

อุทกพลศาสตร์และการถ่ายเทมวลสารของกระบวนการควบคู่ซึมเมทานอลและเบนซีนในรูปฟองอากาศ

นางสาวพัชรพร ประจักษ์สูตร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

HYDRODYNAMIC AND MASS TRANSFER OF METHANOL AND BENZENE ABSORPTION PROCESS
IN FORM OF BUBBLE

Miss Patcharaporn PrajaKsoot

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering
Department of Environmental Engineering
Faculty of Engineering
ChulalongKorn University
Academic Year 2008
Copyright of ChulalongKorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

อุทกพลศาสตร์และการถ่ายเทมวลสารของกระบวนการดูดซึม

เมทานอลและเบนซีนในรูปฟองอากาศ

โดย

นางสาว พัชรพร ประจักษ์สุต

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

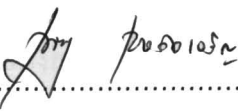
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

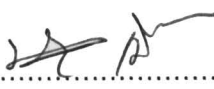
อาจารย์ ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล

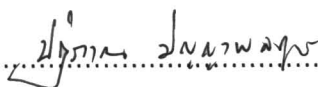
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ


 คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

 ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)

 อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล)

 กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ปฐิภาณ ปัญญาพลกุล)



 กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ศรายุทธ ราชู)

พัชรพร ประจักษ์สูตร : อุทกพลศาสตร์และการถ่ายเทมวลสารของกระบวนการดูดซึมเมทานอลและเบนซีนในรูปฟองอากาศ. (HYDRODYNAMIC AND MASS TRANSFER OF METHANOL AND BENZENE ABSORPTION PROCESS IN FORM BUBBLE)

อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อ. ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล, 201 หน้า.

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือศึกษากระบวนการดูดซึมสารอินทรีย์ระเหยชนิดที่ละลายน้ำได้มากและน้อยในตัวแปรการถ่ายเทมวลสารและอุทกศาสตร์ของฟองอากาศที่สัมพันธ์กับประสิทธิภาพการบำบัด ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศขนาดเล็ก โดยมีเมทานอลและเบนซีนเป็นตัวแทนของสารอินทรีย์ระเหยที่ละลายน้ำได้มากและน้อย ตามลำดับ น้ำประปาและสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบที่ความเข้มข้น 0.2 0.6 และ 1 ซีเอ็มซี เป็นของเหลวที่ใช้เป็นสารดูดซึมภายในถังปฏิกรณ์ใช้อุปกรณ์เติมอากาศประเภทรูเติมอากาศแบบแข็งช่องเปิดเดี่ยวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน 4 ค่าคือ 0.65 1.25 2.50 และ 4.50 มิลลิเมตรในการสร้างฟองก๊าซ ในการนี้ อุปกรณ์ก๊าซโครมาโทกราฟีและระบบวิเคราะห์ถ่ายภาพความเร็วสูงได้ถูกประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของเฟสก๊าซที่เข้าและออกจากระบบ รวมไปถึงตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ ตามลำดับ

จากผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซเมทานอลมีค่าสูง (ร้อยละ 86.53 - 97.96) ในกรณีของเบนซีนมีค่าต่ำ (ร้อยละ 5.57 - 8.50) และขนาดของรูเติมอากาศไม่ได้มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยทั้งสองชนิด จากการวิเคราะห์ตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองก๊าซทำให้สามารถเลือกอัตราการไหลของก๊าซที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่สูงและไม่เกิดผลเสียจากความปั่นป่วนซึ่งทำให้เกิดการหลุดออกของก๊าซซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยลดลง จากการวิเคราะห์ตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสารพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารโดยรวม ($K_L a$ และ $K_G a$) สัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (a) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยในเฟสก๊าซและของเหลว (K_G และ K_L) ซึ่งสอดคล้องกับเฟสที่ควบคุมการถ่ายเทมวลสารสำหรับกรณีเมทานอลและเบนซีน ตามลำดับ โดยในกรณีที่มีสารลดแรงตึงผิวในสารดูดซึมพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ $K_G a$ ค่าเพิ่มขึ้นในกรณีเมทานอล ในขณะที่ค่า $K_L a$ ลดลงในกรณีเบนซีนเมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวสูงขึ้น โดยประสิทธิภาพการบำบัดสารเบนซีนที่เพิ่มสูงขึ้นในการทดลองนี้กล่าวได้ว่าผลดีจากการเพิ่มสูงขึ้นของค่าความแตกต่างความเข้มข้น (ΔC) ในสมการการถ่ายเทมวลสาร ($\frac{dC_L}{dt} = k_L a (C_L^s - C_L)$) มีสัดส่วนที่สูงกว่าผลเสียจากการลดลงของค่า $K_L a$ ทั้งนี้ค่า K_G แปรผันตรงกับค่า a สำหรับเมทานอล แต่ค่า K_L และค่า a มีลักษณะหักล้างซึ่งกันและกันสำหรับเบนซีน

ภาควิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา.....2551.....

4970463321 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORDS: VOLATILE ORGANIC COMPOUND / ABSORPTION / HYDRODYNAMIC / MASS TRANSFER / BUBBLE COLUMN / SPACIFIC INTERFACIAL AREA

PATCHARAPORN PRAJAKSOOT : HYDRODYNAMIC AND MASS TRANSFER OF METHANOL AND BENZENE ABSORPTION PROCESS IN FORM OF BUBBLE. ADVISOR : PISUT PAINMANAKUL , Ph.D., 201 pp.

The objective of this research is to study the absorption process of hydrophilic and hydrophobic Volatile Organic Compounds (VOCs) in terms of treatment efficiency, bubble hydrodynamic and mass transfer parameters. The experiments were carried out in a small bubble column. Methanol and Benzene were used as the hydrophilic and hydrophobic VOCs, respectively. Moreover, Tap water and aqueous solutions with anionic surfactants at different concentrations (0.2 0.6 and 1 CMC) were used as absorbent. The VOCs bubbles were generated by using four types of single rigid orifices (0.65 1.25 2.50 and 4.50 mm in diameter). Note that, the GC-FID and Image treatment program were used in order to measure the inlet and outlet VOCs gas concentration and also the bubble hydrodynamic parameters.

This study has shown that, in case of tap water used as absorbent, the treatment efficiencies obtained with methanol (86.53-97.96%) are greater than those obtained with benzene (5.57-8.50%). The insignificant effects of different orifices were observed in this study. Moreover, due to the determination of bubble hydrodynamic parameters can be applied for selecting the suitable gas flow rate: high treatment efficiency and low desorption or stripping phenomena can be thus obtained. For the mass transfer parameters, the overall mass transfer coefficient in gas and liquid phases ($K_G a$ and $K_L a$) were determined due to the phase for controlling the mass transfer mechanism obtained with methanol and benzene, respectively. In presence of surfactants, the $K_G a$ coefficients increase, whereas the $K_L a$ values obtained with benzene absorption decrease: note that, the augmentation of benzene treatment efficiency were based on the positive effect on concentration gradient (ΔC) as shown in the mass transfer rate equation ($\frac{dC_L}{dt} = k_L a (C_L^s - C_L)$). Moreover, by applying the dissociation method, the K_G coefficient increase with a values, however the K_L and a values compensate each other for a given gas flow rate.

Department :Environmental Engineering..... Student's Signature..... *Patcharaj Prajaksoot*.....

Field of Study :Environmental Engineering..... Advisor's Signature..... *Pisut Painmanakul*.....

Academic Year :2008.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำการวิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อ อาจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สำหรับการให้คำแนะนำ และการดูแลเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา รวมทั้ง กรุณาตรวจสอบเนื้อหาวิทยานิพนธ์เพื่อให้ได้วิทยานิพนธ์ที่มีความสมบูรณ์ ตลอดจน รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เขาวงกัจเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล และ ดร.ศรายุทธ ราชู กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น และ ตรวจสอบเนื้อหาวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณครอบครัวของข้าพเจ้า บิดามารดา ญาติพี่น้องและ เพื่อนๆ ซึ่งคอยเป็นกำลังใจ และสนับสนุนผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 สารอินทรีย์ระเหย.....	5
2.2 การถ่ายเทมวลสาร.....	10
2.3 กระบวนการดูดซึม.....	14
2.4 ตัวแปรการถ่ายเทมวลสารในกระบวนการดูดซึม.....	18
2.5 ตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองก๊าซ.....	24
2.6 สารลดแรงตึงผิว.....	28
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	41
3.1 การเตรียมอุปกรณ์.....	41
3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	43
3.3 ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย.....	46
3.4 ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย.....	47
3.5 การคำนวณหาค่าตัวแปรการถ่ายเทมวลสาร.....	48
3.6 วิธีการหาค่าอุทกพลศาสตร์.....	50
3.7 วิธีการทดลอง.....	53

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	98
4.1 ผลการศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของอากาศ (ความเข้มข้น ของสารอินทรีย์ระเหยที่เข้าระบบ)	68
4.2 ผลการทดลองการศึกษาผลกระทบของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง รูเดิมอากาศชนิดแข็ง 4 ชนิด ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย และตัวแปรในด้านการถ่ายเทมวลสารและด้านอุทกพลศาสตร์	86
4.3 ผลการทดลองการศึกษาผลกระทบของความสามารถในการละลาย น้ำของสารอินทรีย์ระเหยทั้ง 2 ชนิด คือ ชนิดที่สามารถละลายน้ำได้มาก (เมทานอล) และชนิดที่ละลายน้ำได้น้อย (เบนซีน) ต่อประสิทธิภาพการบำบัด สารอินทรีย์ระเหยรวมทั้งตัวแปรในด้านการถ่ายเทมวลสารและด้าน อุทกพลศาสตร์	104
4.4 การศึกษาผลกระทบจากการปนเปื้อนของสารละลายสารลดแรงตึงผิว ชนิดประจุลบในการดูดซึมของสารอินทรีย์ระเหยทั้งสองชนิด คือ ชนิด ละลายน้ำมาก (เมทานอล) และชนิดที่ละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย ตัวแปรในด้านการถ่ายเท มวลสารและด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ	125
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	154
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	154
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต.....	158
เอกสารอ้างอิง.....	159
ภาคผนวก	162
ภาคผนวก ก.....	163
ภาคผนวก ข.....	164
ภาคผนวก ค.....	165
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	201

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ความสามารถในการละลายน้ำของสารอินทรีย์ระเหย ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....6
2.2	เทคโนโลยีที่ใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย8
2.3	ความสามารถในการแพร่ของสารละลาย A ในสารละลาย B ที่ความเข้มข้นต่ำ.....15
2.4	โมเดลทางคณิตศาสตร์คำนวณขนาดฟองอากาศ25
2.5	โมเดลทางคณิตศาสตร์คำนวณความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ26
3.1	ตารางสรุปตัวแปรทั้งหมดของการทดลอง54
3.2	ตัวแปรสำหรับการทดลองในการศึกษาถึงผลกระทบของอัตราการไหลที่ต่างกัน และความเข้มข้นที่ต่างกัน..... 58
3.3	ตัวแปรสำหรับการทดลองในการศึกษาถึงผลกระทบของชนิดรูเดิมอากาศทั้ง 4 ชนิด61
3.4	ตัวแปรสำหรับการทดลองในการศึกษาถึงผลกระทบของชนิดของสารอินทรีย์ ระเหยทั้ง 2 ชนิด ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย64
3.5	ตัวแปรสำหรับการทดลองในการศึกษาถึงผลกระทบของตัวดูดซึมของสารละลาย ของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ67
4.1	ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยประเภทเมทานอลที่เข้าระบบบำบัด70
4.2	ค่าตัวแปรที่ศึกษาจากการทดลองผลกระทบของอัตราการไหลของอากาศ (ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยที่เข้าระบบ) ต่อประสิทธิภาพการบำบัด สารอินทรีย์ระเหย85
4.3	ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยประเภทเมทานอลในน้ำประปา ที่มีขนาดรูเดิมอากาศแตกต่างกันและที่อัตราการไหลของก๊าซแตกต่างกัน91
4.4	ค่าตัวแปรที่ศึกษาจากการทดลองการศึกษาผลกระทบของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ของรูเดิมอากาศชนิดเชิงรูเดียวที่มีขนาดแตกต่างกัน 4 ชนิด ต่อประสิทธิภาพ การบำบัดสารอินทรีย์ระเหย102
4.5	ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยประเภทเบนซีนที่เข้าระบบบำบัดที่อัตรา การไหลของก๊าซที่แตกต่างกัน105
4.6	เวลาที่อิ่มตัวของความเข้มข้นที่อิ่มตัวในเฟสของเหลวที่อัตราการไหลของก๊าซ ที่แตกต่างกัน110

ตารางที่	หน้า
4.7	ค่าตัวแปรที่ศึกษาจากการทดลองการศึกษาผลกระทบของความสามารถในการละลายน้ำของสารอินทรีย์ระเหยทั้ง 2 ชนิด คือ ชนิดที่สามารถละลายน้ำได้มากและชนิดที่ละลายน้ำได้น้อย ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย123
4.8	เวลาที่อิ่มตัวและค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหย (เบนซีน) ที่อิ่มตัวในเฟสของเหลวที่อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที134
4.9	คุณสมบัติของตัวดูดซึมที่ใช้ในการทดลองนี้137
4.10	ค่าตัวแปรที่ศึกษาจากการทดลองการศึกษาผลกระทบของสารอินทรีย์ระเหยทั้งสองชนิด คือ ชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ที่ความเข้มข้นที่เฟสของเหลวที่แตกต่างกัน151
4.11	ค่าตัวแปรที่ศึกษาจากการทดลองการศึกษาผลกระทบของสารอินทรีย์ระเหยทั้งสองชนิด คือ ชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ที่ความเข้มข้นที่เฟสของเหลวที่แตกต่างกัน152
5.1	สรุปผลการทดลองทั้งหมดในกรณีสารอินทรีย์ชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล)156
5.2	สรุปผลการทดลองทั้งหมดในกรณีสารอินทรีย์ชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน)157
ค.1	ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 มิลลิลิตรต่อวินาที166
ค.2	ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.65 มิลลิลิตรต่อวินาที166
ค.3	ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 1.20 มิลลิลิตรต่อวินาที167
ค.4	ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 2.00 มิลลิลิตรต่อวินาที167
ค.5	ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที168
ค.6	ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 1.25) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 มิลลิลิตรต่อวินาที168
ค.7	ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 1.25) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.65 มิลลิลิตรต่อวินาที169
ค.8	ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 1.25) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 1.20 มิลลิลิตรต่อวินาที169
ค.9	ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 1.25) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 2.00 มิลลิลิตรต่อวินาที170

ตารางที่	หน้า
ก.70 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในตัวดูดซึม SDS 1 CMC (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที	200

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี	9
2.2 หอสเปร์ย์	16
2.3 หอบรรจุเบด	17
2.4 หอฟองก๊าซ	17
2.5 ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลซึ่งเป็นไปตามกฎของเฮนรี	19
2.6 ความเข้มข้นที่ผิวระหว่างเฟสโดยใช้ทฤษฎีสองความต้านทาน	20
2.7 แรงขับเคลื่อนในการถ่ายเทมวล สำหรับทฤษฎีสองความต้านทาน	21
2.8 ลักษณะของสารลดแรงตึงผิว	28
2.9 กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและการรวมตัวของสารลดแรงตึงผิว	30
2.10 การดูดซับสารอินทรีย์ของสารลดแรงตึงผิวที่มีการจัดเรียงตัวต่างกัน	30
2.11 ความสามารถของสารลดแรงตึงผิวในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหย	31
2.12 อุปกรณ์สร้างฟองอากาศชนิดแอโรโอเจคเตอร์	32
2.13 ถึงปฏิบัติการแบบฟองอากาศ	33
2.14 การสัมผัสระหว่างเฟสก๊าซและเฟสของเหลวของแอโรโอเจคเตอร์	34
2.15 ถึงปฏิบัติการทดลองสไตรีนและออกซิเจนในอิมัลชัน	35
2.16 ถึงปฏิบัติการแบบกึ่งที่ละเท	36
2.17 อุปกรณ์เติมอากาศแบบยืดหยุ่น โดยให้กำเนิดฟองแบบรูเดี่ยว	37
2.18 แบบจำลองการคำนวณการถ่ายเทมวล โดยใช้นิพจน์ของฟองก๊าซ	38
2.19 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองขนาดเล็ก	39
2.20 การบำบัดในระดับอุตสาหกรรม	39
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	42
3.2 เครื่องมือก๊าซโครมาโทกราฟีที่ใช้งานวิจัยนี้	44
3.3 คอลัมน์คาปิลารีของบริษัทแควเรียนท์	44
3.4 ลักษณะการไหลของก๊าซในก๊าซโครมาโทกราฟี	45
3.5 กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง (100 รูป/วินาที)	45
3.6 โปรแกรมวัดขนาดฟองก๊าซ	45
3.7 รูเติมอากาศทั้ง 4 ชนิดที่ใช้ในการทดลองนี้	46
3.8 ค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยในเฟสของเหลวที่เวลาต่างๆ	48

รูปที่	หน้า
3.9	รูปแบบของฟองอากาศจากกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง51
3.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของฟองและความเร็ว ในการลอยตัวของฟอง52
3.11	ขั้นตอนการทดลองทั้งหมดในงานวิจัยนี้53
3.12	ขั้นตอนการหาค่าจากตัวแปรตามที่ใช้ในการทดลอง55
3.13	ขั้นตอนการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราการใช้และความเข้มข้น ของสารอินทรีย์ระเหยต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย57
3.14	ขั้นตอนการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดรูเดิมอากาศทั้ง 4 ชนิด ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย60
3.15	ขั้นตอนการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของชนิดของสารอินทรีย์ ระเหยทั้ง 2 ชนิด ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย63
3.16	ขั้นตอนการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของตัวดูดซึมของสารละลาย ของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ66
4.1	ความเข้มข้นในเฟสก๊าซของสารอินทรีย์ระเหยประเภทเมทานอลที่ออกจากถัง ปฏิกริยาแบบฟองอากาศที่เวลาต่างๆ69
4.2	ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยประเภทเมทานอลในตัวดูดซึมชนิดน้ำประปา ที่เวลาบำบัดต่างๆ72
4.3	ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย (เมทานอล) ที่อัตราการใช้ ของก๊าซต่างๆ73
4.4	ลักษณะการไหลของฟองอากาศที่อัตราการใช้ต่ำๆ ในถังปฏิกรณ์ แบบฟองอากาศ.....75
4.5	ลักษณะการไหลของฟองอากาศที่อัตราการใช้สูงๆ (Eddy) ในถังปฏิกรณ์ แบบฟองอากาศ75
4.6	สัมพันธ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสก๊าซ (KGa) ที่อัตราการใช้ ของก๊าซที่แตกต่างกัน76
4.7	ขนาดของฟองอากาศที่อัตราการใช้ของก๊าซที่แตกต่างกัน78
4.8	ฟองอากาศรูปทรงกลมที่อัตราการใช้ของก๊าซมีค่าต่ำ79
4.9	ฟองอากาศรูปกลมรี ที่อัตราการใช้ของก๊าซมีค่าสูง79
4.10	ความถี่ในการเกิดฟองที่อัตราการใช้ของก๊าซที่แตกต่างกัน80
4.11	ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศที่อัตราการใช้ของก๊าซที่แตกต่างกัน81

รูปที่	หน้า
4.12	พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสารที่อัตราการไหลของก๊าซแตกต่างกัน82
4.13	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย (KG) ที่อัตราการไหลของก๊าซต่างๆ84
4.14	ความเข้มข้นในเฟสก๊าซของเมทานอลที่ออกจากระบบ โดยศึกษาผลกระทบ จากอุปกรณ์เติมอากาศที่มีรูเติมอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 ชนิด87
4.15	แสดงความเข้มข้นของเฟสก๊าซที่ออกจากระบบในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ โดยสารอินทรีย์ชนิดละลายน้ำน้อย (โทลูอิน)87
4.16	ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยชนิดเมทานอลในเฟสของเหลว (น้ำประปา) โดยใช้อุปกรณ์เติมอากาศที่มีรูเติมอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 ชนิด88
4.17	ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยเมทานอลในน้ำประปา ที่สอดคล้องกับอุปกรณ์เติมอากาศ 4 ชนิด90
4.18	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสก๊าซที่อัตราการไหล ของก๊าซที่แตกต่างกัน ที่สอดคล้องกับอุปกรณ์เติมอากาศ 4 ชนิด92
4.19	ขนาดของฟองอากาศที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกัน ที่สอดคล้องกับอุปกรณ์เติมอากาศ 4 ชนิด94
4.20	ลักษณะการไหลของฟองอากาศที่อัตราการไหลต่างๆ ในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ95
4.21	ลักษณะการไหลของฟองอากาศที่อัตราการไหลสูง ในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ95
4.22	ความถี่ในการลอยตัวของฟองอากาศที่อัตราการไหลต่างๆ ที่สอดคล้องกับอุปกรณ์เติมอากาศ 4 ชนิด96
4.23	ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกัน ที่สอดคล้องกับอุปกรณ์เติมอากาศ 4 ชนิด97
4.24	พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสารที่อัตราการไหลของก๊าซแตกต่างกัน ที่สอดคล้องกับอุปกรณ์เติมอากาศ 4 ชนิด99
4.25	ประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารย่อยในเฟสก๊าซ (KG) ที่อัตราการไหลของก๊าซต่างๆ ที่สอดคล้องกับอุปกรณ์เติมอากาศ 4 ชนิด100
4.26	แสดงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยชนิดเบนซีนในเฟสของก๊าซในน้ำประปา105
4.27	แสดงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยชนิดเบนซีนในเฟสของ ของเหลว (น้ำประปา)106
4.28	ความสามารถในการละลายของสารละลายในตัวดูดซึมความเข้มข้นที่อิ่มตัว ในเฟสของเหลวที่เท่ากัน108

รูปที่	หน้า
4.29 ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยทั้ง 2 ชนิด คือ เมทานอลและเบนซีนใน น้ำประปา ที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่าง โดยอุปกรณ์เดิมอากาศ 4 ชนิด.....	112
4.30 ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย(เบนซีน)ในน้ำประปา ที่เวลาในการบำบัดที่แตกต่างกัน โดยใช้ขนาดของรูเดิมอากาศขนาด 0.65 มล.	113
4.31 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสของเหลว (KLa) ของสารอินทรีย์ระเหย (เบนซีน) ที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่าง	114
4.32 ขนาดของฟองอากาศของสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน)ที่อัตรา การไหลของก๊าซที่แตกต่างกัน ที่ขนาดรูเดิมอากาศแบบเชิงรูเดียว (OR0.65 OR1.25 OR2.50 และ OR4.50)	115
4.33 ฟองของสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล)	116
4.34 ฟองของสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน)	116
4.35 ความถี่ในการลอยตัวของฟองอากาศของสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน)ที่อัตราการไหลต่างๆ ที่สอดคล้องกับอุปกรณ์เดิมอากาศ 4 ชนิด	117
4.36 ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศของสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่าง ที่สอดคล้องกับอุปกรณ์เดิมอากาศ 4 ชนิด	118
4.37 พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสารของสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลาย น้ำน้อย (เบนซีน) ที่อัตราการไหลของก๊าซแตกต่างกัน ที่สอดคล้องกับอุปกรณ์ เดิมอากาศ 4 ชนิด	119
4.38 ประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารย่อยในเฟสก๊าซและของเหลว ที่อัตราการไหลของ ก๊าซต่างๆ ที่ขนาดรูเดิมอากาศแบบเชิงที่มีขนาดแตกต่างกัน	121
4.39 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยชนิดเมทานอลที่ออกจากระบบในตัวดูดซึม ที่แตกต่างกัน คือ น้ำประปา สารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้น 0.2 CMC 0.6 CMC และ 1 CMC	126
4.40 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยชนิดเบนซีนที่ออกจากระบบในตัวดูดซึมที่ ต่างกัน คือ น้ำประปา สารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้น 0.2 CMC 0.6 CMC และ 1 CMC	127
4.41 ความเข้มข้นของเฟสก๊าซที่ออกจากระบบที่อัตราการไหลของก๊าซ 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที ในตัวดูดซึมที่มีความเข้มข้นที่ต่างกัน คือ น้ำประปา สารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้น 0.2 CMC และ 1 CMC 0.6 CMC	128

รูปที่	หน้า
4.42 ความเข้มข้นของเฟสก๊าซที่ออกจากระบบในงานวิจัยของ (Lalane และคณะ, 2008) ในการดูดซึมของ VOCs ที่ความเข้มข้นของตัวดูดซึมที่แตกต่างกัน	129
4.43 แสดงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยชนิดเมทานอล ในตัวดูดซึมที่มีความเข้มข้นที่ต่างกัน คือ น้ำประปา สารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่มีความเข้มข้น 0.2 CMC 0.6 CMC 1 CMC	130
4.44 แสดงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยชนิดเบนซีน ในตัวดูดซึมที่มีความเข้มข้นที่ต่างกัน คือ น้ำประปา สารละลายของสารลดแรงตึงผิวความเข้มข้น 0.2 CM C 0.6 CMC และ 1 CMC	131
4.45 แสดงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยชนิดเมทานอล ที่อัตราการไหลของก๊าซ 3.50 มล./วินาที ในตัวดูดซึมที่มีความเข้มข้นที่ต่างกัน คือ น้ำประปา สารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่มีความเข้มข้น 0.2 CMC 0.6 CMC และ 1 CMC	132
4.46 แสดงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อยในเฟสของเหลว ที่มีตัวดูดซึมที่แตกต่างกัน	133
4.47 ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) และชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ที่อัตราการไหลของก๊าซและสารดูดซึมที่แตกต่างกัน	135
4.48 แสดงการดูดซึมสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ความเข้มข้น 0.6 CMC	139
4.49 แสดงการดูดซึมสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ความเข้มข้น 1 CMC	139
4.50 แสดงสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทมวลสารรวมทั้งเฟสก๊าซ (KGa) และเฟสของเหลว (KLa) ที่อัตราการไหลของก๊าซและชนิดของสารดูดซึมที่แตกต่างกัน	140
4.51 ขนาดของฟองอากาศของสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) และชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ที่อัตราการไหลของก๊าซและสารดูดซึมที่แตกต่างกัน	142
4.52 ความถี่ในการเกิดฟองของสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) และชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ที่อัตราการไหลของก๊าซและสารดูดซึมที่แตกต่างกัน	144
4.53 ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศของสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) และชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ที่อัตราการไหลของก๊าซและสารดูดซึมที่แตกต่างกัน	145

รูปที่	หน้า
4.54	พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสารของสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลาย น้ำน้อย (เบนซีน) และชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ที่อัตราการไหลของก๊าซ และสารดูดซับที่แตกต่างกัน146
4.55	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยของสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) และชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ที่อัตราการไหลของก๊าซและสารดูดซับ ที่แตกต่างกัน148
ข.1	พื้นที่ได้กราฟความเข้มข้นของเมทานอล วัดโดยเครื่องมือ ก๊าซโครมาโทกราฟี.....164
ข.2	พื้นที่ได้กราฟความเข้มข้นของเบนซีน วัดโดยเครื่องมือ ก๊าซโครมาโทกราฟี.....164

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สารอินทรีย์ระเหย (Volatile Organic Compounds: VOCs) เป็นสารประกอบเคมีที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก โดยสามารถระเหยได้ง่ายที่อุณหภูมิห้องและมีมากมายหลายกลุ่ม เช่น aliphatic, aromatic, chlorinated hydrocarbons, aldehydes, Ketones, esters, ethers, acid และ alcohols เป็นต้น ซึ่งสารอินทรีย์ระเหยเหล่านี้มักจะมีที่มาจากแหล่งกำเนิดต่างๆ กัน ทั้งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและเกิดขึ้นจากกิจกรรมต่างๆ ในชีวิตประจำวันของมนุษย์ เช่น การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับยานพาหนะ การระเหยของน้ำมันเชื้อเพลิงจากสถานบริการน้ำมัน การกำจัดกากของเสีย การใช้ผลิตภัณฑ์ตามอาคารบ้านเรือน ตลอดจนการใช้สารทำลายในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง เช่น อุตสาหกรรมพลาสติก สี ฟอกย้อม สิ่งทอ เทปกาวยานพิมพ์บรรจุภัณฑ์

เนื่องจากสารอินทรีย์ระเหยเป็นสารเคมีที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ตั้งแต่ก่อให้เกิดความรำคาญจนถึงทำให้เกิดโรคหรือเสียชีวิตได้อีกทั้งสารอินทรีย์ระเหยหลายชนิดเป็นสารก่อมะเร็ง เช่น สารเบนซีน สารไดคลอโรเอทิลีน สารคลอโรฟอร์ม สารเอมที่บีอี สารไวนิลคลอไรด์ เป็นต้น ซึ่งจากการศึกษาของหน่วยงานต่างๆ พบว่า มีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ระเหยในหลายพื้นที่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเขตเมือง ดังนั้นการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยออกจากอากาศก่อนที่จะปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง

ในปัจจุบัน กระบวนการที่ใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยมีหลากหลายกระบวนการด้วยกัน ตัวอย่างเช่น กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ กระบวนการออกซิเดชัน กระบวนการดูดซับ และกระบวนการดูดซึม เป็นต้น ซึ่งกระบวนการหนึ่งที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายก็คือ “กระบวนการดูดซึม” (Absorption process) ซึ่งสามารถทำงานด้วยรูปแบบต่างๆ เช่น หอสปเรย์ (Spray tower) หอแบบถาด (Tray tower) การใช้ตัวกลาง (Packed bed) เป็นต้น โดยกลไกหลักของกระบวนการดูดซึมก็คือ การถ่ายเทมวลสารของสารอินทรีย์ระเหยจากเฟสก๊าซไปสู่เฟสของเหลว โดยวิธีการนี้สามารถใช้ได้ผลถ้าสามารถเลือกใช้ของเหลวทำละลาย (Solvent) ใดๆ ที่สามารถละลายสารที่ต้องการกำจัดออกจากก๊าซได้มากกว่าสารตัวอื่นที่เข้าในระบบบำบัดพร้อมกัน ดังนั้นคุณสมบัติต่างๆ ของสารตัวทำละลาย เช่น ความสามารถในการละลาย (Solubility) ความสามารถในการกลายเป็นไอ (Volatility) ความสามารถในการกัดกร่อน (Corrosiveness) และค่าความหนืดจำเพาะ (Viscosity) จึงเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบบำบัดอย่าง

หลีกเลี่ยงไม่ได้ นอกจากนี้ประเด็นเรื่องราคาของสารตัวทำละลายก็จัดเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อการเลือกใช้สารตัวทำละลายอีกทางหนึ่งด้วย

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต พบว่าการศึกษาส่วนใหญ่จะทำการทดลองโดยใช้รูปแบบของอุปกรณ์ดังที่กล่าวถึงข้างต้นซึ่งสามารถใช้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ค่อนข้างสูงและจัดเป็นเทคโนโลยีการบำบัดที่มีความน่าเชื่อถือในทางปฏิบัติ อย่างไรก็ตามยังมีรูปแบบอุปกรณ์ของกระบวนการดูดซึมอีกชนิดซึ่งมีการประยุกต์ใช้โดยทั่วไปในด้านการเติมอากาศ (Aeration) ให้กับระบบบำบัดน้ำเสียกล่าวคืออุปกรณ์แบบถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (Bubble column) ซึ่งใช้หลักการปล่อยอากาศที่ต้องการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยในรูปของฟองอากาศเข้าไปในถังปฏิกรณ์ที่บรรจุของเหลวที่จะใช้เป็นสารดูดซึม วิธีดังกล่าวสามารถประยุกต์ใช้ข้อดีของฟองอากาศขนาดเล็กๆ จำนวนมากเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟสก๊าซที่ต้องการถ่ายเทและเฟสของเหลวและเป็นการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทมวลสารรวมไปถึงประสิทธิภาพในการบำบัดในท้ายที่สุด แต่เนื่องจากแนวทางการประยุกต์ใช้วิธีดังกล่าวสำหรับกระบวนการดูดซึมยังไม่เป็นแพร่หลายและมีอยู่อย่างจำกัดโดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษาในแง่ของความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยกับตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสาร (พื้นที่ผิวสัมผัส สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย) และตัวแปรด้านอุทกศาสตร์ (ขนาดของฟองอากาศ ความถี่ในการเกิดฟองอากาศ และความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ)

จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นเพื่อให้เข้าใจถึงกลไกและประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศมากยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้จึงจัดทำขึ้นเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสารและตัวแปรด้านอุทกศาสตร์กับประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยและปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยในกระบวนการดูดซึมของถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศรวมไปถึงการศึกษาผลกระทบของความสามารถในการละลายน้ำได้ของสารอินทรีย์ระเหยและการปนเปื้อนของสารลดแรงตึงผิวในสารดูดซึมเพื่อนำไปสู่การประยุกต์ใช้เป็นทางเลือกในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยและรองรับการแก้ไขปัญหาผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่อาจเกิดขึ้นจากการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมในอนาคตได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อให้เข้าใจกลไกการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศขนาดเล็ก ศึกษาตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์และการถ่ายเทมวลสาร

1.2.2 ประยุกต์วิธีการในการแยกตัวแปรที่มีผลในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย ซึ่งได้แก่ พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (Specific interfacial area: a) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม (Overall mass transfer coefficient: $K_L a$, $K_G a$) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย (Mass transfer coefficient:

K_L , K_G) เพื่อให้เข้าใจกลไกในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยรวมถึงสามารถประยุกต์วิธีการในการออกแบบการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย

1.2.3 ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยในกระบวนการดูดซึมในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ เช่น อัตราการไหลของก๊าซ ชนิดของรูเดิมอากาศ ชนิดของสารอินทรีย์ระเหยและสารละลายของลดแรงตึงผิวในกระบวนการดูดซึม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ณ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3.2 ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบที่ละเท (Batch reactor) รูปทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4.4 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร ตัวดูดซึมที่ใช้ในการทดลองคือน้ำประปาที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสารละลายลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบที่ความเข้มข้น 0.2 CMC 0.6 CMC และ 1 CMC ($\sigma_L = 71.8 \text{ N/m}$, $\mu_L = 10.002 \cdot 10^{-4} \text{ Pa.s}$, $\rho_L = 997 \text{ Kg/m}^3$)

1.3.3 ทำการทดลองโดยใช้สารอินทรีย์ระเหย 2 ชนิด คือ

- 1) สารอินทรีย์ระเหยชนิดที่ละลายน้ำมากใช้เมทานอล
- 2) สารอินทรีย์ระเหยชนิดที่ละลายน้ำน้อยใช้เบนซีน

1.3.4 หัวเดิมอากาศที่ใช้ทำจากวัสดุพีวีซีมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.65 1.25 2.50 และ 4.50 มิลลิเมตร อัตราการไหลของอากาศที่ทำการศึกษา คือ 0.30 0.65 1.20 2.00 และ 3.50 มิลลิตรต่อวินาที

1.3.5 เฟสของเหลวที่ใช้ในการดูดซึม (ชนิดของตัวดูดซึม) 4 ชนิด คือน้ำประปา สารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ (Anionic surfactant solution) ที่ความเข้มข้น 0.2, 0.6 และ 1 CMC

1.3.5 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม (Overall mass transfer coefficient) โดยวิเคราะห์รูปแบบการถ่ายเทมวลสารที่ควบคุมด้วยเฟสก๊าซและเฟสของเหลว หากจากความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยในเฟสก๊าซที่เวลาต่างๆ ซึ่งตรวจสอบความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยโดยเครื่องมือก๊าซโครมาโทกราฟี

1.3.6 การหาค่าอุทกพลศาสตร์ ได้แก่ พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (Specific interfacial area: a) หาจากขนาดฟองอากาศ (Bubble diameter: D_B) ความถี่ในการเกิดฟอง (Bubble formation frequency: f_B) ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (Bubble rising velocity: U_B)

1.3.7 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย (Mass transfer coefficient) จะทำการคำนวณจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม (Overall mass transfer coefficient) และพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (Specific interfacial area: a) ซึ่งหาได้จากการทดลอง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เป็นเครื่องมือในการศึกษากลไกในการดูดซึมสารอินทรีย์ระเหยโดยกระบวนการดูดซึมในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศเพื่อเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์และตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสาร

1.4.2 ความรู้ที่ได้จากการทดลองสามารถนำไปพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยในระดับอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพในด้านการบำบัดและการถ่ายเทมวลสาร

1.4.3 ทำให้เข้าใจถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซึมสารอินทรีย์ระเหยด้วยกระบวนการดูดซึมในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารอินทรีย์ระเหย (VOCs: Volatile Organic Compounds)

สารอินทรีย์ระเหยคือ สารประกอบทางเคมีที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักประกอบกับสารไฮโดรเจน ออกซิเจนและสารประกอบอื่นๆ ในกลุ่มอะโรมาติก อะลิฟาติก เป็นต้น มีคุณสมบัติระเหยกลายเป็นไอง่าย บางประเภทมีผลต่อร่างกายหากได้รับปริมาณมากหรือสะสมเป็นเวลานาน ซึ่งจากมลพิษทางอากาศดังกล่าว ทำให้เกิดผลต่อสิ่งต่างๆ ได้มากมาย เช่น เป็นอันตรายต่อสุขภาพคนและสัตว์ ทำลายพืช ทำให้วัสดุเสียหาย ทำให้เกิดผลกระทบต่อสภาพภูมิอากาศและเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศวิทยา โดยที่ลักษณะและความรุนแรงของผลกระทบที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารมลพิษอากาศรวมทั้งเวลาของการสัมผัสกับสารมลพิษอากาศ นอกจากนี้สารมลพิษอากาศบางชนิดรวมทั้งสารอินทรีย์ระเหยได้อาจมีผลเสริมฤทธิ์กัน (Synergism) ทำให้ความรุนแรงในการได้รับมีมากขึ้น

2.1.1 ความสามารถในการละลายน้ำของสารอินทรีย์ระเหย

ความสามารถในการละลายน้ำของสารเคมีรวมทั้งสารอินทรีย์ระเหย เช่น เบนซีน เมทานอล เราสามารถใช้กฎของเฮนรีอธิบายถึงความสามารถในการละลายน้ำของก๊าซในของเหลว เช่น น้ำ เมื่อสารอินทรีย์ระเหย (Volatile organic compounds, VOCs) ละลายอยู่ในน้ำมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับธรรมชาติของสารนั้นๆ (มันซิน ตันทูลเวสม์, 2542) กฎของเฮนรีกล่าวว่า สำหรับก๊าซที่ละลายน้ำได้น้อยหรือปานกลาง ความสามารถในการละลายน้ำขึ้นอยู่กับความดันย่อยของก๊าซ (Partial pressure) ในบรรยากาศเหนือผิวน้ำและสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$C = K_h P^* \quad (2.1)$$

โดยที่ C = ความเข้มข้นของก๊าซที่ละลายน้ำ (โมล/ลิตร)
 K_h = ค่าคงที่ (โมล/ลิตร - บรรยากาศ)
 P^* = ปริมาณของก๊าซวัดเป็น Partial pressure (บรรยากาศ)

กฎของเฮนรีบอกให้รู้ว่าเมื่อถึงสภาวะสมดุลจะมีก๊าซละลายน้ำอยู่มากน้อยเท่ากับเท่าไร ซึ่งกฎดังกล่าวไม่ได้บอกเกี่ยวกับอัตราการเปลี่ยนแปลงว่าจะต้องใช้เวลาานเท่าใดจึงจะถึงสภาวะสมดุล ดังในตารางที่ 2.1 บอกความสามารถในการละลายน้ำของสารอินทรีย์ระเหย

ตารางที่ 2.1 ความสามารถในการละลายน้ำของสารอินทรีย์ระเหย ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

(Nevers, 2000)

ชื่อสารเคมี	สารประกอบ	มวลโมเลกุล กรัม/โมล	ความสามารถละลาย ในน้ำ โดยน้ำหนัก%
HC,linear	n-Pentane	72	0.0038
	n-Hexane	86	0.00095
HC,cyclic	Cyclohexane	84	0.0055
HC,aromatic	Benzene	78	0.18
	Toluene	92	0.052
	Ethyl benzene	106	0.020
Alcohols	Methanol	32	ละลายได้มาก
	Methyl,ethyl,n-propyl,isopropyl, ethylene glycol	32,46,60,60, 62	ละลายได้มาก ละลายได้มาก
	n-butanol	74	7.3
	Ketones	Cyclohexanol	100
Actone		58	ละลายได้มาก
Methyl ethyl Ketone		72	26
Ethers	Methyl isobutyl Ketone	100	1.7
	Diethyl ether	74	6.9
Esters	Di-isopropyl ether	102	1.2
	Methyl acetate	75	24.5
	Ethyl acetate	88	7.7
	n-Butyl acetate	116	0.7

2.1.2 วิธีการควบคุมก๊าซและสารอินทรีย์ระเหย

แหล่งกำเนิดที่ทำให้เกิดสารมลพิษทางอากาศแบบก๊าซคือ การเผาไหม้เชื้อเพลิงจากการผลิตของเขตอุตสาหกรรมก่อให้เกิดอากาศที่เป็นพิษ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซจากสารอินทรีย์ระเหย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวิธีการบำบัดมลภาวะจากอากาศ ซึ่งวิธีที่ใช้ในการบำบัดก๊าซ เช่น

การดูดซับ (Adsorption)

ในการดูดซับอนุภาคของก๊าซจะถูกดูดซับออกจากก๊าซที่ไหลออกมาโดยการติดกับผิววัตถุของแข็ง ซึ่งโมเลกุลของก๊าซที่ถูกดูดซับเรียกว่า Adsorbate ในขณะที่ของแข็งที่ทำการดูดซับก๊าซเรียกว่า Adsorbent โดยปกติเทคโนโลยีการดูดซับจะประยุกต์ใช้สำหรับการควบคุมพวกสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งวิธีการนี้ก๊าซที่มีการปนเปื้อนจะจับติดอยู่ที่ผิวของของแข็งของสารดูดซับ เมื่อผ่านไประยะหนึ่งผิวของตัวดูดซับจะอิ่มตัวไปด้วย Adsorbate ซึ่ง Adsorbate จะต้องนำมาใส่สารที่ถูกดูดซับไว้ออกไป

การดูดซึม (Absorption)

เป็นวิธีที่แพร่หลายที่ใช้สำหรับบำบัดก๊าซอินทรีย์ที่ถูกปล่อยออกมา การดูดซึมก๊าซด้วยของเหลวเกิดขึ้นเมื่อปริมาณของเหลวน้อยกว่าปริมาณที่ทำให้เกิดสมดุลความเข้มข้นของก๊าซ ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นจริงกับความเข้มข้นสมดุลทำให้เกิดแรงขับเคลื่อนของการดูดซึม โดยที่อัตราการดูดซึมจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพของก๊าซหรือของเหลว เช่น การแพร่กระจาย ความเร็ว ความหนาแน่น และสถานะของตัวดูดซึม เช่น อุณหภูมิ อัตราการไหลของก๊าซและของเหลว

การดูดซึมเกิดขึ้นได้ทั้งทางกายภาพและทางเคมี โดยการดูดซึมแบบกายภาพเกิดขึ้นเมื่อก๊าซที่ถูกดูดกลืนละลายอยู่ในตัวทำละลายและหากเกิดปฏิกิริยาระหว่างก๊าซที่ถูกดูดกลืนกับตัวทำละลายนั้นคือเกิดการดูดซึมแบบเคมีซึ่งถ้าก๊าซที่ปนเปื้อนนั้นละลายได้ดีการบำบัดด้วยวิธีการดูดซึมจะมีประสิทธิภาพสูง

การเผาทำลาย (Incineration)

มีหลักการทำงานคือ ให้ความร้อนแก่ก๊าซเสียและสารอินทรีย์ระเหยจนทำให้อุณหภูมิของก๊าซจากของเสียมีค่าสูงขึ้นจนเพียงพอที่ของเสียอินทรีย์สามารถรวมตัวกับออกซิเจนได้ ซึ่งประสิทธิภาพของการบำบัดก๊าซเสียด้วยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาและระยะเวลาที่ใช้ในการเผา

จะเห็นว่าวิธีที่ใช้ในการบำบัดมลพิษทางอากาศรวมทั้งสารอินทรีย์ระเหยมีหลายวิธี นอกจากวิธีที่กล่าวมาข้างต้นแล้วยังแสดงไว้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เทคโนโลยีที่ใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย (Seader และ Henley, 2000)

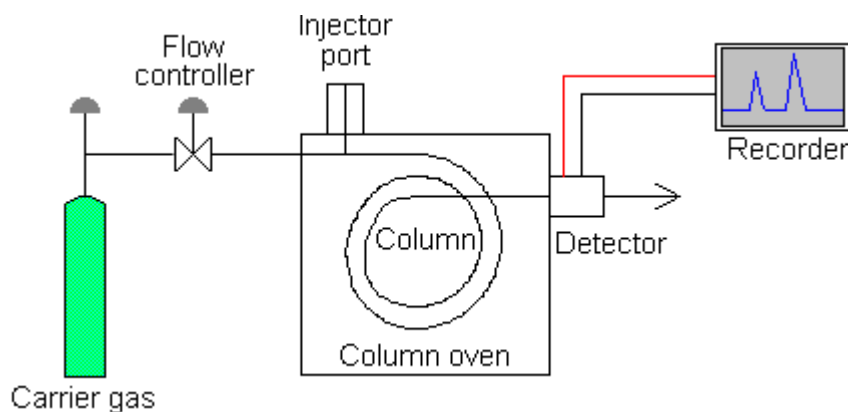
วิธีการ	ความเข้มข้น พีพีเอ็ม	ประสิทธิภาพ	ข้อได้เปรียบ	ข้อเสียเปรียบ
การดูดซึม (Absorption)	250 1,000 5,000	90% 95% 98%	บำบัดก๊าซอินทรีย์ที่มี สถานะเป็นกรดได้ดี	มีข้อจำกัดในการใช้ งาน
การดูดซับ (Adsorption)	200 1,000 5,000	50% 90-95% 98%	สามารถนำกลับมาใช้ ใหม่ได้ดี	ประสิทธิภาพขึ้นกับ ความชื้น อุณหภูมิ
การควบแน่น (Condensation)	500 10,000	50% 95%	ดีสำหรับสารที่ต้องการ นำกลับมาใช้ใหม่	มีข้อจำกัดในการใช้ งาน
การเผาทำลาย โดยใช้ความร้อน	20 100	95% 99%	ทำลายโครงสร้างได้สูง สามารถนำพลังงาน ความร้อนกลับมาใช้ ใหม่ได้	สารอินทรีย์ไม่ สามารถนำกลับมาได้ ราคาในการบำบัดสูง
การเผาทำลาย โดยใช้ตัวเร่ง	50	90%	ทำลายโครงสร้างทาง เคมีได้สูง	สารอินทรีย์ไม่ สามารถนำกลับมาได้
Flares	100	>95% >98%	ราคาไม่สูงเมื่อเทียบ กับการทำลาย โครงสร้าง (thermal incineration) ทำลายโครงสร้างทาง เคมีได้สูง	มีข้อจำกัดในการใช้ งาน, สารอินทรีย์ไม่ สามารถนำกลับมาได้, ให้ฝุ่นละอองสูง

2.1.3 วิธีการตรวจวัดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหย

ความเข้มข้นของก๊าซหรือสารอินทรีย์ระเหยสามารถวัดโดยใช้เครื่องมือที่ชื่อว่าก๊าซโครมาโทกราฟีซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้สำหรับแยกของผสมหรือสารที่เป็นก๊าซหรือไอของสารที่ผสมกันอยู่ โดยเมื่อสารผ่านคอลัมน์จะสามารถแยกออกจากกันได้ด้วยการกระจายตัวที่แตกต่างกันของก๊าซหรือไอระหว่างเฟสเคลื่อนที่กับเฟสคงที่ที่มีของเหลว (Liquid phase) หรือมี Partition coefficient ต่างกัน ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับแยกสารที่เป็นก๊าซ

หรือสารที่สามารถเปลี่ยนให้เป็นไอหรือเฟสก๊าซได้ตามอุณหภูมิที่กำหนด โดยเมื่อปี 1952 A.J.P. Martin และ R.L.M.Synge เป็นผู้ได้รับรางวัลโนเบล (Nobel prize) จากการค้นพบ Partition Chromatography ทำให้สภาพไว ความรวดเร็ว ความเที่ยงและความง่ายของวิธีนี้ช่วยให้การแยกสาร การวิเคราะห์สารและการหาปริมาณของสารระเหยได้รับความนิยมอย่างรวดเร็ว องค์ประกอบของเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (GC) แสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- 1) ก๊าซที่ใช้อบรมตัวพา (Carrier gas) เพื่อจะพาไอของสารตัวอย่างผ่านเข้าไปยังคอลัมน์ ได้แก่ ไนโตรเจน ฮีเลียมและอาร์กอน เป็นต้น
- 2) ส่วนที่ใช้ควบคุมการไหลของก๊าซต่างๆ (Flow controller) ได้แก่ ไฮโดรเจน อากาศ และไนโตรเจน เป็นต้น
- 3) ส่วนที่จะฉีดสารตัวอย่างเข้าไป (Injector)
- 4) คอลัมน์ (Column) ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดในการแยกสาร
- 5) ดีเทคเตอร์ (Detector) เป็นส่วนที่ใช้สำหรับตรวจวัดสารแต่ละชนิดที่ถูกแยกออกจากคอลัมน์
- 6) ส่วนที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) ใช้กับคอลัมน์ Detector และ Injector
- 7) ส่วนใช้ประมวลผลและข้อมูลต่างๆ ได้แก่ อินทิเกรเตอร์ เครื่องบันทึกโครมาโทแกรม



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

(แม่น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม, 2534)

ดังนั้นในการวิเคราะห์สารตัวอย่างด้วยเทคนิคก๊าซโครมาโทกราฟี (Gas chromatography, GC) นั้น เมื่อเลือกสภาวะต่างๆ ของการวิเคราะห์ แลปจัดสภาวะของเครื่อง GC ให้เรียบร้อยแล้ว จึงนำสารตัวอย่างเข้าไปฉีดที่ Sample injector port สารจะกลายเป็นไอแล้วถูกพาเข้าไปในคอลัมน์ด้วยก๊าซพา (Carrier gas) อย่างช้าๆ สารผสมจะถูกแยกออกเป็นส่วนๆ ที่คอลัมน์นี้แล้วออกไปสู่ดีเทค

เตอร์ (Detector) หรือต่อเข้ากับ Integrator ก็จะทำให้ผู้วิเคราะห์สามารถทราบถึงองค์ประกอบของสารตัวอย่างได้

2.2 การถ่ายเทมวลสาร (Mass Transfer)

การถ่ายเทมวลสารเป็นปรากฏการณ์อย่างหนึ่งซึ่งเกิดขึ้นเมื่อระบบประกอบด้วยองค์ประกอบจำนวนสองหรือมากกว่า โดยที่องค์ประกอบเหล่านั้นมีความเข้มข้นแตกต่างกัน มวลสารจึงถูกถ่ายเทไปเพื่อลดความแตกต่างของความเข้มข้นในระบบลง องค์ประกอบหนึ่งนั้นจะถูกถ่ายเทจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าและในที่สุดความเข้มข้นของทุกองค์ประกอบจะมีค่าสม่ำเสมอทั้งระบบ การถ่ายเทมวลสารก็จะหยุดลง

กลไกการถ่ายเทมวลสารสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ การถ่ายเทมวลสารโดยการแพร่ของโมเลกุลหรือเรียกสั้น ๆ ว่าการแพร่โมเลกุล (Molecular diffusion) และการถ่ายเทมวลสารโดยการพาหรือเรียกง่าย ๆ ว่าการพามวลสาร (Convective mass transfer) กลไกแบบแรกนั้นเกิดขึ้นโดยโมเลกุลเคลื่อนที่แบบสุ่ม (Random) และตัวกลางของผสมนั้นอยู่นิ่ง (Stagnant) หรือมีการเคลื่อนที่แบบลามินาร์ กระบวนการจะดำเนินไปอย่างช้า ๆ ส่วนกลไกแบบที่สองนั้นการถ่ายเทมวลสารจะเกิดขึ้นโดยที่ตัวกลางของผสมนั้นมีการไหลหรือเคลื่อนที่อันเนื่องมาจากการกวนทางกลใด ๆ การถ่ายเทมวลสารทั้งสองแบบนี้อาจเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน โดยที่กลไกแบบหนึ่งอาจมีบทบาทสำคัญมากกว่าอีกแบบหนึ่งก็ได้ กลไกทั้งสองแบบนี้เปรียบเทียบกับกับการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อน (Conductive heat transfer) และการพาความร้อน (Convective heat transfer) ตามลำดับ

การถ่ายเทมวลสารของสารอินทรีย์ระเหยเช่น เมทานอลในสารละลายไปยังตัวดูดซึม ซึ่งเป็นการถ่ายเทมวลสารระหว่างเฟสก๊าซกับของเหลวและเป็นการถ่ายเทมวลสารโดยการพา ในการถ่ายเทระหว่างของไหลเคลื่อนที่กับพื้นที่ผิวจะขึ้นกับคุณสมบัติการเคลื่อนที่และลักษณะทางพลศาสตร์ (Dynamics) ของของไหลเคลื่อนที่ ซึ่งสมการแสดงอัตราการพามวลสารสามารถเขียนจากกฎของนิวตัน (Newton's law) ดังนี้ (Treybel, 1981)

$$N_A = k_C \Delta C_A \quad (2.2)$$

เมื่อ N_A = ฟลักซ์เชิง โมลของ A เมื่อเทียบกับพื้นที่ที่อยู่นิ่งกับที่
 ΔC_A = ความแตกต่างของความเข้มข้นของ A ระหว่างพื้นที่ผิวกับค่าเฉลี่ยในของไหล
 k_C = ค่าสัมประสิทธิ์การพามวลสาร (Convective mass transfer coefficient)

ในการถ่ายเทมวลสารจะเกิดขึ้นในทิศทางที่ลดความเข้มข้น ซึ่งจากสมการ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ของการแพร่ (Diffusion substance) และเกรเดียนต์ของความเข้มข้นที่ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสารขึ้นและเนื่องจากของไหลที่ไหลผ่านพื้นผิวจะมีลักษณะเป็นชั้น (Layer)

เกิดขึ้นติดกับผิวที่มีการไหลแบบลาร์มินาร์ ส่วนอนุภาคของไหลที่อยู่ติดกับพื้นผิวของแข็งจะอยู่นิ่ง ซึ่งกลไกการถ่ายเทมวลระหว่างผิวและของไหลจะเกี่ยวข้องกับการแพร่ของโมเลกุลเข้าไปยังชั้นของไหลที่อยู่นิ่งหรือไหลแบบลาร์มินาร์ โดยการถ่ายเทมวลสารนี้จะถูกควบคุมโดยฟิล์มของของไหล ดังนั้นในกรณีนี้ K_c จึงหมายถึงสัมประสิทธิ์ฟิล์ม (Film coefficient) ซึ่งโดยทั่วไปขึ้นอยู่กับรูปร่างของระบบ คุณสมบัติของของไหล และการไหล

กฎของการถ่ายเทมวลสารแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ของสารแพร่ (Diffusing substance) และเกรเดียนต์ของความเข้มข้นที่ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสารขึ้น โดยแต่ลักษณะของตัวแปรค่อนข้างจะซับซ้อนและเนื่องจากการถ่ายเทมวลสารยังเกิดขึ้นในของผสมอีกด้วยจึงทำให้ค่าต่าง ๆ ขององค์ประกอบหนึ่งขึ้นอยู่กับของอีกองค์ประกอบหนึ่งตัวอย่างเช่น การหาค่าอัตราการถ่ายเทมวลสารขององค์ประกอบหนึ่งเทียบกับความเร็วของของผสม แต่เนื่องจากองค์ประกอบแต่ตัวมีการเคลื่อนที่ที่ต่างกันค่าความเร็วของของผสมจึงหาได้โดยการเฉลี่ยค่าความเร็วของทุกองค์ประกอบในของผสมนั้น

2.2.1 ฟลักซ์ (Fluxes)

ฟลักซ์เชิงมวล (Mass flux) หรือฟลักซ์เชิงโมล (Molar flux) ขององค์ประกอบหนึ่งเป็นปริมาณเวกเตอร์ที่แสดงถึงจำนวนองค์ประกอบ (ทั้งในหน่วยมวลหรือโมล) ที่เคลื่อนที่ผ่านต่อหนึ่งหน่วยเวลาต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่ตั้งฉากกับเวกเตอร์ สามารถนิยามฟลักซ์ได้ 2 แบบ คือ ฟลักซ์เชิงมวล และฟลักซ์เชิงโมล ในแต่ละแบบก็ยังแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามการเคลื่อนที่ของพิกัดดังนี้

- 1) \bar{J}_A = ฟลักซ์เชิงโมล เทียบกับพิกัดที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเฉลี่ยเชิงโมล
- 2) \bar{j}_A = ฟลักซ์เชิงมวล เทียบกับพิกัดที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเฉลี่ยเชิงมวล
- 3) \bar{N}_A = ฟลักซ์เชิงโมล เทียบกับพิกัดที่อยู่นิ่งกับที่
- 4) \bar{n}_A = ฟลักซ์เชิงมวล เทียบกับพิกัดที่อยู่นิ่งกับที่

$$\text{โดย} \quad \bar{J}_A = C_A (\bar{v}_A - \bar{v}^*) \quad (2.3)$$

$$\bar{N}_A = C_A \bar{v}_A \quad (2.4)$$

$$\bar{j}_A = \rho_A (\bar{v}_A - \bar{v}) \quad (2.5)$$

$$\bar{n}_A = \rho_A \bar{v} \quad (2.6)$$

2.2.2 การแพร่ของโมเลกุล (Molecular diffusion)

การแพร่ของโมเลกุลเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปในสารโดยอาศัยพลังงานความร้อนซึ่งสามารถใช้ทฤษฎีจลน์ของก๊าซอธิบายปรากฏการณ์การแพร่ได้ดี ในการใช้ทฤษฎีจลน์ของก๊าซนั้น ได้จินตนาการให้โมเลกุลเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงด้วยความเร็วสม่ำเสมอจนกระทั่งชน

กับโมเลกุลอื่นทำให้ความเร็วและทิศทางเปลี่ยนไป ระยะทางเฉลี่ยที่โมเลกุลเคลื่อนที่โดยไม่ชนกับโมเลกุลเรียกว่า Mean free path และค่าความเร็วเฉลี่ยก็เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ดังนั้นโมเลกุลจึงเคลื่อนที่แบบมีทิศทางไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้ได้ระยะทางสุทธิในช่วงเวลาที่กำหนดค่าและอัตราการแพร่เป็นเศษส่วนกับระยะทางจริง ด้วยเหตุนี้อัตราการแพร่จึงมีค่าต่ำถึงแม้ว่าจะคาดได้ว่าอัตราการแพร่จะสูงขึ้นเมื่อความดันลดลง (ซึ่งจะทำให้จำนวนครั้งของการชนลดลง) และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (ซึ่งจะเพิ่มความเร็วของโมเลกุล)

2.2.3 สมการของฟิค (Fick's rate equation)

ความสัมพันธ์เบื้องต้นสำหรับการแพร่แบบโมเลกุล ได้นิยามฟลักซ์เชิงโมลเทียบกับความเร็วเฉลี่ยเชิงโมล, J และสมการสำหรับฟลักซ์เชิงโมลนี้เสนอโดยฟิค (Fick) และกฎที่มักใช้อ้างถึงคือ กฎข้อแรกของฟิค (Fick's first law) ซึ่งนิยามการแพร่ขององค์ประกอบ A ในทิศทาง z ในระบบที่อุณหภูมิและความดันคงที่ ดังนี้

$$J_{A,z} = -D_{AB} \frac{dC_A}{dz} \quad (2.7)$$

เมื่อ $J_{A,z}$ = ฟลักซ์เชิงโมลในทิศทาง Z เทียบกับความเร็วเฉลี่ยเชิงโมล
 $\frac{dC_A}{dz}$ = เกรเดียนต์ของความเข้มข้นในทิศทาง Z
 D_{AB} = สภาพการแพร่มวล (mass diffusivity) หรือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) ขององค์ประกอบ A ที่แพร่ผ่านองค์ประกอบ B

สมการของ de Groot เป็นความสัมพันธ์ของฟลักซ์โดยทั่วไป ไม่จำกัดเฉพาะระบบอุณหภูมิและความดันคงที่คือ ฟลักซ์การถ่ายเทมวลสารเท่ากับผลคูณระหว่างความเข้มข้นทั้งหมดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และเกรเดียนต์ของความเข้มข้น ดังแสดงในสมการที่ 2.8

$$J_A = -CD_{AB} \frac{dy_A}{dz} \quad (2.8)$$

เนื่องจากค่าความเข้มข้นทั้งหมด C จะคงที่ภายใต้สภาวะความดันและอุณหภูมิกงที่ ดังนั้นสมการ (2.7) จึงเป็นสมการเฉพาะของสมการ (2.8) ในขณะที่สมการที่คล้ายกับฟลักซ์เชิงโมลคือ ฟลักซ์เชิงมวลในทิศทาง z เทียบกับความเร็วเฉลี่ยเชิงมวล, $j_{A,z}$ คือ

$$J_{A,z} = -\rho D_{AB} \frac{d\omega_A}{dz} \quad (2.9)$$

เมื่อ $\frac{d\omega_A}{dz}$ เป็นเกรเดียนต์ของความเข้มข้นในเทอมของเศษส่วนมวล

2.2.4 สัมประสิทธิ์การแพร่ของของเหลว (Liquid mass diffusivity)

การแพร่ในของเหลวมีความสำคัญมากในกระบวนการแยกหลายอย่าง ที่สำคัญได้แก่ การสกัดของเหลวด้วยของเหลว (Liquid-Liquid extraction) การดูดซึมก๊าซ (Gas absorption) และการกลั่น (Distillation) ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในของเหลวมีค่าต่ำกว่าในก๊าซมากเนื่องจากระยะห่างระหว่างโมเลกุลในของเหลวมีค่าน้อยกว่าในก๊าซมาก นอกจากนี้แล้วค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในของเหลวจะต่างกับในก๊าซตรงที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในของเหลวมีค่าขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายด้วย ดังนั้นในการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในของเหลวจึงยุ่งยากและทำได้ไม่ถูกต้องเท่ากรณีก๊าซ การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของเหลวอาจเคลื่อนที่ในรูปของโมเลกุลหรือรูปของไอออนกรณีที่เป็นสารประกอบอิเล็กโทรไลต์ ตัวอย่างเช่น โซเดียมคลอไรด์, NaCl แพร่เข้าไปในน้ำในรูปของ Na^+ และ Cl^- แต่ละไอออนมีความสามารถในการเคลื่อนที่ (Mobility) ไม่เท่ากัน แต่เพื่อรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้าไอออนทั้งสองจะมีอัตราการแพร่เท่ากัน

ทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายการแพร่ในของเหลวมีอยู่ 2 ทฤษฎี คือ ทฤษฎี Eyring hole และทฤษฎี Hydrodynamic ทฤษฎีแรกได้ให้แนวความคิดพื้นฐานว่าของเหลวอุดมคติมีลักษณะเป็นแลตทิซคล้ายผลึก (Quasi-Crystalline lattice) ที่มีรูกระจายอยู่ทั่ว การถ่ายเทมวลสารหรือการแพร่เกิดขึ้นจากการที่โมเลกุลตัวถูกละลายเคลื่อนที่เข้าในรูหรือเคลื่อนที่จากรูหนึ่งไปยังอีกรูหนึ่งในแลตทิซนั้น ส่วนทฤษฎีหลังนั้นกล่าวว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในของเหลวมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวถูกละลายและกับความเร็วสุทธิของโมเลกุลที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของแรงขับเคลื่อน ซึ่งหลักการของทฤษฎี Hydrodynamic ได้รับการพัฒนามาเป็นสมการ Stokes-Einstein ดังนี้

$$D_{AB} = \frac{kT}{6\pi r_A \mu_B} \quad (2.10)$$

โดย	D_{AB}	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ของ A ในสารละลายเจือจางใน B
	K	=	ค่าคงที่ Boltzmann
	T	=	อุณหภูมิสัมบูรณ์
	r_A	=	รัศมีของอนุภาคตัวถูกละลาย A
	μ_B	=	ความหนืดของตัวทำละลาย B

สมการ (2.10) นี้ใช้อธิบายได้ดีในกรณีที่เป็นการแพร่ของอนุภาคคอลลอยด์ (Colloidal particles) โมเลกุลกลมใหญ่ผ่านเข้าไปในตัวทำละลายที่ประพฤติตัวเป็นสารตัวกลางต่อเนื่อง (Continuum) ให้กับสารที่แพร่อาจเขียนสมการนี้ในรูปทั่วไปได้เป็น

$$D_{AB} = \frac{kT}{\mu_B} f(\nabla) \quad (2.11)$$

โดย $f(\nabla)$ เป็นฟังก์ชันของปริมาตรเชิงโมลของตัวถูกละลาย ต่อมาได้มีผู้พัฒนาสมการ (2.10) เพื่อหาสมการที่ใช้คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในเทอมของคุณสมบัติของตัวถูกละลายและตัวทำละลาย โดย WiKe และ Chang ได้เสนอสมการเอมไพริกัลต่อไปนี้สำหรับการแพร่ของสารที่ไม่ใช่อิเล็กโทรไลต์ ในสารละลายเจือจาง A ใน B ดังสมการ (2.12)

$$\frac{D_{AB}\mu_B}{T} = \frac{7.4 \times 10^{-8} (\phi_B M_B)^{1/2}}{\nabla_B^{0.6}} \quad (2.12)$$

โดย D_{AB} = สัมประสิทธิ์การแพร่ของ A ในตัวทำละลาย B, cm^2/sec
 μ_B = ความหนืดของสารละลาย
 T = น้ำหนักโมเลกุลของตัวทำละลาย B
 M_B = ปริมาตรเชิงโมลของตัวถูกละลายที่จุดเดือดปกติ, $\text{cm}^3/\text{g mole}$
 ∇_B = ตัวแปร association ของตัวทำละลาย B

2.3 กระบวนการดูดซึม (Absorption Process)

กระบวนการดูดซึม คือ การถ่ายเทมวลสารจากเฟสก๊าซไปสู่ของเหลวในการถ่ายเทมวลสารด้วยกลไกการแพร่โมเลกุลหรือการพาที่ตามเป็นกลไกซึ่งขึ้นอยู่กับกระแย์ความเข้มข้นภายในเฟสการถ่ายเทมวลสารระหว่างสองเฟสก็เกิดขึ้นเนื่องจากระบบไม่ได้อยู่ที่สมดุล โดยจะมีการถ่ายเทมวลสารจากเฟสที่มีความเข้มข้นมากไปสู่เฟสที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า โดยทั่วไปกระบวนการในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบของสารละลายและของผสม ดังนั้นในการบำบัดในส่วนของก๊าซต่างๆ ที่เกิดขึ้นนั้นวิธีการดูดซึม (Absorption) จัดเป็นวิธีการหนึ่งที่มีการนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายโดยอาศัยหลักการถ่ายเทมวลระหว่างเฟสเป็นหลัก โดยทั่วไปการออกแบบอุปกรณ์การถ่ายเทมวลมักทำเป็นหอ (Tower) โดยจะต้องให้มีการสัมผัสกันระหว่างเฟสให้มากที่สุดเพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการถ่ายเทมวล ในที่นี้จะกล่าวถึงชนิดของอุปกรณ์ในการถ่ายเทมวลสารของกระบวนการดูดซึมซึ่งมีดังนี้

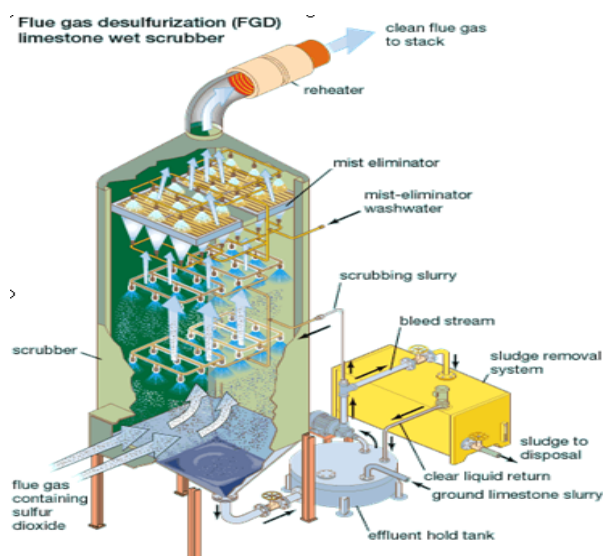
2.3.1 หอสเปรย์ (Spray towers)

หอสเปรย์ประกอบด้วยภาชนะหรือคอลัมน์ขนาดใหญ่โดยมีก๊าซไหลเข้าจากทางด้านล่างสวนทางกับของเหลวที่ไหลเข้าทางด้านบน โดยไหลผ่านหัวฉีด (Nozzle) ลงสู่ด้านล่าง ดังรูปที่ 2.2 แสดงทิศทางการไหลของของไหลในหอสเปรย์ของเหลวที่ผ่านหัวฉีดจะมีลักษณะเป็นหยดเล็ก ๆ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟสแต่ต้องระวังไม่ให้เล็กเกินไปจนถูกพัดพาติดไปกับกระแสก๊าซได้

ตารางที่ 2.3 ความสามารถในการแพร่ของสารละลาย A ในสารละลาย B ที่ความเข้มข้นต่ำ

สารละลาย B	สารละลาย A	อุณหภูมิ เคลวิน (K)	ความสามารถในการแพร่, D_{AB} , $\text{cm}^2/\text{s} \times 10^5$
Water	Acetic acid	20	1.19
	Aniline	20	0.92
	Carbon dioxide	25	2.00
	Ethanol	15	1.00
	Methanol	15	1.26
Ethanol	Allyl alcohol	20	0.98
	Benzene	25	1.81
	Oxygen	30	2.64
	Pyridine	20	1.10
	Water	25	1.24
Benzene	Acetic acid	25	2.09
	Cyclohexane	25	2.25
	Ethanol	15	2.10
	n-Heptane	25	1.85
	Toluene	25	3.70
n-Hexane	Carbon tetrachloride	25	3.74
	Methyl ethyl Ketone	30	4.87
	Propane	25	4.21
	Toluene	25	2.92
Acetone	Acetic acid	15	3.77
	Formic acid	25	2.94
	Nitrobenzene	20	4.56

อัตราการถ่ายเทมวลจะขึ้นอยู่กับระยะทางที่หยดน้ำตกลงด้านล่างหรือระยะเวลาที่ทั้งสองเฟสสัมผัสกัน การเคลื่อนที่แบบหมุนวนของหยดของเหลวที่ตกลงมาจะช่วยลดความต้านทานต่อการถ่ายเทมวลในเฟสก๊าซได้ หอสมปรีย์เหมาะสำหรับใช้เป็นอุปกรณ์การถ่ายเทมวลเมื่อก๊าซละลายในของเหลวได้ดีหรือเมื่อความต้านทานต่อการถ่ายเทมวลอยู่ในเฟสก๊าซ

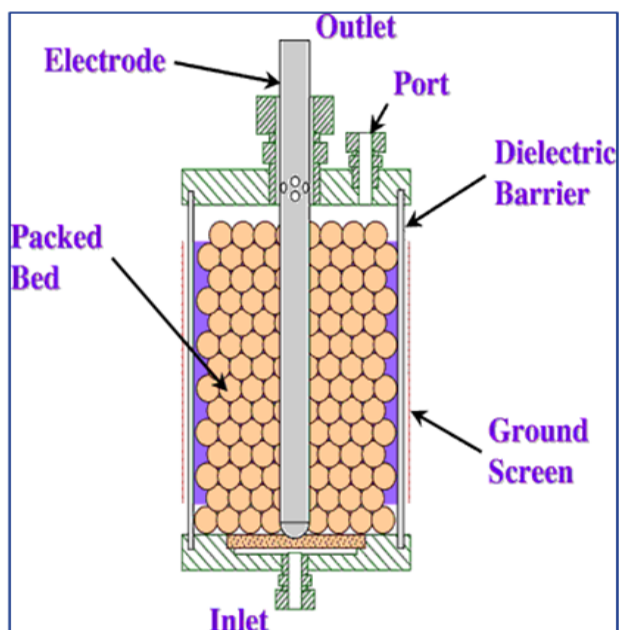


รูปที่ 2.2 หอสเปรย์ (สุภาภรณ์ มานะรังสรรค์, 2545)

2.3.2 หอบรรจุเบด (PacKed towers)

อุปกรณ์ชนิดนี้จัดเป็นอุปกรณ์ถ่ายเทมวลที่มีลักษณะเป็นคอลัมน์ทรงกระบอกตั้งฉากภายในบรรจุด้วยวัสดุบรรจุ (PacKing materials) หรือเบด (Bed) และมีของไหล 2 เฟสที่ไม่ละลายซึ่งกันและกันไหลสวนทางกันดังแสดงในรูปที่ 2.3 ของเหลวจะไหลจากด้านบนลงมาอบผิวเบดเป็นลักษณะฟิล์มบาง ๆ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวการสัมผัส โดยทั่วไปก๊าซจะไหลจากด้านล่างขึ้นด้านบนสวนทางกับของเหลวที่ตกลงมา ดังนั้นอุปกรณ์ชนิดนี้จึงเหมาะที่จะใช้กับระบบก๊าซ – ของเหลว ซึ่งถูกควบคุมด้วยความดันทานเฟสใดเฟสหนึ่งหรือเมื่อความดันทานในทั้งสองเฟสมีความสำคัญพอ ๆ กัน วัสดุบรรจุที่ใช้กันมากจะเป็นพวกเซรามิกส์ ก้อนกรวดหรือพลาสติก

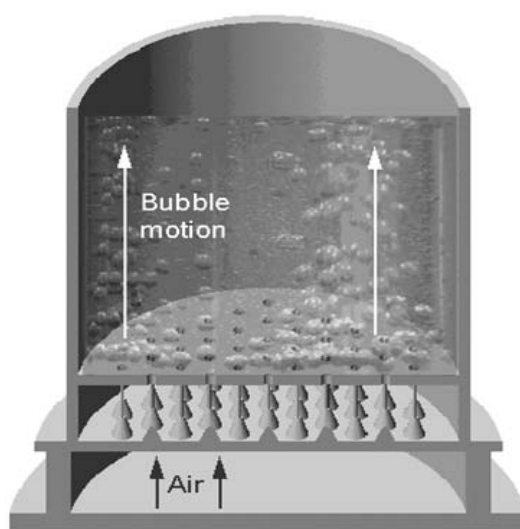
หอบรรจุเบดชนิดพิเศษมักใช้ทำน้ำให้เย็น (Cooling water) เพื่อที่จะนำกลับไปใช้เป็นตัวกลางถ่ายเทความร้อนได้อีก หอบรรจุเบดชนิดนี้ทำด้วยไม้แผ่นบาง ๆ วางเรียงกันในลักษณะบานเกล็ดเป็นชั้น ๆ เพื่อให้อากาศสามารถไหลผ่านแต่ละชั้นได้ ซึ่งน้ำจะถูกพ่นจากด้านบนลงล่างผ่านชั้นต่าง ๆ Cooling tower โดยแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การไหลแบบธรรมชาติ (Natural draft) เมื่อมีลมมากพอที่จะพาอากาศขึ้นไปได้และการไหลแบบบังคับ (Forced or induced draft) เมื่อมีพัดลมช่วยดูดอากาศให้ลอยขึ้นไปได้



รูปที่ 2.3 หอบรรจุเบด (สุภาภรณ์ มานะรังสรรค์, 2545)

2.3.3 หอฟองก๊าซหรือถังปฏิกริยาชนิดฟองอากาศ (Bubble towers/column)

อุปกรณ์ชนิดนี้มีหลักการที่ตรงข้ามกับหอสเปรย์ คือ ก๊าซจะถูกทำให้กระจายในเฟสของเหลวในลักษณะของฟองอากาศเล็ก ๆ ซึ่งจะทำให้พื้นที่สัมผัสระหว่างเฟสมากขึ้น การถ่ายเทมวลเกิดขึ้นเมื่อเกิดฟองก๊าซและในขณะที่ฟองก๊าซเคลื่อนที่ผ่านของเหลว การเคลื่อนที่ของฟองก๊าซนี้จะช่วยลดความต้านทานในเฟสของเหลว หอฟองก๊าซเหมาะสำหรับระบบที่เฟสของเหลวเป็นตัวควบคุมการถ่ายเทมวลสาร ดังรูปที่ 2.4 แสดงถึงระยะและทิศทางของของไหลในหอฟองก๊าซ กลไกการถ่ายเทมวลอาจเป็นแบบกะ (Batch) หรือแบบต่อเนื่อง ตัวอย่างเครื่องมือ เช่น ถังเติมอากาศ (Aeration tank) ในระบบการปรับน้ำเสีย



รูปที่ 2.4 หอฟองก๊าซ (สุภาภรณ์ มานะรังสรรค์, 2545)

จากคุณลักษณะของหอพองก๊าซดังที่กล่าวถึงข้างต้น งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาแนวทางการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ดังกล่าวในกระบวนการดูดซึมสารมลพิษประเภทสารอินทรีย์ระเหยซึ่งมีตัวแปรต่างๆ มากมายที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ เช่น ขนาดฟองอากาศ อุปกรณ์และพลังงานที่ใช้ในสร้างฟองอากาศ ลักษณะของสารตัวทำละลายที่เลือกใช้รวมไปถึงสภาพแวดล้อมการทำงานของระบบบำบัด เป็นต้น โดยสรุปจากตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของระบบสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเด็นหลักๆ ดังนี้

1) ตัวแปรที่เกี่ยวกับการถ่ายเทมวลสารของระบบ (Mass transfer parameters) เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย เป็นต้น

2) ตัวแปรที่เกี่ยวกับลักษณะทางอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamic parameters) เช่น ขนาดฟองอากาศ ความถี่ในการเกิดฟองอากาศ ความเร็วในลอยตัวของฟองอากาศและค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ เป็นต้น

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงจะทำการศึกษการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยด้วยวิธีการดูดซึมด้วยอุปกรณ์ชนิดหอพองก๊าซ โดยจะทำการพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดของระบบที่สัมพันธ์กับตัวแปรที่สำคัญ ได้แก่ ตัวแปรที่เกี่ยวกับการถ่ายเทมวลสารของระบบและตัวแปรที่เกี่ยวกับลักษณะทางอุทกพลศาสตร์ เพื่อให้เข้าใจถึงกลไกการทำงานของกระบวนการดูดซึมในรูปของฟองอากาศซึ่งจะเป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการประยุกต์ใช้ในทางอุตสาหกรรมต่อไป

2.4 ตัวแปรการถ่ายเทมวลสารในกระบวนการดูดซึม (Mass transfer parameters)

