารได้ดี จะต้องมีการใช้กับหัวจ่ายอากาศขนาดเล็ก ซึ่งในการทดลองก็คือขนาด 0.4 มิลลิเมตร ที่มีจำนวน 38 รู เนื่องจากหัวจ่ายอากาศขนาดเล็กจะสามารถสร้างขนาดฟองอากาศที่มีขนาดเล็กและการมีจำนวนรู 38 รูนั้นช่วยให้ฟองอากาศนั้นมีความเร็วลอยตัวช้าลงส่งผลให้มีสัดส่วนของแก๊สเพิ่มขึ้น กล่าวคือ ความเร็วฟองเฉลี่ยช้าทำให้ฟองอากาศอยู่ในระบบได้นานขึ้น แต่การใช้หัวจ่ายขนาดเล็กจะเป็นการสิ้นเปลืองในเรื่องการใช้พลังงาน

2. คอลัมน์แบบฟองอากาศแบบชนิดเติมตัวกลาง การเติมตัวกลางพลาสติกจะสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลสารได้ เมื่อใช้กับหัวจ่ายอากาศขนาดใหญ่ 0.8 และ 1.2 มิลลิเมตร แต่การเติมตัวกลางพลาสติกในหัวจ่ายอากาศขนาด 0.4 มิลลิเมตรกลับมีการถ่ายเทมวลสารที่ลดลง ถึงแม้ว่า การเติมตัวกลางในหัวจ่ายขนาด 0.4 มิลลิเมตรจะมีค่าการถ่ายเทมวลสารที่ลดลง แต่ก็ยังมีค่าการถ่ายเทมวลสารที่สูงกว่าการใช้กับหัวจ่ายอากาศขนาด 0.8 และ 1.2 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นผลมาจากรูขนาดเล็กของหัวจ่ายอากาศขนาด 0.4 มิลลิเมตรที่ช่วยให้การถ่ายเทมวลสารได้ดี ซึ่งแตกต่างจากการหัวจ่าย

อากาศขนาด 0.8 และ 1.2 มิลลิเมตร ที่การเติมตัวกลางจะเป็นการช่วยขัดขวางจากการรวมตัวของอากาศที่จะส่งผลให้ฟองอากาศแตกตัวและถูกกักอยู่ในระบบได้นานขึ้น ซึ่งจะเป็นการสร้างโอกาสและเพิ่มระยะเวลาในเกิดการสัมผัสระหว่างวัฏภาคของเหลวและวัฏภาคของแก๊ส ซึ่งตัวกลางที่สามารถช่วยให้เกิดการถ่ายเทมวลสารได้ดีในการทดลองนี้ก็คือ ตัวกลางพอลลิ่ง ที่มีขนาด 25 มิลลิเมตร ในปริมาตร 2.5% เนื่องจากลักษณะของตัวกลางมีความพรุนของชั้นและมีพื้นที่ผิวตัวกลางมาก นอกจากนี้การเติมตัวกลางพลาสติกในหัวจ่ายอากาศขนาด 0.8 และ 1.2 มิลลิเมตรที่มีการถ่ายเทมวลสารที่สูงขึ้นเกือบเท่าการใช้ในหัวจ่ายอากาศขนาด 0.4 มิลลิเมตร และยังเป็นผลดีที่มีอัตราการใช้พลังงานที่น้อยกว่าหัวจ่ายอากาศขนาด 0.4 มิลลิเมตร

3. คอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง การเติมตัวกลางชนิดพอลลิ่ง สามารถช่วยให้มีการถ่ายเทมวลสารที่ดีที่สุด เนื่องจากตัวกลางพอลลิ่งมีรูลักษณะของชั้นพรุนมาก และการถ่ายเทมวลสารรองลงมาจะเป็นตัวกลางแคสเคดมินิริง อานม้าและแรสซิกริง ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ขนาดของตัวกลางที่ใช้มีผลกระทบต่ออัตราการถ่ายเทมวลสารเพียงเล็กน้อยแต่ขนาดที่เหมาะสมต่อการใช้ในการทดลองนี้คือตัวกลางขนาด 50 มิลลิเมตร ที่จะมีค่าพื้นที่ผิวตัวกลางน้อยและขนาดชั้นใหญ่จึงทำให้ใส่จำนวนชั้นตัวกลางได้น้อยในคอลัมน์ทำให้เกิดพื้นที่ประสานระหว่างแก๊สและของเหลวมากขึ้น และการใช้คอลัมน์แบบบรรจุตัวกลางยังเป็นการประหยัดพลังงานมากกว่าการใช้คอลัมน์แบบฟองอากาศ

4. การนำตัวแปรที่ดีที่สุดที่ในคอลัมน์ต่าง ๆ มาใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายเบนซีน เมื่อเพิ่มความเร็วของแก๊สในทุกคอลัมน์จะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงในคอลัมน์ทุกประเภท อย่างไรก็ตามคอลัมน์ที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายเบนซีนที่ดีที่สุดนั้นก็คือนั่นก็คือ คอลัมน์แบบฟองอากาศที่ใช้กับหัวจ่ายอากาศขนาด 0.4 มิลลิเมตร จำนวน 38 รู ซึ่งสามารถบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายประมาณ 75 – 43% และยังมีอัตราการใช้พลังงานในระบบสูง

5.2 ข้อเสนอแนะ

เพื่อให้เข้าใจและชัดเจนที่สามารถรู้ถึงกลไกต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงควรมีแนวทางที่จะทำการศึกษาเพิ่มเติมดังต่อไปนี้

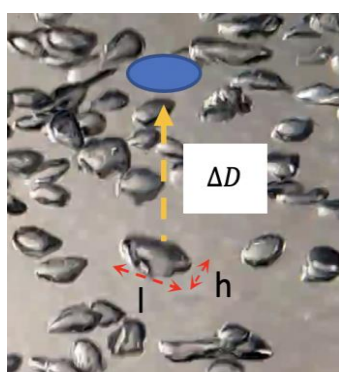
1. ควรทำการศึกษเกี่ยวกับเรื่องความสัมพันธ์ความพรุนของตัวกลางพลาสติกและปริมาตรที่เหมาะสมสำหรับการใช้ในคอลัมน์แบบฟองอากาศในเชิงด้านอุทกพลศาสตร์และการถ่ายเทมวลสารที่เกิดขึ้น
2. ควรทำการศึกษเกี่ยวกับเรื่องการเติมตัวกลางพลาสติกแบบสุ่มที่ทำการบรรจุแบบเบดนิ่ง (Fixed bed) หรือการใช้ตัวกลางแบบโครงสร้าง (Structure packing) เพื่อนำมาศึกษาในคอลัมน์แบบฟองอากาศทั้งในเชิงอุทกพลศาสตร์ การถ่ายเทมวลสารและพลังงานที่ใช้
3. ควรทำการศึกษเกี่ยวกับคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลางที่นำไปใช้ในระดัอุสาหกรรมหรือในสภาพการทำงานที่กว้างขึ้น เช่น มีการใช้อัตราการไหลของแก๊สและของเหลวในปริมาณมาก ๆ คอลัมน์ที่มีขนาดใหญ่
4. ควรศึกษเกี่ยวกับการใช้ตัวดูดซึมที่มีความสามารถในการดูดซึมสารอินทรีย์ระเหยง่ายทั้งชนิดที่ละลายน้ำมากและสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ละลายน้ำน้อย โดยศึกษาหลักการดูดซึมต่าง ๆ เนื่องจากในปัจจุบันอุตสาหกรรมมีการใช้สารอินทรีย์ระเหยง่ายมากมายหลายตัวที่มีความเป็นพิษสูงต่อมนุษย์ สิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมที่ควรได้รับนำมาศึกษาวิจัย



ภาคผนวก ก
การวิเคราะห์ผลและการคำนวณ

การวิเคราะห์ผลและการคำนวณตัวแปรในคอลัมน์แบบฟองอากาศ

- ที่อัตราการไหลของแก๊ส 4 ลิตรต่อนาทีและอัตราการไหลของเหลว 25 ลิตรต่อชั่วโมง
ขนาดฟอง



การหาฟองอากาศ 1 ฟอง

โดยที่ l และ h หาได้จากโปรแกรมอิมเมจ

$$\begin{aligned} d_b &= \sqrt[3]{l^2 \times h} \\ &= \sqrt[3]{4.575^2 \times 2.459} \\ &= 3.72 \text{ มิลลิเมตร} \end{aligned}$$

ความเร็วฟอง

การหาความเร็วของฟองอากาศ 1 ฟอง

$$u_b = \frac{\Delta D}{t_{flame}}$$

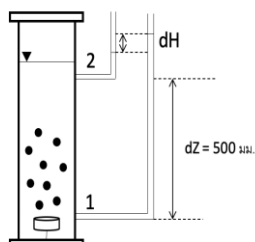
โดยที่ ΔD ที่ได้จากโปรแกรมอิมเมจ

$$t_{flame} = \frac{10 \text{ เฟรม}}{240 \text{ เฟรม/วินาที}} = 0.04166 \text{ วินาที}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} &= \frac{12.42}{0.04166} \\ &= 298.12 \text{ มิลลิเมตรต่อวินาที} \\ &= 29.8 \text{ เซนติเมตรต่อวินาที} \end{aligned}$$

สัดส่วนของแก๊ส

dH คือความแตกต่างที่วัดได้ 4.2 มิลลิเมตร



$$\varepsilon_g = \frac{dH}{dZ}$$

$$= \frac{4.2}{500} = 0.0084$$

พื้นที่ผิวจำเพาะ

โดยที่ $d_b = 0.00372$ เมตรและ $\varepsilon_g = 0.0084$

$$a = \frac{6}{d_b} \cdot \frac{\varepsilon_g}{1 - \varepsilon_g}$$

$$= \frac{6}{0.00372} \cdot \frac{0.0084}{1 - 0.0084}$$

$$= 13.66 \text{ เมตร}^{-1}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

คำสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม

$$K_L a = \frac{(C_{out} - C_{in}) \times Q_L}{(C^* - C_{out}) / V}$$

ที่อัตราการไหลของแก๊ส 4 ลิตรต่อนาทีและอัตราการไหลของเหลว 25 ลิตรต่อชั่วโมง

พบว่า $C^* = 7.56$ มิลลิกรัมต่อลิตรที่ 30°C

$C_{out} = 5.2$ มิลลิกรัมต่อลิตร

$C_{in} = 0.75$ มิลลิกรัมต่อลิตร

ปริมาตรคอลัมน์ = 19.85 ลิตร

$$K_L a = \frac{(5.2 - 0.75) \times 25}{(7.56 - 5.2) / 19.85}$$

$$= 2.38 \text{ hr}^{-1} = 0.00066 \text{ s}^{-1}$$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย

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

$$= \frac{0.00066}{13.66}$$

$$= 4.83 \times 10^{-5} \text{ เมตรต่อวินาที}$$

พลังงานที่ใช้ในระบบ

- พลังงานที่ใช้ในระบบของแก๊ส

จากการทดลองวัดค่าจากเกจวัดความดัน ที่อัตราการไหลแก๊ส 4 ลิตรต่อนาที เท่ากับ 6.66×10^{-5} ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ซึ่งได้ค่าเท่ากับ 1.2 Psi = 8274 นิวตันต่อตารางเมตร

$$(P/V)_{gas} = Q_g \cdot \Delta P_g / V$$

$$= 6.66 \times 10^{-5} \cdot \left(\frac{8274}{0.01985} \right)$$

$$= 27.8 \text{ วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร}$$

- พลังงานที่ใช้ในระบบของเหลว

จากการทดลองวัดจากความแตกต่างของน้ำในท่อ ที่อัตราการไหลของเหลว 25 ลิตรต่อชั่วโมง เท่ากับ 6.94×10^{-6} ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ซึ่งได้ค่าความสูงน้ำในท่อ 0.03 เมตร

$$\Delta P_g = \rho g h = 1000 \times 9.81 \times 0.03 = 294.3 \text{ นิวตันต่อตารางเมตร}$$

$$\begin{aligned}
 (P/V)_{liquid} &= Q_l \cdot \Delta P_l / V \\
 &= 6.94 \times 10^{-6} \cdot \left(\frac{294.3}{0.01985} \right) \\
 &= 0.103 \text{ วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร}
 \end{aligned}$$

-พลังงานที่ใช้ในระบบทั้งหมด

$$\begin{aligned}
 P/V_{Total} &= (P/V)_{gas} + (P/V)_{liquid} \\
 &= 27.8 + 0.103 \\
 &= 27.903 \text{ วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร}
 \end{aligned}$$

การวิเคราะห์ผลและการคำนวณตัวแปรในคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง

- ที่อัตราการไหลของแก๊ส 4 ลิตรต่อนาทีและอัตราการไหลของเหลว 25 ลิตรต่อชั่วโมง
สัดส่วนของเหลว

อัตราการไหลของเหลว 25 ลิตรต่อชั่วโมง เมื่อปิดระบบวัดความสูงของเหลวได้เท่ากับ 0.01 เมตร ทำให้ได้ปริมาตร $V_l = 0.000283$ ลูกบาศก์เมตร

$$\varepsilon_l = \frac{V_l}{V_{Total}}$$

$$= \frac{0.000283}{0.01985}$$

$$= 0.0142$$

พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแก๊สและของเหลว

Ideal gas

$$PV = nRT$$

$$P \left(\frac{V}{t} \right) = \left(\frac{n}{t} \right) RT \quad ; \quad PQ = NRT$$

$$N = \frac{PQ}{RT}$$

ที่อัตราการไหลของแก๊ส 4 ลิตรต่อนาที = 0.0667 ลิตรต่อวินาที

$$N = \frac{1 \text{ atm} \times 0.0667 \text{ LPS}}{0.08206 \frac{\text{L} \cdot \text{atm}}{\text{mol} \cdot \text{k}} \times 308 \text{ k}}$$

$$= 2.64 \times 10^{-3} \text{ โมลต่อวินาที}$$

Balance: In – Out = oxygen transfer

$$(Gas_{in} \times O_2 \text{ conc, in}) - (Gas_{in} \times O_2 \text{ conc, out}) - (Oxygen \text{ transfer} \times O_2 \text{ conc, out}) = Oxygen \text{ transfer}$$

$$(2.64 \times 10^{-3} \times 0.21) - (2.64 \times 10^{-3} \times 0.186) - (Oxygen \text{ transfer} \times 0.186) = Oxygen \text{ transfer}$$

$$Oxygen \text{ transfer}(N_{O_2}) = 5.34 \times 10^{-5} \text{ โมลต่อวินาที}$$

Danckwerts' mass-transfer model

$$N_{O_2} = \sqrt{Dk_1 + k_L^2} A C_{O_2}$$

$$A = \frac{N_{O_2}}{\sqrt{Dk_1} C_{O_2}}$$

โดยที่ $D = 2 \times 10^{-5}$ ตารางเมตรต่อวินาที

$k_1 = 5.93 \times 10^3$ วินาที⁻¹

$C_{O_2} = 2.44 \times 10^{-4}$ โมลต่อลิตร

แทนค่าในสมการ $A = \frac{5.34 \times 10^{-5}}{\sqrt{2 \times 10^{-5} (5.93 \times 10^3)} (2.44 \times 10^{-4})}$

$= 0.635$ ตารางเมตร

พื้นที่ผิวจำเพาะ

$$a = \frac{A}{V}$$

$$= \frac{0.635}{0.01985}$$

$$= 31.98 \text{ เมตร}^{-1}$$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม

$$K_L a = \frac{Q_L (C_{out} - C_{in})}{\Delta C_{In, mean} \cdot V_{Total}}$$

$$\Delta C_{ln,mean} = \frac{(C_{in}^* - C_{out}) - (C_{out}^* - C_{in})}{\ln\left(\frac{C_{in}^* - C_{out}}{C_{out}^* - C_{in}}\right)}$$

โดยที่ C_{in}^* = 7.56 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ 30°C

C_{out}^* = 6.31 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ 30°C จากของกฎเฮนรี

$$\Delta C_{ln,mean} = \frac{(7.56 - 5.7) - (6.31 - 0.73)}{\ln\left(\frac{7.56 - 5.7}{6.31 - 0.73}\right)}$$

$$\Delta C_{ln,mean} = 3.386 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

แทนค่าในสมการ

$$K_L a = \frac{25(5.7 - 0.73)}{3.386 \cdot 19.847}$$

$$= 1.85 \text{ ชั่วโมง}^{-1} = 0.000513 \text{ วินาที}^{-1}$$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย

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

$$= \frac{0.000513}{31.98}$$

$$= 1.6 \times 10^{-5} \text{ เมตรต่อวินาที}$$

พลังงานที่ใช้ในระบบ

- พลังงานที่ใช้ในระบบของแก๊ส

จากการทดลองวัดจากความแตกต่างของน้ำในท่อ ที่อัตราการไหลแก๊ส 4 ลิตรต่อ นาที เท่ากับ 6.66×10^{-5} ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ซึ่งได้ค่าความสูงน้ำในท่อ 0.1 เมตร

$$\Delta P_g = \rho g h = 1000 \times 9.81 \times 0.1 = 981 \text{ นิวตันต่อตารางเมตร}$$

$$\begin{aligned} (P/V)_{gas} &= Q_g \cdot \Delta P_g / V \\ &= 6.66 \times 10^{-5} \cdot \left(\frac{981}{0.01985} \right) \\ &= 3.29 \text{ วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

- พลังงานที่ใช้ในระบบของเหลว

จากการทดลองวัดค่าจากเกจวัดความดัน อัตราการไหลของเหลว 25 ลิตรต่อ ชั่วโมง เท่ากับ 6.94×10^{-6} ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ซึ่งได้ค่าเท่ากับ 0.3 Psi = 2068.5 นิวตันต่อ ตารางเมตร

$$\begin{aligned} (P/V)_{liquid} &= Q_l \cdot \Delta P_l / V \\ &= 6.94 \times 10^{-6} \cdot \left(\frac{2068.5}{0.01985} \right) \\ &= 0.723 \text{ วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

- พลังงานที่ใช้ในระบบทั้งหมด

$$\begin{aligned} P/V_{Total} &= (P/V)_{gas} + (P/V)_{liquid} \\ &= 3.29 + 0.723 \\ &= 4.018 \text{ วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

การวิเคราะห์ผลและการคำนวณตัวแปรในบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย

- ที่อัตราการไหลของแก๊ส 4 ลิตรต่อนาทีและอัตราการไหลของเหลว 25 ลิตรต่อชั่วโมง

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม

$$K_L a = \frac{Q_g(C_{in} - C_{out})}{\Delta C_{In,mean} \cdot V_{Total}}$$

สำหรับคอลัมน์แบบฟองอากาศ $\Delta C_{In,mean} = \frac{(C_{out}^* - C_{out}) - (C_{in}^* - C_{out})}{\ln\left(\frac{C_{in}^* - C_{out}}{C_{out}^* - C_{out}}\right)}$

สำหรับคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง $\Delta C_{In,mean} = \frac{(C_{out} - C_{in}) - (C_{in}^* - C_{out})}{\ln\left(\frac{C_{in}^* - C_{out}}{C_{out}^* - C_{in}}\right)}$

โดยที่

ความเข้มข้นขาเข้า 1000 ppm

$$1000 \text{ ppm} = \frac{1000 \times 78.11}{24.45}$$

$$= 3194.68 \text{ มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร}$$

$$= 3.19 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

Ideal gas

$$P = \frac{nRT}{V}$$

$$n \text{ ของเบนซีน} = \frac{3.19}{78.11} = 0.041 \text{ โมล}$$

$$P = \frac{0.041 \text{ mol} \cdot 0.0821 \frac{\text{L} \cdot \text{atm}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 298 \text{ K}}{1000 \text{ L}}$$

$$P = 1.003 \times 10^{-3} \text{ atm}$$

Henry's law

$$k_H^{cp} = \frac{P}{C_{aq}} \quad \text{ของเบนซีน} = 5.5 \frac{\text{atm} \cdot \text{L}}{\text{mol}}$$

$$C_{aq} = \frac{P}{k_H^{cp}}$$

$$C_{aq} = \frac{1.003 \times 10^{-3} \text{ atm}}{5.5 \frac{\text{atm} \cdot \text{L}}{\text{mol}}}$$

$$= 1.82 \times 10^{-4} \text{ โมลต่อลิตร}$$

$$C_{in}^* = 1.82 \times 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{L}} \times 78.11 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \times \frac{1000 \text{ mg}}{\text{g}}$$

$$C_{in}^* = 14.21 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

ความเข้มข้นขาออก 307 ppm

$$307 \text{ ppm} = \frac{307 \times 78.11}{24.45}$$

$$= 980.76 \text{ มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร}$$

$$= 0.981 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

Ideal gas

$$P = \frac{nRT}{V}$$

$$n \text{ ของเบนซีน} = \frac{0.981}{78.11} = 0.0125 \text{ โมล}$$

$$P = \frac{0.0125 \text{ mol} \cdot 0.0821 \frac{\text{L} \cdot \text{atm}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 298 \text{ K}}{1000 \text{ L}}$$

$$P = 3.05 \times 10^{-4} \text{ atm}$$

Henry's law

$$k_H^{cp} = \frac{P}{C_{aq}} \quad \text{ของเบนซีน} = 5.5 \frac{\text{atm}\cdot\text{L}}{\text{mol}}$$

$$C_{aq} = \frac{P}{k_H^{cp}}$$

$$C_{aq} = \frac{3.05 \times 10^{-4} \text{ atm}}{5.5 \frac{\text{atm}\cdot\text{L}}{\text{mol}}}$$

$$= 5.56 \times 10^{-5} \text{ โมลต่อลิตร}$$

$$C_{out}^* = 5.56 \times 10^{-5} \frac{\text{mol}}{\text{L}} \times 78.11 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \times \frac{1000 \text{ mg}}{\text{g}}$$

$$C_{out}^* = 4.34 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

แทนค่าในสมการ

$$\Delta C_{in,mean} = \frac{(C_{in}^* - C_{out}) - (C_{out}^* - C_{out})}{\ln \left(\frac{C_{in}^* - C_{out}}{C_{out}^* - C_{out}} \right)}$$

$$\Delta C_{in,mean} = \frac{(14.21 - 0.982) - (4.34 - 0.982)}{\ln \left(\frac{14.21 - 0.982}{4.34 - 0.982} \right)}$$

$$= 7.19 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

แทนค่าในสมการ

$$K_L a = \frac{Q_g (C_{in} - C_{out})}{\Delta C_{in,mean} \cdot V_{Total}}$$

$$K_L a = \frac{240 \frac{\text{L}}{\text{Hr}} (3.21 - 0.982)}{7.19 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \cdot 19.847 \text{ L}}$$

$$= 3.74 \text{ ชั่วโมง}^{-1} = 0.00103 \text{ วินาที}^{-1}$$

ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย

$$Eff (\%) = \frac{C_{inlet} - C_{outlet}}{C_{inlet}} \times 100$$

$$Eff (\%) = \frac{3.21 - 0.982}{3.21} \times 100$$

$$= 69.4 \%$$



ภาคผนวก ข

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข.1 ผลการทดลองในคอลัมน์แบบพองอากาศ ซึ่งแต่ละหัวจ่ายมี 19 รู

หัวจ่าย (mm)	Fg (L/min)	Vg (cm/s)	FL (L/hr)	VL (cm/s)	ϵ_g (-)	C* (mg/l)	C in (mg/l)	C out (mg/l)	Kla (1/hr)	Kla (1/s)	Ub (cm/s)	dB (mm)	a (m ⁻¹)	Kl (m/s)	P/V liquid	P/V gas	P/V total	
0.4	4	0.24	25	0.024	0.0084	7.56	0.75	5.2	2.4	0.00066	22.55	3.72	13.7	4.83×10^{-5}	0.103	27.8	27.9	
	8	0.47	25	0.024	0.0142	7.56	0.75	5.4	2.7	0.00075	23.65	3.94	21.9	3.43×10^{-5}	0.103	69.5	69.6	
	12	0.71	25	0.024	0.0192	7.56	0.75	5.6	3.1	0.00087	24.04	4.31	27.2	3.18×10^{-5}	0.103	125.1	125.2	
	16	0.94	25	0.024	0.0234	7.56	0.75	5.9	3.9	0.00109	25.09	4.99	28.8	3.77×10^{-5}	0.103	203.8	203.9	
	24	1.41	25	0.024	0.0348	7.56	0.75	6.2	5.0	0.00140	26.97	5.44	39.8	3.52×10^{-5}	0.103	486.4	486.5	
	4	0.24	50	0.049	0.0086	7.56	0.79	5.8	7.2	0.00199	22.55	3.72	14.0	14.0	0.00014234	0.618	27.8	28.4
	8	0.47	50	0.049	0.0138	7.56	0.79	6.1	9.2	0.00255	23.65	3.94	21.3	21.3	0.00011937	0.618	69.5	70.1
	12	0.71	50	0.049	0.018	7.56	0.79	6.2	10.0	0.00278	24.04	4.31	25.5	25.5	0.00010917	0.618	125.1	125.7
	16	0.94	50	0.049	0.0224	7.56	0.79	6.3	11.0	0.00306	25.09	4.99	27.5	27.5	0.00011117	0.618	203.8	204.4
	24	1.41	50	0.049	0.0354	7.56	0.79	6.4	12.2	0.00338	26.97	5.44	40.5	40.5	8.36×10^{-5}	0.618	486.4	487.0
	4	0.24	75	0.073	0.008	7.56	0.72	5.9	11.8	0.00328	22.55	3.72	13.0	13.0	0.00025175	1.823	27.8	29.6
	8	0.47	75	0.073	0.0142	7.56	0.72	6.1	13.9	0.00387	23.65	3.94	21.9	21.9	0.00017624	1.823	69.5	71.3
12	0.71	75	0.073	0.0184	7.56	0.72	6.3	16.7	0.00465	24.04	4.31	26.1	26.1	0.00017827	1.823	125.1	126.9	
16	0.94	75	0.073	0.0232	7.56	0.72	6.4	18.5	0.00514	25.09	4.99	28.5	28.5	0.00018013	1.823	203.8	205.6	
24	1.41	75	0.073	0.0352	7.56	0.72	6.6	23.1	0.00643	26.97	5.44	40.2	40.2	0.00015974	1.823	486.4	488.2	
4	0.24	100	0.098	0.0082	7.56	0.72	6	17.1	0.00474	22.55	3.72	13.3	13.3	0.00035513	4.462	27.8	32.3	
8	0.47	100	0.098	0.0144	7.56	0.72	6.2	20.3	0.00564	23.65	3.94	22.3	22.3	0.00025333	4.462	69.5	73.9	
12	0.71	100	0.098	0.0188	7.56	0.72	6.3	22.3	0.00620	24.04	4.31	26.7	26.7	0.00023254	4.462	125.1	129.5	
16	0.94	100	0.098	0.025	7.56	0.72	6.5	27.5	0.00763	25.09	4.99	30.8	30.8	0.00024775	4.462	203.8	208.3	
24	1.41	100	0.098	0.0354	7.56	0.72	6.7	35.0	0.00973	26.97	5.44	40.5	40.5	0.00024038	4.462	486.4	490.8	
4	0.24	25	0.024	0.0092	7.56	0.72	5.2	2.4	0.00066	49.82	5.96	9.3	9.3	7.104×10^{-5}	0.137	23.2	23.3	
8	0.47	25	0.024	0.0128	7.56	0.72	5.3	2.6	0.00071	48.51	6.22	12.5	12.5	5.67×10^{-5}	0.137	46.3	46.5	
12	0.71	25	0.024	0.0164	7.56	0.72	5.5	2.9	0.00081	49.54	6.43	15.6	15.6	5.22×10^{-5}	0.137	76.4	76.6	

พื้ง่าย (mm)	Fg (L/min)	Vg (cm/s)	FL (L/hr)	VL (cm/s)	εg (-)	C* (mg/L)	C in (mg/l)	C out (mg/l)	Kla (l/hr)	Kla (1/s)	U _b (cm/s)	dB (mm)	a (m ⁻¹)	Kl (m ³)	P/V liquid	P/V gas	P/V total
0.8	16	0.94	25	0.024	0.0222	7.56	0.72	5.6	3.1	0.00087	51.16	6.73	20.2	4.304X10 ⁻⁵	0.137	120.4	120.6
	24	1.41	25	0.024	0.0302	7.56	0.72	5.7	3.4	0.00094	52.01	7.18	26.0	3.60X10 ⁻⁵	0.137	208.4	208.6
	4	0.24	50	0.049	0.009	7.56	0.72	5.5	5.8	0.00162	49.82	5.96	9.1	0.00017757	0.652	23.2	23.8
	8	0.47	50	0.049	0.013	7.56	0.72	5.7	6.7	0.00187	48.51	6.22	12.7	0.00014757	0.652	46.3	47.0
	12	0.71	50	0.049	0.0164	7.56	0.72	6	8.5	0.00237	49.54	6.43	15.6	0.0001522	0.652	76.4	77.1
	16	0.94	50	0.049	0.0238	7.56	0.72	6.1	9.3	0.00258	51.16	6.73	21.7	0.00011866	0.652	120.4	121.1
	24	1.41	50	0.049	0.0306	7.56	0.72	6.3	11.2	0.00310	52.01	7.18	26.4	0.00011751	0.652	208.4	209.1
	4	0.24	75	0.073	0.0088	7.56	0.72	5.6	9.4	0.00261	49.82	5.96	8.9	0.00029235	1.802	23.2	25.0
	8	0.47	75	0.073	0.013	7.56	0.72	5.8	10.9	0.00303	48.51	6.22	12.7	0.00023862	1.802	46.3	48.1
	12	0.71	75	0.073	0.016	7.56	0.72	6	12.8	0.00355	49.54	6.43	15.2	0.0002341	1.802	76.4	78.2
	16	0.94	75	0.073	0.0224	7.56	0.72	6.2	15.2	0.00423	51.16	6.73	20.4	0.00020708	1.802	120.4	122.2
	24	1.41	75	0.073	0.0304	7.56	0.72	6.4	18.5	0.00514	52.01	7.18	26.2	0.00019621	1.802	208.4	210.2
1.2	4	0.24	100	0.098	0.0092	7.56	0.72	5.7	13.5	0.00375	49.82	5.96	9.3	0.00040079	4.325	23.2	27.5
	8	0.47	100	0.098	0.0132	7.56	0.72	5.8	14.5	0.00404	48.51	6.22	12.9	0.00031328	4.325	46.3	50.6
	12	0.71	100	0.098	0.0172	7.56	0.72	6	17.1	0.00474	49.54	6.43	16.3	0.00029001	4.325	76.4	80.8
	16	0.94	100	0.098	0.0228	7.56	0.72	6.1	18.6	0.00516	51.16	6.73	20.8	0.00024798	4.325	120.4	124.8
	24	1.41	100	0.098	0.0302	7.56	0.72	6.4	24.7	0.00685	52.01	7.18	26.0	0.0002634	4.325	208.4	212.8
	4	0.24	25	0.024	0.0094	7.56	0.65	4.7	1.8	0.00050	52.19	6.68	8.5	5.82X10 ⁻⁵	0.137	23.2	23.3
	8	0.47	25	0.024	0.01	7.56	0.65	5.2	2.4	0.00067	51.29	6.78	8.9	7.54X10 ⁻⁵	0.137	46.3	46.5
	12	0.71	25	0.024	0.016	7.56	0.65	5.3	2.6	0.00072	54.73	7.07	13.8	5.22X10 ⁻⁵	0.137	76.4	76.6
	16	0.94	25	0.024	0.018	7.56	0.65	5.6	3.2	0.00088	55.93	7.11	15.5	5.72X10 ⁻⁵	0.137	111.2	111.3
	24	1.41	25	0.024	0.0278	7.56	0.65	5.7	3.4	0.00095	58.13	7.59	22.6	4.202X10 ⁻⁵	0.137	194.5	194.7
	4	0.24	50	0.049	0.0094	7.56	0.6	5.2	4.9	0.00136	52.19	6.68	8.5	0.00016013	0.687	23.2	23.8
	8	0.47	50	0.049	0.0102	7.56	0.6	5.5	6.0	0.00166	51.29	6.78	9.1	0.00018248	0.687	46.3	47.0

หน้าจอย (mm)	Fg (L/min)	Vg (cm/s)	FL (L/hr)	VL (cm/s)	ϵ_g (-)	C* (mg/l)	C in (mg/l)	C out (mg/l)	Kla (1/hr)	Kla (1/s)	Ub (cm/s)	dB (mm)	a (m ⁻¹)	Kl (m/s)	P/V liquid	P/V gas	P/V total
1.2	12	0.71	50	0.049	0.0164	7.56	0.6	5.7	6.9	0.00192	54.73	7.07	14.2	0.00013558	0.687	764	77.1
	16	0.94	50	0.049	0.0198	7.56	0.6	5.9	8.0	0.00223	55.93	7.11	17.0	0.00013114	0.687	111.2	111.9
	24	1.41	50	0.049	0.0286	7.56	0.6	6.1	9.5	0.00264	58.13	7.59	23.3	0.00011325	0.687	194.5	195.2
	4	0.24	75	0.073	0.0094	7.56	0.65	5.3	7.8	0.00216	52.19	6.68	8.5	0.00025355	1.915	232	25.1
	8	0.47	75	0.073	0.0102	7.56	0.65	5.5	8.9	0.00247	51.29	6.78	9.1	0.00027092	1.915	46.3	48.2
	12	0.71	75	0.073	0.0164	7.56	0.65	5.8	11.1	0.00307	54.73	7.07	14.2	0.00021703	1.915	764	78.3
	16	0.94	75	0.073	0.0196	7.56	0.65	6	13.0	0.00360	55.93	7.11	16.9	0.0002135	1.915	111.2	113.1
	24	1.41	75	0.073	0.029	7.56	0.65	6.2	15.4	0.00428	58.13	7.59	23.6	0.00018141	1.915	194.5	196.5
	4	0.24	100	0.098	0.0094	7.56	0.64	5.3	10.4	0.00289	52.19	6.68	8.5	0.00033879	4.531	232	27.7
	8	0.47	100	0.098	0.0106	7.56	0.64	5.5	11.9	0.00330	51.29	6.78	9.5	0.00034818	4.531	46.3	50.9
	12	0.71	100	0.098	0.016	7.56	0.64	5.8	14.8	0.00410	54.73	7.07	13.8	0.0002973	4.531	764	81.0
	16	0.94	100	0.098	0.0188	7.56	0.64	5.9	16.0	0.00443	55.93	7.11	16.2	0.00027444	4.531	111.2	115.7
	24	1.41	100	0.098	0.0298	7.56	0.64	6.1	18.8	0.00523	58.13	7.59	24.3	0.00021553	4.531	194.5	199.1

ตารางที่ ข.2 ผลการทดลองในคอลัมน์แบบฟองอากาศ ซึ่งแต่ละหัวจ่ายมี 38 รู

หัวจ่าย (mm)	Fg (L/min)	Vg (cm/s)	FL (L/hr)	VL (cm/s)	ϵ_g (-)	C* (mg/l)	C in (mg/l)	C out (mg/l)	Kla (1/hr)	Kla (1/s)	Ub (cm/s)	dB (mm)	a (m ⁻¹)	Kl (m/s)	P/V liquid	P/V gas	P/V total
0.4	4	0.24	50	0.049	0.0102	7.56	0.6	5.9	8.0	0.00223	19.46	3.69	16.8	0.000133	0.618	27.8	28.4
	8	0.47	50	0.049	0.0113	7.56	0.6	6	8.7	0.00242	20.17	3.82	20.7	0.000117	0.618	60.2	60.8
	12	0.71	50	0.049	0.0116	7.56	0.6	6.2	10.4	0.00288	21.93	4.57	21.4	0.000135	0.618	104.2	104.8
	16	0.94	50	0.049	0.0268	7.56	0.6	6.3	11.4	0.00317	22.58	4.93	33.5	0.000094	0.618	148.2	148.8
	24	1.41	50	0.049	0.0408	7.56	0.6	6.4	12.6	0.00350	25.06	5.26	48.5	0.000072	0.618	291.8	292.4
	4	0.24	100	0.098	0.0106	7.56	0.6	6	17.4	0.00484	19.46	3.69	17.4	0.000278	4.462	27.8	32.3
	8	0.47	100	0.098	0.0152	7.56	0.6	6.2	20.7	0.00576	20.17	3.82	24.2	0.000238	4.462	60.2	64.7
	12	0.71	100	0.098	0.019	7.56	0.6	6.4	25.2	0.00700	21.93	4.57	25.5	0.000275	4.462	104.2	108.7
0.8	16	0.94	100	0.098	0.0244	7.56	0.6	6.5	28.0	0.00779	22.58	4.93	30.4	0.000256	4.462	148.2	152.7
	24	1.41	100	0.098	0.0412	7.56	0.6	6.7	35.7	0.00993	25.06	5.26	49.0	0.000202	4.462	291.8	296.3
	4	0.24	50	0.049	0.009	7.56	0.5	5.5	6.1	0.00170	37.78	5.46	10.0	0.000170	0.652	23.2	23.8
	8	0.47	50	0.049	0.012	7.56	0.5	5.8	7.6	0.00211	38.21	5.53	13.2	0.000160	0.652	51.0	51.6
	12	0.71	50	0.049	0.0166	7.56	0.5	6	8.9	0.00247	38.84	5.84	17.3	0.000142	0.652	76.4	77.1
	16	0.94	50	0.049	0.0236	7.56	0.5	6.1	9.7	0.00268	39.72	6.37	22.8	0.000118	0.652	111.2	111.8
	24	1.41	50	0.049	0.0344	7.56	0.5	6.2	10.6	0.00293	40.05	7.08	30.2	0.000097	0.652	180.7	181.3
	4	0.24	100	0.098	0.0096	7.56	0.5	5.6	13.1	0.00364	37.78	5.46	10.7	0.000342	4.325	23.2	27.5
1.2	8	0.47	100	0.098	0.013	7.56	0.5	5.7	14.1	0.00391	38.21	5.53	14.3	0.000274	4.325	51.0	55.3
	12	0.71	100	0.098	0.017	7.56	0.5	6	17.8	0.00493	38.84	5.84	17.8	0.000278	4.325	76.4	80.8
	16	0.94	100	0.098	0.0234	7.56	0.5	6.1	19.3	0.00537	39.72	6.37	22.6	0.000238	4.325	111.2	115.5
	24	1.41	100	0.098	0.0348	7.56	0.5	6.3	23.2	0.00644	40.05	7.08	30.6	0.000211	4.325	180.7	185.0
	4	0.24	50	0.049	0.006	7.56	0.6	5.1	4.6	0.00128	43.19	6.26	5.8	0.000221	0.687	23.2	23.8
	8	0.47	50	0.049	0.008	7.56	0.6	5.5	6.0	0.00166	43.44	6.43	7.5	0.000221	0.687	46.3	47.0
	12	0.71	50	0.049	0.0122	7.56	0.6	5.8	7.4	0.00207	45.48	6.77	10.9	0.000189	0.687	76.4	77.1
	16	0.94	50	0.049	0.0176	7.56	0.6	5.9	8.0	0.00223	47.06	6.97	15.4	0.000145	0.687	101.9	102.6

หัวจ่าย (mm)	Fg (L/min)	Vg (cm/s)	FL (L/hr)	VL (cm/s)	ϵ_g (-)	C* (mg/l)	C in (mg/l)	C out (mg/l)	Kla (1/hr)	Kla (1/s)	Ub (cm/s)	db (mm)	a (m ⁻¹)	Kl (m/s)	P/V liquid	P/V gas	P/V total
1.2	24	1.41	50	0.049	0.0308	7.56	0.6	6.1	9.5	0.00264	47.11	7.37	25.9	0.000102	0.687	180.7	181.3
	4	0.24	100	0.098	0.0078	7.56	0.5	5.2	10.0	0.00279	43.19	6.26	7.5	0.000370	4.531	23.2	27.7
	8	0.47	100	0.098	0.011	7.56	0.5	5.5	12.2	0.00340	43.44	6.43	10.4	0.000327	4.531	46.3	50.9
	12	0.71	100	0.098	0.0148	7.56	0.5	5.8	15.2	0.00421	45.48	6.77	13.3	0.000317	4.531	76.4	81.0
	16	0.94	100	0.098	0.0184	7.56	0.5	6	17.8	0.00493	47.06	6.97	16.1	0.000306	4.531	101.9	106.4