ในกระบวนการดูดซึมระบบสองเฟสที่จะพิจารณา คือ ระบบที่ประกอบด้วยเฟสก๊าซสัมผัสของเหลว โดยเฟสก๊าซ คือ สารอินทรีย์ระเหยในรูปของฟองอากาศ เช่น ไอระเหยของเมทานอล ส่วนเฟสของเหลว คือ น้ำ ซึ่งเมื่อทั้งสองเฟสสัมผัสกันเมทานอลซึ่งละลายน้ำได้ก็จะถูกถ่ายเทไปยังน้ำ ส่วนน้ำก็จะถ่ายเทไปยังเฟสก๊าซ ถ้าระบบอยู่ที่อุณหภูมิและความดันคงที่ระบบก็จะเข้าสู่สมดุลไดนามิก (Dynamic equilibrium) ดังนั้นในการที่จะเข้าใจกลไกการถ่ายเทมวลสารมากขึ้นในกระบวนการดูดซึมเพื่อให้ทราบว่าเฟสไหนเป็นเฟสควบคุมจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาทฤษฎีสองความต้านทาน (Two-Resistance theory) ด้วย

2.4.1 ทฤษฎีสองความต้านทาน (Two-Resistance theory)

ทฤษฎีสองความต้านทานนี้เริ่มต้นศึกษาโดย Whitman ซึ่งนำมาใช้อธิบายกลไกการถ่ายเทมวลระหว่างเฟสซึ่งประกอบด้วยสามขั้นตอนคือ

- 1) การถ่ายเทมวลจากภายในเฟสหนึ่งไปยังผิวสัมผัสระหว่างเฟส
- 2) การถ่ายเทมวลข้ามผิวสัมผัสระหว่างเฟส

3) การถ่ายเทมวลจากผิวสัมผัสไปยังภายในเฟสที่สอง

โดยทฤษฎีนี้มีข้อสมมุติฐานสองข้อ คือ

- 1) อัตราการถ่ายเทมวลระหว่างสองเฟสถูกควบคุมโดยการแพร่ผ่านแต่ละเฟส
- 2) ไม่มีความต้านทานการถ่ายเทมวลข้ามชั้นผิวสัมผัส

การถ่ายเทองค์ประกอบ A จากเฟสก๊าซไปยังของเหลวสามารถแสดงดังรูปที่ 2.5 โดยมีเกรเดียนต์ของความดันย่อยระหว่างความดันย่อยในเฟสก๊าซ ($P_{A,G}$) กับความดันย่อยที่ผิวระหว่างเฟสก๊าซและของเหลว ($P_{A,i}$) และมีเกรเดียนต์ความเข้มข้นของของเหลวระหว่างความเข้มข้นในเฟสของเหลว ($C_{A,L}$) กับความเข้มข้นที่ผิวระหว่างเฟสก๊าซและของเหลว ($C_{A,i}$) ส่วน δ_G และ δ_L เป็นความหนาของชั้นขอบเขตในเฟสก๊าซและในเฟสของเหลวตามลำดับ ถ้าไม่มีความต้านทานการถ่ายเทมวลที่ผิวระหว่างเฟสแสดงว่าความเข้มข้นที่สมดุลซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นที่ได้เมื่อทั้งสองเฟสสัมผัสกันเป็นเวลานานมาก ค่าความเข้มข้น $P_{A,i}$ และ $C_{A,i}$ มีความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ ความดันย่อยที่ผิวสัมผัส ($P_{A,i}$) อาจมีค่าน้อยกว่า เท่ากับหรือมากกว่า $C_{A,i}$ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลของระบบนั้นดังรูปที่ 2.5 แสดงกรณีที่กำลังที่เฮนรีมีค่าน้อยกว่าและเท่ากับหนึ่งเมื่อความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลเป็นไปตามกฎของเฮนรี กรณีเป็นการถ่ายเทมวลจากเฟสก๊าซไปยังเฟสของเหลวแล้วจะได้ว่า $C_{A,L} < C_{A,i}$ และ $P_{A,i} < P_{A,G}$ และในกรณีที่เป็นการถ่ายเทมวลจากเฟสของเหลวไปยังก๊าซ จะได้ว่า $C_{A,L} > C_{A,i}$ และ $P_{A,i} < P_{A,G}$

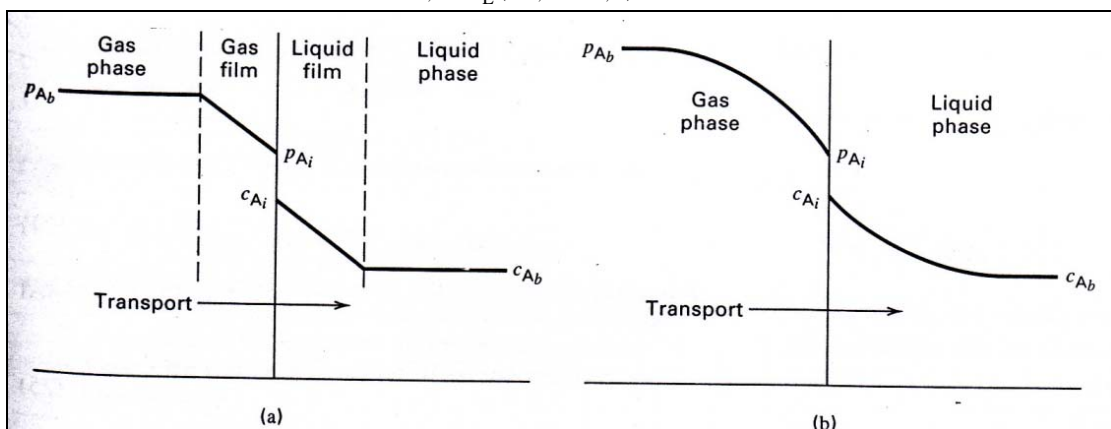
2.4.2 สัมประสิทธิ์การพามวลย่อย (Individual mass-transfer coefficients)

การถ่ายเทมวลขององค์ประกอบ A ระหว่างเฟสที่สภาวะคงตัว ในทิศทาง z สามารถเขียนสมการของฟลักซ์หรืออัตราการแพร่ที่แต่ละด้านของชั้นผิวสัมผัสระหว่างเฟสได้ดังนี้

$$N_{A,z} = k_G (P_{A,G} - P_{A,i}) \quad (2.13)$$

และ

$$N_{A,z} = k_L (C_{A,i} - C_{A,L}) \quad (2.14)$$



รูปที่ 2.5 ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลซึ่งเป็นไปตามกฎของเฮนรี (สุภาภรณ์ มานะรังสรรค์, 2545)

- เมื่อ K_G = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในเฟสก๊าซ
 K_L = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในเฟสของเหลว
 $P_{A,G} - P_{A,i}$ = แรงขับเคลื่อนที่ทำให้เกิดการถ่ายเทมวล A จากภายในก๊าซไปยังผิวสัมผัสระหว่างเฟส
 $C_{A,i} - C_{A,L}$ = แรงขับเคลื่อนที่ทำให้เกิดการถ่ายเทมวล A ที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟสมายังภายในเฟสของเหลว

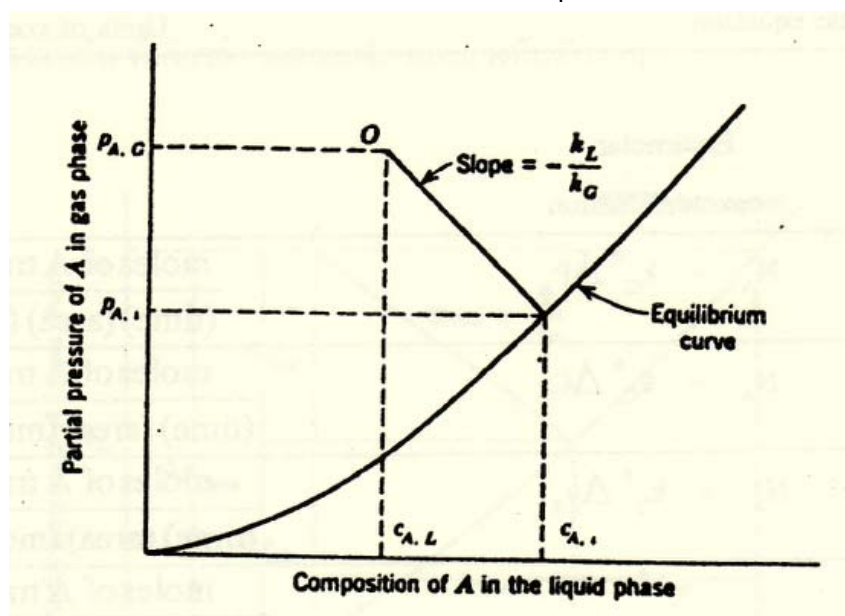
โดยที่สภาวะคงตัว ฟลักซ์เชิงมวลในแต่ละเฟสย่อมมีค่าเท่ากัน ดังนั้นรวมสมการ (2.13) และ (2.14) ได้เป็น

$$N_{A,z} = k_G (P_{A,G} - P_{A,i}) = -k_L (C_{A,L} - C_{A,i}) \quad (2.15)$$

ดังนั้น เมื่อทำการจัดสมการให้อยู่ในรูปอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การพามวลทั้งสอง

$$-\frac{k_L}{k_G} = \frac{P_{A,G} - P_{A,i}}{C_{A,L} - C_{A,i}} \quad (2.16)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันย่อยของเฟสก๊าซและค่าความเข้มข้นขององค์ประกอบ A ดังแสดงในรูปที่ 2.6 เป็นการนำเอาอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การพามวลในสมการ (2.16) ไปใช้เพื่อที่จะหาความเข้มข้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟส จุด O แสดงความเข้มข้นภายในทั้งสองเฟสที่จุดหนึ่งหรือที่ระนาบหนึ่งในเครื่องถ่ายเทมวล เมื่อลากเส้นตรงจากจุด O ที่มีความชัน $-k_L/k_G$ มาตัดเส้นโค้งสมดุล จุดที่ตัดก็คือความเข้มข้นที่ผิวระหว่างเฟสหรือค่าของ $P_{A,i}$, $C_{A,i}$ นั้นเอง ดังนั้นอาจเรียก K_G , K_L ว่าเป็นสัมประสิทธิ์การพามวลย่อยเพราะเป็นค่าที่ระบุเฉพาะเฟสใดเฟสหนึ่ง



รูปที่ 2.6 ความเข้มข้นที่ผิวระหว่างเฟสโดยใช้ทฤษฎีสองความต้านทาน (สุภาภรณ์ มานะรังสรรค์, 2545)

2.4.3 สัมประสิทธิ์การพามวลรวม (Overall Mass-transfer Coefficients)

โดยทั่วไปในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพามวลด้วยสมการ (2.13) และ (2.14) นั้น จะต้องทราบค่าความเข้มข้นและค่าความดันย่อยที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟส (สมดุล) หรือค่าของ $P_{A,i}, C_{A,i}$ ซึ่งไม่สามารถวัดได้ง่ายนัก ดังนั้นวิธีที่ง่ายกว่าคือการหาค่าสัมประสิทธิ์การพามวลรวม (Overall mass transfer coefficients) ซึ่งใช้ค่าแรงขับเคลื่อนที่ความเข้มข้นรวมในทั้งสองเฟส $P_{A,G}, C_{A,L}$ โดยจากนิยามของสัมประสิทธิ์การพามวลรวม ดังแสดงในรูปที่ 2.7

$$N_A = K_G (P_{A,G} - P_A^*) \quad (2.17)$$

เมื่อ

$P_{A,G}$ เป็น ความดันย่อยในเฟสก๊าซ

P_A^* เป็น ความดันย่อยของ A ซึ่งอยู่ในสมดุลกับความเข้มข้นภายในเฟสของเหลว, $C_{A,L}$

K_G คือ สัมประสิทธิ์การพามวลรวมที่คำนวณจากแรงขับดันในรูปแบบผลต่างของความดันย่อย

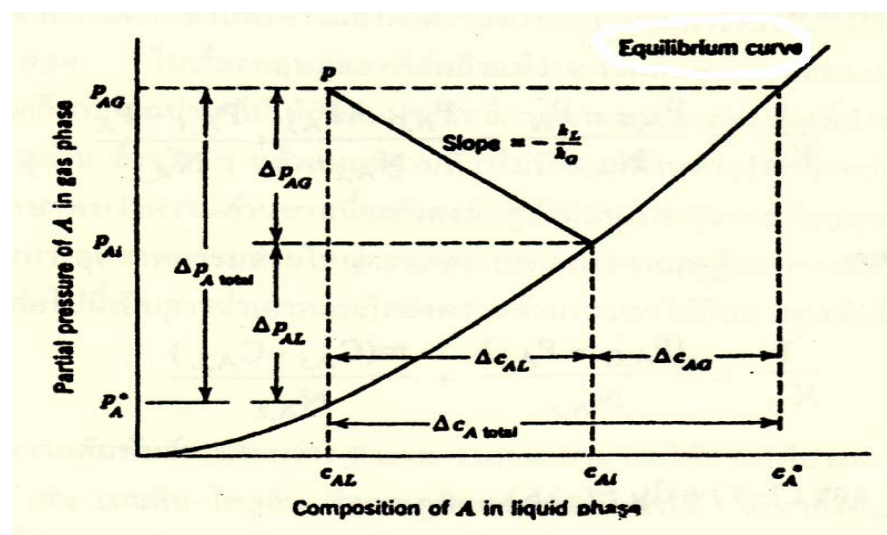
เนื่องจากค่าที่สมดุลระหว่างเฟสก๊าซและเฟสของเหลวที่ความดันและอุณหภูมิหนึ่งจะมีเพียงค่าเดียว ดังนั้น P_A^* (ที่สมดุลกับ $C_{A,L}$) จะสามารถนำมาใช้วัดค่า $C_{A,L}$ ได้ดี

และ

$$N_A = K_L (C_A^* - C_{A,L}) \quad (2.18)$$

เมื่อ C_A^* = ความเข้มข้นของ A ที่อยู่ในสมดุลกับ $P_{A,G}$ ในทำนองเดียวกันค่า $C_{A,L}$ ก็สามารถนำมาใช้วัด ค่า $P_{A,G}$ ได้ดี

K_L = สัมประสิทธิ์การพามวลรวมที่คำนวณจากแรงขับดันในรูปแบบผลต่างของความเข้มข้นในเฟสของเหลว



รูปที่ 2.7 แรงขับเคลื่อนในการถ่ายเทมวล สำหรับทฤษฎีสองความต้านทาน (สุภาภรณ์ มานะรังสรรค์, 2545)

จากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพามวลรวมและสัมประสิทธิ์การพามวลย่อยจะสามารถหาได้เมื่อความสัมพันธ์ที่สมดุลเป็นเส้นตรงดังนี้

$$P_{A,i} = mC_{A,i} \quad (2.19)$$

โดยที่สมการนี้คือสภาวะที่ความเข้มข้นต่ำ (สารละลายเจือจาง) ซึ่งเป็นไปตามกฎของเฮนรี โดยค่า m คือค่าคงที่ของสมการเฮนรี ดังนั้นจากการใช้สมการ (2.19) จะสามารถหาความสัมพันธ์ของความเข้มข้นในเฟสก๊าซและของเหลวได้ดังนี้

$$P_{A,G} = mC_A^* \quad (2.20)$$

และ

$$P_{A,i} = mC_{A,i} \quad (2.21)$$

จากสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม (2.15) จัดสมการ ใหม่จะได้

$$\frac{1}{K_G} = \frac{P_{A,G} - P_A^*}{N_{A,z}} = \frac{P_{A,G} - P_{A,i}}{N_{A,z}} + \frac{P_{A,i} - P_A^*}{N_{A,z}} \quad (2.22)$$

หรือเขียนในเทอมของ m ได้ดังนี้

$$\frac{1}{K_G} = \frac{P_{A,G} - P_{A,i}}{N_{A,z}} + \frac{m(C_{A,i} - C_{A,L})}{N_{A,z}} \quad (2.23)$$

แทนค่าสมการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย (2.13) และ (2.14) ลงใน (2.23) จะได้

$$\frac{1}{K_G} = \frac{1}{k_G} + \frac{m}{k_L} \quad (2.24)$$

ในทำนองเดียวกัน จะได้สมการความสัมพันธ์ของ K_L ดังนี้

$$\frac{1}{K_L} = \frac{C_A^* - C_{A,L}}{N_{A,z}} = \frac{(P_{A,G} - P_{A,i})}{mN_{A,z}} + \frac{(C_{A,i} - C_{A,L})}{N_{A,z}} \quad (2.25)$$

$$\frac{1}{K_L} = \frac{1}{mk_G} + \frac{1}{k_L} \quad (2.26)$$

สมการ (2.25) และ (2.26) แสดงค่าความต้านทานรวมในรูปของความต้านทานย่อยในแต่ละเฟสความต้านทานในแต่ละเฟสขึ้นอยู่กับอัตราการละลายของก๊าซซึ่งแสดงอยู่ในเทอมของ m ในระบบที่ก๊าซละลายน้ำได้ดี เช่น แอมโมเนียหรือเมทานอลกับน้ำ ค่า m จะมีค่าน้อยมาก จากสมการ (2.26) แสดงว่าความต้านทานในเฟสของเหลวมีค่าน้อยมากหรือสรุปได้ว่าความต้านทานส่วนใหญ่ของระบบอยู่ในเฟสก๊าซนั่นเองซึ่งเรียกว่าเป็นระบบที่ถูกรควบคุมด้วยเฟสก๊าซ (Gas phase controlled)

ในทางตรงกันข้ามถ้าก๊าซละลายน้ำได้น้อยมาก เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำหรือเบนซีนค่า m จะมีค่ามาก จากสมการ (2.26) แสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานในเฟสก๊าซมีค่าน้อยมาก ดังนั้น สัมประสิทธิ์การพามวลรวม (K_L) มีค่าพอๆ กับสัมประสิทธิ์การพามวลย่อยในเฟสของเหลว (K_G) ซึ่งเรียกระบบนี้ว่าถูกควบคุมด้วยเฟสของเหลว (Liquid phase controlled) ในบางระบบ ความสำคัญของความต้านทานในแต่ละเฟสอาจจะพอๆ กันและต้องนำมาพิจารณาทั้งคู่ในการคำนวณความต้านทานรวม

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การพามวลย่อยในแต่ละเฟส, K_L และ K_G เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของสารแพร่ ธรรมชาติของเฟสตัวกลางและสภาวะการไหลของเฟส ถึงแม้ว่าค่า K_G จะไม่ขึ้นกับความเข้มข้นก็ตามแต่ค่าสัมประสิทธิ์การพามวลรวม (K_G) จะแปรตามค่าความเข้มข้นถ้าเส้นโค้งสมดุลไม่เป็นเส้นตรงซึ่งในกรณีของ K_L ก็เช่นเดียวกัน ด้วยเหตุนี้ค่าสัมประสิทธิ์การพามวลรวม (K_G และ K_L) จึงควรใช้เฉพาะในสมการที่คล้ายคลึงหรือใกล้เคียงกับสภาวะที่มันถูกวัดและไม่ควรใช้ที่ช่วงความเข้มข้นอื่นยกเว้นว่าเส้นกราฟสมดุลเป็นเส้นตรงตลอดช่วงที่เราสนใจ

2.4.4 สมดุลของเฟสก๊าซ – เฟสของเหลว ของสารอินทรีย์ระเหย

การหาค่าความสมดุลของเฟสก๊าซและเฟสของเหลวมีหลายวิธีด้วยกัน วิธีหนึ่งที่สามารถทำได้และนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ คือ การหาความเข้มข้นของเฟสก๊าซที่เวลาต่างๆ และใช้สมการคำนวณสมดุลเฟสก๊าซเท่ากับเฟสของเหลวของถังปฏิกรณ์แบบกะขนาดเล็ก (Semi-Batch reactor) ดังนี้

$$Q_g C_{g,in} = Q_g C_{g,out}(t) + V_L \frac{dC_L(t)}{dt} \quad (2.27)$$

ดังนั้นความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยในเฟสของเหลว $C_L(t)$ สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$C_L(t) = \frac{Q_g}{V_L} (C_{g,in} t - \int C_{g,out}(t) dt) \quad (2.28)$$

เมื่อ

Q_g = อัตราการไหลของก๊าซ

V_L = ปริมาตรของตัวดูดซึม

$C_{g(in)}$ = ความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ต้องการศึกษาในเฟสก๊าซของขาเข้า

$C_{g(out)}$ = ความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ต้องการศึกษาในเฟสก๊าซของขาออก

$C_L(t)$ = ความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ต้องการศึกษาในของเหลวที่เวลาต่างๆ

จากสมการนี้จะทราบถึงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยในเฟสของเหลวที่เวลาต่างๆ ของสารอินทรีย์ระเหย รวมถึงความเข้มข้นที่สารดูดซึมอิ่มตัว (Saturation concentration in liquid

phase) นอกจากนี้เรายังสามารถใช้สมการ (2.28) ซึ่งเป็นการถ่ายเทมวลสารจากเฟสก๊าซไปสู่เฟสของเหลว สำหรับกรณีที่องค์ประกอบที่ต้องการศึกษาเป็นสารอินทรีย์ระเหยโดยสมมติให้ไม่มีการทำปฏิกิริยาโดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสของเหลว (Overall mass transfer coefficient in liquid phase, $K_L a$) สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$\frac{dC_L}{dt} = k_L a (C_L^s - C_L) \quad (2.29)$$

เมื่อ

C_L = ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยที่เวลาต่างๆ ในเฟสของเหลว

C_L^s = ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยที่อิ่มตัวในเฟสของเหลว

a = พื้นผิวสัมผัสจำเพาะ (ตารางเมตรต่อปริมาตร)

2.5 ตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองก๊าซ (Bubble hydrodynamic parameters)

เนื่องจากตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศจัดเป็นอีกหนึ่งตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยด้วยวิธีการดูดซับดังที่กล่าวถึงข้างต้น ดังนั้นในส่วนนี้จะกล่าวถึงตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ลักษณะทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศในระบบซึ่งสามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (Interfacial area) ของฟองอากาศในระบบบำบัดได้ต่อไป

2.5.1 ขนาดฟองอากาศ (Bubble diameter: D_B)

การวัดขนาดฟองอากาศที่อัตราไหลของก๊าซ (Q_g) ใดๆ สามารถทำได้โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย (Image treatment techniques) ทำการเก็บและวิเคราะห์ภาพของฟองอากาศจำนวน 200-300 ฟอง ต่อการศึกษาที่อัตราการไหลของก๊าซ (Q_g) ต่างๆ เพื่อให้ได้ค่าที่เป็นตัวแทนที่น่าเชื่อถือทางสถิติ โดยในงานวิจัยนี้ขนาดฟองอากาศโดยเฉลี่ย (d_{avg}) และค่าฟองอากาศแบบ Sauter diameter (d_{32}) คำนวณได้จากสมการ 2.30 และ 2.31 ตามลำดับ

$$d_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^N d_i}{N} \quad (2.30)$$

$$d_{32} = \frac{\sum_{i=1}^N d_i^3}{\sum_{i=1}^N d_i^2} \quad (2.31)$$

นอกจากนี้ขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้น ยังได้จากโมเดลทางคณิตศาสตร์ ดังตาราง 2.4

ตาราง 2.4 โมเดลทางคณิตศาสตร์คำนวณขนาดฟองอากาศ (PainmanaKul และคณะ, 2005)

No.	Correlation for predicting bubble size	Conditions
1	$d_B = \left(\frac{6d_0 \sigma g_c}{g \Delta \rho} \right)^{1/3}$	$Q_{go} < \left[\frac{20(\sigma d_0 g_c)^5}{(g \Delta \rho)^2 \rho_L^3} \right]^{1/6}$
2	$d_B = 0.0287 d_0^{1/2} \text{Re}^{1/3}$	$\text{Re} < 2100$
3	$d_B = \left(\frac{72 \rho_L}{\pi^2 g \Delta \rho} \right)^{1/5} Q_{g0}^{0.4}$	-
4	$d_B = 7.1 \times 10^{-4} \Delta P^{0.328}$	-
5	$d_B = 15.73 \times 10^{-3} D_c^{0.32} \left(\frac{Q_g}{A_{or}} \right)^{0.16}$	-
6	$d_B = 1.56 \text{Re}^{0.058} \left(\frac{d_0^2 \sigma}{\Delta \rho g} \right)^{1/4}$	$1 < \text{Re} < 10$
	$d_B = 0.32 \text{Re}^{0.425} \left(\frac{d_0^2 \sigma}{\Delta \rho g} \right)^{1/4}$	$10 < \text{Re} < 21000$
7	$\frac{g \rho_L d_B^2}{\sigma} = 8.8 \left(\frac{u_G \mu_L}{\sigma} \right)^{-0.04} \left(\frac{\sigma^3 \rho_L}{g \mu_L^4} \right)^{-0.12} \left(\frac{\rho_L}{\rho_G} \right)^{0.22}$	

2.5.2 ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (Bubble rising velocity: U_B)

จาก PainmanaKul และคณะ (2005) ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศหาได้จากการทดลองโดยใช้กล้องถ่ายภาพฟองอากาศที่ลอยตัวขึ้นในถังปฏิกรณ์เพื่อวิเคราะห์หาระยะทางที่ฟองอากาศลอยขึ้น (ΔD) ณ ช่วงเวลาหนึ่งๆ หรือ ณ ช่วงเวลาการเก็บภาพของกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง (t_{frame}) โดยค่าของความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (U_B) สามารถหาได้สมการ 2.32

$$U_B = \frac{\Delta D}{t_{\text{frame}}} \quad (2.32)$$

เมื่อ

U_B = ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (Bubble rising velocity)

ΔD = ระยะทางที่ฟองอากาศลอยขึ้น

t_{frame} = ช่วงเวลาการเก็บภาพของกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง

นอกจากการหาความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศด้วยการทดลองแล้วสามารถวิเคราะห์ค่าความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (U_B) ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการ

ลอยตัวและขนาดของฟองอากาศจากการศึกษาของ Grace และ Wairegi, 1986 รวมไปถึงโมเดลทางคณิตศาสตร์ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตาราง 2.5 โมเดลทางคณิตศาสตร์คำนวณความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (PainmanaKul และคณะ, 2005)

No.	Correlation for predicting bubble rising velocity	Conditions
1	$U_B = \frac{g\Delta\rho d_B^2}{12\mu_L}$	$Re < 250, \frac{\mu_G}{\mu_L} = 0$
2	$U_B = \frac{g\Delta\rho d_B^2}{18\mu_L}$	$Re < 250, \frac{\mu_G}{\mu_L} \rightarrow \infty$
3	$U_B = \frac{\mu_L}{\rho_L d_B} (J - 0.857) M_o^{-0.149}$	$250 < Re < 6000$
4	$U_B = \left(\frac{2}{d_B r} + 0.5 d_B g \right)^{0.5}$	$0.2 \leq d_B \leq 8cm$
5	Experimental curve for predicting the bubble rising velocity	

2.5.3 ความถี่ในการเกิดฟอง (bubble formation frequency: f_b)

ความถี่ในการเกิดฟอง คือ จำนวนฟองที่เกิดขึ้นในเวลา 1 วินาที ซึ่งคำนวณจากจำนวนรูเดิมอากาศคูณกับอัตราการไหลของก๊าซต่อหนึ่งรูเดิมอากาศแล้วหารด้วยปริมาตรของฟองอากาศ ดังสมการ 2.33 (PainmanaKul และ คณะ, 2005)

$$f_B = \frac{N_{OR} \times q}{V_B} \quad (2.33)$$

เมื่อ	f_b	=	ความถี่ในการเกิดฟอง (bubble formation frequency, s^{-1})
	N_{OR}	=	จำนวนรูเดิมอากาศ (number of orifices)
	q	=	อัตราการไหลของก๊าซที่ผ่านรู (gas flow rate through the orifice, m^3/s)
	V_B	=	ปริมาตรของฟองอากาศ (bubble volume, m^3)

2.5.4 พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (Specific interfacial area: a)

พื้นที่ผิวสัมผัสในการถ่ายเทมวลสาร (Specific interfacial area, a) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการศึกษาการถ่ายเทมวลสาร โดยเป็นส่วนระหว่างพื้นที่ผิวในการถ่ายเทมวลสารทั้งหมดของฟองอากาศต่อปริมาตรของถังปฏิกรณ์ ณ เวลาใดๆ ทั้งนี้ เนื่องจากข้อจำกัดในด้านวิธีการวิเคราะห์ผล เช่น วิธีทางเคมี (Chemical Method) รวมไปถึงตัวแปรที่เกี่ยวข้องจำนวนมาก เช่น ขนาดของถังปฏิกรณ์ ชนิดตัวเติมอากาศ สภาพแวดล้อมในการทำงาน ดังนั้น ในทางปฏิบัติ จึงมักรวมค่า a นี้ไว้กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย (Mass transfer coefficient) และวัดค่ารวมกันเพื่อพิจารณาความสามารถในการถ่ายเทมวลสารผ่านผิวสัมผัสระหว่างเฟสก๊าซและของเหลว

ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจถึงกลไกในการถ่ายเทมวลสารของอุปกรณ์สร้างฟองอากาศที่เลือกใช้นั้น ในงานวิจัยนี้ จึงทำการวิเคราะห์ค่า a และ K_L ออกจากกัน โดยที่ค่าของ a สามารถหาจากจำนวนฟองอากาศคูณกับพื้นที่ผิวของฟองอากาศโดยให้คิดจากฟองอากาศเป็นทรงกลมแล้วหารด้วยปริมาตรของถังปฏิกรณ์ซึ่งก็คือปริมาตรของน้ำรวมกับปริมาตรของอากาศ สำหรับการคำนวณจำนวนฟองอากาศ (N_B) นั้นคำนวณจากความถี่ในการเกิดฟอง (f_B) คูณกับระยะเวลาที่ฟองอากาศอยู่ในถังปฏิกรณ์ของฟองอากาศหนึ่งๆ ในถังปฏิกรณ์ดังสมการ 2.34 และค่าของ a หาได้จากสมการ 2.35

$$N_B = f_B \times \frac{H_L}{U_B} \quad (2.34)$$

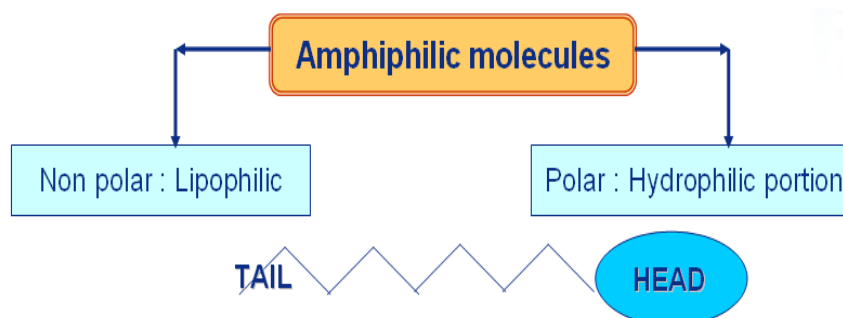
$$a = N_B \times \frac{S_B}{V_{Total}} = f_B \times \frac{H_L}{U_B} \times \frac{\pi D_B^2}{A H_L + N_B V_B} \quad (2.35)$$

เมื่อ

- a = พื้นที่ผิวสัมผัสในการถ่ายเทมวลสาร (Specific interfacial area, m^{-1})
- N_B = จำนวนฟองที่เกิด (number of bubbles generated)
- S_B = พื้นที่ผิวของฟองทั้งหมด (total bubble surface, m^2)
- V_{Total} = ปริมาตรของถังปฏิกรณ์ทั้งหมด (total volume in reactor, m^3)
- f_B = ความถี่ในการเกิดฟอง (bubble formation frequency, s^{-1})
- H_L = ความสูงของของเหลว (liquid height, m)
- U_B = ความเร็วที่เกิดฟอง (bubble rising velocity, m/s)
- D_B = เส้นผ่านศูนย์กลางฟอง (bubble diameter, m)
- A = พื้นที่หน้าตัดของถังปฏิกรณ์ (cross - sectional area of reactor, m^2)
- V_B = ปริมาตรฟอง (bubble volume, m^3)

2.6 สารลดแรงตึงผิว (Surfactant)

สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) เป็นสารที่เมื่อละลายน้ำแล้วจะช่วยลดแรงตึงผิวของน้ำซึ่งมีคุณลักษณะที่สำคัญ คือ โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะถูกเรียกว่าเป็น Amphiphilic molecules เนื่องจากในหนึ่งโมเลกุลจะประกอบด้วยทั้งส่วนที่มีขั้วและชอบน้ำ (Polar: Hydrophilic portion) ส่วนนี้จะอยู่ที่ส่วนหัวและส่วนที่ไม่มีขั้วและไม่ชอบน้ำ (Non polar: Lipophilic) ในส่วนนี้จะอยู่ที่ส่วนหางโดยแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ลักษณะของสารลดแรงตึงผิว (Rosen, 2004)

หลักการการทำงานของสารลดแรงตึงผิวคือ ส่วนที่ชอบน้ำจะทำการจับน้ำและส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (ชอบน้ำมัน) จะทำการจับสิ่งสกปรกพวกไขมันที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ทำให้สิ่งสกปรกหลุดออกไปแล้วแขวนลอยอยู่ในน้ำ สารลดแรงตึงผิวแบ่งออกเป็นหลายกลุ่มขึ้นอยู่กับประจุไฟฟ้าบนส่วนประกอบที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) โดยสามารถแยกได้เป็น 4 ประเภทได้แก่

1) สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ (Anionic surfactant)

เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ประจุไฟฟ้าบนส่วนหัวที่ชอบน้ำ ให้ประจุลบ ส่วนมากแสดงอยู่ในรูป คาร์บอกซีเลต (Carboxylate), ซัลเฟต (Sulfate), ซัลฟอนेट (Sulfonate) หรือ ฟอสเฟต (Phosphate) สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้ใช้มากในอุตสาหกรรมประเภทผงซักฟอก ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด น้ำยาล้างแชม เป็นต้น โดยใช้มากถึง 49 เปอร์เซ็นต์ ของสารลดแรงตึงผิวทั้งหมด เนื่องจากสามารถใช้จัดคราบสกปรกได้ดี

2) สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก (Cationic surfactant)

เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ประจุไฟฟ้าบนส่วนหัวที่ชอบน้ำให้ประจุบวก สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้จะไม่สามารถทำงานได้ในสภาวะแวดล้อมที่เป็นด่างสูง (พีเอช 10-11) เนื่องจากเกลือแอมโมเนียมจะมีการสูญเสียประจุบวกทำให้เกิดการตกตะกอนได้ สารลดแรงตึงผิวประเภทประจุบวก จะทำให้เกิดการระคายเคืองมากกว่าสารลดแรงตึงผิวประเภทประจุลบ นิยมใช้ในพวกน้ำยาปรับผ้านุ่ม ครีมนวดผมและผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับการจัดแต่งทรงผม เป็นต้น

3) สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (Nonionic surfactant)

สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้จะต่างจากสารลดแรงตึงผิวประเภทประจุลบและประจุบวกตรงที่เป็นโมเลกุลที่ไม่มีประจุ โดยมีพอลิเอเธอร์ (Polyether) หรือโพลีไฮดรอกซิล (Polyhydroxyl) เป็นกลุ่มที่แสดงคุณสมบัติคล้ายพวกที่มีประจุ ใช้มากในผงซักฟอก น้ำยาล้างถ้วยชาม ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดพื้นผิว เป็นต้น

4) สารลดแรงตึงผิวที่มีทั้งประจุบวกและประจุลบ (Amphoteric surfactant หรือ Zwitterions)

เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ประจุไฟฟ้าบนส่วนหัวที่ชอบน้ำ สามารถให้ได้ทั้งประจุบวกและประจุลบ โดยจะแสดงคุณสมบัติประเภทใดขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นกรดเป็นด่างของสภาวะแวดล้อม ถ้าสภาวะแวดล้อมเป็นด่างประจุไฟฟ้าบนส่วนหัวที่ชอบน้ำจะให้ประจุลบ ถ้าสภาวะแวดล้อมเป็นกรดประจุไฟฟ้าบนส่วนหัวที่ชอบน้ำจะให้ประจุบวกและในสภาวะที่เป็นกลางจะไม่เกิดการให้ประจุไฟฟ้าบนส่วนหัวที่ชอบน้ำ สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับผิวหรือผม ในปัจจุบันยังใช้น้อยกว่าสารลดแรงตึงผิวประเภทอื่น

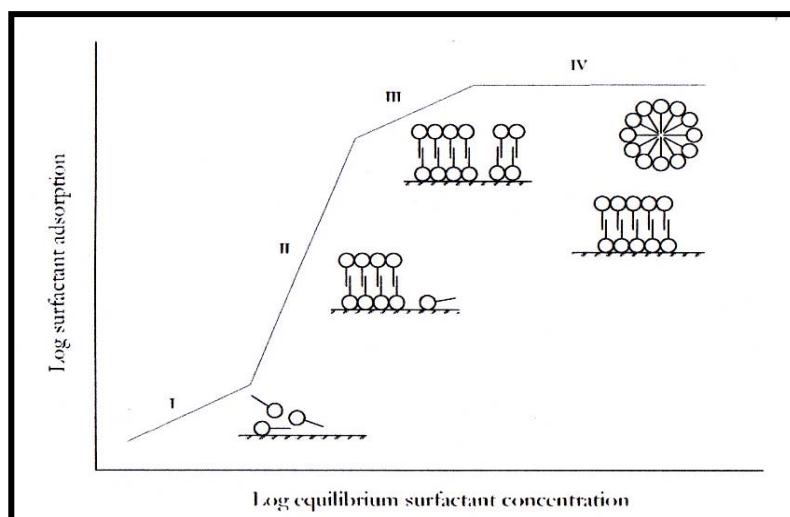
นอกจากนี้จะพบว่ารูปแบบการเรียงตัวของสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) จะขึ้นกับความเข้มข้นของสาร โดยรูปแบบการรวมตัวของสารลดแรงตึงผิวแสดงดังรูปที่ 2.8 โดยแบ่งออกเป็นช่วงต่างๆ ได้ 4 ช่วง ดังต่อไปนี้

1) ช่วงที่ 1 ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวมีความเข้มข้นต่ำ ไม่มีการรวมตัวกันของโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว ในช่วงนี้สารลดแรงตึงผิวจะอยู่อย่างอิสระซึ่งเรียกว่า monomers ดังนั้นการเรียงตัวของสารลดแรงตึงผิวที่จุดเปลี่ยนของความเข้มข้นจากจุดที่ 1 ไปสู่จุดที่ 2 เรียกว่าจุด CAC (Critical admicelle concentration) หรือ HMC (Hemimicelle concentration)

2) ช่วงที่ 2 ในช่วงนี้ความชันของกราฟมีค่าเพิ่มขึ้นจากช่วงที่ 1 เนื่องจากเริ่มมีการรวมตัวของสารลดแรงตึงผิว ในช่วงที่ 2 โดยสารลดแรงตึงผิวมีการรวมตัวกันเรียกว่า Admicell

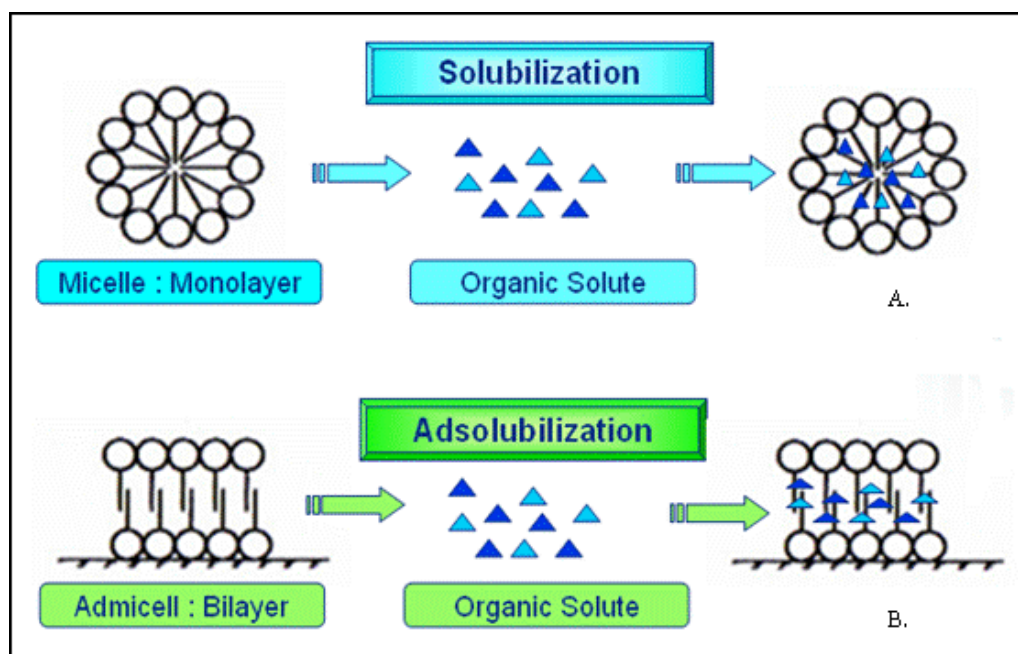
3) ช่วงที่ 3 ในช่วงนี้ความชันลดลงจากช่วงที่ 2 เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการรวมตัวของ Admicell น้อยลงจะพบว่าในช่วง Admicell มีการรวมตัวอย่างหนาแน่น

4) ช่วงที่ 4 ความชันของช่วงนี้ค่อนข้างเป็นเส้นตรงขณะที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้น การมีการรวมตัว Admicelle อย่างหนาแน่น จุดเปลี่ยนความเข้มข้นของช่วงที่ 3 ไปช่วงที่ 4 จุดแรกที่พบการรวมตัวของ Micelle เรียกว่าจุด CMC (Critical micelle concentration)



รูปที่ 2.9 กราฟล็อกแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและการรวมตัวของสารลดแรงตึงผิว (Rosen, 2004)

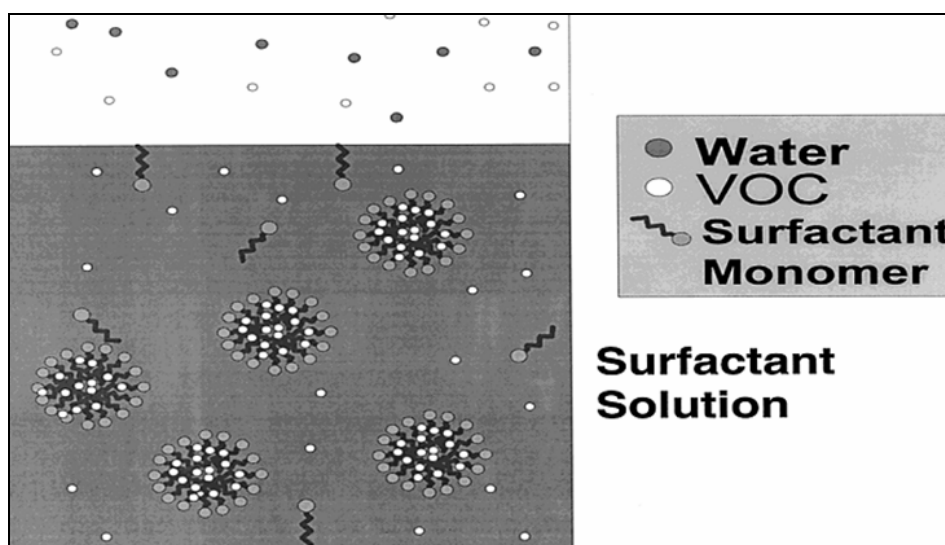
โดยทั่วไปกลไกในการดูดซับสารอินทรีย์จะขึ้นอยู่กับรูปแบบการรวมตัวของสารลดแรงตึงผิวซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.10 โดยพบว่าเมื่อสารลดแรงตึงผิวรวมตัวเป็น Micelle มีลักษณะเป็น Monolayer การดูดซับแสดงดังรูปที่ 2.10A. ในขณะที่พบว่าเมื่อสารลดแรงตึงผิวรวมตัวเป็น Admicelle มีลักษณะเป็น Bi-layer และการดูดซับสารอินทรีย์สามารถแสดงดังรูปที่ 2.10B



รูปที่ 2.10 การดูดซับสารอินทรีย์ของสารลดแรงตึงผิวที่มีการจัดเรียงตัวต่างกัน

(Rosen, 2004)

นอกจากนี้ยังพบว่าสารลดแรงตึงผิวมีคุณสมบัติในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยได้ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว โดยที่ความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้นการรวมตัวของสารลดแรงตึงผิวเป็น Micelle ได้มากขึ้นสามารถดูดซับสารอินทรีย์ระเหยได้มากขึ้นด้วย โดยสารอินทรีย์ระเหยจะถูกดูดซับไว้ที่ส่วนหางเนื่องจากเป็นส่วนที่ไม่ไม่ขี้หรือไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic part)



รูปที่ 2.11 ความสามารถของสารลดแรงตึงผิวในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหย
(Vane และ Giroux, 2000)

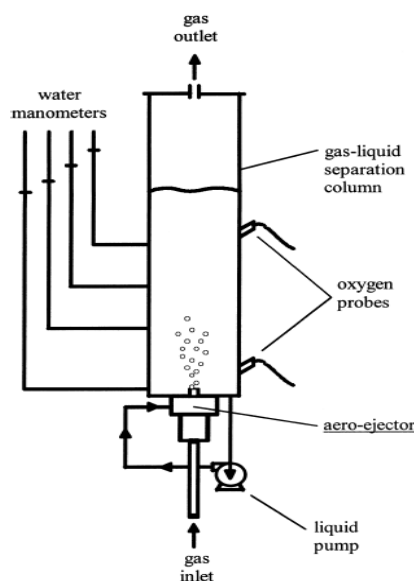
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Billerbeck และคณะ (1999) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารจากเฟสก๊าซไปสู่เฟสของเหลวของอุปกรณ์สร้างฟองอากาศชนิดแอโรอีเจกเตอร์ (Aero-ejector) โดยก๊าซที่นำมาใช้ในการทดลอง คือ ออกซิเจนและสารอินทรีย์ระเหยชนิดเอทานอล โดยที่อุปกรณ์และรูปแบบของการทดลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.12 ในงานวิจัยนี้การถ่ายเทมวลสารของออกซิเจนไปสู่ของเหลว (น้ำ) จะทำการตรวจสอบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสของเหลว (Overall mass transfer coefficient in gas phase, $K_L a$) เนื่องจากออกซิเจนมีค่าความสามารถในการละลายน้ำได้ต่ำเนื่องจากค่า Henry constant สูง เฟสของเหลวเป็นตัวควบคุมการถ่ายเทมวลสารโดยคำนวณค่า $K_L a$ จากสมการ

$$\frac{dC_L}{dt} = k_L a (C_L^* - C_L) \quad (2.36)$$

C_L^* = ความเข้มข้นของออกซิเจนที่อิ่มตัวในเฟสของเหลว (น้ำ)

C_L = ความเข้มข้นของออกซิเจนในเฟสของเหลว (น้ำ)



รูปที่ 2.12 อุปกรณ์สร้างฟองอากาศชนิดแอรออีเจกเตอร์ (Billerbeck และคณะ, 1999)

ในขณะที่ การถ่ายเทมวลสารของสารอินทรีย์ระเหยชนิดเอทานอลไปสู่ของเหลว (น้ำ) จะทำการตรวจสอบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสก๊าซ (Overall mass transfer coefficient in gas phase, $K_G a$) เนื่องจากเอทานอลมีค่าความสามารถในการละลายน้ำได้สูงเนื่องจากค่า Henry constant ต่ำ เฟสก๊าซเป็นตัวควบคุมการถ่ายเทมวลสาร โดยคำนวณค่า $K_L a$ จากสมการ

$$K_G a = \frac{Q_G}{V_L} \ln \left(1 - \frac{m V_L}{Q_G C_{Gin}} \right) \quad (2.37)$$

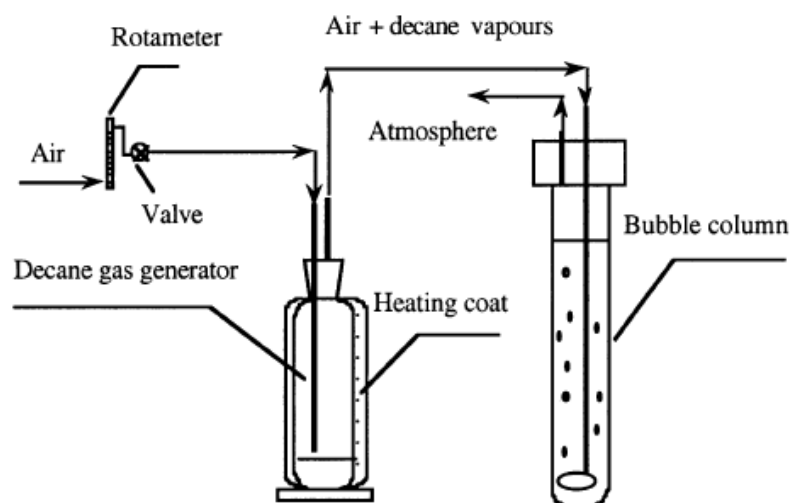
Q_g = อัตราการไหลของก๊าซ

V_L = ปริมาตรของตัวดูดซึม

$C_{g(in)}$ = ความเข้มข้นของเอทานอลในเฟสก๊าซของขาเข้าถึงปฏิกิริยา

สำหรับผลการทดลองพบว่า อุปกรณ์แอรออีเจกเตอร์ (Aero-Ejector) มีประสิทธิภาพสูงในการถ่ายเทมวลสารจากเฟสก๊าซไปสู่เฟสของเหลว โดยให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยสูงกว่า 90% นอกจากนี้ในการถ่ายเทมวลสารจากระบวนการดูดซึมหดงกล่าวพบว่าออกซิเจนถูกควบคุมโดยเฟสของเหลวและเอทานอลถูกควบคุมโดยเฟสก๊าซ อย่างไรก็ตามกล่าวได้ว่าตัวแปรทางด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์ดังกล่าวจัดเป็นประเด็นที่ควรนำมาพิจารณาควบคู่ไปกับค่าความดันลดที่เกิดขึ้นเพื่อสามารถวิเคราะห์กลไกการทำงานของอุปกรณ์และความเหมาะสมในการประยุกต์ นอกจากนี้จากงานวิจัยนี้สามารถนำสมการในค่าการถ่ายเทมวลสารมาประยุกต์ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์สำหรับสารอินทรีย์ระเหยชนิดที่ละลายในน้ำได้มากและน้อยต่อไป

Peeva และคณะ (2001) งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารของสารอินทรีย์ระเหยในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (Bubble column) โดยตรวจสอบการถ่ายเทมวลสารของ n-decane ในอิมัลชันน้ำปนเปื้อนน้ำมัน (น้ำประปาผสมซิลิโคนออยล์) โดยในงานวิจัยนี้ n-decane ถูกเลือกเป็นตัวแทนของสารอินทรีย์ระเหยชนิดที่ละลายน้ำได้น้อย สำหรับอัตราการไหลของก๊าซที่ใช้ในการพาอากาศเข้าสู่อุปกรณ์ก่อกำเนิดสารอินทรีย์ระเหยในการทดลองเข้าสู่ถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศในการทดลองนี้ คือ 6×10^{-3} และ 12×10^{-3} ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที โดยที่รูปแบบการทดลองในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 2.13

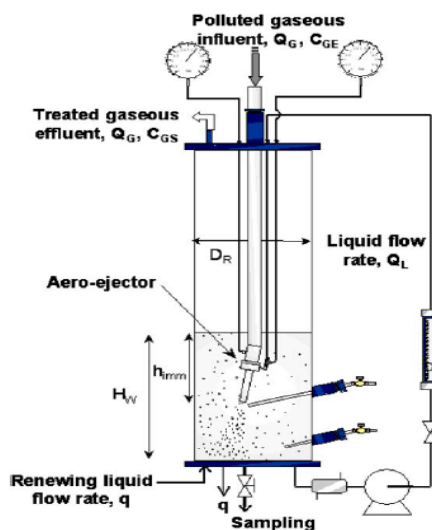


รูปที่ 2.13 ถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (Peeva และคณะ, 2001)

สำหรับผลการทดลองพบว่า การถ่ายเทมวลสารของสารอินทรีย์ระเหยชนิด n-decane เข้าสู่เฟสของเหลว คือ อิมัลชัน ไม่ได้ขึ้นกับสัดส่วนของอิมัลชันที่เลือกใช้เนื่องจากสารอินทรีย์ระเหยชนิด n-decane สามารถละลายในซิลิโคนออยล์ได้ดีโดยประสิทธิภาพในการบำบัดมีประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 70 นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้อิมัลชันชนิดซิลิโคนออยล์เป็นตัวทำละลายในการดักจับสารอินทรีย์ระเหยที่ละลายน้ำได้น้อยนั้นสามารถส่งผลดีต่อการบำบัดต่อเนื่องด้วยวิธีทางชีวภาพในขั้นตอนต่อไปซึ่งจัดเป็นกระบวนการจัดการกับสารอินทรีย์ระเหยได้อย่างสมบูรณ์และราคาต่ำเมื่อเทียบกับวิธีการบำบัดอื่นๆ

Deleris และคณะ (2006) วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อพัฒนาปรับปรุงประสิทธิภาพของแอโรอีเจกเตอร์ (aero-ejector) เพื่อให้เกิดการสัมผัสระหว่างเฟสก๊าซและเฟสของเหลวที่มีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้น สารอินทรีย์ระเหยที่ใช้ในการทดลองมี 3 ชนิด คือ Ethanol (EtOH), Methyl Ethyl Ketone (MEK) and Butyl Acetate (BA) เป็นตัวแทนของสารอินทรีย์ระเหยที่มีค่าความสามารถในการละลายในน้ำได้ต่างกันคือ มาก ปานกลางและน้อย โดยมีค่า Henry's constant เท่ากับ 0.3×10^5 Pa, 3.9×10^5 Pa, 17.9×10^5 Pa ตามลำดับ โดยจะทำการตรวจสอบความเข้มข้น

ของสารอินทรีย์ระเหยโดยใช้อุปกรณ์ก๊าซโครมาโทกราฟีตรวจสอบในเฟสก๊าซ โดยรูปแบบการทดลองในงานวิจัยนี้แสดงในรูปที่ 2.14

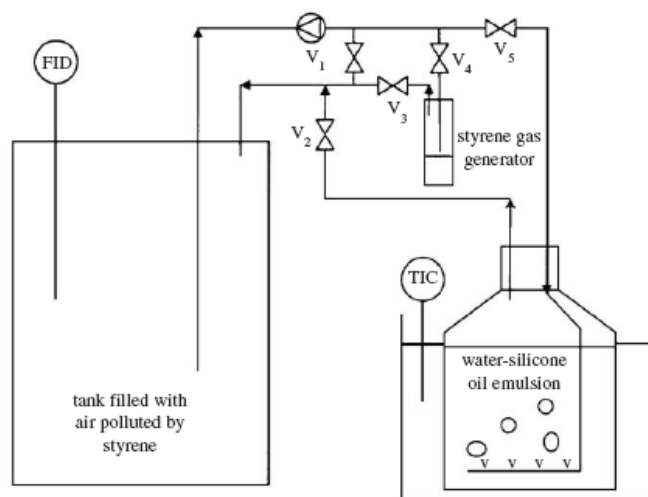


รูปที่ 2.14 การสัมผัสระหว่างเฟสก๊าซและเฟสของเหลวของแอโรอีเจกเตอร์

(Deleris และคณะ, 2006)

สำหรับผลการทดลองพบว่าการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ดังกล่าวสามารถให้ประสิทธิภาพในการบำบัดมลภาวะได้ถึงร้อยละ 90 ในการบำบัดเพียงครั้งเดียว (Single batch) ซึ่งมีสาเหตุมาจากการที่อุปกรณ์ดังกล่าวสามารถสร้างโอกาสในการสัมผัสกันระหว่างเฟสก๊าซและเฟสของเหลวได้สูงขึ้น จากลักษณะการติดตั้งระบบอุปกรณ์สร้างฟองก๊าซ อย่างไรก็ตาม การศึกษาตัวแปรทางด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองก๊าซยังมีความจำเป็นในการวิเคราะห์กลไกการทำงานของอุปกรณ์และความเหมาะสมในการประยุกต์ โดยควรพิจารณาถึงผลกระทบจากการเลือกใช้อัตราการไหลของก๊าซ อุปกรณ์สร้างฟองก๊าซ ซึ่งสามารถส่งผลต่อตัวแปรทางด้านอุทกพลศาสตร์และประสิทธิภาพการบำบัดในท้ายที่สุด

Dumont และคณะ (2006) จุดประสงค์ในงานวิจัย คือ การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสของเหลว (Volumetric mass transfer coefficients; $K_L a$) ของสไตรีนและออกซิเจน (Oxygen) ในอิมัลชัน (น้ำผสมน้ำมัน) โดยใช้วิธีแบบจลศาสตร์ (Dynamic method) โดยในการทดลองนี้เลือกใช้อัตราการไหลของก๊าซคงที่และศึกษาผลกระทบจากสัดส่วนของปริมาณน้ำมันในอิมัลชันต่างกันคือ สัดส่วนร้อยละ 1 – 10 สำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้สามารถแสดงดังรูปที่ 2.15

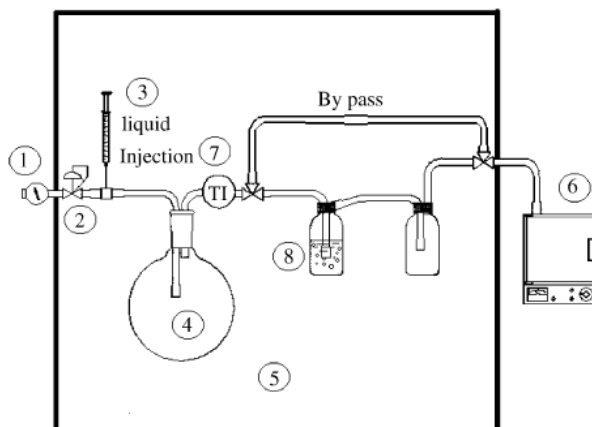


รูปที่ 2.15 ถึงปฏิบัติการทดลองสไตรีนและออกซิเจนในอิมัลชัน (Dumont และคณะ, 2006)

สำหรับผลการทดลองพบว่า การปนเปื้อนของน้ำมันในปริมาณต่ำในอิมัลชันส่งผลต่อความสามารถในการถ่ายเทมวลสารของออกซิเจนที่ลดลงกว่าร้อยละ 25 โดยมีสาเหตุมาจากความต้านทานในการถ่ายเทมวลสารที่เพิ่มสูงขึ้นซึ่งส่งผลเสียต่อกระบวนการทางด้านชีวภาพต่างๆ ทำให้ต้องใช้เวลาในการทำงานนานขึ้น รวมไปถึงค่าใช้จ่ายในการเติมอากาศที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ยังพบอีกว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนของน้ำมันในอิมัลชันที่สูงขึ้น (สูงกว่าร้อยละ 5) กลับส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่เพิ่มสูงขึ้น สำหรับการถ่ายเทมวลสารของสไตรีนซึ่งละลายได้ดีในส่วนที่ไม่มีขี้ (น้ำมัน) ในอิมัลชันพบว่าสามารถเพิ่มความสามารถในการดักจับสารอินทรีย์ระเหยประเภทสไตรีนได้สูงกว่าการใช้น้ำเป็นสารตัวทำละลาย โดยที่ความสามารถในการถ่ายเทมวลสารดังกล่าวไม่ขึ้นกับสัดส่วนของน้ำมันในอิมัลชัน ดังนั้นกล่าวได้ว่า การเติมปริมาณน้ำมันลงในเฟสน้ำในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดเป็นอิมัลชันประมาณร้อยละ 10 (เนื่องจากราคาของซิลิโคนออยล์ค่อนข้างสูง) สามารถช่วยในการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทมวลสารของทั้งออกซิเจนและสารอินทรีย์ระเหย (ในงานวิจัยนี้คือสไตรีน) ซึ่งส่งผลดีต่อการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยด้วยวิธีทางชีวภาพต่อไป นอกจากนี้อุปกรณ์สร้างสารอินทรีย์ระเหยในรูปของฟองอากาศที่ใช้ในงานวิจัยนี้ยังน่าสนใจที่จะนำมาประยุกต์ใช้สำหรับงานวิจัยอีกด้วย

Heymes และคณะ (2006) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาระบวนการดูดซับสารอินทรีย์ระเหย โดยใช้สาร โทลูอินเป็นตัวแทนของสารอินทรีย์ระเหยชนิดที่ละลายน้ำน้อย โดยสาเหตุที่เลือกใช้สาร โทลูอินในการศึกษาเนื่องจากเป็นสารเคมีที่มีอันตรายแต่มีการใช้ในอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก โดยศึกษาถึงผลกระทบของสารดูดซับที่มีผลต่อประสิทธิภาพในบำบัดสารอินทรีย์ระเหย โดยในงานวิจัยนี้สารดูดซับที่เลือกใช้มี 4 ชนิดคือ (1) polyethylene glycols, (2)

phthalates (3) adipates and (4) silicon oil โดยที่รูปแบบของการทดลองในงานวิจัยนี้ แสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ถึงปฏิกรณ์แบบกึ่งทีละเท (Heymes และคณะ, 2006)

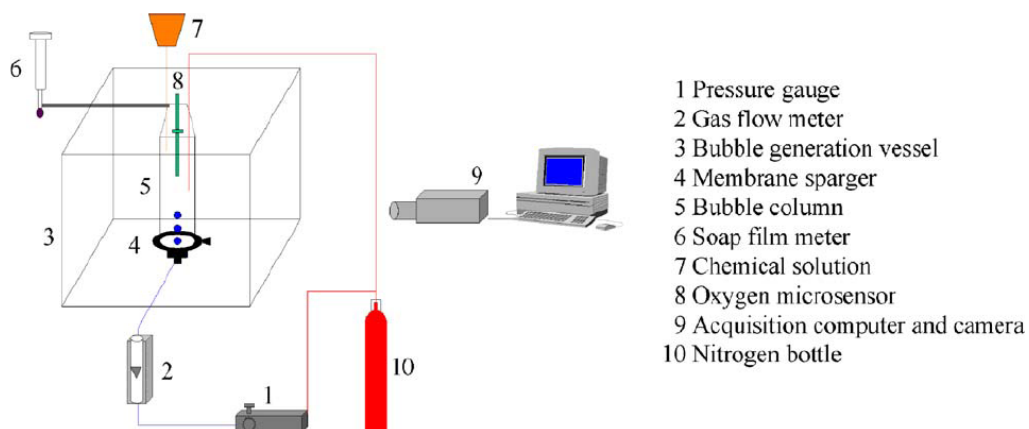
โดยประยุกต์ใช้สมการระหว่างเฟสก๊าซและเฟสของเหลวในถึงปฏิกรณ์แบบกึ่งทีละเท (Semi-batch reactor) ร่วมกับการวิเคราะห์ห้ปริมาณความเข้มข้นของเฟสก๊าซที่เวลาต่างๆ โดยใช้ อุปกรณ์ก๊าซโครมาโทกราฟี เพื่อคำนวณค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยในเฟสของเหลวโดยสามารถแสดงได้ดังสมการด้านล่าง

$$C_L(t) = \frac{Q_g}{V_L} (C_{g,in}t - \int C_{g,out}(t)dt) \quad (2.38)$$

ทั้งนี้จากค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยในเฟสของเหลวที่คำนวณได้ สามารถนำไปใช้ในการหาค่าความเข้มข้นที่อิ่มตัวในเฟสของเหลวรวมไปถึงค่าคงที่ของเฮนรี (Henry constant) และค่าสัมประสิทธิ์ของกระบวนการ (Activity coefficient) ซึ่งจากค่าต่างๆ ที่ได้มานั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาและเปรียบเทียบกลไกการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยด้วยวิธีการดูดซับรวมไปถึงใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้สารดูดซับ (Solvent) ต่อไป โดยในงานวิจัยนี้พบว่าสารดูดซับประเภท Adipates ซึ่งมีค่าคงที่ของเฮนรีสูงที่สุดจัดเป็นตัวดูดซับที่ดีที่สุดซึ่งสามารถดูดซับสารอินทรีย์ระเหยชนิดอโรมาติกและคลอรีเนทได้ดีที่สุด

Sardeing และคณะ (2006) งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีการแยกศึกษาค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของสารลดแรงตึงผิวต่อการเติมอากาศ โดยตัวแปรที่ศึกษาในการถ่ายเทมวลสาร คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม (K_La) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยของเฟสน้ำ (K_L) ในขณะที่ตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ที่ศึกษา ได้แก่ ขนาดฟองอากาศ ความถี่ในการเกิดฟองอากาศ ความเร็วในลอยตัวของ

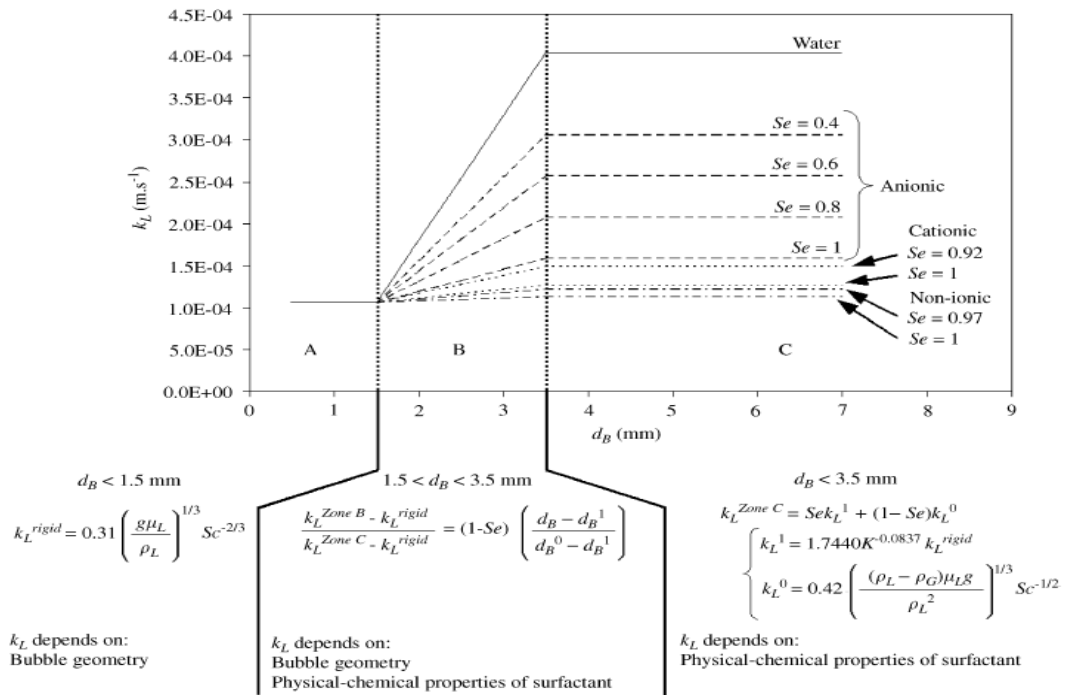
ฟองอากาศ และค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ เป็นต้น โดยสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการทดลองนี้ คือน้ำประปาและสารละลายของสารลดแรงตึงผิว ได้แก่ชนิดประจุลบ (Anionic surfactant) ชนิดประจุบวก (Cationic surfactant) และชนิดไม่มีประจุ (Non-ionic surfactant) ที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยทำการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (Bubble reactor) โดยใช้อุปกรณ์เติมอากาศแบบยืดหยุ่น (Elastic membrane) โดยให้กำเนิดฟองแบบรูเดียว (Single orifice) และรูปแบบการทดลองในงานวิจัยนี้แสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 อุปกรณ์เติมอากาศแบบยืดหยุ่นโดยให้กำเนิดฟองแบบรูเดียว

(Sardeing และคณะ, 2006)

สำหรับผลการทดลองพบว่า การปนเปื้อนของสารลดแรงตึงผิวส่งผลต่อตัวแปรทั้งในด้านการถ่ายเทมวลสารและในด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ โดยที่ค่าแรงตึงผิว (Surface tension) และค่าสัดส่วนของฟองอากาศที่ปกคลุมไปด้วยสารลดแรงตึงผิว (Surface coverage ratio) ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในน้ำ จัดเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการวิเคราะห์ผลกระทบของการปนเปื้อนสารลดแรงตึงต่อการเติมอากาศรวมไปถึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างสมการความสัมพันธ์ในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยของเฟสน้ำ (K_L) ได้อีกทางหนึ่ง โดยสามารถสรุปโมเดลการทำนายได้ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แบบจำลองการคำนวณการถ่ายเทมวลสารโดยใช้ขนาดของฟองก๊าซ

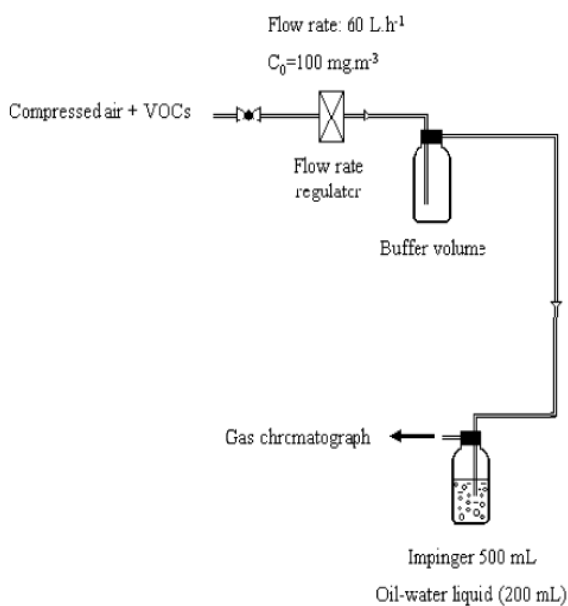
(Sardeing และคณะ, 2006)

จากรูปที่ 2.18 สามารถแบ่งโซนของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยได้เป็น 3 ส่วน โดยมีรายละเอียดโดยสรุป ดังนี้

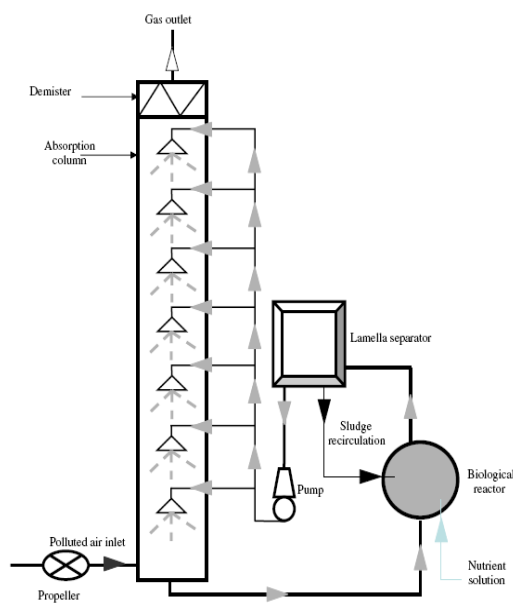
- 1) ขนาดฟองเล็กกว่า 3.5 มิลลิเมตร พบว่าค่า K_L มีค่าต่ำและค่อนข้างคงที่ประมาณ $1 \times 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$ โดยค่า K_L ในช่วงนี้กล่าวได้ว่าขึ้นอยู่กับรูปทรงของฟองอากาศ (ลักษณะทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ)
- 2) ขนาดฟองมีค่าอยู่ระหว่าง 1.5 และ 3.5 มิลลิเมตร โดยพบว่าค่า K_L เพิ่มขึ้นจาก $1 \times 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$ ถึง $3 \times 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$ ซึ่งเป็นผลมาจากทั้งจากการปนเปื้อนของสารลดแรงตึงผิวและลักษณะทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ
- 3) ขนาดฟองใหญ่กว่า 3.5 มิลลิเมตร พบว่าค่า K_L เปลี่ยนแปลงไม่ค่อยมากเมื่อเทียบกับขนาดของฟองที่เพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามในโซนนี้ค่า K_L จะขึ้นกับความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่เจือปนในเฟสน้ำเป็นหลัก

Lalanne และคณะ (2007) วัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้ คือ การพัฒนาประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยหลายชนิดที่ผสมกันโดยทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale unit) ดังแสดงในรูปที่ 2.19 รวมไปถึงเพื่อพัฒนาปรับปรุงนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรม (Semi-industrial scale bioscrubber) ดังแสดงในรูปที่ 2.20 โดยสารอินทรีย์ระเหยที่ใช้ คือ

Oxygenated compound, aromatic compounds และ Chlorinated compound ในขณะที่ตัวดูดซับที่ใช้คือ Cutting oil โดยสัดส่วนความเข้มข้นของ Cutting oil ที่ใช้ในการทดลองนี้คือ ร้อยละ 0, 2.5, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส วิธีการทดลอง คือ ป้อนจ่ายลมที่อัตราการไหล 60 ลิตรต่อชั่วโมง นำสารอินทรีย์ระเหยได้ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตรของอากาศเข้าสู่ตัวดูดซับ (น้ำผสมน้ำมัน) ปริมาตร 200 มิลลิลิตร บรรจุในขวดลูกกลมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร



รูปที่ 2.19 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองขนาดเล็ก
(Lalanne และคณะ, 2008)



รูปที่ 2.20 การบำบัดในระดับอุตสาหกรรม
(Lalanne และคณะ, 2008)

จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มสัดส่วนของน้ำมันในสารดูดซับสามารถส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารของสารอินทรีย์ระเหยชนิดอะโรมาติกเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 12 เป็นร้อยละ 36 และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยสำหรับสารอินทรีย์ระเหยประเภท Chlorinated compound ในขณะที่ประสิทธิภาพลดลงสำหรับสารอินทรีย์ระเหยประเภท Oxygenated compound นอกจากนี้ งานวิจัยพบว่า การเพิ่มขึ้นของสัดส่วนของน้ำมันในปริมาณต่ำนั้นไม่ส่งผลต่อการทำงานของกระบวนการทางชีวภาพของจุลินทรีย์ ดังนั้น จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังที่กล่าวถึงข้างต้นสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) มีความน่าสนใจที่จะประยุกต์ใช้ถึงปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (Bubble column) สำหรับกระบวนการดูดซับสารอินทรีย์ระเหย
- 2) ควรศึกษาความสัมพันธ์ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยด้วยกระบวนการดูดซับในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศที่สอดคล้องกับตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสาร (Mass transfer parameters) และตัวแปรในด้านอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamic parameters) เพื่อเข้าใจถึงกลไกการบำบัดที่เกิดขึ้น

3) มีความน่าสนใจที่จะศึกษาผลกระทบของเกลือใช้สารอินทรีย์ระเหยที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้มากและน้อยต่างกัน โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้เมทานอลเป็นตัวแทนของสารอินทรีย์ระเหยที่ละลายน้ำได้มาก และเลือกใช้เบนซีนเป็นตัวแทนของสารอินทรีย์ระเหยชนิดที่ละลายน้ำได้น้อย

4) เนื่องจากผลกระทบของสารลดแรงตึงผิวที่ส่งผลต่อทั้งตัวแปรทั้งในด้านการถ่ายเทมวลสารและในด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะสนใจที่จะศึกษาผลกระทบของสารดูดซับที่เลือกใช้ต่อการดำเนินการกระบวนการดูดซับแบบฟองอากาศ โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้ น้ำประปาและสารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้น 0.2 CMC, 0.6 CMC และ 1 CMC ตามลำดับ เป็นเฟสน้ำ

5) วิธีการในแยกวิเคราะห์ค่าของค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยควรนำมาประยุกต์ใช้เพื่อศึกษาผลกระทบของสารลดแรงตึงผิวรวมไปถึงการประยุกต์ใช้และพัฒนาโมเดลในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยสำหรับกรณีที่เฟสก๊าซเป็นสารอินทรีย์ระเหย

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์คือศึกษากลไกในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยในกระบวนการดูดซึมในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศขนาดเล็ก โดยศึกษาตัวแปรในด้านอุทกพลศาสตร์และในด้านการถ่ายเทมวลสาร เพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยและกลไกการทำงานที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการดูดซึมในรูปฟองอากาศ โดยทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาคารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 4 ส่วน ดังนี้

- 1) ศึกษาถึงผลกระทบของอัตราการไหลของก๊าซซึ่งส่งผลต่อความเข้มข้นขาเข้าที่ต่างกัน
- 2) ศึกษาถึงผลกระทบของชนิดอุปกรณ์เติมอากาศที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน
- 3) ศึกษาถึงผลกระทบของชนิดของสารอินทรีย์ระเหยทั้ง 2 ชนิด คือ ชนิดที่สามารถละลายน้ำได้มากและชนิดที่ละลายน้ำได้น้อย
- 4) ศึกษาถึงผลกระทบของสารละลายของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ

3.1 การเตรียมอุปกรณ์

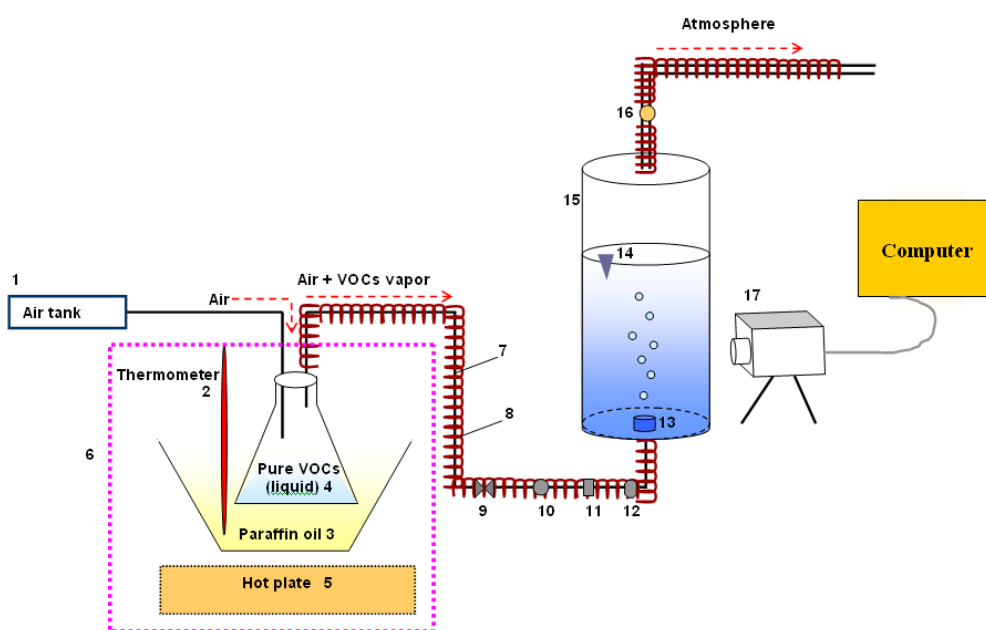
ในการทดลองครั้งนี้ ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศขนาดเล็กดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยถังปฏิกรณ์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.4 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร (9) โดยที่น้ำประปาและสารละลายของสารลดแรงตึงผิวถูกเลือกนำมาใช้เป็นตัวดูดซึม (10) เพื่อบำบัดสารอินทรีย์ระเหย 2 ชนิด ได้แก่ ชนิดที่ละลายในน้ำได้มาก (เมทานอล) และชนิดที่ละลายในน้ำได้น้อย (เบนซีน)

ในงานนี้ สารอินทรีย์ระเหยในรูปก๊าซผลิตด้วยอุปกรณ์สร้างสารอินทรีย์ระเหย (2) และใช้อากาศบริสุทธิ์จากถังบรรจุอากาศ (Air zero 99.999%) (1) เป็นตัวพาสารอินทรีย์ระเหยที่ผลิตได้เข้าสู่ถังปฏิกรณ์ และทำการตรวจสอบอัตราการไหลเฉลี่ยของก๊าซและความดันลดจากอุปกรณ์วัดแบบฟองสบู่ (Soap film meter) (7) และเครื่องมือวัดความดันลด (12) ตามลำดับ โดยในงานนี้เลือกใช้ อุปกรณ์สร้างฟองอากาศชนิดแข็งที่มีรูเติมอากาศหนึ่งรู (13) ซึ่งทำจากวัสดุประเภทพีวีซี โดยทำการติดตั้งที่ตรงกลางส่วนล่างของถังปฏิกรณ์ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเติมอากาศเท่ากับ 0.65 1.25 2.5 และ 4.5 มม. ตามลำดับ (OR0.65 OR1.25 OR2.5 และ OR 4.5)

ในการทดลองนี้ ถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศจะเป็นระบบปิดและมีการติดตั้งอุปกรณ์ให้ความร้อนแบบเส้น (8) เพื่อควบคุมอุณหภูมิของระบบ รวมไปถึงลดข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจาก

การควบคุมของก๊าซที่เกิดขึ้น โดยจะมีจุดเก็บตัวอย่างสารอินทรีย์ระเหย (6 และ 10) เพื่อตรวจสอบความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยได้ทั้งก่อนเข้าและส่วนที่ออกจากระบบ โดยใช้อุปกรณ์ก๊าซโครมาโทกราฟี (GC / FID VARIAN 3800) ซึ่งความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยที่ได้จากการวิเคราะห์ที่เวลาบัพิตต่างๆ จะถูกนำมาใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารโดยรวม

สำหรับตัวแปรในด้านอุทกพลศาสตร์ ในงานวิจัยนี้จะใช้กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง (100 รูปต่อวินาที) และโปรแกรมการวิเคราะห์ภาพถ่าย เพื่อวิเคราะห์ขนาดฟองอากาศ (D_B) ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (U_B) และความถี่ในการเกิดฟองอากาศ (f_B) และจากค่าต่างๆ ที่กล่าวถึงข้างต้นสามารถนำมาใช้ในการคำนวณค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (a) ของการถ่ายเทมวลสารของสารอินทรีย์ระเหยในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศได้



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- 1) ถังบรรจุอากาศบริสุทธิ์ (Air zero tanK Purity 99.999%) บริษัทแพรกแอร์
- 2) เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
- 3) น้ำมันพาราฟินออย (Paraffin oil)
- 4) ขวดลูกชมพู
- 5) ตัวให้ความร้อน (Hot plate) ควบคุมอุณหภูมิ
- 6) อุปกรณ์สร้างสารอินทรีย์ระเหย (VOCs generator)
- 7) ท่อสแตนเลส (Stainless steel)
- 8) อุปกรณ์ให้ความร้อนแบบเส้น (Heating tape)
- 9) วาล์วควบคุมอัตราการไหล (Valve control flow rate)
- 10) จุดเก็บความเข้มข้นขาเข้า (Septum for sampling gas_(in))

- 11) อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ (soap film meter)
- 12) อุปกรณ์วัดความดันลด (Mano meter)
- 13) อุปกรณ์สร้างฟองอากาศ (Rigid Orifice)
- 14) สารดูดซึม (Absorbent)
- 15) ถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (Bubble Column)
- 16) จุดเก็บความเข้มข้นขาออก (Septum for sampling gas (out))
- 17) กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง (Acquisition computer & Camera)

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองในงานวิจัยนี้

3.2.1 การเตรียมสารอินทรีย์ระเหย จากอุปกรณ์สร้างสารอินทรีย์ระเหย

ในการก่อกำเนิดสารอินทรีย์ระเหยในงานทดลองครั้งนี้ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เลือกใช้ขวด ลูกชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตรซึ่งบรรจุสารเมทานอลหรือเบนซีนบริสุทธิ์ปริมาตร 400 มิลลิลิตร และ นำมาบรรจุน้ำมันพาราฟินออยซึ่งควบคุมอุณหภูมิที่ 75 และที่ 90 องศาเซลเซียส สำหรับในการ สร้างสารอินทรีย์ระเหยได้ชนิดเมทานอลและชนิดเบนซีน ตามลำดับ เนื่องจากเมทานอลและเบนซีน มีจุดเดือดที่อุณหภูมิ 65 และที่ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ นอกจากนี้ อัตราการไหลของอากาศที่ใช้ ในการนำพาสารอินทรีย์ระเหยเข้าสู่ถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศจะเลือกใช้ค่าที่แตกต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 0.30 0.65 1.20 2.00 และ 3.50 มิลลิเมตรต่อวินาที ซึ่งส่งผลต่อความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ระเหยที่แตกต่างกันก่อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์

3.2.2 อุปกรณ์ก๊าซโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography Detector FID)

ในการทดลองครั้งนี้ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยได้ในเฟสก๊าซจะทำการตรวจสอบ โดยใช้เครื่องมือ Gas Chromatography with Flame Ionization Detector (VARIAN 3800 gas chromatography) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยใช้คอลัมน์คาปิลารีของบริษัท Varian โดยลักษณะของ คอลัมน์มีดังนี้ (WCOT FUSED SILICA 50 m. x 0.53 mm. diameter COATING CP-SIL 5CB DF = 1.0) และสามารถแสดงดังรูปที่ 3.3

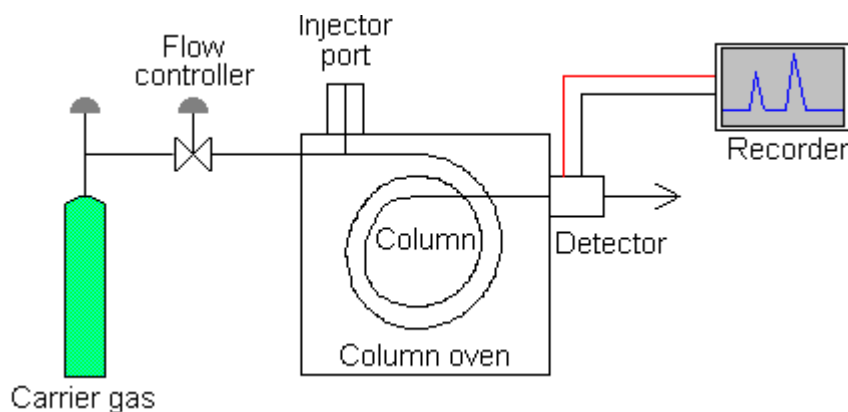


รูปที่ 3.2 เครื่องมือก๊าซโครมาโทกราฟีที่ใช้งานวิจัยนี้



รูปที่ 3.3 คอลัมน์คาลิปราของบริษัทแวนเรียนท์

สำหรับสถานะที่ใช้ในการทำงานของก๊าซโครมาโทกราฟีที่ใช้ในการทดลองนี้กล่าวคือ ก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซพา (carrier gas) ที่อัตราการไหลในคอลัมน์ 2.0 มิลลิลิตรต่อวินาที โดยที่อุณหภูมิของตัวรับการฉีดสาร (Injector ; front 1079) คือ 220 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของตัวตรวจวัด (Detector; front FID) คือ 300 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของเตาเผา (Oven) คือ 120 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิที่กำหนดในเครื่อง GC ในการตรวจหาค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยที่ใช้ในการทดลองนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ลักษณะการไหลของก๊าซในก๊าซโครมาโทกราฟี
(แม้นอมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม, 2534)

ทั้งนี้ สำหรับการเก็บสารอินทรีย์ระเหยเพื่อตรวจวัดความเข้มข้นจะทำการเก็บก๊าซตัวอย่างที่ปริมาตร 2 มิลลิลิตร โดยในการทดลองตรวจความเข้มข้นทั้งขาเข้าและออกจากระบบทุกๆ 30 นาทีเป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อหาประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยในกระบวนการดูดซึม รวมไปถึงค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทมวลสารโดยรวม ทั้งนี้ เหตุผลในการเลือกใช้เวลาในการทดลองที่ 4 ชั่วโมงกล่าวคือ เพื่อให้ได้จำนวนข้อมูลที่เพียงพอกับการวิเคราะห์ตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสารลดปัญหาหรือข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นมาจากการควมแน่นของก๊าซในระบบบำบัด รวมไปถึงเหมาะสมกับอัตราการระเหยของสารตั้งต้นที่เลือกใช้ในขบวนการดูดซับ

3.2.3 กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง

ในงานวิจัยนี้ขนาดของฟองอากาศรวมไปถึงตัวแปรอื่นๆ ในด้านอุทกพลศาสตร์จะวิเคราะห์หาจากภาพถ่ายของกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง (Basler camera) ที่มีความเร็วในการเก็บภาพ 100 รูปต่อวินาที ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณขนาดของฟองคือ Pylon Viewer vision software ดังแสดงในรูปที่ 3.6



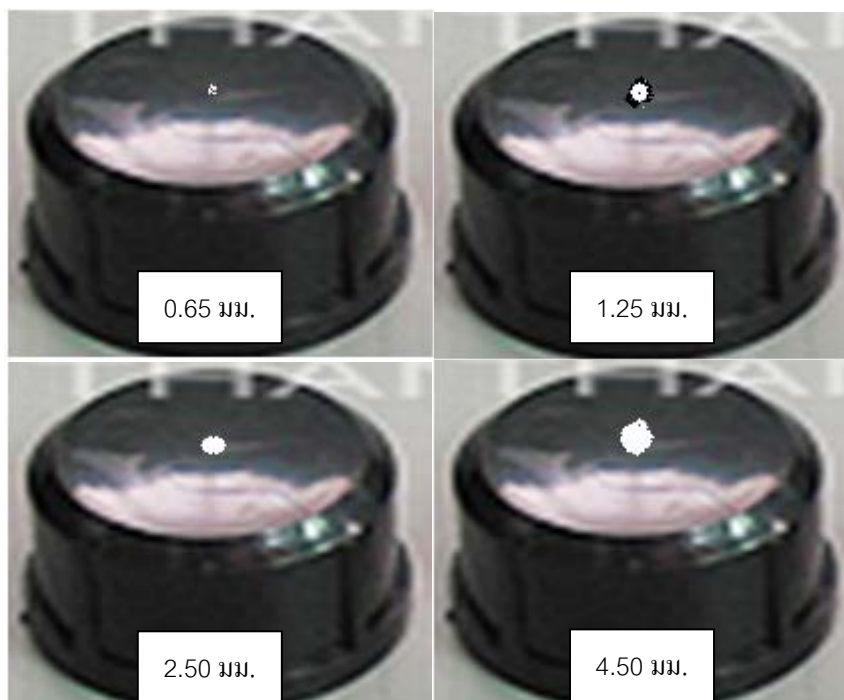
รูปที่ 3.5 กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง (100 รูป/วินาที)



รูปที่ 3.6 โปรแกรมวัดขนาดฟองก๊าซ

3.2.4 ชนิดของรูเดิมอากาศที่ใช้ในการทดลองนี้

ในการทดลองนี้ อุปกรณ์สร้างฟองอากาศที่เลือกใช้จะเป็นรูเดิมอากาศเป็นแบบแข็ง (Rigid orifice) ซึ่งทำจากวัสดุพีวีซี (PVC) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใช้คือ 0.65 1.25 2.50 และ 4.50 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยจะทำการเจาะรูเดิมอากาศ 1 รูที่กึ่งกลางของอุปกรณ์เพื่อสร้างฟองอากาศที่มีลักษณะเป็นสายของฟองอากาศ (Bubble chain) และติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าวที่ด้านล่างและที่บริเวณกึ่งกลางของถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ โดยชนิดของรูเดิมอากาศที่ใช้ในการทดลองนี้สามารถแสดงดังรูปที่ 3.7 ในการพา (carrier) สารอินทรีย์ระเหยเข้าสู่ถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศใช้ถังบรรจุอากาศบริสุทธิ์ (Air Zero 99.999%) ความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 3.7 รูเดิมอากาศทั้ง 4 ชนิดที่ใช้ในการทดลองนี้

3.3 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้

3.3.1 สารอินทรีย์ระเหย

ในงานวิจัยนี้ จะเลือกใช้สารอินทรีย์ระเหยที่มีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ต่างกัน โดยคุณสมบัติของสารเคมีที่เลือก สามารถสรุปได้ดังนี้

1) เมทานอล (Methanol: CH_3OH) เป็นตัวแทนของสารอินทรีย์ระเหยชนิดที่ละลายน้ำได้มาก (Hydrophilic VOCs)

- คุณสมบัติสารเคมีระดับห้องปฏิบัติการ (Analytical grade, 99.99%)
- จากบริษัทเมอร์ค (MerK)

2) เบนซีน (Benzene: C_6H_6) เลือกใช้เป็นตัวแทนของสารอินทรีย์ระเหยชนิดที่ละลายน้ำได้น้อย (Hydrophobic VOCs)

- คุณสมบัติสารเคมีระดับห้องปฏิบัติการ (Analytical grade, 99.99%)
- จากบริษัท S.R.LAB.

3.3.2 ชนิดของสารดูดซึม

1) น้ำประปา ($\sigma_L = 71.8 \text{ N/m}$, $\mu_L = 10.002 \cdot 10^{-4} \text{ Pa.s}$, $\rho_L = 997 \text{ Kg/m}^3$).

2) สารละลายสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ

- สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ Sodium Lauryl Sulphate (SLS or SDS) จากบริษัท Carlo Erba Co., Ltd

- มวลโมเลกุล (M) เท่ากับ 382×10^3 กิโลกรัมต่อโมล
- ค่า Critical Micelle Concentration (CMC) เท่ากับ 1900 มิลลิกรัมต่อลิตร
- โดยสารดูดซึมของสารละลายสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบที่ใช้ในงานวิจัยนี้

จะเลือกใช้ที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่แตกต่างกันคือที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.2 CMC 0.6 CMC และ 1 CMC ตามลำดับ

3.4 ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย

ประสิทธิภาพที่ใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยจัดเป็นตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาและเปรียบเทียบการทำงานของสภาวะการทำงานต่างๆ ของระบบบำบัดสารอินทรีย์ระเหย โดยสมการที่ใช้การคำนวณประสิทธิภาพ ได้แก่

$$\text{Eff}(\%) = \frac{C_{\text{inlet}} - C_{\text{outlet}}}{C_{\text{inlet}}} \times 100 = \frac{A_{\text{inlet}} - A_{\text{outlet}}}{A_{\text{inlet}}} \times 100 \quad (3.1)$$

เมื่อ $\text{EFF}(\%) =$ ประสิทธิภาพในการบำบัด

$C_{\text{inlet}} =$ ความเข้มข้นสารอินทรีย์ระเหยที่เข้าระบบซึ่งสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ได้กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (A_{inlet})

$C_{\text{outlet}} =$ ความเข้มข้นสารอินทรีย์ระเหยที่เข้าระบบซึ่งสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ได้กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (A_{outlet})

3.5 การคำนวณหาค่าตัวแปรการถ่ายเทมวลสาร

3.5.1 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสก๊าซ ($K_g a$)

จากค่าคงที่ของเฮนรีของเมทานอลที่มีค่าค่อนข้างต่ำและมีค่าความสามารถในการละลายน้ำได้สูงซึ่งกล่าวได้ว่ากระบวนการในการถ่ายเทมวลสารจากเฟสก๊าซไปสู่เฟสของเหลวจะถูกควบคุมด้วยเฟสก๊าซ ดังนั้น จึงคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสก๊าซ (Overall mass transfer coefficient in gas phase, $K_g a$) โดยมีวิธีการดังสรุปดังนี้

- 1) ตรวจสอบความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยในเฟสก๊าซที่ขาออกของถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศที่เวลาต่างๆ ทุกๆ 30 นาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
- 2) ประยุกต์ใช้สมการมวลสารระหว่างเฟสก๊าซและเฟสของเหลว ดังแสดงในสมการด้านล่าง

$$Q_g C_g^* (in) = Q_g C_{g(out)}(t) + V_L \frac{dC_L(t)}{dt} \quad (3.2)$$

เมื่อ

Q_g = อัตราการไหลของก๊าซ

V_L = ปริมาตรของสารดูดซับ

$C_g^* (in)$ = ความเข้มข้นของเมทานอลในเฟสก๊าซที่เข้าถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ

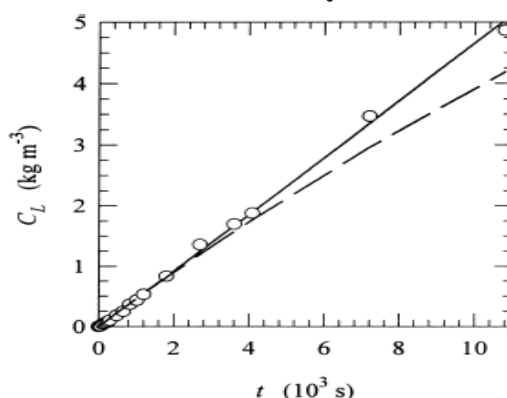
$C_{g(out)}$ = ความเข้มข้นของเมทานอลในเฟสก๊าซที่ออกถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ

- 3) ทำการคำนวณความเข้มข้นของเมทานอลในเฟสของเหลวที่เวลาต่างๆ และความเข้มข้นของเมทานอลที่อิ่มตัวในเฟสของเหลว จากสมการด้านล่าง

$$C_L(t) = \frac{Q_g}{V_L} [C_g^* (in) \times t - \int_0^t C_g dt] \quad (3.3)$$

เมื่อ $C_L(t)$ = ความเข้มข้นของเมทานอลในเฟสของเหลวที่เวลาต่างๆ

โดยลักษณะความสัมพันธ์สามารถแสดงได้ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยในเฟสของเหลวที่เวลาต่างๆ

(Billerbeck และคณะ, 1999)

4) จากรูปที่ 3.8 ความเข้มข้นของเมทานอลในเฟสของเหลวที่เวลาต่างๆ เป็นเส้นตรง (ใช้เวลานานกว่าจะถึงค่าความเข้มข้นอิ่มตัวในเฟสของเหลว) และค่าความชันจากกราฟ $\frac{dc}{dt} = m$ เป็นค่าคงที่นั้น สามารถใช้เป็นเครื่องมือที่ยืนยันว่าสารอินทรีย์ระเหยชนิดที่เลือกใช้ในการทดลองนี้จะถูกควบคุมโดยเฟสก๊าซ ดังนั้นจากสมการที่ 3.2 สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$V_L m = Q_g (C_g^* - C_g(t)) \quad (3.4)$$

5) ประยุกต์ใช้สมการพลັกซ์ของการถ่ายเทมวลสารของเฟสก๊าซร่วมกับสมการที่ 3.4 โดยสมมติให้ค่าอัตราการไหลของก๊าซ (Q_g) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสก๊าซ ($K_G a$) มีค่าคงที่

$$Q_g dC_g(t) = -K_G a C_g(t) \Omega dz \quad (3.5)$$

6) ขั้นตอนสุดท้าย ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสก๊าซ ($K_G a$) สามารถคำนวณได้จากสมการด้านล่าง

$$K_G a = -\frac{Q_g}{V_L} \ln \left(1 - \frac{m V_L}{Q_g C_g^*} \right) \quad (3.6)$$

3.5.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสของเหลว ($K_L a$)

เนื่องการถ่ายเทมวลสารของสารอินทรีย์ระเหยชนิดที่ละลายในน้ำได้น้อยจากเฟสก๊าซไปสู่เฟสของเหลวถูกควบคุมโดยเฟสของเหลว ดังนั้น จึงต้องคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสของเหลว (Overall mass transfer coefficient in gas phase, $K_L a$) โดยวิธีการในการคำนวณมีดังนี้

1) จากสมการสมดุลมวลของระบบ ที่สมดุลมวลสารเฟสก๊าซเท่ากับเฟสของเหลว ดังแสดงในสมการที่ 3.2 ดังนั้น ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยในเฟสของเหลว $C_L(t)$ แสดงได้ดังสมการ

$$C_L(t) = \frac{Q_g}{V_L} (C_{g,in} t - \int C_{g,out}(t) dt) \quad (3.7)$$

2) จากวิธีการของ DecKwer และคณะ (1992) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสของเหลว (Overall mass transfer coefficient in liquid phase: $K_L a$) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\frac{dC_L}{dt} = k_L a (C_L^s - C_L) \quad (3.8)$$

เมื่อ C_L = ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยที่เวลาต่างๆ ในเฟสของเหลว
 C_L^s = ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยที่อิ่มตัวในเฟสของเหลว

3.5.3 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยจะเป็นสัดส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมและค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยในเฟสก๊าซ (Gas-Film mass transfer coefficient: K_G) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยในเฟสของเหลว (Liquid-Side mass transfer coefficient: K_L) สามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$K_G = \frac{K_G a}{a} \quad (3.9)$$

เมื่อ K_G = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยในเฟสก๊าซ (เมตร/วินาที)

$K_G a$ = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสของก๊าซ (วินาที⁻¹)

a = พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (เมตร⁻¹)

$$K_L = \frac{K_L a}{a} \quad (3.10)$$

เมื่อ K_L = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยในเฟสของเหลว(เมตร/วินาที)

$K_L a$ = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสของเหลว (วินาที⁻¹)

a = พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (เมตร⁻¹)

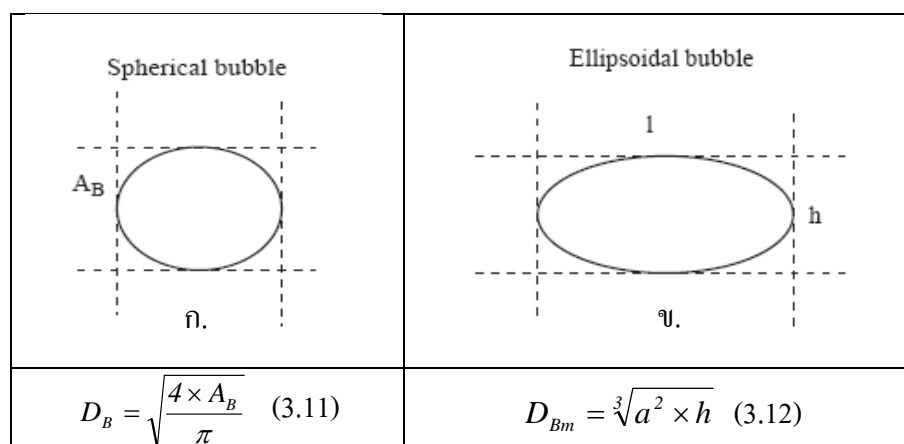
3.6 วิธีการหาค่าอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamic)

ในส่วนนี้ จะกล่าวถึงวิธีการวิเคราะห์ค่าตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เช่น ขนาดฟองอากาศ ความถี่ในการเกิดฟองอากาศ ความเร็วในลอยตัวของฟองอากาศ ซึ่งจากตัวแปรต่างๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์จะสามารถนำไปคำนวณหาค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ เพื่อใช้ร่วมกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมที่ได้จากการทดลอง ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยดังแสดงในสมการความสัมพันธ์ที่กล่าวถึงข้างต้น

3.6.1 ขนาดฟองอากาศ (Bubble diameter: D_b)

การวัดขนาดฟองอากาศที่อัตราไหลของก๊าซ (Q_g) ใดๆ สามารถทำได้โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย (Image Treatment Techniques) โดยทำการเก็บและวิเคราะห์ภาพของฟองอากาศจำนวน 150 -200 ภาพ ต่อการศึกษาที่อัตราการไหลของก๊าซ (Q_g) ต่างๆ เพื่อให้ได้ค่าที่เป็นตัวแทนที่น่าเชื่อถือทางสถิติ ทั้งนี้ จากรูปแบบของฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะแตกต่างกันกล่าวคือ ที่อัตราการไหลของก๊าซต่ำฟองอากาศที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นทรงกลม (Spherical bubble) ดังแสดงในรูปที่ 3.9 (ก.) สมการที่ใช้ในการหาขนาดของฟองจะเป็นไปตามสมการที่ 3.11 ในขณะที่ อัตราการไหลของก๊าซสูงฟองอากาศในถังปฏิกรณ์แบบ

ฟองอากาศส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นวงรี (Ellipsoidal bubble) ดังแสดงในรูปที่ 3.9 (ข.) และสมการที่ใช้ในการหาขนาดของฟองใช้สมการที่ 3.12



รูปที่ 3.9 รูปแบบของฟองอากาศจากกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง (Painmanakul และคณะ, 2004)

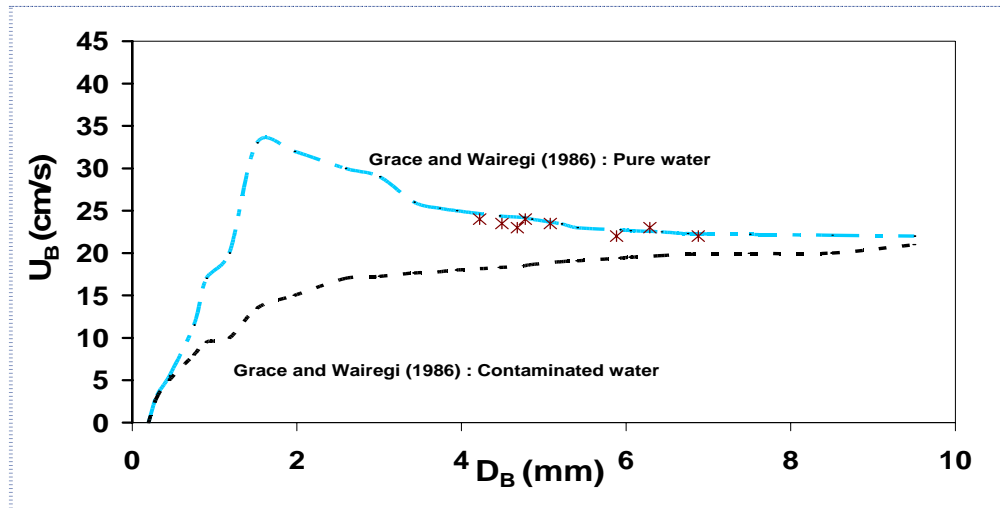
3.6.2 ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (Bubble rising velocity: U_B)

ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ ในงานวิจัยนี้ จะทำการวิเคราะห์จากจากการทดลอง โดยใช้กล้องถ่ายภาพฟองอากาศที่ลอยตัวขึ้นในถังปฏิกรณ์ เพื่อวิเคราะห์หาระยะทางที่ฟองอากาศลอยขึ้น (ΔD) ณ ช่วงเวลาหนึ่งๆ หรือ ณ ช่วงเวลาการเก็บภาพของกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง (t_{frame}) โดยค่าของความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (U_B) สามารถหาได้สมการ 3.13

$$U_B = \frac{\Delta D}{t_{frame}} \quad (3.13)$$

เมื่อ U_B = ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (Bubble rising velocity)
 ΔD = ระยะทางที่ฟองอากาศลอยขึ้น
 t_{frame} = ช่วงเวลาการเก็บภาพของกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง

นอกจากการหาความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศจากการทดลองแล้วยังสามารถวิเคราะห์ค่าความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (U_B) ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการลอยตัวและขนาดของฟองอากาศจากการศึกษาของ Grace และ Wairegi (1986) ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของฟองอากาศกับความเร็วในการลอยตัวในเฟสของเหลวที่เป็นน้ำบริสุทธิ์และน้ำที่มีการปนเปื้อน



รูปที่ 3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของฟองและความเร็วในการลอยตัวของฟอง
(Painmanakul และคณะ, 2004)

3.6.3 ความถี่ในการเกิดฟองอากาศ (Bubble formation frequency: f_B)

โดยทั่วไป ความถี่ในการเกิดฟองอากาศ คือ จำนวนของฟองที่เกิดขึ้นในเวลา 1 วินาที ซึ่งคำนวณจากจำนวนรูเดิมอากาศคูณกับอัตราการไหลของก๊าซต่อหนึ่งรูเดิมอากาศ แล้วหารด้วยปริมาตรของฟองอากาศ ดังแสดงในสมการ 3.14

$$f_B = \frac{Q_g}{V_B} \quad (3.14)$$

เมื่อ f_B = ความถี่ในการเกิดฟอง (Bubble formation frequency, s^{-1})
 Q_g = อัตราการไหลของก๊าซ (Gas flow rate, m^3/s)
 V_B = ปริมาตรของฟองอากาศ (Bubble volume, m^3)

3.6.4 พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (Specific interfacial area: a)

พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (Specific interfacial area, a) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการศึกษาการถ่ายเทมวลสาร โดยมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวในการถ่ายเทมวลสารทั้งหมดของฟองอากาศต่อปริมาตรของถังปฏิกรณ์ฯ ณ เวลาใดๆ (จำนวนฟอง: N_B x พื้นที่ผิวของฟอง: S_B / ปริมาตรของถังปฏิกรณ์ฯ: V_{Total})

สำหรับการคำนวณค่า (N_B) นั้น คำนวณจากความถี่ในการเกิดฟอง (f_B) คูณกับระยะเวลาที่ฟองอากาศอยู่ในถังปฏิกรณ์ฯของฟองอากาศหนึ่งๆ ในถังปฏิกรณ์ฯ (T_B เท่ากับความสูงของเหลว: H_L หารด้วยความเร็วในการลอยตัวของฟอง: U_B) ดังสมการ 3.15 และค่าของ a หาได้จากสมการ 3.16

$$N_B = f_B \times \frac{H_L}{U_B} \quad (3.15)$$

$$a = N_B \times \frac{S_B}{V_{Total}} = f_B \times \frac{H_L}{U_B} \times \frac{\pi D_B^2}{AH_L + N_B V_B} \quad (3.16)$$

3.7 วิธีการทดลอง

เพื่อเข้าใจกลไกในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยด้วยการประยุกต์ใช้กระบวนการดูดซึมในรูปฟองอากาศ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จะศึกษาในประเด็นต่างๆ ที่ประกอบด้วย 4 ส่วน ดังนี้

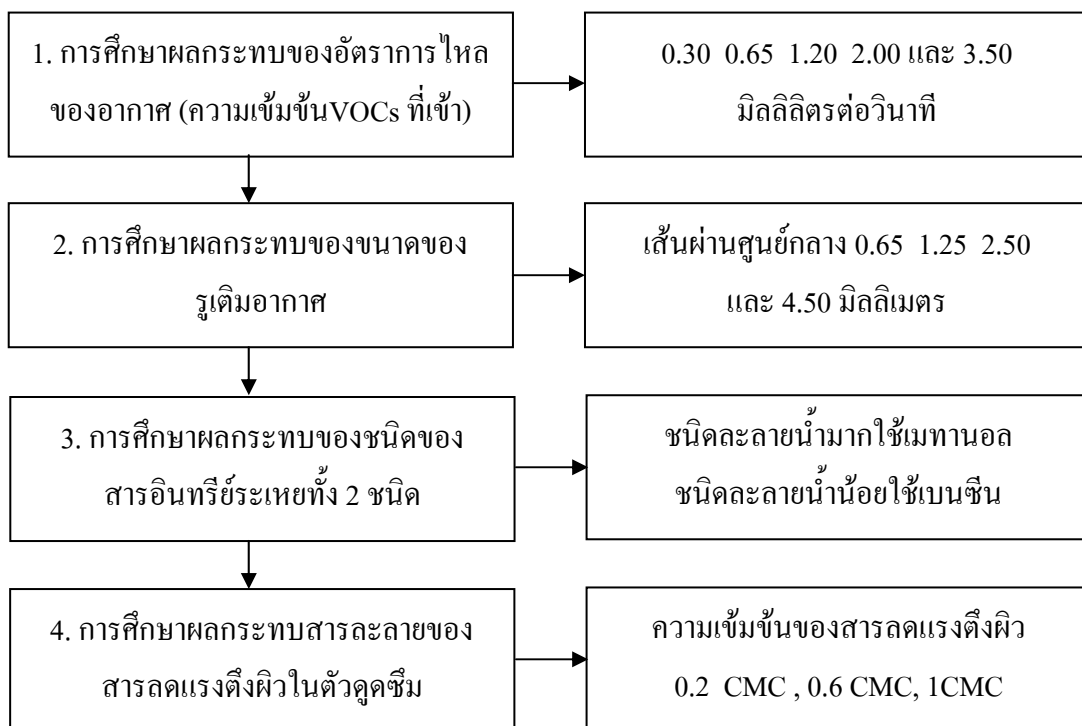
1) การศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของอากาศ (ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยที่เข้าระบบ) ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยและตัวแปรในด้านการถ่ายเทมวลสารและด้านอุทกพลศาสตร์

2) การศึกษาผลกระทบของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเดิมอากาศชนิดแข็ง 4 ชนิด ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยและตัวแปรในด้านการถ่ายเทมวลสารและด้านอุทกพลศาสตร์

3) การศึกษาผลกระทบของความสามารถในการละลายน้ำของสารอินทรีย์ระเหยทั้ง 2 ชนิด คือ ชนิดที่สามารถละลายน้ำได้มากและชนิดที่ละลายน้ำได้น้อยต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยและตัวแปรในด้านการถ่ายเทมวลสารและด้านอุทกพลศาสตร์

4) การศึกษาผลกระทบจากการปนเปื้อนของสารละลายสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบในสารดูดซึมต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยและตัวแปรในด้านการถ่ายเทมวลสารและด้านอุทกพลศาสตร์

โดยแผนผังของภาพรวมของการทดลองสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 3.11 ในขณะที่ตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.1

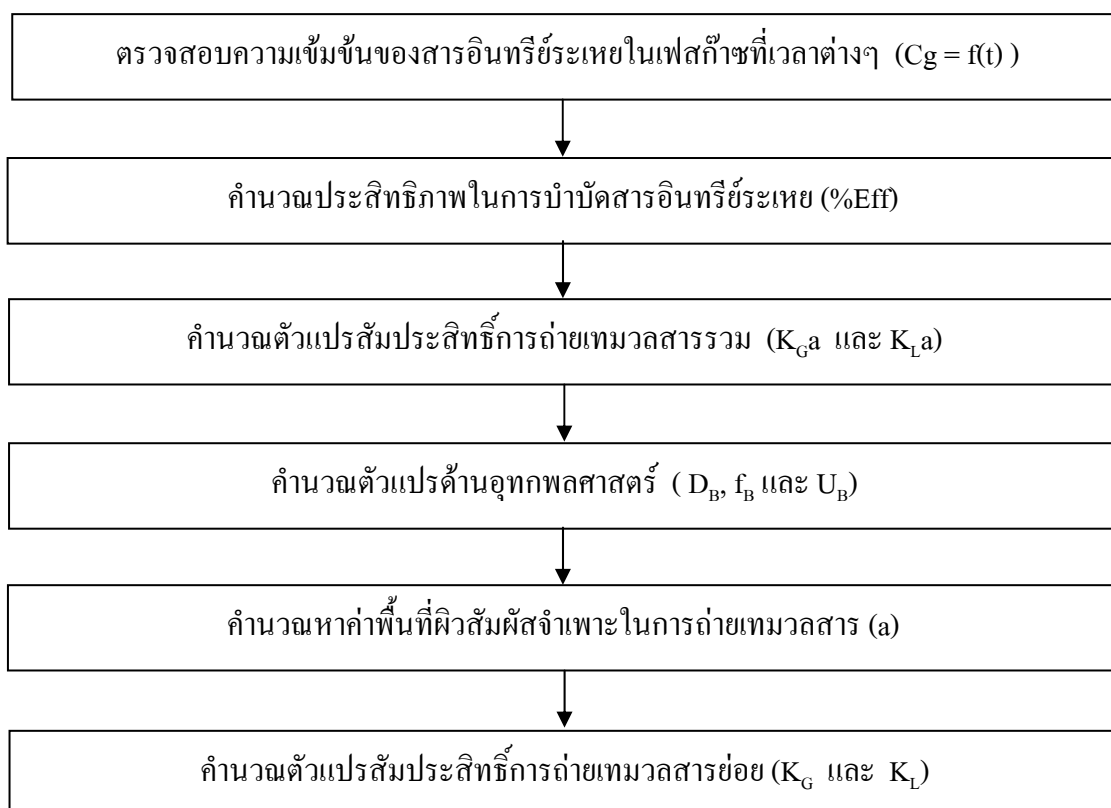


รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการทดลองทั้งหมดในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 3.1 สรุปตัวแปรทั้งหมดของการทดลอง

ตัวแปรคงที่	ตัวที่ทำการควบคุม
อุณหภูมิตัวก่อกำเนิดสารอินทรีย์ระเหย	75 ± 3 องศาเซลเซียส สำหรับกรณีเมทานอล 90 ± 3 องศาเซลเซียส สำหรับกรณีเบนซีน
ขนาดถังปฏิกรณ์	เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.4 ซม. ความสูง 30 ซม.
ปริมาตรของตัวดูดซึม	300 ลบ.ซม.
ตัวแปรอิสระ	ตัวที่ทำการควบคุม
ชนิดของสารอินทรีย์ระเหย	เมทานอล สำหรับสาร VOCs ที่ละลายน้ำได้มาก เบนซีน สำหรับสาร VOCs ที่ละลายน้ำได้น้อย
อัตราการไหลของก๊าซ	0.30, 0.65, 1.20, 2.0 และ 3.5 มล./วินาที
ขนาดของรูเติมอากาศ	0.65, 1.25, 2.50 และ 4.5 มม.
ชนิดของตัวดูดซึม	1. น้ำประปา 2. สารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้น 0.2 CMC, 0.6 CMC, 1 CMC
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการตรวจสอบ
ประสิทธิภาพในการบำบัด VOCs	ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย
ตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสาร	K_{Ga} , K_{La} , K_G , K_L
ตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์	a , D_B , f_B , U_B

ทั้งนี้ จากตัวแปรตามทั้งหมดที่ต้องทำการวิเคราะห์ (ดังแสดงในตารางที่ 3.1) ขั้นตอนหรือวิธีที่ใช้ในการหาตัวแปรดังกล่าวจะสามารถหาได้ ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการหาค่าจากตัวแปรตามที่ใช้ในการทดลอง

3.7.1 การศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของอากาศ (ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยที่เข้าระบบ) ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยและตัวแปรในด้านการถ่ายเทมวลสารและด้านอุทกพลศาสตร์

จุดประสงค์ของการทดลองนี้ กล่าวคือเพื่อศึกษาผลกระทบอัตราการไหล ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยที่เข้าถึงปฏิกรณ์แบบฟองอากาศต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย รวมไปถึงวิเคราะห์ผลกระทบต่อค่าตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์และตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสาร โดยขั้นตอนในการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1) สร้างสารอินทรีย์ระเหยที่ละลายน้ำมาก (เมทานอล) จากอุปกรณ์สร้างสารอินทรีย์ระเหย ดังที่ได้กล่าวถึงข้างต้นในส่วนอุปกรณ์ก่อกำเนิดสารอินทรีย์ระเหย

2) เลือกใช้อัตราการไหลของอากาศจากถังบรรจุอากาศในการนำพา (carrier) สารอินทรีย์ระเหยเข้าสู่ถึงปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (Bubble Column) ที่อัตราการไหล 0.30, 0.65, 1.20 และ 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที (โดยเลือกใช้อัตราการไหลที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพด้วยกล้องความเร็วสูง เพื่อสามารถทำการวิเคราะห์ค่าตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ได้ถูกต้องยิ่งขึ้น)

3) ในส่วนของการสร้างฟองก๊าซสารอินทรีย์ระเหย ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้อุปกรณ์สร้างฟองอากาศแบบแข็งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเดิมอากาศขนาด 0.65 มิลลิเมตร

4) การทดลองนี้สารดูดซับที่ใช้ คือ น้ำประปา (ที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) ปริมาตร 300 มิลลิลิตร

5) ทำการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นทั้งขาเข้าและขาออกระบบบำบัดด้วยเครื่องมือก๊าซโครมาโตกราฟฟีโดยทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 30 นาทีเป็นเวลา 4 ชั่วโมง และทำการคำนวณประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย จากสมการที่ 3.1

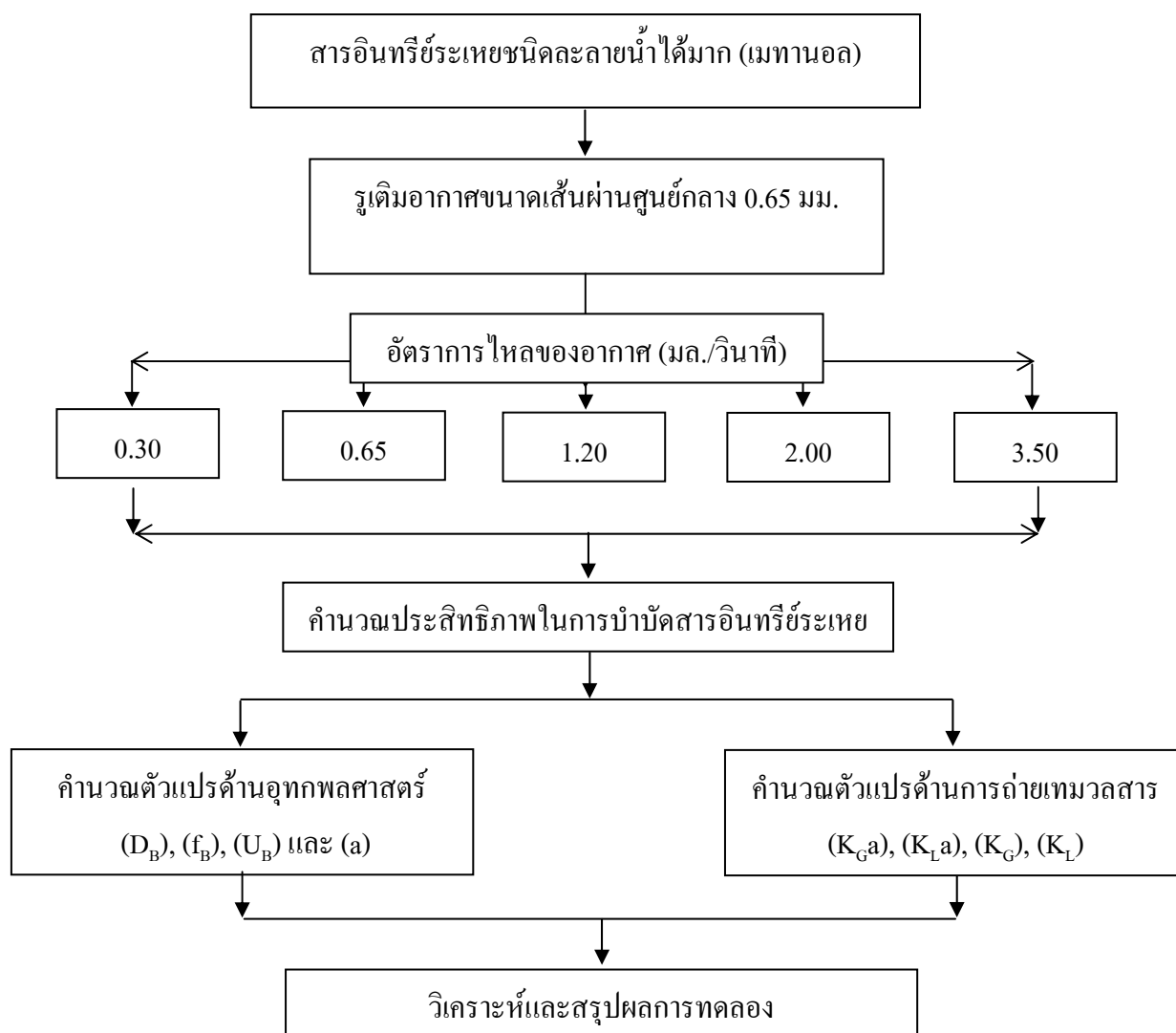
6) ทำการวิเคราะห์ค่าตัวแปรอุทกพลศาสตร์ ซึ่งได้แก่ ขนาดฟองอากาศ (Bubble diameter: D_b) ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (Bubble rising velocity: U_b) ความถี่ในการเกิดฟอง (bubble formation frequency: f_b) และจากค่าต่างๆ ที่กล่าวถึงข้างต้นสามารถนำมาใช้ในการคำนวณค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (Specific interfacial area: a) ได้จากสมการที่ (3.16)

7) ทำการวิเคราะห์ค่าตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสารซึ่งได้แก่ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสก๊าซ (Overall mass transfer coefficient in gas phase: $K_G a$) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสของเหลว (Overall mass transfer coefficient in gas phase: $K_L a$) โดยวิธีการในวิเคราะห์ดังที่กล่าวถึงข้างต้นในหัวข้อที่ 3.5.1 และ 3.5.2

8) ทั้งนี้ จากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมและค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะที่ได้จากการทดลอง สามารถใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยในเฟสก๊าซ (Gas-film mass transfer coefficient: K_G) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยในเฟสของเหลว (Liquid-side mass transfer coefficient: K_L) ได้จากสมการที่ 3.9 และ 3.10

9) ทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ขั้นตอนการทดลองในการศึกษาครั้งนี้แสดงดังรูปที่ 3.13 และตัวแปรที่ศึกษาในการทดลองนี้แสดงในตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.13 ขั้นตอนการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราการไหล และความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรสำหรับการทดลองในการศึกษาถึงผลกระทบของอัตราการไหลที่ต่างกัน และความเข้มข้นที่ต่างกัน

ตัวแปรคงที่	ตัวที่ทำการควบคุม
อุณหภูมิตัวก่อกำเนิดสารอินทรีย์ระเหย	75 ± 3 องศาเซลเซียส สำหรับเมทานอล
ขนาดถังปฏิกรณ์	เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.4 ซม. ความสูง 30 ซม.
ชนิดของตัวดูดซึม	น้ำประปา
ตัวแปรอิสระ	ตัวที่ทำการควบคุม
ชนิดของสารอินทรีย์ระเหย	เมทานอล
อัตราการไหลของก๊าซ	0.30, 0.65, 1.20 , 2.00 และ 3.50 มล./วินาที
ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหย	ขึ้นกับอัตราการไหลของก๊าซ
ขนาดของรูเติมอากาศ	0.65 มม.
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการตรวจสอบ
ประสิทธิภาพในการบำบัด VOCs	ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย
ตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสาร	K_{Ga} และ K_G
ตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์	a , D_B , f_B , U_B

3.7.2 การศึกษาผลกระทบของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเติมอากาศชนิดแข็ง 4 ชนิด ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยและตัวแปรในด้านการถ่ายเทมวลสารและด้านอุทกพลศาสตร์

จุดประสงค์ของการทดลองนี้ เพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดรูเติมอากาศทั้ง 4 ชนิด ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย เพื่อวิเคราะห์ค่าตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์และตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสาร โดยขั้นตอนในการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1) สร้างสารอินทรีย์ระเหยที่ละลายน้ำมาก (เมทานอล) จากอุปกรณ์สร้างก๊าซ VOCs ดังที่ได้กล่าวถึงข้างต้นในส่วนอุปกรณ์ก่อกำเนิดสารอินทรีย์ระเหย

2) เลือกใช้อัตราการไหลของอากาศจากถังบรรจุอากาศในการนำพา (Carrier) สารอินทรีย์ระเหยเข้าสู่ถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (Bubble Column) ที่อัตราการไหล 0.3 0.65 1.20 และ 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที (โดยเลือกใช้อัตราการไหลที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายเทมวลสารด้วยความเร็วสูงเพื่อสามารถทำการวิเคราะห์ค่าตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ได้ถูกต้องยิ่งขึ้น)

3) ในส่วนของการสร้างฟองก๊าซ VOCs ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้อุปกรณ์สร้างฟองอากาศแบบแข็งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเติมอากาศขนาด 0.65 1.25 2.50 และ 4.50 มิลลิเมตร

4) การทดลองนี้สารดูดซับที่ใช้ คือ น้ำประปา (ที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) ปริมาตร 300 มิลลิลิตร

5) ทำการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นทั้งขาเข้าและขาออกระบบบำบัดด้วยเครื่องมือก๊าซโครมาโตกราฟฟีโดยทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 30 นาทีเป็นเวลา 4 ชั่วโมง และทำการคำนวณประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย จากสมการที่ 3.1

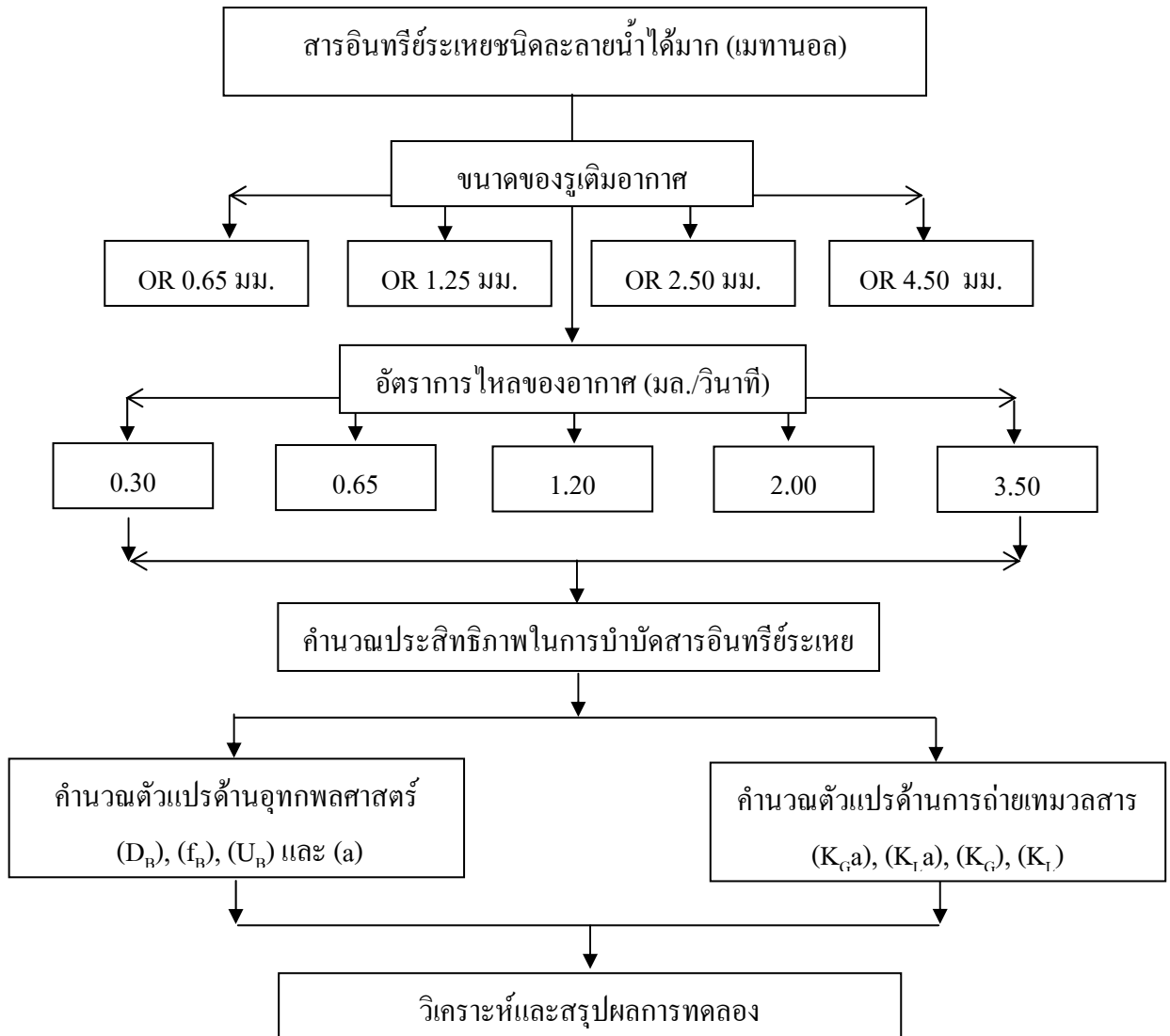
6) ทำการวิเคราะห์ค่าตัวแปรอุทกพลศาสตร์ ซึ่งได้แก่ ขนาดฟองอากาศ (Bubble diameter: D_B) ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (Bubble rising velocity : U_B) ความถี่ในการเกิดฟอง (Bubble formation frequency: f_B) และจากค่าต่างๆ ที่กล่าวถึงข้างต้นสามารถนำมาใช้ในการคำนวณค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (Specific interfacial area: a) ได้จากสมการที่ (3.16)

7) ทำการวิเคราะห์ค่าตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสารซึ่งได้แก่ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสก๊าซ (Overall mass transfer coefficient in gas phase: $K_G a$) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสของเหลว (Overall mass transfer coefficient in liquid phase: $K_L a$) โดยวิธีการในวิเคราะห์ดังที่กล่าวถึงข้างต้นในหัวข้อที่ 3.5.1 และ 3.5.2

8) ทั้งนี้ จากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมและค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะที่ได้จากการทดลอง สามารถใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยในเฟสก๊าซ (Gas-Film mass transfer coefficient: K_G) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยในเฟสของเหลว (Liquid-Side mass transfer coefficient: K_L) ได้จากสมการที่ 3.9 และ 3.10

9) ทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ขั้นตอนการทดลองในการศึกษาครั้งนี้แสดงดังรูปที่ 3.14 และตัวแปรที่ศึกษาในการทดลองนี้แสดงในตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.14 ขั้นตอนการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดรูเดิมอากาศทั้ง 4 ชนิด ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรสำหรับการทดลองในการศึกษาถึงผลกระทบของชนิดรูเติมอากาศทั้ง 4 ชนิด

ตัวแปรคงที่	ค่าที่ทำการควบคุม
อุณหภูมิตัวก่อกำเนิดสารอินทรีย์ระเหย	75 ± 3 องศาเซลเซียส สำหรับเมทานอล
ขนาดถังปฏิกรณ์	เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.4 ซม. ความสูง 30 ซม.
ชนิดของตัวดูดซึม	น้ำประปา
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ทำการควบคุม
ชนิดของสารอินทรีย์ระเหย	เมทานอล
อัตราการไหลของก๊าซ	0.30, 0.65, 1.2, 2.0 และ 3.5 มล./วินาที
ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหย	ขึ้นกับอัตราการไหลของก๊าซ
ขนาดของรูเติมอากาศ	0.65, 1.25, 2.5 และ 4.5 มม.
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการตรวจสอบ
ประสิทธิภาพในการบำบัด VOCs	ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย
ตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสาร	K_{Ga} และ K_G
ตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์	a , D_B , f_B , U_B

3.7.3 การศึกษาผลกระทบของความสามารถในการละลายน้ำของสารอินทรีย์ระเหยทั้ง 2 ชนิด คือ ชนิดที่สามารถละลายน้ำได้มากและชนิดที่ละลายน้ำได้น้อยต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยและตัวแปรในด้านการถ่ายเทมวลสารและด้านอุทกพลศาสตร์

จุดประสงค์ของการทดลองนี้ เพื่อศึกษาผลกระทบของความสามารถในการละลายน้ำของสารอินทรีย์ระเหยทั้ง 2 ชนิด คือ ชนิดที่สามารถละลายน้ำได้มาก (เมทานอล) และชนิดที่ละลายน้ำได้น้อย (เบนซีน) ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยเพื่อวิเคราะห์ค่าตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์และตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสาร โดยขั้นตอนในการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1) สร้างสารอินทรีย์ระเหยที่ละลายน้ำมาก (เมทานอล) และสารอินทรีย์ระเหยที่ละลายน้ำน้อย (เบนซีน) จากอุปกรณ์สร้างก๊าซ VOCs ดังที่ได้กล่าวถึงข้างต้นในส่วนอุปกรณ์ก่อนกำเนิดสารอินทรีย์ระเหย

2) เลือกใช้อัตราการไหลของอากาศจากถังบรรจุอากาศในการนำพา (carrier) สารอินทรีย์ระเหยเข้าสู่ถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (Bubble Column) ที่อัตราการไหล 0.3, 0.65, 1.20 และ 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที (โดยเลือกใช้อัตราการไหลที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพด้วยกล้องความเร็วสูงเพื่อสามารถทำการวิเคราะห์ค่าตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ได้ถูกต้องยิ่งขึ้น)

3) ในส่วนของการสร้างฟองก๊าซ VOCs ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้อุปกรณ์สร้างฟองอากาศแบบแข็งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเดิมอากาศขนาด 0.65, 1.25, 2.50 และ 4.50 มิลลิเมตร

4) การทดลองนี้สารดูดซับที่ใช้ คือ น้ำประปา (ที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) ปริมาตร 300 มิลลิลิตร

5) ทำการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นทั้งขาเข้าและขาออกระบบบำบัดด้วยเครื่องมือก๊าซโครมาโตกราฟฟีโดยทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 30 นาทีเป็นเวลา 4 ชั่วโมง และทำการคำนวณประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย จากสมการที่ 3.1

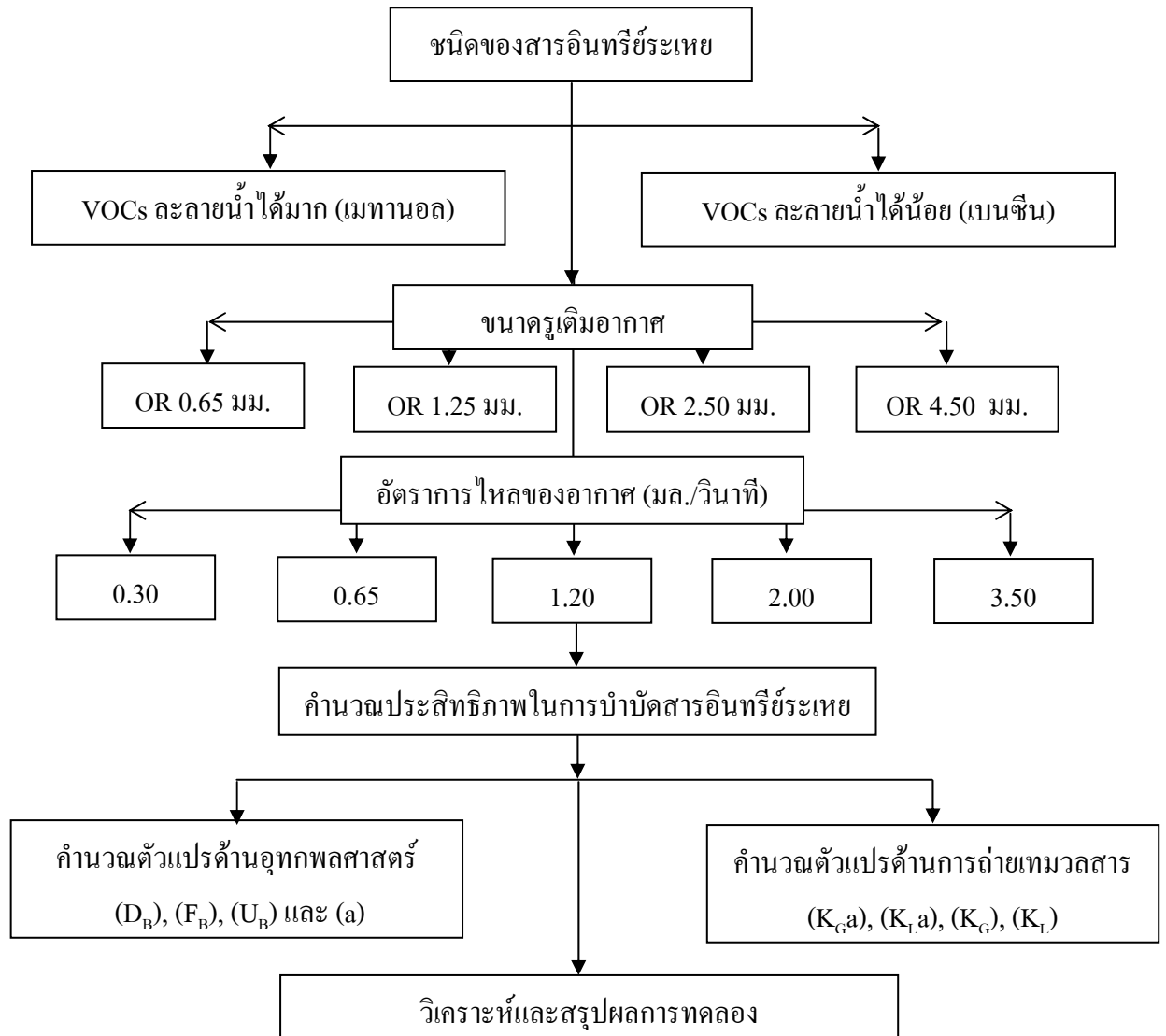
6) ทำการวิเคราะห์ค่าตัวแปรอุทกพลศาสตร์ ซึ่งได้แก่ ขนาดฟองอากาศ (Bubble diameter: D_b) ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (Bubble rising velocity: U_b) ความถี่ในการเกิดฟอง (bubble formation frequency: f_b) และจากค่าต่างๆ ที่กล่าวถึงข้างต้นสามารถนำมาใช้ในการคำนวณค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (Specific interfacial area: a) ได้จากสมการที่ (3.16)

7) ทำการวิเคราะห์ค่าตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสารซึ่งได้แก่ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสก๊าซ (Overall mass transfer coefficient in gas phase: $K_G a$) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสของเหลว (Overall mass transfer coefficient in gas phase: $K_L a$) โดยวิธีการในวิเคราะห์ดังที่กล่าวถึงข้างต้นในหัวข้อที่ 3.5.1 และ 3.5.2

8) ทั้งนี้ จากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมและค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะที่ได้จากการทดลอง สามารถใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยในเฟสก๊าซ (Gas-film

Mass transfer coefficient: K_G) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยในเฟสของเหลว (Liquid-Side mass transfer coefficient: K_L) ได้จากสมการที่ 3.9 และ 3.10

9) ทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
 ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ขั้นตอนการทดลองในการศึกษาครั้งนี้แสดงดังรูปที่ 3.15 และตัวแปรที่ศึกษาในการทดลองนี้แสดงในตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.15 ขั้นตอนการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของชนิดของสารอินทรีย์ระเหยทั้ง 2 ชนิด ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรสำหรับการทดลองในการศึกษาถึงผลกระทบของชนิดของสารอินทรีย์ระเหยทั้ง 2 ชนิด ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย

ตัวแปรคงที่	ค่าที่ทำการควบคุม
อุณหภูมิตัวก่อกำเนิดสารอินทรีย์ระเหย	75 ± 3 องศาเซลเซียส สำหรับกรณีเมทานอล 90 ± 3 องศาเซลเซียส สำหรับกรณีเบนซีน
ขนาดถังปฏิกรณ์	เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.4 ซม. ความสูง 30 ซม.
ชนิดของตัวดูดซึม	น้ำประปา
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ทำการควบคุม
ชนิดของสารอินทรีย์ระเหย	เมทานอลและเบนซีน
อัตราการไหลของก๊าซ	0.30, 0.65, 1.20, 2.00 และ 3.50 มล./วินาที
ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหย	ขึ้นกับอัตราการไหลของก๊าซ
ขนาดของรูเติมอากาศ	0.65, 1.25, 2.50 และ 4.50 มม.
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการตรวจสอบ
ประสิทธิภาพในการบำบัด VOCs	ประสิทธิภาพในการบำบัด VOCs
ตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสาร	K_{Ga} , K_{La} , K_G , K_L
ตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์	a , D_B , f_B , U_B

3.7.4 การศึกษาผลกระทบจากการปนเปื้อนของสารละลายสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบในสารดูดซึมต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยและตัวแปรในการถ่ายเทมวลสารและด้านอุทกพลศาสตร์

จุดประสงค์ของการทดลองนี้ เพื่อศึกษาผลกระทบความเข้มข้นของตัวดูดซึมของสารละลายสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย เพื่อวิเคราะห์ค่าตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์และตัวแปรในการถ่ายเทมวลสาร โดยขั้นตอนในการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1) สร้างสารอินทรีย์ระเหยที่ละลายน้ำมาก (เมทานอล) และสารอินทรีย์ระเหยที่ละลายน้ำน้อย (เบนซีน) จากอุปกรณ์สร้างก๊าซ VOCs ดังที่ได้กล่าวถึงข้างต้นในส่วนอุปกรณ์ก่อนกำเนิดสารอินทรีย์ระเหย

2) การทดลองนี้ตัวดูดซึมที่ใช้ คือ สารละลายของสารลดแรงตึงผิว ใช้ที่ความเข้มข้นของสารละลายลดแรงตึงผิวที่ 0.2 CMC 0.6 CMC และ 1 CMC

3) ในส่วนของการสร้างฟองก๊าซ VOCs ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้อุปกรณ์สร้างฟองอากาศแบบแข็งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเดิมอากาศที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดซึ่งขนาดที่ใช้ในการทดลองนี้หาได้จากการทดลองที่ 3.7.2

4) เลือกใช้อัตราการไหลของอากาศจากถังบรรจุอากาศในการนำพา (carrier) สารอินทรีย์ระเหยเข้าสู่ถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (Bubble Column) ที่อัตราการไหล 0.30 0.65 1.20 และ 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที (โดยเลือกใช้อัตราการไหลที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพด้วยกล้องความเร็วสูง เพื่อสามารถทำการวิเคราะห์ค่าตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ได้ถูกต้องยิ่งขึ้น)

5) ทำการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นทั้งขาเข้าและขาออกระบบบำบัดด้วยเครื่องมือก๊าซโครมาโตกราฟีโดยทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 30 นาทีเป็นเวลา 4 ชั่วโมง และทำการคำนวณประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย จากสมการที่ 3.1

6) ทำการวิเคราะห์ค่าตัวแปรอุทกพลศาสตร์ ซึ่งได้แก่ ขนาดฟองอากาศ (Bubble diameter: D_b) ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (Bubble rising velocity: U_b) ความถี่ในการเกิดฟอง (bubble formation frequency: f_b) และจากค่าต่างๆ ที่กล่าวถึงข้างต้นสามารถนำมาใช้ในการคำนวณค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (Specific interfacial area: a) ได้จากสมการที่ (3.16)

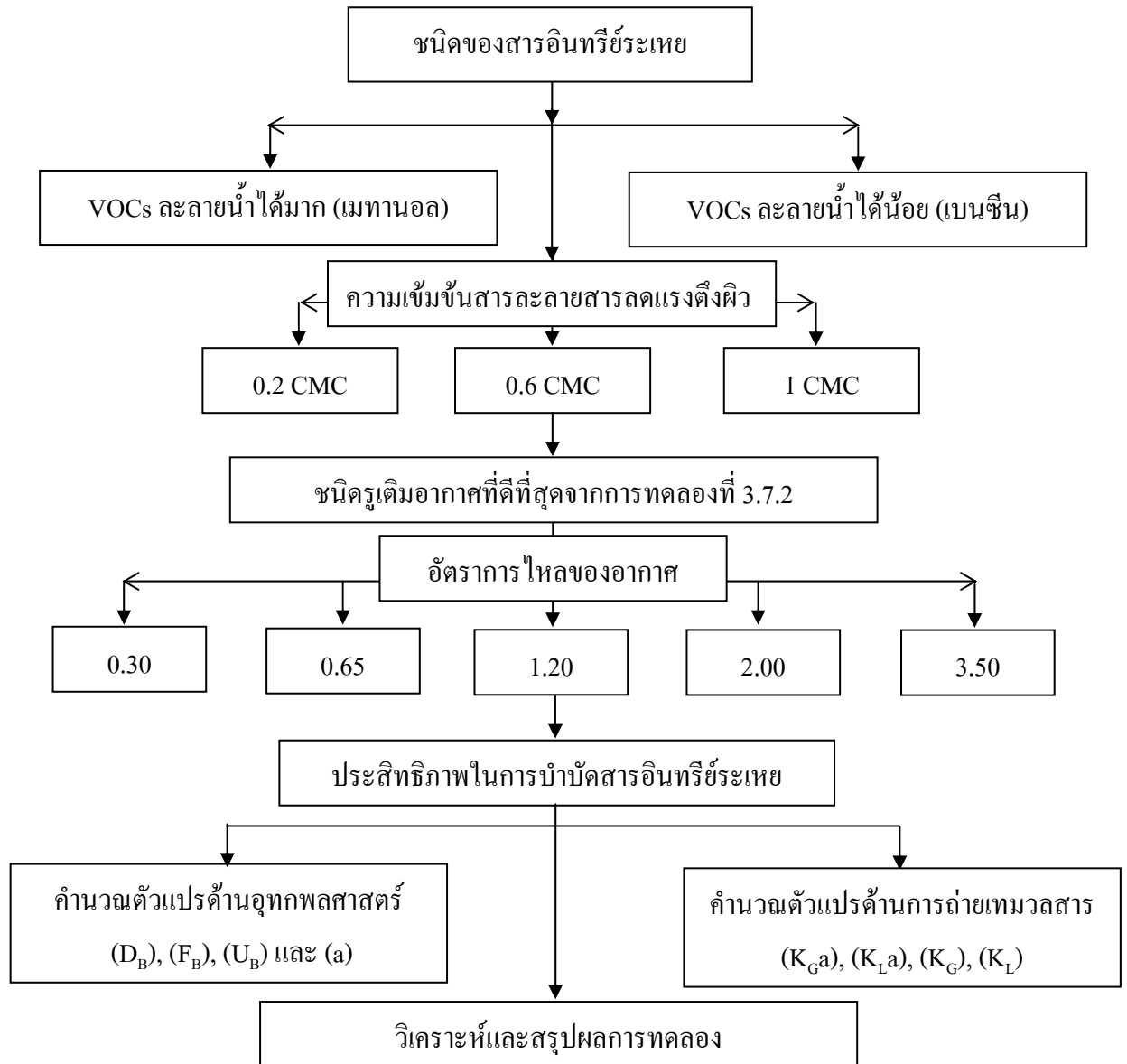
7) ทำการวิเคราะห์ค่าตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสารซึ่งได้แก่ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสก๊าซ (Overall mass transfer coefficient in gas phase: $K_G a$) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสของเหลว (Overall mass transfer coefficient in gas phase: $K_L a$) โดยวิธีการในวิเคราะห์ดังที่กล่าวถึงข้างต้นในหัวข้อที่ 3.5.1 และ 3.5.2

8) ทั้งนี้ จากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมและค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะที่ได้จากการทดลอง สามารถใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยในเฟสก๊าซ (Gas-film

mass transfer coefficient: K_G) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยในเฟสของเหลว (Liquid-side mass transfer coefficient: K_L) ได้จากสมการที่ 3.9 และ 3.10

9) ทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ขั้นตอนการทดลองในการศึกษาแสดงดังรูปที่ 3.16 และตัวแปรที่ศึกษาในการทดลองนี้แสดงในตารางที่ 3.5



รูปที่ 3.16 ขั้นตอนการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของตัวดูดซึมของสารละลายของสารลดแรงดึงผิวชนิดประจุลบ

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรการทดลองในการศึกษาถึงผลกระทบของตัวดูดซึมของสารละลายของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ

ตัวแปรต้น	ค่าที่ทำการควบคุม
อุณหภูมิตัวก่อกำเนิดสารอินทรีย์ระเหย	75 ± 3 องศาเซลเซียส สำหรับกรณีเมทานอล 90 ± 3 องศาเซลเซียส สำหรับกรณีเบนซีน
ขนาดถังปฏิกรณ์	เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.4 ซม. ความสูง 30 ซม.
ชนิดของตัวดูดซึม	สารละลายสารลดแรงตึงผิวประจุลบ
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ทำการควบคุม
ชนิดของสารอินทรีย์ระเหย	เมทานอลและเบนซีน
อัตราการไหลของก๊าซ	0.30, 0.65, 1.20, 2.00 และ 3.50 มล./วินาที
ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหย	ขึ้นกับอัตราการไหลของก๊าซ
ขนาดของรูเติมอากาศ	0.65, 1.25, 2.5 และ 4.50 มม.
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการตรวจสอบ
ประสิทธิภาพในการบำบัด VOCs	ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย
ตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสาร	K_{Ga} , K_{La} , K_G , K_L
ตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์	a , D_B , f_B , U_B

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากลไกในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยในกระบวนการดูดซึมของถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศขนาดเล็ก โดยศึกษาตัวแปรในด้านอุทกพลศาสตร์และในด้านการถ่ายเทมวลสาร เพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยและกลไกการทำงานที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการดูดซึมในรูปฟองอากาศ ดังกล่าวถึงในรายละเอียดในบทที่ 3 ผลการดำเนินการวิจัยนี้ประกอบไป 4 ส่วน ดังนี้

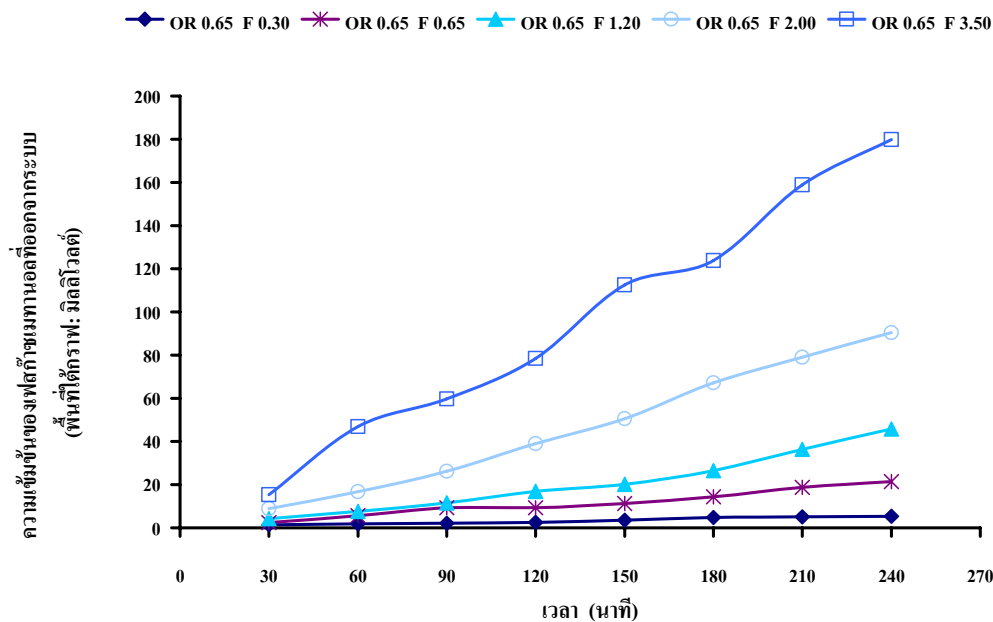
1. การศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของก๊าซซึ่งส่งผลต่อความเข้มข้นขาเข้าที่ต่างกัน
2. การศึกษาผลกระทบของชนิดอุปกรณ์เติมอากาศที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเติมอากาศชนิดแข็งที่มีขนาดแตกต่างกัน
3. การศึกษาผลกระทบของชนิดของสารอินทรีย์ระเหยทั้ง 2 ชนิด คือ ชนิดที่สามารถละลายน้ำได้มากและชนิดที่ละลายน้ำได้น้อย
4. การศึกษาผลกระทบของสารละลายสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบที่เจือปนในเฟสของเหลว

4.1 ผลการศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของอากาศ (ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยที่เข้าระบบ)

จุดประสงค์ของการทดลองในส่วนนี้ เพื่อศึกษาผลกระทบอัตราการไหล ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยที่เข้าถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย รวมไปถึงวิเคราะห์ผลกระทบต่อค่าตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสาร โดยขั้นตอนในการทดลองในส่วนนี้มีรายละเอียดดังแสดงในหัวข้อที่ 3.7.1 ซึ่งผลการทดลองที่ได้สามารถแสดงได้ ดังนี้

4.1.1 ความเข้มข้นของเฟสก๊าซที่ออกจากระบบ

รูปที่ 4.1 แสดงความเข้มข้นของเฟสก๊าซของสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ที่ออกจากระบบฟองอากาศที่เวลาต่างๆ โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที และประยุกต์ใช้อุปกรณ์เติมอากาศที่มีรูเติมอากาศแบบแข็งจำนวน 1 รูที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.65 มิลลิเมตร (OR 0.65)



รูปที่ 4.1 ความเข้มข้นในเฟสก๊าซของสารอินทรีย์ระเหยประเภทเมทานอลที่ออกจากถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศที่เวลาต่างๆ

จากรูปที่ 4.1 พบว่าเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้นทำให้ความเข้มข้นของเฟสก๊าซในระบบมากขึ้น เนื่องจากในการทดลองใช้สารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดเมทานอลบริสุทธิ์ซึ่งมีจุดเดือดที่ 65 องศาเซลเซียส โดยบรรจุเมทานอลในฟาราฟินออย ที่อุณหภูมิ 75 ± 3 องศาเซลเซียส รายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 3.1 บทที่ 3 ส่วนของการทดลอง โดยการที่ความเข้มข้นในระบบแปรผันตรงกับอัตราการไหลของก๊าซเนื่องจากในการทดลองมีไอระเหยของเมทานอลที่มากเกินไปที่ความดันไอคงที่ (อุณหภูมิประมาณ 75 องศาเซลเซียส) โดยในกรณีดังกล่าว เราหาความเข้มข้นจากความเข้มข้นที่สมดุลของสองเฟส ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ได้ เมื่อก๊าซและของเหลวในระบบไม่ใช่ก๊าซและของเหลวจินตภาพ (non-ideal) ความสัมพันธ์จะอยู่ในรูปที่ซับซ้อนยุ่งยาก แต่ถ้าในกรณีที่ก๊าซและของเหลวนั้นเป็นสารจินตภาพ (ideal) สามารถหาความเข้มข้นในรูปของความสัมพันธ์ที่ง่าย ๆ ได้ โดยจากการที่ในการทดลองครั้งนี้ใช้เมทานอลบริสุทธิ์เป็นตัวแทนของสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำได้มาก (สาร A) ดังนั้น เราสามารถใช้กฎของเลอท์ (Raoult's Law) ในการหาค่าความดันย่อยของสาร A ในเฟสไอที่อยู่เหนือเฟสของเหลว (p_A) ได้ดังนี้

$$p_A = x_A P_A \quad (4.1)$$

เมื่อค่า P_A คือความดันไอของสาร A โดยหลังจากที่ทราบค่าความดันไอในสมการที่ (4.1) แล้ว เมื่อทำการแทนที่ความดันไอในสมการของก๊าซในอุดมคติ (Ideal gas law) ดังแสดงในสมการที่

(4.2) จะทำให้เราสามารถคำนวณค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยที่เข้าถึงปฏิกิริยาแบบฟองอากาศที่เกิดจากอุปกรณ์สร้างสารอินทรีย์ระเหยได้ ดังสมการ (4.3)

$$pV = nRT \quad (4.2)$$

$$[C_g] = \frac{n}{V} = \frac{P_A}{RT} \quad (4.3)$$

โดย	V	คือ	ปริมาตรของถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศ (Volume of bubble column)
	n	คือ	จำนวนของก๊าซ (โมล) (Amount of gas in moles)
	R	คือ	ค่าคงที่ของก๊าซ มีค่า $8.314 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\text{mol}^{-1}$
	T	คือ	อุณหภูมิ (Temperature in Kelvin)

โดยความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยชนิดเมทานอลที่สัมพันธ์กับอัตราการไหลของอากาศสามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยค่าความเข้มข้นของเฟสก๊าซทำการตรวจวัดด้วยเครื่อง GC Varian 3800 โดยมีรายละเอียดการปรับสถานะการใช้งานของเครื่องดังกล่าวแสดงในบทที่ 3 โดยในงานวิจัยนี้ ทำงานเก็บความเข้มข้นที่เข้าระบบเป็นจำนวน 8 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 4.1 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยประเภทเมทานอลที่เข้าระบบบำบัด

อัตราการไหลของอากาศ	ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เข้าระบบ (พื้นที่ใต้กราฟ)
0.30 มล./วินาที	538 มิลลิโวลต์
0.65 มล./วินาที	698 มิลลิโวลต์
1.20 มล./วินาที	915 มิลลิโวลต์
2.00 มล./วินาที	1236 มิลลิโวลต์
3.50 มล./วินาที	1646 มิลลิโวลต์

นอกจากนี้ จากรูปที่ 4.1 ยังพบว่าที่เวลาสุดท้ายของการทดลองนี้ คือ ที่เวลา 240 นาที ความเข้มข้นของเฟสก๊าซที่ออกจากระบบมีค่าแตกต่างกัน โดยแปรผันตรงกับความเข้มข้นของเฟสก๊าซที่เข้าระบบ (อัตราการไหลของก๊าซ) นอกจากนี้ จะสังเกตเห็นได้ว่าความเข้มข้นของเฟสก๊าซขาออกเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาและอัตราการไหลของก๊าซเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารอินทรีย์ระเหยที่เข้าสู่ถังปฏิกิริยา ทำให้เมื่อเดินระบบดูดซึมอาจมีสารอินทรีย์บางส่วนที่หลุดออกไปจากเฟสน้ำที่ให้การดูดซึม (Absorbent) เพิ่มสูงขึ้นด้วย อย่างไรก็ตาม จากความเข้มข้นที่ออกจากระบบ (ที่เวลาสุดท้ายของการทดลอง) มีค่าน้อยกว่าค่าความเข้มข้นที่เข้าระบบมาก ($C_g \ll$

Cg inlet) ที่ทุกๆ อัตราไหลของก๊าซ ดังนั้น เราสามารถสรุปได้ว่าสารอินทรีย์ระเหยชนิดเมทานอล ละลายน้ำได้มาก โดยที่สามารถประยุกต์ใช้น้ำประปาเป็นตัวดูดซับสารอินทรีย์ระเหยดังกล่าวซึ่งเป็น ชนิดที่มีขั้ว (hydrophilic VOCs) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

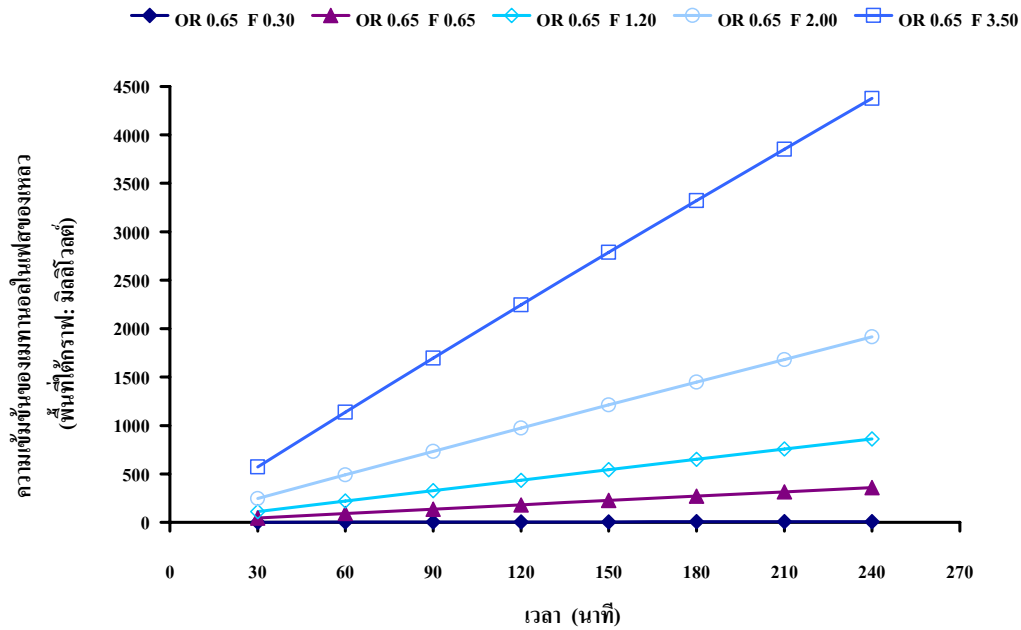
4.1.2 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยประเภทเมทานอลในเฟสของเหลว (น้ำประปา)

รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยประเภทเมทานอล ในเฟสของเหลว (ตัวดูดซับน้ำประปา) และเวลาบำบัดต่างๆ โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของ ก๊าซ 0.30 - 3.50 มิลลิเมตรต่อวินาที ที่รูเติมอากาศแบบแข็งรูเดี่ยวที่มีขนาด 0.65 มิลลิเมตร (single rigid orifice, OR0.65) และทำการทดลองเป็นเวลา 240 นาที ทั้งนี้ ทำการคำนวณความ เข้มข้นของเฟสของเหลวจากสมการสมดุลมวลของปริมาณสารอินทรีย์ระเหยภายในถังปฏิกิริยา แบบฟองอากาศ (Mass balance equation of VOCs in bubble column) จากสมการที่ (4.4) รายละเอียดกล่าวถึงในบทที่ 3 โดยที่เทอม $\int_0^t C_g dt$ ในงานวิจัยนี้คำนวณจากการอินทิเกรตเพื่อหา ค่าพื้นที่ใต้กราฟความเข้มข้นในเฟสก๊าซของสารอินทรีย์ระเหยประเภทเมทานอลที่ออกจากถัง ปฏิกิริยาแบบฟองอากาศที่เวลาต่างๆ (รูปที่ 4.1)

$$C_L(t) = \frac{Q_g}{V_L} \left[C_g^*(in) \times t - \int_0^t C_g dt \right] \quad (4.4)$$

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยชนิดเมทา นอลในเฟสของเหลว (C_L) เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น โดยมีลักษณะสอดคล้องกับสมการเส้นตรง (Linear equation) โดยจากการพิจารณาค่าคงที่ของเฮนรี (Henry law constant) ของเมทานอลที่มีค่า ต่ำ ซึ่งแสดงว่าสารดังกล่าวสามารถละลายในเฟสน้ำได้มากนั้น (ดังแสดงในสมการที่ 4.6) ดังนั้น สามารถกล่าวได้ว่ากลไกการถ่ายเทมวลสารดังกล่าวถูกควบคุมหรือความต้านทานโดยรวมเกิดขึ้นที่ เฟสก๊าซ (Gas phase mass transfer control or resistant) ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวสอดคล้องกับผล การทดลองที่ว่าค่า C_L ที่เพิ่มสูงขึ้นเป็นเส้นตรงที่เวลาต่างๆ (BillerbecK และคณะ, 1999)

$$C_L = \frac{1}{He} \times P_A \quad (4.5)$$



รูปที่ 4.2 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยประเภทเมทานอลในตัวดูดซึมชนิดน้ำประปา ที่เวลาบัพัดต่างๆ

นอกจากนี้ จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งมีลักษณะเป็นดังสมการเส้นตรง ดังนั้น เมื่อทำการคำนวณหาค่าความชัน ($m = \frac{dC_L}{dt}$) ที่สอดคล้องกับผลการทดลองข้างต้น กล่าวได้ว่าค่า m จะสัมพันธ์กับอัตราเร็วในการดูดซึมสารอินทรีย์ชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในเฟส น้ำ โดยที่ค่า m มีค่าเท่ากับ 0.534 1.497 3.580 7.941 และ 18.113 ที่อัตราการไหลของอากาศ 0.30 0.65 1.20 2.00 และ 3.50 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ

สำหรับการวิเคราะห์ค่าตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสารสำหรับกรณีการดูดซึมสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำได้มาก (เมทานอล) ซึ่งกลไกการถ่ายเทมวลสารดังกล่าวถูกควบคุมหรือความต้านทานโดยรวมเกิดขึ้นที่เฟสก๊าซนั้น เมื่อพิจารณาสมการที่ (4.6) ซึ่งแสดงค่าความต้านทานการถ่ายเทมวลสาร โดยรวมในรูปของความต้านทานย่อยในแต่ละเฟส (ค่า He ของเมทานอลมีค่าน้อยมาก) แสดงว่าความต้านทานการถ่ายเทมวลสารในเฟสของเหลวมีค่าน้อยมาก

$$\frac{1}{K_G a} = \frac{1}{k_G a} + \frac{He}{k_L a} \quad (4.6)$$

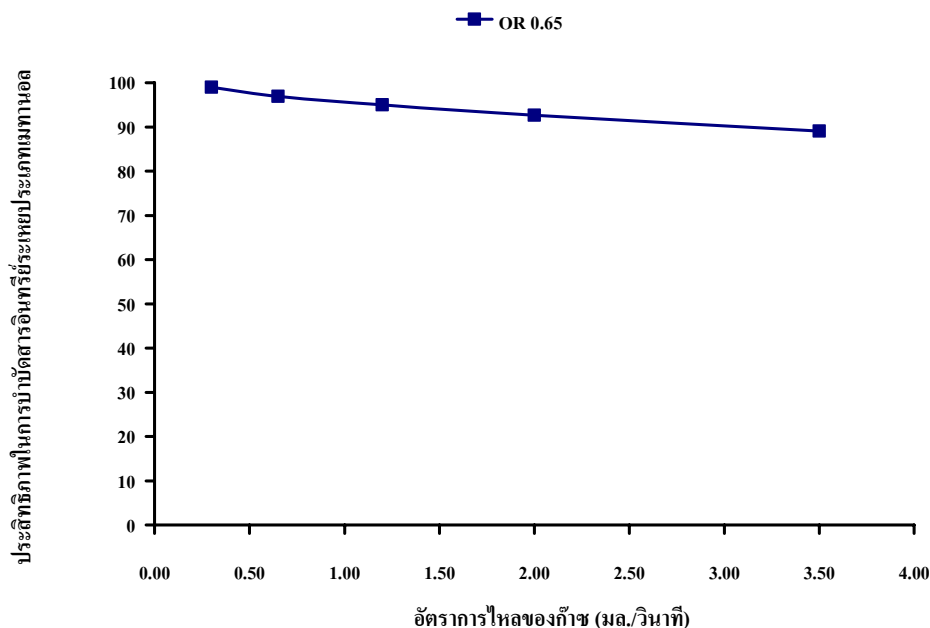
จากการเปรียบเทียบความต้านทานในการถ่ายเทมวลสารรวม (Overall mass transfer resistant) เป็นการยืนยันว่าการถ่ายเทมวลสารในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศในงานวิจัยครั้งนี้ถูกควบคุมโดยเฟสก๊าซ หรือสรุปได้ว่าความต้านทานส่วนใหญ่ของระบบอยู่ในเฟสก๊าซนั่นเอง ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ การวัดค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทมวลสารรวม (Overall mass transfer coefficient) จึงทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสก๊าซ (Overall mass transfer coefficient

in gas phase: $K_G a$) ไม่ใช่การวัดค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสของเหลว (Overall mass transfer coefficient in liquid phase: $K_L a$) ซึ่งจะแสดงผลการทดลองในหัวข้อถัดไป

4.1.3 ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยประเภทเมทานอลในน้ำประปา (VOCs removal efficient)

รูปที่ 4.3 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยประเภทเมทานอลโดยตัวดูดซึมคือน้ำประปา โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที และประยุกต์ใช้อุปกรณ์เติมอากาศชนิดรูเดี่ยวที่มีขนาด 0.65 มิลลิเมตร (Single rigid orifice, OR0.65) โดยประสิทธิภาพในการบำบัดคิดที่เวลาสุดท้ายของการทดลองคือ ที่เวลา 240 นาที โดยประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยสามารถคำนวณจากสมการที่ (4.7)

$$\text{Eff}(\%) = \frac{C_{\text{inlet}} - C_{\text{outlet}}}{C_{\text{inlet}}} \times 100 = \frac{A_{\text{inlet}} - A_{\text{outlet}}}{A_{\text{inlet}}} \times 100 \quad (4.7)$$



รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย (เมทานอล) ที่อัตราการไหลของก๊าซต่างๆ

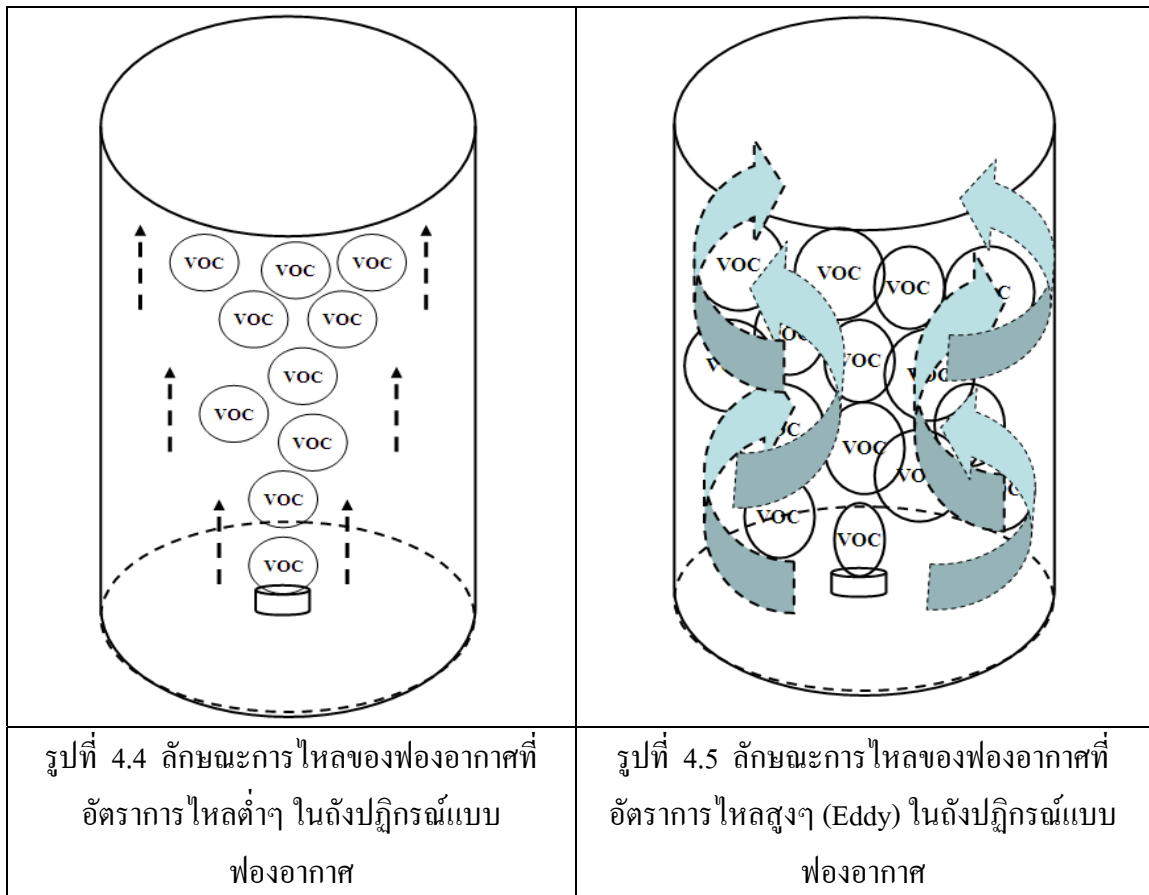
จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย (เมทานอล) มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 89.08 - 98.96 โดยประสิทธิภาพบำบัดมากที่สุดอยู่ที่อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 0.30 มิลลิลิตรต่อวินาที และประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยน้อยสุดที่อัตราการไหล 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที นอกจากนี้ พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดโดยรวมมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มมากขึ้น โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวอาจเป็นผลเนื่องจากเมื่ออัตราการไหลของก๊าซสูงขึ้น ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยที่เข้าระบบสูงขึ้น (ตั้ง

แสดงในตารางที่ 4.1) รวมทั้งก๊าซที่ออกจากระบบมากขึ้นตามอัตราการไหลของก๊าซ (รูปที่ 4.1) จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่คำนวณจากสมการที่ 4.7 มีค่าลดลง แต่อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่า อัตราการไหลของอากาศไม่ค่อยมีความสำคัญมากนักในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยประเภทที่ละลายในน้ำได้มาก (เมทานอล) เนื่องจากประสิทธิภาพในการบำบัดโดยประมาณมากกว่าร้อยละ 90 ดังนั้น เราสามารถสรุปได้ว่า น้ำประปามีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยชนิดที่ละลายน้ำได้มาก

นอกจากนี้ การที่ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยชนิดเมทานอลที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกันนั้น ยังสัมพันธ์กับรูปแบบการไหลภายในคอลัมน์ด้วย ซึ่งรูปแบบแบ่งการไหลสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ การไหลแบบธรรมดา (Ordinary flow) และการไหลแบบเอ็ดดี้ (Eddy flow) ซึ่งจะได้อธิบายต่อไปดังนี้ (แม้น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม, 2534)

1. การไหลแบบธรรมดา (Ordinary flow) การไหลแบบนี้เป็นการไหลแบบราบเรียบ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 จะพบได้ที่อัตราการไหลของก๊าซที่ต่ำในการทดลอง ซึ่งลักษณะของฟองอากาศที่ไหลจะมีลักษณะเป็นราบเรียบตลอดคอลัมน์ทำให้มีการถ่ายเทมวลสารของสารอินทรีย์ระเหยจากฟองอากาศสู่ตัวดูดซึม (น้ำประปา) ได้ดี
2. การไหลกระจายแบบเอ็ดดี้ (Eddy flow) การไหลแบบนี้เป็นการไหลแบบปั่นป่วน ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ทำให้เกิดการผสมกัน (Mixing) ระหว่างฟองของสารอินทรีย์ระเหย (เมทานอล) และน้ำประปา เนื่องจากการไหลที่ปั่นป่วนภายในระบบอาจส่งผลให้สารอินทรีย์ระเหย (เมทานอล) บางส่วนหลุดออกมาจากระบบ (Desorption) ดังนั้น จึงทำให้ความเข้มข้นที่ออกในเฟสก๊าซที่อัตราการไหลของก๊าซสูงมีค่าสูงกว่าที่อัตราการไหลต่ำ ซึ่งเป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยลดลงเมื่ออัตราการไหลของก๊าซสูงๆ

ในทางปฏิบัติ ประสิทธิภาพที่ใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยจัดเป็นตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาและเปรียบเทียบสภาวะการทำงานต่างๆ ของระบบบำบัดสารอินทรีย์ระเหยในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (Bubble Column) จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น เพื่อให้เข้าใจปรากฏการณ์ดังกล่าว รวมถึงกลไกการทำงานมากยิ่งขึ้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสาร (สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย และพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ) และตัวแปรด้านอุทกศาสตร์ของฟองอากาศ (ขนาดของฟองอากาศ ความถี่ในการเกิดฟองอากาศ และความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ) ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับอัตราการไหลของอากาศ และประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยในที่สุด



4.1.4 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสก๊าซ (Overall mass transfer coefficient in gas-phase: $K_G a$)

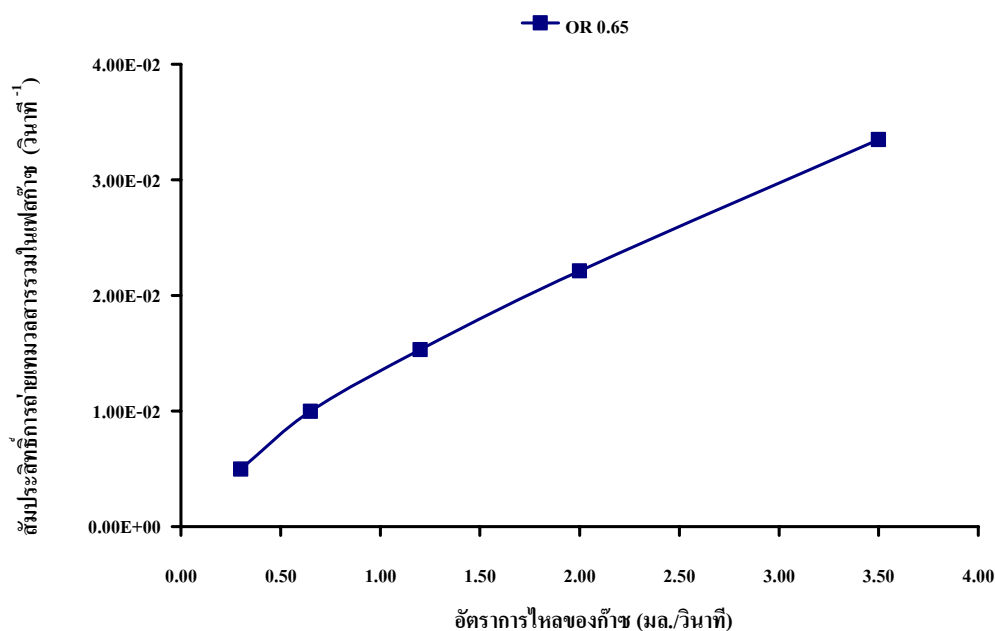
รูปที่ 4.6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสก๊าซ ($K_G a$) ที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกัน โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที โดยประยุกต์ใช้อุปกรณ์เดิมอากาศที่มีรูเดิมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่มีขนาด 0.65 มิลลิเมตร (OR0.65) ทั้งนี้ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสก๊าซ ($K_G a$) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.8 โดยรายละเอียดในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสก๊าซ ($K_G a$) แสดงรายละเอียดในบทที่ 3

$$K_G a = -\frac{Q_g}{V_L} \ln \left(1 - \frac{mV_L}{Q_g C_g^* (in)} \right) \quad (4.8)$$

เมื่อ $K_G a$ = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสของก๊าซ (วินาที⁻¹)
 Q_g = อัตราการไหลของก๊าซเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ (มิลลิลิตรต่อวินาที)
 V_L = ปริมาตรของตัวดูดซับ (น้ำประปาปริมาตร 300 มิลลิลิตร)

- C_g^* (in) = ความเข้มข้นของเมทานอลในเฟสก๊าซที่เข้าถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศซึ่งขึ้นกับอัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.1
- m = ความชันจากกราฟความเข้มข้นของเมทานอลในเฟสของเหลวที่เวลาต่างๆ (จากผลการทดลองรูปที่ 4.2)

ดังนั้น เมื่อแทนตัวแปรทุกตัวในสมการที่ (4.8) จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสก๊าซ ($K_G a$) ที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.6 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสก๊าซ ($K_G a$) ที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกัน

จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.6 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสก๊าซ ($K_G a$) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.0050 - 0.0335 วินาที⁻¹ ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซระหว่าง 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที นอกจากนี้ ค่าสัมประสิทธิ์ $K_G a$ เพิ่มขึ้นที่อัตราการไหลของก๊าซเพิ่มขึ้น โดยที่สามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสก๊าซ ($K_G a$) มีค่าน้อยสุดที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 มิลลิลิตรต่อวินาที มี และค่ามากที่สุดที่อัตราการไหลของก๊าซ 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที

โดยการที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม ($K_G a$) ของอัตราการไหลของก๊าซต่ำมีค่าน้อยกว่าอัตราการไหลของก๊าซที่สูงนั้น เนื่องจากความสามารถในการถ่ายเทมวลสารที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ระบบการดูดซึมประกอบไปด้วยองค์ประกอบมากกว่า 2 ประเภทขึ้นไปและมีความเข้มข้นที่แตกต่างกัน ดังนั้น มวลสารที่มีความเข้มข้นสูงกว่าจึงถูกถ่ายเทไปเพื่อลดความเข้มข้นในระบบลง โดยองค์ประกอบหนึ่งนั้น (สารอินทรีย์ระเหยภายในฟองอากาศ) จะถูกถ่ายเท

ไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า (เฟสน้ำหรือตัวดูดซึม) จนในที่สุดความเข้มข้นของทุกองค์ประกอบจะมีค่าสม่ำเสมอทั้งระบบ และการถ่ายเทมวลสารก็จะสิ้นสุดลง ดังนั้น กล่าวได้ว่า อัตราการถ่ายเทมวลสารเคลื่อนที่ไปยังจุดใดๆ ในทิศทางใดๆ นั้น ขึ้นอยู่กับเกรเดียนต์ของความเข้มข้น (Concentration gradient) ซึ่งสัมพันธ์กับอัตราการไหลของก๊าซที่เข้าระบบคือ เมื่ออัตราการไหลของก๊าซมากขึ้น ความเข้มข้นของก๊าซที่เข้าระบบบำบัดแปรผันตามอัตราการไหลของก๊าซซึ่งมีค่าเพิ่มมากขึ้น (ดังแสดงในตารางที่ 4.1) เมื่อมีความเข้มข้นในระบบมากขึ้นจึงทำให้การถ่ายเทมวลสารมากขึ้นตาม จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้เมื่อ อัตราการไหลของก๊าซสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสก๊าซ ($K_G a$) มีค่ามากด้วย

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าที่อัตราการไหลของก๊าซที่สูง (เกรเดียนต์ของความเข้มข้นมีค่าสูง) จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม (Overall mass transfer coefficient: $K_G a$) มีค่าสูงขึ้นก็ตาม แต่อาจส่งผลต่อการเพิ่มกลไกการไล่ออก (Desorption or Stripping) ของสารอินทรีย์ระเหยจากความปั่นป่วน (Turbulent condition) ได้อีกทางหนึ่งด้วย ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของประสิทธิภาพการบำบัดเมื่ออัตราการไหลของก๊าซเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้น ในทางปฏิบัติ เราควรเดินระบบบำบัดสารอินทรีย์ระเหยที่อัตราการไหลของก๊าซที่เหมาะสม เพื่อที่จะได้ประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงและไม่สิ้นเปลืองพลังงานโดยไม่จำเป็นอีกด้วย นอกจากนี้ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม ($K_G a$) ที่ได้จากการทดลองนี้ เป็นผลคูณระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยในเฟสก๊าซ (K_G) และค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (a)

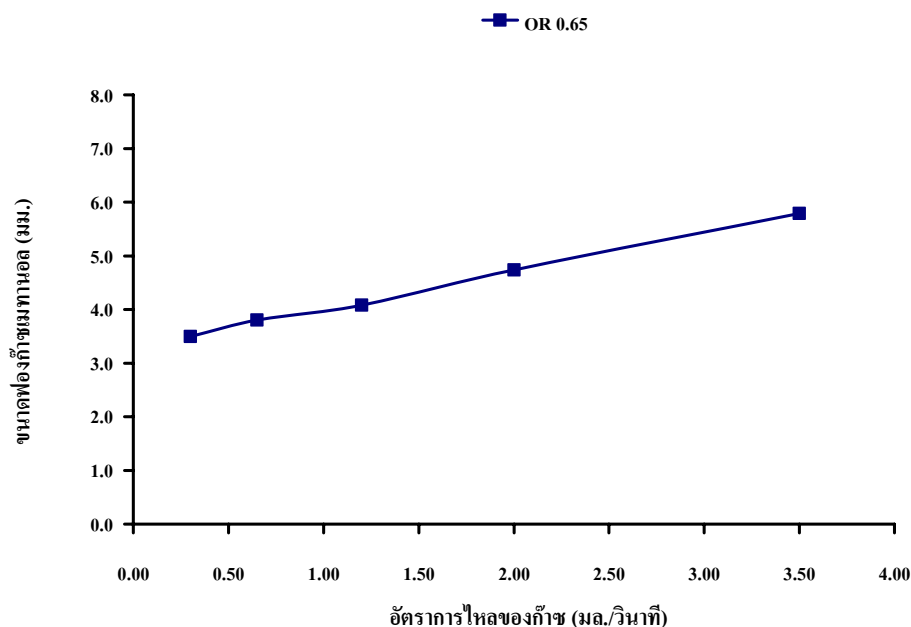
ดังนั้น เพื่อเข้าถึงความสัมพันธ์และกลไกการบำบัดดังกล่าวภายในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (Bubble column) ให้ชัดเจนยิ่งขึ้น เราจะได้ทำการศึกษาด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ (Bubble hydrodynamic parameters) ได้แก่ ขนาดของฟองอากาศ (Bubble diameter: D_B) ความถี่ในการเกิดฟองอากาศ (Bubble formation frequency: f_B) และความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (Bubble rising velocity: U_B) ซึ่งตัวแปรทั้งสามตัวข้างต้นจะได้นำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (Specific interfacial area: a) ซึ่งจะแสดงผลลัพธ์ที่ได้ในหัวข้อถัดไป

4.1.5 ตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamic parameters)

ขนาดของฟองอากาศ (Bubble diameter: D_B)

รูปที่ 4.7 แสดงขนาดของฟองอากาศที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกัน โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที ร่วมกับอุปกรณ์เดิมอากาศที่มีรูเดิมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่มีขนาด 0.65 มิลลิเมตร (OR0.65) โดยขนาดของฟองอากาศที่ได้จากการทดลองนี้มาจากการประยุกต์ใช้วิธีการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย (Image Treatment Techniques) โดยทำ

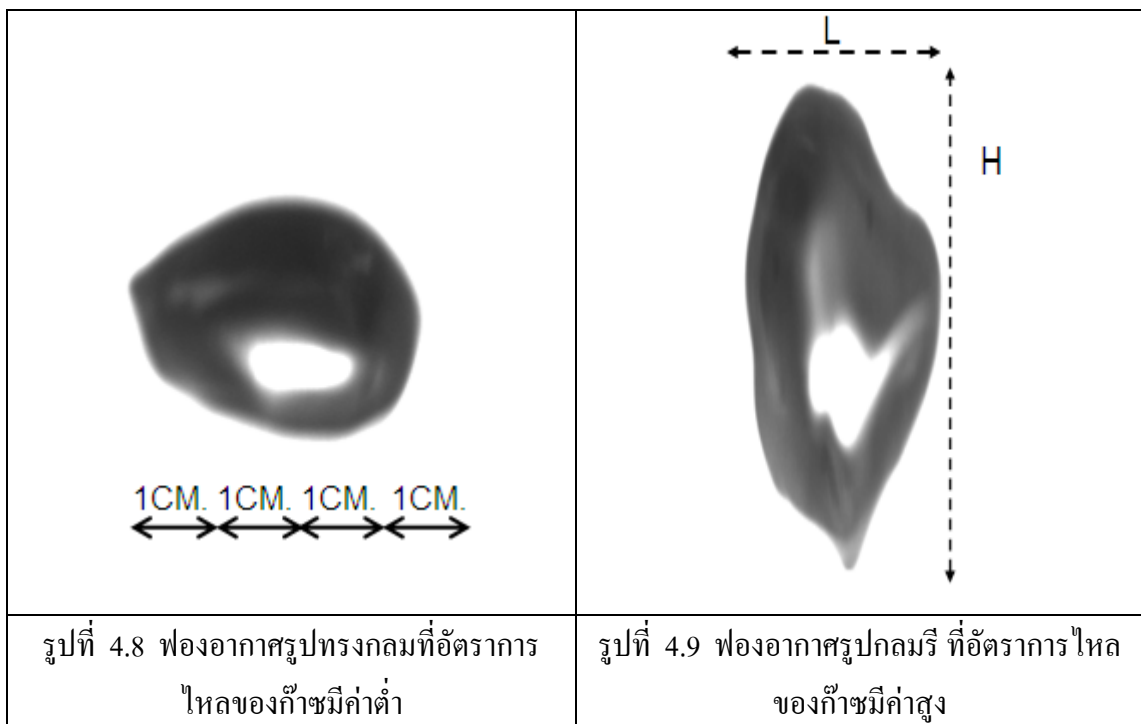
การเก็บด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง (100 รูปต่อวินาที) และวิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรมในการคำนวณขนาดของฟองอากาศจำนวน 150 ภาพต่อการศึกษาที่อัตราการไหลของก๊าซ (Q_g) ต่างๆ เพื่อหาค่าเฉลี่ยของขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (รายละเอียดดังกล่าวถึงในบทที่ 3 ในส่วนของการหาขนาดของฟองอากาศ)



รูปที่ 4.7 ขนาดของฟองอากาศที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกัน

จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าขนาดของฟองอากาศมีค่าระหว่าง 3.49 - 5.22 มิลลิเมตร ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซระหว่าง 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที โดยขนาดของฟองอากาศแปรผันตรงกับอัตราการไหลของก๊าซ กล่าวคือเมื่ออัตราการไหลของก๊าซเพิ่มขึ้นขนาดของฟองอากาศมีขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นตามลำดับ นอกจากนี้ พบว่าที่อัตราการไหลของก๊าซต่ำคือ ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 - 1.20 มิลลิลิตรต่อวินาที ขนาดของฟองอากาศมีค่าค่อนข้างคงที่ ซึ่งกล่าวได้ว่าขนาดของฟองอากาศที่เกิดขึ้นนั้นถูกควบคุมด้วยขนาดของรูเดิมอากาศ (Orifice size) แต่เมื่ออัตราการไหลของก๊าซที่สูงขึ้นคือ ที่อัตราการไหลของก๊าซ 2.00 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที พบว่าขนาดของฟองอากาศมีค่าสูงขึ้น โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวมีสาเหตุมาจากการชนกัน (สัมผัส) ระหว่างฟองอากาศจำนวนมากภายในระบบ และส่งผลทำให้มีการรวมตัวกันของฟองอากาศ (PainmanaKul และคณะ, 2005) อย่างไรก็ตาม จากการที่ระบบบำบัดมีอัตราการไหลของก๊าซสูงขึ้นซึ่งทำให้ขนาดของฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้นนั้น ยังทำให้เราต้องใช้พลังงานในการให้กำเนิดฟองอากาศค่อนข้างสูง ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความปั่นป่วน (Turbulent condition) ภายในระบบ และเป็นสาเหตุให้เกิดการไล่ก๊าซหรือคายการดูดซับ (Desorption) ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยลดลง ดังที่กล่าวถึงข้างต้นอีกด้วย

ทั้งนี้ เมื่อทำการวิเคราะห์รูปแบบหรือลักษณะของฟองอากาศที่เกิดขึ้น (Bubble shape) พบว่าจะมีลักษณะแตกต่างกันกล่าวคือ ที่อัตราการไหลของก๊าซต่ำฟองอากาศที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นทรงกลม (Spherical bubble) ดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยสมการที่ใช้ในการหาขนาดของฟองจะเป็นไปตามสมการที่ 3.11 ในขณะที่ อัตราการไหลของก๊าซสูงฟองอากาศในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นวงรี (Ellipsoidal bubble) ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และสมการที่ใช้ในการหาขนาดของฟองใช้สมการที่ 3.12 ซึ่งลักษณะของฟองอากาศที่ได้ดังกล่าวพบว่าสอดคล้องกับ Bubble regime (Loubiere และคณะ, 2002)

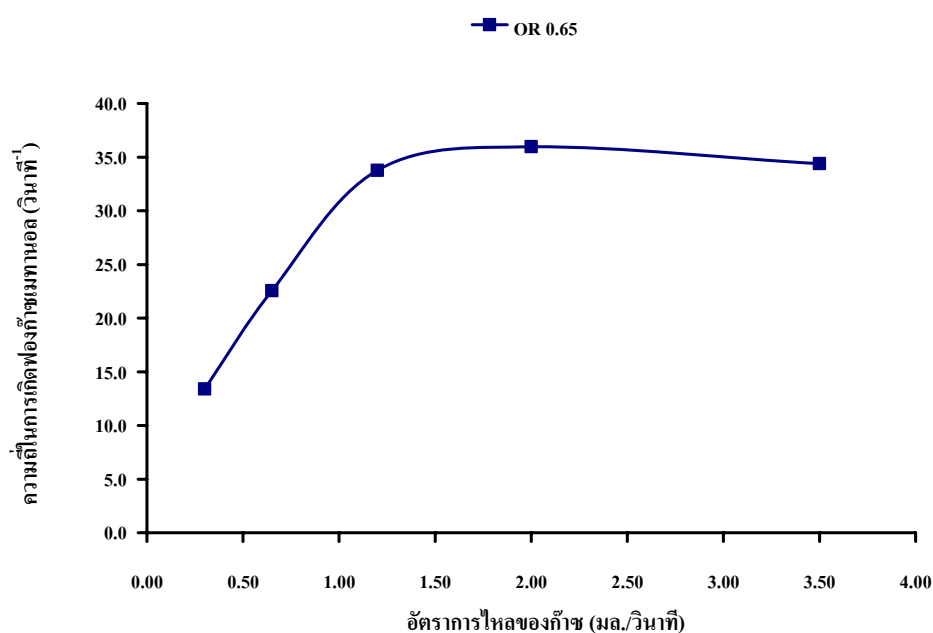


นอกจากนี้ เนื่องจากขนาดของฟองอากาศ (D_B) ที่ได้จากการทดลองข้างต้นมีความสัมพันธ์กับความถี่ในการเกิดฟองอากาศ (f_B) และความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (U_B) ซึ่งเป็นตัวแปรหลักในการเพื่อที่จะหาพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (a) ซึ่งการผลการทดลองในส่วน of ตัวแปรอื่นๆ จะได้นำเสนอในหัวข้อถัดไป

ความถี่ในการเกิดฟองอากาศ (Bubble formation frequency: f_B)

รูปที่ 4.1 แสดงความถี่ในการเกิดฟองอากาศที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกัน โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที โดยประยุกต์ใช้อุปกรณ์เดิมอากาศที่มีรูเดิมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่มีขนาด 0.65 มิลลิเมตร (OR0.65) โดยความถี่ในการเกิด

ฟองในการทดลองส่วนนี้สามารถหาได้จากสมการที่ 3.14 ในส่วนการหาค่าความถี่ในการเกิดฟองอากาศ



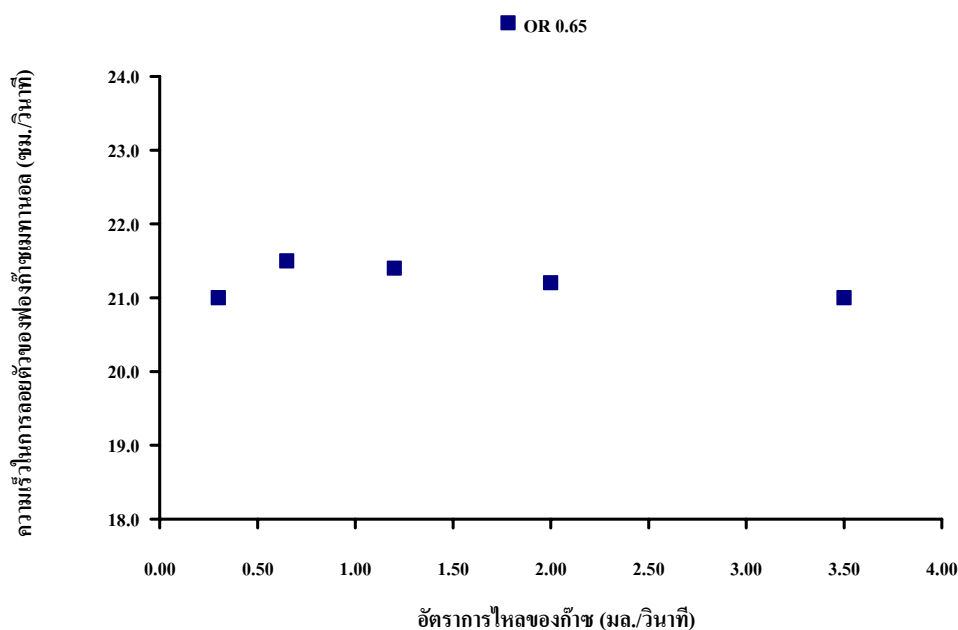
รูปที่ 4.10 ความถี่ในการเกิดฟองที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกัน

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่าความถี่ในการเกิดฟอง มีค่าระหว่าง 13.392 - 35.989 ต่อวินาที ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซระหว่าง 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที ทั้งนี้เนื่องจากความถี่ของฟองอากาศ (f_B) มีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของอากาศ (Q_G) และปริมาตรของฟองอากาศ (V_B) ดังนั้นจะพบว่าความถี่ในการเกิดฟองจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามอัตราการไหลของอากาศ จนถึงอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 2.00 มิลลิลิตรต่อวินาที หลังจากนั้นความถี่ในการเกิดฟองเริ่มคงที่และลดลงอย่างช้าจนถึงอัตราการไหล 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้โดยเมื่ออัตราการไหลของก๊าซเพิ่มสูงขึ้นนั้น จะส่งผลทำให้ขนาดของฟองอากาศใหญ่ขึ้น เนื่องจากการรวมตัวของฟองอากาศภายในคอลัมน์ ซึ่งส่งผลทำให้จำนวนฟองที่เกิดขึ้นต่อเวลาหรือความถี่ในการเกิดฟองอากาศ (f_B) นั้นมีค่าลดลง ซึ่งอาจส่งผลเสียทำให้พื้นที่ผิวของฟองอากาศในการถ่ายเทมวลสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) จากภายในฟองสู่ น้ำ (Bubble transferred surface) ลดลงได้ ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยประเภทเมทานอลที่ลดลงตามลำดับ เมื่ออัตราการไหลของก๊าซสูงขึ้น

ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (Bubble rising velocity: U_B)

รูปที่ 4.11 แสดงความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (U_B) ที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกัน โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที ร่วมกับ

อุปกรณ์เติมอากาศที่มีรูเติมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่มีขนาด 0.65 มิลลิเมตร (OR 0.65) โดยวิธีการวิเคราะห์ค่า U_B ดังแสดงในบทที่ 3 ในส่วนของ การหาค่าความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ



รูปที่ 4.11 ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกัน

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.16 พบว่าความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศมีค่าค่อนข้างคงที่ (มีค่าอยู่ระหว่าง 21.00 - 21.50 เซนติเมตรต่อวินาที) โดยที่อัตราการไหลของก๊าซส่งผลกระทบต่อค่าเวลาการกักฟองอากาศ (สมการที่ 4.9) ภายในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศที่แตกต่างกันค่อนข้างน้อย (Bubble detention time: t_{DB}) เมื่อค่าอัตราการไหลของก๊าซเพิ่มสูงขึ้น โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวแตกต่างเมื่อเทียบกับผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นกับขนาดของฟองอากาศ (D_B) และความถี่ในการเกิดฟอง (f_B) ดังที่กล่าวถึงข้างต้น

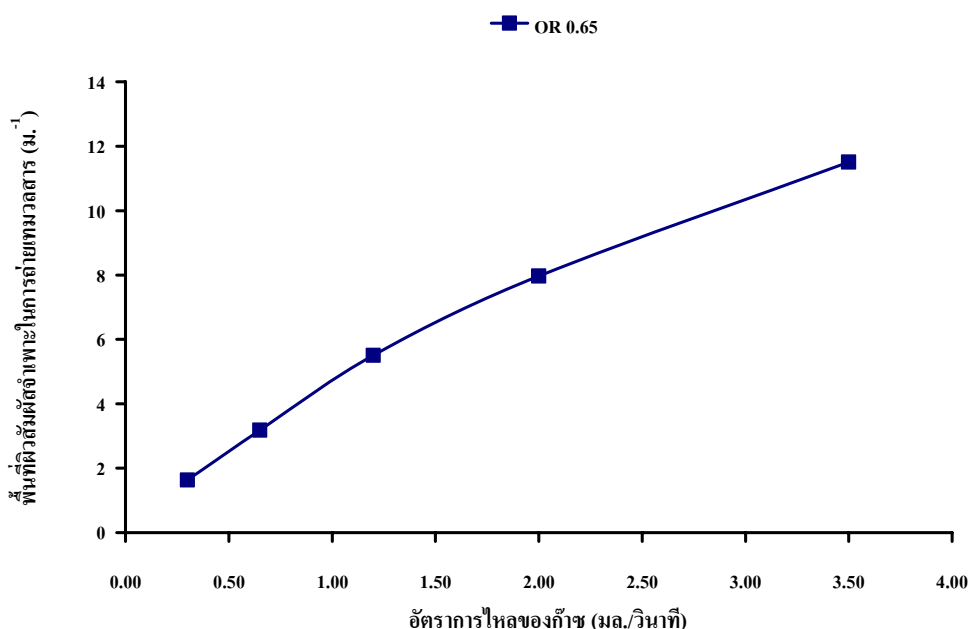
$$t_{DB} = \frac{H_L}{U_B} \quad (4.9)$$

โดยเมื่อพิจารณาสมการที่ (4.9) พบว่าความสูงของน้ำ (H_L) ในระบบบำบัดมีค่าคงที่ประมาณ 20 เซนติเมตร เมื่อพิจารณาจากกราฟพบว่าความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (U_B) มีค่าค่อนข้างคงที่ ตั้งแต่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 - 3.50 มิลลิตรต่อวินาที ดังนั้นเวลาในการกักฟองอากาศในถังปฏิกรณ์ไม่ค่อยแตกต่างกันมากนักที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกัน เป็นการยืนยันว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบเอ็ดดี้ที่เกิดขึ้นมาจากการเพิ่มจำนวนและขนาดของฟองอากาศ รวมไปถึงพลังงานที่ใช้ซึ่งส่งผลต่อสภาพความปั่นป่วนในเฟสน้ำเป็นหลัก นอกจากนี้ พบว่าค่าความเร็วในการ

ลอยตัวของฟองอากาศ (U_B) ซึ่งสอดคล้องกับกราฟการทดลองของ Grace และ Wairegi (1986) ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ในกรณีที่เฟสของเหลวไม่มีการปนเปื้อน (Pure condition) เนื่องจากน้ำประปาได้ถูกเลือกนำมาใช้เป็นตัวดูดซึมในการทดลองนี้

พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (Specific interfacial area: a)

รูปที่ 4.12 แสดงค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกัน โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที และประยุกต์ใช้อุปกรณ์เติมอากาศที่มีรูเติมอากาศแบบแข็งแรงเดียวที่มีขนาด 0.65 มิลลิเมตร (OR 0.65) โดยค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (Specific interfacial area: a) นี้มีความสัมพันธ์กับขนาดของฟองอากาศ (bubble diameter: D_B) ความถี่ในการการเกิดฟอง (bubble frequency: f_B) และค่าแรงลอยตัวของฟองอากาศ (terminal bubble rising velocity: U_B) ซึ่งตัวแปรดังกล่าวหาได้จากการทดลองและคำนวณโดยสมการที่ (3.16)



รูปที่ 4.12 พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสารที่อัตราการไหลของก๊าซแตกต่างกัน

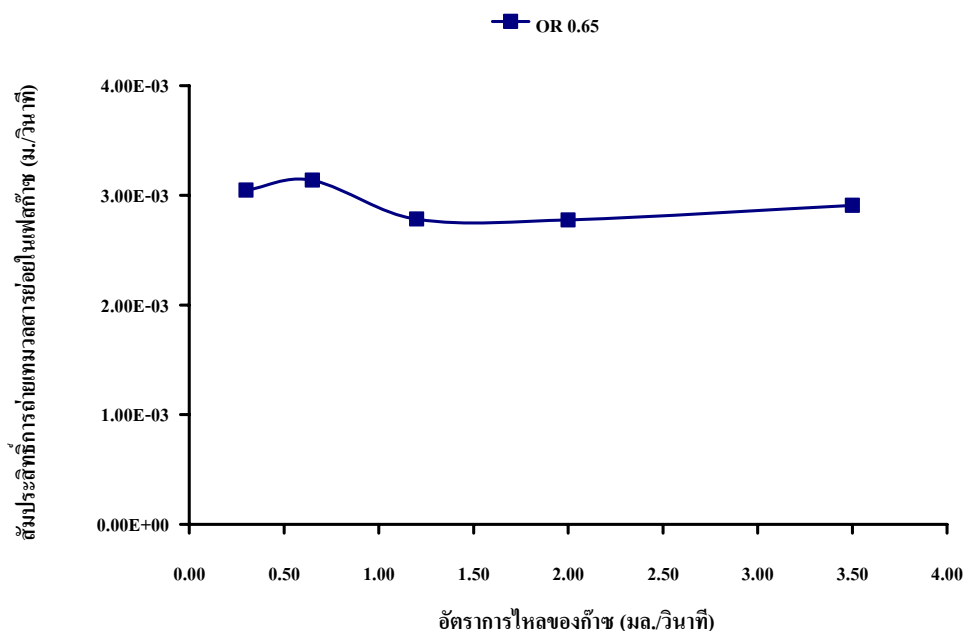
จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (a) มีค่าอยู่ระหว่าง 1.63 - 11.51 m^{-1} ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซระหว่าง 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที โดยจากกราฟพบว่าเมื่ออัตราการไหลของก๊าซเพิ่มขึ้นค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (a) มีค่าเพิ่มขึ้นมีลักษณะค่อนข้างเป็นเส้นตรง นอกจากนี้ พบว่าค่า a มีค่ามากที่สุดที่อัตราการไหลของก๊าซ 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที และมีค่าน้อยสุดที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 มิลลิลิตรต่อวินาที โดยค่าความชันของการเพิ่มขึ้นของค่า a เริ่มลดลงที่อัตราการไหลของก๊าซมากกว่า 2.00 มิลลิลิตร

ต่อวินาที โดยช่วงของค่า Q_G ดังกล่าวสอดคล้องกับการที่ค่าความถี่ในการเกิดฟองอากาศ (จำนวนของฟองที่เกิดขึ้นในเวลา 1 วินาที) ที่เริ่มมีค่าลดลง (รูปที่ 4.10)

ทั้งนี้ เมื่อพิจารณารูปที่ 4.12 เราสามารถกล่าวได้ว่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (a) ที่มีค่าเพิ่มขึ้นนั้นสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสก๊าซ ($K_G a$) เมื่ออัตราการไหลของก๊าซสูงขึ้น โดยที่ปรากฏการณ์ดังกล่าวกับส่งผลเสียกับประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย ดังนั้น การประยุกต์ใช้แนวทางในการเพิ่มค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (a) ให้มีค่ามาก เพื่อเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสก๊าซ ($K_G a$) นั้น อาจไม่ใช่วิธีการที่ดีที่สุดเสมอไปในการกระบวนการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (Bubble column) เพราะการที่เพิ่มผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (a) โดยการทำให้ฟองมีขนาดเล็ก ต้องใช้พลังงานเป็นจำนวนมากทำให้สิ้นเปลืองพลังงานโดยไม่จำเป็น นอกจากนี้แล้ว พบว่าก่อให้เกิดความปั่นป่วน (Turbulent condition) ในระบบ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง เนื่องจากการไล่ก๊าซ (Desorption) ออกจากเฟสของเหลวได้อีกด้วย

4.1.6 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยในเฟสก๊าซ (Gas – film mass transfer coefficient: K_G)

รูปที่ 4.13 แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย (Gas-film mass transfer coefficient: K_G) ที่อัตราการไหลของอากาศที่แตกต่างกัน โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที ร่วมกับอุปกรณ์เดิมอากาศที่มีรูเดิมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่มีขนาด 0.65 มิลลิเมตร (OR 0.65) เนื่องจากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยที่เฟสก๊าซ (K_G) ไม่สามารถวัดได้ง่ายนัก เพราะจะต้องทราบค่าความเข้มข้นและค่าความดันย่อยที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟสที่สมดุลระหว่างสองเฟส ($P_{A,i}$ และ $C_{A,i}$) ซึ่งวิธีการที่ง่ายกว่าคือการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม ($K_G a$) ซึ่งใช้ค่าแรงขับเคลื่อนรวมที่ความเข้มข้นรวมในทั้งสองเฟส (P_{AG} และ C_{AL}) ดังได้กล่าวในหัวข้อการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม ($K_G a$) โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยในเฟสก๊าซ (K_G) ในการทดลองนี้จะเป็นสัดส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม ($K_G a$) และพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (a) ซึ่งวิเคราะห์ได้จากการทดลองดังที่กล่าวถึงข้างต้น (PainmanaKul และคณะ, 2005) โดยรายละเอียดดังแสดงในบทที่ 3



รูปที่ 4.13 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย (K_G) ที่อัตราการไหลของก๊าซต่างๆ

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.13 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย (K_G) มีค่าอยู่ระหว่าง $0.0028 - 0.0031 \text{ m.s.}^{-1}$ ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซระหว่าง $0.30 - 3.50$ มิลลิเมตรต่อวินาที โดยมีค่า K_G มีค่าค่อนข้างคงที่ ($\approx 3 \times 10^{-3} \text{ m/s}$) ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวขัดแย้งกับผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (a) ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของก๊าซเพิ่มขึ้น ดังนั้น สามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่า การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของการถ่ายเทมวลสารตั้งอยู่บนพื้นฐานของเฟสก๊าซ ($K_G a$) ซึ่งมีความสำคัญต่อค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย จากการทดลองดังกล่าวพบว่า ค่า K_G คงที่แสดงว่าก๊าซฟิล์มและความต้านทานไม่ขึ้นกับอัตราการไหลของก๊าซ โดยพิจารณาสมการที่ 4.10

$$\frac{dC}{dt} = K_G a \times [C_g^* - C_g] \quad (4.10)$$

เมื่ออัตราการไหลของก๊าซสูงขึ้นส่งผลให้ค่า C_g^* สูงขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นที่เข้าระบบบำบัดมากขึ้นอีกทั้งเมทานอลละลายน้ำได้มาก เนื่องจากค่า P_G^* สูง จึงส่งผลให้ ΔC สูงมากๆ และส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงด้วย นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่า $K_G a$ พบว่าเมื่ออัตราการไหลของก๊าซสูงขึ้นค่า $K_G a$ เพิ่มขึ้น แต่ถ้าสูงเกินไปส่งผลให้เกิดความปั่นป่วนภายในระบบทำให้เกิดการหลุดออกจากระบบ (desorption) ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้น

ดังนั้น จากการศึกษาในส่วนนี้ จะพบว่าไม่มีความจำเป็นที่จะต้องให้พลังงานสูง เพื่อเพิ่มจำนวนฟองหรือสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการถ่ายเทมวลสารจากสารอินทรีย์ระเหย (VOCs) จากฟองอากาศไปสู่เฟสของเหลว เนื่องจากการที่ต้องทำให้พื้นที่

ผิวสัมผัสในการถ่ายเทมวลสารมากขึ้น เรามีความจำเป็นต้องใช้พลังงานเป็นจำนวนมากทำให้สิ้นเปลืองพลังงานโดยไม่จำเป็น

ตารางที่ 4.2 ค่าตัวแปรที่ศึกษาจากการทดลองผลกระทบของอัตราการไหลของอากาศ (ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยที่เข้าระบบ) ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย

Qg	%Eff	$K_G a$	D_B	f_B	U_B	a	K_G
0.30	98.96	0.0050	3.50	13.39	21.00	1.63	0.0031
0.65	96.92	0.0100	3.80	22.54	21.50	3.18	0.0031
1.20	94.99	0.0153	4.08	33.78	21.40	5.50	0.0028
2.00	92.68	0.0221	4.73	35.99	21.20	7.97	0.0028
3.50	89.08	0.0335	5.79	34.39	21.00	11.51	0.0029

จากตารางที่ 4.2 เราสามารถสรุปผลการทดลองดังมีรายละเอียด ดังนี้

- ที่อัตราการไหลของก๊าซสูงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยมีค่าลดลง เนื่องจากความปั่นป่วนของระบบของถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ
- พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (a) จะมีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยที่เฟสก๊าซ (K_G) จะค่อนข้างคงที่ ดังนั้น ทางปฏิบัติ เราควรที่จะดำเนินการระบบที่อัตราการไหลของก๊าซที่เหมาะสม คือ ที่อัตราการไหลระดับกลางๆ ดีกว่า เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานในการสร้างฟองอากาศขนาดเล็กๆ จำนวนมาก เพื่อเพิ่มค่า a เนื่องจากอาจเกิดปัญหาการไล่ก๊าซ (Desorption) ของสารที่ต้องการบำบัดอีกทางหนึ่งด้วย

โดยในหัวข้อถัดไป จะเป็นการศึกษาการเลือกใช้รูเดิมอากาศแบบแข็งรูเดี่ยว (Single rigid orifice) ที่มีขนาดรูเดิมอากาศที่แตกต่างกัน ซึ่งปัจจัยดังกล่าวจะส่งผลต่อการสร้างฟองอากาศที่มีลักษณะทางอุทกพลศาสตร์ที่เหมาะสม ทำให้เราได้ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (a) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยในเฟสก๊าซ (K_G) รวมไปถึงสภาพความปั่นป่วนของเฟสน้ำที่เหมาะสม เพื่อที่จะทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสก๊าซ ($K_G a$) และประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยที่เพิ่มสูงขึ้นต่อไป

4.2 ผลการทดลองการศึกษาผลกระทบของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเดิมอากาศชนิดแข็ง 4 ชนิด ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยและตัวแปรในด้านการถ่ายเทมวลสารและด้านอุทกพลศาสตร์

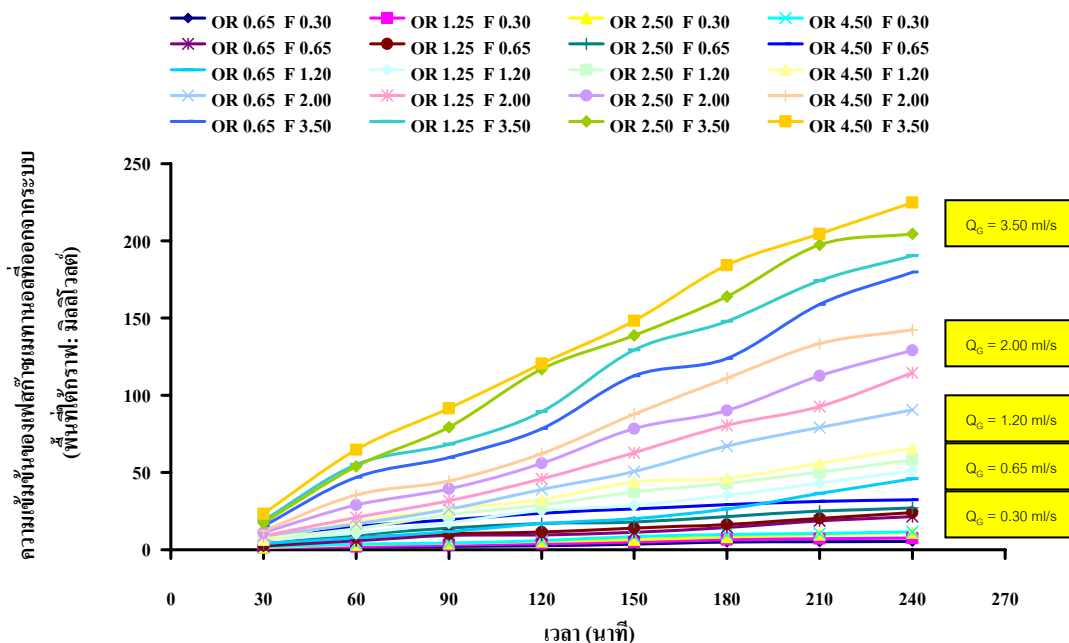
โดยจุดประสงค์ของการทดลองนี้ เพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดรูเดิมอากาศทั้ง 4 ชนิดต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำได้มาก (เมทานอล) เพื่อวิเคราะห์ค่าตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสารที่เกิดขึ้น โดยขั้นตอนในการทดลองสามารถสรุปได้ในหัวข้อ 3.7.2 โดยมีผลการทดลองดังนี้ คือ

4.2.1 ความเข้มข้นของเฟสก๊าซที่ออกจากระบบ

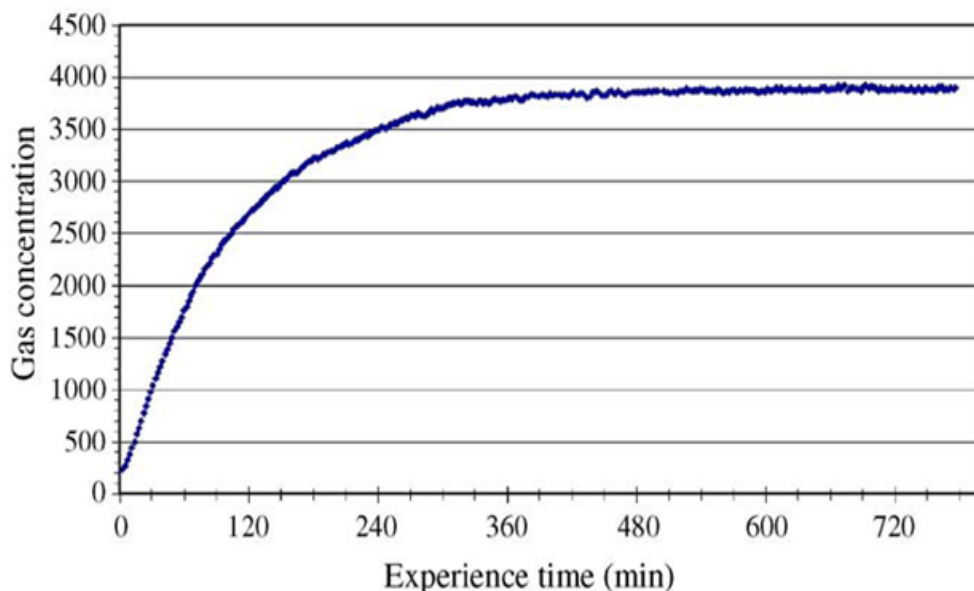
รูปที่ 4.14 แสดงความเข้มข้นของเฟสก๊าซของสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำได้มาก (เมทานอล) ที่ออกจากระบบที่เวลาต่างๆ โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 - 3.50 มิลลิตรต่อวินาที ที่ประยุกต์ใช้อุปกรณ์เดิมอากาศที่มีรูเดิมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่มีขนาดแตกต่างกัน ดังนี้ 0.65 1.25 2.50 และ 4.50 มิลลิเมตร (OR0.65 OR1.25 OR2.50 และ OR4.50) โดยวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซที่ออกจากระบบของเมทานอลในเฟสก๊าซที่เวลาต่างๆ ทุก 30 นาทีเป็นเวลา 4 ชั่วโมง และทำการทดลองและเก็บก๊าซตรงจุดเก็บความเข้มข้นขาออก (Septum for sampling gas (out)) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยใช้อุปกรณ์ก๊าซโครมาโทกราฟี (GC / FID VARIAN 3800) โดยทำการทดลอง 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยเพื่อให้ได้ค่าความถูกต้องที่แม่นยำมากยิ่งขึ้น ซึ่งจากการทดลองพบว่า เมื่ออัตราการไหลของก๊าซสูงขึ้นทำให้ความเข้มข้นเข้าระบบมากขึ้น รายละเอียดได้อธิบายในส่วนก่อนหน้าในส่วน 4.1.1 ความเข้มข้นของเฟสก๊าซที่ออกจากระบบในหัวข้อผลการศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของอากาศ

จากรูปที่ 4.14 จะพบว่าความเข้มข้นของเฟสก๊าซที่ออกจากระบบแปรผันตรงกับความเข้มข้นที่เข้าระบบ นอกจากนี้จะพบว่าความเข้มข้นของเฟสก๊าซเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นตามหลักการดูดซึมของตัวดูดซึม โดยขนาดของรูเดิมอากาศที่มีขนาดแตกต่างกัน ซึ่งในการทดลองนี้ คือ 0.65 1.25 2.50 และ 4.50 มิลลิเมตรไม่ได้มีผลกระทบมากนักในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำได้มาก (เมทานอล) และจะพบว่าความเข้มข้นที่ออกจากระบบที่เวลาสุดท้ายของการทดลองคือ 240 นาที มีค่าแตกต่างจากความเข้มข้นที่เข้าระบบมาก ($C_g \lll C_{g \text{ inlet}}$) ต้องใช้เวลานานมากกว่าจะถึงจุดอิ่มตัวในเฟสก๊าซและเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา เช่น ในงานวิจัยของ (Heymes และคณะ 2006) ซึ่งเป็นการศึกษาผลกระทบของสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (โทลูอิน) ซึ่งแสดงผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.15 โดยความเข้มข้นของเฟสก๊าซที่ออกจากระบบใช้เวลาจนถึงจุดอิ่มตัวในเฟสก๊าซ กล่าวคือประมาณ 250 นาที ที่จะถึงจุดอิ่มตัวในเฟสก๊าซ (ความเข้มข้นที่เข้าระบบ = ความเข้มข้นที่ออกจากระบบ) ดังนั้นเป็นการยืนยันว่าสารอินทรีย์ระเหย

ชนิดเมทานอลละลายน้ำได้มาก และจากความเข้มข้นที่ออกจากระบบในเฟสก๊าซมีค่าน้อย ดังนั้น น้ำประปาสามารถใช้เป็นตัวดูดซับสารอินทรีย์ระเหยชนิดที่มีขั้ว (Hydrophilic VOCs) ได้อีกทั้ง ขนาดของรูเดิมอากาศไม่ได้มีผลกระทบมากนักในการบำบัดสารอินทรีย์ชนิดที่ละลายน้ำมาก



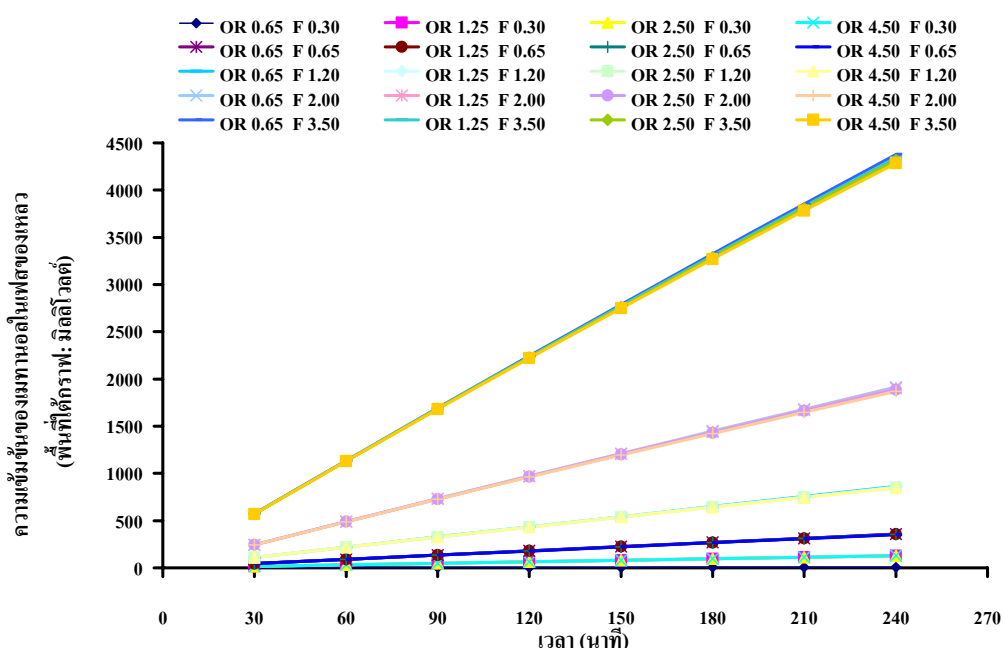
รูปที่ 4.14 ความเข้มข้นในเฟสก๊าซของเมทานอลที่ออกจากระบบ โดยศึกษาผลกระทบจากอุปกรณ์เดิมอากาศที่มีรูเดิมอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 ชนิด



รูปที่ 4.15 แสดงความเข้มข้นของเฟสก๊าซที่ออกจากระบบในถังปฏิบัติการแบบพองอากาศ โดยสารอินทรีย์ชนิดละลายน้ำน้อย (โทลูอิน) ในงานวิจัยของ (Heymes และคณะ, 2006)

4.2.2 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยประเภทเมทานอลในเฟสของเหลว

รูปที่ 4.16 แสดงถึงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยประเภทเมทานอลที่ละลายหรือถูกดูดซับในเฟสของเหลวในตัวดูดซับน้ำประปาที่เวลาต่างๆ โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที ที่รูเดิมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่มีขนาดแตกต่างกัน ดังนี้ 0.65 1.25 2.50 และ 4.50 มิลลิเมตร (OR0.65 OR1.25 OR2.50 OR4.50) ซึ่งทำการทดลองเป็นเวลา 240 นาที ทั้งนี้ การคำนวณความเข้มข้นของเฟสของเหลวได้แสดงวิธีคำนวณในส่วนที่ 4.1.2 โดยที่ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยประเภทเมทานอลในเฟสของเหลว (น้ำประปา) จากสมการจากสมการที่ (4.4) ถึงสมการที่ (4.6) ซึ่งผลการคำนวณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยประเภทเมทานอลในเฟสของเหลวสามารถแสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยชนิดเมทานอลในเฟสของเหลว (น้ำประปา) โดยใช้อุปกรณ์เดิมอากาศที่มีรูเดิมอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 ชนิด

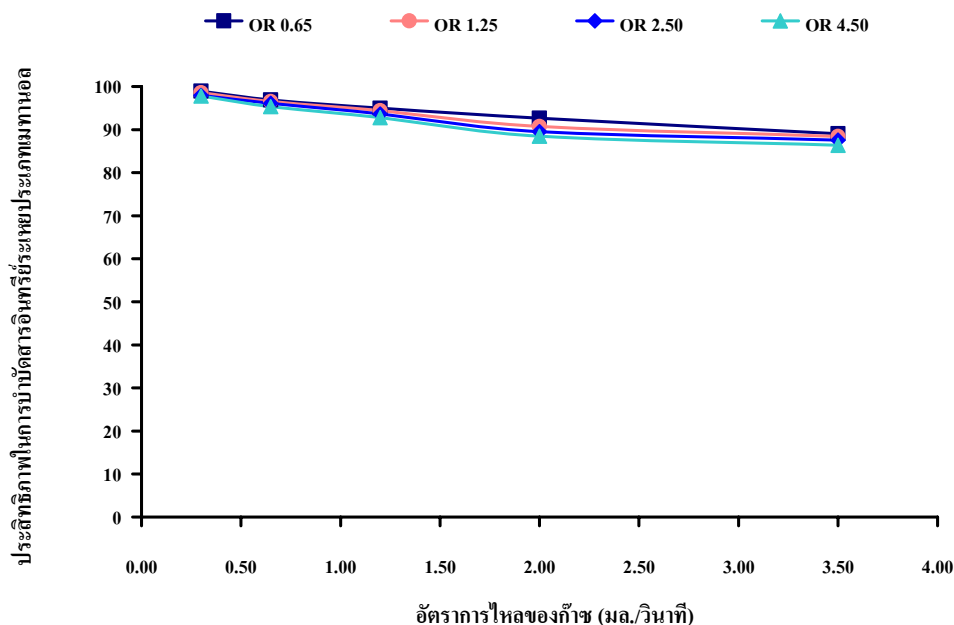
จากรูปที่ 4.16 พบว่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดเมทานอลที่ถูกดูดซับในเฟสของเหลวจะเพิ่มขึ้นในลักษณะที่เป็นเส้นตรงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น โดยเมื่อพิจารณาค่าเฮนรี (Henry constant) ของเมทานอลที่มีค่าต่ำ พบว่าการถ่ายเทมวลสารถูกควบคุมโดยเฟสก๊าซ (Gas-phase mass transfer resistant) ปรากฏการณ์ดังกล่าวยืนยันจากความเข้มข้นของเฟสของเหลวที่เป็นเส้นตรงที่เวลาต่างๆในการทดลอง ซึ่งแสดงรายละเอียดใน 4.1.2 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยประเภทเมทานอลในเฟสของเหลว (น้ำประปา) นอกจากนี้จะพบว่าความเข้มข้นของเฟสของเหลวที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกัน ค่าทั้งหมดเป็นเส้นตรงและความชัน (m) ซึ่งมาจาก $\frac{dC_L}{dt}$ นั้นกล่าวได้ว่าสัมพันธ์กับอัตราเร็วในการดูดซับสารอินทรีย์ชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) โดยความ

เข้มข้นในเฟสของเหลวจะแบ่งออกเป็น 5 เส้นอย่างชัดเจนตามอัตราการไหลของก๊าซ (ความเข้มข้นที่เข้าระบบ) นอกจากนี้ จะพบว่าขนาดรูเดิมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่มีขนาดแตกต่างกัน (OR0.65 OR1.25 OR2.50 OR4.50) ความเข้มข้นในเฟสของเหลวไม่ค่อยแตกต่างกันมากนักที่อัตราการไหลของก๊าซเดียวกัน โดยการดูดซึมดังกล่าวขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมีของเฟสของเหลวที่ใช้เป็นสารดูดซึมมากกว่าการปรับเปลี่ยนลักษณะทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศจากอุปกรณ์เดิมอากาศที่แตกต่างกัน

นอกจากนี้ จากที่ได้อธิบายในส่วนก่อนหน้านี้ พบว่าสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) การถ่ายเทมวลสารถูกควบคุมโดยเฟสก๊าซซึ่งสอดคล้องกับการที่มีการลดลงของความเข้มข้นในส่วนที่เป็นฟิล์มก๊าซมาก ดังนั้นการถ่ายเทมวลสารจากเฟสก๊าซคือฟองเมทานอลไปสู่เฟสของเหลว (น้ำประปา) สามารถอธิบายได้ดังนี้ การถ่ายเทมวลสารซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นภายในเฟส โดยที่องค์ประกอบของฟองเมทานอลนั้นจะถูกถ่ายเทจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นที่ต่ำกว่า (น้ำประปา) จนในที่สุดความเข้มข้นของทุกองค์ประกอบจะมีค่าสม่ำเสมอทั้งระบบการถ่ายเทมวลสารจึงยุติ

4.2.3 ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยเมทานอลในน้ำประปา

รูปที่ 4.17 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยประเภทเมทานอลโดยตัวดูดซึมคือน้ำประปา โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 - 3.50 มิลลิเมตรต่อวินาที ที่รูเดิมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่มีขนาดแตกต่างกัน ดังนี้ 0.65 1.25 2.50 และ 4.50 มิลลิเมตร (single rigid orifice, OR0.65 OR1.25 OR2.50 OR4.50) โดยประสิทธิภาพในการบำบัดคิดที่เวลาสุดท้ายของการทดลอง คือ ที่เวลา 240 นาที



รูปที่ 4.17 ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยเมทานอลในน้ำประปา
ที่สอดคล้องกับอุปกรณ์เดิมอากาศ 4 ชนิด

จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.17 พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำได้มากอยู่ในช่วงร้อยละ 86.35 - 98.96 นอกจากนี้ ขนาดรูเดิมอากาศแบบเชิงรูปเดียวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน ประสิทธิภาพในการบำบัดมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มมากขึ้น โดยประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยจะมากที่สุดที่อัตราการไหลของก๊าซต่ำๆ นั่นคือ อยู่ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 มิลลิลิตรต่อวินาที เนื่องจาก ที่อัตราการไหลต่ำเวลาในการสัมผัสกันมากขึ้นอีกทั้งการไหลในระบบเป็นแบบราบเรียบ ทำให้สามารถถ่ายเทมวลสารได้มากขึ้น ในขณะที่ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายน้อยสุดจะอยู่ที่อัตราการไหลของก๊าซ 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที ซึ่งเป็นผลจากการไหลแบบเอ็ดดี้ (Eddy flow) ซึ่งเป็นการไหลในระบบเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ทำให้ก๊าซของเมทานอลหลุดออกมาจากระบบบำบัดได้ ซึ่งส่งผลให้ความเข้มข้นที่ออกจากเฟสก๊าซมีค่าสูง เป็นเหตุให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยที่อัตราการไหลสูงๆมีประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำ (ดังแสดงในรูปที่ 4.5) ซึ่งสอดคล้องกับรายละเอียดทั้งหมดในส่วนนี้ได้แสดงในหัวข้อที่ 4.1.2 โดยผลลัพธ์ดังกล่าวเป็นการยืนยันว่าที่ขนาดรูเดิมอากาศแบบเชิงรูปเดียวที่มีขนาดเท่ากันนั้นมีลักษณะการไหลในคอลัมน์ที่อัตราการไหลเท่ากันมีลักษณะเหมือนกันจึงทำให้แนวโน้มของการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยคล้ายกัน

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยที่มีขนาดรูเดิมอากาศที่แตกต่างกัน (OR0.65 OR1.25 OR2.50 OR4.50) พบว่าที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากันขนาดรูเดิมอากาศแบบเชิงรูปเดียวที่มีขนาดเล็กที่สุดจะมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยประสิทธิภาพการ

บำบัดสารอินทรีย์ระเหย (เมทานอล) จะเรียงลำดับจากมากไปหาน้อย คือ OR 0.65 OR1.25 OR2.50 และ OR 4.50 ตามลำดับ โดยการที่ขนาดรูเดิมอากาศที่มีขนาดเล็กมีประสิทธิภาพในการบำบัดมากกว่าขนาดรูเดิมอากาศที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากที่อัตราการไหลของก๊าซที่ต่ำๆ ทำให้เกิดปรากฏการณ์การเกิดของฟองอากาศ (Bubble generation) ที่เหมาะสม โดยอาจจะเป็นในด้านของขนาดฟองอากาศ (D_B) และพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (a) ที่มีค่ามากขึ้น ซึ่งทำให้การถ่ายเทมวลสารจากเฟสก๊าซไปสู่เฟสของเหลวมากขึ้น และเป็นเหตุให้ความเข้มข้นของเฟสก๊าซที่ออกจากระบบน้อยลง ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงขึ้นตามลำดับ โดยการศึกษาในส่วนของคุณสมบัติทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศจะได้กล่าวถึงต่อไป

นอกจากนี้ ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยขึ้นกับคุณสมบัติทางเคมีของตัวดูดซับ คือ น้ำประปา (H_2O) เป็นกลุ่มที่มีขั้วและตัวถูกดูดซับ คือ เมทานอล (CH_3OH) เป็นสารอินทรีย์ระเหยที่มีคุณสมบัติทางเคมีเป็นสารที่มีขั้วกล่าวคือ มีกลุ่ม OH^- เมื่ออยู่ในระบบบำบัดแบบฟองอากาศจึงเกิดการดูดซับกันได้โดยตรงส่วนมีขั้วของน้ำประปา (H_2O) และมีขั้วของเมทานอล (CH_3OH) จึงทำให้เกิดการดูดซับได้ในปริมาณมาก (อุดม กักผล และคณะ, 2536)