ตารางที่ ข.3 ผลการทดลองในคอสม์นแบบพองอากาศ ที่เติมตัวกลางพอลิ่ง ปริมาตร 1%

ขนาด (mm)	หัวสาย (mm)	Fg (L/min)	Vg (cm/s)	FL (L/hr)	VL (cm/s)	ϵ_g (-)	C* (mg/L)	C in (mg/L)	C out (mg/L)	Kla (1/hr)	Kla (1/s)	Ub (cm/s)	dB (mm)	a (m ⁻¹)	Kl (m/s)	P/V liquid	P/V gas	P/V total
25	0.4	12	0.71	50	0.049	0.0208	7.56	0.56	5.9	8.1	0.00225	20.5	5.96	21.4	0.000105	0.618	111.2	111.8
	0.4	24	1.41	50	0.049	0.038	7.56	0.56	6.1	9.6	0.00266	22.7	6.51	36.4	0.000073	0.618	500.3	500.9
	0.4	12	0.71	100	0.098	0.023	7.56	0.56	6.1	19.1	0.00531	20.5	5.96	23.7	0.000224	4.462	111.2	115.6
38	0.4	24	1.41	100	0.098	0.041	7.56	0.56	6.3	23.0	0.00638	22.7	6.51	39.4	0.000162	4.462	500.3	504.7
	0.4	12	0.71	50	0.049	0.0226	7.56	0.69	6	8.6	0.00238	21.3	6.18	22.4	0.000106	0.618	111.2	111.8
	0.4	24	1.41	50	0.049	0.0356	7.56	0.69	6.1	9.3	0.00259	23.6	6.53	33.9	0.000076	0.618	500.3	500.9
50	0.4	12	0.71	100	0.098	0.023	7.56	0.69	6.1	18.7	0.00519	21.3	6.18	22.9	0.000227	4.462	111.2	115.6
	0.4	24	1.41	100	0.098	0.0388	7.56	0.69	6.3	22.4	0.00623	23.6	6.53	37.1	0.000168	4.462	500.3	504.7
	0.4	12	0.71	50	0.049	0.021	7.56	0.69	6	8.6	0.00238	21.4	6.33	20.3	0.000117	0.618	111.2	111.8
25	0.4	24	1.41	50	0.049	0.034	7.56	0.69	6.1	9.3	0.00259	24.7	6.88	30.7	0.000084	0.618	500.3	500.9
	0.4	12	0.71	100	0.098	0.023	7.56	0.69	6.1	18.7	0.00519	21.4	6.33	22.3	0.000232	4.462	111.2	115.6
	0.4	24	1.41	100	0.098	0.0386	7.56	0.69	6.3	22.4	0.00623	24.7	6.88	35.0	0.000178	4.462	500.3	504.7
38	0.8	12	0.71	50	0.049	0.0168	7.56	0.76	6	8.5	0.00235	34.1	6.95	14.8	0.000159	0.618	90.3	90.9
	0.8	24	1.41	50	0.049	0.032	7.56	0.76	6.2	10.1	0.00280	36.9	7.24	27.4	0.000102	0.618	208.4	209.1
	0.8	12	0.71	100	0.098	0.0204	7.56	0.76	6.2	20.2	0.00560	34.1	6.95	18.0	0.000311	4.462	90.3	94.8
50	0.8	24	1.41	100	0.098	0.034	7.56	0.76	6.5	27.3	0.00758	36.9	7.24	29.2	0.000260	4.462	208.4	212.9
	0.8	12	0.71	50	0.049	0.0166	7.56	0.83	6	8.3	0.00232	35.8	7.04	14.4	0.000161	0.618	90.3	90.9
	0.8	24	1.41	50	0.049	0.0318	7.56	0.83	6.1	9.1	0.00253	37.5	7.41	26.6	0.000095	0.618	208.4	209.1
50	0.8	12	0.71	100	0.098	0.0192	7.56	0.83	6.1	18.2	0.00505	35.8	7.04	16.7	0.000303	4.462	90.3	94.8
	0.8	24	1.41	100	0.098	0.0348	7.56	0.83	6.4	24.2	0.00672	37.5	7.41	29.2	0.000230	4.462	208.4	212.9
	0.8	12	0.71	50	0.049	0.015	7.56	0.75	6	8.5	0.00236	35.8	7.18	12.7	0.000185	0.618	90.3	90.9
50	0.8	24	1.41	50	0.049	0.036	7.56	0.75	6.2	10.1	0.00280	38.2	7.47	30.0	0.000093	0.618	208.4	209.1
	0.8	12	0.71	100	0.098	0.019	7.56	0.75	6.2	20.2	0.00561	35.8	7.18	16.2	0.000346	4.462	90.3	94.8

ขนาด (mm)	หัวจ่าย (mm)	Fg (L/min)	Vg (cm/s)	FL (L/hr)	VL (cm/s)	ϵ_g (-)	C* (mg/l)	C in (mg/L)	C out (mg/L)	Kla (1/hr)	Kla (1/s)	Ub (cm/s)	dB (mm)	a (m ⁻¹)	Kl (m/s)	P/V liquid	P/V gas	P/V total
50	0.8	24	1.41	100	0.098	0.037	7.56	0.75	6.4	24.5	0.00682	38.2	7.47	30.9	0.000221	4.462	208.4	212.9
25	1.2	12	0.71	50	0.049	0.0146	7.56	0.76	6	8.5	0.00235	41.3	6.05	14.7	0.000160	0.618	76.4	77.0
	1.2	24	1.41	50	0.049	0.0294	7.56	0.76	6.2	10.1	0.00280	44.7	6.35	28.6	0.000098	0.618	180.7	181.3
	1.2	12	0.71	100	0.098	0.0164	7.56	0.76	6	16.9	0.00470	41.3	6.05	16.5	0.000284	4.462	76.4	80.9
38	1.2	24	1.41	100	0.098	0.033	7.56	0.76	6.4	24.5	0.00680	44.7	6.35	32.3	0.000211	4.462	180.7	185.1
	1.2	12	0.71	50	0.049	0.016	7.56	0.85	6	8.3	0.00231	41.8	6.12	15.9	0.000145	0.618	76.4	77.0
	1.2	24	1.41	50	0.049	0.0308	7.56	0.85	6.1	9.1	0.00252	45.4	6.37	29.9	0.000084	0.618	180.7	181.3
50	1.2	12	0.71	100	0.098	0.017	7.56	0.85	6.1	18.1	0.00503	41.8	6.12	17.0	0.000297	4.462	76.4	80.9
	1.2	24	1.41	100	0.098	0.0352	7.56	0.85	6.3	21.8	0.00605	45.4	6.37	34.4	0.000176	4.462	180.7	185.1
	1.2	12	0.71	50	0.049	0.0124	7.56	0.85	5.8	7.1	0.00197	42.7	6.24	12.1	0.000163	0.618	76.4	77.0
50	1.2	24	1.41	50	0.049	0.028	7.56	0.85	6	8.3	0.00231	46.0	6.54	26.4	0.000087	0.618	180.7	181.3
	1.2	12	0.71	100	0.098	0.0146	7.56	0.85	6.1	18.1	0.00503	42.7	6.24	14.2	0.000353	4.462	76.4	80.9
	1.2	24	1.41	100	0.098	0.0314	7.56	0.85	6.3	21.8	0.00605	46.0	6.54	29.8	0.000203	4.462	180.7	185.1

ตารางที่ ข.4 ผลการทดลองในคอลัมน์แบบพองอากาศ ที่เติมตัวกลางพอลิ่ง ปริมาตร 2.5%

ขนาด (mm)	หัวจ่าย (mm)	Fg (L/min)	Vg (cm/s)	FL (L/hr)	VL (cm/s)	ϵ_g (-)	C* (mg/l)	C in (mg/L)	C out (mg/L)	Kla (1/hr)	Kla (1/s)	U _b (cm/s)	dB (mm)	a (m ⁻¹)	Kl (m/s)	P/V liquid	P/V gas	P/V total
25	0.4	12	0.71	50	0.049	0.0234	7.56	0.65	6.2	10.3	0.00286	18.6	4.24	33.9	0.000084	0.618	111.2	111.8
	0.4	24	1.41	50	0.049	0.0418	7.56	0.65	6.3	11.3	0.00314	19.8	5.53	47.3	0.000066	0.618	514.2	514.8
	0.4	12	0.71	100	0.098	0.0244	7.56	0.65	6.4	25.0	0.00694	18.6	4.24	35.4	0.000196	4.462	111.2	115.6
	0.4	24	1.41	100	0.098	0.0426	7.56	0.65	6.6	31.2	0.00867	19.8	5.53	48.3	0.000180	4.462	514.2	518.6
38	0.4	12	0.71	50	0.049	0.0256	7.56	0.73	6.1	9.3	0.00257	18.8	5.28	29.9	0.000086	0.618	111.2	111.8
	0.4	24	1.41	50	0.049	0.042	7.56	0.73	6.3	11.1	0.00309	20.2	5.78	45.5	0.000068	0.618	514.2	514.8
	0.4	12	0.71	100	0.098	0.0258	7.56	0.73	6.4	24.6	0.00684	18.8	5.28	30.1	0.000227	4.462	111.2	115.6
	0.4	24	1.41	100	0.098	0.044	7.56	0.73	6.6	30.8	0.00856	20.2	5.78	47.8	0.000179	4.462	514.2	518.6
50	0.4	12	0.71	50	0.049	0.0192	7.56	0.7	6.1	9.3	0.00259	19.0	5.57	21.1	0.000123	0.618	111.2	111.8
	0.4	24	1.41	50	0.049	0.0336	7.56	0.7	6.2	10.2	0.00283	21.5	5.92	35.2	0.000080	0.618	514.2	514.8
	0.4	12	0.71	100	0.098	0.0214	7.56	0.7	6.3	22.4	0.00622	19.0	5.57	23.6	0.000264	4.462	111.2	115.6
	0.4	24	1.41	100	0.098	0.0422	7.56	0.7	6.5	27.6	0.00766	21.5	5.92	44.7	0.000171	4.462	514.2	518.6
25	0.8	12	0.71	50	0.049	0.0148	7.56	0.6	6	8.7	0.00242	29.4	5.18	17.4	0.000139	0.618	76.4	77.0
	0.8	24	1.41	50	0.049	0.0354	7.56	0.6	6.2	10.4	0.00288	32.7	5.46	40.3	0.000071	0.618	208.4	209.1
	0.8	12	0.71	100	0.098	0.0158	7.56	0.6	6.1	19.0	0.00527	29.4	5.18	18.6	0.000284	4.462	76.4	80.9
	0.8	24	1.41	100	0.098	0.036	7.56	0.6	6.4	25.2	0.00700	32.7	5.46	41.0	0.000171	4.462	208.4	212.9
38	0.8	12	0.71	50	0.049	0.0154	7.56	0.71	6.1	9.3	0.00258	30.8	5.35	17.5	0.000147	0.618	76.4	77.0
	0.8	24	1.41	50	0.049	0.0348	7.56	0.71	6.3	11.2	0.00310	32.1	5.76	37.6	0.000083	0.618	208.4	209.1
	0.8	12	0.71	100	0.098	0.016	7.56	0.71	6.2	20.3	0.00565	30.8	5.35	18.2	0.000310	4.462	76.4	80.9
	0.8	24	1.41	100	0.098	0.035	7.56	0.71	6.4	24.7	0.00687	32.1	5.76	37.8	0.000182	4.462	208.4	212.9
50	0.8	12	0.71	50	0.049	0.0146	7.56	0.83	6	8.3	0.00232	30.5	5.58	15.9	0.000146	0.618	76.4	77.0
	0.8	24	1.41	50	0.049	0.03	7.56	0.83	6.2	9.9	0.00276	33.1	5.91	31.4	0.000088	0.618	208.4	209.1
	0.8	12	0.71	100	0.098	0.0148	7.56	0.83	6.1	18.2	0.00505	30.5	5.58	16.2	0.000313	4.462	76.4	80.9

ขนาด (mm)	หัวจ่าย (mm)	Fg (L/min)	Vg (cm/s)	FL (L/hr)	VL (cm/s)	ϵ_g (-)	C* (mg/l)	C in (mg/l)	C out (mg/l)	Kla (1/hr)	Kla (1/s)	Kla (cm/s)	Ub (cm/s)	dB (mm)	a (m ⁻¹)	Kl (m/s)	P/V liquid	P/V gas	P/V total
50	0.8	24	1.41	100	0.098	0.031	7.56	0.83	6.4	24.2	0.00672	33.1	5.91	32.5	0.000207	4.462	208.4	212.9	
	1.2	12	0.71	50	0.049	0.016	7.56	0.67	5.9	7.9	0.00220	39.6	5.06	19.3	0.000114	0.618	76.4	77.0	
25	1.2	24	1.41	50	0.049	0.0324	7.56	0.67	6.2	10.2	0.00285	41.8	5.43	37.0	0.000077	0.618	194.5	195.2	
	1.2	12	0.71	100	0.098	0.0164	7.56	0.67	6.2	20.5	0.00569	39.6	5.06	19.8	0.000288	4.462	76.4	80.9	
38	1.2	24	1.41	100	0.098	0.0326	7.56	0.67	6.4	24.9	0.00691	41.8	5.43	37.2	0.000186	4.462	194.5	199.0	
	1.2	12	0.71	50	0.049	0.0156	7.56	0.75	6	8.5	0.00236	40.6	5.12	18.6	0.000127	0.618	76.4	77.0	
50	1.2	24	1.41	50	0.049	0.0304	7.56	0.75	6.2	10.1	0.00280	42.3	5.66	33.2	0.000084	0.618	194.5	195.2	
	1.2	12	0.71	100	0.098	0.0164	7.56	0.75	6.1	18.5	0.00513	40.6	5.12	19.5	0.000262	4.462	76.4	80.9	
50	1.2	24	1.41	100	0.098	0.0346	7.56	0.75	6.4	24.5	0.00682	42.3	5.66	38.0	0.000179	4.462	194.5	199.0	
	1.2	12	0.71	50	0.049	0.0128	7.56	0.88	6	8.3	0.00230	40.7	5.13	15.2	0.000151	0.618	76.4	77.0	
50	1.2	24	1.41	50	0.049	0.025	7.56	0.88	6.2	9.9	0.00274	43.5	5.59	27.5	0.000099	0.618	194.5	195.2	
	1.2	12	0.71	100	0.098	0.013	7.56	0.88	6.1	18.0	0.00500	40.7	5.13	15.4	0.000325	4.462	76.4	80.9	
50	1.2	24	1.41	100	0.098	0.0286	7.56	0.88	6.4	24.0	0.00666	43.5	5.59	31.6	0.000211	4.462	194.5	199.0	

ตารางที่ ข.5 ผลการทดลองในคอลัมน์แบบพองอากาศ ที่เติมตัวกลางแคสเคดมินิริง ปริมาตร 1%

ขนาด (mm)	หัวจ่าย (mm)	Fg (L/min)	Vg (cm/s)	FL (L/hr)	VL (cm/s)	ϵ_g (-)	C* (mg/L)	C in (mg/L)	C out (mg/L)	Kla (1/hr)	Kla (1/s)	Ub (cm/s)	dB (mm)	a (m ⁻¹)	Kl (m/s)	P/V liquid	P/V gas	P/V total
25	0.4	12	0.71	50	0.049	0.018	7.56	0.6	5.9	8.0	0.00223	22.4	6.08	18.1	0.000124	0.618	111.2	111.8
	0.4	24	1.41	50	0.049	0.0366	7.56	0.6	6	8.7	0.00242	25.9	6.72	33.9	0.000071	0.618	486.4	487.0
	0.4	12	0.71	100	0.098	0.019	7.56	0.6	6.1	19.0	0.00527	22.4	6.08	19.1	0.000276	4.462	111.2	115.6
38	0.4	24	1.41	100	0.098	0.0368	7.56	0.6	6.3	22.8	0.00633	25.9	6.72	34.1	0.000186	4.462	486.4	490.8
	0.4	12	0.71	50	0.049	0.0166	7.56	0.76	5.9	7.8	0.00217	21.4	6.34	16.0	0.000136	0.618	111.2	111.8
	0.4	24	1.41	50	0.049	0.0378	7.56	0.76	6	8.5	0.00235	24.4	6.67	35.3	0.000067	0.618	486.4	487.0
50	0.4	12	0.71	100	0.098	0.017	7.56	0.76	6	16.9	0.00470	21.4	6.34	16.4	0.000287	4.462	111.2	115.6
	0.4	24	1.41	100	0.098	0.0394	7.56	0.76	6.3	22.2	0.00615	24.4	6.67	36.9	0.000167	4.462	486.4	490.8
	0.4	12	0.71	50	0.049	0.0212	7.56	0.83	5.9	7.7	0.00214	22.6	6.53	19.9	0.000107	0.618	111.2	111.8
25	0.4	24	1.41	50	0.049	0.037	7.56	0.83	6.1	9.1	0.00253	25.5	6.74	34.2	0.000074	0.618	486.4	487.0
	0.4	12	0.71	100	0.098	0.0224	7.56	0.83	6.1	18.2	0.00505	22.6	6.53	21.1	0.000240	4.462	111.2	115.6
	0.4	24	1.41	100	0.098	0.0384	7.56	0.83	6.4	24.2	0.00672	25.5	6.74	35.5	0.000189	4.462	486.4	490.8
38	0.8	12	0.71	50	0.049	0.0182	7.56	0.7	6	8.6	0.00238	33.9	7.04	15.8	0.000150	0.618	76.4	77.0
	0.8	24	1.41	50	0.049	0.031	7.56	0.7	6.1	9.3	0.00259	35.6	7.32	26.2	0.000099	0.618	208.4	209.1
	0.8	12	0.71	100	0.098	0.0186	7.56	0.7	6.1	18.6	0.00518	33.9	7.04	16.2	0.000320	4.462	76.4	80.9
50	0.8	24	1.41	100	0.098	0.0324	7.56	0.7	6.3	22.4	0.00622	35.6	7.32	27.4	0.000227	4.462	208.4	212.9
	0.8	12	0.71	50	0.049	0.014	7.56	0.7	6	8.6	0.00238	33.7	6.95	12.3	0.000194	0.618	76.4	77.0
	0.8	24	1.41	50	0.049	0.0284	7.56	0.7	6.2	10.2	0.00283	36.9	7.48	23.4	0.000121	0.618	208.4	209.1
25	0.8	12	0.71	100	0.098	0.0162	7.56	0.7	6.1	18.6	0.00518	33.7	6.95	14.2	0.000364	4.462	76.4	80.9
	0.8	24	1.41	100	0.098	0.0292	7.56	0.7	6.3	22.4	0.00622	36.9	7.48	24.1	0.000258	4.462	208.4	212.9
	0.8	12	0.71	50	0.049	0.0146	7.56	0.7	6	8.6	0.00238	34.3	7.14	12.5	0.000191	0.618	76.4	77.0
38	0.8	24	1.41	50	0.049	0.0282	7.56	0.7	6.1	9.3	0.00259	37.6	7.57	23.0	0.000113	0.618	208.4	209.1
	0.8	12	0.71	100	0.098	0.0174	7.56	0.7	6.1	18.6	0.00518	34.3	7.14	14.9	0.000348	4.462	76.4	80.9

ขนาด (mm)	พุง่าย (mm)	Fg (L/min)	Vg (cm/s)	FL (L/hr)	VL (cm/s)	ϵ_g (-)	C* (mg/L)	C in (mg/L)	C out (mg/L)	Kla (1/hr)	Kla (1/s)	Ub (cm/s)	dB (mm)	a (m ⁻¹)	Kl (m/s)	P/V liquid	P/V gas	P/V total
50	0.8	24	1.41	100	0.098	0.029	7.56	0.7	6.4	24.8	0.00688	37.6	7.57	23.7	0.000291	4.462	208.4	212.9
25	1.2	12	0.71	50	0.049	0.0152	7.56	0.58	6.1	9.5	0.00265	44.7	6.47	14.3	0.000185	0.618	76.4	77.0
	1.2	24	1.41	50	0.049	0.03	7.56	0.58	6.2	10.4	0.00289	48.7	6.75	27.5	0.000105	0.618	194.5	195.2
	1.2	12	0.71	100	0.098	0.017	7.56	0.58	6.2	20.8	0.00578	44.7	6.47	16.0	0.000361	4.462	76.4	80.9
38	1.2	24	1.41	100	0.098	0.0334	7.56	0.58	6.4	25.3	0.00702	48.7	6.75	30.7	0.000229	4.462	194.5	199.0
	1.2	12	0.71	50	0.049	0.013	7.56	0.58	6.1	9.5	0.00265	44.2	6.31	12.5	0.000211	0.618	76.4	77.0
	1.2	24	1.41	50	0.049	0.0268	7.56	0.58	6.3	11.4	0.00318	48.9	6.63	24.9	0.000127	0.618	194.5	195.2
50	1.2	12	0.71	100	0.098	0.0152	7.56	0.58	6.1	19.0	0.00529	44.2	6.31	14.7	0.000361	4.462	76.4	80.9
	1.2	24	1.41	100	0.098	0.0274	7.56	0.58	6.4	25.3	0.00702	48.9	6.63	25.5	0.000275	4.462	194.5	199.0
	1.2	12	0.71	50	0.049	0.0136	7.56	0.61	6.1	9.5	0.00263	45.4	6.22	13.3	0.000198	0.618	76.4	77.0
50	1.2	24	1.41	50	0.049	0.0266	7.56	0.61	6.2	10.4	0.00288	49.1	6.69	24.5	0.000117	0.618	194.5	195.2
	1.2	12	0.71	100	0.098	0.017	7.56	0.61	6	17.4	0.00484	45.4	6.22	16.7	0.000290	4.462	76.4	80.9
	1.2	24	1.41	100	0.098	0.0286	7.56	0.61	6.4	25.1	0.00699	49.1	6.69	26.4	0.000265	4.462	194.5	199.0