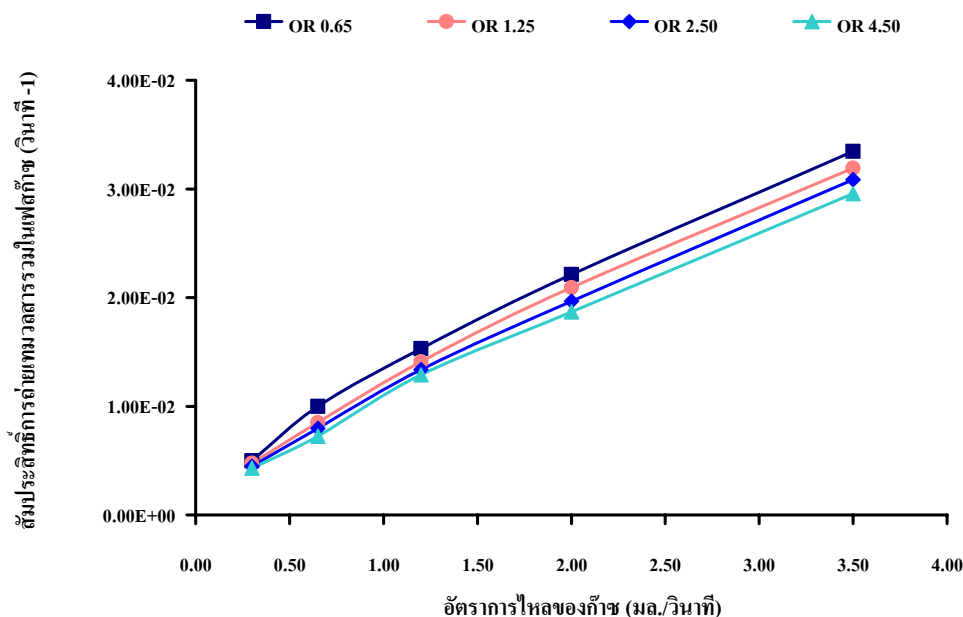
ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยประเภทเมทานอลในน้ำประปาที่มีขนาดรูเดิมอากาศแตกต่างกันและที่อัตราการไหลของก๊าซแตกต่างกัน

อัตราการไหลของอากาศ (มล./วินาที)	OR 0.65	OR 1.25	OR 2.50	OR 4.50
0.30	98.96	98.62	97.96	97.84
0.65	96.92	96.55	96.13	95.37
1.20	94.99	94.25	93.63	92.81
2.00	92.68	90.73	89.56	88.48
3.50	89.08	88.44	87.57	86.35

จากการทดลองในส่วนนี้ แสดงให้เห็นว่าขนาดของรูเดิมอากาศ (Orifice size) ไม่ค่อยมีผลสำคัญมากนักในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยประเภทที่ละลายในน้ำได้มาก ดังนั้น เพื่อให้เข้าใจปรากฏการณ์ดังกล่าวมากยิ่งขึ้น จึงมีความจำเป็นต้องศึกษากลไกการถ่ายเทมวลสาร (mass transfer mechanism) ในถึงปฏิกิริยาแบบฟองอากาศ รวมไปถึงตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ (ขนาดของฟองอากาศ ความถี่ในการเกิดฟองอากาศ และความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ) ที่เกิดขึ้นจากการประยุกต์ใช้ขนาดของรูเดิมอากาศที่ต่างกัน (OR0.65 OR1.25 OR2.50 OR4.50) ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย (เมทานอล) ต่อไป

4.2.4 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสก๊าซ (Overall mass transfer coefficient in gas-phase, $K_{G,a}$)

รูปที่ 4.18 แสดงสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสก๊าซ ($K_{G,a}$) ที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกัน โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที โดยประยุกต์ใช้อุปกรณ์เติมอากาศที่มีรูเติมอากาศแบบแจ็กรูเดียวที่มีขนาดแตกต่างกัน ดังนี้ 0.65 1.25 2.50 และ 4.50 มิลลิเมตร (OR0.65 OR1.25 OR2.50 OR4.50)



รูปที่ 4.18 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสก๊าซ ($K_{G,a}$) ที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกัน ที่สอดคล้องกับอุปกรณ์เติมอากาศ 4 ชนิด

จากการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสก๊าซ ($K_{G,a}$) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.0050 - 0.0335 ต่อวินาที⁻¹ ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซระหว่าง 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที สำหรับทุกๆ อุปกรณ์เติมอากาศที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเติมอากาศทั้ง 4 ชนิด นอกจากนี้สัมประสิทธิ์ $K_{G,a}$ มีค่าเพิ่มขึ้นที่อัตราการไหลของก๊าซเพิ่มขึ้น โดยสามารถสังเกตได้ว่าที่รูเติมอากาศที่มีขนาดเท่ากัน ค่าสัมประสิทธิ์ $K_{G,a}$ มีค่ามากที่สุดที่อัตราการไหลของก๊าซ 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที และมีค่าน้อยสุดที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 มิลลิลิตรต่อวินาที นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ $K_{G,a}$ ที่มีรูเติมอากาศขนาดแตกต่างกัน (OR0.65 OR1.25 OR2.50 OR4.50) จะพบว่าที่อัตราการไหลของก๊าซเท่ากัน รูเติมอากาศที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทมวลสาร ($K_{G,a}$) มากกว่ารูเติมอากาศที่มีขนาดใหญ่ โดยรูเติมอากาศที่มี $K_{G,a}$ มากที่สุดคือ OR 0.65 และน้อยที่สุดคือ OR 4.5 โดยเรียงตามลำดับการถ่ายเทมวลสาร คือ OR 0.65 OR1.25 OR2.50 และ OR4.5 ตามลำดับ

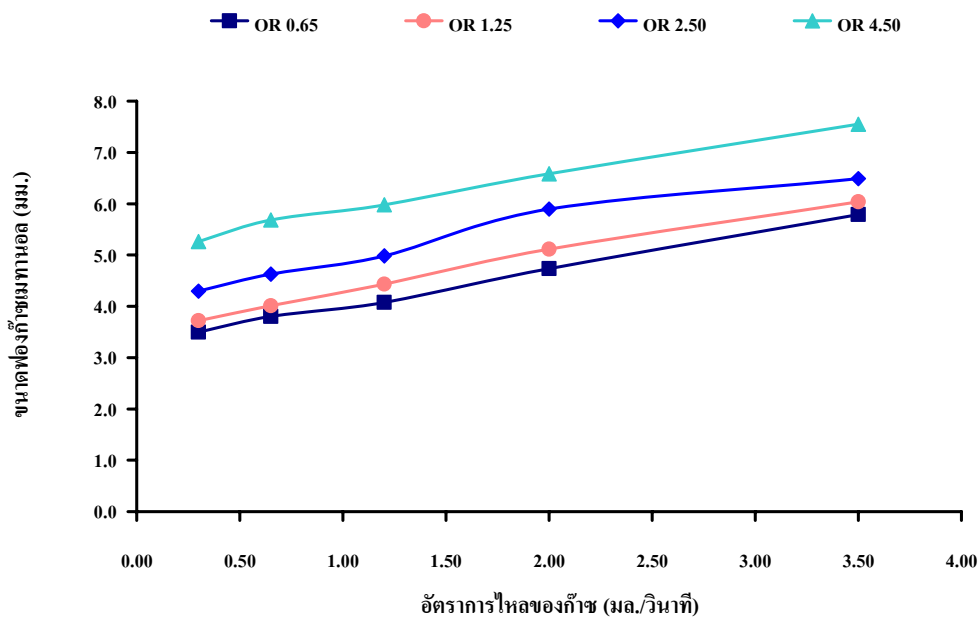
จากที่ได้อธิบายในส่วนก่อนหน้านี พบว่าสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) การถ่ายเทมวลสารถูกควบคุมโดยเฟสก๊าซ ดังนั้น การถ่ายเทมวลสารจากเฟสก๊าซคือฟองก๊าซเมทานอลไปสู่เฟสของเหลว (น้ำประปา) สามารถอธิบายได้โดยทฤษฎีสองความต้านทาน (Two-film theory) โดยแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ การถ่ายเทมวลสารจากภายในฟองของสารอินทรีย์ระเหยประเภทเมทานอล (Gas-phase) ไปยังผิวสัมผัสระหว่างเฟส (Interphase) ซึ่งในขั้นตอนนี้ใช้เวลานานในการถ่ายเทมวลสารจึงเป็นการยืนยันว่าสารอินทรีย์ระเหยประเภทชนิดที่ละลายน้ำได้มาก (เมทานอล) เฟสก๊าซจึงเป็นตัวควบคุม (Gas-phase resistant control) ขั้นตอนที่สองคือ การถ่ายเทมวลสารข้ามผิวสัมผัสระหว่างเฟสและขั้นตอนสุดท้าย คือ การถ่ายเทมวลสารจากผิวสัมผัสไปยังภายในเฟสที่ของเหลวซึ่งในการทดลองนี้ใช้น้ำประปา (Liquid-phase)

ในทางปฏิบัติ เราควรเดินระบบบำบัดสารอินทรีย์ระเหยที่อัตราการไหลของก๊าซและขนาดของรูเดิมอากาศที่เหมาะสม เพื่อที่จะได้ประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงและไม่สิ้นเปลืองพลังงานโดยไม่จำเป็น เนื่องจากเมื่อใช้ขนาดของรูเดิมอากาศที่มีขนาดเล็กนั้น เราต้องใช้พลังงานเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม (K_{Ga}) ที่ได้จากการทดลองนี้เป็นผลคูณระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยในเฟสก๊าซ (K_G) และค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (a) ดังที่กล่าวถึงในส่วนการศึกษาที่ผ่านมา ดังนั้น เราจะได้ทำการศึกษาดัชนีด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ (Bubble hydrodynamic parameters) และการถ่ายเทมวลสาร (Mass transfer parameters) ที่เกิดขึ้นจากขนาดของรูเดิมอากาศแบบเชิงรูเดียวที่มีขนาดแตกต่างกัน (OR0.65 OR1.25 OR2.50 OR4.50) ภายในถึงปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ ต่อไป

4.2.5 ตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamic parameters)

ขนาดของฟองอากาศ (Bubble diameter: D_b)

รูปที่ 4.19 แสดงขนาดของฟองอากาศที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกัน โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที ร่วมกับประยุกต์ใช้อุปกรณ์เดิมอากาศที่มีรูเดิมอากาศแบบเชิงรูเดียวที่มีขนาดแตกต่างกัน ดังนี้ 0.65 1.25 2.50 และ 4.50 มิลลิเมตร (OR0.65 OR1.25 OR2.50 OR4.50) โดยรายละเอียดในส่วนของการหาขนาดของฟองอากาศแสดงดังกล่าวถึงในบทที่ 3

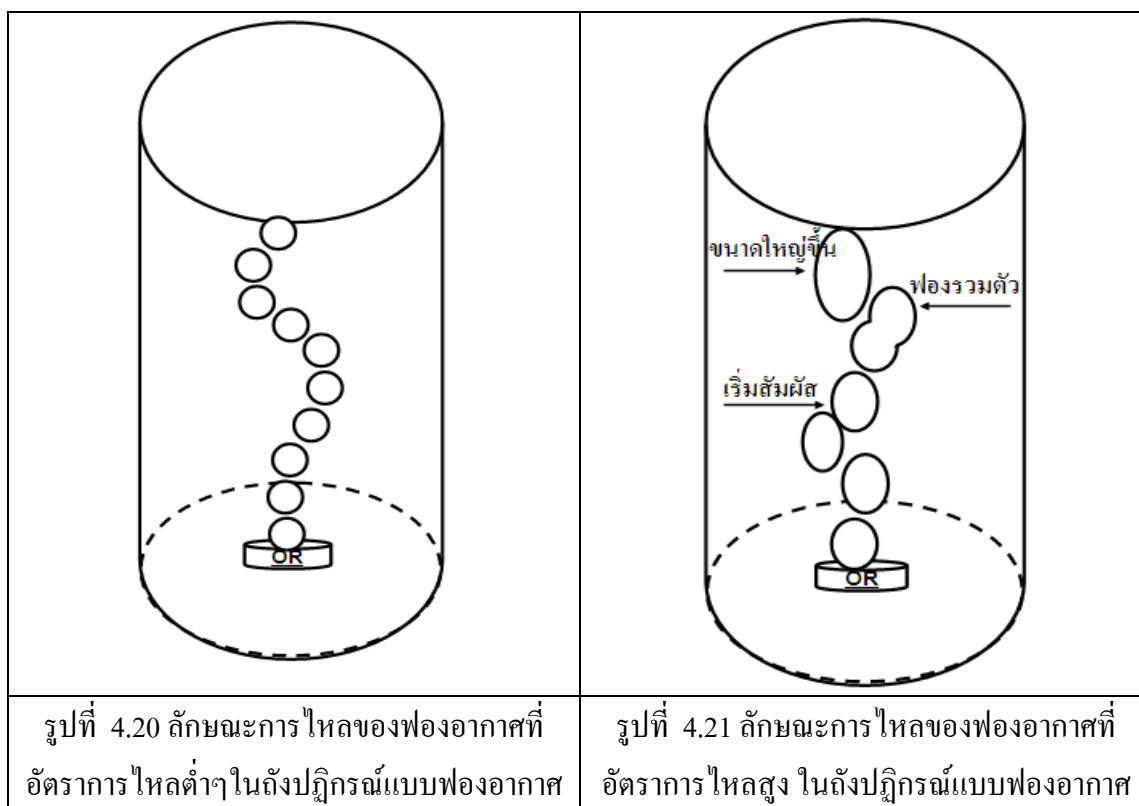


รูปที่ 4.19 ขนาดของฟองอากาศที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกัน
ที่สอดคล้องกับอุปกรณ์เดิมอากาศ 4 ชนิด

จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.19 พบว่าขนาดของฟองอากาศมีค่าระหว่าง 3.50 – 7.50 มิลลิเมตร ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซระหว่าง 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที จากการพิจารณารูเดิมอากาศแบบแข็งขนาดเดียวกันพบว่าขนาดของฟองอากาศ (D_b) ที่ได้จากการทดลองจะแปรผันตรงกับอัตราการไหลของอากาศ (Q_g) กล่าวคือเมื่ออัตราการไหลของก๊าซเพิ่มขึ้นขนาดของฟองอากาศมีขนาดใหญ่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ที่อัตราการไหลของก๊าซเท่ากันขนาดของฟองอากาศจะแปรผันตรงกับขนาดรูเดิมอากาศ โดยขนาดรูเดิมอากาศที่มีขนาดเล็กจะให้ฟองอากาศที่มีขนาดเล็ก และที่ขนาดรูเดิมอากาศที่มีขนาดใหญ่ขึ้นส่งผลให้ฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่ตามขนาดของรูเดิมอากาศ ตามลำดับ โดยขนาดของรูเดิมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่ให้ขนาดของฟองเล็กที่สุดคือขนาด OR 0.65 และรูเดิมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่ให้ขนาดของฟองใหญ่ที่สุดคือ ขนาด OR 4.50

จากการทดลองจะพบว่าขนาดของรูเดิมอากาศแบบแข็งรูเดียว ที่มีขนาดแตกต่างกันนั้น มีลักษณะแนวโน้มของขนาดของฟองอากาศที่คล้ายกัน กล่าวคือ ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 มิลลิลิตรต่อวินาทีและขนาดของฟองอากาศใหญ่ที่สุดที่อัตราการไหลของก๊าซ 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที นอกจากนี้ พบว่าที่อัตราการไหลของก๊าซต่ำคือ ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 - 1.20 มิลลิลิตรต่อวินาที จะมีขนาดของฟองอากาศมีค่าค่อนข้างคงที่ ซึ่งกล่าวได้ว่าขนาดของฟองอากาศที่เกิดขึ้นนั้น ถูกควบคุมด้วยขนาดของรูเดิมอากาศ (Orifice size) ดังแสดงในรูปที่ 4.20 แต่เมื่ออัตราการไหลของก๊าซที่สูงขึ้นคือ ที่อัตราการไหลของก๊าซ 2.00 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที พบว่าขนาดของฟองอากาศมีค่าสูงขึ้น โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวมีสาเหตุมาจากการชนกัน (สัมผัส) ระหว่างฟองอากาศจำนวน

มากภายในระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.21 และส่งผลทำให้มีการรวมตัวกันของฟองอากาศ (PainmanaKul และคณะ, 2005)



ทั้งนี้ เมื่อทำการวิเคราะห์รูปแบบหรือลักษณะของฟองอากาศที่เกิดขึ้น (Bubble shape) จะพบว่าขนาดของรูเดิมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่มีขนาดแตกต่างกันนั้น มีลักษณะแนวโน้มของขนาดของฟองอากาศที่คล้ายกันกล่าวคือ ที่อัตราการไหลของก๊าซต่ำฟองอากาศที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นทรงกลม (Spherical bubble) ในขณะที่ อัตราการไหลของก๊าซสูงฟองอากาศในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นวงรี (Ellipsoidal bubble) โดยลักษณะของฟองอากาศที่ได้ดังกล่าวพบว่าสอดคล้องกับ Bubble regime (Loubiere และคณะ, 2002)

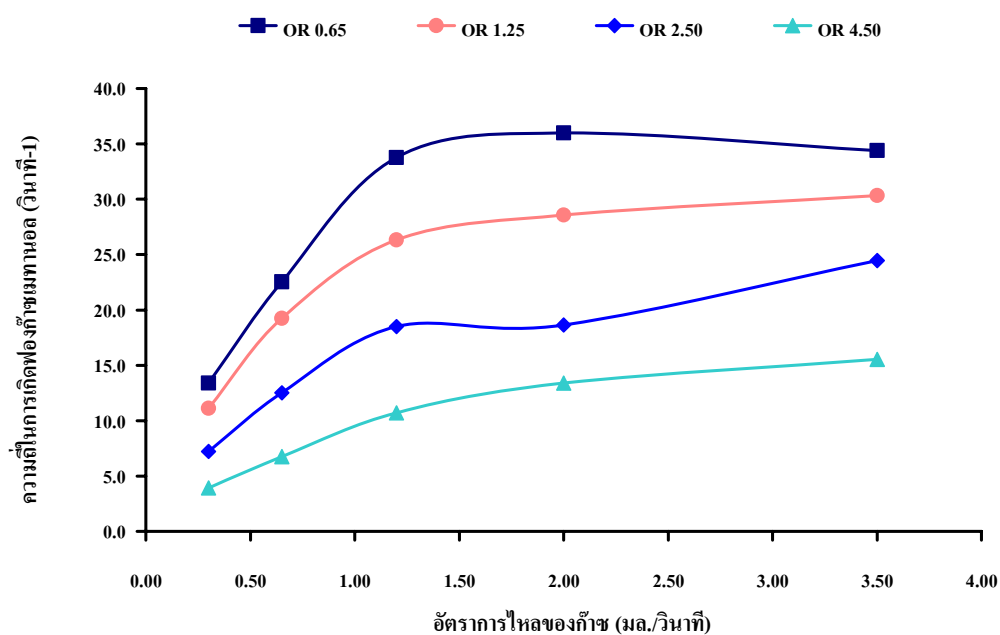
อย่างไรก็ตาม จากการที่ระบบบำบัดใช้ขนาดของรูเดิมอากาศขนาดเล็กเพื่อทำให้มีฟองก๊าซขนาดเล็กนั้น จุดประสงค์เพื่อให้ได้ค่าพื้นที่สัมผัสในการถ่ายเทมวลสาร (a) มาก ยังทำให้เราต้องใช้พลังงานหรือความดันลดที่จำเป็นในการให้กำเนิดฟองอากาศค่อนข้างสูง ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เปลืองพลังงานโดยไม่จำเป็น (ดังที่กล่าวถึงในการศึกษาในส่วนที่ผ่านมา) อีกทั้งจากประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ที่ขนาดของรูเดิมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่มีขนาดแตกต่างกัน คือ 0.65 1.25 2.50 และ 4.50 มิลลิเมตร (OR0.65 OR1.25 OR2.50 OR4.50) พบว่าประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันมากนัก เพราะอยู่ที่ช่วงร้อยละ 86.35 - 98.96 ดังนั้น จึงไม่มี

ความจำเป็นในการใช้รูเดิมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่มีขนาดเล็กเพื่อให้มีพื้นที่สัมผัสในการถ่ายเทมวลสารมาก เพราะจะทำให้เปลืองพลังงาน

นอกจากนี้ เนื่องจากขนาดของฟองอากาศ (D_B) ที่ได้จากการทดลองข้างต้นมีความสัมพันธ์กับความถี่ในการเกิดฟองอากาศ (f_B) และความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (U_B) ซึ่งเป็นตัวแปรหลักในการเพื่อที่จะหาพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (a) ดังนั้น เราจะได้ศึกษาผลกระทบจากขนาดของรูเดิมอากาศที่มีขนาดแตกต่างกันต่อตัวแปรดังกล่าว ในหัวข้อถัดไป

ความถี่ในการเกิดฟองอากาศ (Bubble formation frequency: f_B)

รูปที่ 4.22 แสดงความถี่ในการเกิดฟองอากาศที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกัน โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที โดยประยุกต์ใช้อุปกรณ์เดิมอากาศที่มีรูเดิมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่มีขนาดแตกต่างกัน ดังนี้ 0.65 1.25 2.50 และ 4.50 มิลลิเมตร (single rigid orifice, OR0.65 OR1.25 OR2.50 OR4.50)



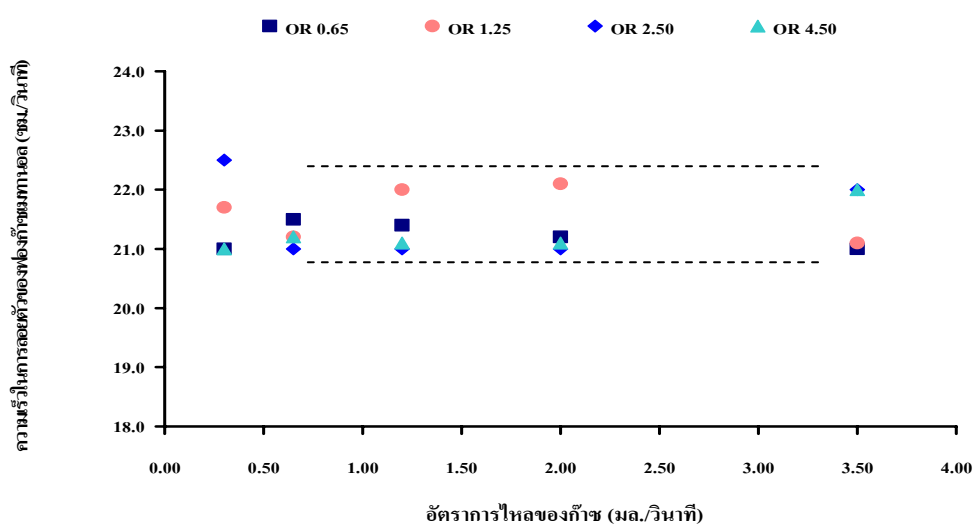
รูปที่ 4.22 ความถี่ในการลอยตัวของฟองอากาศที่อัตราการไหลต่างๆ ที่สอดคล้องกับอุปกรณ์เดิมอากาศ 4 ชนิด

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.22 พบว่าความถี่ในการเกิดฟองก๊าซเมทานอลมีค่าระหว่าง 3.93 - 35.99 ต่อวินาที ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซระหว่าง 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที ที่รูเดิมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่มีขนาดแตกต่างกัน คือ 0.65 1.25 2.50 และ 4.50 มิลลิเมตร นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบขนาดของรูเดิมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่มีขนาดแตกต่างกัน พบว่าที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากันความถี่ในการเกิดฟองอากาศมีค่ามากที่สุดที่ขนาดรูเดิมอากาศที่มีขนาดเล็กคือ OR 0.65 และความถี่ในการเกิดฟองอากาศมีค่าน้อยสุดที่ขนาดรูเดิมอากาศที่มีขนาดใหญ่คือ

OR 4.50 ซึ่งเป็นผลมาจากขนาดของฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่ที่ได้จากรูเดิมอากาศขนาดดังกล่าว เนื่องจากความถี่ของฟองอากาศ (f_B) มีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของอากาศ (Q_G) และปริมาตรของฟองอากาศ (V_B) ที่ขนาดรูเดิมอากาศ OR0.65 OR1.25 OR2.50 จะพบว่าความถี่ในการเกิดฟองจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามอัตราการไหลของอากาศ จนถึงอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 2.00 มิลลิเมตรต่อวินาที หลังจากนั้นความถี่ในการเกิดฟองเริ่มคงที่และลดลงอย่างช้าจนถึงอัตราการไหล 3.50 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้โดยเมื่ออัตราการไหลของก๊าซเพิ่มสูงขึ้นนั้น จะส่งผลทำให้ขนาดของฟองอากาศใหญ่ขึ้น เนื่องจากการรวมตัวของฟองอากาศภายในคอลัมน์ ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ซึ่งส่งผลทำให้จำนวนฟองที่เกิดขึ้นต่อเวลาหรือความถี่ในการเกิดฟองอากาศ (f_B) นั้นมีค่าลดลง ซึ่งอาจส่งผลเสียทำให้พื้นที่ผิวของฟองอากาศในการถ่ายเทมวลสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำ (เมทานอล) จากภายในฟองก๊าซสู่เฟสน้ำประปา (Bubble transferred surface) ลดลงได้ ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยประเภทเมทานอลที่ลดลง เมื่ออัตราการไหลของก๊าซสูงขึ้น

ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (Bubble rising velocity: U_B)

รูปที่ 4.23 แสดงความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (U_B) ที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกัน โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 - 3.50 มิลลิเมตรต่อวินาที ร่วมกับอุปกรณ์เดิมอากาศที่มีรูเดิมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่มีขนาดแตกต่างกัน ดังนี้ 0.65 1.25 2.50 และ 4.50 มิลลิเมตร (OR0.65 OR1.25 OR2.50 และ OR4.50) โดยวิธีการวิเคราะห์ค่า U_B ดังแสดงในบทที่ 3 ในส่วนของการหาค่าความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ

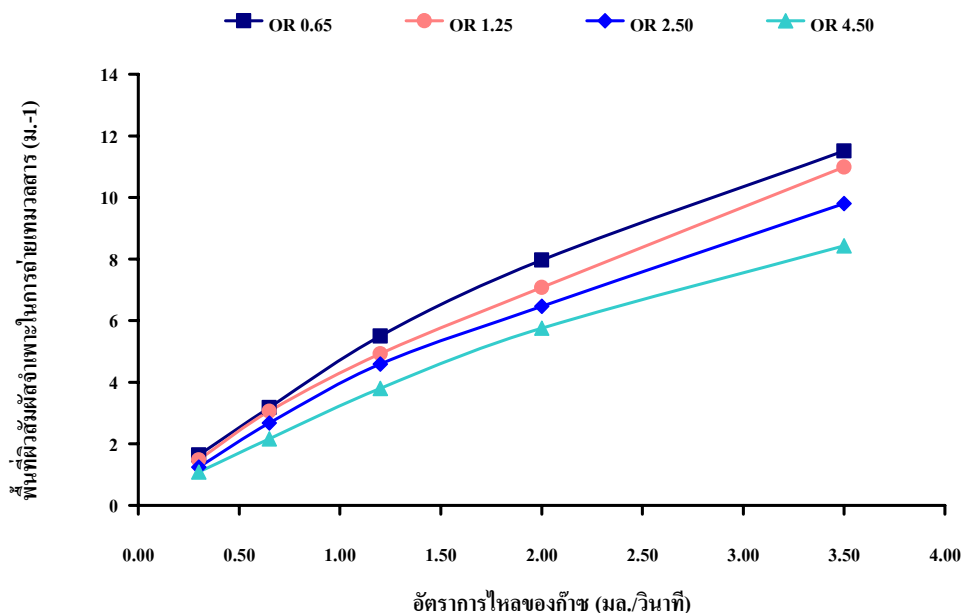


รูปที่ 4.23 ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกัน ที่สอดคล้องกับอุปกรณ์เดิมอากาศ 4 ชนิด

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.23 พบว่าความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศมีค่าค่อนข้างคงที่ (มีค่าอยู่ระหว่าง 21.00 - 22.70 เซนติเมตรต่อวินาที) โดยที่ขนาดของรูเดิมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่มีขนาดแตกต่างกัน (OR0.65 OR1.25 OR2.50 OR4.50) ที่อัตราการไหลของก๊าซเท่ากันนั้น พบว่าส่งผลกระทบต่อค่าน้อยต่อค่า U_B ซึ่งส่งผลกระทบต่อเวลาการกักฟองอากาศ (Bubble detention time: t_{DB}) ดังแสดงในสมการที่ 4.9 ภายในถึงปฏิบัติการแบบฟองอากาศที่แตกต่างกันค่อนข้างน้อยนั้น โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวแตกต่างเมื่อเทียบกับผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นกับขนาดของฟองอากาศ (D_B) และความถี่ในการเกิดฟอง (f_B) ดังที่กล่าวถึงข้างต้น (PainmanaKul และคณะ, 2005) นอกจากนี้ พบว่าค่าความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (U_B) ซึ่งสอดคล้องกับกราฟการทดลองของ Grace และ Wairegi (1986) ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ในกรณีที่เฟสของเหลวไม่มีการปนเปื้อน (Pure condition) เนื่องจากน้ำประปาได้ถูกเลือกนำมาใช้เป็นตัวดูดซึมในการทดลองนี้ โดยเมื่อพิจารณาผลกระทบจากความเร็วในการลอยตัว (U_B) และเวลาในการกักฟองอากาศในถึงปฏิกรณ์ (t_{DB}) ที่ไม่ค่อยแตกต่างกันมากนักจากการประยุกต์ใช้รูเดิมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่มีขนาดแตกต่างกัน 4 ชนิด ดังนั้นกล่าวได้ว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดที่เปลี่ยนแปลงจากอัตราการไหลของก๊าซส่วนใหญ่่นั้น เป็นผลมาจากรูปแบบการไหลของฟองอากาศ (แบบราบเรียบและแบบเอ็ดดี้) ที่เกิดขึ้นมาจากการเพิ่มจำนวนและขนาดของฟองอากาศ รวมไปถึงพลังงานภายในระบบซึ่งส่งผลต่อสภาพความปั่นป่วนในเฟสน้ำ รวมทั้งคุณสมบัติทางเคมีของตัวดูดซึม (น้ำประปา) และตัวถูกดูดซึม (เมทานอล)

พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (Specific interfacial area: a)

รูปที่ 4.24 แสดงค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกัน โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที และประยุกต์ใช้อุปกรณ์เดิมอากาศที่มีรูเดิมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่มีขนาดแตกต่างกัน ดังนี้ 0.65 1.25 2.50 และ 4.50 มิลลิเมตร (single rigid orifice: OR0.65 OR1.25 OR2.50 OR4.50) โดยค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (Specific interfacial area: a) นี้มีความสัมพันธ์กับขนาดของฟองอากาศ (bubble diameter: D_B) ความถี่ในการเกิดฟอง (bubble frequency: f_B) และค่าแรงลอยตัวของฟองอากาศ (terminal bubble rising velocity: U_B) ซึ่งตัวแปรดังกล่าวหาได้จากการทดลอง และคำนวณโดยสมการที่ (3.16)



รูปที่ 4.24 พื้นที่ผิวสัมพัทธ์จำเพาะในการถ่ายเทมวลสารที่อัตราการไหลของก๊าซแตกต่างกัน ที่สอดคล้องกับอุปกรณ์เดิมอากาศ 4 ชนิด

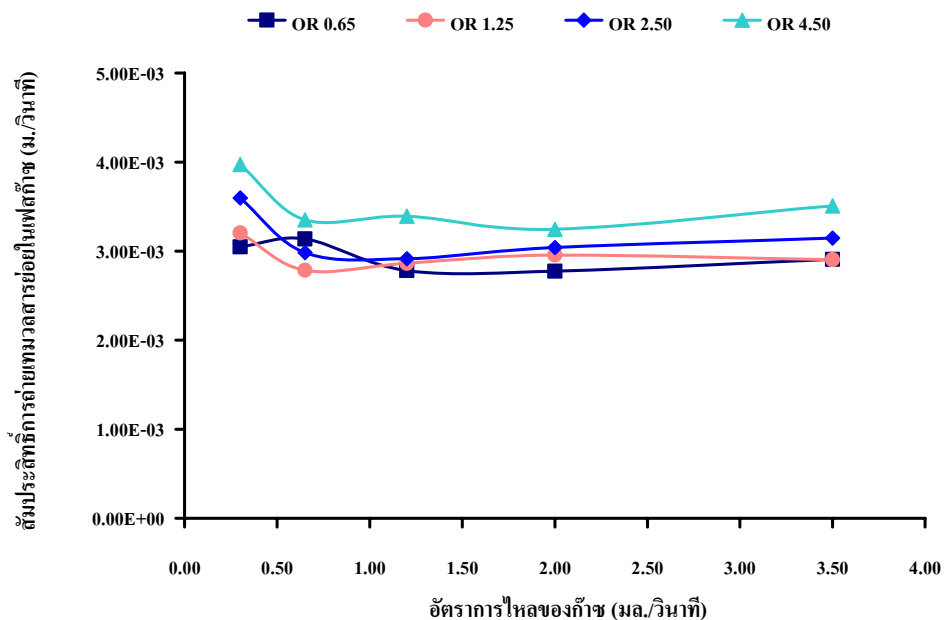
จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.24 พบว่าพื้นที่ผิวสัมพัทธ์จำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (a) มีค่าอยู่ระหว่าง 1.09 - 11.51 m^2 ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซระหว่าง 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที ที่รูเดิมอากาศแบบแข็งแรงเดียวที่มีขนาดแตกต่างกัน (OR0.65 OR1.25 OR2.50 OR4.50) จากการพิจารณารูเดิมอากาศแบบแข็งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน พบว่าค่าพื้นที่ผิวสัมพัทธ์จำเพาะ (a) มีค่าเพิ่มขึ้นมีลักษณะค่อนข้างเป็นเส้นตรง นอกจากนี้ พบว่าค่า a มีค่ามากที่สุดที่อัตราการไหลของก๊าซ 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที และมีค่าน้อยสุดที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 มิลลิลิตรต่อวินาที โดยที่ค่าความชันของการเพิ่มขึ้นของค่า a เริ่มลดลงที่อัตราการไหลของก๊าซมากกว่า 2.00 มิลลิลิตรต่อวินาที โดยช่วงของค่า Q_G ดังกล่าวสอดคล้องกับการที่ค่าความถี่ในการเกิดฟองอากาศซึ่งมีค่าลดลงจนกระทั่งคงที่เมื่ออัตราการไหลของก๊าซสูงขึ้น

เมื่อพิจารณารูเดิมอากาศแบบแข็งแรงเดียวที่มีขนาดแตกต่างกันนั้น (OR0.65 OR1.25 OR2.50 และ OR4.50) พบว่าค่าพื้นที่ผิวสัมพัทธ์จำเพาะ (a) มีค่ามากที่สุดที่ขนาดรูเดิมอากาศ 0.65 มิลลิเมตร (OR0.65) และมีค่าน้อยสุดที่ขนาดรูเดิมอากาศ 4.50 มิลลิเมตร (OR4.50) โดยค่าพื้นที่ผิวสัมพัทธ์จำเพาะ (a) แปรผกผันกับขนาดของฟองอากาศที่กล่าวถึงในขั้นต้น โดยเมื่อพิจารณารูปที่ 4.24 เราสามารถกล่าวได้ว่าพื้นที่ผิวสัมพัทธ์จำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (a) มีค่าเพิ่มขึ้นนั้นสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสก๊าซ ($K_G a$) เมื่ออัตราการไหลของก๊าซสูงขึ้น แต่แปรผกผันกับขนาดของรูเดิมอากาศ และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยจะพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดไม่ได้แตกต่างกัน

มากนักที่ขนาดของรูเดิมอากาศที่แตกต่างกัน (OR0.65 OR1.25 OR2.50 และ OR4.50) ดังนั้นเป็นการยืนยันว่า การประยุกต์ใช้แนวทางในการเพิ่มค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (a) ให้มีค่ามาก เพื่อเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสก๊าซ (K_{Ga}) นั้น อาจไม่ใช่วิธีการที่ดีที่สุดเสมอไปในการกระบวนการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (Bubble column) เพราะการที่เพิ่มผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (a) โดยการทำให้ฟองมีขนาดเล็ก (การประยุกต์ใช้รูเดิมอากาศขนาดเล็กที่สุด) ต้องใช้พลังงานเป็นจำนวนมาก ซึ่งทำให้เกิดความดันลดจากการสร้างฟองก๊าซและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายโดยไม่จำเป็น

4.2.6 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย (Gas – film mass transfer coefficient, K_G)

รูปที่ 4.25 แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย (Gas-film mass transfer coefficient: K_G) ที่อัตราการไหลของอากาศที่แตกต่างกัน โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 - 3.50 มิลลิเมตรต่อวินาที ร่วมกับอุปกรณ์เดิมอากาศที่มีรูเดิมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่มีขนาดแตกต่างกัน ดังนี้ 0.65 1.25 2.50 และ 4.50 มิลลิเมตร (single rigid orifice, OR0.65 OR1.25 OR2.50 OR4.50) โดยค่า (K_G) ในการทดลองนี้จะเป็นสัดส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม (K_{Ga}) และพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (a) ซึ่งวิเคราะห์ได้จากการทดลองดังที่กล่าวถึงข้างต้น (PainmanaKul และคณะ, 2005) โดยรายละเอียดดังแสดงในบทที่ 3



รูปที่ 4.25 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยในเฟสก๊าซ ที่อัตราการไหลของก๊าซต่างๆ ที่สอดคล้องกับอุปกรณ์เดิมอากาศ 4 ชนิด

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.25 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย (K_G) มีค่าอยู่ระหว่าง $0.0028 - 0.0040 \text{ m.s.}^{-1}$ ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซระหว่าง $0.30 - 3.50$ มิลลิลิตรต่อวินาที สำหรับการประยุกต์ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางรูเดิมอากาศแตกต่างกัน (OR0.65 OR1.25 OR2.50 และ OR4.50) จากการพิจารณารูเดิมอากาศแบบแข็งขนาดเดียวกันพบว่าค่า K_G มีแนวโน้มลดลงจนค่าอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1.20 มิลลิลิตรต่อวินาที หลังจากนั้นก็มีแนวโน้มเข้าสู่ค่าคงที่ โดยจะพบว่าค่า K_G ไม่ขึ้นกับ Q_g เนื่องจากฟิล์มก๊าซบางมาก ความต้านทานไม่ค่อยเปลี่ยน นอกจากนี้ จะพบว่าสัมประสิทธิ์ K_G แปรผันตรงกับประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) คือประสิทธิภาพในการบำบัดและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยที่เฟสก๊าซ (K_G) มีค่าลดลงเมื่ออัตราการไหลของก๊าซเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาผลกระทบจากขนาดของรูเดิมอากาศที่แตกต่างกันนั้น (OR0.65 OR1.25 OR2.50 และ OR4.50) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยที่เฟสก๊าซ (K_G) มีค่ามากที่สุดที่ขนาดรูเดิมอากาศ 4.50 มิลลิเมตร (OR4.50) และมีค่าน้อยสุดที่ขนาดรูเดิมอากาศ 0.65 มิลลิเมตร (OR0.65) ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวขัดแย้งกับผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (a) ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของรูเดิมอากาศมีขนาดเล็กลง โดยการหักล้างซึ่งกันและกันระหว่างค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (a) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย (K_G) พบได้กับการประยุกต์ใช้ขนาดรูเดิมอากาศขนาดใหญ่กว่าขนาดเล็ก

ทั้งนี้ อาจกล่าวได้ว่าค่าความสามารถในการถ่ายเทมวลสารที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศมีความสัมพันธ์กับความต้านทานในการถ่ายเทมวลสารซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาของก๊าซฟิล์ม (Gas-film thickness) ซึ่งอาจเปลี่ยนไปตามขนาดของรูเดิมอากาศที่ประยุกต์ใช้ในระบบ โดยจากการทดลองพบว่าที่อัตราการไหลของก๊าซเท่ากัน อุปกรณ์เดิมอากาศแบบแข็งที่มีขนาดเล็กนั้น (OR 0.65) ขนาดของฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีลักษณะค่อนข้างเล็กส่งผลให้ฟิล์มก๊าซของฟองเมทานอลจะมีลักษณะเป็นแบบแข็ง (Rigid gas-film around bubble) ดังนั้น ความต้านทานของก๊าซฟิล์มสูงและเป็นผลให้โมเลกุลเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำได้เข้าไปในโมเลกุลของตัวดูดซึม (น้ำประปา) ได้ยาก จึงส่งผลให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยในเฟสก๊าซ (K_G) ลดลง ในทางตรงกันข้าม ในกรณีที่อยู่อุปกรณ์เดิมอากาศแบบแข็งที่มีขนาดใหญ่ขึ้นนั้น พบว่าขนาดของฟองอากาศ (D_B) ที่เกิดขึ้นมีลักษณะใหญ่ขึ้นตามขนาดของรูเดิมอากาศ (OR) นั่นจะมีฟิล์มก๊าซเป็นแบบอ่อนนุ่ม (Flexible gas-film around bubble) ดังนั้น จึงมีความต้านทานของก๊าซฟิล์มต่ำและเป็นผลให้โมเลกุลเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำได้เข้าไปในโมเลกุลของตัวดูดซึม (น้ำประปา) ได้ง่ายและมากขึ้นจึงส่งผลให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยในเฟสก๊าซ (K_G) มากขึ้นตามขนาดของรูเดิมอากาศ (Sardeing และคณะ, 2006)

ดังนั้น จากการศึกษาในส่วนนี้ จะพบว่าไม่มีความจำเป็นที่จะต้องใช้นาครูเดิมอากาศที่มีขนาดเล็กเกินไป เพื่อเพิ่มจำนวนฟองหรือสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการถ่ายเทมวลสารจากสารอินทรีย์ระเหย (VOCs) จากฟองอากาศไปสู่เฟสของเหลว เนื่องจากต้องใช้พลังงานเป็นจำนวนมากทำให้สิ้นเปลืองพลังงานโดยไม่จำเป็น อีกทั้งการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ด้วยขนาดของรูเดิมอากาศที่แตกต่างกัน (OR 0.65 OR 1.25 OR 2.50 และ OR 4.50) พบว่าให้ประสิทธิภาพในการบำบัดไม่แตกต่างกัน โดยสามารถสรุปได้ตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าตัวแปรที่ศึกษาจากการทดลองการศึกษาผลกระทบของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเดิมอากาศชนิดแข็งรูเดียวที่มีขนาดแตกต่างกัน 4 ชนิด ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย

OR	Qg	%Eff	$K_G a$	D_B	f_B	U_B	a	K_G
OR 0.65	0.30	98.96	0.0050	3.50	13.39	21.00	1.63	0.0031
	0.65	96.92	0.0100	3.80	22.54	21.50	3.18	0.0031
	1.20	94.99	0.0153	4.08	33.78	21.40	5.50	0.0028
	2.00	92.68	0.0221	4.73	35.99	21.20	7.97	0.0028
	3.50	89.08	0.0335	5.79	34.24	21.00	11.51	0.0029
OR 1.25	0.30	98.62	0.0048	3.72	11.11	21.70	1.49	0.0032
	0.65	96.55	0.0085	4.01	19.25	21.20	3.06	0.0028
	1.20	94.25	0.0141	4.43	26.32	22.00	4.92	0.0029
	2.00	90.73	0.0209	5.11	28.58	22.10	7.08	0.0030
	3.50	88.44	0.0319	6.04	30.32	21.10	10.99	0.0029
OR 2.50	0.30	97.96	0.0045	4.30	7.21	22.50	1.24	0.0036
	0.65	96.13	0.0080	4.63	12.51	21.00	2.68	0.0030
	1.20	93.63	0.0134	4.98	18.50	21.00	4.59	0.0029
	2.00	89.56	0.0197	5.89	18.65	21.00	6.46	0.0030
	3.50	98.96	0.0050	3.50	13.39	21.00	1.63	0.0031
OR 4.50	0.30	96.92	0.0100	3.80	22.54	21.50	3.18	0.0031
	0.65	94.99	0.0153	4.08	33.78	21.40	5.50	0.0028
	1.20	92.68	0.0221	4.73	35.99	21.20	7.97	0.0028
	2.00	89.08	0.0335	5.79	34.24	21.00	11.51	0.0029
	3.50	98.62	0.0048	3.72	11.11	21.70	1.49	0.0032

จากตารางที่ 4.4 เราสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

- ที่ขนาดรูเติมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่มีขนาดเล็กทำให้ขนาดของฟองอากาศ (D_B) ขนาดเล็ก ส่งผลให้ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (a) มีค่ามาก และเป็นปัจจัยสำคัญทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสก๊าซ ($K_G a$) มีค่าเพิ่มขึ้น
- ขนาดของรูเติมอากาศ (Size of orifice) แปรผกผันกับค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร(a) แต่แปรผันตรงกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยที่เฟสก๊าซ (K_G) ทั้งนี้ การเพิ่มขึ้นของขนาดฟองก๊าซ (จากการเพิ่มรูเติมอากาศ) อาจส่งผลให้เกิดลักษณะของฟิล์มก๊าซของฟองก๊าซเป็นแบบอ่อนนุ่ม (Flexible gas-film around bubble) ดังนั้น จึงมีความต้านทานของก๊าซฟิล์มต่ำและเป็นผลให้โมเลกุลเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำได้เข้าไปในโมเลกุลของตัวดูดซึม (น้ำประปา) ได้ง่ายและมากขึ้น
- ดังนั้นควรที่จะดำเนินการระบบบำบัดขนาดของรูเติมอากาศที่เหมาะสม รวมทั้งที่อัตราการไหลของก๊าซที่เหมาะสมด้วย คือ ขนาดรูเติมอากาศขนาดปานกลางและที่อัตราการไหลระดับกลางๆ ดีกว่า เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานรวมทั้งประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยชนิดที่ละลายน้ำมาก(เมทานอล) ไม่แตกต่างกันมากนัก

ในหัวข้อถัดไป จะเป็นการศึกษาผลกระทบของความสามารถในการละลายน้ำของสารอินทรีย์ระเหยทั้ง 2 ชนิด คือชนิดที่สามารถละลายน้ำมาก (เมทานอล) และชนิดที่ละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย รวมทั้งศึกษาตัวแปรในด้านการถ่ายเทมวลสาร และตัวแปรด้านอุทกศาสตร์ ซึ่งองค์ความรู้ดังกล่าว อาจทำให้เราเข้าใจถึงแนวทางการเลือกใช้อุปกรณ์เติมอากาศ และอัตราการไหลของก๊าซที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการดูดซึมที่สูง รวมไปถึงใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายที่เหมาะสม

4.3 ผลการทดลองการศึกษาผลกระทบของความสามารถในการละลายน้ำของสารอินทรีย์ระเหยทั้ง 2 ชนิด คือ ชนิดที่สามารถละลายน้ำได้มาก (เมทานอล) และชนิดที่ละลายน้ำได้น้อย (เบนซีน) ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยรวมทั้งตัวแปรในด้านการถ่ายเทมวลสารและด้านอุทกพลศาสตร์

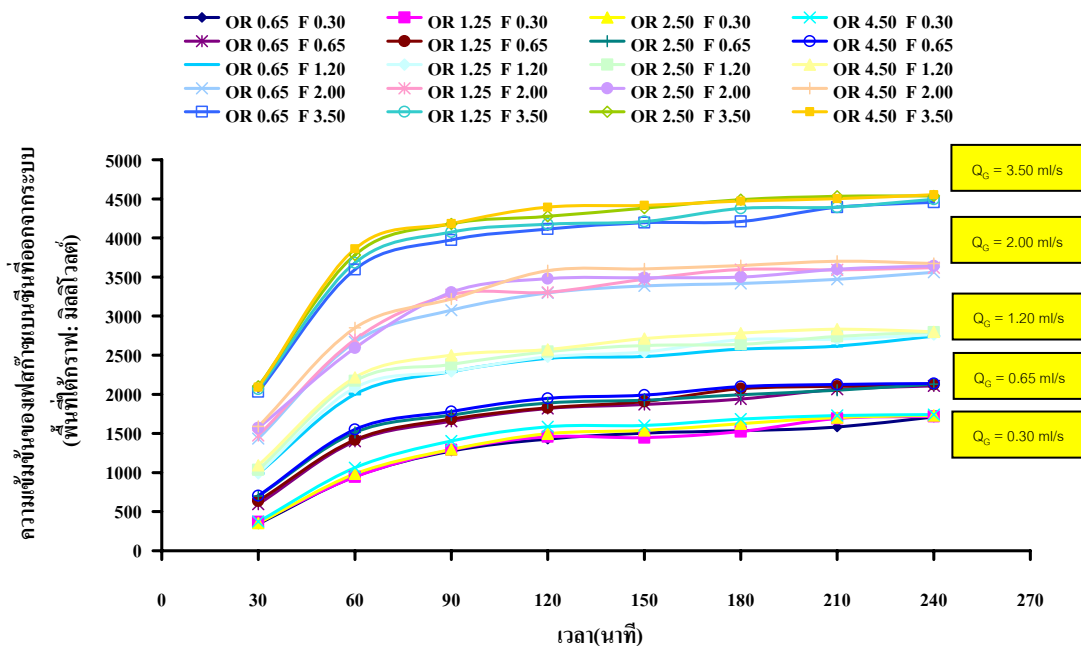
จุดประสงค์ของการทดลองนี้ เพื่อศึกษาผลกระทบของความสามารถในการละลายน้ำของสารอินทรีย์ระเหยทั้ง 2 ชนิด คือ ชนิดที่สามารถละลายน้ำได้มาก (เมทานอล) และชนิดที่ละลายน้ำได้น้อย (เบนซีน) ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยเพื่อวิเคราะห์ค่าตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์และตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสาร โดยขั้นตอนในการทดลองในส่วนนี้ แสดงในหัวข้อ 3.7.3 ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

4.3.1 ความเข้มข้นของเฟสก๊าซที่ออกจากระบบ

รูปที่ 4.26 แสดงความเข้มข้นของเฟสก๊าซของสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย(เบนซีน) ที่ออกจากถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศที่เวลาต่างๆ โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที โดยประยุกต์ใช้อุปกรณ์เดิมอากาศที่มีรูเดิมอากาศแบบแห้งรูเดียวที่มีขนาดแตกต่างกัน ดังนี้ 0.65 1.25 2.50 และ 4.50 มิลลิเมตร (OR0.65 OR1.25 OR2.50 OR4.50) โดยวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซที่ออกจากระบบของเมทานอลในเฟสก๊าซที่เวลาต่างๆ ทุก 30 นาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และทำการทดลองและเก็บก๊าซตรงจุดเก็บความเข้มข้นขาออก ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยใช้อุปกรณ์ก๊าซโครมาโทกราฟี (GC / FID VARIAN 3800) โดยทำการทดลอง 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยเพื่อให้ได้ค่าความถูกต้องที่แม่นยำมากยิ่งขึ้น

จากรูปที่ 4.26 พบว่าเมื่ออัตราการไหลของก๊าซสูงขึ้นทำให้ความเข้มข้นเข้าระบบมากขึ้น เนื่องจากในการทดลองใช้สารอินทรีย์ระเหยชนิดเบนซีนบริสุทธิ์ซึ่งมีจุดเดือดที่ 80 องศาเซลเซียส โดยบรรจุเบนซีนในฟาราฟินออย ที่อุณหภูมิ 90 ± 3 องศาเซลเซียส รายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 3.1 บทที่ 3 ส่วนของการทดลอง โดยการที่ความเข้มข้นเข้าระบบแปรผันตรงกับอัตราการไหลของก๊าซเนื่องจากในการทดลองมีไอระเหยของเบนซีนที่มากเกินไปที่อุณหภูมิและความดันไอคงที่ (อุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียส) ดังนั้นเมื่อมีอากาศหรือก๊าซนำพาไอบนซีนและความเข้มข้นที่เข้าระบบจึงมากตามด้วย โดยในกรณีดังกล่าว เราหาความเข้มข้นจากความเข้มข้นที่สมดุลของสองเฟส ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ได้ ดังแสดงในสมการที่ 4.1 – 4.3 รายละเอียดแสดงในส่วน 4.1.1 ความเข้มข้นของเฟสก๊าซที่ออกจากระบบของสารอินทรีย์ระเหย (เมทานอล) ในน้ำประปา โดยความเข้มข้นและภาวะบรรทุกของสารอินทรีย์ระเหยชนิดเบนซีนที่สัมพันธ์กับอัตราการไหลของอากาศสามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 4.5 โดยค่าความเข้มข้นของเฟสก๊าซทำการตรวจวัดด้วยเครื่อง (GC / FID VARIAN 3800) โดยมีรายละเอียดการ

ปรับสภาวะการใช้งานของเครื่องดังกล่าวแสดงในบทที่ 3 โดยในงานวิจัยนี้ทำการเก็บความเข้มข้นที่เข้าระบบเป็นจำนวน 8 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 4.26 แสดงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยชนิดเบนซีนในเฟสของก๊าซในน้ำประปา

ตารางที่ 4.5 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยประเภทเบนซีนที่เข้าระบบบำบัดที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกัน

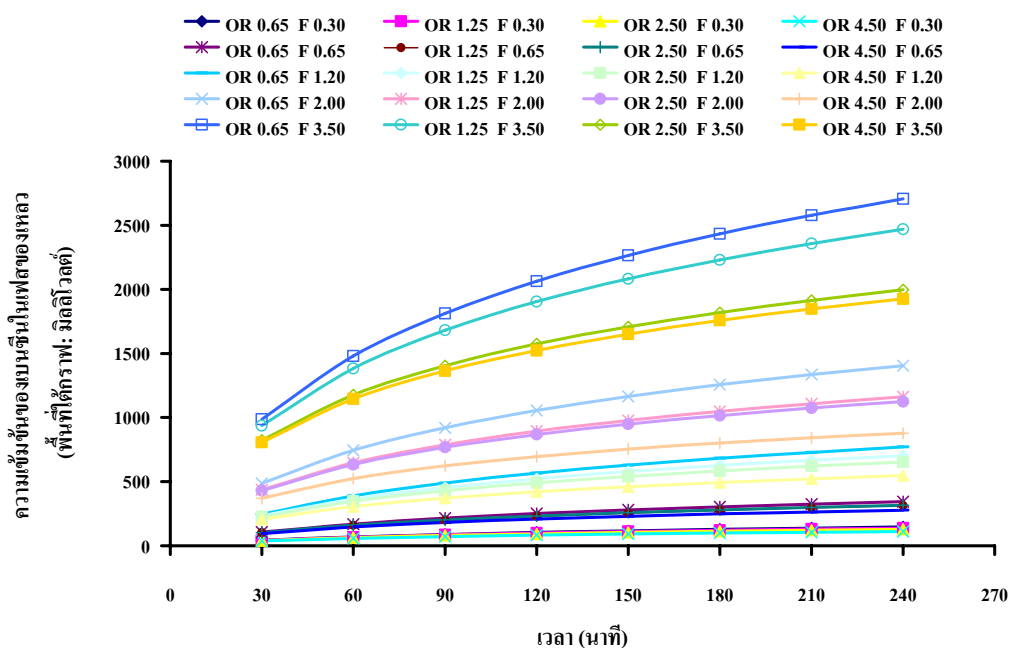
อัตราการไหลของอากาศ	ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เข้าระบบ (พื้นที่ได้กราฟ)
0.30 มล./วินาที	1870 มิลลิโวลต์
0.65 มล./วินาที	2298 มิลลิโวลต์
1.20 มล./วินาที	2984 มิลลิโวลต์
2.00 มล./วินาที	3824 มิลลิโวลต์
3.50 มล./วินาที	4720 มิลลิโวลต์

นอกจากนี้ จากรูปที่ 4.26 ยังพบว่าที่เวลาสุดท้ายของการทดลองนี้ คือ ที่เวลา 240 นาที ความเข้มข้นของเฟสก๊าซที่ออกจากระบบมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นที่เข้าระบบ ($C_{g(in)} \cong C_{g(out)}$) โดยแปรผันตรงกับความเข้มข้นที่เข้าระบบ (อัตราการไหลของก๊าซ) นอกจากนี้ จะสังเกตเห็นได้ว่าความเข้มข้นของเฟสก๊าซขาออกเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาและอัตราการไหลของก๊าซเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารอินทรีย์ระเหยที่เข้าสู่ถังปฏิกริยา (Loading) เมื่อ

เปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา เช่น ในงานวิจัยของ (Heymes และคณะ, 2006) ซึ่งแสดงผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.20 ซึ่งเป็นการศึกษาผลกระทบของสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (โทลูอิน) รายละเอียดในหัวข้อ 4.2.1 โดยความเข้มข้นของเฟสก๊าซที่ออกจากระบบใช้เวลาสั้นจึงถึงจุดอิ่มตัวในเฟสก๊าซ (ความเข้มข้นที่เข้าระบบ \cong ความเข้มข้นที่ออกจากระบบ) ดังนั้นเป็นการยืนยันว่าสารอินทรีย์ระเหยชนิดเบนซีนละลายน้ำได้น้อย และจากความเข้มข้นที่ออกจากระบบในเฟสก๊าซมีค่ามาก ดังนั้นน้ำประปามีประสิทธิภาพน้อยในการบำบัดสารอินทรีย์ชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ระเหยชนิดที่ไม่มีขั้ว (Hydrophobic VOCs)

4.3.2 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยประเภทเบนซีนในเฟสของเหลว (น้ำประปา)

รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยประเภทเบนซีนในเฟสของเหลว (ตัวดูดซึมน้ำประปา) ที่เวลาบำบัดต่างๆ โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 - 3.50 มิลลิตรต่อวินาที โดยประยุกต์ใช้อุปกรณ์เดิมอากาศที่มีรูเดิมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่มีขนาดแตกต่างกัน ดังนี้ 0.65 1.25 2.50 และ 4.50 มิลลิเมตร (single rigid orifice: OR0.65 OR1.25 OR2.50 OR4.50) และทำการทดลองเป็นเวลา 240 นาที ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในเฟสของเหลวสามารถแสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.27



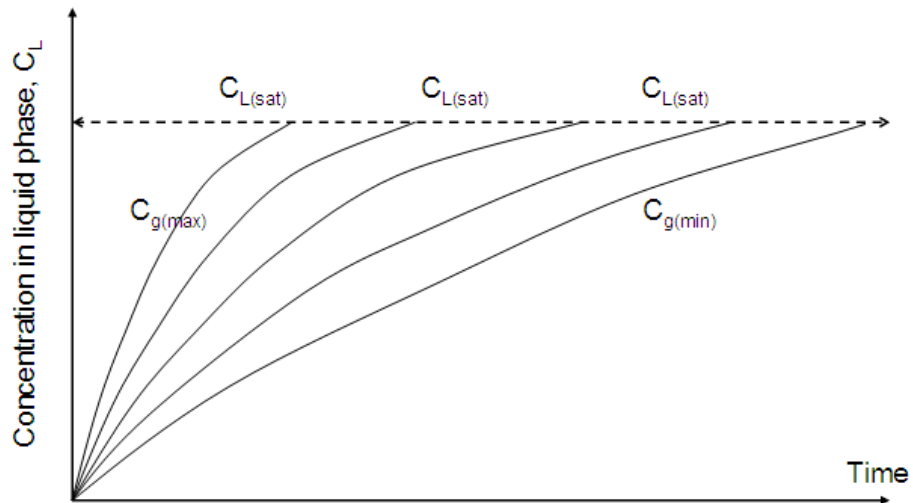
รูปที่ 4.27 แสดงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยชนิดเบนซีนในเฟสของของเหลว (น้ำประปา)

จากรูปที่ 4.27 พบว่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ที่ถูกดูดซึมในเฟสของเหลวจะเพิ่มขึ้นในลักษณะที่เป็นเส้นโค้งเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น โดยเมื่อพิจารณาค่าเฮนรี (Henry constant) ของเบนซีนที่มีค่าสูง พบว่าการถ่ายเทมวลสารถูกควบคุมโดยเฟสของเหลว

(Liquid-phase mass transfer resistant) ปรากฏการณ์ดังกล่าวขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของเฟสของเหลวที่เป็นเส้นโค้งที่เวลาต่างๆในการทดลอง (Lalanne และคณะ, 2008) โดยความเข้มข้นในเฟสของเหลวจะแบ่งออกเป็น 5 ช่วง ตามอัตราการไหลของก๊าซ (ความเข้มข้นที่เข้าระบบ) นอกจากนี้ จะพบว่าขนาดรูเดิมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่มีขนาดแตกต่างกัน (OR0.65 OR1.25 OR2.50 OR4.50) ความเข้มข้นในเฟสของเหลวไม่ค่อยแตกต่างกันมากนักที่อัตราการไหลของก๊าซเดียวกัน เป็นการบ่งชี้ว่าขนาดของรูเดิมอากาศขนาดในการทดลองนี้ (OR0.65 OR1.25 OR2.50 OR4.50) มีผลค่อนข้างน้อยในการบำบัด แต่สารอินทรีย์ระเหยชนิดเบนซีนสามารถถ่ายเทมวลสารจากเฟสก๊าซไปสู่เฟสของเหลวได้เร็วสุดที่ขนาดของขนาดของรูเดิมอากาศที่มีขนาดเล็ก (OR0.65) ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการถ่ายเทมวลสารในระดับอุตสาหกรรมได้ในอนาคต โดยการดูดซึมดังกล่าวขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมีของเฟสของเหลวที่ใช้เป็นสารดูดซึมเป็นหลัก

จากความสัมพันธ์ของความสามารถในการละลายในตัวทำละลาย พบว่าที่อุณหภูมิ (Temperature) และความดันไอ (Partial pressure) เดียวกันสารชนิดหนึ่งมีความสามารถในการละลายในตัวดูดซึมได้ค่าเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.28 (สุภาพรณี มานะรังสรรค์, 2545) ดังนั้นจากการทดลองนี้จะพบว่า สารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) มีความสามารถในการละลายในน้ำประปามากสุดค่าเดียวกัน นั่น คือ 1780 มิลลิกรัมต่อลิตร (Chao และคณะ, 2008)

ทั้งนี้ ทำการคำนวณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยชนิดเบนซีนในเฟสของเหลว (น้ำประปา) โดยคำนวณจากความสมดุลของเฟสก๊าซและเฟสของเหลว พบว่าที่จุดสมดุล เวลาที่อิมตัวในเฟสก๊าซมีค่าเท่ากับเวลาที่อิมตัวในเฟสของเหลว ในงานวิจัยนี้คำนวณความเข้มข้นในเฟสของเหลวโดยเลือกความเข้มข้นในเฟสก๊าซที่ขนาดรูเดิมอากาศแบบแข็งรูเดียว OR0.65 ที่อัตราการไหลของก๊าซ 3.50 มิลลิตรต่อวินาที จากรูปที่ 4.26 พบว่าความเข้มข้นที่ออกจากระบบของสารอินทรีย์ระเหย (เบนซีน) พบว่าเวลาที่อิมตัวของเฟสก๊าซ คือ ที่เวลาที่ออกจากระบบ 120 นาที (เนื่องจากเป็นค่าที่ความเข้มข้นของเฟสก๊าซที่ออกจากระบบ \cong ความเข้มข้นที่เข้าจากระบบ) ทำการคำนวณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยชนิดเบนซีนในเฟสของเหลวจากสมการที่ (4.11)



รูปที่ 4.28 ความสามารถในการละลายของสารละลายในตัวดูดซึมความเข้มข้นที่อิ่มตัว
ในเฟสของเหลวที่เท่ากัน (สุภาพรณ์ มานะรังสรรค์, 2545)

โดยในการทดลองนี้ได้นำสมการ Langmuir มาประยุกต์ในการหาตัวแปรที่ต้องการโดยสมการนี้เป็นสมการที่เหมาะสมกับการทดลองและนอกจากนี้จะพบว่าสมการ Langmuir ยังสามารถใช้ร่วมกับสมการของนักวิทยาศาสตร์และงานวิจัยอื่นๆ อีกด้วยเนื่องจากประโยชน์ของสมการนี้คือสามารถนำไปเขียนกราฟและทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากกราฟได้อย่างน่าเชื่อถือ โดยทำการคำนวณความเข้มข้นในเฟสของเหลวดังสมการที่ (4.11)

$$C_L(t) = \frac{Q_g}{V_L} [C_{g(in)}^* \times t - \int_0^t C_g dt] \quad (4.11)$$

ทำการอินทิเกรต $\int_0^t C_g dt$ ได้ดังสมการ (4.12)

$$\int_0^t C_g dt = C_{g(in)}^* \left[t - \frac{1}{k} \ln(1 + kt) \right]_0^t \quad (4.12)$$

นำสมการที่อินทิเกรตได้แทนค่าในสมการที่ (4.11) ได้ค่าดัง สมการที่ (4.13)

$$C_L = \frac{Q_g}{V_L} \left[C_{g(in)}^* \times t - C_{g(in)}^* \left[t - \frac{1}{k} \ln(1 + kt) \right]_0^t \right] \quad (4.13)$$

ทำการแปลงอนุพันธ์ จากสมการที่ (4.13) ได้ค่าดัง สมการที่ (4.14)

$$C_L = \frac{Q_g}{V_L} \left[(C_{g(in)}^* \times t) - (C_{g(in)}^* \times t) + \frac{C_{g(in)}^*}{k} \ln(1 + kt) \right] \quad (4.14)$$

ดังนั้นได้สมการในการคำนวณความเข้มข้นในเฟสของเหลวดังแสดงในสมการที่ (4.15)

$$C_L = \frac{Q_g}{V_L} \left[\frac{C_{g(in)}^*}{k} \ln(1 + kt) \right] \quad (4.15)$$

โดย

C_L^s	หมายถึง	ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยที่อิ่มตัวในเฟสของเหลว
C_L	หมายถึง	ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยที่เวลาต่างๆในเฟสของเหลว
Q_g	หมายถึง	อัตราการไหลของก๊าซ (มิลลิลิตรต่อวินาที)
V_L	หมายถึง	ปริมาตรของสารดูดซึม 300 มิลลิลิตร
$C_{g(in)}^*$	หมายถึง	ความเข้มข้นของเมทานอลในเฟสก๊าซที่เข้าถึงปฏิกิริยาแบบพองอากาศ
K	หมายถึง	ค่าคงที่ (constant) ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมทานอลในเฟสก๊าซที่เวลาต่างๆเพื่อที่จะหาเวลาที่อิ่มตัว โดยทำการคำนวณค่าคงที่ K (constant) จากสมการที่ (4.16)

$$C_g = \frac{C_{g(in)}^* (kt)}{1 + kt} \quad (4.16)$$

ทำการแปลงอนุพันธ์ จากสมการที่ (4.16) ได้ค่าดัง สมการที่ (4.17)

$$k = \frac{1}{t} \times \left[\frac{C_g}{C_{g(in)}^* t - C_g^* t} \right] \quad (4.17)$$

เมื่อได้ตัวแปรทุกตัวแล้ว นำมาแทนค่าในสมการที่ (4.15) เพื่อหาความเข้มข้นที่อิ่มตัวในเฟสของเหลว เมื่อได้ความเข้มข้นที่อิ่มตัวในเฟสของเหลวที่มากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.28 จึงทำการคำนวณกลับเพื่อหาเวลาที่อิ่มตัวในเฟสของเหลวที่อัตราการไหลและที่ขนาดรูเดิมอากาศใดๆ โดยคำนวณความเข้มข้นของเฟสของเหลวมีค่าเท่ากัน (เนื่องจากในสารละลายเดียวกันมีค่าความสามารถในการละลายค่าเท่ากัน ดังที่กล่าวถึงข้างต้น) ซึ่งผลการคำนวณกลับแสดงในตารางที่ 4.6 จากผลการคำนวณกลับ พบว่าการคำนวณดังกล่าวสอดคล้องกับหลักการที่ความเข้มข้นในเฟสก๊าซที่มาก ($C_{g(max)}$) ซึ่งแปรผันตรงกับอัตราการไหลของก๊าซที่มาก นั่นคือ อัตราการไหลของก๊าซ 3.50 มิลลิลิตรต่อลิตร นั้นจะใช้เวลาน้อยในการถึงจุดอิ่มตัวในเฟสของเหลว นอกจากนี้จะพบว่าที่ความเข้มข้นในเฟสก๊าซที่น้อย ($C_{g(min)}$) ซึ่งแปรผันตรงกับอัตราการไหลของก๊าซที่น้อย นั่นคือ อัตราการไหลของก๊าซ 0.65 มิลลิลิตรต่อลิตร นั้นจะใช้เวลามากในการถึงจุดอิ่มตัวในเฟสของเหลว โดยในการทดลองในงานวิจัยนี้ในการคำนวณความเข้มข้นในเฟสของเหลวใช้หลักการของสมดุลของก๊าซ-ของเหลว ตามหลักการสารจินตภาพ (ideal) ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ความเวลาที่อิ่มตัวในเฟสของเหลวใช้เวลานานมากที่อัตราการไหลของก๊าซต่ำๆ เนื่องจากผลการทดลองที่ได้ในส่วนนี้มี

จำเป็นและสำคัญอย่างยิ่งในการคำนวณค่าการถ่ายเทมวลสาร (Mass transfer coefficient) ของสารอินทรีย์ระเหยที่เข้าสู่ระบบต่อค่าตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์(Hydrodynamic) ดังได้กล่าวถึงในส่วนก่อนหน้า

ตารางที่ 4.6 เวลาที่อิ่มตัวของความเข้มข้นที่อิ่มตัวในเฟสของเหลวที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกัน

ขนาดของรูเติมอากาศ (Rigid orifice)	อัตราการไหลของก๊าซ (Qg)	ความเข้มข้นที่อิ่มตัวในเฟสของเหลว ($C_{L(sat)}$)	เวลาที่อิ่มตัวในเฟสของเหลว (Tsat)
OR 0.65	0.30	2500	710
	0.65	2500	530
	1.20	2500	360
	2.00	2500	290
	3.50	2500	240
OR 1.25	0.30	2500	780
	0.65	2500	560
	1.20	2500	390
	2.00	2500	310
	3.50	2500	260
OR 2.50	0.30	2500	800
	0.65	2500	590
	1.20	2500	410
	2.00	2500	330
	3.50	2500	280
OR 4.50	0.30	2500	840
	0.65	2500	630
	1.20	2500	460
	2.00	2500	380
	3.50	2500	290

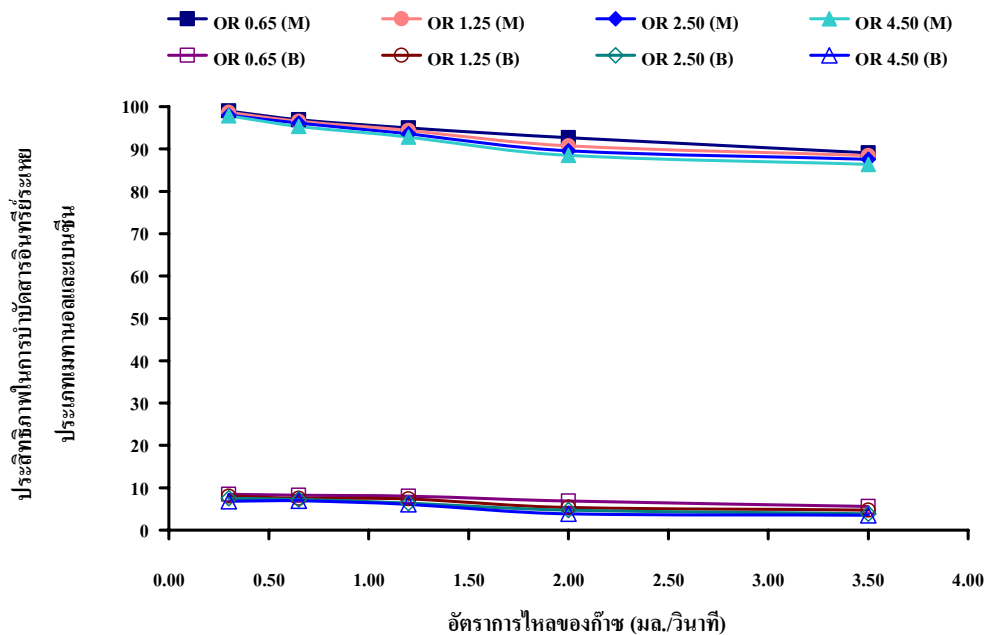
****หมายเหตุ**** การคำนวณความเข้มข้นในเฟสของเหลวใช้หลักการของสมดุลของก๊าซ-ของเหลว ตามหลักการสารจินตภาพ (ideal)

****** เนื่องจากสมการ Langmuir ที่นำมาคำนวณในการหาความเข้มข้นในเฟสของเหลวนี้ใช้หลักการจินตภาพ (ideal) โดยจากการคำนวณจะพบว่ามีเวลาที่ถึงสมดุลในเฟสของเหลวนานมาก เพราะที่ใช้หลักการถ่ายเทมวลสารตามธรรมชาติของสารโดยไม่มีการกวน (None Mixing)

จากที่ได้อธิบายในส่วนก่อนหน้า พบว่าสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) การถ่ายเทมวลสารถูกควบคุมโดยเฟสของเหลวซึ่งสอดคล้องกับการที่มีการลดลงของความเข้มข้นในส่วนที่เป็นฟิล์มของเหลวมาก คือใช้เวลานานในการถ่ายเทมวลสารจาก ดังนั้นการถ่ายเทมวลสารจากเฟสก๊าซคือฟองเบนซีนไปสู่เฟสของเหลว (น้ำประปา) สามารถอธิบายได้ดังนี้ การถ่ายเทมวลสารซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นภายในเฟส โดยที่องค์ประกอบเหล่านั้นมีความเข้มข้นแตกต่างกัน โดยที่องค์ประกอบของฟองสารเบนซีนนั้นจะถูกถ่ายเทจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูง (ฟองเบนซีน) ไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นที่ต่ำกว่า (น้ำประปา) จนในที่สุดความเข้มข้นของทุกองค์ประกอบจะมีค่าสม่ำเสมอทั้งระบบการถ่ายเทมวลสารจึงยุติ (ความเข้มข้นของเฟสก๊าซเท่ากับเฟสของเหลว) โดยทฤษฎีการถ่ายเทมวลสารสองความต้านทาน (Two- film theory) ของฟิล์มของเหลว (Lewis and Whitman, 1962) สามารถนำมาประยุกต์ในการอธิบายเกี่ยวกับกลไกในการถ่ายเทมวลสารก๊าซ – ของเหลว ซึ่งนำมาใช้อธิบายกลไกการถ่ายเทมวลสารระหว่างเฟสในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (Lalane และคณะ, 2008) ในส่วนการทดลองนี้ได้ คือ ในการถ่ายเทมวลสาร ซึ่งประกอบด้วยสามขั้นตอน คือ การถ่ายเทมวลสารจากภายในฟองของสารอินทรีย์ระเหยประเภทเบนซีนไปยังผิวสัมผัสระหว่างเฟส ขั้นตอนที่สองคือ การถ่ายเทมวลสารข้ามผิวสัมผัสระหว่างเฟสและขั้นตอนสุดท้าย คือ การถ่ายเทมวลสารจากผิวสัมผัสไปยังภายในเฟสที่ของเหลว (น้ำประปา) ซึ่งในขั้นตอนนี้ใช้เวลานานในการถ่ายเทมวลสาร จึงบ่งบอกว่าสารอินทรีย์ระเหยประเภทชนิดที่ละลายน้ำได้น้อย (เบนซีน) เฟสของเหลวจึงเป็นตัวควบคุมการถ่ายเทมวลสาร

4.3.3 ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยประเภทเบนซีนในน้ำประปา (VOCs removal efficient)

รูปที่ 4.29 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยทั้ง 2 ชนิด คือ ชนิดที่สามารถละลายน้ำได้มาก (เมทานอล) และชนิดที่ละลายน้ำได้น้อย (เบนซีน) โดยใช้ น้ำประปาเป็นตัวดูดซึม ซึ่งทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที ที่รูเดิมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่มีขนาดแตกต่างกัน ดังนี้ 0.65 1.25 2.50 และ 4.50 มิลลิเมตร (single rigid orifice, OR0.65 OR1.25 OR2.50 OR4.50) โดยประสิทธิภาพในการบำบัดในรูปที่ 4.29 คิดที่เวลาสุดท้ายของการทดลอง 240 นาที



รูปที่ 4.29 ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยทั้ง 2 ชนิด คือ เมทานอลและ เบนซีนในน้ำประปา ที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกัน โดยอุปกรณ์เดิมอากาศ 4 ชนิด

จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.29 พบว่าที่เวลา 240 นาที ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยทั้งสองชนิดในตัวดูดซึมเดียวกัน มีประสิทธิภาพในการบำบัดที่แตกต่างกันมาก คือ ชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) อยู่ในช่วงร้อยละ 86.35 - 98.96 นอกจากนี้จะพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) อยู่ในช่วงร้อยละ 3.25 - 8.74 โดยที่ขนาดรูเดิมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน (OR0.65 OR1.25 OR2.50 OR4.50) ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยแต่ละชนิดไม่แตกต่างกันมากนัก โดยปัจจัยในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมีของตัวดูดซึม(น้ำประปา) และตัวที่ถูกดูดซึมคือ สารอินทรีย์ระเหยทั้ง 2 ชนิด คือ ชนิดที่สามารถละลายน้ำได้มาก (เมทานอล) และชนิดที่ละลายน้ำได้น้อย (เบนซีน) นั้นเป็นส่วนใหญ่ (สุรชาติพิศ ศิริไพศาลพิพัฒน์ และคณะ, 2541) กล่าวคือ

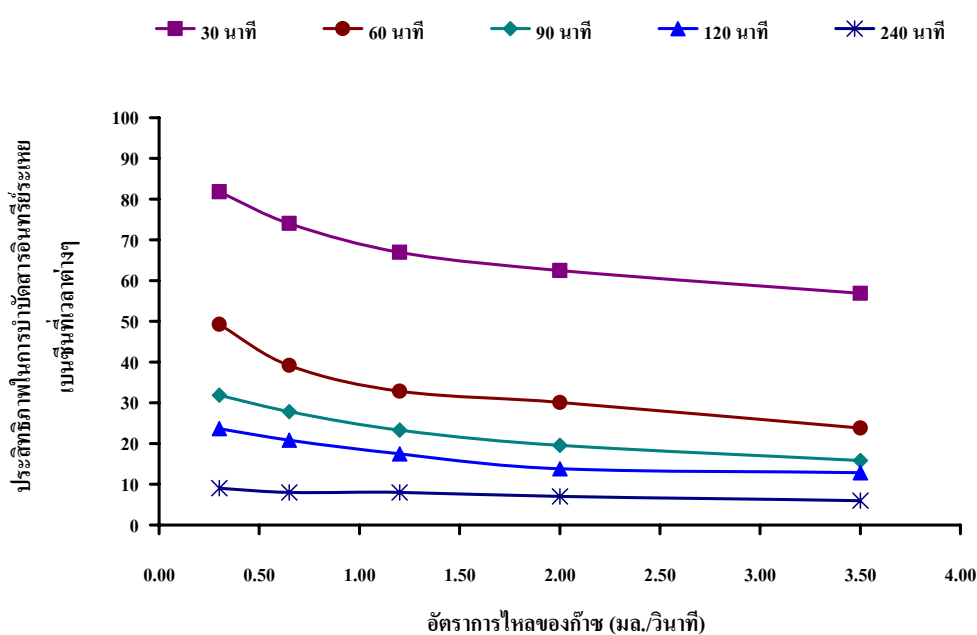
1. ธรรมชาติของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซึมเป็นปัจจัยหลักปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ ซึ่ง จากการทดลองในส่วนนี้ใช้น้ำประปาเป็นตัวดูดซึม (H_2O)
2. ธรรมชาติของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ โดยคุณสมบัติทางเคมีของตัวถูกดูดซึมที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 4.7
 - 2.1 ความสามารถในการละลาย ความสามารถในการละลายในการละลายที่สูงจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปฏิกิริยาของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย ทำให้การแพร่ขยายการดูดซับลดลงหรือ

เพิ่มขึ้น เพราะก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับขึ้นนั้นจะต้องมีการทำลายพันธะของตัวถูกละลาย และตัวทำละลายก่อน

2.2 ความมีขั้ว (Polarity) ของโมเลกุล ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงนั้นขึ้นอยู่กับความมีขั้วเป็นส่วนหนึ่ง เนื่องจากในตัวดูดซับคือน้ำประปา (H₂O) เป็นสารที่มีขั้ว (Polarity) เพราะการเพิ่มความมีขั้วจะทำให้สามารถในการละลายเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองในส่วนนี้ คือ เมทานอลมีความสามารถในการบำบัดมากกว่าเบนซีน

จากการพิจารณารูปที่ 4.29 พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยชนิดเบนซีนที่เวลา 240 นาที มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้อย อยู่ในช่วงร้อยละ 3.59 - 8.94 ดังนั้นจึงน่าสนใจที่จะพิจารณาประสิทธิภาพในการบำบัดที่เวลาแตกต่างกัน ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 4.30 ซึ่งจากกราฟจะพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ที่เวลาแตกต่างกันนั้น มีความสามารถในการบำบัดที่แตกต่างกันด้วย โดยประสิทธิภาพมากที่สุดคือ ที่เวลาน้อยสุด คือ ในช่วงเวลา 30 นาที ประสิทธิภาพมีค่ามากที่สุด คือ อยู่ในช่วงร้อยละ 57 - 82 ประสิทธิภาพในการบำบัดรองลงมา คือ ในช่วงเวลา 60 นาที ช่วงร้อยละ 49 - 24 ในช่วงเวลา 90 นาที ช่วงร้อยละ 32 - 16 ในช่วงเวลา 120 นาที ช่วงร้อยละ 24 - 13 ที่เวลา 240 นาที มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้อย อยู่ในช่วงร้อยละ 3.59 - 8.94

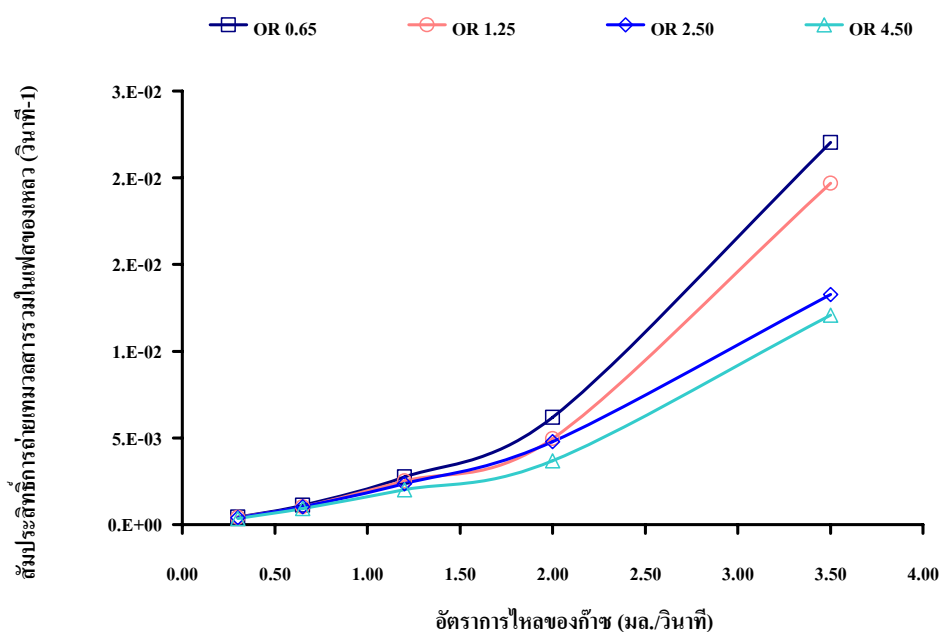
จากการพิจารณาในส่วนนี้จะพบว่าน้ำประปามีประสิทธิภาพต่ำในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) แต่เมื่อพิจารณาในส่วนของเวลาต่างๆ นั้นจะพบว่า ที่เวลา 30 - 60 นาที ยังสามารถบำบัดสารอินทรีย์ชนิดนี้ได้พอสมควร ดังนั้นน้ำประปาจึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในขั้นตอนแรกเพื่อให้ความเข้มข้นลดลงในระดับหนึ่งก่อนที่จะเข้าสู่ระบบบำบัดในขั้นตอนต่อไป เพื่อเป็นการประหยัดต้นทุนในการดำเนินการ



รูปที่ 4.30 ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในน้ำประปาที่เวลาในการบำบัดที่แตกต่างกัน โดยใช้ขนาดของรูเดิมอากาศขนาด 0.65 มล.