ตารางที่ ข.6 ผลการทดลองในคอลัมน์แบบฟองอากาศ ที่เติมตัวกลางแคสเคดมินิริง ปริมาตร 2.5%

ขนาด (mm)	หัวจ่าย (mm)	Fg (L/min)	Vg (cm/s)	FL (L/hr)	VL (cm/s)	ϵ_g (-)	C* (mg/l)	C in (mg/l)	C out (mg/l)	Kla (1/hr)	Kla (1/s)	U _b (cm/s)	dB (mm)	a (m ⁻¹)	Kl (m/s)	P/V liquid	P/V gas	P/V total
25	0.4	12	0.71	50	0.049	0.0242	7.56	0.65	5.9	8.0	0.00221	19.7	4.41	33.7	0.000066	0.618	111.2	111.8
	0.4	24	1.41	50	0.049	0.0388	7.56	0.65	6.1	9.4	0.00261	21.1	5.72	42.3	0.000062	0.618	486.4	487.0
	0.4	12	0.71	100	0.098	0.0256	7.56	0.65	6.2	20.6	0.00571	19.7	4.41	35.7	0.000160	4.462	111.2	115.6
	0.4	24	1.41	100	0.098	0.042	7.56	0.65	6.4	25.0	0.00694	21.1	5.72	46.0	0.000151	4.462	486.4	490.8
	0.4	12	0.71	50	0.049	0.0214	7.56	0.7	5.9	7.9	0.00219	20.6	5.37	24.4	0.000090	0.618	111.2	111.8
38	0.4	24	1.41	50	0.049	0.04	7.56	0.7	6.1	9.3	0.00259	22.7	5.8	43.1	0.000060	0.618	486.4	487.0
	0.4	12	0.71	100	0.098	0.0234	7.56	0.7	6.1	18.6	0.00518	20.6	5.37	26.8	0.000193	4.462	111.2	115.6
	0.4	24	1.41	100	0.098	0.0428	7.56	0.7	6.4	24.8	0.00688	22.7	5.8	46.3	0.000149	4.462	486.4	490.8
	0.4	12	0.71	50	0.049	0.0202	7.56	0.73	5.8	7.3	0.00202	19.9	5.58	22.2	0.000091	0.618	111.2	111.8
	0.4	24	1.41	50	0.049	0.0406	7.56	0.73	6	8.5	0.00236	22.9	6.03	42.1	0.000056	0.618	486.4	487.0
50	0.4	12	0.71	100	0.098	0.0206	7.56	0.73	6.1	18.5	0.00515	19.9	5.58	22.6	0.000228	4.462	111.2	115.6
	0.4	24	1.41	100	0.098	0.0408	7.56	0.73	6.4	24.6	0.00684	22.9	6.03	42.3	0.000162	4.462	486.4	490.8
	0.8	12	0.71	50	0.049	0.0168	7.56	0.56	6.1	9.6	0.00266	30.1	5.52	18.6	0.000143	0.618	76.4	77.0
	0.8	24	1.41	50	0.049	0.0324	7.56	0.56	6.2	10.4	0.00290	33.5	5.83	34.5	0.000084	0.618	208.4	209.1
	0.8	12	0.71	100	0.098	0.0194	7.56	0.56	6.1	19.1	0.00531	30.1	5.52	21.5	0.000247	4.462	76.4	80.9
38	0.8	24	1.41	100	0.098	0.0334	7.56	0.56	6.4	25.4	0.00705	33.5	5.83	35.6	0.000198	4.462	208.4	212.9
	0.8	12	0.71	50	0.049	0.017	7.56	0.58	6.1	9.5	0.00265	31.8	5.47	19.0	0.000139	0.618	76.4	77.0
	0.8	24	1.41	50	0.049	0.0342	7.56	0.58	6.2	10.4	0.00289	34.7	5.92	35.9	0.000081	0.618	208.4	209.1
	0.8	12	0.71	100	0.098	0.018	7.56	0.58	6.2	20.8	0.00578	31.8	5.47	20.1	0.000288	4.462	76.4	80.9
	0.8	24	1.41	100	0.098	0.0348	7.56	0.58	6.5	28.1	0.00782	34.7	5.92	36.5	0.000214	4.462	208.4	212.9
50	0.8	12	0.71	50	0.049	0.0164	7.56	0.61	6.2	10.4	0.00288	31.2	5.66	17.7	0.000163	0.618	76.4	77.0
	0.8	24	1.41	50	0.049	0.034	7.56	0.61	6.3	11.4	0.00316	34.6	6.08	34.7	0.000091	0.618	208.4	209.1
	0.8	12	0.71	100	0.098	0.0174	7.56	0.61	6.3	22.8	0.00632	31.2	5.66	18.8	0.000337	4.462	76.4	80.9

ขนาด (mm)	หัวจ่าย (mm)	Fg (L/min)	Vg (cm/s)	FL (L/hr)	VL (cm/s)	ϵ_g (-)	C* (mg/l)	C in (mg/l)	C out (mg/l)	Kla (1/hr)	Kla (1/s)	U _b (cm/s)	dB (mm)	a (m ⁻¹)	Kl (m/s)	P/V liquid	P/V gas	P/V total
50	0.8	24	1.41	100	0.098	0.0346	7.56	0.61	6.5	28.0	0.00778	34.6	6.08	35.4	0.000220	4.462	208.4	212.9
	1.2	12	0.71	50	0.049	0.015	7.56	0.61	6.1	9.5	0.00263	41.9	5.25	17.4	0.000151	0.618	76.4	77.0
	1.2	24	1.41	50	0.049	0.0294	7.56	0.61	6.2	10.4	0.00288	44.4	5.71	31.8	0.000090	0.618	194.5	195.2
38	1.2	12	0.71	100	0.098	0.0164	7.56	0.61	6	17.4	0.00484	41.9	5.25	19.1	0.000254	4.462	76.4	80.9
	1.2	24	1.41	100	0.098	0.0316	7.56	0.61	6.2	20.7	0.00575	44.4	5.71	34.3	0.000168	4.462	194.5	199.0
	1.2	12	0.71	50	0.049	0.0162	7.56	0.61	6	8.7	0.00242	41.3	5.42	18.2	0.000133	0.618	76.4	77.0
50	1.2	24	1.41	50	0.049	0.0284	7.56	0.61	6.2	10.4	0.00288	45.8	5.87	29.9	0.000096	0.618	194.5	195.2
	1.2	12	0.71	100	0.098	0.0168	7.56	0.61	6.1	18.9	0.00526	41.3	5.42	18.9	0.000278	4.462	76.4	80.9
	1.2	24	1.41	100	0.098	0.0304	7.56	0.61	6.4	25.1	0.00699	45.8	5.87	32.0	0.000218	4.462	194.5	199.0
50	1.2	12	0.71	50	0.049	0.0166	7.56	0.62	6.1	9.5	0.00263	42.6	5.58	18.2	0.000145	0.618	76.4	77.0
	1.2	24	1.41	50	0.049	0.0312	7.56	0.62	6.2	10.3	0.00287	46.1	5.83	33.1	0.000087	0.618	194.5	195.2
	1.2	12	0.71	100	0.098	0.0176	7.56	0.62	6.2	20.7	0.00574	42.6	5.58	19.3	0.000298	4.462	76.4	80.9
50	1.2	24	1.41	100	0.098	0.0314	7.56	0.62	6.4	25.1	0.00697	46.1	5.83	33.4	0.000209	4.462	194.5	199.0

ตารางที่ ข.7 ผลการทดลองในคอลัมน์แบบพองอากาศ ที่เติมตัวกลางอากาศ ปริมาตร 1%

ขนาด (mm)	หัวถ่าย (mm)	Fg (L/min)	Vg (cm/s)	FL (L/hr)	VL (cm/s)	ϵ_g (-)	C* (mg/l)	C in (mg/l)	C out (mg/l)	Kla (1/hr)	Kla (1/s)	Ub (cm/s)	dB (mm)	a (m ⁻¹)	Kl (m/s)	P/V liquid	P/V gas	P/V total
25	0.4	12	0.71	50	0.049	0.0202	7.56	0.61	5.8	7.4	0.00206	24.1	6.39	19.4	0.000107	0.618	118.1	118.7
	0.4	24	1.41	50	0.049	0.0355	7.56	0.61	6.1	9.5	0.00263	27.8	6.57	33.1	0.000079	0.618	514.2	514.8
	0.4	12	0.71	100	0.098	0.0246	7.56	0.61	6	17.4	0.00484	24.1	6.39	23.7	0.000204	4.462	118.1	122.6
38	0.4	24	1.41	100	0.098	0.0358	7.56	0.61	6.2	20.7	0.00575	27.8	6.57	33.9	0.000170	4.462	514.2	518.6
	0.4	12	0.71	50	0.049	0.019	7.56	0.62	5.7	6.9	0.00191	24.7	6.42	18.1	0.000106	0.618	118.1	118.7
	0.4	24	1.41	50	0.049	0.0342	7.56	0.62	5.9	8.0	0.00223	26.6	6.57	32.3	0.000069	0.618	514.2	514.8
50	0.4	12	0.71	100	0.098	0.0194	7.56	0.62	5.9	16.0	0.00445	24.7	6.42	18.5	0.000241	4.462	118.1	122.6
	0.4	24	1.41	100	0.098	0.0356	7.56	0.62	6.2	20.7	0.00574	26.6	6.57	33.7	0.000170	4.462	514.2	518.6
	0.4	12	0.71	50	0.049	0.0158	7.56	0.67	5.8	7.3	0.00204	25.5	6.48	14.9	0.000137	0.618	118.1	118.7
25	0.4	24	1.41	50	0.049	0.0333	7.56	0.67	5.9	7.9	0.00220	28.8	6.79	30.2	0.000073	0.618	514.2	514.8
	0.4	12	0.71	100	0.098	0.0176	7.56	0.67	6	17.2	0.00478	25.5	6.48	16.6	0.000288	4.462	118.1	122.6
	0.4	24	1.41	100	0.098	0.0332	7.56	0.67	6.2	20.5	0.00569	28.8	6.79	30.3	0.000188	4.462	514.2	518.6
38	0.8	12	0.71	50	0.049	0.0152	7.56	0.64	5.8	7.4	0.00205	35.7	6.31	14.7	0.000140	0.618	83.4	84.0
	0.8	24	1.41	50	0.049	0.0308	7.56	0.64	6	8.7	0.00240	36.7	6.83	27.9	0.000086	0.618	208.4	209.1
	0.8	12	0.71	100	0.098	0.017	7.56	0.64	6	17.3	0.00481	35.7	6.31	16.4	0.000292	4.462	83.4	87.8
50	0.8	24	1.41	100	0.098	0.0314	7.56	0.64	6.2	20.6	0.00572	36.7	6.83	28.5	0.000201	4.462	208.4	212.9
	0.8	12	0.71	50	0.049	0.0128	7.56	0.64	5.8	7.4	0.00205	34.9	6.8	11.4	0.000179	0.618	83.4	84.0
	0.8	24	1.41	50	0.049	0.0276	7.56	0.64	6	8.7	0.00240	37.2	7.36	23.1	0.000104	0.618	208.4	209.1
25	0.8	12	0.71	100	0.098	0.0146	7.56	0.64	5.8	14.8	0.00410	34.9	6.8	13.1	0.000314	4.462	83.4	87.8
	0.8	24	1.41	100	0.098	0.0312	7.56	0.64	6.1	18.8	0.00523	37.2	7.36	26.3	0.000199	4.462	208.4	212.9
	0.8	12	0.71	50	0.049	0.0134	7.56	0.7	5.7	6.8	0.00188	36.0	6.98	11.7	0.000161	0.618	83.4	84.0
38	0.8	24	1.41	50	0.049	0.0288	7.56	0.7	6	8.6	0.00238	38.3	7.57	23.5	0.000101	0.618	208.4	209.1
	0.8	12	0.71	100	0.098	0.0152	7.56	0.7	5.8	14.6	0.00406	36.0	6.98	13.3	0.000306	4.462	83.4	87.8

ขนาด (mm)	หัวจ่าย (mm)	Fg (L/min)	Vg (cm/s)	FL (L/hr)	VL (cm/s)	ϵ_g (-)	C* (mg/l)	C in (mg/l)	C out (mg/l)	Kla (1/hr)	Kla (1/s)	Ub (cm/s)	dB (mm)	a (m ⁻¹)	Kl (m/s)	P/V liquid	P/V gas	P/V total
50	0.8	24	1.41	100	0.098	0.029	7.56	0.7	6.1	18.6	0.00518	38.3	7.57	23.7	0.000219	4.462	208.4	212.9
25	1.2	12	0.71	50	0.049	0.0142	7.56	0.6	5.9	8.0	0.00223	45.7	6.38	13.5	0.000165	0.618	76.4	77.0
	1.2	24	1.41	50	0.049	0.0222	7.56	0.6	6.1	9.5	0.00264	47.0	6.86	19.9	0.000133	0.618	194.5	195.2
	1.2	12	0.71	100	0.098	0.0146	7.56	0.6	5.9	16.1	0.00447	45.7	6.38	13.9	0.000321	4.462	76.4	80.9
38	1.2	24	1.41	100	0.098	0.0234	7.56	0.6	6.3	22.8	0.00633	47.0	6.86	21.0	0.000302	4.462	194.5	199.0
	1.2	12	0.71	50	0.049	0.013	7.56	0.6	5.8	7.4	0.00207	45.5	6.4	12.3	0.000167	0.618	76.4	77.0
	1.2	24	1.41	50	0.049	0.0234	7.56	0.6	6	8.7	0.00242	48.3	6.71	21.4	0.000113	0.618	194.5	195.2
50	1.2	12	0.71	100	0.098	0.0136	7.56	0.6	5.9	16.1	0.00447	45.5	6.4	12.9	0.000346	4.462	76.4	80.9
	1.2	24	1.41	100	0.098	0.0238	7.56	0.6	6.2	20.7	0.00576	48.3	6.71	21.8	0.000264	4.462	194.5	199.0
	1.2	12	0.71	50	0.049	0.012	7.56	0.6	5.7	6.9	0.00192	46.4	6.52	11.2	0.000172	0.618	76.4	77.0
50	1.2	24	1.41	50	0.049	0.023	7.56	0.6	6	8.7	0.00242	49.6	6.97	20.3	0.000120	0.618	194.5	195.2
	1.2	12	0.71	100	0.098	0.0128	7.56	0.6	5.9	16.1	0.00447	46.4	6.52	11.9	0.000375	4.462	76.4	80.9
	1.2	24	1.41	100	0.098	0.024	7.56	0.6	6.2	20.7	0.00576	49.6	6.97	21.2	0.000272	4.462	194.5	199.0

ตารางที่ ข.8 ผลการทดลองในคอลัมน์แบบฟองอากาศ ที่เติมตัวกลางอากาศ ปริมาตร 2.5%

ขนาด (mm)	หัวจ่าย (mm)	Fg (L/min)	Vg (cm/s)	FL (L/hr)	VL (cm/s)	ϵ_g (-)	C* (mg/L)	C in (mg/L)	C out (mg/L)	Kla (1/hr)	Kla (1/s)	Ub (cm/s)	dB (mm)	a (m ⁻¹)	Kl (m/s)	P/V liquid	P/V gas	P/V total
25	0.4	12	0.71	50	0.049	0.0238	7.56	0.79	5.9	7.8	0.00215	23.5	6.21	23.6	0.000091	0.618	118.1	118.7
	0.4	24	1.41	50	0.049	0.0362	7.56	0.79	6	8.4	0.00234	26.7	6.58	34.2	0.000068	0.618	514.2	514.8
	0.4	12	0.71	100	0.098	0.025	7.56	0.79	6	16.8	0.00467	23.5	6.21	24.8	0.000189	4.462	118.1	122.6
	0.4	24	1.41	100	0.098	0.0366	7.56	0.79	6.2	20.0	0.00557	26.7	6.58	34.6	0.000161	4.462	514.2	518.6
38	0.4	12	0.71	50	0.049	0.0226	7.56	0.8	5.8	7.2	0.00199	22.3	6.17	22.5	0.000088	0.618	118.1	118.7
	0.4	24	1.41	50	0.049	0.0342	7.56	0.8	5.9	7.7	0.00215	25.8	6.73	31.6	0.000068	0.618	514.2	514.8
	0.4	12	0.71	100	0.098	0.0228	7.56	0.8	6	16.8	0.00467	22.3	6.17	22.7	0.000206	4.462	118.1	122.6
	0.4	24	1.41	100	0.098	0.0348	7.56	0.8	6.2	20.0	0.00556	25.8	6.73	32.1	0.000173	4.462	514.2	518.6
50	0.4	12	0.71	50	0.049	0.0224	7.56	0.88	5.7	6.5	0.00181	22.7	6.34	21.7	0.000084	0.618	118.1	118.7
	0.4	24	1.41	50	0.049	0.033	7.56	0.88	5.9	7.6	0.00212	26.9	7.02	29.2	0.000073	0.618	514.2	514.8
	0.4	12	0.71	100	0.098	0.023	7.56	0.88	5.9	15.2	0.00423	22.7	6.34	22.3	0.000190	4.462	118.1	122.6
	0.4	24	1.41	100	0.098	0.0348	7.56	0.88	6.1	18.0	0.00500	26.9	7.02	30.8	0.000162	4.462	514.2	518.6
25	0.8	12	0.71	50	0.049	0.0182	7.56	0.86	5.6	6.1	0.00169	34.5	6.9	16.1	0.000105	0.618	83.4	84.0
	0.8	24	1.41	50	0.049	0.0326	7.56	0.86	5.8	7.1	0.00196	36.1	7.45	27.1	0.000072	0.618	208.4	209.1
	0.8	12	0.71	100	0.098	0.019	7.56	0.86	5.8	14.1	0.00393	34.5	6.9	16.8	0.000233	4.462	83.4	87.8
	0.8	24	1.41	100	0.098	0.033	7.56	0.86	6.2	19.8	0.00550	36.1	7.45	27.5	0.000200	4.462	208.4	212.9
38	0.8	12	0.71	50	0.049	0.015	7.56	0.86	5.6	6.1	0.00169	34.2	6.94	13.2	0.000129	0.618	83.4	84.0
	0.8	24	1.41	50	0.049	0.031	7.56	0.86	5.7	6.6	0.00182	36.9	7.57	25.4	0.000072	0.618	208.4	209.1
	0.8	12	0.71	100	0.098	0.016	7.56	0.86	5.9	15.3	0.00425	34.2	6.94	14.1	0.000302	4.462	83.4	87.8
	0.8	24	1.41	100	0.098	0.0336	7.56	0.86	6.2	19.8	0.00550	36.9	7.57	27.6	0.000199	4.462	208.4	212.9
50	0.8	12	0.71	50	0.049	0.0158	7.56	0.9	5.6	6.0	0.00168	35.7	7.03	13.7	0.000122	0.618	83.4	84.0
	0.8	24	1.41	50	0.049	0.032	7.56	0.9	5.7	6.5	0.00181	37.9	7.55	26.3	0.000069	0.618	208.4	209.1
	0.8	12	0.71	100	0.098	0.0158	7.56	0.9	5.9	15.2	0.00422	35.7	7.03	13.7	0.000308	4.462	83.4	87.8

ขนาด (mm)	หัวจ่าย (mm)	Fg (L/min)	Vg (cm/s)	FL (L/hr)	VL (cm/s)	ϵ_g (-)	C* (mg/L)	C in (mg/L)	C out (mg/L)	Kla (1/hr)	Kla (1/s)	U _b (cm/s)	dB (mm)	a (m ⁻¹)	Kl (m/s)	P/V liquid	P/V gas	P/V total
50	0.8	24	1.41	100	0.098	0.0336	7.56	0.9	6.2	19.6	0.00545	37.9	7.55	27.6	0.000197	4.462	208.4	212.9
	1.2	12	0.71	50	0.049	0.0146	7.56	0.62	5.7	6.9	0.00191	42.9	6.79	13.1	0.000146	0.618	76.4	77.0
	1.2	24	1.41	50	0.049	0.0284	7.56	0.62	5.9	8.0	0.00223	44.2	7.04	24.9	0.000089	0.618	194.5	195.2
38	1.2	12	0.71	100	0.098	0.017	7.56	0.62	5.7	13.8	0.00382	42.9	6.79	15.3	0.000250	4.462	76.4	80.9
	1.2	24	1.41	100	0.098	0.0316	7.56	0.62	6.1	18.9	0.00525	44.2	7.04	27.8	0.000189	4.462	194.5	199.0
	1.2	12	0.71	50	0.049	0.0152	7.56	0.62	5.6	6.4	0.00178	43.6	6.66	13.9	0.000128	0.618	76.4	77.0
50	1.2	24	1.41	50	0.049	0.0314	7.56	0.62	5.8	7.4	0.00206	45.9	7.17	27.1	0.000076	0.618	194.5	195.2
	1.2	12	0.71	100	0.098	0.0176	7.56	0.62	5.9	16.0	0.00445	43.6	6.66	16.1	0.000276	4.462	76.4	80.9
	1.2	24	1.41	100	0.098	0.0344	7.56	0.62	6.1	18.9	0.00525	45.9	7.17	29.8	0.000176	4.462	194.5	199.0
50	1.2	12	0.71	50	0.049	0.0166	7.56	0.62	5.6	6.4	0.00178	42.3	6.71	15.1	0.000118	0.618	76.4	77.0
	1.2	24	1.41	50	0.049	0.0314	7.56	0.62	5.8	7.4	0.00206	46.8	7.25	26.8	0.000077	0.618	194.5	195.2
	1.2	12	0.71	100	0.098	0.0178	7.56	0.62	5.9	16.0	0.00445	42.3	6.71	16.2	0.000275	4.462	76.4	80.9
50	1.2	24	1.41	100	0.098	0.0326	7.56	0.62	6.1	18.9	0.00525	46.8	7.25	27.9	0.000188	4.462	194.5	199.0

ตารางที่ ข.9 ผลการทดลองในคอลัมน์แบบฟองอากาศ ที่เติมตัวกลางแอสทิกริง ปริมาตร 1%

ขนาด (mm)	หัวจ่าย (mm)	Fg (L/min)	Vg (cm/s)	FL (L/hr)	VL (cm/s)	ξg (-)	C* (mg/L)	C in (mg/L)	C out (mg/L)	Kla (1/hr)	Kla (1/s)	U _b (cm/s)	dB (mm)	a (m ⁻¹)	Kl (m/s)	P/V liquid	P/V gas	P/V total
25	0.4	12	0.71	50	0.049	0.019	7.56	0.62	6	8.7	0.00241	23.6	6.04	19.2	0.000125	0.618	118.1	118.7
	0.4	24	1.41	50	0.049	0.03	7.56	0.62	6.2	10.3	0.00287	26.8	6.47	28.7	0.000100	0.618	500.3	500.9
	0.4	12	0.71	100	0.098	0.0236	7.56	0.62	6.1	18.9	0.00525	23.6	6.04	24.0	0.000219	4.462	118.1	122.6
50	0.4	24	1.41	100	0.098	0.0362	7.56	0.62	6.4	25.1	0.00697	26.8	6.47	34.8	0.000200	4.462	500.3	504.7
	0.4	12	0.71	50	0.049	0.021	7.56	0.69	6.1	9.3	0.00259	24.4	6.15	20.9	0.000124	0.618	118.1	118.7
	0.4	24	1.41	50	0.049	0.035	7.56	0.69	6.3	11.2	0.00312	26.8	6.42	33.9	0.000092	0.618	500.3	500.9
25	0.4	12	0.71	100	0.098	0.024	7.56	0.69	6.2	20.4	0.00567	24.4	6.15	24.0	0.000236	4.462	118.1	122.6
	0.4	24	1.41	100	0.098	0.0372	7.56	0.69	6.4	24.8	0.00689	26.8	6.42	36.1	0.000191	4.462	500.3	504.7
	0.8	12	0.71	50	0.049	0.0142	7.56	0.63	6.2	10.3	0.00287	34.1	6.89	12.5	0.000228	0.618	90.3	90.9
50	0.8	24	1.41	50	0.049	0.0302	7.56	0.63	6.4	12.5	0.00348	36.9	7.11	26.3	0.000132	0.618	236.2	236.9
	0.8	12	0.71	100	0.098	0.0152	7.56	0.63	6.1	18.9	0.00524	34.1	6.89	13.4	0.000390	4.462	90.3	94.8
	0.8	24	1.41	100	0.098	0.0322	7.56	0.63	6.4	25.1	0.00696	36.9	7.11	28.1	0.000248	4.462	236.2	240.7
50	0.8	12	0.71	50	0.049	0.016	7.56	0.63	6.1	9.4	0.00262	35.1	6.95	14.0	0.000187	0.618	90.3	90.9
	0.8	24	1.41	50	0.049	0.0288	7.56	0.63	6.3	11.3	0.00315	37.0	7.37	24.1	0.000130	0.618	236.2	236.9
	0.8	12	0.71	100	0.098	0.0224	7.56	0.63	6	17.3	0.00482	35.1	6.95	19.8	0.000244	4.462	90.3	94.8
25	0.8	24	1.41	100	0.098	0.03	7.56	0.63	6.3	22.7	0.00630	37.0	7.37	25.2	0.000250	4.462	236.2	240.7
	1.2	12	0.71	50	0.049	0.0116	7.56	0.59	5.9	8.1	0.00224	45.3	6.48	10.9	0.000206	0.618	76.4	77.0
	1.2	24	1.41	50	0.049	0.0206	7.56	0.59	6.2	10.4	0.00289	47.9	6.71	18.8	0.000153	0.618	194.5	195.2
50	1.2	12	0.71	100	0.098	0.0134	7.56	0.59	6	17.5	0.00485	45.3	6.48	12.6	0.000386	4.462	76.4	80.9
	1.2	24	1.41	100	0.098	0.0246	7.56	0.59	6.3	22.8	0.00634	47.9	6.71	22.6	0.000281	4.462	194.5	199.0
	1.2	12	0.71	50	0.049	0.0174	7.56	0.6	6	8.7	0.00242	45.4	6.39	16.6	0.000146	0.618	76.4	77.0
50	1.2	24	1.41	50	0.049	0.0306	7.56	0.6	6.2	10.4	0.00288	47.9	6.81	27.8	0.000104	0.618	194.5	195.2
	1.2	12	0.71	100	0.098	0.018	7.56	0.6	6	17.4	0.00484	45.4	6.39	17.2	0.000281	4.462	76.4	80.9
	1.2	24	1.41	100	0.098	0.0318	7.56	0.6	6.2	20.7	0.00576	47.9	6.81	28.9	0.000199	4.462	194.5	199.0

ตารางที่ ข.10 ผลการทดลองในคอลัมน์แบบพองอากาศ ที่เติมตัวกลางเรสซิง ปริมาตร 2.5%

ขนาด (mm)	หัวจ่าย (mm)	Fg (L/min)	Vg (cm/s)	FL (L/hr)	VL (cm/s)	ϵ_g (-)	C* (mg/l)	C in (mg/l)	C out (mg/l)	Kla (1/hr)	Kla (1/s)	Ub (cm/s)	dB (mm)	a (m ⁻¹)	Kl (m/s)	P/V liquid	P/V gas	P/V total
25	0.4	12	0.71	50	0.049	0.0222	7.56	0.73	6.1	9.3	0.00257	23.2	6.35	21.5	0.000120	0.618	1181	118.7
	0.4	24	1.41	50	0.049	0.0368	7.56	0.73	6.3	11.1	0.00309	27.9	6.47	35.4	0.000087	0.618	500.3	500.9
	0.4	12	0.71	100	0.098	0.0224	7.56	0.73	6.2	20.3	0.00563	23.2	6.35	21.7	0.000260	4.462	1181	122.6
	0.4	24	1.41	100	0.098	0.0368	7.56	0.73	6.4	24.6	0.00684	27.9	6.47	35.4	0.000193	4.462	500.3	504.7
50	0.4	12	0.71	50	0.049	0.024	7.56	0.73	5.9	7.8	0.00218	22.9	6.58	22.4	0.000097	0.618	1181	118.7
	0.4	24	1.41	50	0.049	0.0374	7.56	0.73	6	8.5	0.00236	28.5	6.9	33.8	0.000070	0.618	500.3	500.9
	0.4	12	0.71	100	0.098	0.027	7.56	0.73	6.1	18.5	0.00515	22.9	6.58	25.3	0.000203	4.462	1181	122.6
	0.4	24	1.41	100	0.098	0.0392	7.56	0.73	6.3	22.3	0.00619	28.5	6.9	35.5	0.000174	4.462	500.3	504.7
25	0.8	12	0.71	50	0.049	0.0192	7.56	0.64	6	8.7	0.00240	33.7	6.94	16.9	0.000142	0.618	90.3	90.9
	0.8	24	1.41	50	0.049	0.0324	7.56	0.64	6.3	11.3	0.00314	35.6	7.47	26.9	0.000117	0.618	236.2	236.9
	0.8	12	0.71	100	0.098	0.0204	7.56	0.64	6.1	18.8	0.00523	33.7	6.94	18.0	0.000291	4.462	90.3	94.8
	0.8	24	1.41	100	0.098	0.0344	7.56	0.64	6.4	25.0	0.00695	35.6	7.47	28.6	0.000243	4.462	236.2	240.7
50	0.8	12	0.71	50	0.049	0.0214	7.56	0.64	5.9	8.0	0.00222	33.5	7.03	18.7	0.000119	0.618	90.3	90.9
	0.8	24	1.41	50	0.049	0.038	7.56	0.64	6.1	9.4	0.00262	36.1	7.5	31.6	0.000083	0.618	236.2	236.9
	0.8	12	0.71	100	0.098	0.0222	7.56	0.64	6.1	18.8	0.00523	33.5	7.03	19.4	0.000270	4.462	90.3	94.8
	0.8	24	1.41	100	0.098	0.0388	7.56	0.64	6.4	25.0	0.00695	36.1	7.5	32.3	0.000215	4.462	236.2	240.7
25	1.2	12	0.71	50	0.049	0.0174	7.56	0.64	5.9	8.0	0.00222	43.5	6.59	16.1	0.000138	0.618	76.4	77.0
	1.2	24	1.41	50	0.049	0.033	7.56	0.64	6.1	9.4	0.00262	45.7	6.82	30.0	0.000087	0.618	194.5	195.2
	1.2	12	0.71	100	0.098	0.022	7.56	0.64	6	17.3	0.00481	43.5	6.59	20.5	0.000235	4.462	76.4	80.9
	1.2	24	1.41	100	0.098	0.033	7.56	0.64	6.3	22.6	0.00629	45.7	6.82	30.0	0.000209	4.462	194.5	199.0
50	1.2	12	0.71	50	0.049	0.019	7.56	0.64	6	8.7	0.00240	43.4	6.55	17.7	0.000136	0.618	76.4	77.0
	1.2	24	1.41	50	0.049	0.0344	7.56	0.64	6.1	9.4	0.00262	47.0	6.97	30.7	0.000085	0.618	194.5	195.2
	1.2	12	0.71	100	0.098	0.0216	7.56	0.64	6	17.3	0.00481	43.4	6.55	20.2	0.000238	4.462	76.4	80.9
	1.2	24	1.41	100	0.098	0.0348	7.56	0.64	6.2	20.6	0.00572	47.0	6.97	31.0	0.000184	4.462	194.5	199.0

ตารางที่ ข.11 ผลการทดลองในคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง ที่เติมตัวกลางพอลีโพรพิลีน

ขนาด (mm)	Fg (L/min)	Vg (cm/s)	FL (L/hr)	VL (cm/s)	ϵ_l (-)	C*in (mg/l)	C*out (mg/l)	C in (mg/l)	C out (mg/l)	ΔC_{in} (mg/l)	Kla (1/hr)	Kla (1/s)	Kl (m/s)	A (m ²)	a (m ⁻¹)	P/V liquid	P/V gas	P/V total																
4	25	0.24	75	0.073	0.0143	7.56	6.31	0.73	5.7	3.39	1.85	0.000514	1.60×10^{-5}	0.64	32.04	0.72	3.30	4.02																
																			50	0.049	0.0186	7.56	6.31	0.73	6.4	2.81	5.08	0.001410	3.08×10^{-5}	0.91	45.77	6.76	3.30	10.05
	8	0.47	100	0.098	0.0271	7.56	6.31	0.73	6.8	2.42	12.65	0.003514	4.57×10^{-5}	1.52	76.82	41.50	3.30	44.79																
																			25	0.024	0.0143	7.56	6.31	0.63	5.8	3.35	1.95	0.000541	8.81×10^{-6}	1.22	61.35	0.72	7.58	8.30
25	12	0.71	100	0.098	0.0271	7.56	6.31	0.63	6.8	2.45	12.71	0.003530	3.26×10^{-5}	2.15	108.25	41.50	7.58	49.07																
																			25	0.024	0.0143	7.56	6.31	0.62	5.8	3.35	1.95	0.000541	1.05×10^{-5}	1.02	51.58	0.72	12.85	13.58
	16	0.94	75	0.073	0.0229	7.56	6.31	0.62	6.6	2.66	8.50	0.002362	2.69×10^{-5}	1.75	87.95	18.09	12.85	30.95																
																			25	0.024	0.0143	7.56	6.31	0.62	6.8	2.45	12.72	0.003532	3.14×10^{-5}	2.23	112.50	41.50	12.85	54.35
24	16	0.94	75	0.073	0.0229	7.56	6.31	0.56	6.8	2.47	9.56	0.002656	3.13×10^{-5}	1.68	84.86	18.09	19.77	37.87																
																			25	0.024	0.0143	7.56	6.31	0.56	6.9	2.35	13.59	0.003774	3.22×10^{-5}	2.33	117.27	41.50	19.77	61.27
	24	1.41	100	0.098	0.0271	7.56	6.31	0.55	6.8	2.47	9.57	0.002658	1.75×10^{-5}	3.01	151.53	18.09	37.57	55.66																
																			25	0.024	0.0143	7.56	6.31	0.55	6.9	2.35	13.59	0.003775	2.36×10^{-5}	3.17	159.64	41.50	37.57	79.06
38	4	0.24	75	0.073	0.0214	7.56	6.31	0.74	6.4	2.81	5.07	0.001409	4.05×10^{-5}	0.69	34.76	6.76	3.30	10.05																
																			25	0.024	0.0143	7.56	6.31	0.74	5.8	3.31	1.93	0.000535	2.24×10^{-5}	0.47	23.91	0.72	3.30	4.02
75	0.073	0.0214	7.56	6.31	0.74	6.6	2.62	8.45	0.002346	4.57×10^{-5}	1.02	51.33	18.09	3.30	21.39																			

အရွယ်အစား (mm)	Fg (L/min)	Vg (cm/s)	FL (L/hr)	VL (cm/s)	ϵ_L (-)	C*in (mg/L)	C*out (mg/L)	ΔC_{in} (mg/L)	Kla (1/hr)	Kla (1/s)	Kl (m/s)	A (m ²)	a (m ⁻¹)	P/V liquid	P/V gas	P/V total
38	4	0.24	100	0.098	0.0257	7.56	6.31	2.52	11.91	0.003309	4.65×10^{-5}	1.41	71.09	41.50	3.30	44.79
			25	0.024	0.0143	7.56	6.31	3.25	2.02	0.000562	1.32×10^{-5}	0.84	42.43	0.72	7.58	8.30
			50	0.049	0.0171	7.56	6.31	2.74	5.36	0.001488	2.23×10^{-5}	1.33	66.80	6.76	7.58	14.33
	8	0.47	75	0.073	0.0214	7.56	6.31	2.54	8.96	0.002489	2.64×10^{-5}	1.87	94.31	18.09	7.58	25.67
			100	0.098	0.0257	7.56	6.31	2.43	12.68	0.003522	3.17×10^{-5}	2.20	111.05	41.50	7.58	49.07
			25	0.024	0.0143	7.56	6.31	3.26	2.03	0.000563	1.18×10^{-5}	0.94	47.57	0.72	12.85	13.58
	12	0.71	50	0.049	0.0171	7.56	6.31	2.65	5.66	0.001571	2.19×10^{-5}	1.42	71.72	6.76	12.85	19.61
			75	0.073	0.0214	7.56	6.31	2.54	8.97	0.002492	2.49×10^{-5}	1.99	100.20	18.09	12.85	30.95
			100	0.098	0.0257	7.56	6.31	2.44	12.69	0.003525	2.73×10^{-5}	2.56	129.01	41.50	12.85	54.35
	16	0.94	25	0.024	0.0143	7.56	6.31	3.26	2.03	0.000563	1.07×10^{-5}	1.05	52.77	0.72	19.77	20.50
			50	0.049	0.0171	7.56	6.31	2.55	5.98	0.001662	1.84×10^{-5}	1.79	90.23	6.76	19.77	26.53
			75	0.073	0.0214	7.56	6.31	2.44	9.52	0.002645	2.16×10^{-5}	2.44	122.70	18.09	19.77	37.87
24	1.41	100	0.098	0.0257	7.56	6.31	2.33	13.53	0.003760	2.81×10^{-5}	2.65	133.59	41.50	19.77	61.27	
		25	0.024	0.0143	7.56	6.31	3.26	2.03	0.000563	8.91×10^{-6}	1.25	63.22	0.72	37.57	38.29	
		50	0.049	0.0171	7.56	6.31	2.44	6.35	0.001764	1.59×10^{-5}	2.21	111.19	6.76	37.57	44.32	
4	0.24	75	0.073	0.0214	7.56	6.31	2.33	10.15	0.002820	2.22×10^{-5}	2.53	127.28	18.09	37.57	55.66	
		100	0.098	0.0257	7.56	6.31	2.33	13.53	0.003760	2.78×10^{-5}	2.69	135.35	41.50	37.57	79.06	
		25	0.024	0.0143	7.56	6.31	3.43	1.87	0.000520	2.06×10^{-5}	0.50	25.25	0.72	3.30	4.02	
50	0.47	50	0.049	0.0143	7.56	6.31	2.56	6.00	0.001666	4.14×10^{-5}	0.80	40.25	6.76	3.30	10.05	
		75	0.073	0.0171	7.56	6.31	2.45	9.55	0.002651	5.17×10^{-5}	1.02	51.33	18.09	3.30	21.39	
		100	0.098	0.0229	7.56	6.31	2.34	13.56	0.003767	5.52×10^{-5}	1.35	68.24	41.50	3.30	44.79	
8	0.47	25	0.024	0.0114	7.56	6.31	3.35	1.95	0.000542	9.69×10^{-6}	1.11	55.92	0.72	7.58	8.30	
		50	0.049	0.0143	7.56	6.31	2.45	6.36	0.001767	2.65×10^{-5}	1.33	66.80	6.76	7.58	14.33	
		75	0.073	0.0171	7.56	6.31	2.34	10.17	0.002824	3.51×10^{-5}	1.60	80.50	18.09	7.58	25.67	