4.3.4 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสของเหลว (Overall mass transfer coefficient in liquid – phase: $K_L a$)

รูปที่ 4.31 แสดงสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสของเหลว ($K_L a$) ของสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกัน โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที และประยุกต์ใช้อุปกรณ์เดิมอากาศที่มีรูเดิมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่มีขนาดแตกต่างกัน ดังนี้ 0.65 1.25 2.50 และ 4.50 มิลลิเมตร (OR0.65 OR1.25 OR2.50 และ OR4.50)



รูปที่ 4.31 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสของเหลว ($K_L a$) ของสารอินทรีย์ระเหย (เบนซีน) ที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกัน

จากการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสของเหลว ($K_L a$) ของสารอินทรีย์ชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.0004 - 0.022 ต่อวินาที ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซระหว่าง 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที สำหรับทุกๆ อุปกรณ์เดิมอากาศที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเดิมอากาศทั้ง 4 ชนิด โดยสัมประสิทธิ์ $K_L a$ มีค่าเพิ่มขึ้นที่อัตราการไหลของก๊าซเพิ่มขึ้น โดยสามารถสังเกตได้ว่าที่รูเดิมอากาศที่มีขนาดเท่ากัน ค่าสัมประสิทธิ์ $K_L a$ มีค่ามากที่สุดที่อัตราการไหลของก๊าซ 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที และมีค่าน้อยสุดที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 มิลลิลิตรต่อวินาที นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ $K_L a$ ที่มีรูเดิมอากาศขนาดแตกต่างกัน (OR0.65 OR1.25 OR2.50 OR4.50) จะพบว่าที่อัตราการไหลของก๊าซเท่ากัน รูเดิมอากาศที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสของเหลว ($K_L a$) มากกว่ารูเดิมอากาศที่มี

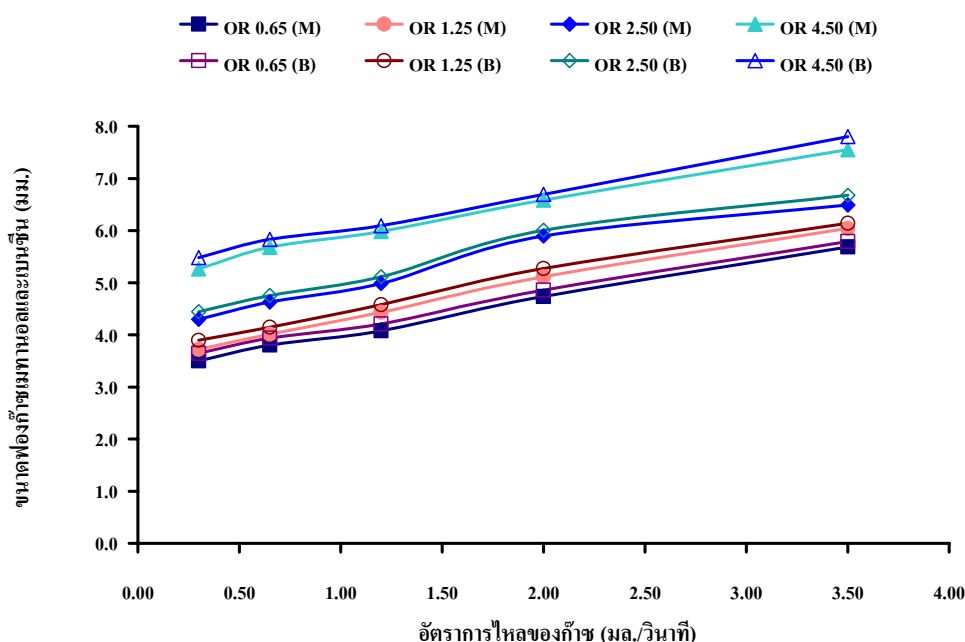
ขนาดใหญ่ โดยรูเดิมอากาศที่มี K_{La} มากสุดคือ OR 0.65 และน้อยสุดคือ OR 4.5 โดยเรียงตามลำดับการถ่ายเทมวลสาร (K_{La}) จากมากไปสู่น้อย คือ OR 0.65 OR1.25 OR2.50 และ OR4.5 ตามลำดับ

เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม (K_{La}) ที่ได้จากการทดลองนี้ เป็นผลคูณระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยในเฟสก๊าซ (K_L) และค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (a) ดังที่กล่าวถึงในส่วนการศึกษาที่ผ่านมา ดังนั้น เราจะได้ทำการศึกษาตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ (Bubble hydrodynamic parameters) และการถ่ายเทมวลสาร (Mass transfer parameters) ที่เกิดขึ้นจากขนาดของรูเดิมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่มีขนาดแตกต่างกัน (OR0.65 OR1.25 OR2.50 OR4.50) ภายในถึงปฏิบัติการแบบฟองอากาศ ต่อไป

4.3.5 ตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamic parameters)

ขนาดของฟองอากาศ (Bubble diameter: D_b)

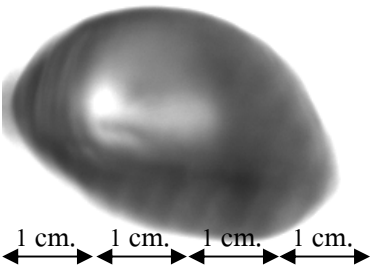
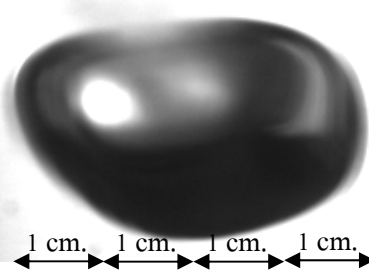
รูปที่ 4.32 แสดงขนาดของฟองอากาศของสารอินทรีย์ชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที ร่วมกับประยุกต์ใช้อุปกรณ์เดิมอากาศที่มีรูเดิมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่มีขนาดแตกต่างกัน ดังนี้ 0.65 1.25 2.50 และ 4.50 มิลลิเมตร (OR0.65 OR1.25 OR2.50 OR4.50) โดยรายละเอียดในส่วนของการหาขนาดของฟองอากาศแสดงดังกล่าวถึงในบทที่ 3



รูปที่ 4.32 ขนาดของฟองอากาศของสารอินทรีย์ระเหยชนิดเมทานอลและเบนซีน ที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกัน ที่ขนาดรูเดิมอากาศแบบแข็งรูเดียว (OR0.65 OR1.25 OR2.50 และ OR4.50)

จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.32 พบว่าขนาดของฟองอากาศมีค่าระหว่าง 3.50 – 7.55 มิลลิเมตร ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซระหว่าง 0.30 - 3.50 มิลลิเมตรต่อวินาที จากการพิจารณารูเดิมอากาศแบบแข็งขนาดเดียวกันพบว่าขนาดของฟองอากาศ (D_B) ที่ได้จากการทดลองจะแปรผันตรงกับอัตราการไหลของอากาศ (Q_g) กล่าวคือเมื่ออัตราการไหลของก๊าซเพิ่มขึ้นขนาดของฟองอากาศมีขนาดใหญ่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ที่อัตราการไหลของก๊าซเท่ากันขนาดของฟองอากาศจะแปรผันตรงกับขนาดรูเดิมอากาศ จากผลการทดลองดังกล่าวจะพบว่าขนาดของฟองอากาศที่แตกต่างกันนั้น เนื่องจาก ขนาดของฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับแรงตึงผิว (Surface tension) และแรงลอยตัว (Buoyancy force) ในการแยกตัว (Detachment) ออกจากขนาดรูเดิมอากาศที่แตกต่างกัน โดยรายละเอียดในส่วนนี้ได้อธิบายใน 4.2.5 ตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamic parameters)

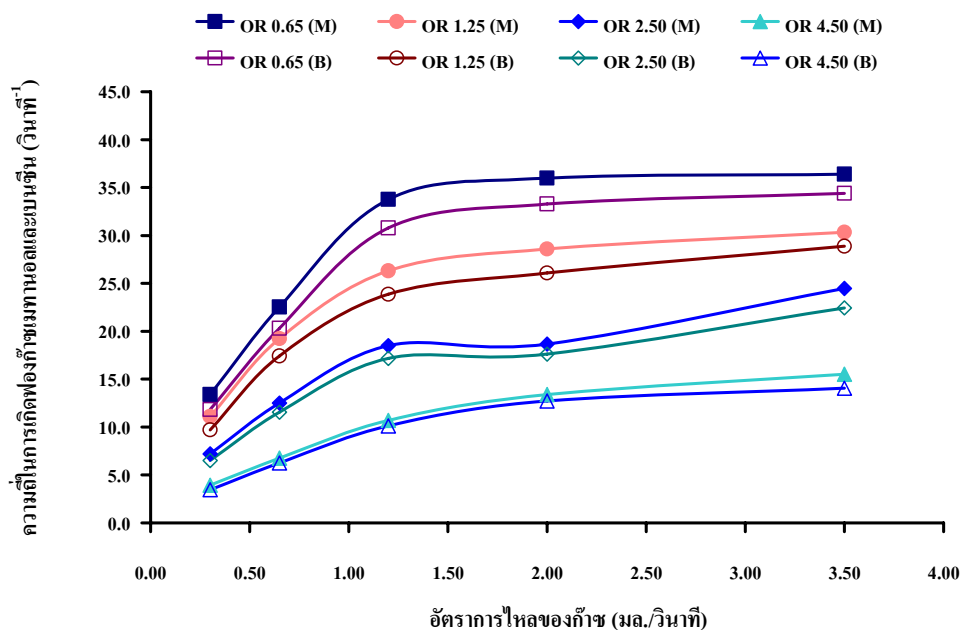
ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบขนาดของฟองอากาศของสารอินทรีย์ระเหยทั้งสองชนิด ที่อัตราการไหลของก๊าซและขนาดของรูเดิมอากาศแบบแข็งรูเดิมขนาดเท่ากัน พบว่าขนาดของฟองอากาศของสารอินทรีย์ทั้งสองชนิดไม่แตกต่างกันมาก โดยสารอินทรีย์ชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) มีขนาดเล็กกว่าฟองอากาศของสารอินทรีย์ชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) เล็กน้อยเนื่องจากความแตกต่างทางด้านแรงตึงผิว (Surface tension) ดังที่กล่าวมาในตอนต้น เนื่องจากสารอินทรีย์ชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) มีแรงตึงผิวในเฟสก๊าซน้อยกว่า สารอินทรีย์ชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) จึงเป็นสาเหตุให้ขนาดของฟองเล็กกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.33 และ 4.34 ตามลำดับ เนื่องจากเฟสของเหลว (น้ำประปา) ที่ใช้ดูดซึมเมทานอลมีค่าแรงตึงผิวที่ต่ำกว่าที่ใช้ดูดซึมเบนซีน ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากความสามารถในการละลายน้ำของเมทานอลมากกว่าเบนซีน จึงส่งผลกระทบต่อค่าแรงตึงผิวได้มากกว่าจึงทำให้ขนาดของฟองเมทานอลมีขนาดเล็กกว่าเบนซีน

	
<p>รูปที่ 4.33 ฟองของสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล)</p>	<p>รูปที่ 4.34 ฟองของสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน)</p>

ความถี่ในการเกิดฟองอากาศ (Bubble formation frequency: f_b)

รูปที่ 4.35 แสดงความถี่ในการเกิดฟองอากาศของสารอินทรีย์ชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 - 3.50 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยประยุกต์ใช้อุปกรณ์

เติมอากาศที่มีรูเติมอากาศแบบแข็งรูเดี่ยวที่มีขนาดแตกต่างกัน ดังนี้ 0.65 1.25 2.50 และ 4.50 มิลลิเมตร (OR0.65 OR1.25 OR2.50 และ OR4.50)

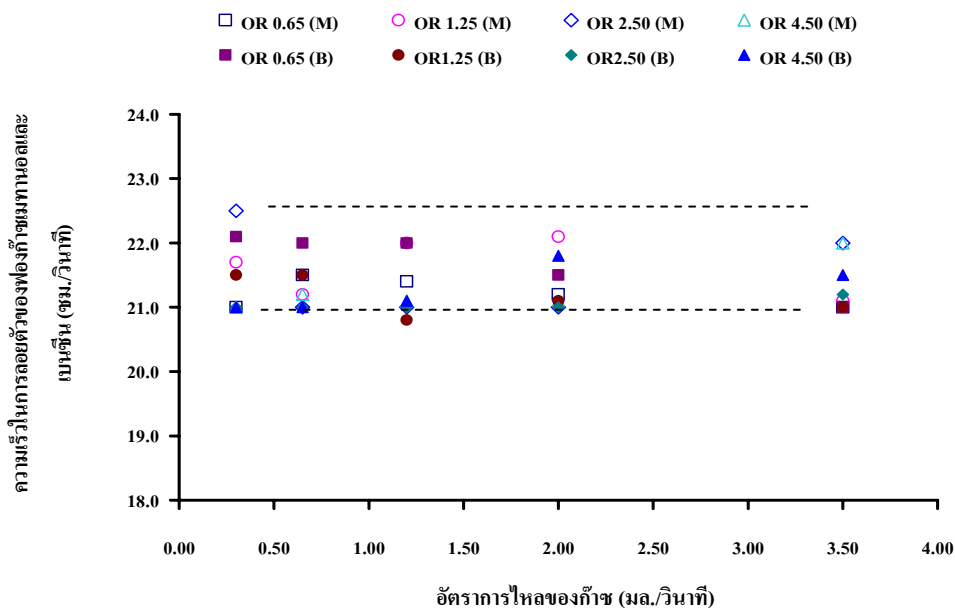


รูปที่ 4.35 ความถี่ในการลอยตัวของฟองอากาศของสารอินทรีย์ระเหยชนิดเมทานอลและเบนซีน ที่อัตราการไหลต่างๆ ที่สอดคล้องกับอุปกรณ์เติมอากาศ 4 ชนิด

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.35 พบว่าความถี่ในการเกิดฟองก๊าซเบนซีนมีค่าระหว่าง 3.93 - 35.99 ต่อวินาที ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซระหว่าง 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที ที่รูเติมอากาศแบบแข็งรูเดี่ยวที่มีขนาดแตกต่างกัน คือ 0.65 1.25 2.50 และ 4.50 มิลลิเมตร นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบขนาดของรูเติมอากาศแบบแข็งรูเดี่ยวที่มีขนาดแตกต่างกัน พบว่าที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากันความถี่ในการเกิดฟองอากาศมีค่ามากที่สุดที่ขนาดรูเติมอากาศที่มีขนาดเล็กคือ OR 0.65 และความถี่ในการเกิดฟองอากาศมีค่าน้อยสุดที่ขนาดรูเติมอากาศที่มีขนาดใหญ่คือ OR 4.50 จากการทดลองในส่วนนี้จะพบว่าความถี่ในการเกิดฟองอากาศ (f_B) ที่วัดได้จากสารอินทรีย์ระเหยทั้งสองชนิด คือ ชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) และชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ค่า f_B ที่เกิดขึ้นไม่แตกต่างกันมากนักเนื่องค่าดังกล่าวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดของฟองอากาศ และเนื่องจากขนาดของฟองอากาศที่ได้จากการทดลองของสารอินทรีย์ทั้งสองชนิดนั้นมีขนาดที่แตกต่างกันไม่มากดังนั้นจึงส่งผลให้ความถี่ในการเกิดฟองอากาศ (f_B) ไม่แตกต่างกันมากนัก ดังได้อธิบายในหัวข้อ 4.3.5

ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (Bubble rising velocity: U_B)

รูปที่ 4.36 แสดงความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (U_B) ของสารอินทรีย์ชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 - 3.50 มิลลิเมตรต่อวินาที ร่วมกับอุปกรณ์เติมอากาศที่มีรูเติมอากาศแบบแข็งรูเดี่ยวที่มีขนาดแตกต่างกัน ดังนี้ 0.65 1.25 2.50 และ 4.50 มิลลิเมตร (OR0.65 OR1.25 OR2.50 และ OR4.50) โดยวิธีการวิเคราะห์ค่า U_B ดังแสดงในบทที่ 3 ในส่วนของการหาค่าความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ

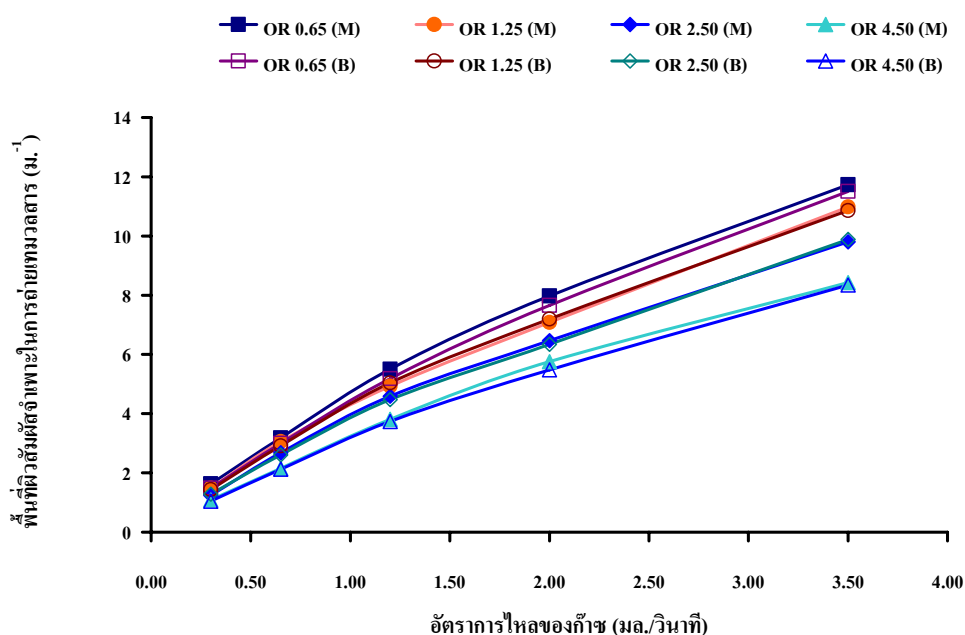


รูปที่ 4.36 ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศของสารอินทรีย์ระเหยชนิดเมทานอลและเบนซีน ที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกัน ที่สอดคล้องกับอุปกรณ์เติมอากาศ 4 ชนิด

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.36 พบว่าความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศมีค่าค่อนข้างคงที่ (มีค่าอยู่ระหว่าง 21.00 - 22.75 เซนติเมตรต่อวินาที) ที่ขนาดของรูเติมอากาศแบบแข็งรูเดี่ยวที่มีขนาดแตกต่างกัน (OR0.65 OR1.25 OR2.50 OR4.50) พบว่าความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (U_B) ที่วัดได้จากสารอินทรีย์ระเหยทั้งสองชนิด คือ ชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) และชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ค่า U_B ที่เกิดขึ้นไม่แตกต่างกันมากนักเนื่องค่า U_B ดังได้อธิบายในหัวข้อ 4.3.5 ซึ่งพบว่ามีความสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดของฟองอากาศ และจากขนาดของฟองอากาศที่ได้จากการทดลองของสารอินทรีย์ทั้งสองชนิดนั้นมีขนาดที่แตกต่างกันไม่มาก นอกจากนี้ พบว่าค่าความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (U_B) ซึ่งสอดคล้องกับกราฟการทดลองของ Grace และ Wairegi (1986) ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ในกรณีที่เฟสของเหลวไม่มีการปนเปื้อน (Pure condition) เนื่องจากน้ำประปาได้ถูกเลือกนำมาใช้เป็นตัวดูดซึมในการทดลองนี้

พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (Specific interfacial area: a)

รูปที่ 4.37 แสดงค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะของสารอินทรีย์ชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที และประยุกต์ใช้อุปกรณ์เติมอากาศที่มีรูเติมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่มีขนาดแตกต่างกัน ดังนี้ 0.65 1.25 2.50 และ 4.50 มิลลิเมตร (single rigid orifice: OR0.65 OR1.25 OR2.50 OR4.50) โดยค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (a) นี้มีความสัมพันธ์กับขนาดของฟองอากาศ (D_B) ความถี่ในการการเกิดฟอง (f_B) และค่าแรงลอยตัวของฟองอากาศ (U_B) ซึ่งตัวแปรดังกล่าวหาได้จากการทดลอง และคำนวณโดยสมการที่ (3.16)



รูปที่ 4.37 พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสารของสารอินทรีย์ระเหยชนิดเมทานอลและเบนซีน ที่อัตราการไหลของก๊าซแตกต่างกัน ที่สอดคล้องกับอุปกรณ์เติมอากาศ 4 ชนิด

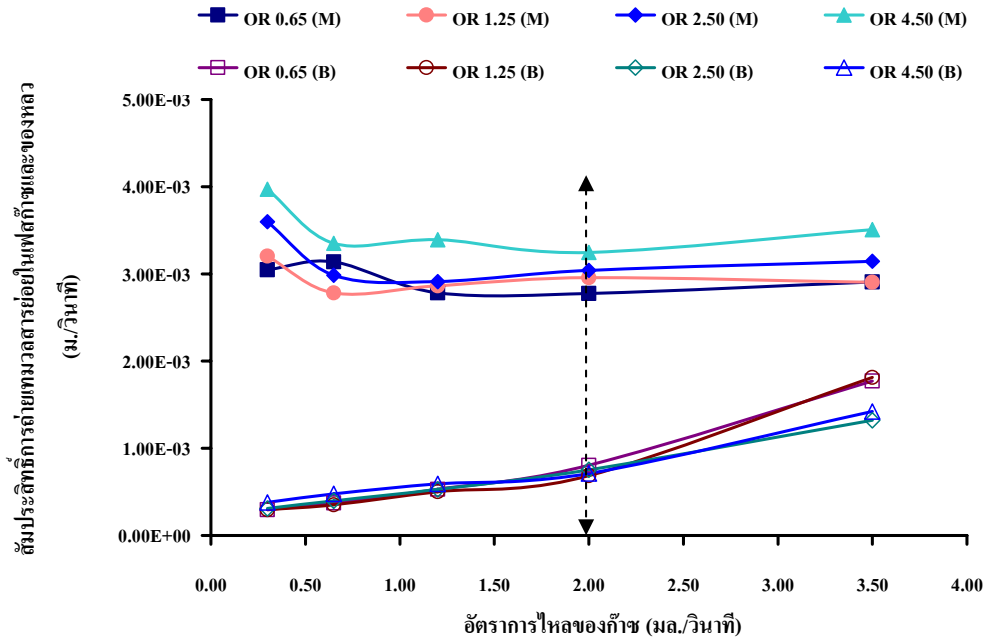
จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.37 พบว่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (a) มีค่าอยู่ระหว่าง 1.09 - 11.51 m²/m³ ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซระหว่าง 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที ที่รูเติมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่มีขนาดแตกต่างกัน (OR0.65 OR1.25 OR2.50 OR4.50) จากการพิจารณารูเติมอากาศแบบแข็งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน พบว่าค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (a) มีค่ามากที่สุดที่อัตราการไหลของก๊าซ 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที และมีค่าน้อยสุดที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 มิลลิลิตรต่อวินาที เมื่อพิจารณารูเติมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่มีขนาดแตกต่างกันพบว่าค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (a) มีค่ามากที่สุดที่ขนาดรูเติมอากาศ 0.65 มิลลิเมตร (OR0.65) และมีค่าน้อยสุดที่ขนาดรูเติมอากาศ 4.50 มิลลิเมตร (OR4.50) โดยค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (a) แปรผกผันกับขนาดของฟองอากาศที่กล่าวถึงในขั้นต้น

จากการทดลองในส่วนนี้จะพบว่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (a) ที่วัดได้จากสารอินทรีย์ระเหยทั้งสองชนิด คือ ชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) และชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ค่า a ที่วัดได้ไม่แตกต่างกันมากนักเนื่องจากค่า a นี้มีความสัมพันธ์กับขนาดของฟองอากาศ (D_B) ความถี่ในการการเกิดฟอง (f_B) และค่าแรงลอยตัวของฟองอากาศ (U_B)

จากการทดลองในส่วนนี้จะพบว่าตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ของสารอินทรีย์ระเหยทั้งสองชนิด คือ ชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) และชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ไม่แตกต่างกันมาก แต่ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยทั้งสองชนิดนั้น มีประสิทธิภาพที่แตกต่างกันมาก ดังนั้นเป็นการยืนยันว่าตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้อย โดยผลกระทบในการบำบัดส่วนใหญ่ขึ้นขึ้นกับคุณสมบัติของตัวดูดซึม (น้ำประปา) และตัวถูกดูดซึมที่เลือกใช้เป็นปัจจัยสำคัญ

4.3.6 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยในเฟสก๊าซ (Gas – Liquid film mass transfer coefficient: K_G , K_L)

รูปที่ 4.38 แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย (Gas – Liquid film mass transfer coefficient: K_G , K_L) ของสารอินทรีย์ระเหยทั้งสองชนิด คือ ชนิดที่ละลายน้ำมาก(เมทานอล) และชนิดที่ละลายน้ำน้อย (เบนซีน) โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 - 3.50 มิลลิเมตรต่อวินาที ร่วมกับอุปกรณ์เติมอากาศที่มีรูเติมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่มีขนาดแตกต่างกัน ดังนี้ 0.65 1.25 2.50 และ 4.50 มิลลิเมตร (single rigid orifice: OR0.65 OR1.25 OR2.50 OR4.50) โดยค่า (K_G , K_L) ในการทดลองนี้จะเป็นสัดส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม ($K_G a$, $K_L a$) และพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (a) ซึ่งวิเคราะห์ได้จากการทดลองดังที่กล่าวถึงข้างต้น (PainmanaKul และคณะ, 2005) โดยรายละเอียดดังแสดงในบทที่ 3 ในหัวข้อ 3.5.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย (K_G , K_L)



รูปที่ 4.38 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยในเฟสก๊าซและของเหลว ที่อัตราการไหลของก๊าซต่างๆ ที่ขนาดรูเดิมอากาศแบบแข็งที่มีขนาดแตกต่างกัน

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.38 เป็นการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทมวลสารย่อยของสารอินทรีย์ระเหยทั้งสองชนิด คือ ชนิดที่ละลายน้ำมาก (เมทานอล) โดยทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทมวลสารย่อยในเฟสก๊าซ (K_G) และชนิดที่ละลายน้ำน้อย (เบนซีน) โดยทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทมวลสารย่อยในเฟสของเหลว (K_L) จากการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย (K_G) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.0028 - 0.0048 $m.s^{-1}$ ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซระหว่าง 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที ที่ขนาดรูเดิมอากาศแตกต่างกัน (OR0.65 OR1.25 OR2.50 และ OR4.50) จากการพิจารณารูเดิมอากาศแบบแข็งขนาดเดียวกันพบว่าค่า K_G มีแนวโน้มลดลงจนค่าอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 1.20 มิลลิลิตรต่อวินาที หลังจากนั้นแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหรือมีค่าเกือบคงที่ เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทมวลสารย่อยในเฟสของเหลว (K_L) พบว่าค่ามีค่าอยู่ระหว่าง 0.0004 - 0.022 $m.s^{-1}$ ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซระหว่าง 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที ที่ขนาดรูเดิมอากาศแตกต่างกัน (OR0.65 OR1.25 OR2.50 และ OR4.50) จากการพิจารณารูเดิมอากาศแบบแข็งขนาดเดียวกันพบว่าค่า K_L มีค่าค่อนข้างคงที่จนถึงอัตราการไหลของก๊าซ 1.20 มิลลิลิตรต่อวินาที นอกจากนั้นค่า K_L มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการกวนผสม (Mixing)

ทั้งนี้ ค่าความสามารถในการถ่ายเทมวลสารที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศมีความสัมพันธ์กับความต้านทานในการถ่ายเทมวลสารซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาของฟิล์มก๊าซและ

ของเหลว (Gas-Liquid film thickness) ซึ่งเปลี่ยนไปตามความต้านทานของฟิล์มก๊าซ – ของเหลว รวมทั้ง ความปั่นป่วนของระบบ โดยพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทมวลสารย่อยในเฟสก๊าซ (K_G) พบว่า Q_g ไม่ค่อยมีผลกระทบต่อค่า K_G หรือความต้านทานก๊าซฟิล์มแต่ขนาดของรูเดิมอากาศมีผลกระทบมาก (ดังหัวข้อที่ผ่านมา) เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทมวลสารย่อยในเฟสของเหลว (K_L) พบว่าถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบเบนซินจะมีความหนามาก (Large gas-film around bubble) เพราะไม่ถูกรบกวนและเป็นอุปสรรคในการถ่ายเทมวลสารจากฟองเบนซินไปสู่ น้ำประปา (มันสิน ตันฑูเวศน์, 2542) ทำให้ฟิล์มของเหลวเป็นตัวกำหนดการถ่ายเทมวลสาร จากเหตุผลดังกล่าวจึง ส่งผลให้ค่า K_L มีค่าน้อยที่อัตราการไหลของก๊าซต่ำ ในทางตรงกันข้าม ถ้ามีความปั่นป่วนสูง ทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนาส่งผลให้ฟิล์มของเหลวมีลักษณะบาง (Thin gas-film around bubble) เป็นผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่จากเฟสก๊าซผ่านฟิล์มของเหลวสู่ น้ำประปาได้มากขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่า K_L มีค่าสูงที่อัตราการไหลของก๊าซสูง ซึ่งจากการทดลองในส่วนนี้จะพบว่าที่อัตราการไหลของก๊าซที่เท่ากัน ลักษณะของฟิล์มก๊าซหรือฟิล์มของเหลวจะมีลักษณะบาง (Thin gas-film around bubble) หรือ หนา (Large gas-film around bubble) นั้น สาเหตุสำคัญมาจากเฟสก๊าซหรือเฟสของเหลว เฟสไหนเป็นตัวควบคุมการถ่ายเทมวลสารเป็นหลัก นอกจากนี้จะพบว่าขนาดของรูเดิมอากาศ (orifice size) มีผลกระทบน้อยต่อค่า K_L ซึ่งยืนยันงานวิจัยนี้ได้จากงานวิจัยที่ผ่านมา (PainmannKul และคณะ, 2005) พบว่าฟองอากาศที่มีขนาดมากกว่า 3 มิลลิเมตร ขึ้นไป ค่า K_L ของทุกรูเดิมอากาศใดๆ นั้นมีค่าคงที่ แต่ในกรณีของค่า K_{La} ที่แตกต่างกันที่อัตราการไหลสูงๆ มีสาเหตุมาจากค่า a ที่แตกต่างกันตามขนาดรูเดิมอากาศ (Orifice) ขนาดฟองอากาศ (D_B) และอัตราการไหลเป็นปัจจัยสำคัญ ดังนั้น จากการศึกษาในส่วนนี้ จะพบว่าการที่เราต้องการให้ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทมวลสารย่อย (K_G, K_L) มากขึ้นหรือลดลงนั้น ควรที่จะดูคุณสมบัติของสารอินทรีย์ระเหยเป็นหลักว่าการถ่ายเทมวลสารนั้นขึ้นกับเฟสไหนเป็นตัวควบคุม รวมทั้งควรดำเนินระบบที่อัตราการไหลของก๊าซที่เหมาะสมด้วย

ตารางที่ 4.7 ค่าตัวแปรที่ศึกษาจากการทดลองการศึกษาลักษณะของความสามารถในการละลายน้ำของสารอินทรีย์ระเหยทั้ง 2 ชนิด คือ ชนิดที่สามารถละลายน้ำได้มากและชนิดที่ละลายน้ำได้น้อย ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย (กรณีเบนซินในน้ำประปา)

OR	Qg	%Eff	$K_L a$	D_B	f_B	U_B	a	K_L
0.65	0.30	8.50	0.0004	3.50	13.39	21.00	1.63	0.0003
	0.65	8.22	0.0011	3.80	22.54	21.50	3.18	0.0004
	1.20	8.01	0.0028	4.08	33.78	21.40	5.50	0.0005
	2.00	6.90	0.0062	4.73	35.99	21.20	7.97	0.0008
	3.50	5.57	0.0220	5.79	34.39	21.00	11.51	0.0018
1.25	0.30	8.07	0.0004	3.72	11.11	21.70	1.49	0.0003
	0.65	7.53	0.0009	4.01	19.25	21.20	3.06	0.0003
	1.20	7.41	0.0028	4.28	26.32	22.00	4.92	0.0006
	2.00	5.36	0.0050	5.11	28.58	22.10	7.08	0.0007
	3.50	4.77	0.0197	6.04	30.32	21.10	10.99	0.0018
2.50	0.30	7.54	0.0004	4.30	7.21	22.50	1.24	0.0003
	0.65	7.22	0.0010	4.63	12.51	21.00	2.68	0.0004
	1.20	6.37	0.0024	4.98	18.50	21.00	4.59	0.0005
	2.00	4.71	0.0048	5.89	18.65	21.00	6.46	0.0008
	3.50	3.90	0.0133	6.49	24.30	22.00	9.81	0.0013
4.50	0.30	6.79	0.0004	5.26	3.93	21.00	1.09	0.0004
	0.65	6.96	0.0009	5.68	6.77	21.20	2.16	0.0005
	1.20	6.13	0.0020	5.98	10.70	21.10	3.80	0.0006
	2.00	3.90	0.0037	6.58	13.38	21.10	5.76	0.0007
	3.50	3.54	0.0121	7.55	15.53	22.00	8.43	0.0014

จากผลการศึกษาการดูดซึมเมทานอลและเบนซีน ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และ 4.7 ตามลำดับ เราสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

- ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยสองชนิดที่แตกต่างกันนั้น คือ ชนิดที่ละลายน้ำมาก (เมทานอล) และชนิดที่ละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ประสิทธิภาพในการบำบัดส่วนใหญ่เป็นผลมาจากคุณสมบัติทางเคมีของตัวดูดซึมและตัวถูกดูดซึมเป็นปัจจัยสำคัญ
- ตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ ซึ่งได้แก่ ขนาดของฟองอากาศ (D_B) ความถี่ในการการเกิดฟอง (f_B) และค่าแรงลอยตัวของฟองอากาศ (U_B) และค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (a) มีผลกระทบน้อยในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยชนิดที่มีความสามารถในการละลายน้ำที่แตกต่างกัน
- ในการดำเนินระบบในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยควรพิจารณาความสามารถในการละลายน้ำเป็นปัจจัยหนึ่ง เนื่องจากที่อัตราการไหลของก๊าซ (Q_g) และขนาดของรูเดิมอากาศที่มีขนาดเดียวกัน (OR) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย (K_G, K_L) มีค่าที่แตกต่างกัน ซึ่งมีผลในการถ่ายเทมวลสารที่แตกต่างกันตามลำดับ
- ความสามารถในการถ่ายเทมวลสารของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย (K_G, K_L) มีลักษณะและความสัมพันธ์กับการถ่ายเทมวลสาร โดยดูจากเฟสไหนเป็นเฟสในการควบคุมการถ่ายเทมวลสารเป็นหลัก (Gas – Liquid mass transfer resistant)

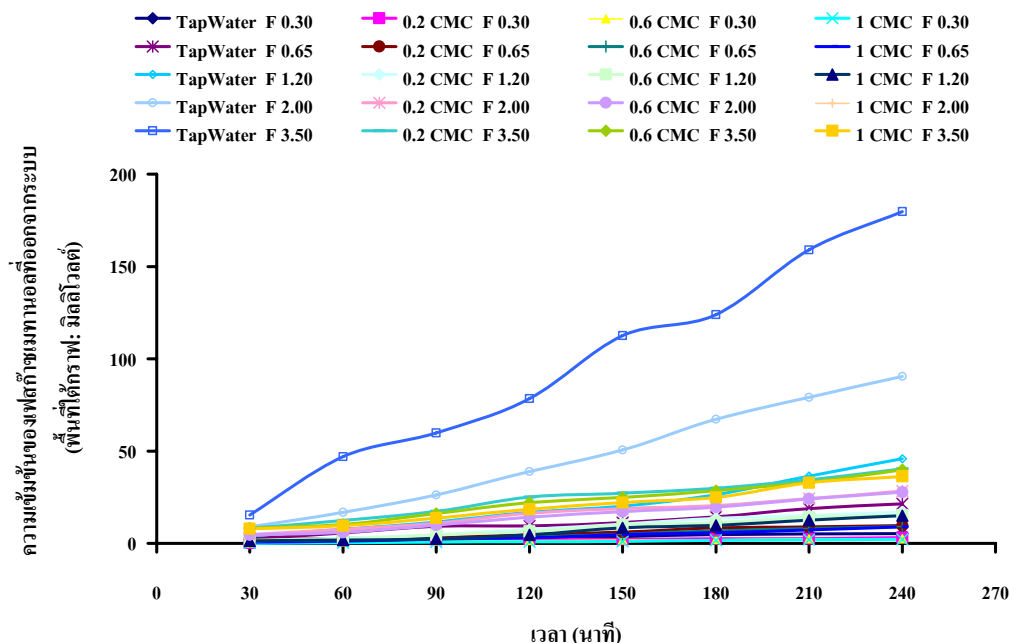
ในหัวข้อถัดไป จะเป็นการศึกษาผลกระทบจากการปนเปื้อนของสารละลายสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบในสารดูดซึมต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยทั้งชนิดที่ละลายน้ำมาก (เมทานอล) และชนิดที่ละลายน้ำน้อย (เบนซีน) รวมทั้งตัวแปรในด้านการถ่ายเทมวลสารและด้านอุทกพลศาสตร์ ซึ่งองค์ความรู้ดังกล่าวส่งผลทำให้เราเข้าใจถึงกลไกในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยทั้งสองชนิดมากยิ่งขึ้น

4.4 การศึกษาผลกระทบจากการปนเปื้อนของสารละลายสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบในการดูดซึมของสารอินทรีย์ระเหยทั้งสองชนิด คือ ชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) และชนิดที่ละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย ตัวแปรในด้านการถ่ายเทมวลสารและด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ

จุดประสงค์ของการทดลองนี้ เพื่อศึกษาผลกระทบความเข้มข้นของตัวดูดซึมของสารละลายสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน (0.2 0.6 และ 1 CMC) ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย และทำการวิเคราะห์ค่าตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสาร โดยผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

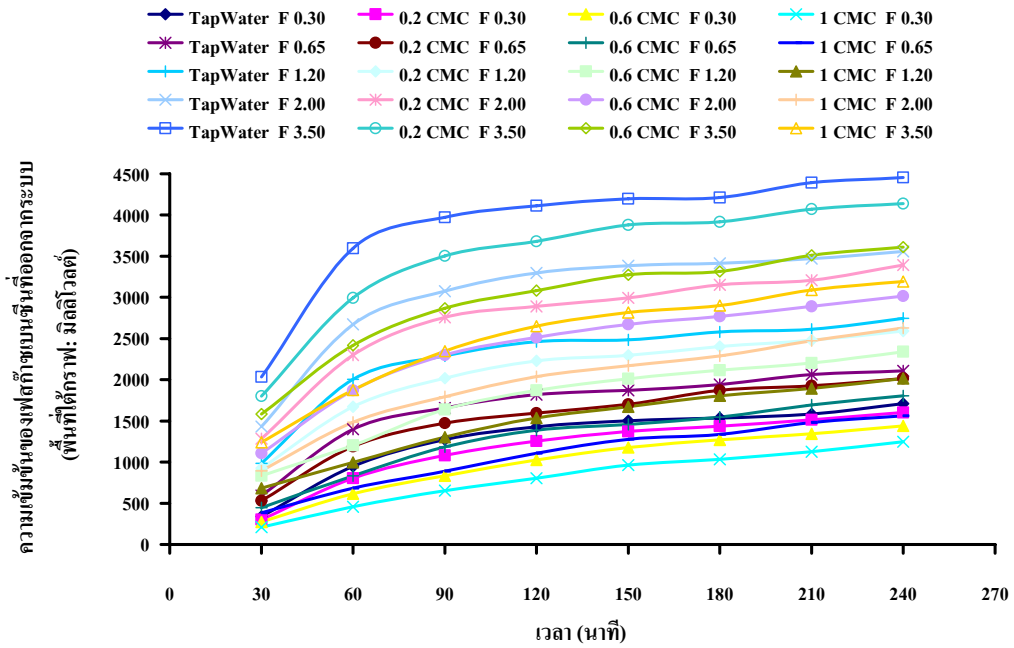
4.4.1 ความเข้มข้นเฟสก๊าซของสารอินทรีย์ทั้งสองชนิด คือ ชนิดที่ละลายน้ำมาก (เมทานอล) และชนิดที่ละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ที่ออกจากระบบบำบัด

รูปที่ 4.39 และ 4.40 แสดงความเข้มข้นของเฟสก๊าซของสารอินทรีย์ระเหยทั้งสองชนิด คือ ชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) และชนิดที่ละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ที่ออกจากถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศที่เวลาต่างๆ ตามลำดับ โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที โดยประยุกต์ใช้อุปกรณ์เติมอากาศที่มีรูเติมอากาศแบบแจ็กรูเดียวที่มีขนาด 0.65 มิลลิเมตร (OR0.65) รวมทั้งเฟสของเหลวที่แตกต่างกัน คือ น้ำประปา สารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้น 0.2 CMC 0.6 CMC และ 1 CMC ตามลำดับ ในงานวิจัยนี้ ทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซที่ออกจากระบบของเมทานอลในเฟสก๊าซที่เวลาต่างๆ ทุก 30 นาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และทำการทดลองและเก็บก๊าซตรงจุดเก็บความเข้มข้นขาออก ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยใช้อุปกรณ์ก๊าซโครมาโทกราฟี (GC / FID VARIAN 3800) โดยทำการทดลอง 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยเพื่อให้ได้ค่าความถูกต้องที่แม่นยำมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 4.39 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยชนิดเมทานอลที่ออกจากระบบ ในตัวดูดซึมที่แตกต่างกัน คือ น้ำประปา สารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้น 0.2 CMC 0.6 CMC และ 1 CMC

จากรูปที่ 4.39 จะพบว่าความเข้มข้นของเฟสก๊าซเมทานอลที่ออกจากระบบแปรผันตรงกับ ความเข้มข้นที่เข้าระบบ นอกจากนี้ ความเข้มข้นของเฟสก๊าซเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นตามหลักการดูดซึมของตัวดูดซึม (ดังที่กล่าวถึงในส่วนของการทดลองที่ผ่านมา) โดยที่อัตราการไหลของก๊าซที่เข้าระบบ (Q_G) เท่ากันจะพบว่าความเข้มข้นของเฟสก๊าซที่ออกจากระบบไม่ได้แตกต่างกันมากนัก ในตัวดูดซึมที่แตกต่างกันนั้น (น้ำประปา และสารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้น 0.2 CMC 0.6 CMC และ 1 CMC) เป็นการยืนยันว่าชนิดของตัวดูดซึมที่มีลักษณะแตกต่างกันนั้นไม่ได้มีผลกระทบมากนักในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ทั้งนี้ ที่ค่าความเข้มข้นที่ออกจากระบบที่เวลาสุดท้ายของการทดลอง คือ 240 นาที มีค่าแตกต่างจากความเข้มข้นที่เข้าระบบมาก ($C_{g(out)} \lll C_{g(inlet)}$) โดยอาจต้องใช้เวลานานมากกว่าจะถึงจุดอิ่มตัวในเฟสก๊าซ ซึ่งเป็นการยืนยันว่าสารอินทรีย์ระเหยชนิดเมทานอลละลายน้ำได้มาก และจากความเข้มข้นที่ออกจากระบบในเฟสก๊าซของตัวดูดซึมที่แตกต่างกันมีค่าน้อย ในทางปฏิบัติ การประยุกต์ใช้น้ำประปาสามารถใช้เป็นตัวดูดซึมสารอินทรีย์ระเหยชนิดที่มีขั้ว (Hydrophilic VOCs) ก็น่าจะเพียงพอ และเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำบัดในส่วนของการเตรียมเฟสของเหลวที่ใช้ในการดูดซึม (Absorbent) ดังนั้น เราควรตรวจสอบคุณสมบัติของสารอินทรีย์ระเหยที่เราต้องการที่จะบำบัดว่าเป็นชนิดใดก่อนการเลือกใช้นิคมเฟสของเหลวที่ใช้ในการดูดซึม



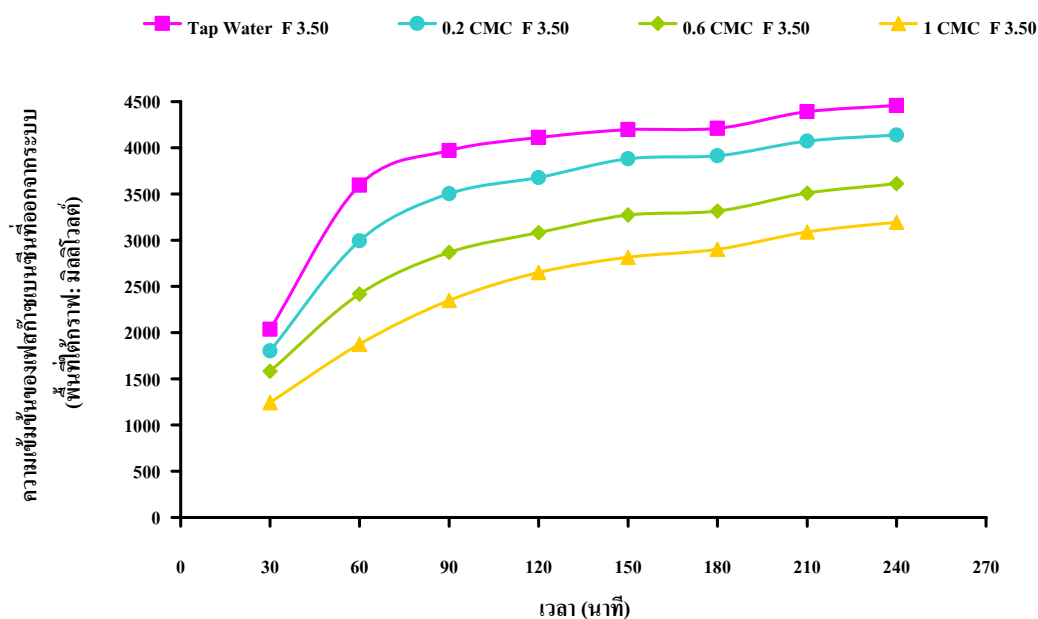
รูปที่ 4.40 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยชนิดเบนซีนที่ออกจากระบบในตัวดูดซึมที่ต่างกัน คือน้ำประปา สารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้น 0.2 CMC 0.6 CMC และ 1 CMC

จากรูปที่ 4.40 ในกรณีของเฟสก๊าซชนิดเบนซีน พบว่าที่เวลาสุดท้ายของการทดลองนี้ คือ ที่เวลา 240 นาที ความเข้มข้นของเฟสก๊าซที่ออกจากระบบแปรผันตรงกับความเข้มข้นที่เข้าระบบ (อัตราการไหลของก๊าซ) โดยจะสังเกตเห็นได้ว่าความเข้มข้นของเฟสก๊าซขาออกเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาและอัตราการไหลของก๊าซเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารอินทรีย์ระเหยที่เข้าสู่ถึงปฏิกิริยา ซึ่งส่งผลต่อค่าความแตกต่างของความเข้มข้นในระบบ (Concentration gradient) นอกจากนี้ จะพบว่าความเข้มข้นของเฟสก๊าซที่ออกจากระบบแปรผกผันกับความเข้มข้นของสารละลายสารลดแรงตึงผิวที่ใช้กล่าวคือ ที่อัตราการไหลของก๊าซเดียวกัน ที่เฟสของเหลวที่มีความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวมาก ส่งผลให้ความเข้มข้นของเฟสก๊าซออกจากระบบมีค่าน้อย ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยสมการสมดุลมวล (Mass balance equation)

$$\text{ความเข้มข้นก๊าซที่เข้าระบบ} = \text{ความเข้มข้นก๊าซที่ออกระบบ} + \text{ความเข้มข้นในของเหลว} \quad (4.23)$$

โดยเมื่อสารอินทรีย์ที่ออกจากระบบในเฟสก๊าซมีค่าน้อย เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวมากขึ้น ส่งผลให้สารอินทรีย์ระเหยสามารถละลายหรือถูกดูดซึมโดยสารละลายของสารลดแรงตึงผิวมากขึ้นนั่นเอง ดังนั้น ปรากฏการณ์ดังกล่าวจึงส่งผลทำให้ความเข้มข้นที่เหลือจึงสามารถละลายในเฟสของเหลวเป็นจำนวนมาก และทำให้เฟสก๊าซที่ออกจากระบบน้อยตามลำดับ ซึ่งเป็นการยืนยันว่าสารละลายของสารลดแรงตึงผิวสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยชนิดที่ไม่มีขั้ว (Hydrophobic VOCs) เนื่องจากคุณสมบัติทางเคมีของสารลดแรง

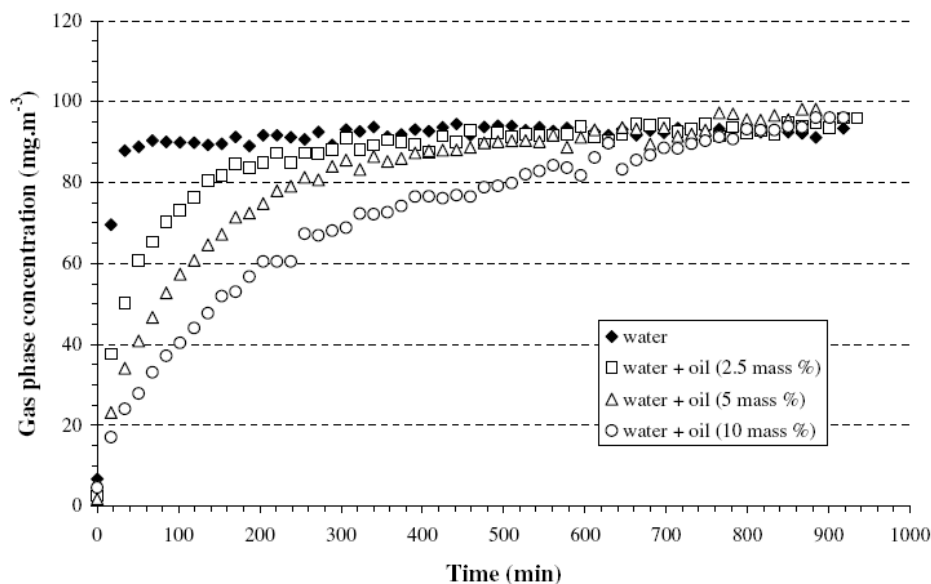
ตั้งผิวในส่วนหางที่ไม่มีขั้ว (Hydrophobic tail) ที่สามารถจับกับสาร VOCs ที่เข้าสู่ระบบได้ ดังนั้นจึงส่งผลให้ความเข้มข้นที่ออกในเฟสก๊าซน้อยลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายสารลดแรงตึงผิวมากขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาเฉพาะกรณีอัตราไหลของก๊าซสูงที่สุด (3.50 มล./วินาที) ดังแสดงในรูปที่ 4.41 ซึ่งทำให้เราสามารถอ่านค่าเวลา ณ จุดสมดุลของเฟสก๊าซ (Gas-phase equilibrium time, T_E) เกิดขึ้นในระบบการดูดซึมได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ทั้งนี้ ที่เวลาดังกล่าวความเข้มข้นของเฟสก๊าซที่ออกจากระบบ (C_g) มีค่าคงที่หรือเฟสของเหลวไม่สามารถดูดซึมก๊าซ VOCs ได้อีกต่อไป โดยค่าเวลา T_E ที่ได้นี้จะได้นำไปประยุกต์ใช้ในการคำนวณค่าความเข้มข้นในเฟสของเหลวของสารอินทรีย์ระเหยอิมัตว์หรือมีค่าสูงที่สุด ณ จุดสมดุล ($C_{L(SAT)}$) ต่อไป



รูปที่ 4.41 ความเข้มข้นของเฟสก๊าซเบนซีนที่ออกจากระบบที่อัตราการไหลของก๊าซ 3.50 มิลลิเมตรต่อวินาที ในตัวดูดซึมที่มีความเข้มข้นที่ต่างกัน คือ น้ำประปา สารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่มีความเข้มข้น 0.2 CMC และ 1 CMC 0.6 CMC

จากรูปที่ 4.41 เมื่อพิจารณาที่อัตราการไหลของก๊าซที่เข้าระบบเท่ากัน (3.50 มิลลิเมตรต่อวินาที) จะพบว่าความเข้มข้นของเฟสก๊าซที่ออกจากระบบ ความเข้มข้นของเฟสก๊าซ (เบนซีน) ที่ออกจากระบบจะแปรผกผันกับความเข้มข้นของตัวดูดซึม โดยความเข้มข้นของเฟสก๊าซที่ออกจากระบบน้อยที่สุดคือ สารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่ 1 CMC รองลงมา คือ 0.6 CMC 0.2 CMC และน้ำประปา ตามลำดับ ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ (Lalanne และคณะ, 2008) ดังแสดงในรูปที่ 4.42 ซึ่งเป็นการศึกษาผลกระทบของสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (โทลูอีน) ในตัวดูดซึมที่มีความเข้มข้นของปริมาณน้ำมัน (ในรูปอิมัลชัน) แตกต่างกันนั้น กล่าวได้ว่ามีความสอดคล้องกับที่พบในงานวิจัยนี้ โดยความเข้มข้นของเฟสก๊าซที่ออกจากระบบแปรผกผันกับความเข้มข้นของ

ตัวดูดซับที่ใช้ นอกจากนี้ ความเข้มข้นที่เพิ่มสูงขึ้นนั้นยังสามารถส่งผลต่อการเพิ่มสูงขึ้นของเวลา ณ จุดสมดุลของเฟสก๊าซ (T_E) อีกทางหนึ่งด้วย โดยความสามารถในการดูดซับสาร VOCs ที่เพิ่มสูงขึ้นนั้น เป็นผลมาจากการเพิ่มปริมาณสัดส่วนของสาร ไม่มีขั้วภายในเฟสของเหลวที่ใช้ในการดูดซับนั่นเอง



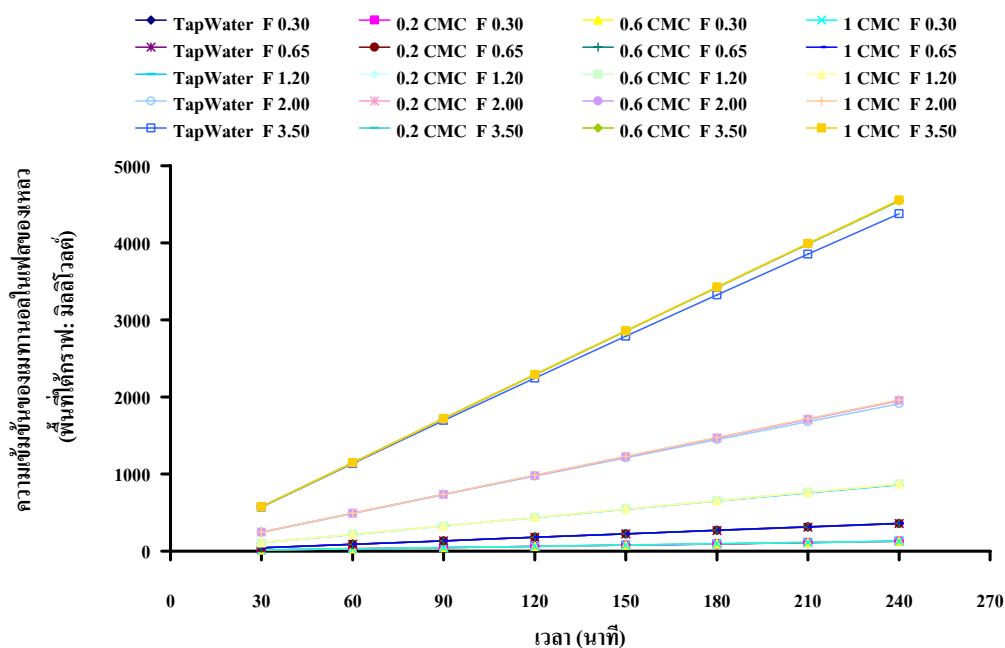
รูปที่ 4.42 ความเข้มข้นของเฟสก๊าซที่ออกจากระบบในงานวิจัยของ (Lalane และคณะ, 2008) ในการดูดซับของ VOCs ที่ความเข้มข้นของตัวดูดซับที่แตกต่างกัน

จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาทั้งหมดทั้งในแง่มุมของชนิดของสารอินทรีย์ชนิดที่ละลายน้ำแตกต่างกัน (ละลายน้ำมากและละลายน้ำน้อย) รวมทั้งชนิดของตัวดูดซับที่แตกต่างกันนั้น (น้ำประปา สารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้น 0.2 CMC 0.6 CMC และ 1 CMC) อาจนำมาสรุปลักษณะสำคัญและความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหย โดยคำนึงจากคุณสมบัติชนิดของสารอินทรีย์ชนิดที่ละลายน้ำแตกต่างกันรวมทั้งชนิดของตัวดูดซับดังที่กล่าวข้างต้นเป็นหลัก

4.4.2 ความเข้มข้นเฟสของเหลวของสารอินทรีย์ทั้งสองชนิด คือ ชนิดที่ละลายน้ำมาก (เมทานอล) และชนิดที่ละลายน้ำน้อย (เบนซีน)

รูปที่ 4.43 และ 4.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยทั้งสองชนิด คือ ชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) และชนิดที่ละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในเฟสของเหลวตามลำดับ โดยประยุกต์ใช้สารดูดซับที่แตกต่างกัน ได้แก่ น้ำประปา สารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้น 0.2 CMC 0.6 CMC และ 1 CMC ในส่วนนี้ ทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที และประยุกต์ใช้อุปกรณ์เดิมอากาศที่มีรูเดิมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่มี

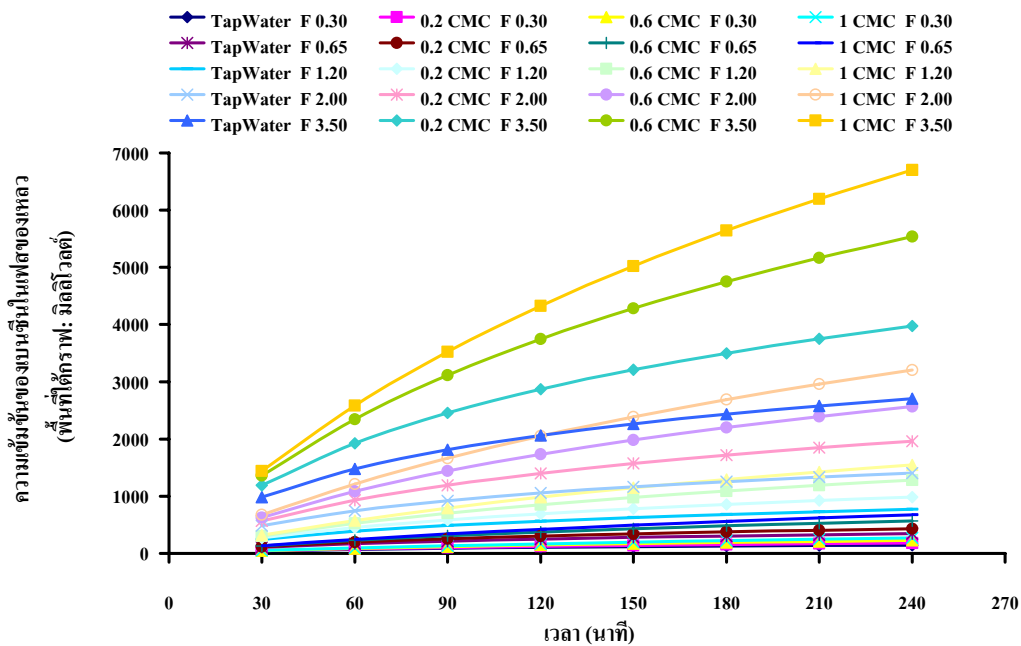
ขนาด 0.65 มิลลิเมตร (OR0.65) และทำการทดลองเป็นเวลา 240 นาที โดยวิธีการคำนวณค่า C_L นี้ อ้างอิงดังที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ผ่านมา



รูปที่ 4.43 แสดงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยชนิดเมทานอล ในตัวดูดซึมที่มีความเข้มข้นที่ต่างกัน คือ น้ำประปา สารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่มีความเข้มข้น 0.2 CMC 0.6 CMC 1 CMC

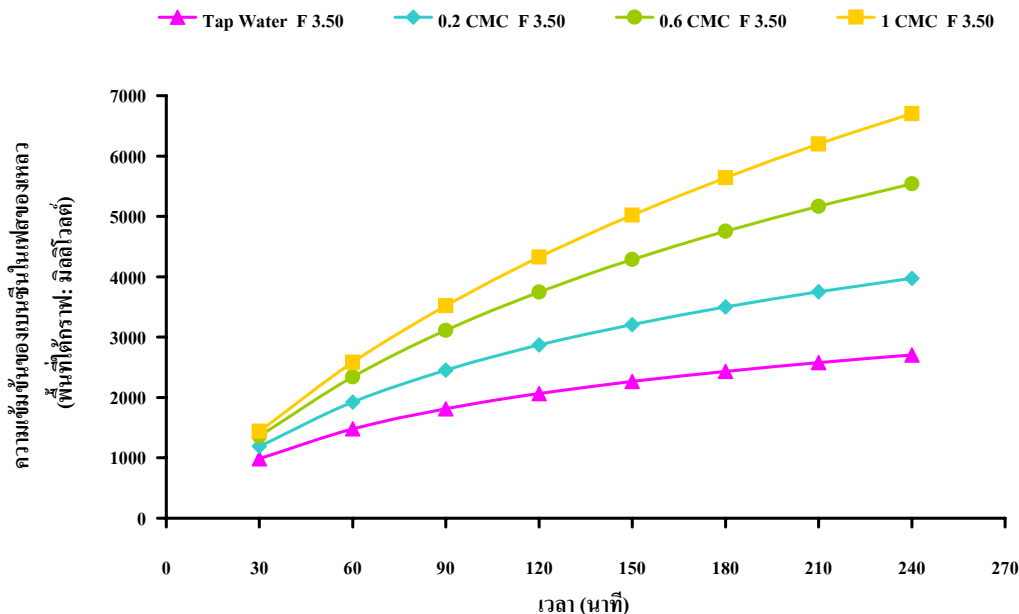
จากรูปที่ 4.43 พบว่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยชนิดเมทานอลที่ถูกดูดซึมในเฟสของเหลวที่แตกต่างกันนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะที่เป็นเส้นตรงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น จากค่าคงที่ของเฮนรี (Henry constant) ของเมทานอลที่มีค่าต่ำสุดคล้อยกับการถ่ายเทมวลสารถูกควบคุมโดยเฟสก๊าซ (Gas-phase mass transfer resistant) ปรากฏการณ์ดังกล่าวยืนยันได้โดยการที่ค่าความเข้มข้นของเฟสของเหลวที่เป็นเส้นตรงที่เวลาต่างๆ ในการทดลอง (ดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อ 4.1.2) นอกจากนี้จะพบว่าความเข้มข้นของเฟสของเหลวที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกัน โดยความเข้มข้นในเฟสของเหลวจะแบ่งออกเป็น 5 ช่วงอย่างชัดเจนตามอัตราการไหลของก๊าซ (ความเข้มข้นที่เข้าระบบ) ทั้งนี้ ที่ความเข้มข้นของตัวดูดซึมที่แตกต่างกันนั้น (น้ำประปา สารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่มีความเข้มข้น 0.2 CMC 0.6 CMC และ 1 CMC) พบว่าส่งผลกระทบต่อค่าความเข้มข้นในเฟสของเหลวที่อัตราการไหลของก๊าซเดียวกัน โดยสังเกตได้จากความเข้มข้นในเฟสของเหลวในการทดลองของสารละลายของสารลดแรงตึงผิว (0.2 CMC 0.6 CMC และ 1 CMC) จะพบว่าที่ไม่แตกต่างกันมาก คือ จนเกือบเป็นเส้นตรงเดียวกัน ในขณะที่ น้ำประปาความเข้มข้นในเฟสของเหลวจะแตกต่างเพียงเล็กน้อย โดยน่าจะมีสาเหตุมาจากการที่สารอินทรีย์ระเหย (เมทานอล) มีคุณสมบัติทางเคมีในการละลายน้ำได้สูงเป็นพื้นฐาน รวมไปถึงเป็นเฟสก๊าซที่เป็นตัวควบคุมการถ่ายเทมวลสาร ดังนั้นการถ่ายเทมวลสารจากเฟสก๊าซสู่เฟสของเหลว (ตัวดูดซึม) ในตัว

จุดซึมที่แตกต่างกัน จึงไม่เห็นความแตกต่างมากนัก ทั้งนี้ จากผลลัพธ์ดังกล่าวจะได้นำไปคำนวณค่าความชื้น (m) ที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทมวลสารโดยรวมของเฟสก๊าซ (K_{Ga}) ต่อไป



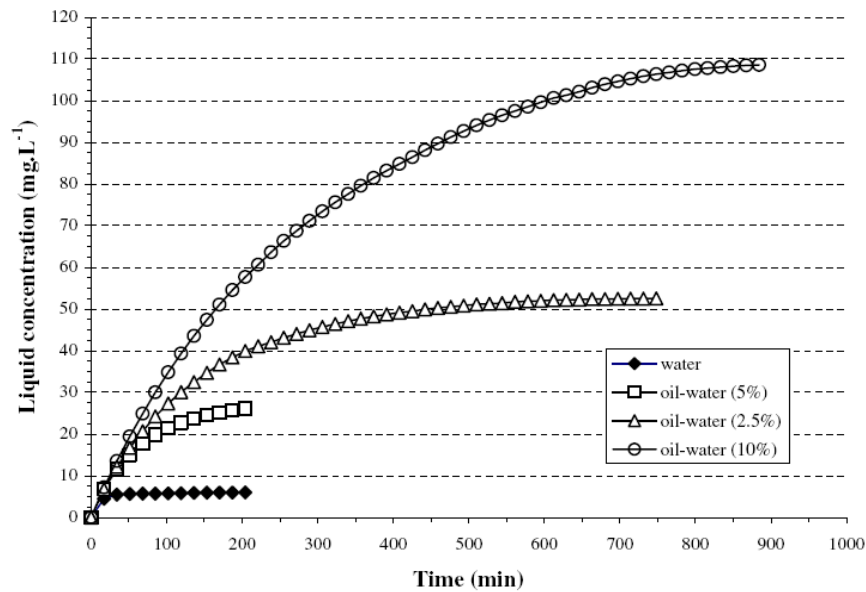
รูปที่ 4.44 แสดงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยชนิดเบนซีน ในตัวดูดซึมที่มีความเข้มข้นที่ต่างกัน คือ น้ำประปา สารละลายของสารลดแรงตึงผิวความเข้มข้น 0.2 CMC 0.6 CMC และ 1 CMC

จากรูปที่ 4.44 พบว่าความเข้มข้นของเบนซีนที่ละลายในเฟสของเหลวจะเพิ่มขึ้นในลักษณะที่เป็นเส้นโค้งแบบ Logarithmic line เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น (แตกต่างจากกราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงในกรณีของก๊าซเมทานอล) โดยกลไกที่ใช้ในการอธิบายการถ่ายเทมวลสารจากเฟสก๊าซของฟองเบนซีนไปสู่เฟสของเหลว (ตัวดูดซึม) ที่มีความเข้มข้นที่แตกต่างกันนั้น คือ ความสามารถในการถ่ายเทมวลสารแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว กล่าวคือ ตัวดูดซึมที่มีความเข้มข้นของสารละลายของสารลดแรงตึงผิวมาก จะส่งผลให้การละลายของเฟสก๊าซจากฟองเบนซีนไปสู่เฟสของเหลวได้มากขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายโดยการที่ความเข้มข้นของสารละลายของสารลดแรงตึงผิวมากขึ้นจะส่งผลให้แรงตึงผิว (surface tension) ของเฟสก๊าซและของเหลวลดลง รวมไปถึงเพิ่มสัดส่วนที่ไม่มีขั้ว (Hydrophobic part) ภายในสารดูดซึม ทำให้การถ่ายเทมวลสารจากเฟสก๊าซไปสู่เฟสของเหลวได้ง่ายและมากขึ้น และส่งผลต่อความเข้มข้นของเบนซีนในเฟสของเหลว (C_L) ในกรณีที่มีสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.45 เมื่อพิจารณาที่อัตราการไหลของก๊าซ (ภาวะบรรทุกเข้าระบบ) ที่สูงที่สุดที่ 3.50 มล./วินาที



รูปที่ 4.45 แสดงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยชนิดเมทานอล ที่อัตราการไหลของก๊าซ 3.50 มล./วินาที ในตัวดูดซึมที่มีความเข้มข้นที่ต่างกัน คือ น้ำประปา สารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้น 0.2 CMC 0.6 CMC และ 1 CMC

จากรูปที่ 4.45 เมื่อพิจารณาที่อัตราการไหลของก๊าซที่เข้าระบบเท่ากัน (3.50 มิลลิตรต่อวินาที) จะพบว่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในเฟสของเหลว (ตัวดูดซึม) จะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในตัวดูดซึม โดยความเข้มข้นของเฟสของเหลวมากที่สุด คือ ตัวดูดซึมที่มีความเข้มข้นของสารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้น 1 CMC รองลงมา คือ 0.6 CMC 0.2 CMC และ น้ำประปา ตามลำดับ ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Lalanne และคณะ (2008) ดังแสดงในรูปที่ 4.46 ซึ่งเป็นการศึกษาผลกระทบของสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (โทลูอีน) ในตัวดูดซึมที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน พบว่ามีความสอดคล้องกับที่พบในงานวิจัยนี้ โดยความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อยในเฟสของเหลวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารไม่มีขั้วภายในเฟสของเหลวที่ใช้ในการดูดซึมมีค่ามากขึ้น กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของสัดส่วนอิมัลชันน้ำมันและสารลดแรงตึงผิวในกรณีงานวิจัยของ Lalanne และคณะ (2008) และงานวิจัยนี้ ตามลำดับ



รูปที่ 4.46 แสดงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อยในเฟสของเหลว ที่มีตัวดูดซับที่แตกต่างกัน งานวิจัยของ (Lalane และคณะ, 2008)

ทั้งนี้ จากความสัมพันธ์ของความสามารถในการละลายในตัวทำละลาย พบว่าที่อุณหภูมิ (Temperature) และความดัน (Pressure) เดียวกันนั้น ตัวดูดซับที่มีองค์ประกอบต่างชนิดกันจะมีความสามารถในการละลายสูงสุดในตัวดูดซับ (C_{SAT}) ได้แตกต่างกัน โดยเมื่อพิจารณาค่าความเข้มข้นในเฟสก๊าซที่ขนาดรูเดิมอากาศแบบเชิงรูเดียว OR0.65 ที่อัตราการไหลของก๊าซ 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที จากรูปที่ 4.45 พบว่าความเข้มข้นของเฟสก๊าซที่ออกจากระบบของสารอินทรีย์ระเหย (เบนซีน) จะสัมพันธ์กับเวลาที่อิ่มตัวของเฟสก๊าซ (T_{SAT}) และเป็นค่าที่ความเข้มข้นในเฟสของเหลวของสารอินทรีย์ระเหยอิ่มตัวหรือมีค่าสูงที่สุด ณ จุดสมดุล ($C_{L(SAT)}$) ด้วยเช่นกัน (เนื่องจากเป็นค่าที่ความเข้มข้นของเฟสก๊าซที่ออกจากระบบมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นที่เข้าจากระบบ) โดยการถ่ายเทมวลสารของเฟสของเหลวในแต่ละเฟสมีขีดความสามารถในการดูดซับหรือความสามารถในการดูดซับในการละลายได้ไม่เท่ากัน กล่าวคือ ในแต่ละเฟสของเหลวนั้นจะสามารถดูดซับสาร VOCs ได้มากน้อยเพียงไรนั้น ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมีเป็นหลัก โดยที่เมื่อความเข้มข้นของสารละลายของสารลดแรงตึงผิวมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่าแรงตึงผิวของฟิล์มก๊าซ – ของเหลวลดลง รวมไปถึงการเพิ่มส่วนที่ไม่มีขี้ในเฟสของเหลว (ดังที่กล่าวถึงข้างต้นนั้น) จึงทำให้สารอินทรีย์ระเหยสามารถละลายเข้าสู่เฟสของเหลวได้มากขึ้น

ทั้งนี้ จากการประยุกต์ใช้สมการเพื่อทำนายความเข้มข้นของเฟสก๊าซที่เวลาต่างๆ ($C_G = f(t)$) ดังที่กล่าวถึงข้างต้นในสมการที่ (4.4) โดยเมื่อทราบค่าความเข้มข้นของเฟสก๊าซที่เข้าระบบ (C_{Gin}) ที่อัตราไหลของก๊าซ (Q_G) ใดๆ และเวลาที่อิ่มตัวของเฟสก๊าซ (T_{SAT}) ที่ได้จากการทดลองที่อัตราการไหลที่สูงขึ้นและรูเดิมอากาศที่เล็กลงกับสารดูดซับแต่ละชนิด จากนั้นเราสามารถประยุกต์ใช้สมการที่ (4.11) ในการคำนวณค่าความเข้มข้น VOCs ที่ละลายในเฟสของเหลวที่มีค่าสูงที่สุด ณ จุดสมดุล

($C_{L(SAT)}$) ที่สอดคล้องกับ 4 ชนิดของเฟสของเหลวที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้ในกรณีของเฟสของเหลวต่างๆ เช่น น้ำประปา และสารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้น 0.2 CMC 0.6 CMC และ 1 CMC สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.8 ทั้งนี้ ค่า $C_{L(SAT)}$ ที่ได้จะได้อีกประยุกต์ใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของเฟสของเหลวโดยรวม (K_{La}) โดยจะได้กล่าวถึงในส่วนต่อไป

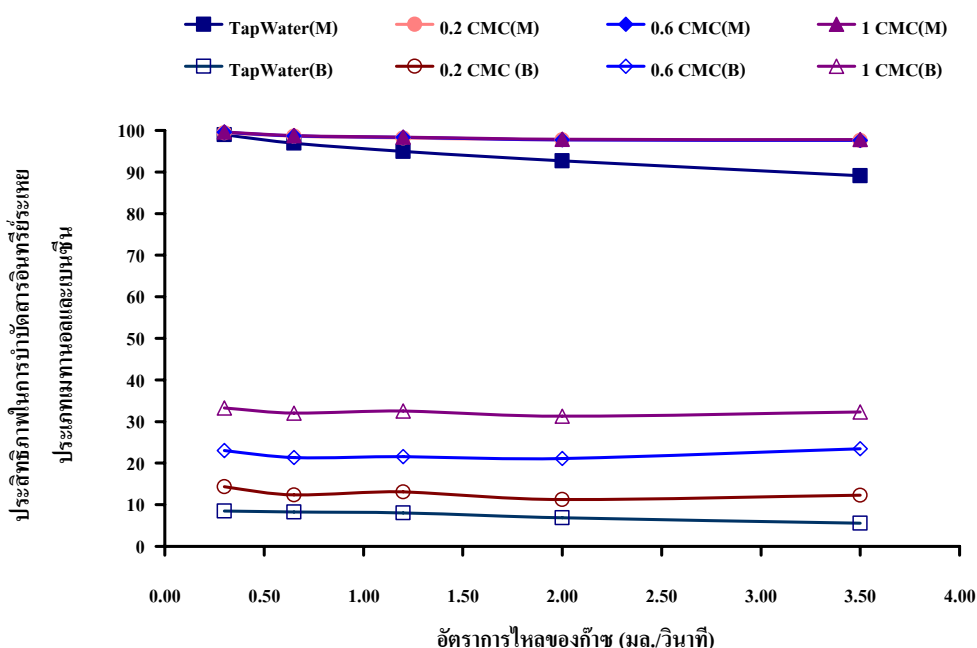
ตารางที่ 4.8 เวลาที่อิ่มตัวและค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหย (เบนซีน) ที่อิ่มตัวในเฟสของเหลวที่อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 3.50 มิลลิเมตรต่อวินาที

ขนาดของรูเติมอากาศ (Rigid orifice)	ชนิดและความเข้มข้นของตัวดูดซึมในเฟสของเหลว	ความเข้มข้นของเบนซีนที่อิ่มตัวในเฟสของเหลว ($C_{L(sat)}$)	เวลาที่เบนซีนอิ่มตัวในเฟสของเหลว (T_{sat})
OR 0.65	Tap water	2500	240
	Anionic surfactant 0.2 CMC	3974	320
	Anionic surfactant 0.6 CMC	7050	684
	Anionic surfactant 1 CMC	12007	808

นอกจากนี้ จากที่ได้อธิบายในส่วนก่อนหน้าเกี่ยวกับขั้นตอนการถ่ายเทมวลสารจากทฤษฎีสองความต้านทาน (Two-film theory) ของ Whitman (1962) ซึ่งนำมาใช้อธิบายกลไกการถ่ายเทมวลสารระหว่างเฟส โดยสารอินทรีย์ระเหยประเภทชนิดที่ละลายน้ำได้มาก (เมทานอล) พบว่าการถ่ายเทมวลสารถูกควบคุมโดยเฟสก๊าซ (Gas phase resistant control) ในขณะที่ สารอินทรีย์ระเหยประเภทชนิดที่ละลายน้ำได้น้อย (เบนซีน) พบว่าการถ่ายเทมวลสารถูกควบคุมโดยเฟสของเหลว (Liquid phase resistant control) ดังนั้น เมื่อเปรียบเทียบการถ่ายเทมวลสารที่ถูกควบคุมโดยแต่ละเฟสนั้น จะพบว่าในกรณีที่เฟสของเหลวเป็นสารละลายของสารลดแรงตึงผิวจะส่งผลต่อการเพิ่มสูงขึ้นของค่า $C_{L(SAT)}$ ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่าความดันย่อยของเฟสก๊าซ (P_{AG}) นั้นเอง จึงส่งผลต่อค่าความแตกต่างของความเข้มข้น (Concentration gradient) หรือความชันที่เพิ่มขึ้น ทำให้ช่วยเพิ่มพลังหรืออัตราเร็วในการถ่ายเทมวลสาร ($dC_A/dt = N_A \cdot \Delta C_A \cdot A/V$) โดยเฉพาะกรณีของเบนซีนที่เกิดขึ้น ในขณะที่ส่งผลกระทบต่อในกรณีของเมทานอลนั้น เนื่องจากคุณสมบัติที่สามารถละลายในเฟสของเหลวได้มาก ดังนั้นค่า $C_{L(SAT)}$ ที่ได้นั้นจึงมีค่าสูงและไม่แตกต่างกันมากนักสำหรับแต่ละชนิดของสารดูดซึมที่ใช้ในงานวิจัยนี้

4.4.3 ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ทั้งสองชนิด คือ ชนิดที่ละลายน้ำมาก (เมทานอล) และชนิดที่ละลายน้ำน้อย (เบนซีน)

รูปที่ 4.47 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยทั้ง 2 ชนิด คือ ชนิดที่สามารถละลายน้ำได้มาก (เมทานอล) และชนิดที่ละลายน้ำได้น้อย (เบนซีน) ซึ่งทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที โดยประยุกต์ใช้อุปกรณ์เดิมอากาศที่มีรูเดิมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่มีขนาด 0.65 มิลลิเมตร (OR0.65) และชนิดของตัวดูดซึมที่แตกต่างกัน ได้แก่ น้ำประปา (Tap water) และสารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้น 0.2 CMC 0.6 CMC และ 1 CMC ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพในการบำบัดในรูปที่ 4.47 คัดที่เวลาสุดท้ายของการทดลอง คือ ที่เวลา 240 นาที



รูปที่ 4.47 ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) และชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ที่อัตราการไหลของก๊าซและสารดูดซึมที่แตกต่างกัน

จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.47 พบว่าที่เวลา 240 นาที ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยทั้งสอง คือ ชนิดที่ละลายน้ำมาก (เมทานอล) และชนิดที่ละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในตัวดูดซึมที่แตกต่างกันนั้น พบว่ามีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดแตกต่างกันอย่างชัดเจน กล่าวคือ

- สารอินทรีย์ชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ประสิทธิภาพในการบำบัด อยู่ในช่วงร้อยละ 89.08 – 99.43 จากผลการทดลองดังกล่าวจะพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ชนิดละลายน้ำมากในตัวดูดซึมที่แตกต่างกันมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากคุณสมบัติในการละลายของเมทานอล ดังนั้นเมื่อใส่สารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้นที่แตกต่างกันจึงไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการ

บำบัดในกรณีของเฟสของเหลวปนเปื้อนด้วยสารลดแรงตึงผิวมีแนวโน้มที่สูงกว่าที่ได้จากน้ำประปานั้น อาจกล่าวได้ว่าน่าจะมาจากการลดลงของแรงตึงผิวที่เกิดขึ้นระหว่างเฟสก๊าซภายในฟองอากาศและเฟสน้ำของสารดูดซึม รวมไปถึงปริมาณโฟม (Foam) ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของถังปฏิบัติการแบบฟองอากาศจากการประยุกต์ใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบในงานวิจัยนี้ ซึ่งสามารถส่งผลกระทบต่อลักษณะความปั่นป่วน (Turbulent condition) และการหลุดออก (Desorption) ของก๊าซเมทานอลจากเฟสของเหลว โดยที่โฟมที่เกิดขึ้นนี้จะสามารถกักเก็บหรือดูดซับสารอินทรีย์ระเหยที่จะหลุดออกจากระบบจากความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นเมื่อประยุกต์ใช้อัตราการไหลของก๊าซ (Q_g) ที่สูงเกินไป และจึงส่งผลให้ความเข้มข้นของเฟสก๊าซขาออกลดน้อยลง ดังนั้น ในกรณีของเมทานอลที่อัตราการไหลของก๊าซสูง (Q_g) ค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยในสารละลายของสารลดแรงตึงผิวจึงมีค่าสูง และไม่แตกต่างจากที่อัตราการไหลของก๊าซต่ำๆ มากนัก

- สารอินทรีย์ชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ประสิทธิภาพในการบำบัด อยู่ในช่วงร้อยละ 7.53 – 35.82 ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าว พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดอยู่ในช่วงที่กว้างโดยแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารละลายของสารลดแรงตึงผิว โดยเมื่อความเข้มข้นของสารละลายของสารลดแรงตึงผิวมากขึ้น ทำให้ค่าความเข้มข้นของเบนซีนที่ละลายในเฟสของเหลว ณ จุดสมดุล ($C_{L(SAT)}$) มีค่าสูงขึ้น และส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดมากขึ้นตามลำดับ

จากผลการทดลองดังกล่าว จะพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยเป็นคุณสมบัติที่สำคัญ ซึ่งใช้ในการกำหนดขีดความสามารถของการกำจัดสารอินทรีย์ระเหย ดังนั้น ปัจจัยที่ควรพิจารณาในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมีของตัวที่ถูกดูดซึม (สารอินทรีย์ระเหยทั้งชนิดละลายน้ำได้มาก (เมทานอล) และละลายน้ำได้น้อย (เบนซีน) ดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 คุณสมบัติของตัวดูดซึมที่ใช้ในการทดลองนี้

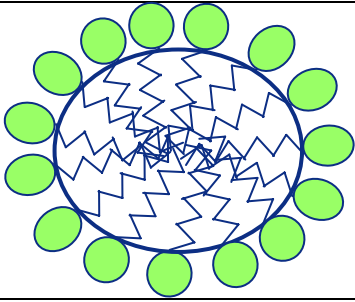
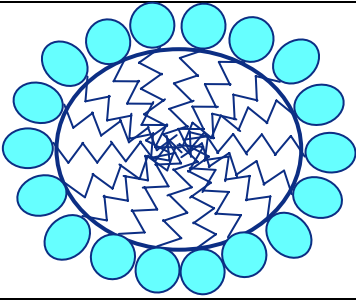
ชนิดของสารละลาย	ชื่อสารเคมี	ความเข้มข้นที่ใช้ในการทดลอง (มล./ล.)	น้ำหนักโมเลกุล (กก./โมล)	แรงตึงผิว (surface tension) (mN/m)
น้ำประปา	--	--	18×10^{-3}	72.00
สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ	Sodium laurylsulfate (SDS)	1900	$\cong 382 \times 10^{-3}$	39.70
		(1 CMC)		
		1140		42.69
		(0.6 CMC)		
		380		54.28
		(0.2 CMC)		

จากผลการทดลองดังกล่าวถึงข้างต้น สารลดแรงตึงผิวมีคุณสมบัติในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหย โดยความสามารถในการบำบัดจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว นอกจากนี้ จะพบว่ารูปแบบการเรียงตัวของสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) จะขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลายของสารลดแรงตึงผิว เนื่องจากความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มมากขึ้น การจัดเรียงตัวของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวได้เปลี่ยนไป (Formation of surfactant molecules) โดยมีลักษณะของ Admicelle และ Micelle ได้มากขึ้น ซึ่งส่งผลให้สามารถดูดซับสารอินทรีย์ระเหยได้มากขึ้นด้วย ซึ่งในส่วนนี้ จะอธิบายกลไกในการดูดซับของสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) เป็นหลัก เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่แตกต่างกันนั้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดแตกต่างกันอย่างชัดเจนกว่าในกรณีของเฟสก๊าซเมทานอล

โดยทั่วไป สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) เป็นสารที่เมื่อละลายน้ำแล้วจะช่วยลดแรงตึงผิวของน้ำ โดยมีคุณลักษณะที่สำคัญ คือ โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะถูกเรียกว่าเป็น Amphiphilic molecules เนื่องจากในหนึ่งโมเลกุลจะประกอบด้วยทั้งส่วนที่มีขั้วและชอบน้ำ (Polar: Hydrophilic portion) โดยส่วนนี้จะอยู่ที่ส่วนหัว และส่วนที่ไม่มีขั้วและไม่ชอบน้ำ (Non polar: Lipophilic) ในส่วนนี้จะอยู่ที่ส่วนหาง ดังนั้น เมื่อฟองของสารอินทรีย์ระเหยชนิดเบนซีน (Hydrophobic VOCs) ซึ่งไม่ชอบน้ำ แขนงลอยอยู่ในระบบบำบัด จะส่งผลให้โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) และฟองเบนซีนทำปฏิกิริยาซึ่งกัน โดยส่วนหางของสารลดแรงตึงผิว (Tail of surfactant) จะเข้ามาล้อมรอบฟองเบนซีน เนื่องจากเป็นส่วนที่ไม่มีขั้วดึงดูดส่วนไม่มีขั้วด้วยตัวเอง (Non polar; hydrophobic interaction with hydrophobic) (Vane และ Giroux, 2000) โดยปัจจัยหลักที่ทำให้การบำบัดสารอินทรีย์ระเหยประเภทที่ละลายน้ำน้อยมีประสิทธิภาพแตกต่างกัน คือ ชนิดของตัวดูดซึม

และความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว ซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า $C_{L(SAT)}$ และค่าความแตกต่างของความเข้มข้น (ΔC) ซึ่งเป็นแรงขับเคลื่อน (Driving force) ในการถ่ายเทมวลสารนั่นเอง โดยผลกระทบของความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิวสามารถสรุปได้ ดังนี้

- น้ำประปา ประสิทธิภาพในการบำบัด อยู่ในช่วงร้อยละ 4.37 - 8.82 เนื่องจากสารอินทรีย์ระเหยชนิดเบนซีนมีความสามารถในการละลายน้ำน้อย จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้อย ดังได้กล่าวไว้ในส่วนที่ผ่านมา
- สารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้น 0.2 CMC ประสิทธิภาพในการบำบัด อยู่ในช่วงร้อยละ 11.27 - 14.33 ในช่วงของความเข้มข้นนี้การรวมตัวของสารลดแรงตึงผิวอยู่ในช่วงที่ 1 คือ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวมีความเข้มข้นต่ำ ไม่มีการรวมตัวกันของโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว ในช่วงนี้สารลดแรงตึงผิวจะอยู่อย่างอิสระเรียกว่า Monomers ทำให้การดูดซับสารละลายของสารอินทรีย์ระเหยง่ายประเภทเบนซีนของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวเกิดขึ้นน้อย แต่มากกว่าน้ำประปา
- สารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้น 0.6 CMC ประสิทธิภาพในการบำบัดอยู่ในช่วงร้อยละ 21.10 - 23.47 ในช่วงของความเข้มข้นนี้การรวมตัวของสารลดแรงตึงผิวอยู่ในช่วงที่ 3 คือ สารลดแรงตึงผิวที่เป็น โมเลกุลเดี่ยว (monomer) มีการรวมตัวอย่างหนาแน่นมากยิ่งขึ้นรอบๆ ฟองก๊าซที่แขวนลอยภายในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ รวมถึงอาจเกิดเป็น Admicelle ภายในเฟสของเหลว จึงทำสารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้นนี้สามารถดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้มากยิ่งขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.48
- สารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้น 1 CMC ประสิทธิภาพในการบำบัดอยู่ในช่วงร้อยละ 31.28 - 33.26 โดยในช่วงของความเข้มข้นนี้การรวมตัวของสารลดแรงตึงผิวอยู่ในช่วงที่ 4 คือ ที่ความเข้มข้นนี้การรวมตัวของสารละลายของสารลดแรงตึงผิวจะปรากฏเป็น Micelle เรียกว่าจุด CMC (Critical micelle concentration) จึงทำให้สารละลายของสารอินทรีย์ระเหยชนิดเบนซีน (ไม่ชอบน้ำ) ถูกดูดซับโดยส่วนหาง (Tail) ของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวที่เกาะติดอยู่รอบๆ ฟองก๊าซได้ในปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ ที่ความเข้มข้น CMC ยังอาจมี Micelle ของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิว (ที่เกาะตัวกันเอง) ภายในเฟสของเหลว จึงส่งผลให้สามารถดูดซับสารอินทรีย์ระเหย (เบนซีน) ที่ละลายสู่เฟสน้ำได้มากขึ้นอีกทางหนึ่งด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.49

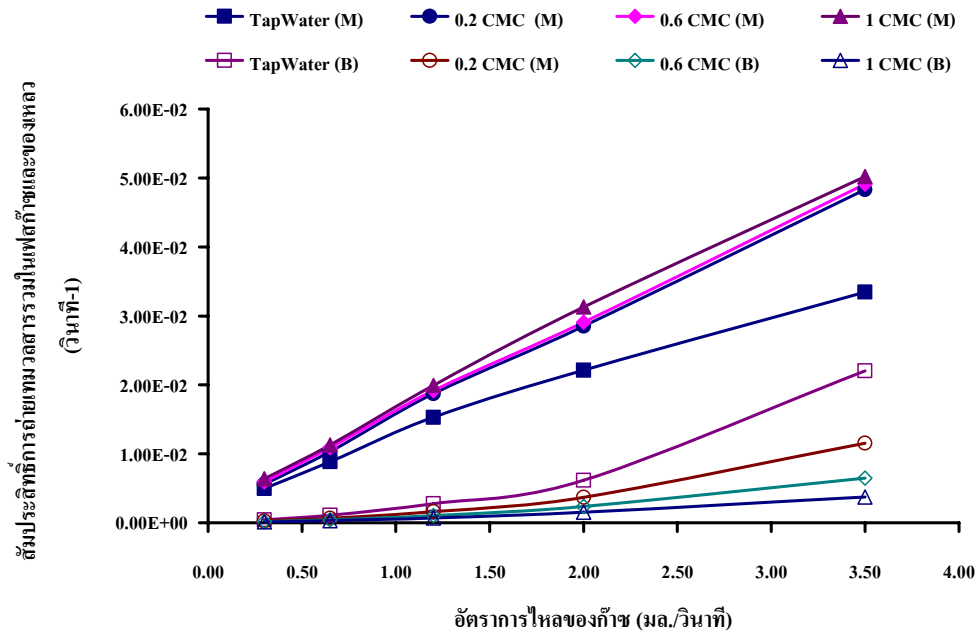
	
<p>รูปที่ 4.48 การดูดซึมสารอินทรีย์ระเหยที่ความเข้มข้น 0.6 CMC</p>	<p>รูปที่ 4.49 การดูดซึมสารอินทรีย์ระเหยที่ความเข้มข้น 1 CMC</p>

โดยสรุป สารดูดซึมที่แตกต่างกัน ซึ่งได้แก่ น้ำประปา และสารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้นต่างๆ (0.2 CMC 0.6 CMC และ 1 CMC) เมื่อนำมาบำบัดสารอินทรีย์ชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) สามารถให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงแต่ไม่แตกต่างกันมากนัก ในทางตรงข้าม เมื่อนำมาบำบัดสารอินทรีย์ชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดแปรผันตรงกับ ความเข้มข้นของสารละลายของสารลดแรงตึงผิว ดังนั้น ในการนำมาประยุกต์ใช้กับการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย (VOCs) ในระบบอุตสาหกรรม เราควรพิจารณาคุณสมบัติของสาร VOCs ที่ต้องการบำบัดเป็นปัจจัยหลักเพื่อจะได้ลดต้นทุนในการบำบัดในส่วนของสารดูดซึม (Absorbent) ที่ใช้ รวมไปถึงเวลาดักหรือบำบัดของระบบ (Operation time) ซึ่งส่งผลต่อขนาดถึงปฏิบัติการและค่าก่อสร้างในที่สุด

ในส่วนต่อไป จะกล่าวถึงผลกระทบของสารลดแรงตึงผิวต่อตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ และด้านการถ่ายเทมวลสารที่เกิดขึ้น ซึ่งจะทำให้เราเข้าใจถึงกลไกการดูดซึมภายในถึงปฏิบัติการแบบฟองอากาศในกรณีที่มีการปนเปื้อนสารลดแรงตึงผิวอย่างชัดเจนยิ่งขึ้น รวมไปถึงผลดีและผลเสียที่อาจเกิดขึ้นในการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำได้น้อย ด้วยการเติมสารลดแรงตึงผิวในเฟสของเหลวที่ประยุกต์ใช้เป็นสารดูดซึมในระบบ

4.4.4 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสก๊าซและเฟสของเหลว (Overall mass transfer coefficient in gas – liquid phase; $K_{G,a}$, $K_{L,a}$)

รูปที่ 4.50 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมของสารอินทรีย์ระเหยทั้ง 2 ชนิด คือ ชนิดที่สามารถละลายน้ำได้มาก (เมทานอล) และชนิดที่ละลายน้ำได้น้อย (เบนซีน) ที่อัตราการไหลของก๊าซต่างๆ (0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที) โดยประยุกต์ใช้อุปกรณ์เดิมอากาศที่มีรูเดิมอากาศแบบเชิงรูปเคียวที่มีขนาด 0.65 มิลลิเมตร (OR0.65) และทำการทดลองในตัวดูดซึมที่แตกต่างกัน ได้แก่ น้ำประปา (Tap water) และสารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้น 0.2 0.6 และ 1 CMC ตามลำดับ



รูปที่ 4.50 แสดงสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทมวลสารรวมที่เฟสก๊าซ (K_{Ga}) และเฟสของเหลว (K_{La}) ที่อัตราการไหลของก๊าซและชนิดของสารดูดซับที่แตกต่างกัน

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.50 ในกรณีสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสของก๊าซ (K_{Ga}) ของสารอินทรีย์ชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) มีค่าอยู่ระหว่าง $0.005 - 0.05$ วินาที⁻¹ ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซระหว่าง $0.30 - 3.50$ มิลลิลิตรต่อวินาที นอกจากนี้ จะพบว่าเมื่อพิจารณาเมื่อประยุกต์ใช้สารดูดซับชนิดเดียวกันนั้น ค่าสัมประสิทธิ์ K_{Ga} มีค่าเพิ่มขึ้นที่อัตราการไหลของก๊าซเพิ่มขึ้น โดยมีค่ามากที่สุดที่อัตราการไหลของก๊าซ 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที และมีค่าน้อยสุดที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 มิลลิลิตรต่อวินาที โดยผลลัพธ์ดังกล่าวขึ้นอยู่กับค่าความแตกต่างของความเข้มข้นของเมทานอล (Concentration gradient) ที่เข้าระบบซึ่งสัมพันธ์กับอัตราการไหลของก๊าซ (ดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อ 4.1 และตารางที่ 4.1) ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ K_{Ga} ในกรณีที่ใช้สารดูดซับแตกต่างกัน 4 ชนิด จะพบว่าที่อัตราการไหลของก๊าซเท่ากัน ความเข้มข้นของสารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้นสูง (1 CMC) จะมีค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสของก๊าซ (K_{Ga}) สูงที่สุด โดยเรียงตามลำดับการถ่ายเทมวลสาร (K_{Ga}) จากน้อยไปมาก คือ น้ำประปา ความเข้มข้นสารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้น 0.2 CMC 0.6 CMC และ 1 CMC ตามลำดับ นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่า (K_{Ga}) จะพบว่าในกรณีของสารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้นต่างๆ (0.2 CMC 0.6 CMC และ 1 CMC) ค่าที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนักเนื่องจากการคำนวณค่า (K_{Ga}) ดังกล่าวข้างต้น ตัวแปรหลักที่ทำให้ค่าดังกล่าวแตกต่างกันคือ ค่า m (ความชันในเฟสของเหลว) จากที่ได้กล่าวในส่วนก่อนนี้ ซึ่งพบว่าความเข้มข้นของเมทานอลในเฟสของเหลวในกรณีของสารละลายของ

สารลดแรงตึงผิวมีค่าไม่แตกต่างกันมากนักจนเกือบจะเป็นเส้นเดียวกัน (เนื่องจากความสามารถในการละลายน้ำได้สูงของเมทานอลอีกทั้งสารละลายของสารลดแรงตึงผิวทำให้เมทานอลละลายได้เพิ่มอีกมาก) ในขณะที่ในกรณีน้ำประปาพบว่ามีความชัน (m) ที่ได้แตกต่างจากข้างต้น จึงส่งผลให้กรณีของค่า(K_{Ga}) ของน้ำประปาแตกต่างจากค่า(K_{Ca}) ในกรณีสารละลายของสารลดแรงตึงผิว

โดยกลไกที่ได้อธิบายความสัมพันธ์ดังกล่าว คือ การถ่ายเทมวลสารของสารอินทรีย์ระเหยชนิดเมทานอลนั้นถูกควบคุมการถ่ายเทมวลสาร โดยเฟสก๊าซ (Gas phase resistant control) เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายของสารลดแรงตึงผิวมากขึ้น ส่งผลให้แรงตึงผิวระหว่างเฟสก๊าซในฟองและเฟสของเหลวมีค่าลดน้อยลง จึงอาจส่งผลให้การถ่ายเทมวลสารจากฟองก๊าซของเมทานอลไปสู่เฟสของเหลวได้มากขึ้น และทำให้ค่า K_{Ga} มีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้ เพื่อยืนยันแนวความคิดดังกล่าว การวิเคราะห์ลักษณะทางอุทกพลศาสตร์ของฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง โดยจะได้กล่าวถึงในส่วนของผลการทดลองต่อไป

กรณีสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ดังแสดงในรูปที่ 4.50 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสของเหลว (K_{La}) ของสารอินทรีย์ชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.0001 - 0.022 วินาที⁻¹ ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซระหว่าง 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที โดยค่าสัมประสิทธิ์ K_{La} มีค่าเพิ่มขึ้นที่อัตราการไหลของก๊าซเพิ่มขึ้น และมีค่าสูงและต่ำสุดที่อัตราการไหลของก๊าซ 3.50 และ 0.30 มิลลิลิตรต่อวินาที ตามลำดับ นอกจากนี้ ค่าสัมประสิทธิ์ K_{La} จะมีค่าเรียงตามลำดับจากน้อยไปมากกล่าวคือ สารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้น 1 CMC 0.6 CMC 0.2 CMC และ น้ำประปา ตามลำดับ โดยสาเหตุที่ค่าสัมประสิทธิ์ K_{La} มีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้นนั้น สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของจำนวนโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่ห่อหุ้มอยู่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างฟองก๊าซและสารดูดซับซึ่งขัดขวางการถ่ายเทมวลสารจากภายในฟองก๊าซเบนซีน ไปสู่เฟสของเหลว ดังที่ได้กล่าวถึงข้างต้น (รูปที่ 4.48 และ 4.49)

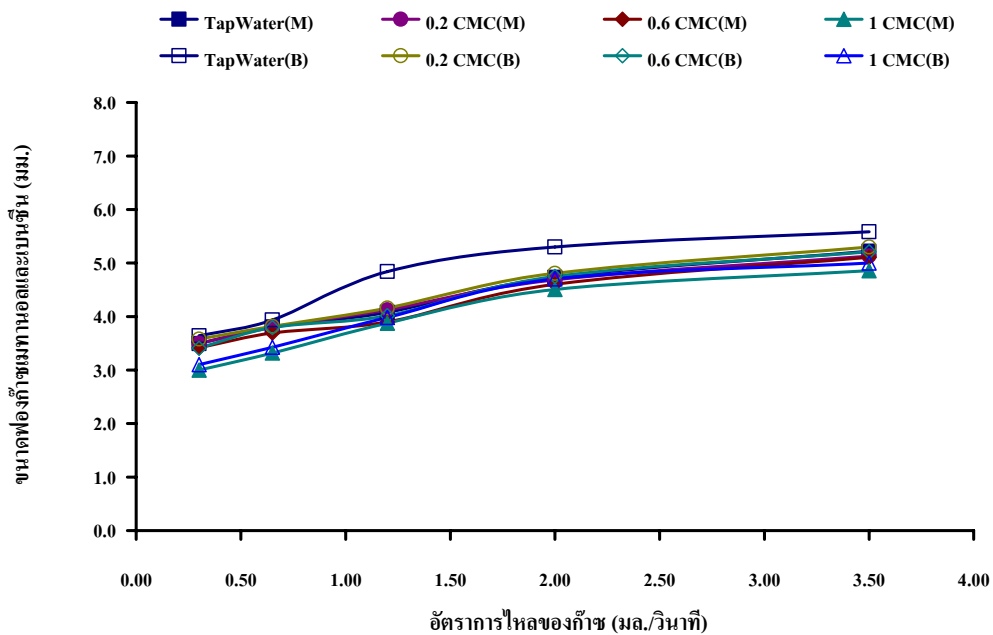
ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารโดยรวมของเฟสก๊าซและเฟสของเหลว (K_{Ca} และ K_{La}) จะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ K_{Ca} มีค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์ K_{La} ประมาณ 10 - 50 เท่า ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นผลมาจากชนิดของเฟสที่ควบคุมการถ่ายเทมวลสาร (เฟสก๊าซและเฟสของเหลวสำหรับฟองก๊าซเมทานอลและฟองก๊าซเบนซีน ตามลำดับ) โดยในกรณีที่ความหนาของฟิล์มดังกล่าวมีค่าเท่ากันนั้น ความต้านทานในการไหลผ่านฟิล์มก๊าซและของเหลวย่อมมีค่าไม่เท่ากัน โดยที่เฟสก๊าซ (มีความหนาแน่นต่ำกว่าเฟสของเหลว) จะมีค่าต่ำกว่าเสมอ ดังนั้น จึงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ K_{Ca} ที่ได้มีค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์ K_{La} รวมไปถึงยังส่งผลต่อ ประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารและการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยโดยรวมอีกด้วย

อย่างไรก็ตาม เพื่อเข้าใจถึงผลกระทบของการปนเปื้อนสารลดแรงตึงผิวอย่างชัดเจน การแยกวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารโดยรวมออกเป็นค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (a) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยของทั้งสองเฟสควบคู่กัน (K_G และ K_L) จะเป็นประเด็นที่จะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

4.4.5 ตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ (Bubble hydrodynamic parameters)

ขนาดของฟองอากาศ (Bubble diameter: D_b)

รูปที่ 4.51 แสดงขนาดของฟองอากาศของสารอินทรีย์ระเหยทั้งสองชนิด คือ ชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) และชนิดที่ละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ที่อัตราการไหลของก๊าซระหว่าง 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที โดยประยุกต์ใช้อุปกรณ์เติมอากาศที่มีรูเติมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่มีขนาด 0.65 มิลลิเมตร (OR0.65) และสารดูดซึมชนิดต่างๆ ได้แก่ น้ำประปา สารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้น 0.2 0.6 และ 1 CMC ตามลำดับ



รูปที่ 4.51 ขนาดของฟองอากาศของสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) และชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ที่อัตราการไหลของก๊าซและสารดูดซึมที่แตกต่างกัน

จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.51 พบว่าขนาดของฟองอากาศมีค่าระหว่าง 3.11 - 5.38 มิลลิเมตร ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซระหว่าง 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที โดยที่ขนาดของฟองอากาศ (D_b) ที่ได้จากการทดลองจะแปรผันตรงกับอัตราการไหลของอากาศ (Q_G) กล่าวคือเมื่ออัตราการไหลของก๊าซเพิ่มขึ้นขนาดของฟองอากาศมีขนาดใหญ่มากขึ้น และมีแนวโน้มที่จะคงที่เมื่อ

อัตราการไหลเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับที่ได้กล่าวถึงในส่วนที่ผ่านมา นอกจากนี้ ยังพบว่าขนาดของฟองอากาศจะแปรผันตรงกับค่าแรงตึงผิว (หรือแปรผกผันกับความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว) โดยขนาดของฟองอากาศที่เล็กสุดได้จากสารลดแรงตึงผิวชนิดสารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้น 1 CMC และขนาดของฟองอากาศที่ใหญ่สุดได้จากน้ำประปา ทั้งนี้ เมื่อทำการเปรียบเทียบขนาดของฟองอากาศของสารอินทรีย์ระเหยทั้งสองชนิด คือ ฟองเมทานอลและฟองเบนซิน ที่เฟสของเหลวและอัตราการไหลของก๊าซเท่ากัน พบว่าขนาดของฟองอากาศของสารอินทรีย์ทั้งสองชนิดไม่แตกต่างกันมาก โดยสารอินทรีย์ชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) มีขนาดเล็กกว่าฟองอากาศของสารอินทรีย์ชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซิน) เพียงเล็กน้อย เนื่องจากความแตกต่างทางด้านแรงตึงผิว (Surface tension) ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดของฟองก๊าซ ดังกล่าวถึงในสมการของลาปลาซ (Laplace 's equation)

$$\Delta P = \frac{2\sigma_L}{D_B} \quad (4.24)$$

เมื่อทำการแปลงจากสมการที่ (4.24) ได้รูปสมการดังสมการที่ (4.25)

$$D_B = \frac{2\sigma_L}{\Delta P} \quad (4.25)$$

เมื่อ D_B = ขนาดของฟองอากาศ (Bubble size)

σ_L = แรงตึงผิว (surface tension)

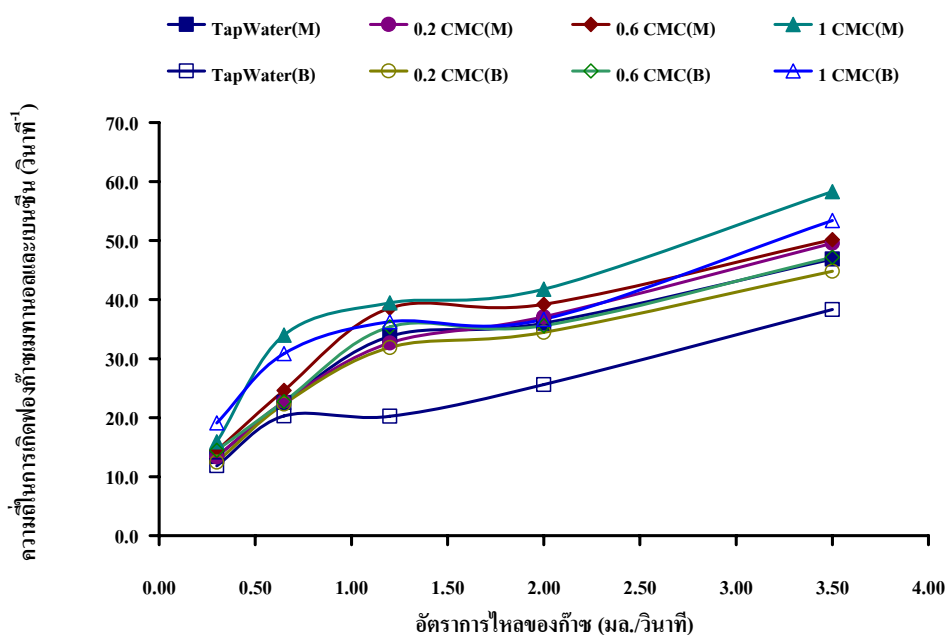
ΔP = ความดันลด (pressure drop)

จากสมการที่ (4.25) จะพบว่า ΔP มีค่าคงที่ เนื่องจากความสูงของน้ำในถังปฏิกรณ์ทั้งในกรณีของการทดลองเมทานอลและเบนซินคือประมาณ 20 เซนติเมตร รวมไปถึงความสูงของเฟสน้ำในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศที่ไม่สูงมาก จึงไม่ค่อยส่งผลมากนักต่อขนาดของฟอง ดังนั้นปัจจัยหลักที่เป็นตัวควบคุมขนาดของฟองอากาศนั้นคือ ค่าแรงตึงผิว (surface tension) ซึ่งจากการทดลองจะพบว่าขนาดของฟองเมทานอลจะเล็กกว่าขนาดของฟองเบนซินเล็กน้อย เนื่องจากแรงตึงผิว (Surface tension) โดยในกรณีของสารเมทานอลมีค่าแรงตึงผิว ต่ำกว่าค่าที่ได้จากสารเบนซิน โดยค่าแรงตึงผิวที่แตกต่างกันนี้อาจสัมพันธ์กับความสามารถในการละลายน้ำที่มากขึ้นต่างกันระหว่างสารอินทรีย์ระเหยทั้งสองชนิด โดยเมทานอลมีความสามารถในการละลายน้ำสูงกว่าเบนซิน จึงส่งผลให้กระทบต่อค่าแรงตึงผิวของเฟสของเหลวในสัดส่วนที่สูงกว่า ดังนั้น ปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงค่าแรงตึงผิวและขนาดของฟองก๊าซ (ดังที่กล่าวถึงข้างต้น) เป็นการยืนยันการคงอยู่ของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวที่บริเวณผิวสัมผัสของฟองก๊าซที่แขวนลอยภายในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ โดยลักษณะการเกาะติดดังกล่าว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.48 และ 4.49 นอกจากนี้ เนื่องจากขนาดของฟองอากาศ (D_B) ที่ได้จากการทดลองข้างต้นมีความสัมพันธ์กับความถี่ในการเกิดฟองอากาศ (f_B) และความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (U_B) ซึ่งเป็นตัวแปรหลักในการเพื่อที่จะ

หาพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (a) ซึ่งผลการทดลองในส่วนของตัวเองอื่นๆ จะได้นำเสนอในหัวข้อถัดไป

ความถี่ในการเกิดฟองอากาศ (Bubble formation frequency: f_b)

รูปที่ 4.52 แสดงความถี่ในการเกิดฟองอากาศของสารอินทรีย์ระเหยทั้งสองชนิด คือ ชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) และชนิดที่ละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ที่อัตราการไหลของก๊าซในช่วง 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที โดยประยุกต์ใช้อุปกรณ์เดิมอากาศที่มีรูเดิมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่มีขนาดคือ 0.65 มิลลิเมตร (OR0.65) และสารดูดซึมที่แตกต่างกันได้แก่ น้ำประปา และสารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้น 0.2 CMC 0.6 CMC และ 1 CMC ตามลำดับ



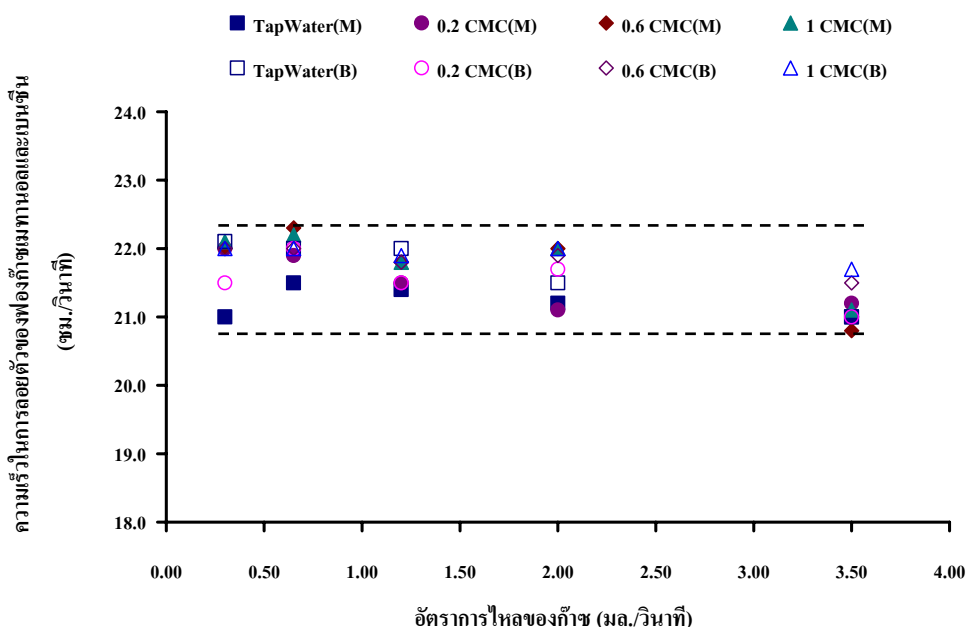
รูปที่ 4.52 ความถี่ในการเกิดฟองของสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) และชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ที่อัตราการไหลของก๊าซและสารดูดซึมที่แตกต่างกัน

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.52 พบว่าความถี่ในการเกิดฟองมีค่าระหว่าง 11.85 - 58.32 ต่อวินาที ทั้งในกรณีของสารอินทรีย์ระเหยทั้งสองชนิด คือ ชนิดที่ละลายน้ำมาก (เมทานอล) และชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซระหว่าง 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที โดยเมื่อเปรียบเทียบที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากันและเฟสของเหลวชนิดเดียวกัน ของสารอินทรีย์ระเหยทั้งสองชนิดพบว่า ฟองเมทานอลมีความถี่ในการเกิดฟอง (f_b) มากกว่าฟองเบนซีนเล็กน้อย โดยการที่ค่า f_b จากสารอินทรีย์ระเหยทั้งสองชนิด (เมทานอล และเบนซีน) มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก สอดคล้องกับการที่ค่า f_b มีความสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดของฟองอากาศซึ่งมีค่าที่แตกต่างกันไม่มากที่แต่ละอัตราไหลของก๊าซ (ดังที่แสดงในหัวข้อที่ผ่านมา) นอกจากนี้ เมื่อ

เปรียบเทียบชนิดของตัวดูดซึมแตกต่างกัน พบว่าความถี่ในการเกิดฟองอากาศมีค่ามากที่สุดที่เฟสของเหลวที่มีความเข้มข้นมากที่สุด นั่นคือ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 1 CMC และความถี่ในการเกิดฟองอากาศมีค่าน้อยสุด คือ ที่เฟสของเหลวที่ใช้น้ำประปาเป็นตัวดูดซึม

ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (Bubble rising velocity: U_B)

รูปที่ 4.53 แสดงความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (U_B) ของสารอินทรีย์ระเหยทั้งสองชนิด คือ ชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) และชนิดที่ละลายน้ำน้อย (เบนซีน) โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที ร่วมกับอุปกรณ์เดิมอากาศที่มีรูเดิมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่มีขนาด 0.65 มิลลิเมตร (OR0.65) และชนิดของเฟสของเหลวที่แตกต่างกัน คือน้ำประปา และสารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่มีความเข้มข้น 0.2 CMC 0.6 CMC และ 1 CMC



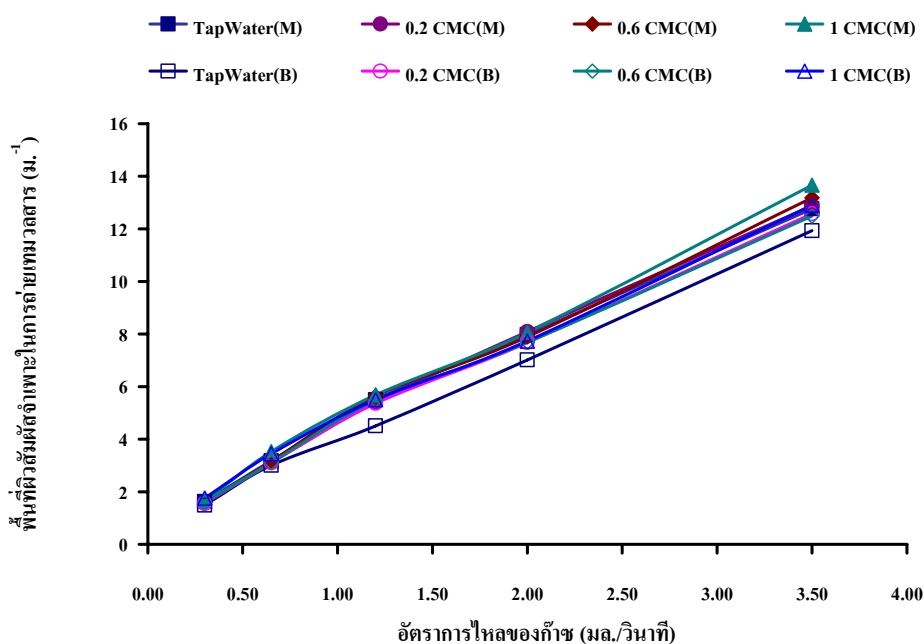
รูปที่ 4.53 ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศของสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) และชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ที่อัตราการไหลของก๊าซและสารดูดซึมที่แตกต่างกัน

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.53 พบว่าในช่วงอัตราการไหลของก๊าซระหว่าง 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศมีค่าค่อนข้างคงที่ คือ มีค่าอยู่ระหว่าง 20.80 - 22.75 เซนติเมตรต่อวินาที ทั้งในกรณีของสารอินทรีย์ระเหยทั้งสองชนิด โดยที่ค่า U_B ที่ได้จากการทดลองด้วยน้ำประปามีค่าสูงกว่าที่ได้จากสารละลายของสารลดแรงตึงผิว โดยที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่แตกต่างกันนั้นพบว่าสามารถส่งผลกระทบต่อค่า U_B โดยกล่าวได้ว่าค่า U_B ที่ได้ นั้นมีความสัมพันธ์กับขนาดของฟองอากาศที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดซึ่งมีขนาดที่แตกต่างกันทั้งจากที่ได้จากน้ำประปาและสารละลายของสารลดแรงตึงผิว (ดังแสดงในรูปที่ 4.53)

นอกจากนี้ พบว่าค่าความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (U_B) สอดคล้องกับกราฟผลการทดลองของ Grace และ Wairegi (1986) ดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยในกรณีที่เฟสของเหลวไม่มีการปนเปื้อน (Pure condition) สำหรับน้ำประปา และกรณีที่เฟสของเหลวมีการปนเปื้อน (Contaminate condition) สำหรับสารละลายของสารลดแรงตึงผิว

พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (Specific interfacial area: a)

รูปที่ 4.54 แสดงค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะของสารอินทรีย์ระเหยทั้งสองชนิด คือ ชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) และชนิดที่ละลายน้ำน้อย (เบนซีน) โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที โดยประยุกต์ใช้อุปกรณ์เดิมอากาศที่มีรูเดิมอากาศแบบแจ๊จรูเดียวที่มีขนาดแตกต่างกัน 0.65 มิลลิเมตร (OR0.65) และสารดูดซับที่แตกต่างกันได้แก่ น้ำประปา และสารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้น 0.2 CMC 0.6 CMC และ 1 CMC ตามลำดับ โดยค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (a) นี้มีความสัมพันธ์กับขนาดของฟองอากาศ (D_B) ความถี่ในการการเกิดฟอง (f_B) และค่าแรงลอยตัวของฟองอากาศ (U_B) ซึ่งตัวแปรดังกล่าวหาได้จากการทดลอง โดยคำนวณได้จากสมการที่ (3.16)



รูปที่ 4.54 พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสารของสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) และชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ที่อัตราการไหลของก๊าซและสารดูดซับที่แตกต่างกัน

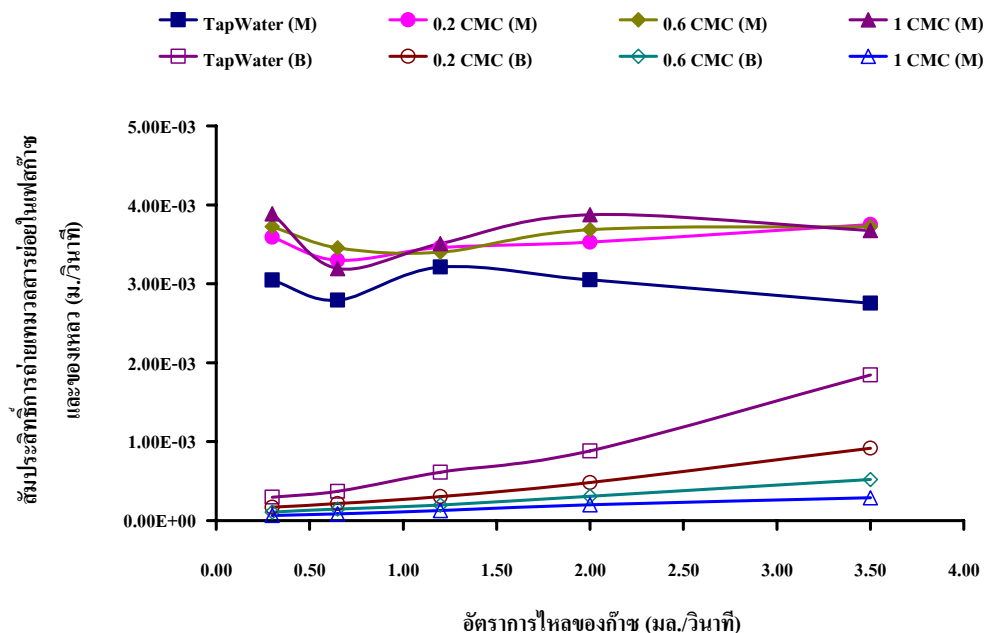
จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.54 พบว่าจากการวิเคราะห์สาร VOCs ทั้งสองชนิด (เมทานอลและเบนซีน) ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (a) มีค่าอยู่ระหว่าง 1.50 - 13.66 m² ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซระหว่าง 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที โดยเมื่อพิจารณา

สารดูดซึมชนิดเดียวกันนั้น พบว่าค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (a) มีค่ามากที่สุดที่อัตราการไหลของก๊าซ 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที และมีค่าน้อยสุดที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 มิลลิลิตรต่อวินาที ในขณะที่เมื่อพิจารณาตัวดูดซึมเดียวกันและอัตราการไหลของก๊าซเท่ากัน พบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่มีความเข้มข้นมาก คือ 1 CMC มีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (a) สูงที่สุด และมีค่า a น้อยสุดคือที่ตัวดูดซึมชนิดน้ำประปา โดยสามารถเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยดังนี้ สารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่มีความเข้มข้น 1 CMC 0.6 CMC 0.2 CMC และน้ำประปา ตามลำดับ ซึ่งกล่าวได้ว่าค่า a ที่คำนวณได้แปรผกผันกับขนาดของฟองอากาศ นอกจากนี้ ค่า a ที่วัดได้จากสารอินทรีย์ระเหยทั้งสองชนิด คือ ชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) และชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากค่า a นี้มีความสัมพันธ์กับขนาดของฟองอากาศ (D_B) ความถี่ในการการเกิดฟอง (f_B) และค่าแรงลอยตัวของฟองอากาศ (U_B) ซึ่งมีค่าที่วิเคราะห์ได้จากทั้งสองกรณีที่ไม่แตกต่างกัน จึงส่งผลให้ค่า a ที่ได้ของสารอินทรีย์ระเหยทั้งสองชนิดนี้ไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน

ดังนั้น จากการทดลองที่พบว่าตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ของสารอินทรีย์ระเหยทั้งสองชนิด คือ ชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) และชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ที่วัดได้ไม่แตกต่างกันมาก แต่ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยทั้งสองชนิดในตัวดูดซึมที่แตกต่างกันนั้นมีค่าที่แตกต่างกันมาก จึงอาจกล่าวโดยสรุปได้ว่าตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยทั้งสองชนิดค่อนข้างน้อย โดยที่ผลกระทบในการบำบัดส่วนใหญ่ขึ้นขึ้นกับคุณสมบัติของตัวดูดซึมนั้นคือความเข้มข้นของสารละลายของสารลดแรงตึงผิว ที่เลือกใช้ในการดักจับสารดังกล่าวเป็นปัจจัยสำคัญ

4.4.6 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยในเฟสก๊าซและของเหลว (Gas and Liquid film mass transfer coefficient: K_G, K_L)

รูปที่ 4.55 แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยในเฟสก๊าซและเฟสของเหลว (Gas and Liquid film mass transfer coefficient: K_G, K_L) ของสารอินทรีย์ระเหยทั้งสองชนิด คือ ชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) และชนิดที่ละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ที่อัตราการไหลของก๊าซระหว่าง 0.30 - 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที โดยประยุกต์ใช้อุปกรณ์เดิมอากาศที่มีรูเดิมอากาศแบบแข็งรูเดียวที่มีขนาด 0.65 มิลลิเมตร (OR0.65) และสารดูดซึมที่แตกต่างกันคือ น้ำประปา และสารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่มีความเข้มข้น 0.2 CMC 0.6 CMC และ 1 CMC ตามลำดับ



รูปที่ 4.55 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยของสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) และชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ที่อัตราการไหลของก๊าซและสารดูดซับที่แตกต่างกัน

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.55 เป็นการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทมวลสารย่อยของสารอินทรีย์ระเหยทั้งสองชนิด คือ ชนิดที่ละลายน้ำมาก (เมทานอล) โดยทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทมวลสารย่อยในเฟสก๊าซ (K_G) และชนิดที่ละลายน้ำน้อย (เบนซีน) โดยทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทมวลสารย่อยในเฟสของเหลว (K_L) ซึ่งสอดคล้องกับชนิดของเฟสที่เป็นตัวควบคุมการถ่ายเทมวลสารที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ โดยค่าสัมประสิทธิ์ K_G มีค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์ K_L ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพ (ความหนาแน่นและขนาดโมเลกุล) ระหว่างสองเฟสที่แตกต่างกัน ทำให้ส่งผลต่อค่าความต้านทานในการถ่ายเทมวลสาร (แปรผกผันกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล)

ในกรณีของสารเมทานอล พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย (K_G) มีค่าอยู่ระหว่าง $0.0026 - 0.0039 \text{ m.s.}^{-1}$ ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซระหว่าง $0.30 - 3.50$ มิลลิลิตรต่อวินาที เมื่อพิจารณาที่ตัวดูดซับที่แตกต่างกันนั้นพบว่าค่า (K_G) ในกรณีของน้ำประปามีค่าที่ต่ำกว่าที่ได้จากสารละลายของสารลดแรงตึงผิว เนื่องจากในกรณีของเมทานอลเฟสก๊าซเป็นตัวควบคุมการถ่ายเทมวลสารและเมื่อใส่สารละลายของสารลดแรงตึงผิวมากขึ้นจึงส่งผลให้ค่าแรงตึงผิว (surface tension) ระหว่างเฟสก๊าซและเฟสของเหลวและความต้านทานในระบบนั้นมีค่าลดลง ดังนั้น จึงส่งผลให้เกิดการถ่ายเทมวลสารได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามค่า K_G จากความเข้มข้นของสารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้น 0.2 0.6 และ 1 CMC มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ K_L ในกรณีสารเบนซีนจะพบว่าค่ามีค่าอยู่ระหว่าง $0.00007 - 0.002$ เมตรต่อวินาที ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซระหว่าง $0.30 - 3.50$ มิลลิลิตรต่อวินาที

และจากการพิจารณาตัวคูณซึมใดๆ นั้น พบว่าค่า K_L จะมีค่าคงที่ (ประมาณ $1-6 * 10^{-4}$ เมตรต่อวินาที) ที่อัตราไหลของก๊าซต่างๆ ซึ่งค่าดังกล่าวสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการถ่ายเทมวลสารในรูปของฟองก๊าซ (Mass transfer in form of bubble) ภายในถังปฏิกริยาแบบฟอง (Rushtan, 2003) ในขณะที่ค่า K_L มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของก๊าซสูงขึ้นตั้งแต่ 2 มิลลิลิตรต่อวินาที โดยอาจกล่าวได้ว่ามีความสัมพันธ์กับสภาพความปั่นป่วน (Turbulent condition) รวมไปถึงพลังงานภายในเฟสของเหลวที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งส่งผลต่อกลไกการถ่ายเทมวลสารที่ไม่ได้ขึ้นกับทฤษฎีการถ่ายเทมวลสารผ่านฟิล์มของเหลวที่อยู่บริเวณรอบๆ ฟองก๊าซซึ่งเป็นตัวควบคุมเพียงอย่างเดียวอีกต่อไป

จากการที่ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (a) ที่ได้จากทั้งสองกรณี (เมทานอลและเบนซีน) มีค่าใกล้เคียงกันนั้น เราสามารถสรุปได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย (K_G และ K_L) ส่งผลกระทบบ่อยมากต่อความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารโดยรวม (K_{Ga} และ K_{La}) ที่ได้จากการทดลอง ซึ่งส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนของการดูดซึมสารอินทรีย์ระเหยทั้ง 2 ชนิด ดังนั้น กล่าวโดยสรุปได้ว่า ค่าความสามารถในการถ่ายเทมวลสารที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศมีความสัมพันธ์กับความต้านทานในการถ่ายเทมวลสารซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของเฟสที่ควบคุมการถ่ายเทมวลสาร รวมไปถึงลักษณะและความหนาของฟิล์มก๊าซและของเหลว (Gas and Liquid film thickness) ที่แตกต่างกันจากสาร VOCs สองชนิดซึ่งสามารถสรุปได้ ดังนี้

- ในกรณีสารเมทานอล พบว่าการเติมสารลดแรงตึงผิวช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทมวลสารย่อยในเฟสก๊าซ (K_G) โดยที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่แตกต่างกันนั้น ส่งผลกระทบบ่อยต่อค่าสัมประสิทธิ์ K_G โดยกล่าวได้ว่า โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่อยู่บริเวณผิวสัมผัสของฟองก๊าซเมทานอลซึ่งมีปริมาณมากหรือน้อยแตกต่างกันออกไปตามความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่เพิ่มขึ้นนั้น ส่งผลน้อยต่อความต้านทานการถ่ายเทมวลสาร ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ฟิล์มของก๊าซที่อยู่ภายในฟองก๊าซเมทานอล อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงค่าประสิทธิภาพการบำบัด (รูปที่ 4.47) ซึ่งมีค่าค่อนข้างสูงทั้งในกรณีสารดูดซึมที่เป็นน้ำประปาและสารลดแรงตึงผิว ดังนั้น การปรับเปลี่ยนสารดูดซึม (Absorbent modification) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดนั้น อาจไม่มีความจำเป็นในกรณีของการดูดซึมสารอินทรีย์ระเหยที่ละลายน้ำได้มาก (Hydrophilic VOCs) ดังสารเมทานอลในงานวิจัยนี้
- ในกรณีสารเบนซีน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทมวลสารย่อยในเฟสของเหลว (K_L) ที่ความเข้มข้นของสารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่มีค่ามาก ส่งผลให้มีโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวมาดูดซับที่บริเวณผิวสัมผัสรอบๆ ฟองก๊าซและเกิดการขัดขวางการถ่ายเทมวลสารเนื่องจากรูปแบบการรวมตัวของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวเมื่อความเข้มข้นมากขึ้น (ดังกล่าวก่อนหน้า) จากเหตุผลดังกล่าวจึงส่งผลให้ค่า K_L มีค่าน้อยที่ความเข้มข้นของสารละลาย

สารลดแรงตึงผิวสูง (Chao และคณะ 2008) อย่างไรก็ตาม จากการที่เราได้ประสิทธิภาพการบำบัด (%Eff) ที่สูงขึ้นนั้น (รูปที่ 4.47) น่าจะมาจากการเพิ่มขึ้นของค่าความเข้มข้นในเฟสของเหลวของสารอินทรีย์ระเหย ณ จุดสมดุล ($C_{L(SAT)}$) เมื่อมีการปนเปื้อนของสารลดแรงตึงผิว (ดังแสดงในตารางที่ 4.6) ซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของแรงขับเคลื่อน (Driving force) หรือความแตกต่างของความเข้มข้น (Concentration gradient: ΔC) ภายในกลไกการถ่ายเทมวลสารของถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ ซึ่งเพิ่มขึ้นในสัดส่วนที่สูงกว่าการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร (K_{La} และ K_L) ที่เกิดขึ้น

จากการทดลองผลกระทบของสารลดแรงตึงผิวต่อการดูดซึมสารอินทรีย์ระเหย ทั้งเมทานอลและเบนซีน สามารถสรุปผลการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.10 ค่าตัวแปรที่ศึกษาจากการทดลองการศึกษผลกระทบของสารอินทรีย์ระเหยทั้งสองชนิด คือ ชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ที่ความเข้มข้นที่เฟสของเหลวที่แตกต่างกัน

OR	Qg	%Eff(4hr.)	$K_G a$	D_B	f_B	U_B	a	K_G
Tap water	0.30	98.96	0.0050	3.50	13.39	21.00	1.63	0.0030
	0.65	96.92	0.0100	3.80	22.54	21.50	3.18	0.0028
	1.20	94.99	0.0153	4.08	33.78	21.40	5.50	0.0028
	2.00	92.68	0.0221	4.53	35.99	21.20	7.97	0.0028
	3.50	89.08	0.0335	5.22	46.87	21.00	12.76	0.0026
0.2 CMC	0.30	99.43	0.0056	3.50	13.35	22.00	1.56	0.0036
	0.65	98.64	0.0103	3.80	22.70	21.90	3.13	0.0033
	1.20	98.15	0.0187	4.13	32.64	21.50	5.41	0.0035
	2.00	97.71	0.0285	4.49	37.08	21.10	8.09	0.0035
	3.50	97.55	0.0483	5.13	49.55	21.20	12.88	0.0038
0.6 CMC	0.30	99.53	0.0060	3.41	14.40	22.00	1.60	0.0037
	0.65	98.71	0.0109	3.69	24.44	22.30	3.16	0.0035
	1.20	98.33	0.0192	3.90	38.56	21.80	5.64	0.0034
	2.00	97.77	0.0291	4.42	39.18	22.00	7.90	0.0037
	3.50	97.58	0.0491	5.11	50.17	20.80	13.18	0.0037
1 CMC	0.30	99.60	0.0064	3.11	15.91	22.10	1.64	0.0039
	0.65	98.73	0.0113	3.32	34.00	22.20	3.53	0.0032
	1.20	98.36	0.0199	3.87	39.43	21.80	5.69	0.0035
	2.00	97.85	0.0313	4.49	41.79	22.00	8.07	0.0039
	3.50	97.80	0.0502	4.86	58.32	21.10	13.66	0.0030

ตารางที่ 4.11 ค่าตัวแปรที่ศึกษาจากการทดลองการศึกษากลุ่ของสารอินทรีย์ระเหยทั้งสองชนิด คือ ชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ที่ความเข้มข้นที่เฟสของเหลวที่แตกต่างกัน

OR	Qg	%Eff(4hr.)	$K_L a$	D_B	f_B	U_B	a	K_L
Tap water	0.30	8.50	0.0004	3.64	11.85	22.10	1.49	0.0003
	0.65	8.22	0.0011	3.94	20.32	22.00	3.00	0.0004
	1.20	8.01	0.0028	4.21	30.77	22.00	5.19	0.0005
	2.00	6.90	0.0062	4.86	33.28	21.50	7.66	0.0008
	3.50	5.57	0.0220	5.36	43.44	21.00	12.44	0.0018
0.2 CMC	0.30	14.33	0.0003	3.58	12.46	21.50	1.56	0.0002
	0.65	14.33	0.0007	3.82	22.30	22.00	3.10	0.0002
	1.20	12.36	0.0016	4.16	31.87	21.50	5.37	0.0003
	2.00	13.10	0.0037	4.80	34.43	21.70	7.67	0.0005
	3.50	11.27	0.0115	5.30	44.83	21.00	12.57	0.0009
0.6 CMC	0.30	23.05	0.0002	3.41	14.46	22.00	1.60	0.0001
	0.65	21.37	0.0005	3.79	22.72	22.00	3.12	0.0001
	1.20	21.55	0.0011	4.02	35.37	21.80	5.48	0.0002
	2.00	21.10	0.0024	4.55	35.58	21.90	7.69	0.0003
	3.50	23.47	0.0065	5.21	47.17	21.50	12.49	0.0005
1 CMC	0.30	33.26	0.0001	3.20	19.13	22.00	1.76	0.0001
	0.65	31.98	0.0003	3.43	30.83	22.00	3.45	0.0001
	1.20	32.51	0.0007	3.98	36.28	21.90	5.50	0.0001
	2.00	31.28	0.0016	4.50	36.68	22.00	7.73	0.0002
	3.50	32.31	0.0037	5.00	53.39	21.70	12.90	0.0003

จากตารางที่ 4.10 และ 4.11 เราสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

- ที่ชนิดของตัวดูดซึมแบบเดียวกันนั้น ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยทั้งสองชนิด (เมทานอลและเบนซีน) ที่แตกต่างกันอย่างมากนั้น จะขึ้นกับคุณสมบัติการละลายในสารดูดซึมที่เลือกใช้ (VOCs Solubility in absorbent) รวมไปถึงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารโดยรวม (Overall mass transfer coefficient) เป็นหลัก
- โดยทั่วไป ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในกรณีที่เฟสก๊าซควบคุม ($K_G a$ และ K_G) จะมีค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในกรณีที่เฟสของเหลวควบคุม ($K_L a$ และ K_L) ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพ (ความหนาแน่นและขนาดโมเลกุล) ที่แตกต่างกันของเฟสควบคุมที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อค่าความต้านทานในการถ่ายเทมวลสาร
- จากการทดลองในส่วนนี้ ทั้งสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) และชนิดละลายน้ำมาก (เบนซีน) ค่าตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ ซึ่งได้แก่ ขนาดของฟองอากาศ (D_B) ความถี่ในการเกิดฟองอากาศ (f_B) ความเร็วในการลอยตัวของฟอง (U_B) และ พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (a) มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ประสิทธิภาพในการบำบัดดังกล่าวแตกต่างกันอย่างมาก นั้นเป็นการยืนยันว่าตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์มีผลกระทบน้อยต่อการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยโดยปัจจัยหลักมาจากคุณสมบัติทางเคมีของตัวดูดซึมและตัวถูกดูดซึมมากกว่า
- การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของสารละลายของสารลดแรงตึงผิว ซึ่งส่งผลต่อปริมาณ โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่ผิวสัมผัสของฟองอากาศนั้น ส่งผลกระทบบ่อน้างต่ำต่อลักษณะของฟิล์มก๊าซและความต้านทาน (Gas-film resistant) ที่เกิดขึ้นซึ่งควบคุมการดูดซึมก๊าซเมทานอล ในขณะที่ กรณีของก๊าซเบนซีน การเพิ่มขึ้นของ โมเลกุลดังกล่าวเป็นการขัดขวางการถ่ายเทมวลสาร เนื่องจากทำให้ความหนาของฟิล์มของเหลวรอบๆ ฟองก๊าซเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้มีความต้านทานการถ่ายเทมวลสารที่มากขึ้น หรือค่าสัมประสิทธิ์ K_L มีค่าน้อยลง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือศึกษาการดูดซับสารอินทรีย์ระเหย โดยศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสารและตัวแปรด้านอุทกศาสตร์กับประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำได้มาก (Hydrophilic VOCs) และละลายน้ำน้อย (Hydrophobic VOCs) ด้วยกระบวนการดูดซับโดยประยุกต์ใช้ถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ เพื่อเข้าใจถึงกลไกและประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยในถังปฏิกรณ์ดังกล่าวมากยิ่งขึ้น โดยมีข้อสรุปดังนี้

1. จากการทดลองการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยโดยน้ำประปาเป็นตัวดูดซับพบว่า ในกรณีของสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูงที่เวลา 240 นาที ร้อยละ 86.53 - 97.96 ซึ่งแตกต่างจากสารอินทรีย์ชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดร้อยละ 5.57 - 8.50

2. จากการศึกษาผลกระทบของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเดิมอากาศแบบแจ็กรูเดียวที่มีขนาดแตกต่างกัน (0.65 1.25 2.50 และ 4.50 มิลลิเมตร) พบว่าขนาดของรูเดิมอากาศไม่ได้มีผลกระทบมากนักต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยทั้งสองชนิด โดยประสิทธิภาพในการบำบัดขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับเป็นปัจจัยหลัก

3. จากการศึกษาตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศภายในถังปฏิกรณ์ เช่น ขนาดของฟองอากาศ (D_p) ความถี่ในการเกิดฟอง (f_p) ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (U_p) และพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (a) พบว่ารูเดิมอากาศขนาดเล็กให้ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสารที่มีค่ามากที่สุด โดยค่า (a) จะเพิ่มขึ้นค่อนข้างเป็นเส้นตรงเมื่ออัตราการไหลของก๊าซสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการถ่ายเทมวลสารในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ อย่างไรก็ตาม พลังงานที่ใช้ในการก่อกำเนิดฟองให้มีขนาดเล็กนั้นต้องใช้พลังงานมากและอาจส่งผลกระทบต่อการหลุดออกของก๊าซจากเฟสของเหลว (Desorption or Stripping phenomena)

4. ค่าความสามารถในการถ่ายเทมวลสารที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศมีความสัมพันธ์กับความต้านทานในการถ่ายเทมวลสารซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาของฟิล์มก๊าซและของเหลว (Gas-film thickness) บริเวณผิวสัมผัสของฟองอากาศ (Interface) ซึ่งเปลี่ยนไปตามความปั่นป่วนของระบบ

5. ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยในเฟสก๊าซ (K_G) มีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับอัตราการไหลของก๊าซ (Q_g) แต่แปรผันตรงกับกับขนาดรูเดิมอากาศ (Orifice size) เนื่องจากฟิล์มก๊าซมีลักษณะ

อ่อนนุ่ม (Flexible film gas-liquid around bubble) มากขึ้นเมื่อขนาดของฟองก๊าซใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานลดลง ดังนั้นค่า K_G สูงขึ้น

6. กรณีของฟองเบนซิน ฟิล์มของเหลวเป็นตัวกำหนดการถ่ายเทมวลสารในกรณีนี้ ทำให้ค่า K_L มีค่าน้อยที่อัตราการไหลของก๊าซต่ำ ในขณะที่ความปั่นป่วนสูง ทำให้ฟิล์มน้ำรอบๆ ฟองก๊าซมีลักษณะบาง (Thin gas-film around bubble) เป็นผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่จากเฟสก๊าซผ่านฟิล์มของเหลวสู่น้ำประปาได้มากขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่า K_L มีค่าสูงที่อัตราการไหลของก๊าซสูง

7. การบำบัดสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในกรณีของความเข้มข้นของสารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่แตกต่างกัน (0.2 0.6 และ 1 CMC) มีประสิทธิภาพในการบำบัดไม่แตกต่างกันมากนักคือ อยู่ในช่วงร้อยละ 97.55 - 99.60 ดังนั้น ในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยชนิดเมทานอล ควรใช้สารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้น 0.2 CMC ซึ่งช่วยลดการหลุดออกของเฟสก๊าซจากเฟสของเหลวเมื่ออัตราการไหลของก๊าซเพิ่มสูงขึ้น หรือใช้เพียงน้ำประปาก็เพียงพอ

8. การบำบัดสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซิน) พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว โดยที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่แตกต่างกันนั้น ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความสามารถในการละลายของเบนซินในเฟสของเหลว ซึ่งส่งผลต่อความแตกต่างของความเข้มข้น (Concentration gradient: ΔC) รวมไปถึง ประสิทธิภาพการบำบัดที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยพบว่าความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 0.2 0.6 และ 1 CMC ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดในช่วงร้อยละ 14.33 - 12.31 23.47 - 23.05 และ 32.31 - 33.26 ตามลำดับ ดังนั้นในกรณีของสารอินทรีย์ชนิดละลายน้ำน้อยควรใช้สารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้น 1 CMC เนื่องจากให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูง

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ การบำบัดสารอินทรีย์ระเหยเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพนั้น ควรพิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้องโดยสรุปดังนี้ 1) ชนิดของสารอินทรีย์ระเหยว่าเป็นชนิดที่ละลายน้ำน้อยหรือละลายน้ำมาก 2) คุณสมบัติของสารดูดซับที่เลือกใช้ 3) อัตราการไหลของก๊าซ 4) อุปกรณ์สร้างฟองก๊าซ 5) ชนิดและความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่เลือกใช้ และ 6) ตัวแปรทางด้านอุทกพลศาสตร์และการถ่ายเทมวลสารของฟองอากาศที่เกิดขึ้น โดยในงานวิจัยนี้สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังแสดงในตารางที่ 5.1 และ 5.2

ตารางที่ 5.1 สรุปผลการทดลองทั้งหมดในกรณีสารอินทรีย์ชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล)

ตัวแปร	%Eff.	C_L	$C_{L(sat)}$	$K_G a$	a	K_G	หมายเหตุ
เพิ่มอัตราการไหลก๊าซ	↓	↑	≈	↑	↑	≈	ความแตกต่างของความเข้มข้น (ΔC) และ $K_G a$ สูงขึ้นตามอัตราการไหลของก๊าซซึ่งส่งผลต่อความเข้มข้นที่ละลายในเฟสของเหลว (C_L) ที่เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้มีปรากฏการณ์หลุดออก (desorption) ของสารอินทรีย์ระเหยที่บริเวณผิวหน้าของถังปฏิกรณ์ (ด้านบน) อีกทางหนึ่งด้วย ดังนั้นจึงส่งผลต่อการลดลงของประสิทธิภาพการบำบัดโดยรวมที่คำนวณจากผลต่างระหว่างค่า $C_G(in)$ และ $C_G(out)$ ในการทดลองนี้
เพิ่มขนาดรูเติมอากาศ	≈	≈	≈	≈	↓	↑	ค่า a และ K_G หักล้างกัน และยังคงมี desorption
ใส่สารละลายสารลดแรงตึงผิว	↑	↑	≈	↑	↑	↑	ค่า a , K_G และ $K_G a$ เพิ่มสูงขึ้น และโฟม(foam) ที่มีช่วยลดการหลุดออก (desorption)
เพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว	≈	≈	≈	≈	≈	≈	ใส่สารลดแรงตึงผิวเพียงเล็กน้อยก็เพียงพอต่อการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก

ตารางที่ 5.2 สรุปผลการทดลองทั้งหมดในกรณีสารอินทรีย์ชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน)

ตัวแปร	%Eff.	C_L	$C_{L(sat)}$	$K_L a$	a	K_L	หมายเหตุ
เพิ่มอัตราการไหลก๊าซ	↓	↑	≈	↑ ที่ Q_g สูงๆ	↑	คงที่ ที่ Q_g ต่ำๆ เพิ่มขึ้น ที่ Q_g สูงๆ	ความแตกต่างของความเข้มข้น (ΔC) และ $K_L a$ แปรผันตรงตามอัตราการไหล (Q_g) ส่งผลให้เกิดการหลุดออก (desorption) เนื่องจากการกวนผสมรวมถึงตัวดูดซึมเริ่มอิ่มตัว โดยค่าประสิทธิภาพที่ลดลงนั้น สอดคล้องกับที่อธิบายในตารางที่ 5.1 ที่ผ่านมา
เพิ่มขนาดรูเดิมอากาศ	≈	≈	≈	↓	↓	≈	ค่า a เป็นตัวควบคุมการถ่ายเทมวลสาร โดยค่า K_L คงที่
ใส่สารละลายสารลดแรงตึงผิว	↑	↑	↑	↓	↑	↓	สารลดแรงตึงผิวขัดขวางการถ่ายเทมวลสารมากกว่าค่า a เพิ่มขึ้น
เพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว	↑	↑	↑	↓	↑ เล็กน้อย	↓	ขัดขวาง K_L มากกว่าค่า a ที่เพิ่มขึ้นและช่วยลดการหลุดออก (desorption) จากสมการ $\frac{dC}{dt} = K_L a (C_{L(sat)} - C_L)$ ค่า $K_L a$ ลดลงน้อยกว่าค่าความเข้มข้นอิ่มตัว ($C_{L(sat)}$) ที่เพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้การถ่ายเทมวลสารมากขึ้นและประสิทธิภาพในการบำบัดสูงขึ้นด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

1. ควรทำการทดลองสารอินทรีย์ระเหยทั้งชนิดที่ละลายน้ำมาก (High soluble in water) และสารอินทรีย์ระเหยทั้งชนิดที่ละลายน้ำน้อย (Low soluble in water) ตัวอื่นๆ นอกเหนือจากงานวิจัยในครั้งนี้ อีกทั้งผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ระเหยชนิดต่างๆ เข้าด้วยกัน (Mixed VOCs) โดยศึกษากลไกต่างๆ ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย เนื่องจากในปัจจุบันสารอินทรีย์ระเหยหลายชนิดได้นำมาใช้ในอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก อีกทั้งความเป็นพิษและอันตรายของสารอินทรีย์ระเหยดังกล่าวข้างต้น ได้ก่อให้เกิดโทษและอันตรายต่อชีวิตมนุษย์และสิ่งแวดล้อมเป็นจำนวนมาก

2. ควรศึกษาผลกระทบของชนิดของสารลดแรงตึงผิวชนิดอื่น เช่น สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก (Cationic surfactant) สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (Nonionic surfactant) และสารลดแรงตึงผิวที่มีทั้งประจุบวกและประจุลบ (Amphoteric surfactant หรือ Zwitterions) รวมถึงศึกษาชนิดของตัวดูดซับชนิดอื่น เช่น อิมัลชันของน้ำมัน (Oily emulsion) โดยศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสารและตัวแปรด้านอุทกศาสตร์ กับประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย และปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย

3. ควรศึกษาผลกระทบจากปัจจัยอื่นๆ ต่อตัวแปรด้านอุทกศาสตร์ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย เช่น ชนิดของรูปร่างเติมอากาศแบบแข็ง (Rigid orifice) และแบบยืดหยุ่น (flexible orifice) ขนาดของรูเติมอากาศ (เล็กลงหรือใหญ่ขึ้น) รวมไปถึงจำนวนรูเติมอากาศจำนวนมากขึ้น

4. ควรดำเนินการศึกษาและยืนยันผลการทดลองที่ได้ในช่วงหรือสภาพการทำงาน (Operating condition) ที่กว้างมากขึ้น เช่น คอลัมน์ที่มีขนาดใหญ่ อัตราการไหลของก๊าซที่สูงขึ้น รวมไปถึงลักษณะทั้งเฟสก๊าซและของเหลวที่ใกล้เคียงกับสภาพแวดล้อมจริงยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

ภาษาไทย

นภคกุล ไชยคำ พิรพรรณ พันธมนาวิน และ ลัดดาวัลย์ ผดุงทรัพย์. เคมี 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ท็อปจำกัด, 2546.

แม่น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม. Principles and Techniques of Instrumental Analysis. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์ชวนพิมพ์, 2534.

มันสิน ตันฑกุลเวศน์. วิศวกรรมการประปาเล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

มันสิน ตันฑกุลเวศน์. วิศวกรรมการประปาเล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

สุภาภรณ์ มานะรังสรรค์. กระบวนการถ่ายเทมวลสาร. พิมพ์ครั้งที่ 2. ขอนแก่น: หน่วยสารบรรณงานบริหารและธุรการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2545.

สุชาติพิศ สิริไพศาลพิพัฒน์ อัจฉนา วงศ์ชัยสุวรรณ และ สายใจ ชาญเศรษฐีกุล. เคมีทั่วไป 2. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ไอ.เอส.พรินติ้ง เฮ้าส์, 2541.

อุดม ก๊กผล โสภณ เรืองสำราญ และ อมร เพชรสม. อินทรีย์เคมี 1. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.

ภาษาอังกฤษ

- Billerbeck, D.G., Condoret, J.S. and Fonade, C. Study of mass transfer in a novel gas-liquid contactor: the aero-ejector. Chemical Engineering Journal 72(1999): 185-193.
- Chao, H.P., Lee, J.F., Lee, C.K., Huang, F.C. and Annadurai, G. Volatilization reduction of monoaromatic compounds in nonionic surfactant solutions. Chemical Engineering Journal 142(2008): 161-167.
- Chao, K.P., Ong, S.K. and Huang, M.C. Mass transfer of VOCs in laboratory-scale air sparging tank. Journal of Hazardous Materials 152(2008): 1098-1107.
- Deleris, I., Hoffmann, P.A., Fonade, C. and Maranges, C. Hydrodynamic and mass transfer performance of a new aero-ejector with its application to VOC abatement. Chemical Engineering Science 61(2006): 4982-4993.
- Dumont, E., Andrs, Y. and Cloirec, P. Mass transfer coefficients of styrene and oxygen into silicone oil emulsions in a bubble reactor. Chemical Engineering Science 61(2006): 5612-5619.
- Franck, L., Luc, M., Claude, J.R. and Louis, J.F. Absorption of a mixture of Volatile organic compounds (VOCs) in aqueous solutions of soluble cutting oil. Bioresource Technology 2007.
- Grace, J.R. and Wairegi, T. 1986. Properties and Characteristics of drops and bubbles. Encyclopedia of Fluid Mechanics, Cheremisinoff. Gulf Publishing Corporation, Huston, TX., 43-57.
- Heymes, F., Manno-Demoustier, P., Charbit, F., Fanlo, J.L. and Moulin, P. A new efficient absorption liquid to treat exhaust air loaded with toluene. Chemical Engineering Journal 115(2006): 225-231.
- Kungsananta, S., Kitiyanana, B., Rirksomboona, T., Osuwana, S. and Scamehorn, J. F. Toluene removal from nonionic surfactant coacervate phase solutions by vacuum stripping. Separation and Purification Technology (2008).
- Lalanne, F., Malhautier L., Roux, J.C. and Fanlo, J.L. Absorption of a mixture of volatile organic compounds (VOCs) in aqueous solutions of soluble cutting oil. Bioresource Technology 99(2008): 1699-1707.
- Loubiere, K. and Hebrard, G. Bubble formation from a flexible hole submerged in an inviscid liquid. Chemical Engineering Science 58(2002): 135 - 148.