ပုလဲအရွယ် (mm)	Fg (L/min)	Vg (cm/s)	FL (L/hr)	VL (cm/s)	ϵ_l (-)	C*in (mg/L)	C*out (mg/L)	ΔC_{in} (mg/L)	Kla (1/hr)	Kla (1/s)	Kl (m/s)	A (m ²)	a (m ⁻¹)	P/V liquid	P/V gas	P/V total
50	8	0.47	100	0.098	0.0229	7.56	6.31	2.22	14.53	0.004037	4.28×10^{-5}	1.87	94.31	41.50	7.58	49.07
			25	0.024	0.0114	7.56	6.31	3.34	1.94	0.000540	1.13×10^{-5}	0.94	47.57	0.72	12.85	13.58
			50	0.049	0.0143	7.56	6.31	2.55	5.98	0.001662	2.99×10^{-5}	1.10	55.59	6.76	12.85	19.61
	12	0.71	75	0.073	0.0171	7.56	6.31	2.33	10.15	0.002820	4.17×10^{-5}	1.34	67.68	18.09	12.85	30.95
			100	0.098	0.0229	7.56	6.31	2.20	14.51	0.004031	4.38×10^{-5}	1.83	92.02	41.50	12.85	54.35
			25	0.024	0.0114	7.56	6.31	3.26	2.03	0.000564	9.70×10^{-6}	1.15	58.09	0.72	19.77	20.50
	16	0.94	50	0.049	0.0143	7.56	6.31	2.44	6.35	0.001764	2.38×10^{-5}	1.47	74.12	6.76	19.77	26.53
			75	0.073	0.0171	7.56	6.31	2.33	10.16	0.002821	3.32×10^{-5}	1.68	84.86	18.09	19.77	37.87
			100	0.098	0.0229	7.56	6.31	2.21	14.52	0.004033	4.47×10^{-5}	1.79	90.23	41.50	19.77	61.27
	24	1.41	25	0.024	0.0114	7.56	6.31	3.27	2.03	0.000565	8.93×10^{-6}	1.25	63.22	0.72	37.57	38.29
			50	0.049	0.0143	7.56	6.31	2.45	6.36	0.001766	2.23×10^{-5}	1.57	79.15	6.76	37.57	44.32
			75	0.073	0.0171	7.56	6.31	2.33	10.16	0.002823	3.24×10^{-5}	1.73	87.14	18.09	37.57	55.66
	100	0.098	0.0229	7.56	6.31	2.21	14.53	0.004036	4.24×10^{-5}	1.89	95.14	41.50	37.57	79.06		

ตารางที่ ข.12 ผลการทดลองในคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง ที่เติมตัวกลางแคลเซียมนิรึง

ขนาด (mm)	Fg (L/min)	Vg (cm/s)	FL (L/hr)	VL (cm/s)	ϵ_I (-)	C*in (mg/l)	C*out (mg/l)	C in (mg/l)	C out (mg/l)	ΔC_{In} (mg/l)	Kla (1/hr)	Kla (1/s)	Kl (m/s)	A (m ²)	a (m ⁻¹)	P/V liquid	P/V gas	P/V total
25	4	0.24	25	0.024	0.0143	7.56	6.31	0.73	4.8	4.01	1.28	0.000355	8.27×10^{-6}	0.85	43.00	0.72	3.30	4.02
			50	0.049	0.0157	7.56	6.31	0.73	5.9	3.23	4.03	0.001119	2.02×10^{-5}	1.10	55.52	6.76	3.30	10.05
			75	0.073	0.0186	7.56	6.31	0.73	6.1	3.07	6.60	0.001834	2.30×10^{-5}	1.58	79.70	18.09	3.30	21.39
			100	0.098	0.0229	7.56	6.31	0.73	6.3	2.90	9.67	0.002685	2.99×10^{-5}	1.78	89.87	41.50	3.30	44.79
	25	0.024	0.0143	7.56	6.31	0.67	4.9	3.97	1.34	0.000373	7.01×10^{-6}	1.06	53.21	0.72	7.58	8.30		
	50	0.049	0.0157	7.56	6.31	0.67	6	3.17	4.23	0.001175	1.46×10^{-5}	1.60	80.50	6.76	7.58	14.33		
	75	0.073	0.0186	7.56	6.31	0.67	6.1	3.09	6.63	0.001843	1.70×10^{-5}	2.15	108.25	18.09	7.58	25.67		
	100	0.098	0.0229	7.56	6.31	0.67	6.3	2.92	9.71	0.002696	2.06×10^{-5}	2.60	130.79	41.50	7.58	49.07		
	25	0.024	0.0143	7.56	6.31	0.63	5	3.91	1.41	0.000391	6.55×10^{-6}	1.18	59.61	0.72	12.85	13.58		
	50	0.049	0.0157	7.56	6.31	0.63	6	3.19	4.24	0.001179	1.23×10^{-5}	1.91	96.11	6.76	12.85	19.61		
	75	0.073	0.0186	7.56	6.31	0.63	6.1	3.11	6.65	0.001848	1.53×10^{-5}	2.40	120.74	18.09	12.85	30.95		
	100	0.098	0.0229	7.56	6.31	0.63	6.3	2.94	9.73	0.002704	1.80×10^{-5}	2.97	149.81	41.50	12.85	54.35		
16	16	0.94	25	0.024	0.0143	7.56	6.31	0.61	5	3.92	1.41	0.000392	4.34×10^{-6}	1.79	90.23	0.72	19.77	20.50
			50	0.049	0.0157	7.56	6.31	0.61	6	3.19	4.25	0.001181	1.01×10^{-5}	2.33	117.27	6.76	19.77	26.53
			75	0.073	0.0186	7.56	6.31	0.61	6	3.19	6.38	0.001771	1.27×10^{-5}	2.76	139.05	18.09	19.77	37.87
			100	0.098	0.0229	7.56	6.31	0.61	6.3	2.94	9.75	0.002707	1.87×10^{-5}	2.87	144.53	41.50	19.77	61.27
	25	0.024	0.0143	7.56	6.31	0.6	5	3.93	1.41	0.000392	3.08×10^{-6}	2.53	127.28	0.72	37.57	38.29		
	50	0.049	0.0157	7.56	6.31	0.6	6	3.20	4.25	0.001182	8.24×10^{-6}	2.85	143.43	6.76	37.57	44.32		
	75	0.073	0.0186	7.56	6.31	0.6	6.1	3.12	6.67	0.001853	1.05×10^{-5}	3.49	175.90	18.09	37.57	55.66		
	100	0.098	0.0229	7.56	6.31	0.6	6.4	2.85	10.24	0.002843	1.48×10^{-5}	3.81	192.21	41.50	37.57	79.06		
	25	0.024	0.0129	7.56	6.31	0.68	4.8	4.03	1.29	0.000358	9.21×10^{-6}	0.77	38.87	0.72	3.30	4.02		
	50	0.049	0.0143	7.56	6.31	0.68	5.9	3.25	4.05	0.001124	1.97×10^{-5}	1.13	56.93	6.76	3.30	10.05		
	75	0.073	0.0171	7.56	6.31	0.68	6	3.17	6.34	0.001761	1.99×10^{-5}	1.75	88.41	18.09	3.30	21.39		

ขนาด (mm)	Fg (L/min)	Vg (cm/s)	FL (L/hr)	VL (cm/s)	ϵ_I (-)	C*in (mg/l)	C*out (mg/l)	ΔC_{in} (mg/l)	Kla (1/hr)	Kla (1/s)	Kl (m/s)	A (m ²)	a (m ⁻¹)	P/V liquid	P/V gas	P/V total
38	4	0.24	100	0.098	0.0200	7.56	6.31	3.01	9.25	0.002570	2.46×10^{-5}	2.08	104.61	41.50	3.30	44.79
			25	0.024	0.0129	7.56	6.31	3.97	1.35	0.000374	5.60×10^{-6}	1.33	66.80	0.72	7.58	8.30
			50	0.049	0.0143	7.56	6.31	3.18	6	4.23	0.001176	1.18×10^{-5}	1.98	99.87	6.76	7.58
	8	0.47	75	0.073	0.0171	7.56	6.31	3.10	6.64	0.001844	1.70×10^{-5}	2.15	108.25	18.09	7.58	25.67
			100	0.098	0.0200	7.56	6.31	3.01	9.27	0.002574	2.32×10^{-5}	2.20	111.05	41.50	7.58	49.07
			25	0.024	0.0129	7.56	6.31	3.91	5	1.40	0.000390	6.54×10^{-6}	1.18	59.61	0.72	12.85
	12	0.71	50	0.049	0.0143	7.56	6.31	3.18	4.24	0.001178	1.55×10^{-5}	1.50	75.76	6.76	12.85	19.61
			75	0.073	0.0171	7.56	6.31	3.10	6.65	0.001847	2.20×10^{-5}	1.66	83.88	18.09	12.85	30.95
			100	0.098	0.0200	7.56	6.31	3.02	9.28	0.002578	2.21×10^{-5}	2.31	116.62	41.50	12.85	54.35
	16	0.94	25	0.024	0.0129	7.56	6.31	3.71	1.58	0.000440	5.53×10^{-6}	1.58	79.49	0.72	19.77	20.50
			50	0.049	0.0143	7.56	6.31	3.10	4.43	0.001231	1.36×10^{-5}	1.79	90.23	6.76	19.77	26.53
			75	0.073	0.0171	7.56	6.31	3.02	6.96	0.001933	1.82×10^{-5}	2.11	106.43	18.09	19.77	37.87
24	1.41	100	0.098	0.0200	7.56	6.31	2.93	9.73	0.002702	2.20×10^{-5}	2.44	122.70	41.50	19.77	61.27	
		25	0.024	0.0129	7.56	6.31	3.73	5.3	1.60	0.000443	5.60×10^{-6}	1.57	79.15	0.72	37.57	38.29
		50	0.049	0.0143	7.56	6.31	3.13	6.1	4.46	0.001238	1.20×10^{-5}	2.05	103.16	6.76	37.57	44.32
4	0.24	75	0.073	0.0171	7.56	6.31	3.04	6.99	0.001943	1.75×10^{-5}	2.21	111.19	18.09	37.57	55.66	
		100	0.098	0.0200	7.56	6.31	2.86	10.26	0.002849	2.24×10^{-5}	2.53	127.28	41.50	37.57	79.06	
		25	0.024	0.0129	7.56	6.31	3.90	5	1.40	0.000389	1.72×10^{-5}	0.45	22.56	0.72	3.30	4.02
50	0.47	50	0.049	0.0157	7.56	6.31	3.25	4.05	0.001125	2.62×10^{-5}	0.85	43.00	6.76	3.30	10.05	
		75	0.073	0.0171	7.56	6.31	3.17	6.34	0.001762	2.25×10^{-5}	1.55	78.26	18.09	3.30	21.39	
		100	0.098	0.0186	7.56	6.31	2.92	6.3	9.71	0.002696	3.15×10^{-5}	1.70	85.50	41.50	3.30	44.79
8	0.47	25	0.024	0.0129	7.56	6.31	3.84	1.46	0.000406	9.00×10^{-6}	0.90	45.12	0.72	7.58	8.30	
		50	0.049	0.0157	7.56	6.31	3.18	4.24	0.001178	2.21×10^{-5}	1.06	53.21	6.76	7.58	14.33	

ပုလဲ (mm)	Fg (L/min)	Vg (cm/s)	FL (L/hr)	VL (cm/s)	ϵ_l (-)	C*in (mg/L)	C*out (mg/L)	C in (mg/L)	C out (mg/L)	ΔC_{ln} (mg/L)	Kla (1/hr)	Kla (1/s)	Kl (m/s)	A (m ²)	a (m ⁻¹)	P/V liquid	P/V gas	P/V total
50	8	0.47	100	0.098	0.0186	7.56	6.31	0.64	6.4	2.84	10.21	0.002836	3.30×10^{-5}	1.71	86.01	41.50	7.58	49.07
			25	0.024	0.0129	7.56	6.31	0.6	5.4	3.65	1.66	0.000460	8.92×10^{-6}	1.02	51.58	0.72	12.85	13.58
	12	0.71	50	0.049	0.0157	7.56	6.31	0.6	6.1	3.12	4.45	0.001235	1.82×10^{-5}	1.34	67.68	6.76	12.85	19.61
			75	0.073	0.0171	7.56	6.31	0.6	6.2	3.03	6.98	0.001939	2.31×10^{-5}	1.66	83.88	18.09	12.85	30.95
	16	0.94	100	0.098	0.0186	7.56	6.31	0.6	6.4	2.85	10.24	0.002843	2.96×10^{-5}	1.91	96.11	41.50	12.85	54.35
			25	0.024	0.0129	7.56	6.31	0.58	5.4	3.66	1.66	0.000461	7.27×10^{-6}	1.26	63.43	0.72	19.77	20.50
			50	0.049	0.0157	7.56	6.31	0.58	6.2	3.04	4.66	0.001294	1.63×10^{-5}	1.58	79.49	6.76	19.77	26.53
			75	0.073	0.0171	7.56	6.31	0.58	6.3	2.95	7.32	0.002034	2.13×10^{-5}	1.90	95.62	18.09	19.77	37.87
	24	1.41	100	0.098	0.0186	7.56	6.31	0.58	6.4	2.86	10.25	0.002847	2.68×10^{-5}	2.11	106.43	41.50	19.77	61.27
			25	0.024	0.0129	7.56	6.31	0.51	5.3	3.76	1.61	0.000446	5.12×10^{-6}	1.73	87.14	0.72	37.57	38.29
			50	0.049	0.0157	7.56	6.31	0.51	6.2	3.06	4.68	0.001301	1.37×10^{-5}	1.89	95.14	6.76	37.57	44.32
			75	0.073	0.0171	7.56	6.31	0.51	6.3	2.97	7.36	0.002044	1.98×10^{-5}	2.05	103.16	18.09	37.57	55.66
			100	0.098	0.0186	7.56	6.31	0.51	6.4	2.88	10.29	0.002859	2.57×10^{-5}	2.21	111.19	41.50	37.57	79.06

ตารางที่ ข.13 ผลการทดลองในคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง ที่เติมตัวกลางอานม้า

ขนาด (mm)	Fg (L/min)	Vg (cm/s)	FL (L/hr)	VL (cm/s)	ϵ_L (-)	C*in (mg/l)	C*out (mg/l)	C in (mg/l)	C out (mg/l)	ΔC_{in} (mg/l)	Kla (1/hr)	Kla (1/s)	Kl (m/s)	A (m ²)	a (m ⁻¹)	P/V liquid	P/V gas	P/V total
25	4	0.24	25	0.024	0.0129	7.56	6.31	0.71	4.7	4.08	1.23	0.000342	1.17×10^{-5}	0.58	29.32	0.72	3.30	4.02
			50	0.049	0.0157	7.56	6.31	0.71	5.5	3.54	3.41	0.000947	2.01×10^{-5}	0.94	47.16	6.76	3.30	10.05
			75	0.073	0.0186	7.56	6.31	0.71	5.5	3.54	5.11	0.001420	2.08×10^{-5}	1.35	68.24	18.09	3.30	21.39
			100	0.098	0.0214	7.56	6.31	0.71	5.8	3.32	7.73	0.002147	2.47×10^{-5}	1.73	86.95	41.50	3.30	44.79
	25	0.024	0.0129	7.56	6.31	0.69	4.7	4.09	1.24	0.000343	6.80×10^{-6}	1.00	50.51	0.72	7.58	8.30		
	50	0.049	0.0157	7.56	6.31	0.69	5.5	3.55	3.42	0.000949	1.31×10^{-5}	1.43	72.26	6.76	7.58	14.33		
	75	0.073	0.0186	7.56	6.31	0.69	5.6	3.47	5.34	0.001483	1.53×10^{-5}	1.93	97.09	18.09	7.58	25.67		
	100	0.098	0.0214	7.56	6.31	0.69	5.7	3.40	7.42	0.002062	1.69×10^{-5}	2.43	122.30	41.50	7.58	49.07		
	25	0.024	0.0129	7.56	6.31	0.64	4.7	4.11	1.25	0.000346	5.80×10^{-6}	1.18	59.61	0.72	12.85	13.58		
	50	0.049	0.0157	7.56	6.31	0.64	5.5	3.57	3.43	0.000954	8.80×10^{-6}	2.15	108.39	6.76	12.85	19.61		
	75	0.073	0.0186	7.56	6.31	0.64	5.7	3.42	5.59	0.001554	1.20×10^{-5}	2.56	129.01	18.09	12.85	30.95		
	100	0.098	0.0214	7.56	6.31	0.64	5.8	3.34	7.78	0.002161	1.44×10^{-5}	2.97	149.81	41.50	12.85	54.35		
25	12	0.71	25	0.024	0.0129	7.56	6.31	0.61	4.7	4.12	1.25	0.000348	4.37×10^{-6}	1.58	79.49	0.72	19.77	20.50
			50	0.049	0.0157	7.56	6.31	0.61	5.5	3.58	3.44	0.000957	9.47×10^{-6}	2.00	101.02	6.76	19.77	26.53
			75	0.073	0.0186	7.56	6.31	0.61	5.7	3.43	5.61	0.001558	1.17×10^{-5}	2.65	133.59	18.09	19.77	37.87
			100	0.098	0.0214	7.56	6.31	0.61	5.9	3.27	8.14	0.002261	1.40×10^{-5}	3.20	160.99	41.50	19.77	61.27
	25	0.024	0.0129	7.56	6.31	0.59	4.7	4.13	1.25	0.000349	4.90×10^{-6}	1.41	71.18	0.72	37.57	38.29		
	50	0.049	0.0157	7.56	6.31	0.59	5.4	3.66	3.31	0.000921	8.93×10^{-6}	2.05	103.16	6.76	37.57	44.32		
	75	0.073	0.0186	7.56	6.31	0.59	5.6	3.51	5.39	0.001498	8.93×10^{-6}	3.33	167.76	18.09	37.57	55.66		
	100	0.098	0.0214	7.56	6.31	0.59	5.8	3.36	7.81	0.002170	1.13×10^{-5}	3.81	192.21	41.50	37.57	79.06		
	25	0.024	0.0129	7.56	6.31	0.66	4.3	4.35	1.06	0.000293	1.05×10^{-5}	0.55	27.96	0.72	3.30	4.02		
	50	0.049	0.0143	7.56	6.31	0.66	5.2	3.77	3.03	0.000843	1.74×10^{-5}	0.96	48.54	6.76	3.30	10.05		
	75	0.073	0.0157	7.56	6.31	0.66	5.5	3.56	5.14	0.001428	2.14×10^{-5}	1.33	66.81	18.09	3.30	21.39		

ໝາຍ (mm)	Fg (L/min)	Vg (cm/s)	FL (L/hr)	VL (cm/s)	ϵ_l (-)	C*in (mg/L)	C*out (mg/L)	ΔC_{in} (mg/L)	Kla (1/hr)	Kla (1/s)	Kl (m/s)	A (m ²)	a (m ⁻¹)	P/V liquid	P/V gas	P/V total
38	4	0.24	100	0.098	0.0186	7.56	6.31	3.41	7.44	0.002068	2.38×10^{-5}	1.73	86.95	41.50	3.30	44.79
			25	0.024	0.0129	7.56	6.31	4.29	1.10	0.000306	5.22×10^{-6}	1.16	58.63	0.72	7.58	8.30
	8	0.47	50	0.049	0.0143	7.56	6.31	3.63	3.29	0.000915	1.22×10^{-5}	1.49	75.00	6.76	7.58	14.33
			75	0.073	0.0157	7.56	6.31	3.49	5.36	0.001489	1.41×10^{-5}	2.09	105.45	18.09	7.58	25.67
	12	0.71	100	0.098	0.0186	7.56	6.31	3.34	7.77	0.002159	1.73×10^{-5}	2.48	125.12	41.50	7.58	49.07
			25	0.024	0.0129	7.56	6.31	4.24	1.15	0.000320	5.03×10^{-6}	1.26	63.64	0.72	12.85	13.58
	16	0.94	50	0.049	0.0143	7.56	6.31	3.64	3.30	0.000918	8.47×10^{-6}	2.15	108.39	6.76	12.85	19.61
			75	0.073	0.0157	7.56	6.31	3.50	5.38	0.001494	1.09×10^{-5}	2.73	137.31	18.09	12.85	30.95
	24	1.41	100	0.098	0.0186	7.56	6.31	3.43	7.47	0.002076	1.35×10^{-5}	3.06	153.99	41.50	12.85	54.35
			25	0.024	0.0129	7.56	6.31	4.18	1.20	0.000334	3.49×10^{-6}	1.90	95.62	0.72	19.77	20.50
	50	0.24	50	0.049	0.0143	7.56	6.31	3.65	3.31	0.000919	8.22×10^{-6}	2.22	111.84	6.76	19.77	26.53
			75	0.073	0.0157	7.56	6.31	3.50	7.80	0.002167	1.30×10^{-5}	3.30	166.50	41.50	19.77	61.27
8	0.47	100	0.098	0.0186	7.56	6.31	4.20	1.21	0.000336	3.54×10^{-6}	1.89	95.14	0.72	37.57	38.29	
		25	0.024	0.0129	7.56	6.31	3.50	3.33	0.000924	8.31×10^{-6}	2.21	111.19	6.76	37.57	44.32	
4	0.24	50	0.049	0.0143	7.56	6.31	3.59	5.19	0.001443	1.07×10^{-5}	2.69	135.35	18.09	37.57	55.66	
		75	0.073	0.0157	7.56	6.31	4.20	1.14	0.000316	1.08×10^{-5}	0.58	29.32	0.72	3.30	4.02	
8	0.47	100	0.098	0.0186	7.56	6.31	3.54	7.83	0.002176	1.44×10^{-5}	3.01	151.53	41.50	37.57	79.06	
		25	0.024	0.0129	7.56	6.31	4.20	1.14	0.000316	1.08×10^{-5}	0.58	29.32	0.72	3.30	4.02	
50	0.24	50	0.049	0.0143	7.56	6.31	3.54	3.41	0.000947	1.90×10^{-5}	0.99	49.94	6.76	3.30	10.05	
		75	0.073	0.0157	7.56	6.31	3.47	5.33	0.001480	2.17×10^{-5}	1.35	68.24	18.09	3.30	21.39	
8	0.47	100	0.098	0.0186	7.56	6.31	3.32	7.73	0.002147	2.90×10^{-5}	1.47	73.95	41.50	3.30	44.79	
		25	0.024	0.0129	7.56	6.31	4.23	1.15	0.000319	8.02×10^{-6}	0.79	39.74	0.72	7.58	8.30	
50	0.47	50	0.049	0.0143	7.56	6.31	3.49	3.57	0.000993	1.97×10^{-5}	1.00	50.51	6.76	7.58	14.33	
		75	0.073	0.0157	7.56	6.31	3.41	5.59	0.001552	2.42×10^{-5}	1.27	64.07	18.09	7.58	25.67	

ပုလဲ (mm)	F _g (L/min)	V _g (cm/s)	FL (L/hr)	VL (cm/s)	ε _l (-)	C* _{in} (mg/L)	C* _{out} (mg/L)	C _{in} (mg/L)	C _{out} (mg/L)	ΔC _{ln} (mg/L)	K _{la} (1/hr)	K _{la} (1/s)	K _l (m/s)	A (m ²)	a (m ⁻¹)	P/V liquid	P/V gas	P/V total	
50	8	0.47	100	0.098	0.0200	7.56	6.31	0.65	5.9	3.26	8.11	0.002253	2.90X10 ⁻⁵	1.54	77.75	41.50	7.58	49.07	
			25	0.024	0.0129	7.56	6.31	0.63	4.5	4.24	1.15	0.000320	6.20X10 ⁻⁶	1.02	51.58	0.72	12.85	13.58	
			50	0.049	0.0143	7.56	6.31	0.63	5.5	3.57	3.44	0.000955	1.41X10 ⁻⁵	1.34	67.68	6.76	12.85	19.61	
	12	0.71	0.098	100	0.098	0.0200	7.56	6.31	0.63	5.7	3.42	5.60	0.001555	2.05X10 ⁻⁵	1.50	75.76	18.09	12.85	30.95
				25	0.024	0.0129	7.56	6.31	0.57	4.6	4.20	1.21	0.000336	5.78X10 ⁻⁶	1.15	58.09	0.72	19.77	20.50
				50	0.049	0.0143	7.56	6.31	0.57	5.5	3.59	3.46	0.000961	1.30X10 ⁻⁵	1.47	74.12	6.76	19.77	26.53
	16	0.94	0.098	100	0.098	0.0200	7.56	6.31	0.57	5.9	3.29	8.17	0.002268	2.51X10 ⁻⁵	1.79	90.23	41.50	19.77	61.27
				25	0.024	0.0129	7.56	6.31	0.52	4.6	4.22	1.22	0.000338	6.12X10 ⁻⁶	1.10	55.27	0.72	37.57	38.29
				50	0.049	0.0143	7.56	6.31	0.52	5.6	3.52	5.40	0.001501	1.89X10 ⁻⁵	1.58	79.49	18.09	19.77	37.87
	24	1.41	0.098	100	0.098	0.0200	7.56	6.31	0.52	5.7	3.46	5.66	0.001571	1.52X10 ⁻⁵	2.05	103.16	18.09	37.57	55.66
				25	0.024	0.0129	7.56	6.31	0.52	5.9	3.31	8.20	0.002278	2.21X10 ⁻⁵	2.05	103.16	41.50	37.57	79.06
				50	0.049	0.0143	7.56	6.31	0.52	5.6	3.46	5.66	0.001571	1.52X10 ⁻⁵	2.05	103.16	18.09	37.57	55.66

ตารางที่ ข.14 ผลการทดลองในคอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง ที่เติมตัวกลางแอสซีทริก

ขนาด (mm)	Fg (L/min)	Vg (cm/s)	FL (L/hr)	VL (cm/s)	ϵ_l (-)	C*in (mg/L)	C*out (mg/L)	C in (mg/L)	C out (mg/L)	ΔC_{in} (mg/L)	Kla (1/hr)	Kla (1/s)	Kl (m/s)	A (m ²)	a (m ⁻¹)	P/V liquid	P/V gas	P/V total	
4	4	0.24	25	0.024	0.0157	7.56	6.31	0.84	4.7	4.02	1.21	0.000336	1.58×10^{-5}	0.42	21.21	0.72	3.30	4.02	
			50	0.049	0.0171	7.56	6.31	0.84	5.6	3.42	3.42	3.51	0.000974	2.80×10^{-5}	0.69	34.76	6.76	3.30	10.05
			75	0.073	0.0200	7.56	6.31	0.84	5.7	3.35	3.35	5.49	0.001524	3.23×10^{-5}	0.94	47.16	18.09	3.30	21.39
			100	0.098	0.0229	7.56	6.31	0.84	5.8	3.27	3.27	7.64	0.002122	3.92×10^{-5}	1.07	54.12	41.50	3.30	44.79
8	8	0.47	25	0.024	0.0157	7.56	6.31	0.76	4.7	4.06	1.22	0.000340	8.01×10^{-6}	0.84	42.43	0.72	7.58	8.30	
			50	0.049	0.0171	7.56	6.31	0.76	5.7	3.38	3.38	3.69	0.001024	1.53×10^{-5}	1.33	66.80	6.76	7.58	14.33
			75	0.073	0.0200	7.56	6.31	0.76	5.7	3.38	3.38	5.53	0.001536	1.85×10^{-5}	1.65	83.25	18.09	7.58	25.67
			100	0.098	0.0229	7.56	6.31	0.76	5.8	3.30	3.30	7.70	0.002138	1.57×10^{-5}	2.71	136.47	41.50	7.58	49.07
25	12	0.71	25	0.024	0.0157	7.56	6.31	0.72	4.8	4.01	1.28	0.000356	6.40×10^{-6}	1.10	55.59	0.72	12.85	13.58	
			50	0.049	0.0171	7.56	6.31	0.72	5.6	3.46	3.46	3.55	0.000986	1.46×10^{-5}	1.34	67.68	6.76	12.85	19.61
			75	0.073	0.0200	7.56	6.31	0.72	5.7	3.39	3.39	5.55	0.001542	1.60×10^{-5}	1.91	96.11	18.09	12.85	30.95
			100	0.098	0.0229	7.56	6.31	0.72	5.8	3.31	3.31	7.72	0.002145	1.84×10^{-5}	2.31	116.62	41.50	12.85	54.35
16	16	0.94	25	0.024	0.0157	7.56	6.31	0.63	4.8	4.05	1.30	0.000361	4.87×10^{-6}	1.47	74.12	0.72	19.77	20.50	
			50	0.049	0.0171	7.56	6.31	0.63	5.6	3.50	3.50	3.58	0.000995	1.17×10^{-5}	1.68	84.86	6.76	19.77	26.53
			75	0.073	0.0200	7.56	6.31	0.63	5.7	3.42	3.42	5.60	0.001555	1.63×10^{-5}	1.90	95.62	18.09	19.77	37.87
			100	0.098	0.0229	7.56	6.31	0.63	5.8	3.35	3.35	7.79	0.002163	1.84×10^{-5}	2.33	117.27	41.50	19.77	61.27
24	24	1.41	25	0.024	0.0157	7.56	6.31	0.6	4.8	4.06	1.30	0.000362	4.58×10^{-6}	1.57	79.15	0.72	37.57	38.29	
			50	0.049	0.0171	7.56	6.31	0.6	5.6	3.51	3.51	3.59	0.000998	9.67×10^{-6}	2.05	103.16	6.76	37.57	44.32
			75	0.073	0.0200	7.56	6.31	0.6	5.7	3.43	3.43	5.61	0.001560	1.31×10^{-5}	2.37	119.23	18.09	37.57	55.66
			100	0.098	0.0229	7.56	6.31	0.6	5.8	3.36	3.36	7.81	0.002168	1.60×10^{-5}	2.69	135.35	41.50	37.57	79.06
50	4	0.24	25	0.024	0.0143	7.56	6.31	0.75	4.4	4.25	1.08	0.000301	1.26×10^{-5}	0.47	23.91	0.72	3.30	4.02	
			50	0.049	0.0157	7.56	6.31	0.75	5.3	3.67	3.67	3.13	0.000869	2.23×10^{-5}	0.77	38.87	6.76	3.30	10.05
			75	0.073	0.0171	7.56	6.31	0.75	5.5	3.53	3.53	5.09	0.001414	2.76×10^{-5}	1.02	51.33	18.09	3.30	21.39

ຫນ້າ (mm)	Fg (L/min)	Vg (cm/s)	FL (L/hr)	VL (cm/s)	ϵ_l (-)	C*in (mg/l)	C*out (mg/l)	ΔC_{in} (mg/l)	Kla (1/hr)	Kla (1/s)	Kl (m/s)	A (m ²)	a (m ⁻¹)	P/V liquid	P/V gas	P/V total	
50	4	0.24	100	0.098	0.0186	7.56	6.31	5.7	3.38	7.38	0.002050	1.05	52.72	41.50	3.30	44.79	
	8	0.47	25	0.024	0.0143	7.56	6.31	4.5	4.20	1.13	0.000315	4.20×10 ⁻⁶	1.49	75.00	0.72	7.58	8.30
			50	0.049	0.0157	7.56	6.31	5.4	3.61	3.27	0.000908	1.09×10 ⁻⁵	1.65	83.25	6.76	7.58	14.33
			75	0.073	0.0171	7.56	6.31	5.6	3.46	5.32	0.001479	1.67×10 ⁻⁵	1.76	88.77	18.09	7.58	25.67
			100	0.098	0.0186	7.56	6.31	5.8	3.31	7.72	0.002145	2.27×10 ⁻⁵	1.87	94.31	41.50	7.58	49.07
	12	0.71	25	0.024	0.0143	7.56	6.31	4.6	4.13	1.18	0.000328	7.52×10 ⁻⁶	0.86	43.57	0.72	12.85	13.58
			50	0.049	0.0157	7.56	6.31	5.5	3.53	3.40	0.000945	1.83×10 ⁻⁵	1.02	51.58	6.76	12.85	19.61
			75	0.073	0.0171	7.56	6.31	5.6	3.46	5.32	0.001477	2.18×10 ⁻⁵	1.34	67.68	18.09	12.85	30.95
			100	0.098	0.0186	7.56	6.31	5.8	3.31	7.72	0.002143	2.56×10 ⁻⁵	1.66	83.88	41.50	12.85	54.35
	16	0.94	25	0.024	0.0143	7.56	6.31	4.6	4.17	1.19	0.000332	5.23×10 ⁻⁶	1.26	63.43	0.72	19.77	20.50
			50	0.049	0.0157	7.56	6.31	5.5	3.56	3.43	0.000953	1.12×10 ⁻⁵	1.68	84.86	6.76	19.77	26.53
			75	0.073	0.0171	7.56	6.31	5.6	3.49	5.36	0.001489	1.65×10 ⁻⁵	1.79	90.23	18.09	19.77	37.87
			100	0.098	0.0186	7.56	6.31	5.8	3.34	7.77	0.002159	2.26×10 ⁻⁵	1.90	95.62	41.50	19.77	61.27
	24	1.41	25	0.024	0.0143	7.56	6.31	4.7	4.11	1.25	0.000346	4.87×10 ⁻⁶	1.41	71.18	0.72	37.57	38.29
			50	0.049	0.0157	7.56	6.31	5.6	3.50	3.58	0.000995	1.14×10 ⁻⁵	1.73	87.14	6.76	37.57	44.32
			75	0.073	0.0171	7.56	6.31	5.6	3.50	5.37	0.001492	1.57×10 ⁻⁵	1.89	95.14	18.09	37.57	55.66
			100	0.098	0.0186	7.56	6.31	5.9	3.27	8.13	0.002257	2.37×10 ⁻⁵	1.89	95.14	41.50	37.57	79.06

ตารางที่ ข.15 ผลการทดลองในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย โดยใช้คอลัมน์แบบฟองอากาศ

หัวจ่าย (mm)	Fg (L/hr)	FL (L/hr)	VOCs in (ppm)	C in (mg/L)	VOCs out (ppm)	Cout (mg/L)	C*in (mg/l)	C*out (mg/l)	Δ CIn (mg/l)	Kla (1/hr)	Kla (1/s)	Removal (%)	P/V liquid	P/V gas	P/V total	
0.4 มม. 19 รู	240	25	1005.41	3.21	307.4	0.982	14.29	4.37	7.25	3.72	0.00103	69.43	0.103	27.8	27.9	
		50	1004.35	3.21	304.75	0.974	14.27	4.33	7.22	3.74	0.00104	69.66	0.618	27.8	28.4	
		75	1000.64	3.20	283.55	0.906	14.22	4.03	4.03	7.03	3.94	0.00109	71.66	1.823	27.8	29.6
		100	1002.23	3.20	269.24	0.860	14.24	3.83	3.83	6.91	4.10	0.00114	73.14	4.462	27.8	32.3
	480	25	1000.11	3.20	518.34	1.656	14.21	7.37	7.37	8.69	4.28	0.00119	48.17	0.103	69.5	69.6
		50	1001.17	3.20	508.8	1.625	14.23	7.23	7.23	8.64	4.40	0.00122	49.18	0.618	69.5	70.1
		75	1003.29	3.21	489.72	1.565	14.26	6.96	6.96	8.53	4.65	0.00129	51.19	1.823	69.5	71.3
		100	1001.7	3.20	470.11	1.502	14.24	6.68	6.68	8.40	4.89	0.00136	53.07	4.462	69.5	73.9
	720	25	1003.82	3.21	665.68	2.127	14.27	9.46	9.46	9.54	4.11	0.00114	33.69	0.103	125.1	125.2
		50	1004.35	3.21	648.19	2.071	14.27	9.21	9.21	9.45	4.37	0.00121	35.46	0.618	125.1	125.7
		75	1001.7	3.20	620.63	1.983	14.24	8.82	8.82	9.28	4.76	0.00132	38.04	1.823	125.1	126.9
		100	1005.41	3.21	612.68	1.957	14.29	8.71	8.71	9.26	4.91	0.00137	39.06	4.462	125.1	129.5
960	25	1000.64	3.20	780.16	2.492	14.22	11.09	11.09	10.08	3.38	0.00094	22.03	0.103	203.8	203.9	
	50	1001.17	3.20	764.79	2.443	14.23	10.87	10.87	10.01	3.65	0.00101	23.61	0.618	203.8	204.4	
	75	1002.76	3.20	745.71	2.382	14.25	10.60	10.60	9.93	4.00	0.00111	25.63	1.823	203.8	205.6	
	100	1005.94	3.21	737.23	2.355	14.30	10.48	10.48	9.91	4.19	0.00116	26.71	4.462	203.8	208.3	
1440	25	1004.88	3.21	836.34	2.672	14.28	11.89	11.89	10.36	3.77	0.00105	16.77	0.103	486.4	486.5	
	50	1005.41	3.21	818.32	2.614	14.29	11.63	11.63	10.29	4.22	0.00117	18.61	0.618	486.4	487.0	
	75	1003.29	3.21	800.83	2.558	14.26	11.38	11.38	10.19	4.60	0.00128	20.18	1.823	486.4	488.2	
	100	1004.88	3.21	798.71	2.552	14.28	11.35	11.35	10.19	4.69	0.00130	20.52	4.462	486.4	490.8	

พื้ง่าย (mm)	Fg (L/hr)	FL (L/hr)	VOCs in (ppm)	C in (mg/L)	VOCs out (ppm)	Cout (mg/L)	C*in (mg/L)	C*out (mg/L)	Δ Cln (mg/L)	Kla (1/hr)	Kla (1/s)	Removal (%)	P/V liquid	P/V gas	P/V total	
0.4 มม. 38 งู	240	25	1004.88	3.21	240.09	0.77	14.28	3.41	6.66	4.43	0.001232	76.11	0.1	27.8	27.9	
		50	1005.41	3.21	245.92	0.79	14.29	3.49	6.72	4.37	0.001213	75.54	0.6	27.8	28.4	
		75	1003.29	3.21	235.85	0.75	14.26	3.35	14.26	6.62	4.48	0.001245	76.49	1.8	27.8	29.6
		100	1004.88	3.21	242.21	0.77	14.28	3.44	14.28	6.68	4.41	0.001225	75.90	4.5	27.8	32.3
	480	25	1003.82	3.21	287.79	0.92	14.27	14.27	4.09	7.08	7.81	0.002171	71.33	0.1	60.2	60.3
		50	1004.88	3.21	292.03	0.93	14.28	14.28	4.15	7.12	7.74	0.002149	70.94	0.6	60.2	60.8
		75	1003.29	3.21	300.51	0.96	14.26	14.26	4.27	7.18	7.56	0.002100	70.05	1.8	60.2	62.0
		100	1002.76	3.20	296.27	0.95	14.25	14.25	4.21	7.15	7.64	0.002122	70.45	4.5	60.2	64.7
	720	25	1003.82	3.21	375.77	1.20	14.27	14.27	5.34	7.77	9.37	0.002604	62.57	0.1	104.2	104.3
		50	1004.88	3.21	368.88	1.18	14.28	14.28	5.24	7.72	9.55	0.002652	63.29	0.6	104.2	104.8
		75	1003.29	3.21	371.53	1.19	14.26	14.26	5.28	7.73	9.47	0.002630	62.97	1.8	104.2	106.0
		100	1002.76	3.20	364.64	1.16	14.25	14.25	5.18	7.68	9.63	0.002675	63.64	4.5	104.2	108.7
960	25	1001.7	3.20	462.69	1.48	14.24	14.24	6.58	8.35	9.98	0.002771	53.81	0.1	148.2	148.3	
	50	1003.29	3.21	456.33	1.46	14.26	14.26	6.48	8.32	10.16	0.002823	54.52	0.6	148.2	148.8	
	75	1004.88	3.21	446.79	1.43	14.28	14.28	6.35	8.26	10.44	0.002899	55.54	1.8	148.2	150.0	
	100	1001.7	3.20	448.38	1.43	14.24	14.24	6.37	8.26	10.36	0.002877	55.24	4.5	148.2	152.7	
1440	25	1003.29	3.21	568.16	1.82	14.26	14.26	8.07	9.00	11.21	0.003113	43.37	0.1	291.8	291.9	
	50	1002.76	3.20	564.45	1.80	14.25	14.25	8.02	8.98	11.32	0.003144	43.71	0.6	291.8	292.4	
	75	1006.47	3.22	553.32	1.77	14.30	14.30	7.86	8.93	11.76	0.003267	45.02	1.8	291.8	293.6	
	100	1005.41	3.21	550.67	1.76	14.29	14.29	7.83	8.91	11.83	0.003286	45.23	4.5	291.8	296.3	

ตารางที่ ข.16 ผลการทดลองในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย โดยใช้คอลัมน์แบบฟองอากาศ ชนิดเติมตัวกลาง