- Nevers, D.N. Air pollution control engineering. 2 nd ed. Boston : McGraw-Hill, 2000.
- Painmanakul, P., Loubire, K., Hbrard, G. and Buffire, P. Study of different membrane spargers used in waste water treatment: characterisation and performance. Chemical Engineering and Processing 7(2004): 1347–1359.
- Painmanakul, P., Loubire, K., Hbrard, G. and Mietton-Peuchot, M. Effects of surfactants on liquid-side mass transfer coefficients. Chemical Engineering Science 60(2005): 6480–6491.
- Peeva, L., Ben-zvi, S.Y. and Merchuk, J.C. Mass transfer coefficients of decane to emulsions in a bubble column reactor. Chemical Engineering Science 56(2001): 5201–5206.
- Rosen, M. Surfactants and interfacial phenomena. 3 rd ed. New Jersey : Wiley-Interscience, 2004.
- Roustan, M. Transferts Gaz-Liquide dans les procédés de traitement des eaux et des effluents gazeux. 2003. TEC&DOC.
- Sardeing, R., Painmanakul, P. and Hbrard, G. Effect of surfactants on liquid-side mass transfer coefficients in gas–liquid systems:Afirst step to modeling. Chemical Engineering Science 61(2006): 6249 – 6260.
- Seader, J.D. and Henley, E. J. Separation process principles. 2 nd ed. New Jersey : Hoboken, 2006.
- Treybel, R. E. Mass-transfer operations. 3 rd ed. Auckland : McGraw-Hill, 1981.
- Vane,L.M. and Giroux, E.L. Henry’s Law Constants and Micellar Partitioning of Volatile Organic compounds in Surfactant Solution. J. Chemical Engineering Data 45(2000): 38- 47.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การคำนวณความเข้มข้นสารอินทรีย์ระเหยที่เข้าระบบบำบัด

ก.1 การคำนวณความเข้มข้นที่เข้าระบบ

การทดลองครั้งนี้ใช้เมทานอลและเบนซีนบริสุทธิ์เป็นตัวแทนของสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำได้มากและละลายน้ำได้น้อยตามลำดับ (สาร A) ดังนั้น เราสามารถใช้กฎของราอูลท์ (Raoult's Law) ในการหาค่าความดันย่อยของสาร A ในเฟสไอที่อยู่เหนือเฟสของเหลว (p_A) ได้ดังนี้

$$p_A = x_A P_A \quad (\text{ก.1})$$

เมื่อค่า P_A คือความดันไอของสาร A โดยหลังจากที่ทราบค่าความดันไอในสมการที่ (ก.1) แล้ว จึงทำการแทนที่ความดันไอในสมการของก๊าซในอุดมคติ (Ideal gas law) ดังแสดงในสมการที่ (ก.2) จะทำให้เราสามารถคำนวณค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยที่เข้าถึงปฏิกิริยาแบบฟองอากาศที่เกิดจากอุปกรณ์สร้างสารอินทรีย์ระเหยได้ ดังสมการ (ก.3)

$$pV = nRT \quad (\text{ก.2})$$

$$[C_g] = \frac{n}{V} = \frac{p_A}{RT} \quad (\text{ก.3})$$

โดย	V	คือ	ปริมาตรของถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศ (Volume of bubble column)
	n	คือ	จำนวนของก๊าซ (โมล) (Amount of gas in moles)
	R	คือ	ค่าคงที่ของก๊าซ มีค่า $8.314 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\text{mol}^{-1}$
	T	คือ	อุณหภูมิ (Temperature in Kelvin)

นอกจากนี้ จากการที่ทราบค่าความเข้มข้นของของสารอินทรีย์ระเหยที่มีอัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกัน ดังนั้น เราสามารถคำนวณค่าภาระบรรทุก (VOCs loading) ของสารอินทรีย์ระเหยได้ดังสมการ (ก.4)

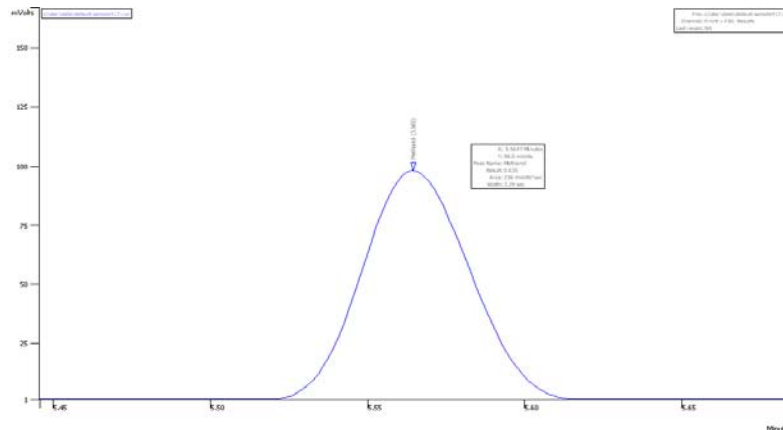
$$\text{Loading} = [C] \times Q_g \quad (\text{ก.4})$$

ภาคผนวก ข

ผลการวัดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยชนิดเมทานอลและเบนซีน ในเฟสก๊าซ
โดยเครื่องมือก๊าซโครมาโทกราฟี (GC- FID)

ข.1 ผลการวัดความเข้มข้นของเมทานอลในเฟสก๊าซ

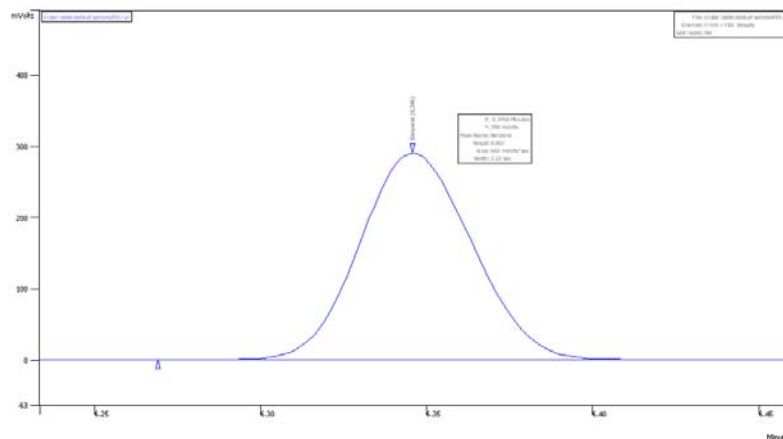
สภาวะที่ใช้ในการทำงานของก๊าซโครมาโทกราฟีที่ใช้ คือ ก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซพา (carrier gas) ที่อัตราการไหลในคอลัมน์ 2.0 มิลลิตรต่อวินาที โดยที่อุณหภูมิของตัวรับการฉีดสาร (Injector ; front 1079) คือ 220 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของตัวตรวจวัด (Detector; front FID) คือ 300 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของเตาเผา (Oven) คือ 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ ข.1 พื้นที่ใต้กราฟความเข้มข้นของเมทานอล วัดโดยเครื่องมือ ก๊าซโครมาโทกราฟี (GC- FID)

ข.2 ผลการวัดความเข้มข้นของเบนซีนในเฟสก๊าซ

สภาวะที่ใช้ในการทำงานของก๊าซโครมาโทกราฟีที่ใช้ คือ ก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซพา (carrier gas) ที่อัตราการไหลในคอลัมน์ 2.0 มิลลิตรต่อวินาที โดยที่อุณหภูมิของตัวรับการฉีดสาร (Injector ; front 1079) คือ 220 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของตัวตรวจวัด (Detector; front FID) คือ 300 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของเตาเผา (Oven) คือ 120 องศาเซลเซียส



รูปที่ ข.2 พื้นที่ใต้กราฟความเข้มข้นของเบนซีน วัดโดยเครื่องมือ ก๊าซโครมาโทกราฟี (GC- FID)

ภาคผนวก ก

ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดเมทานอล และสารอินทรีย์ระเหยชนิดเบนซีน

รูเติมอากาศแบบแข็งรูเดี่ยวขนาด 0.65 1.25 2.50 และ 4.50 มิลลิเมตร

อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 0.65 1.20 2.00 และ 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที

ตัวดูดซึม คือ น้ำประปา และ สารละลายของสารลดแรงตึงผิวประจุลบที่ความเข้มข้น 0.2 0.6 และ 1 CMC

ตารางที่ ค.1 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซับคือน้ำประปา (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$K_G a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_G
30	1.39	0.000086345	16.13	0.0049795	3.497	13.392	21.00	1.634	0.0030473
60	1.82	0.000056573	32.23	0.0049795	3.497	13.392	21.00	1.634	0.0030473
90	2.13	0.000044165	48.31	0.0049795	3.497	13.392	21.00	1.634	0.0030473
120	2.47	0.000038435	64.36	0.0049795	3.497	13.392	21.00	1.634	0.0030473
150	3.59	0.000044785	80.39	0.0049795	3.497	13.392	21.00	1.634	0.0030473
180	4.83	0.000050328	96.40	0.0049795	3.497	13.392	21.00	1.634	0.0030473
210	5.06	0.000045212	112.38	0.0049795	3.497	13.392	21.00	1.634	0.0030473
240	5.31	0.000041534	128.34	0.0049795	3.497	13.392	21.00	1.634	0.0030473

ตารางที่ ค.2 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซับคือน้ำประปา (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.65 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$K_G a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_G
30	2.45	0.000117413	45.28	0.0099764	3.804	22.543	21.50	3.179	0.0031382
60	5.63	0.000135525	90.40	0.0099764	3.804	22.543	21.50	3.179	0.0031382
90	9.24	0.000149060	135.35	0.0099764	3.804	22.543	21.50	3.179	0.0031382
120	9.36	0.000113267	180.13	0.0099764	3.804	22.543	21.50	3.179	0.0031382
150	11.26	0.000109309	224.74	0.0099764	3.804	22.543	21.50	3.179	0.0031382
180	14.37	0.000116779	269.19	0.0099764	3.804	22.543	21.50	3.179	0.0031382
210	18.74	0.000131375	313.47	0.0099764	3.804	22.543	21.50	3.179	0.0031382
240	21.47	0.000132231	357.60	0.0099764	3.804	22.543	21.50	3.179	0.0031382

ตารางที่ ค.3 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซับคือน้ำประปา (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 1.20 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$K_G a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_G
30	4.16	0.000152240	109.53	0.0153078	4.078	33.781	21.40	5.500	0.0027831
60	7.64	0.000140334	218.52	0.0153078	4.078	33.781	21.40	5.500	0.0027831
90	11.53	0.000141799	326.97	0.0153078	4.078	33.781	21.40	5.500	0.0027831
120	16.84	0.000156245	434.90	0.0153078	4.078	33.781	21.40	5.500	0.0027831
150	20.17	0.000150271	542.30	0.0153078	4.078	33.781	21.40	5.500	0.0027831
180	26.41	0.000165118	649.18	0.0153078	4.078	33.781	21.40	5.500	0.0027831
210	36.40	0.000197284	755.55	0.0153078	4.078	33.781	21.40	5.500	0.0027831
240	45.83	0.000219702	861.42	0.0153078	4.078	33.781	21.40	5.500	0.0027831

ตารางที่ ค.4 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซับคือน้ำประปา (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 2.00 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$K_G a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_G
30	8.86	0.000240668	246.17	0.0221221	4.734	35.989	21.20	7.971	0.0027752
60	16.74	0.000228827	490.29	0.0221221	4.734	35.989	21.20	7.971	0.0027752
90	26.16	0.000240252	732.41	0.0221221	4.734	35.989	21.20	7.971	0.0027752
120	38.95	0.000271153	972.56	0.0221221	4.734	35.989	21.20	7.971	0.0027752
150	50.63	0.000284749	1210.76	0.0221221	4.734	35.989	21.20	7.971	0.0027752
180	67.18	0.000319315	1447.04	0.0221221	4.734	35.989	21.20	7.971	0.0027752
210	79.04	0.000325319	1681.45	0.0221221	4.734	35.989	21.20	7.971	0.0027752
240	90.48	0.000329108	1914.00	0.0221221	4.734	35.989	21.20	7.971	0.0027752

ตารางที่ ค.5 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 3.50 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$K_G a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_G
30	15.37	0.000314193	572.25	0.0334670	5.224	46.869	21.00	12.762	0.0026225
60	46.93	0.000489138	1136.92	0.0334670	5.224	46.869	21.00	12.762	0.0026225
90	59.73	0.000418382	1694.22	0.0334670	5.224	46.869	21.00	12.762	0.0026225
120	78.39	0.000416717	2244.34	0.0334670	5.224	46.869	21.00	12.762	0.0026225
150	112.56	0.000489357	2787.46	0.0334670	5.224	46.869	21.00	12.762	0.0026225
180	123.84	0.000451989	3323.75	0.0334670	5.224	46.869	21.00	12.762	0.0026225
210	158.93	0.000508927	3853.38	0.0334670	5.224	46.869	21.00	12.762	0.0026225
240	179.81	0.000510990	4376.53	0.0334670	5.224	46.869	21.00	12.762	0.0026225

ตารางที่ ค.6 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 1.25) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$K_G a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_G
30	1.27	0.000078873	16.12	0.0047618	3.722	11.1076	21.70	1.486	0.0032050
60	1.88	0.000058445	32.22	0.0047618	3.722	11.1076	21.70	1.486	0.0032050
90	3.03	0.000062932	48.28	0.0047618	3.722	11.1076	21.70	1.486	0.0032050
120	3.94	0.000061479	64.31	0.0047618	3.722	11.1076	21.70	1.486	0.0032050
150	4.95	0.000061908	80.31	0.0047618	3.722	11.1076	21.70	1.486	0.0032050
180	6.46	0.000067519	96.29	0.0047618	3.722	11.1076	21.70	1.486	0.0032050
210	7.04	0.000063138	112.23	0.0047618	3.722	11.1076	21.70	1.486	0.0032050
240	7.42	0.000058270	128.14	0.0047618	3.722	11.1076	21.70	1.486	0.0032050

ตารางที่ ค.7 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 1.25) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.65 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$K_G a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_G
30	2.83	0.000135698	45.27	0.0085131	4.010	19.245	21.20	3.058	0.0027835
60	7.85	0.000189572	90.34	0.0085131	4.010	19.245	21.20	3.058	0.0027835
90	10.27	0.000165924	135.21	0.0085131	4.010	19.245	21.20	3.058	0.0027835
120	11.47	0.000139227	179.88	0.0085131	4.010	19.245	21.20	3.058	0.0027835
150	14.02	0.000136651	224.35	0.0085131	4.010	19.245	21.20	3.058	0.0027835
180	16.35	0.000133255	268.63	0.0085131	4.010	19.245	21.20	3.058	0.0027835
210	20.34	0.000142929	312.72	0.0085131	4.010	19.245	21.20	3.058	0.0027835
240	24.08	0.000148880	356.62	0.0085131	4.010	19.245	21.20	3.058	0.0027835

ตารางที่ ค.8 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 1.25) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 1.20 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$K_G a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_G
30	6.53	0.000239597	109.43	0.0140923	4.432	26.315	22.00	4.923	0.0028626
60	10.57	0.000194782	218.12	0.0140923	4.432	26.315	22.00	4.923	0.0028626
90	17.53	0.000217030	326.09	0.0140923	4.432	26.315	22.00	4.923	0.0028626
120	25.31	0.000237068	433.34	0.0140923	4.432	26.315	22.00	4.923	0.0028626
150	28.73	0.000216112	539.89	0.0140923	4.432	26.315	22.00	4.923	0.0028626
180	35.23	0.000222470	645.74	0.0140923	4.432	26.315	22.00	4.923	0.0028626
210	43.18	0.000235850	750.90	0.0140923	4.432	26.315	22.00	4.923	0.0028626
240	51.21	0.000247022	855.38	0.0140923	4.432	26.315	22.00	4.923	0.0028626

ตารางที่ ค.9 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 1.25) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 2.00 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$K_G a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_G
30	8.94	0.000242857	245.96	0.0209343	5.112	28.581	22.10	7.081	0.0029563
60	20.85	0.000285973	489.46	0.0209343	5.112	28.581	22.10	7.081	0.0029563
90	31.74	0.000292849	730.57	0.0209343	5.112	28.581	22.10	7.081	0.0029563
120	45.95	0.000321765	969.31	0.0209343	5.112	28.581	22.10	7.081	0.0029563
150	62.73	0.000356440	1205.75	0.0209343	5.112	28.581	22.10	7.081	0.0029563
180	80.54	0.000387244	1439.92	0.0209343	5.112	28.581	22.10	7.081	0.0029563
210	92.63	0.000385785	1671.86	0.0209343	5.112	28.581	22.10	7.081	0.0029563
240	114.53	0.000425520	1901.63	0.0209343	5.112	28.581	22.10	7.081	0.0029563

ตารางที่ ค.10 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 1.25) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 3.50 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$K_G a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_G
30	18.91	0.000387399	571.66	0.0319163	6.040	30.324	21.10	10.985	0.0029054
60	55.18	0.000578109	1134.62	0.0319163	6.040	30.324	21.10	10.985	0.0029054
90	68.40	0.000481744	1689.15	0.0319163	6.040	30.324	21.10	10.985	0.0029054
120	89.43	0.000478777	2235.49	0.0319163	6.040	30.324	21.10	10.985	0.0029054
150	129.41	0.000568864	2773.87	0.0319163	6.040	30.324	21.10	10.985	0.0029054
180	147.92	0.000548554	3304.54	0.0319163	6.040	30.324	21.10	10.985	0.0029054
210	174.30	0.000563974	3827.70	0.0319163	6.040	30.324	21.10	10.985	0.0029054
240	190.30	0.000544698	4343.57	0.0319163	6.040	30.324	21.10	10.985	0.0029054

ตารางที่ ค.11 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 2.50) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$K_G a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_G
30	1.43	0.000088524	16.12	0.0044633	4.299	7.209	22.50	1.241	0.0035977
60	3.11	0.000096905	32.20	0.0044633	4.299	7.209	22.50	1.241	0.0035977
90	4.14	0.000086165	48.23	0.0044633	4.299	7.209	22.50	1.241	0.0035977
120	5.37	0.000084017	64.22	0.0044633	4.299	7.209	22.50	1.241	0.0035977
150	6.41	0.000080388	80.18	0.0044633	4.299	7.209	22.50	1.241	0.0035977
180	8.22	0.000086199	96.09	0.0044633	4.299	7.209	22.50	1.241	0.0035977
210	9.81	0.000088442	111.96	0.0044633	4.299	7.209	22.50	1.241	0.0035977
240	10.96	0.000086647	127.79	0.0044633	4.299	7.209	22.50	1.241	0.0035977

ตารางที่ ค.12 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 2.50) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.65 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$K_G a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_G
30	3.64	0.000174741	45.24	0.0079797	4.629	12.511	21.00	2.675	0.0029835
60	9.59	0.000232178	90.22	0.0079797	4.629	12.511	21.00	2.675	0.0029835
90	13.95	0.000226592	134.95	0.0079797	4.629	12.511	21.00	2.675	0.0029835
120	16.84	0.000206021	179.42	0.0079797	4.629	12.511	21.00	2.675	0.0029835
150	17.85	0.000174961	223.64	0.0079797	4.629	12.511	21.00	2.675	0.0029835
180	21.53	0.000176817	267.62	0.0079797	4.629	12.511	21.00	2.675	0.0029835
210	25.03	0.000177111	311.35	0.0079797	4.629	12.511	21.00	2.675	0.0029835
240	27.04	0.000167919	354.84	0.0079797	4.629	12.511	21.00	2.675	0.0029835

ตารางที่ ค.13 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 1.20 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$K_G a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_G
30	7.34	0.000269558	109.35	0.0133600	4.984	18.504	21.00	4.586	0.0029131
60	13.51	0.000249772	217.82	0.0133600	4.984	18.504	21.00	4.586	0.0029131
90	22.59	0.000281261	325.41	0.0133600	4.984	18.504	21.00	4.586	0.0029131
120	28.88	0.000271596	432.14	0.0133600	4.984	18.504	21.00	4.586	0.0029131
150	37.42	0.000284267	538.03	0.0133600	4.984	18.504	21.00	4.586	0.0029131
180	42.85	0.000272953	643.09	0.0133600	4.984	18.504	21.00	4.586	0.0029131
210	50.13	0.000276012	747.33	0.0133600	4.984	18.504	21.00	4.586	0.0029131
240	58.26	0.000283342	850.76	0.0133600	4.984	18.504	21.00	4.586	0.0029131

ตารางที่ ค.14 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 2.50) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 2.00 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$K_G a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_G
30	10.93	0.000297398	245.68	0.0196509	5.894	18.648	21.00	6.463	0.0030403
60	28.85	0.000398321	488.37	0.0196509	5.894	18.648	21.00	6.463	0.0030403
90	39.45	0.000366331	728.13	0.0196509	5.894	18.648	21.00	6.463	0.0030403
120	55.84	0.000394297	965.05	0.0196509	5.894	18.648	21.00	6.463	0.0030403
150	78.35	0.000451201	1199.19	0.0196509	5.894	18.648	21.00	6.463	0.0030403
180	90.14	0.000437032	1430.60	0.0196509	5.894	18.648	21.00	6.463	0.0030403
210	112.63	0.000477432	1659.36	0.0196509	5.894	18.648	21.00	6.463	0.0030403
240	129.05	0.000485757	1885.52	0.0196509	5.894	18.648	21.00	6.463	0.0030403

ตารางที่ ค.15 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 2.50) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 3.50 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$K_G a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_G
30	17.3	0.000354066	571.20	0.0308430	6.489	24.455	22.00	9.807	0.0031451
60	53.85	0.000563703	1132.83	0.0308430	6.489	24.455	22.00	9.807	0.0031451
90	79.32	0.000562548	1685.19	0.0308430	6.489	24.455	22.00	9.807	0.0031451
120	116.89	0.000637026	2228.59	0.0308430	6.489	24.455	22.00	9.807	0.0031451
150	138.84	0.000614135	2763.32	0.0308430	6.489	24.455	22.00	9.807	0.0031451
180	163.96	0.000614618	3289.65	0.0308430	6.489	24.455	22.00	9.807	0.0031451
210	197.37	0.000648790	3807.83	0.0308430	6.489	24.455	22.00	9.807	0.0031451
240	204.58	0.000591373	4318.12	0.0308430	6.489	24.455	22.00	9.807	0.0031451

ตารางที่ ค.16 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 4.50) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$K_G a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_G
30	1.86	0.000115641	16.12	0.0043138	5.951	2.718	21.00	0.960	0.0044925
60	3.48	0.000108509	32.18	0.0043138	5.951	2.718	21.00	0.960	0.0044925
90	4.325	0.000090046	48.20	0.0043138	5.951	2.718	21.00	0.960	0.0044925
120	5.84	0.000091451	64.17	0.0043138	5.951	2.718	21.00	0.960	0.0044925
150	8.42	0.000105996	80.10	0.0043138	5.951	2.718	21.00	0.960	0.0044925
180	9.91	0.000104254	95.98	0.0043138	5.951	2.718	21.00	0.960	0.0044925
210	10.53	0.000095063	111.81	0.0043138	5.951	2.718	21.00	0.960	0.0044925
240	11.63	0.000092061	127.59	0.0043138	5.951	2.718	21.00	0.960	0.0044925

ตารางที่ ค.17 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 4.50) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.65 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$K_G a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_G
30	6.13	0.000295092	45.18	0.0072310	6.195	5.219	21.20	1.980	0.0036526
60	14.87	0.000362791	90.00	0.0072310	6.195	5.219	21.20	1.980	0.0036526
90	19.36	0.000316974	134.46	0.0072310	6.195	5.219	21.20	1.980	0.0036526
120	23.59	0.000291489	178.56	0.0072310	6.195	5.219	21.20	1.980	0.0036526
150	26.37	0.000261751	222.31	0.0072310	6.195	5.219	21.20	1.980	0.0036526
180	29.09	0.000241604	265.71	0.0072310	6.195	5.219	21.20	1.980	0.0036526
210	31.25	0.000223186	308.78	0.0072310	6.195	5.219	21.20	1.980	0.0036526
240	32.34	0.000202431	351.51	0.0072310	6.195	5.219	21.20	1.980	0.0036526

ตารางที่ ค.18 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 4.50) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 1.20 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$K_G a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_G
30	6.42	0.000235532	109.30	0.0129002	6.589	8.008	21.10	3.453	0.0037364
60	17.84	0.000331416	217.59	0.0129002	6.589	8.008	21.10	3.453	0.0037364
90	26.45	0.000330751	324.91	0.0129002	6.589	8.008	21.10	3.453	0.0037364
120	32.46	0.000306502	431.27	0.0129002	6.589	8.008	21.10	3.453	0.0037364
150	43.82	0.000335331	536.68	0.0129002	6.589	8.008	21.10	3.453	0.0037364
180	46.28	0.000295965	641.16	0.0129002	6.589	8.008	21.10	3.453	0.0037364
210	55.82	0.000309376	744.73	0.0129002	6.589	8.008	21.10	3.453	0.0037364
240	65.79	0.000322800	847.41	0.0129002	6.589	8.008	21.10	3.453	0.0037364

ตารางที่ ค.19 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 4.50) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 2.00 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$K_G a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_G
30	12.29	0.000334774	245.43	0.0186877	6.984	11.208	21.10	5.429	0.0034423
60	35.41	0.000491564	487.38	0.0186877	6.984	11.208	21.10	5.429	0.0034423
90	44.43	0.000414299	725.95	0.0186877	6.984	11.208	21.10	5.429	0.0034423
120	62.21	0.000441660	961.23	0.0186877	6.984	11.208	21.10	5.429	0.0034423
150	87.82	0.000509908	1193.32	0.0186877	6.984	11.208	21.10	5.429	0.0034423
180	111.04	0.000548365	1422.30	0.0186877	6.984	11.208	21.10	5.429	0.0034423
210	133.54	0.000576805	1648.24	0.0186877	6.984	11.208	21.10	5.429	0.0034423
240	142.39	0.000542508	1871.24	0.0186877	6.984	11.208	21.10	5.429	0.0034423

ตารางที่ ค.20 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 4.50) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 3.50 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$K_G a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_G
30	23.28	0.000478209	570.59	0.0295655	7.550	15.526	22.00	8.429	0.0035077
60	64.84	0.000683464	1130.43	0.0295655	7.550	15.526	22.00	8.429	0.0035077
90	91.53	0.000654242	1679.91	0.0295655	7.550	15.526	22.00	8.429	0.0035077
120	120.54	0.000658490	2219.43	0.0295655	7.550	15.526	22.00	8.429	0.0035077
150	148.27	0.000659977	2749.32	0.0295655	7.550	15.526	22.00	8.429	0.0035077
180	184.2	0.000700050	3269.93	0.0295655	7.550	15.526	22.00	8.429	0.0035077
210	204.58	0.000675855	3781.58	0.0295655	7.550	15.526	22.00	8.429	0.0035077
240	224.75	0.000658898	4284.56	0.0295655	7.550	15.526	22.00	8.429	0.0035077

ตารางที่ ค.21 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$\ln[(C_L^* - C_L)/C_L^*]$	$K_L a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_L
30	341	0.007434053	41.90	-0.0205182	0.0006839	3.643	11.846	22.10	1.490	0.0004589
60	949	0.017173362	68.64	-0.0338352	0.0005639	3.643	11.846	22.10	1.490	0.0003783
90	1274	0.023750932	88.32	-0.0437510	0.0004861	3.643	11.846	22.10	1.490	0.0003261
120	1427	0.026843491	103.90	-0.0516713	0.0004306	3.643	11.846	22.10	1.490	0.0002889
150	1503	0.027302452	116.80	-0.0582756	0.0003885	3.643	11.846	22.10	1.490	0.0002607
180	1537	0.025642309	127.80	-0.0639451	0.0003553	3.643	11.846	22.10	1.490	0.0002383
210	1582	0.026157407	137.40	-0.0689157	0.0003282	3.643	11.846	22.10	1.490	0.0002202
240	1711	0.044837526	145.90	-0.0733435	0.0003056	3.643	11.846	22.10	1.490	0.0002050

ตารางที่ ค.22 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.65 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$\ln[(C_L^* - C_L)/C_L^*]$	$K_L a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_L
30	596	0.011672542	105.86	-0.0526738	0.0017558	3.938	20.319	22.00	3.001	0.0005851
60	1398	0.025888889	169.35	-0.0856517	0.0014275	3.938	20.319	22.00	3.001	0.0004757
90	1658	0.028784722	214.85	-0.1099723	0.0012219	3.938	20.319	22.00	3.001	0.0004072
120	1819	0.031645790	250.34	-0.1293593	0.0010780	3.938	20.319	22.00	3.001	0.0003592
150	1872	0.029295775	279.43	-0.1455394	0.0009703	3.938	20.319	22.00	3.001	0.0003233
180	1941	0.030205415	304.09	-0.1594601	0.0008859	3.938	20.319	22.00	3.001	0.0002952
210	2063	0.041803445	325.49	-0.1716987	0.0008176	3.938	20.319	22.00	3.001	0.0002724
240	2109	0.046494709	344.39	-0.1826344	0.0007610	3.938	20.319	22.00	3.001	0.0002536

ตารางที่ ค.23 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 1.20 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$\ln[(C_L^* - C_L)/C_L^*]$	$K_L a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_L
30	987	0.016474712	245.67	-0.1268004	0.0042267	4.207	30.767	22.00	5.186	0.0008150
60	2004	0.034081633	387.75	-0.2082143	0.0034702	4.207	30.767	22.00	5.186	0.0006691
90	2289	0.036594724	488.12	-0.2700006	0.0030000	4.207	30.767	22.00	5.186	0.0005785
120	2463	0.039395393	565.78	-0.3205780	0.0026715	4.207	30.767	22.00	5.186	0.0005151
150	2483	0.033040585	629.15	-0.3638245	0.0024255	4.207	30.767	22.00	5.186	0.0004677
180	2579	0.035377229	682.67	-0.4018674	0.0022326	4.207	30.767	22.00	5.186	0.0004305
210	2615	0.033746290	728.99	-0.4360077	0.0020762	4.207	30.767	22.00	5.186	0.0004003
240	2745	0.047855649	769.83	-0.4671025	0.0019463	4.207	30.767	22.00	5.186	0.0003753

ตารางที่ ค.24 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 2.00 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$\ln[(C_L^* - C_L)/C_L^*]$	$K_L a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_L
30	1434	0.020000000	485.25	-0.2682232	0.0089408	4.859	33.282	21.50	7.658	0.0011675
60	2673	0.038705474	743.69	-0.4471676	0.0074528	4.859	33.282	21.50	7.658	0.0009732
90	3075	0.045616377	920.94	-0.5914927	0.0065721	4.859	33.282	21.50	7.658	0.0008582
120	3296	0.052020202	1056.00	-0.7173974	0.0059783	4.859	33.282	21.50	7.658	0.0007807
150	3385	0.051404708	1165.14	-0.8321630	0.0055478	4.859	33.282	21.50	7.658	0.0007245
180	3416	0.046514161	1256.72	-0.9398039	0.0052211	4.859	33.282	21.50	7.658	0.0006818
210	3471	0.046823149	1335.62	-1.0428452	0.0049659	4.859	33.282	21.50	7.658	0.0006485
240	3560	0.056186869	1404.93	-1.1430423	0.0047627	4.859	33.282	21.50	7.658	0.0006219

ตารางที่ ค.25 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 3.50 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$\ln[(C_L^* - C_L)/C_L^*]$	$K_L a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_L
30	2035	0.025263811	985.60	-0.6494736	0.0216491	5.358	43.440	21.00	12.442	0.0017399
60	3597	0.053383793	1479.82	-1.2630348	0.0210506	5.358	43.440	21.00	12.442	0.0016918
90	3972	0.059001783	1812.36	-2.1067879	0.0234088	5.358	43.440	21.00	12.442	0.0018814
120	4113	0.056466227	2063.32	-2.1067879	0.0234088	5.358	43.440	21.00	12.442	0.0018814
150	4196	0.053384224	2264.94	-2.1067879	0.0234088	5.358	43.440	21.00	12.442	0.0018814
180	4211	0.045961580	2433.47	-2.1067879	0.0234088	5.358	43.440	21.00	12.442	0.0018814
210	4392	0.063763066	2578.26	-2.1067879	0.0234088	5.358	43.440	21.00	12.442	0.0018814
240	4457	0.070611534	2705.18	-2.1067879	0.0234088	5.358	43.440	21.00	12.442	0.0018814

ตารางที่ ค.26 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 1.25) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$\ln[(C_L^* - C_L)/C_L^*]$	$K_L a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_L
30	369	0.008194537	40.93	-0.0200395	0.0006680	3.893	9.707	21.50	1.434	0.0004659
60	945	0.017027027	66.32	-0.0326772	0.0005446	3.893	9.707	21.50	1.434	0.0003799
90	1289	0.024650985	84.78	-0.0419647	0.0004663	3.893	9.707	21.50	1.434	0.0003252
120	1459	0.029582320	99.29	-0.0493265	0.0004111	3.893	9.707	21.50	1.434	0.0002867
150	1448	0.022875197	111.25	-0.0554337	0.0003696	3.893	9.707	21.50	1.434	0.0002578
180	1524	0.024470135	121.42	-0.0606573	0.0003370	3.893	9.707	21.50	1.434	0.0002350
210	1692	0.045264848	130.26	-0.0652240	0.0003106	3.893	9.707	21.50	1.434	0.0002166
240	1719	0.047433775	138.09	-0.0692830	0.0002887	3.893	9.707	21.50	1.434	0.0002014

ตารางที่ ค.27 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 1.25) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.65 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$\ln[(C_L^* - C_L)/C_L^*]$	$K_L a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_L
30	638	0.012811245	101.19	-0.0502812	0.0016760	4.144	17.437	21.50	2.918	0.0005743
60	1421	0.027004941	158.90	-0.0801357	0.0013356	4.144	17.437	21.50	2.918	0.0004577
90	1684	0.030474122	199.46	-0.1016604	0.0011296	4.144	17.437	21.50	2.918	0.0003871
120	1827	0.032324841	230.75	-0.1185927	0.0009883	4.144	17.437	21.50	2.918	0.0003387
150	1909	0.032716367	256.24	-0.1325976	0.0008840	4.144	17.437	21.50	2.918	0.0003029
180	2074	0.051438492	277.74	-0.1445668	0.0008031	4.144	17.437	21.50	2.918	0.0002752
210	2102	0.051068999	296.34	-0.1550349	0.0007383	4.144	17.437	21.50	2.918	0.0002530
240	2125	0.051180154	312.72	-0.1643488	0.0006848	4.144	17.437	21.50	2.918	0.0002347

ตารางที่ ค.28 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 1.25) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 1.20 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$\ln[(C_L^* - C_L)/C_L^*]$	$K_L a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_L
30	992	0.016599732	234.74	-0.1207960	0.0040265	4.578	23.877	20.80	5.041	0.0007988
60	2085	0.038654060	364.03	-0.1941400	0.0032357	4.578	23.877	20.80	5.041	0.0006419
90	2295	0.037010160	453.73	-0.2483838	0.0027598	4.578	23.877	20.80	5.041	0.0005475
120	2481	0.041103380	522.49	-0.2920497	0.0024337	4.578	23.877	20.80	5.041	0.0004828
150	2542	0.038340875	578.26	-0.3289208	0.0021928	4.578	23.877	20.80	5.041	0.0004350
180	2698	0.052408702	625.17	-0.3610265	0.0020057	4.578	23.877	20.80	5.041	0.0003979
210	2705	0.046168288	665.66	-0.3895895	0.0018552	4.578	23.877	20.80	5.041	0.0003680
240	2763	0.052092760	701.27	-0.4154061	0.0017309	4.578	23.877	20.80	5.041	0.0003434

ตารางที่ ค.29 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 1.25) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 2.00 มิลลิลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$\ln[(C_L^* - C_L)/C_L^*]$	$K_L a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_L
30	1473	0.020884730	437.28	-0.238173440	0.007939115	5.270	26.087	21.10	7.194	0.0011035
60	2703	0.040187333	648.04	-0.376991895	0.006283198	5.270	26.087	21.10	7.194	0.0008733
90	3275	0.066282129	788.22	-0.481298555	0.005347762	5.270	26.087	21.10	7.194	0.0007433
120	3304	0.052948718	893.42	-0.567404150	0.004728368	5.270	26.087	21.10	7.194	0.0006572
150	3472	0.065757576	977.65	-0.642128598	0.004280857	5.270	26.087	21.10	7.194	0.0005950
180	3595	0.087214944	1047.90	-0.709025953	0.003939033	5.270	26.087	21.10	7.194	0.0005475
210	3592	0.073727422	1108.16	-0.770202932	0.003667633	5.270	26.087	21.10	7.194	0.0005098
240	3619	0.073556911	1160.91	-0.827020187	0.003445917	5.270	26.087	21.10	7.194	0.0004790

ตารางที่ ค.30 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 1.25) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$\ln[(C_L^* - C_L)/C_L^*]$	$K_L a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_L
30	2067	0.025970599	936.16	-0.6047317	0.0201577	6.138	28.894	21.00	10.861	0.0018559
60	3683	0.059193185	1383.71	-1.1108395	0.0185140	6.138	28.894	21.00	10.861	0.0017046
90	4073	0.069946763	1680.72	-1.6857151	0.0187302	6.138	28.894	21.00	10.861	0.0017245
120	4174	0.063705739	1903.36	-2.5588912	0.0213241	6.138	28.894	21.00	10.861	0.0019633
150	4209	0.054911937	2081.52	-2.5588912	0.0213241	6.138	28.894	21.00	10.861	0.0019633
180	4377	0.070894072	2230.04	-2.5588912	0.0213241	6.138	28.894	21.00	10.861	0.0019633
210	4394	0.064183465	2357.40	-2.5588912	0.0213241	6.138	28.894	21.00	10.861	0.0019633
240	4495	0.083240741	2468.87	-2.5588912	0.0213241	6.138	28.894	21.00	10.861	0.0019633

ตารางที่ ค.31 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 2.50) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$\ln[(C_L^* - C_L)/C_L^*]$	$K_L a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_L
30	352	0.007729469	39.52	-0.0193427	0.0006448	4.446	6.517	21.00	1.285	0.0005017
60	982	0.018430931	63.06	-0.0310458	0.0005174	4.446	6.517	21.00	1.285	0.0004026
90	1294	0.024961420	79.89	-0.0394943	0.0004388	4.446	6.517	21.00	1.285	0.0003414
120	1495	0.033222222	92.99	-0.0461231	0.0003844	4.446	6.517	21.00	1.285	0.0002991
150	1539	0.030996979	103.72	-0.0515856	0.0003439	4.446	6.517	21.00	1.285	0.0002676
180	1624	0.036675700	112.81	-0.0562354	0.0003124	4.446	6.517	21.00	1.285	0.0002431
210	1702	0.048242630	120.70	-0.0602859	0.0002871	4.446	6.517	21.00	1.285	0.0002234
240	1729	0.051093381	127.66	-0.0638758	0.0002661	4.446	6.517	21.00	1.285	0.0002071

ตารางที่ ค.32 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 2.50) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.65 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$\ln[(C_L^* - C_L)/C_L^*]$	$K_L a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_L
30	698	0.014541667	101.73	-0.0505651	0.0016855	4.752	11.564	21.00	2.605	0.0006469
60	1512	0.032061069	160.10	-0.0807737	0.0013462	4.752	11.564	21.00	2.605	0.0005167
90	1736	0.034321866	201.20	-0.1026091	0.0011401	4.752	11.564	21.00	2.605	0.0004376
120	1890	0.038602941	232.96	-0.1198108	0.0009984	4.752	11.564	21.00	2.605	0.0003832
150	1926	0.034516129	258.84	-0.1340527	0.0008937	4.752	11.564	21.00	2.605	0.0003430
180	1994	0.036440058	280.68	-0.1462331	0.0008124	4.752	11.564	21.00	2.605	0.0003118
210	2052	0.039721254	299.58	-0.1568921	0.0007471	4.752	11.564	21.00	2.605	0.0002868
240	2132	0.053514056	316.24	-0.1663801	0.0006933	4.752	11.564	21.00	2.605	0.0002661

ตารางที่ ค.33 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 2.50) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 1.20 มิลลิลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$\ln[(C_L^* - C_L)/C_L^*]$	$K_L a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_L
30	1036	0.017727584	226.25	-0.1161876	0.0038729	5.111	17.159	21.00	4.472	0.0008660
60	2175	0.044808405	346.25	-0.1837657	0.0030628	5.111	17.159	21.00	4.472	0.0006849
90	2385	0.044240401	428.43	-0.2328331	0.0025870	5.111	17.159	21.00	4.472	0.0005785
120	2548	0.048700306	491.01	-0.2718780	0.0022657	5.111	17.159	21.00	4.472	0.0005066
150	2624	0.048592593	541.56	-0.3045686	0.0020305	5.111	17.159	21.00	4.472	0.0004540
180	2641	0.042776158	583.96	-0.3328421	0.0018491	5.111	17.159	21.00	4.472	0.0004135
210	2741	0.053713502	620.48	-0.3578531	0.0017041	5.111	17.159	21.00	4.472	0.0003810
240	2794	0.061271930	652.56	-0.3803477	0.0015848	5.111	17.159	21.00	4.472	0.0003544

ตารางที่ ค.34 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 2.50) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 2.00 มิลลิลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$\ln[(C_L^* - C_L)/C_L^*]$	$K_L a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_L
30	1572	0.023268206	429.19	-0.2332317	0.0077744	6.007	17.615	21.00	6.342	0.0012259
60	2594	0.035149051	632.58	-0.3661678	0.0061028	6.007	17.615	21.00	6.342	0.0009623
90	3304	0.070598291	767.24	-0.4650250	0.0051669	6.007	17.615	21.00	6.342	0.0008147
120	3481	0.084572400	868.06	-0.5460182	0.0045502	6.007	17.615	21.00	6.342	0.0007175
150	3492	0.070120482	948.68	-0.6158617	0.0041057	6.007	17.615	21.00	6.342	0.0006474
180	3499	0.059811966	1015.86	-0.6780343	0.0037669	6.007	17.615	21.00	6.342	0.0005940
210	3601	0.076895153	1073.44	-0.7345894	0.0034980	6.007	17.615	21.00	6.342	0.0005516
240	3644	0.084351852	1123.83	-0.7868488	0.0032785	6.007	17.615	21.00	6.342	0.0005170

ตารางที่ ค.35 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 2.50) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$\ln[(C_L^* - C_L)/C_L^*]$	$K_L a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_L
30	2103	0.026786397	823.91	-0.5097188	0.0169906	6.579	23.465	21.20	10.038	0.0016927
60	3782	0.067199716	1177.03	-0.8451068	0.0140851	6.579	23.465	21.20	10.038	0.0014032
90	4179	0.085828712	1405.02	-1.1425410	0.0126949	6.579	23.465	21.20	10.038	0.0012647
120	4275	0.080056180	1573.72	-1.4386766	0.0119890	6.579	23.465	21.20	10.038	0.0011944
150	4382	0.086429980	1707.69	-1.7584605	0.0117231	6.579	23.465	21.20	10.038	0.0011679
180	4491	0.108951965	1818.81	-2.1332600	0.0118514	6.579	23.465	21.20	10.038	0.0011807
210	4534	0.116077829	1913.76	-2.6251125	0.0125005	6.579	23.465	21.20	10.038	0.0012454
240	4536	0.102717391	1996.64	-3.4339925	0.0143083	6.579	23.465	21.20	10.038	0.0014255

ตารางที่ ค.36 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 4.50) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 มิลลิลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$\ln[(C_L^* - C_L)/C_L^*]$	$K_L a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_L
30	373	0.008305500	36.98	-0.0180855	0.0006028	6.083	2.544	21.00	0.939	0.0006417
60	1063	0.021953738	57.46	-0.0282468	0.0004708	6.083	2.544	21.00	0.939	0.0005012
90	1402	0.033285850	71.70	-0.0353724	0.0003930	6.083	2.544	21.00	0.939	0.0004184
120	1585	0.046345029	82.63	-0.0408747	0.0003406	6.083	2.544	21.00	0.939	0.0003626
150	1603	0.040024969	91.50	-0.0453626	0.0003024	6.083	2.544	21.00	0.939	0.0003219
180	1684	0.050298686	98.96	-0.0491553	0.0002731	6.083	2.544	21.00	0.939	0.0002907
210	1731	0.059301131	105.41	-0.0524413	0.0002497	6.083	2.544	21.00	0.939	0.0002658
240	1743	0.057185039	111.08	-0.0553413	0.0002306	6.083	2.544	21.00	0.939	0.0002455

ตารางที่ ค.37 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 4.50) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.65 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$\ln[(C_L^* - C_L)/C_L^*]$	$K_L a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_L
30	702	0.014661654	95.31	-0.0473009	0.0015767	6.329	4.895	21.00	1.956	0.0008060
60	1552	0.034673816	146.36	-0.0735892	0.0012265	6.329	4.895	21.00	1.956	0.0006270
90	1782	0.038372093	181.44	-0.0920625	0.0010229	6.329	4.895	21.00	1.956	0.0005229
120	1947	0.046225071	208.20	-0.1063852	0.0008865	6.329	4.895	21.00	1.956	0.0004532
150	1992	0.043398693	229.83	-0.1181181	0.0007875	6.329	4.895	21.00	1.956	0.0004025
180	2101	0.059249859	248.00	-0.1280753	0.0007115	6.329	4.895	21.00	1.956	0.0003637
210	2126	0.058859358	263.65	-0.1367363	0.0006511	6.329	4.895	21.00	1.956	0.0003328
240	2138	0.055677083	277.40	-0.1444084	0.0006017	6.329	4.895	21.00	1.956	0.0003076

ตารางที่ ค.38 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 4.50) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 1.20 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$\ln[(C_L^* - C_L)/C_L^*]$	$K_L a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_L
30	1093	0.019266702	205.58	-0.1049562	0.0034985	6.691	7.648	21.10	3.400	0.0010290
60	2217	0.048174707	305.03	-0.1599779	0.0026663	6.691	7.648	21.10	3.400	0.0007842
90	2501	0.057533931	371.25	-0.1983686	0.0022041	6.691	7.648	21.10	3.400	0.0006483
120	2573	0.052169505	420.97	-0.2281936	0.0019016	6.691	7.648	21.10	3.400	0.0005593
150	2712	0.066470588	460.80	-0.2527406	0.0016849	6.691	7.648	21.10	3.400	0.0004956
180	2784	0.077333333	494.02	-0.2736886	0.0015205	6.691	7.648	21.10	3.400	0.0004472
210	2835	0.090604027	522.51	-0.2920156	0.0013906	6.691	7.648	21.10	3.400	0.0004090
240	2801	0.063775046	547.47	-0.3083433	0.0012848	6.691	7.648	21.10	3.400	0.0003779

ตารางที่ ค.39 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 4.50) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 2.00 มิลลิลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$\ln[(C_L^* - C_L)/C_L^*]$	$K_L a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_L
30	1591	0.023749813	369.36	-0.1972834	0.0065761	7.097	10.681	21.80	5.171	0.0012718
60	2851	0.048835218	523.64	-0.2928037	0.0048801	7.097	10.681	21.80	5.171	0.0009438
90	3219	0.059118457	622.69	-0.3593118	0.0039924	7.097	10.681	21.80	5.171	0.0007721
120	3582	0.123347107	695.79	-0.4113966	0.0034283	7.097	10.681	21.80	5.171	0.0006630
150	3603	0.108687783	753.75	-0.4547144	0.0030314	7.097	10.681	21.80	5.171	0.0005863
180	3647	0.114469554	801.77	-0.4920885	0.0027338	7.097	10.681	21.80	5.171	0.0005287
210	3702	0.144496487	842.78	-0.5251437	0.0025007	7.097	10.681	21.80	5.171	0.0004836
240	3675	0.102768456	878.56	-0.5549057	0.0023121	7.097	10.681	21.80	5.171	0.0004471

ตารางที่ ค.40 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในตัวดูดซึมคือน้ำประปา (OR 4.50) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$\ln[(C_L^* - C_L)/C_L^*]$	$K_L a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_L
30	2092	0.026534754	805.56	-0.4952219	0.0165074	7.660	14.866	21.50	8.501	0.0019419
60	3862	0.075019425	1144.63	-0.8095926	0.0134932	7.660	14.866	21.50	8.501	0.0015873
90	4184	0.086733002	1362.67	-1.0807923	0.0120088	7.660	14.866	21.50	8.501	0.0014127
120	4395	0.112692308	1523.70	-1.3422719	0.0111856	7.660	14.866	21.50	8.501	0.0013158
150	4417	0.097183718	1651.44	-1.6128556	0.0107524	7.660	14.866	21.50	8.501	0.0012649
180	4472	0.100179211	1757.32	-1.9106714	0.0106148	7.660	14.866	21.50	8.501	0.0012487
210	4501	0.097869102	1847.75	-2.2620241	0.0107715	7.660	14.866	21.50	8.501	0.0012671
240	4553	0.113597804	1926.66	-2.7199088	0.0113330	7.660	14.866	21.50	8.501	0.0013332

ตารางที่ ค.41 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึม SDS 0.2 CMC (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 มิลลิลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$K_G a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_G
30	0	0.000000000	16.13	0.0055947	3.501	13.347	22.00	1.558	0.0035910
60	1.54	0.000047845	32.25	0.0055947	3.501	13.347	22.00	1.558	0.0035910
90	1.95	0.000040419	48.36	0.0055947	3.501	13.347	22.00	1.558	0.0035910
120	2.16	0.000033592	64.45	0.0055947	3.501	13.347	22.00	1.558	0.0035910
150	2.17	0.000026999	80.53	0.0055947	3.501	13.347	22.00	1.558	0.0035910
180	2.45	0.000025415	96.60	0.0055947	3.501	13.347	22.00	1.558	0.0035910
210	2.53	0.000022499	112.65	0.0055947	3.501	13.347	22.00	1.558	0.0035910
240	3.05	0.000023756	128.69	0.0055947	3.501	13.347	22.00	1.558	0.0035910

ตารางที่ ค.42 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึม SDS 0.2 CMC (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.65 มิลลิลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$K_G a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_G
30	1.92	0.000091703	45.33	0.0103168	3.795	22.704	21.90	3.128	0.0032978
60	2.66	0.000063637	90.57	0.0103168	3.795	22.704	21.90	3.128	0.0032978
90	3.33	0.000053182	135.72	0.0103168	3.795	22.704	21.90	3.128	0.0032978
120	4.68	0.000056191	180.79	0.0103168	3.795	22.704	21.90	3.128	0.0032978
150	6.13	0.000059018	225.77	0.0103168	3.795	22.704	21.90	3.128	0.0032978
180	8.39	0.000067591	270.67	0.0103168	3.795	22.704	21.90	3.128	0.0032978
210	8.82	0.000060942	315.48	0.0103168	3.795	22.704	21.90	3.128	0.0032978
240	9.52	0.000057584	360.21	0.0103168	3.795	22.704	21.90	3.128	0.0032978

ตารางที่ ค.43 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึม SDS 0.2 CMC (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 1.20 มิลลิลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$K_G a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_G
30	1.68	0.000061315	109.69	0.0187154	4.125	32.639	21.50	5.412	0.0034580
60	2.78	0.000050792	219.14	0.0187154	4.125	32.639	21.50	5.412	0.0034580
90	4.60	0.000056141	328.37	0.0187154	4.125	32.639	21.50	5.412	0.0034580
120	7.57	0.000069519	437.38	0.0187154	4.125	32.639	21.50	5.412	0.0034580
150	10.40	0.000076645	546.16	0.0187154	4.125	32.639	21.50	5.412	0.0034580
180	13.49	0.000083132	654.71	0.0187154	4.125	32.639	21.50	5.412	0.0034580
210	15.10	0.000079903	763.05	0.0187154	4.125	32.639	21.50	5.412	0.0034580
240	16.90	0.000078406	871.16	0.0187154	4.125	32.639	21.50	5.412	0.0034580

ตารางที่ ค.44 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึม SDS 0.2 CMC (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 2.00 มิลลิลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$K_G a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_G
30	4.79	0.000129683	246.81	0.0285429	4.687	37.083	21.10	8.089	0.0035285
60	7.59	0.000102979	492.86	0.0285429	4.687	37.083	21.10	8.089	0.0035285
90	10.89	0.000098767	738.15	0.0285429	4.687	37.083	21.10	8.089	0.0035285
120	16.34	0.000111609	982.68	0.0285429	4.687	37.083	21.10	8.089	0.0035285
150	18.80	0.000102969	1226.45	0.0285429	4.687	37.083	21.10	8.089	0.0035285
180	20.50	0.000093697	1469.48	0.0285429	4.687	37.083	21.10	8.089	0.0035285
210	24.22	0.000095157	1711.76	0.0285429	4.687	37.083	21.10	8.089	0.0035285
240	28.32	0.000097690	1953.31	0.0285429	4.687	37.083	21.10	8.089	0.0035285

ตารางที่ ค.45 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึม SDS 0.2 CMC (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$K_G a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_G
30	8.20	0.000166891	575.06	0.0483167	5.128	49.551	21.20	12.878	0.0037519
60	12.40	0.000126510	1148.07	0.0483167	5.128	49.551	21.20	12.878	0.0037519
90	17.30	0.000118022	1719.02	0.0483167	5.128	49.551	21.20	12.878	0.0037519
120	25.10	0.000129044	2287.95	0.0483167	5.128	49.551	21.20	12.878	0.0037519
150	27.20	0.000112017	2854.85	0.0483167	5.128	49.551	21.20	12.878	0.0037519
180	29.80	0.000102435	3419.75	0.0483167	5.128	49.551	21.20	12.878	0.0037519
210	34.41	0.000101665	3982.67	0.0483167	5.128	49.551	21.20	12.878	0.0037519
240	40.31	0.000104594	4543.60	0.0483167	5.128	49.551	21.20	12.878	0.0037519

ตารางที่ ค.46 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึม SDS 0.6 CMC (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 มิลลิลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$K_G a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_G
30	0	0.000000000	16.14	0.0059514	3.413	14.406	22.00	1.598	0.0037239
60	0.75	0.000023267	32.26	0.0059514	3.413	14.406	22.00	1.598	0.0037239
90	1.33	0.000027536	48.38	0.0059514	3.413	14.406	22.00	1.598	0.0037239
120	1.53	0.000023766	64.48	0.0059514	3.413	14.406	22.00	1.598	0.0037239
150	1.84	0.000022879	80.58	0.0059514	3.413	14.406	22.00	1.598	0.0037239
180	2.02	0.000020938	96.67	0.0059514	3.413	14.406	22.00	1.598	0.0037239
210	2.44	0.000021695	112.74	0.0059514	3.413	14.406	22.00	1.598	0.0037239
240	2.54	0.000019765	128.81	0.0059514	3.413	14.406	22.00	1.598	0.0037239

ตารางที่ ค.47 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึม SDS 0.6 CMC (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.65 มิลลิลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$K_G a$	D_B (mm.)	F_B (s^{-1})	U_B (cm/s.)	a (m^{-1})	K_G
30	1.04	0.000049740	45.34	0.0109105	3.694	24.618	22.30	3.156	0.0034568
60	2.12	0.000050775	90.61	0.0109105	3.694	24.618	22.30	3.156	0.0034568
90	2.46	0.000039298	135.81	0.0109105	3.694	24.618	22.30	3.156	0.0034568
120	3.23	0.000038742	180.95	0.0109105	3.694	24.618	22.30	3.156	0.0034568
150	4.93	0.000047373	226.03	0.0109105	3.694	24.618	22.30	3.156	0.0034568
180	6.68	0.000053682	271.03	0.0109105	3.694	24.618	22.30	3.156	0.0034568
210	8.04	0.000055455	315.98	0.0109105	3.694	24.618	22.30	3.156	0.0034568
240	9.03	0.000054580	360.86	0.0109105	3.694	24.618	22.30	3.156	0.0034568

ตารางที่ ค.48 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึม SDS 0.6 CMC (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 1.20 มิลลิลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$K_G a$	D_B (mm.)	F_B (s^{-1})	U_B (cm/s.)	a (m^{-1})	K_G
30	1.38	0.000050349	109.70	0.0191895	3.902	38.561	21.80	5.643	0.0034007
60	2.38	0.000043465	219.19	0.0191895	3.902	38.561	21.80	5.643	0.0034007
90	4.48	0.000054670	328.49	0.0191895	3.902	38.561	21.80	5.643	0.0034007
120	6.46	0.000059253	437.58	0.0191895	3.902	38.561	21.80	5.643	0.0034007
150	9.67	0.000071208	546.48	0.0191895	3.902	38.561	21.80	5.643	0.0034007
180	11.20	0.000068845	655.17	0.0191895	3.902	38.561	21.80	5.643	0.0034007
210	14.10	0.000074529	763.67	0.0191895	3.902	38.561	21.80	5.643	0.0034007
240	15.30	0.000070857	871.97	0.0191895	3.902	38.561	21.80	5.643	0.0034007

ตารางที่ ค.49 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึม SDS 0.6 CMC (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 2.00 มิลลิลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$K_G a$	D_B (mm.)	F_B (s^{-1})	U_B (cm/s.)	a (m^{-1})	K_G
30	4.54	0.000122957	246.85	0.0291171	4.602	39.176	22.00	7.902	0.0036849
60	5.88	0.000079599	492.99	0.0291171	4.602	39.176	22.00	7.902	0.0036849
90	9.96	0.000090241	738.44	0.0291171	4.602	39.176	22.00	7.902	0.0036849
120	14.19	0.000096748	983.19	0.0291171	4.602	39.176	22.00	7.902	0.0036849
150	17.20	0.000094054	1227.24	0.0291171	4.602	39.176	22.00	7.902	0.0036849
180	19.57	0.000089355	1470.62	0.0291171	4.602	39.176	22.00	7.902	0.0036849
210	24.10	0.000094696	1713.30	0.0291171	4.602	39.176	22.00	7.902	0.0036849
240	27.60	0.000095167	1955.31	0.0291171	4.602	39.176	22.00	7.902	0.0036849

ตารางที่ ค.50 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึม SDS 0.6 CMC (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$K_G a$	D_B (mm.)	F_B (s^{-1})	U_B (cm/s.)	a (m^{-1})	K_G
30	8.17	0.000166318	575.14	0.0491071	5.107	50.165	20.80	13.179	0.0037260
60	10.14	0.000103279	1148.35	0.0491071	5.107	50.165	20.80	13.179	0.0037260
90	16.21	0.000110491	1719.66	0.0491071	5.107	50.165	20.80	13.179	0.0037260
120	22.06	0.000113186	2289.08	0.0491071	5.107	50.165	20.80	13.179	0.0037260
150	24.81	0.000102011	2856.62	0.0491071	5.107	50.165	20.80	13.179	0.0037260
180	28.46	0.000097737	3422.28	0.0491071	5.107	50.165	20.80	13.179	0.0037260
210	33.10	0.000097724	3986.10	0.0491071	5.107	50.165	20.80	13.179	0.0037260
240	39.90	0.000103512	4548.06	0.0491071	5.107	50.165	20.80	13.179	0.0037260

ตารางที่ ค.51 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึม SDS 1 CMC (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$K_G a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_G
30	0	0.000000000	16.14	0.0063932	3.302	15.908	22.10	1.644	0.0038878
60	0.25	0.000007748	32.27	0.0063932	3.302	15.908	22.10	1.644	0.0038878
90	0.64	0.000013233	48.39	0.0063932	3.302	15.908	22.10	1.644	0.0038878
120	0.85	0.000013187	64.51	0.0063932	3.302	15.908	22.10	1.644	0.0038878
150	1.02	0.000012663	80.63	0.0063932	3.302	15.908	22.10	1.644	0.0038878
180	1.68	0.000017403	96.73	0.0063932	3.302	15.908	22.10	1.644	0.0038878
210	1.97	0.000017501	112.83	0.0063932	3.302	15.908	22.10	1.644	0.0038878
240	2.13	0.000016562	128.93	0.0063932	3.302	15.908	22.10	1.644	0.0038878

ตารางที่ ค.52 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึม SDS 1 CMC (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.65 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$K_G a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_G
30	0.64	0.000030352	45.34	0.0112691	3.427	30.832	22.20	3.417	0.0032975
60	1.19	0.000028463	90.63	0.0112691	3.427	30.832	22.20	3.417	0.0032975
90	2.30	0.000036734	135.86	0.0112691	3.427	30.832	22.20	3.417	0.0032975
120	2.97	0.000035610	181.04	0.0112691	3.427	30.832	22.20	3.417	0.0032975
150	4.84	0.000046502	226.16	0.0112691	3.427	30.832	22.20	3.417	0.0032975
180	5.77	0.000046308	271.22	0.0112691	3.427	30.832	22.20	3.417	0.0032975
210	7.26	0.000050050	316.23	0.0112691	3.427	30.832	22.20	3.417	0.0032975
240	8.87	0.000053630	361.19	0.0112691	3.427	30.832	22.20	3.417	0.0032975

ตารางที่ ค.53 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึม SDS 1 CMC (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 1.20 มิลลิลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$K_G a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_G
30	1.27	0.000046330	109.72	0.0199454	3.873	39.434	21.80	5.685	0.0035084
60	1.78	0.000032486	219.27	0.0199454	3.873	39.434	21.80	5.685	0.0035084
90	2.49	0.000030319	328.65	0.0199454	3.873	39.434	21.80	5.685	0.0035084
120	4.61	0.000042198	437.86	0.0199454	3.873	39.434	21.80	5.685	0.0035084
150	8.32	0.000061176	546.91	0.0199454	3.873	39.434	21.80	5.685	0.0035084
180	9.70	0.000059526	655.80	0.0199454	3.873	39.434	21.80	5.685	0.0035084
210	12.50	0.000065954	764.52	0.0199454	3.873	39.434	21.80	5.685	0.0035084
240	15.00	0.000069444	873.08	0.0199454	3.873	39.434	21.80	5.685	0.0035084

ตารางที่ ค.54 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึม SDS 1 CMC (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 2.00 มิลลิลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$K_G a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_G
30	1.82	0.000049020	246.95	0.0313018	4.504	41.789	22.00	8.074	0.0038770
60	3.84	0.000051941	493.39	0.0313018	4.504	41.789	22.00	8.074	0.0038770
90	6.55	0.000059150	739.33	0.0313018	4.504	41.789	22.00	8.074	0.0038770
120	9.56	0.000064923	984.76	0.0313018	4.504	41.789	22.00	8.074	0.0038770
150	13.11	0.000071470	1229.70	0.0313018	4.504	41.789	22.00	8.074	0.0038770
180	16.15	0.000073552	1474.14	0.0313018	4.504	41.789	22.00	8.074	0.0038770
210	21.85	0.000085696	1718.09	0.0313018	4.504	41.789	22.00	8.074	0.0038770
240	26.55	0.000091467	1961.54	0.0313018	4.504	41.789	22.00	8.074	0.0038770

ตารางที่ ค.55 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำมาก (เมทานอล) ในตัวดูดซึม SDS 1 CMC (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$K_G a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_G
30	7.83	0.000159324	575.23	0.0502218	4.857	58.316	21.10	13.661	0.0036763
60	9.62	0.000097981	1148.71	0.0502218	4.857	58.316	21.10	13.661	0.0036763
90	13.69	0.000093188	1720.46	0.0502218	4.857	58.316	21.10	13.661	0.0036763
120	18.52	0.000094830	2290.49	0.0502218	4.857	58.316	21.10	13.661	0.0036763
150	22.01	0.000090354	2858.80	0.0502218	4.857	58.316	21.10	13.661	0.0036763
180	24.87	0.000085229	3425.42	0.0502218	4.857	58.316	21.10	13.661	0.0036763
210	32.84	0.000096941	3990.35	0.0502218	4.857	58.316	21.10	13.661	0.0036763
240	36.20	0.000093697	4553.59	0.0502218	4.857	58.316	21.10	13.661	0.0036763

ตารางที่ ค.56 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในตัวดูดซึม SDS 0.2 CMC (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 มิลลิลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$\ln[(C_L^* - C_L)/C_L^*]$	$K_L a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_L
30	301	0.006394731	45.49	-0.0115130	0.0003838	3.582	12.462	21.50	1.558	0.0002463
60	803	0.012542955	77.77	-0.0197627	0.0003294	3.582	12.462	21.50	1.558	0.0002114
90	1083	0.015290131	102.81	-0.0262089	0.0002912	3.582	12.462	21.50	1.558	0.0001869
120	1256	0.017046688	123.26	-0.0315069	0.0002626	3.582	12.462	21.50	1.558	0.0001685
150	1375	0.018518519	140.56	-0.0360082	0.0002401	3.582	12.462	21.50	1.558	0.0001541
180	1436	0.018381976	155.54	-0.0399239	0.0002218	3.582	12.462	21.50	1.558	0.0001423
210	1514	0.020251471	168.76	-0.0433906	0.0002066	3.582	12.462	21.50	1.558	0.0001326
240	1602	0.024906716	180.58	-0.0465018	0.0001938	3.582	12.462	21.50	1.558	0.0001243

ตารางที่ ค.57 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในตัวดูดซึม SDS 0.2 CMC (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.65 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$\ln[(C_L^* - C_L)/C_L^*]$	$K_L a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_L
30	530	0.009992459	116.38	-0.0297222	0.0009907	3.818	22.296	22.00	3.095	0.0003201
60	1189	0.017868951	194.68	-0.0502293	0.0008372	3.818	22.296	22.00	3.095	0.0002705
90	1472	0.019800915	253.77	-0.0659885	0.0007332	3.818	22.296	22.00	3.095	0.0002369
120	1593	0.018829787	301.24	-0.0788319	0.0006569	3.818	22.296	22.00	3.095	0.0002122
150	1702	0.019038031	340.93	-0.0896955	0.0005980	3.818	22.296	22.00	3.095	0.0001932
180	1873	0.024483660	375.02	-0.0991237	0.0005507	3.818	22.296	22.00	3.095	0.0001779
210	1927	0.024733667	404.90	-0.1074618	0.0005117	3.818	22.296	22.00	3.095	0.0001653
240	2014	0.029548122	431.50	-0.1149430	0.0004789	3.818	22.296	22.00	3.095	0.0001547

ตารางที่ ค.58 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในตัวดูดซึม SDS 0.2 CMC (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 1.20 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$\ln[(C_L^* - C_L)/C_L^*]$	$K_L a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_L
30	928	0.015045396	273.40	-0.0712761	0.0023759	4.158	31.868	21.50	5.369	0.0004425
60	1673	0.021268752	452.67	-0.1209325	0.0020155	4.158	31.868	21.50	5.369	0.0003754
90	2018	0.023211410	586.28	-0.1596150	0.0017735	4.158	31.868	21.50	5.369	0.0003303
120	2231	0.024690128	692.84	-0.1915732	0.0015964	4.158	31.868	21.50	5.369	0.0002973
150	2296	0.022248062	781.47	-0.2189565	0.0014597	4.158	31.868	21.50	5.369	0.0002719
180	2405	0.023076185	857.35	-0.2430105	0.0013501	4.158	31.868	21.50	5.369	0.0002514
210	2482	0.023543920	923.68	-0.2645248	0.0012596	4.158	31.868	21.50	5.369	0.0002346
240	2593	0.027632140	982.61	-0.2840329	0.0011835	4.158	31.868	21.50	5.369	0.0002204

ตารางที่ ค.59 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในตัวดูดซึม SDS 0.2 CMC (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 2.00 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$\ln[(C_L^* - C_L)/C_L^*]$	$K_L a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_L
30	1284	0.016850394	567.81	-0.1541818	0.0051394	4.804	34.439	21.70	7.674	0.0006697
60	2301	0.025180565	927.51	-0.2657895	0.0044298	4.804	34.439	21.70	7.674	0.0005772
90	2758	0.028747134	1191.38	-0.3563888	0.0039599	4.804	34.439	21.70	7.674	0.0005160
120	2891	0.025821722	1399.88	-0.4342777	0.0036190	4.804	34.439	21.70	7.674	0.0004716
150	2995	0.024085243	1572.27	-0.5035983	0.0033573	4.804	34.439	21.70	7.674	0.0004375
180	3152	0.026058201	1719.23	-0.5667412	0.0031486	4.804	34.439	21.70	7.674	0.0004103
210	3207	0.024751100	1847.30	-0.6252222	0.0029772	4.804	34.439	21.70	7.674	0.0003880
240	3393	0.032801624	1960.80	-0.6800687	0.0028336	4.804	34.439	21.70	7.674	0.0003692

ตารางที่ ค.60 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในตัวดูดซึม SDS 0.2 CMC (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 3.50 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$\ln[(C_L^* - C_L)/C_L^*]$	$K_L a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_L
30	1802	0.020584875	1193.16	-0.3570693	0.0119023	5.302	44.831	21.00	12.574	0.0009466
60	2994	0.028910776	1924.65	-0.6623582	0.0110393	5.302	44.831	21.00	12.574	0.0008780
90	3504	0.032017544	2453.66	-0.9610235	0.0106780	5.302	44.831	21.00	12.574	0.0008492
120	3679	0.029450849	2868.32	-1.2796077	0.0106634	5.302	44.831	21.00	12.574	0.0008481
150	3881	0.030838300	3209.38	-1.6486313	0.0109909	5.302	44.831	21.00	12.574	0.0008741
180	3916	0.027059149	3499.08	-2.1252188	0.0118068	5.302	44.831	21.00	12.574	0.0009390
210	4073	0.029977184	3750.87	-2.8817069	0.0137224	5.302	44.831	21.00	12.574	0.0010913
240	4139	0.029683018	3973.55	-2.8817069	0.0137224	5.302	44.831	21.00	12.574	0.0010913

ตารางที่ ค.61 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในตัวดูดซึม SDS 0.6 CMC (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$\ln[(C_L^* - C_L)/C_L^*]$	$K_L a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_L
30	275	0.005747126	48.90	-0.0069607	0.0002320	3.408	14.469	22.00	1.601	0.0001450
60	617	0.008206970	87.41	-0.0124760	0.0002079	3.408	14.469	22.00	1.601	0.0001299
90	835	0.008964037	119.17	-0.0170489	0.0001894	3.408	14.469	22.00	1.601	0.0001184
120	1028	0.010174188	146.21	-0.0209576	0.0001746	3.408	14.469	22.00	1.601	0.0001091
150	1176	0.011296830	169.74	-0.0243725	0.0001625	3.408	14.469	22.00	1.601	0.0001015
180	1271	0.011788165	190.58	-0.0274058	0.0001523	3.408	14.469	22.00	1.601	0.0000951
210	1342	0.012103175	209.28	-0.0301350	0.0001435	3.408	14.469	22.00	1.601	0.0000897
240	1439	0.013911446	226.23	-0.0326163	0.0001359	3.408	14.469	22.00	1.601	0.0000849

ตารางที่ ค.62 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในตัวดูดซึม SDS 0.6 CMC (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.65 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$\ln[(C_L^* - C_L)/C_L^*]$	$K_L a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_L
30	447	0.008049703	127.98	-0.0183203	0.0006107	3.794	22.722	22.00	3.115	0.0001960
60	836	0.009530324	226.18	-0.0326083	0.0005435	3.794	22.722	22.00	3.115	0.0001745
90	1184	0.011809296	305.87	-0.0443557	0.0004928	3.794	22.722	22.00	3.115	0.0001582
120	1389	0.012733773	372.94	-0.0543502	0.0004529	3.794	22.722	22.00	3.115	0.0001454
150	1458	0.011571429	430.84	-0.0630599	0.0004204	3.794	22.722	22.00	3.115	0.0001350
180	1548	0.011466667	481.78	-0.0707860	0.0003933	3.794	22.722	22.00	3.115	0.0001262
210	1694	0.013355408	527.26	-0.0777341	0.0003702	3.794	22.722	22.00	3.115	0.0001188
240	1807	0.015334352	568.33	-0.0840510	0.0003502	3.794	22.722	22.00	3.115	0.0001124

ตารางที่ ค.63 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในตัวดูดซึม SDS 0.6 CMC (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 1.20 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$\ln[(C_L^* - C_L)/C_L^*]$	$K_L a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_L
30	835	0.012951761	300.74	-0.0435930	0.0014531	4.016	35.369	21.80	5.483	0.0002650
60	1205	0.011289114	524.86	-0.0773619	0.0012894	4.016	35.369	21.80	5.483	0.0002352
90	1639	0.013539860	703.57	-0.1051319	0.0011681	4.016	35.369	21.80	5.483	0.0002131
120	1872	0.014028777	852.22	-0.1288319	0.0010736	4.016	35.369	21.80	5.483	0.0001958
150	2013	0.013820803	979.47	-0.1495770	0.0009972	4.016	35.369	21.80	5.483	0.0001819
180	2115	0.013521289	1090.72	-0.1680728	0.0009337	4.016	35.369	21.80	5.483	0.0001703
210	2204	0.013455433	1189.55	-0.1847949	0.0008800	4.016	35.369	21.80	5.483	0.0001605
240	2341	0.015169777	1278.45	-0.2000802	0.0008337	4.016	35.369	21.80	5.483	0.0001521

ตารางที่ ค.64 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในตัวดูดซึม SDS 0.6 CMC (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 2.00 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$\ln[(C_L^* - C_L)/C_L^*]$	$K_L a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_L
30	1107	0.013581156	629.16	-0.0934732	0.0031158	4.752	35.582	21.90	7.687	0.0004053
60	1873	0.016000342	1084.48	-0.1670210	0.0027837	4.752	35.582	21.90	7.687	0.0003621
90	2298	0.016732197	1441.52	-0.2287322	0.0025415	4.752	35.582	21.90	7.687	0.0003306
120	2515	0.016010950	1735.26	-0.2825237	0.0023544	4.752	35.582	21.90	7.687	0.0003063
150	2673	0.015482189	1984.80	-0.3306107	0.0022041	4.752	35.582	21.90	7.687	0.0002867
180	2769	0.014581359	2201.73	-0.3743772	0.0020799	4.752	35.582	21.90	7.687	0.0002706
210	2890	0.014734373	2393.58	-0.4147492	0.0019750	4.752	35.582	21.90	7.687	0.0002569
240	3017	0.015577241	2565.56	-0.4523795	0.0018849	4.752	35.582	21.90	7.687	0.0002452

ตารางที่ ค.65 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในตัวดูดซึม SDS 0.6 CMC (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$\ln[(C_L^* - C_L)/C_L^*]$	$K_L a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_L
30	1583	0.016820742	1358.76	-0.2140825	0.0071361	5.213	47.166	21.50	12.491	0.0005713
60	2417	0.017491678	2341.82	-0.4036909	0.0067282	5.213	47.166	21.50	12.491	0.0005386
90	2869	0.017221922	3112.56	-0.5824416	0.0064716	5.213	47.166	21.50	12.491	0.0005181
120	3083	0.015694360	3746.60	-0.7579971	0.0063166	5.213	47.166	21.50	12.491	0.0005057
150	3274	0.015094514	4285.21	-0.9359545	0.0062397	5.213	47.166	21.50	12.491	0.0004995
180	3316	0.013121241	4753.38	-1.1214473	0.0062303	5.213	47.166	21.50	12.491	0.0004988
210	3510	0.013813459	5167.44	-1.3202038	0.0062867	5.213	47.166	21.50	12.491	0.0005033
240	3612	0.013583032	5538.59	-1.5397351	0.0064156	5.213	47.166	21.50	12.491	0.0005136

ตารางที่ ค.66 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในตัวดูดซึม SDS 1 CMC (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.30 มิลลิลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$\ln[(C_L^* - C_L)/C_L^*]$	$K_L a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_L
30	209	0.004194260	51.31	-0.0042823	0.0001427	3.105	19.132	22.00	1.757	0.0000813
60	457	0.005390422	94.92	-0.0079368	0.0001323	3.105	19.132	22.00	1.757	0.0000753
90	652	0.005947820	132.84	-0.0111258	0.0001236	3.105	19.132	22.00	1.757	0.0000704
120	803	0.006271478	166.40	-0.0139557	0.0001163	3.105	19.132	22.00	1.757	0.0000662
150	962	0.007063142	196.48	-0.0164999	0.0001100	3.105	19.132	22.00	1.757	0.0000626
180	1035	0.006886228	223.75	-0.0188115	0.0001045	3.105	19.132	22.00	1.757	0.0000595
210	1127	0.007222970	248.69	-0.0209299	0.0000997	3.105	19.132	22.00	1.757	0.0000567
240	1248	0.008360129	271.65	-0.0228851	0.0000954	3.105	19.132	22.00	1.757	0.0000543

ตารางที่ ค.67 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในตัวดูดซึม SDS 1 CMC (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.65 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$\ln[(C_L^* - C_L)/C_L^*]$	$K_L a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_L
30	385	0.006708486	134.27	-0.0112464	0.0003749	3.427	30.832	22.00	3.449	0.0001087
60	683	0.007048504	245.24	-0.0206367	0.0003439	3.427	30.832	22.00	3.449	0.0000997
90	891	0.007036247	339.80	-0.0287092	0.0003190	3.427	30.832	22.00	3.449	0.0000925
120	1107	0.007745592	422.19	-0.0357962	0.0002983	3.427	30.832	22.00	3.449	0.0000865
150	1279	0.008367681	495.18	-0.0421175	0.0002808	3.427	30.832	22.00	3.449	0.0000814
180	1336	0.007715408	560.71	-0.0478262	0.0002657	3.427	30.832	22.00	3.449	0.0000770
210	1482	0.008648459	620.16	-0.0530336	0.0002525	3.427	30.832	22.00	3.449	0.0000732
240	1563	0.008860544	674.56	-0.0578226	0.0002409	3.427	30.832	22.00	3.449	0.0000699

ตารางที่ ค.68 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในตัวดูดซึม SDS 1 CMC (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 1.20 มิลลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$\ln[(C_L^* - C_L)/C_L^*]$	$K_L a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_L
30	684	0.009913043	318.15	-0.0268549	0.0008952	3.982	36.283	21.90	5.504	0.0001626
60	996	0.008350101	576.23	-0.0491810	0.0008197	3.982	36.283	21.90	5.504	0.0001489
90	1302	0.008600872	793.35	-0.0683581	0.0007595	3.982	36.283	21.90	5.504	0.0001380
120	1536	0.008839779	980.75	-0.0852112	0.0007101	3.982	36.283	21.90	5.504	0.0001290
150	1672	0.008495935	1145.59	-0.1002746	0.0006685	3.982	36.283	21.90	5.504	0.0001215
180	1805	0.008505325	1292.74	-0.1139146	0.0006329	3.982	36.283	21.90	5.504	0.0001150
210	1893	0.008262