หัวจ่าย (mm)	Fg (L/hr)	FL (L/hr)	VOCs in (ppm)	C in (mg/L)	VOCs out (ppm)	Cout (mg/L)	C*in (mg/l)	C*out (mg/l)	Δ Cin (mg/l)	Kla (1/hr)	Kla (1/s)	Removal (%)	P/V liquid	P/V gas	P/V total	
0.4 มม. 19 จู เติม ตัวกลาง พอลิสรีน 25 มม. 2.5%	240	25	1000.64	3.19672762	487.6	1.56	14.22	6.93	8.50	2.33	0.000648	51.27	0.1	27.8	27.9	
		50	1005.94	3.21	479.65	1.53	14.30	6.82	8.48	2.40	0.000666	52.32	0.6	27.8	28.4	
		75	1003.82	3.21	471.7	1.51	14.27	6.70	14.26	8.42	2.44	0.000678	53.01	1.8	27.8	29.6
		100	1003.29	3.21	424	1.35	14.26	6.03	14.26	8.10	2.76	0.000767	57.74	4.5	27.8	32.3
	480	25	1001.7	3.20	566.57	1.81	14.24	14.24	8.05	8.98	3.74	0.001040	43.44	0.1	69.5	69.6
		50	1003.29	3.21	552.79	1.77	14.26	14.26	7.86	8.91	3.91	0.001085	44.90	0.6	69.5	70.1
		75	1004.88	3.21	535.83	1.71	14.28	14.28	7.61	8.82	4.11	0.001141	46.68	1.8	69.5	71.3
		100	1001.7	3.20	544.31	1.74	14.24	14.24	7.74	8.85	3.99	0.001109	45.66	4.5	69.5	73.9
	720	25	1003.82	3.21	710.2	2.27	14.27	14.27	10.09	9.76	3.49	0.000968	29.25	0.1	125.1	125.2
		50	1004.88	3.21	694.83	2.22	14.28	14.28	9.87	9.69	3.71	0.001030	30.85	0.6	125.1	125.7
		75	1003.29	3.21	685.29	2.19	14.26	14.26	9.74	9.63	3.83	0.001063	31.70	1.8	125.1	126.9
		100	1002.76	3.20	682.11	2.18	14.25	14.25	9.69	9.61	3.87	0.001074	31.98	4.5	125.1	129.5
960	25	1003.29	3.21	822.03	2.63	14.26	14.26	11.68	10.29	2.72	0.000756	18.07	0.1	203.8	203.9	
	50	1002.76	3.20	807.72	2.58	14.25	14.25	11.48	10.22	2.95	0.000819	19.45	0.6	203.8	204.4	
	75	1006.47	3.22	798.71	2.55	14.30	14.30	11.35	10.20	3.15	0.000874	20.64	1.8	203.8	205.6	
	100	1005.41	3.21	789.17	2.52	14.29	14.29	11.21	10.15	3.29	0.000914	21.51	4.5	203.8	208.3	
1440	25	1003.82	3.21	862.84	2.76	14.27	14.27	12.26	10.48	3.12	0.000867	14.04	0.1	486.4	486.5	
	50	1004.88	3.21	855.95	2.73	14.28	14.28	12.16	10.45	3.30	0.000917	14.82	0.6	486.4	487.0	
	75	1003.29	3.21	837.4	2.68	14.26	14.26	11.90	10.36	3.71	0.001031	16.53	1.8	486.4	488.2	
	100	1002.76	3.20	829.98	2.65	14.25	14.25	11.79	10.32	3.88	0.001078	17.23	4.5	486.4	490.8	

หัวจ่าย (mm)	Fg (L/hr)	FL (L/hr)	VOCs in (ppm)	C in (mg/L)	VOCs out (ppm)	Cout (mg/L)	C*in (mg/L)	C*out (mg/L)	ΔCIn (mg/L)	Kla (1/hr)	Kla (1/s)	Removal (%)	P/V liquid	P/V gas	P/V total
0.4 มม.	240	25	1004.88	3.21	382.66	1.22	14.28	5.44	7.82	3.07	0.000854	61.92	0.1	27.8	27.9
		50	1001.7	3.20	380.01	1.21	14.24	5.40	7.79	3.08	0.000857	62.06	0.6	27.8	28.4
		75	1003.29	3.21	373.65	1.19	14.26	5.31	7.75	3.14	0.000872	62.76	1.8	27.8	29.6
		100	1002.76	3.20	371	1.19	14.25	5.27	7.73	3.16	0.000878	63.00	4.5	27.8	32.3
38 นิ้ว เติม ตัวกลาง พอลิสไตรีน	480	25	1003.82	3.21	442.55	1.41	14.27	6.29	8.23	5.27	0.001464	55.91	0.1	60.2	60.3
		50	1004.88	3.21	442.02	1.41	14.28	6.28	8.23	5.28	0.001468	56.01	0.6	60.2	60.8
		75	1003.29	3.21	439.9	1.41	14.26	6.25	8.21	5.30	0.001473	56.15	1.8	60.2	62.0
		100	1002.76	3.20	438.31	1.40	14.25	6.23	8.20	5.32	0.001478	56.29	4.5	60.2	64.7
25 มม. 2.5%	960	25	1005.41	3.21	568.16	1.82	14.29	8.07	9.01	5.62	0.001562	43.49	0.1	104.2	104.3
		50	1004.35	3.21	566.57	1.81	14.27	8.05	9.00	5.64	0.001567	43.59	0.6	104.2	104.8
		75	1000.64	3.20	569.22	1.82	14.22	8.09	8.99	5.56	0.001545	43.11	1.8	104.2	106.0
		100	1002.23	3.20	567.1	1.81	14.24	8.06	8.99	5.61	0.001559	43.42	4.5	104.2	108.7
2.5%	1440	25	1003.82	3.21	674.69	2.16	14.27	9.59	9.58	5.31	0.001474	32.79	0.1	148.2	148.3
		50	1004.88	3.21	678.93	2.17	14.28	9.65	9.61	5.24	0.001456	32.44	0.6	148.2	148.8
		75	1003.29	3.21	670.45	2.14	14.26	9.53	9.56	5.38	0.001495	33.17	1.8	148.2	150.0
		100	1002.76	3.20	674.69	2.16	14.25	9.59	9.58	5.29	0.001471	32.72	4.5	148.2	152.7
2.5%	1440	25	1001.7	3.20	784.4	2.51	14.24	11.15	10.11	4.98	0.001384	21.69	0.1	291.8	291.9
		50	1003.29	3.21	791.29	2.53	14.26	11.25	10.15	4.84	0.001345	21.13	0.6	291.8	292.4
		75	1001.7	3.20	782.81	2.50	14.24	11.12	10.10	5.02	0.001395	21.85	1.8	291.8	293.6
		100	1003.29	3.21	776.45	2.48	14.26	11.03	10.08	5.22	0.001449	22.61	4.5	291.8	296.3

ตารางที่ ข.17 ผลการทดลองในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย โดยใช้คอลัมน์แบบบรรจุตัวกลาง

ตัวกลาง (mm)	Fg (L/hr)	FL (L/hr)	VOCs in (ppm)	C in (mg/L)	VOCs out (ppm)	Cout (mg/L)	C*in (mg/L)	C*out (mg/L)	ΔC_{In} (mg/L)	Kla (1/hr)	Kla (1/s)	Removal (%)	P/V liquid	P/V gas	P/V total
ตัวกลาง พอลิสไตรีน ขนาด 50 มม.	240	25	1003.29	3.21	633.35	2.02	14.26	9.00	8.62	1.66	0.000461	36.87	0.7	3.3	4.0
		50	1002.76	3.20	565.51	1.81	14.25	8.04	6.57	2.57	0.000714	43.60	5.3	3.3	8.6
		75	1001.7	3.20	491.31	1.57	14.24	6.98	6.00	3.29	0.000913	50.95	16.6	3.3	19.9
	480	100	1003.29	3.21	438.84	1.40	14.26	6.24	5.55	3.93	0.001091	56.26	41.5	3.3	44.8
		25	1002.76	3.20	730.34	2.33	14.25	10.38	7.63	2.76	0.000766	27.17	0.7	7.9	8.6
		50	1003.82	3.21	663.03	2.12	14.27	9.42	7.23	3.64	0.001012	33.95	5.3	7.9	13.2
720	75	1004.88	3.21	618.51	1.98	14.28	8.79	6.94	4.30	0.001194	38.45	16.6	7.9	24.6	
	100	1003.29	3.21	576.11	1.84	14.26	8.19	6.65	4.97	0.001379	42.58	41.5	7.9	49.4	
	25	1004.88	3.21	788.64	2.52	14.28	11.21	7.97	3.15	0.000874	21.52	0.7	12.9	13.6	
	50	1001.7	3.20	702.25	2.24	14.24	9.98	7.46	4.65	0.001292	29.89	5.3	12.9	18.2	
	75	1003.29	3.21	672.57	2.15	14.26	9.56	7.29	5.26	0.001461	32.96	16.6	12.9	29.5	
	100	1002.76	3.20	606.32	1.94	14.25	8.62	6.85	6.70	0.001862	39.53	41.5	12.9	54.3	
960	25	1006.47	3.22	825.74	2.64	14.30	11.73	8.17	3.42	0.000949	17.96	0.7	19.8	20.5	
	50	1003.29	3.21	760.02	2.43	14.26	10.80	7.80	4.82	0.001338	24.25	5.3	19.8	25.1	
	75	1004.88	3.21	674.69	2.16	14.28	9.59	7.30	6.99	0.001941	32.86	16.6	19.8	36.4	
1440	100	1001.7	3.20	614.27	1.96	14.24	8.73	6.91	8.67	0.002408	38.68	41.5	19.8	61.3	
	25	1003.82	3.21	893.58	2.85	14.27	12.70	8.51	3.00	0.000834	10.98	0.7	37.6	38.3	
	50	1004.88	3.21	812.49	2.60	14.28	11.55	8.10	5.51	0.001530	19.15	5.3	37.6	42.9	
1440	75	1003.29	3.21	754.19	2.41	14.26	10.72	7.77	7.43	0.002064	24.83	16.6	37.6	54.2	
	100	1002.76	3.20	687.94	2.20	14.25	9.78	7.38	9.89	0.002747	31.40	41.5	37.6	79.1	

บรรณานุกรม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บรรณานุกรม

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2552. คู่มือจัดการกากสารเคมีอันตรายสูงเบนซีน. กรุงเทพฯ.
- ชัยบุตร ออกกะลา, 2553. กลศาสตร์ของไหล. นครปฐม. ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน.
- นพภาพร พานิช, วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์, วิจิตรา จงวิศาล, วรารุช เสือดี, และแสงสันต์ พานิช,, 2550. ตำราระบบบำบัดมลพิษทางอากาศ. กรุงเทพฯ.
- พัชรพร ประจักษ์สุต, 2551. อุทกพลศาสตร์และการถ่ายเทมวลสารของกระบวนการดูดซึมเมทานอลและเบนซีนในรูปฟองอากาศ. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล, 2557. หน่วยกระบวนการสำหรับวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ. สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ภาสกร วรรณวงษ์, 2558. การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยคอลัมน์แบบฟองอากาศร่วมกับการใช้ตัวกลางพลาสติก. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- วรารุช เสือดี, และจิรวรรณ จำปานิล,, 2555. แนวทางการจัดการสารอินทรีย์ระเหยง่าย. ระวัง. มาบตาพุดการพิมพ์.
- ศุภวรรณ ตันตยานนท์, 2532. ปีเตอร์เคมีเบนซีนและผลิตภัณฑ์จากเบนซีน.
- Aroonwilas, A., Tontiwachwuthikul, P. and Chakma, A. (2001). Effects of operating and design parameters on CO₂ absorption in columns with structured packings. Separation and Purification Technology, 24(3), 403-411.
- Bandyopadhyay, A. and Biswas, M. N. (2007). Modeling of SO₂ scrubbing in spray towers. Science of the total environment, 383(1-3), 25-40.
- Bhavaraju, S., Mashelkar, R. and Blanch, H. (1978). Bubble motion and mass transfer in non-Newtonian fluids: Part I. Single bubble in power law and Bingham fluids. AIChE Journal, 24(6), 1063-1070.
- Bouaifi, M., Hebrard, G., Bastoul, D. and Roustan, M. (2001). A comparative study of gas hold-up, bubble size, interfacial area and mass transfer coefficients in stirred gas-liquid reactors and bubble columns. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 40(2), 97-111.
- Calderbank, P. and Moo-Young, M. (1961). The continuous phase heat and mass-transfer properties of dispersions. chemical Engineering science, 16(1-2), 39-54.

- Danckwerts, P. (1970). Chemical methods of measuring interfacial area and mass transfer coefficients in two-fluid systems. *Brit. Chem. Eng.*, 15, 522-526.
- Frossling, N. (1938). Über die verdunstung fallender tropfen. *Gerlands Beitr. Geophys.*, 52, 170-216.
- García-Abuín, A., Gómez-Díaz, D., Losada, M. and Navaza, J. M. (2012). Bubble column gas-liquid interfacial area in a polymer+ surfactant+ water system. *Chemical engineering science*, 75, 334-341.
- Hadamard, J. (1911). Mouvement permanent lent d'une sphère liquid et visqueuse dans un liquide visqueux. *CR Hebd. Seances Acad. Sci. Paris*, 152, 1735-1738.
- Hebrard, G., Bastoul, D. and Roustan, M. (1996). Influence of the gas sparger on the hydrodynamic behavior of bubble-columns. *Chemical engineering research & design*, 74(3), 406-414.
- Hinze, J. (1955). Fundamentals of the hydrodynamic mechanism of splitting in dispersion processes. *AIChE Journal*, 1(3), 289-295.
- Hughmark, G. (1967). Holdup and mass transfer in bubble columns. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 6(2), 218-220.
- Kantarci, N., Borak, F. and Ülgen, K. O. (2005). Bubble column reactors. *Process biochemistry*, 40(7), 2263-2283.
- Luo, X., Lee, D., Lau, R., Yang, G. and Fan, L. S. (1999). Maximum stable bubble size and gas holdup in high-pressure slurry bubble columns. *AIChE journal*, 45(4), 665-680.
- Maldonado, J. G., Bastoul, D., Baig, S., Roustan, M. and Hébrard, G. (2008). Effect of solid characteristics on hydrodynamic and mass transfer in a fixed bed reactor operating in co-current gas-liquid up flow. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47(8), 1190-1200.
- Mena, P., Rocha, F., Teixeira, J. A., Séchet, P. and Cartellier, A. (2008). Measurement of gas phase characteristics using a monofibre optical probe in a three-phase flow. *Chemical Engineering Science*, 63(16), 4100-4115.
- Moustiri, S., Hebrard, G. and Roustan, M. (2002). Effect of a new high porosity packing on hydrodynamics of bubble columns. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 41(5), 419-426.

- Nič, M., Jiráť, J., Košata, B., Jenkins, A. andMcNaught, A. (2009). IUPAC compendium of chemical terminology. IUPAC, Research Triagle Park, NC.
- Onda, K., Takeuchi, H. andOkumoto, Y. (1968). Mass transfer coefficients between gas and liquid phases in packed columns. *Journal of chemical engineering of Japan*, 1(1), 56-62.
- Painmanakul, P., Loubière, K., Hébrard, G., Mietton-Peuchot, M. andRoustan, M. (2005). Effect of surfactants on liquid-side mass transfer coefficients. *Chemical Engineering Science*, 60(22), 6480-6491.
- Parmar, G. R. andRao, N. (2008). Emerging control technologies for volatile organic compounds. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 39(1), 41-78.
- Perry, R. andDW, G. (2007). *Perry's chemical engineers' handbook*, 8th illustrated ed. In: New York: McGraw-Hill.
- Pingxiang zhongying packing. (2010). Product catalog. In L. Pingxiang zhongying packing CO. (Ed.). Jiangxi,china.
- Pisut painmanakul, 2014. *Unit processes for Environmental Engineering*.Bangkok. Chulalongkorn University press. 487-530
- Richards, J., 2000. *Control of Gaseous Emissions: Student Manual: Apti Course* 415.North Carolina State University.
- Roustan, M. (2003). Transferts gaz-liquide dans les procédés de traitement des eaux et des effluents gazeux.
- Sander, R. (2015). Compilation of Henry's law constants (version 4.0) for water as solvent. *Atmos. Chem. Phys*, 15(8), 4399-4981.
- Sardeing, R., Painmanakul, P. andHébrard, 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.
- Seader, J. andHenley, E. (2006). *Separation process principles*. 2006, Hoboken. In (2 ed.): NJ: Wiley. xxxiv.
- Seader, J. D., Henley, E. J. andRoper, D. K., 2010. *Separation process principles*.Wiley New York.

- Senol, A. (2001). Mass transfer efficiency of randomly-packed column: modeling considerations. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 40(1), 41-48.
- Shimizu, K., Takada, S., Minekawa, K. and Kawase, Y. (2000). Phenomenological model for bubble column reactors: prediction of gas hold-ups and volumetric mass transfer coefficients. *Chemical engineering journal*, 78(1), 21-28.
- Stenstrom, M. K., Leu, S.-Y. B. and Jiang, P. (2006). Theory to practice: Oxygen transfer and the new ASCE standard. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2006(7), 4838-4852.
- Strigle Jr, R. F., 1994. *Packed tower design and applications*. Gulf Pub. Co.
- TUNG, H.-H. and MAH, R. S. (1985). Modeling liquid mass transfer in HIGEE separation process. *Chemical Engineering Communications*, 39(1-6), 147-153.
- Wang, Z., Yang, T., Liu, Z., Wang, S., Gao, Y. and Wu, M. (2019). Mass Transfer in a Rotating Packed Bed: A Critical Review. *CHEMICAL ENGINEERING AND PROCESSING-PROCESS INTENSIFICATION*, 139, 78-94.
- Wongwailikhit, k. (2018). *Study of gas-liquid mass transfer in bubble and spray column adding solid media*. Chulalongkorn University.
- Yagi, S. and Inoue, H. (1962). The absorption of oxygen into sodium sulphite solution. *Chemical Engineering Science*, 17(6), 411-421.
- Yang, K., Chu, G., Zou, H., Sun, B., Shao, L. and Chen, J.-F. (2011). Determination of the effective interfacial area in rotating packed bed. *Chemical engineering journal*, 168(3), 1377-1382.
- Akita, K. and Yoshida, F. (1973). Gas holdup and volumetric mass transfer coefficient in bubble columns. Effects of liquid properties. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 12(1), 76-80.
- Cohen, Y. and Metzner, A. (1981). Wall effects in laminar flow of fluids through packed beds. *AIChE journal*, 27(5), 705-715.

- Higbie, R. (1935). The rate of absorption of a pure gas into a still liquid during short periods of exposure. *Trans. AIChE*, 31, 365-389.
- Kumar, A., Degaleesan, T., Laddha, G. and Hoelscher, H. (1976). Bubble swarm characteristics in bubble columns. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 54(5), 503-508.
- Lindner, D., Werner, M. and Schumpe, A. (1988). Hydrogen transfer in slurries of carbon supported catalyst (HPO process). *AIChE journal*, 34(10), 1691-1697.
- Longo, S. (2006). The effects of air bubbles on ultrasound velocity measurements. *Experiments in fluids*, 41(4), 593-602.
- Luo, Y., Luo, J.-Z., Chu, G.-W., Zhao, Z.-Q., Arowo, M. and Chen, J.-F. (2017). Investigation of effective interfacial area in a rotating packed bed with structured stainless steel wire mesh packing. *Chemical engineering science*, 170, 347-354.
- Roberts, P. V., Hopkins, G. D., Munz, C. and Riojas, A. H. (1985). Evaluating two-resistance models for air stripping of volatile organic contaminants in a countercurrent, packed column. *Environmental science & technology*, 19(2), 164-173.
- Roustan, M. (2003). *Transferts gaz-liquide dans les procédés de traitement des eaux et des effluents gazeux*.
- Wongwailikhit, k. (2018). *Study of gas-liquid mass transfer in bubble and spray column adding solid media*. Chulalongkorn University.
- Yang, G., Du, B. and Fan, L. (2007). Bubble formation and dynamics in gas-liquid-solid fluidization—A review. *Chemical engineering science*, 62(1-2), 2-27.
- Yang, N. S., Chen, B. H. and McMillan, A. F. (1986). Axial mixing and mass transfer in gas-liquid Karr columns. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 25(3), 776-780.

Zhang, W., Xie, P., Li, Y., Teng, L. and Zhu, J. (2020). Hydrodynamic characteristics and mass transfer performance of rotating packed bed for CO₂ removal by chemical absorption: A review. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 103373.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นวพัฒน์ เตชะธางกูร
วัน เดือน ปี เกิด	11 พฤศจิกายน 2537
สถานที่เกิด	ระยอง
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยรังสิต
ที่อยู่ปัจจุบัน	63 หมู่ที่ 6 ตำบลวังหว่า อำเภอแกลง จังหวัดระยอง 21110



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY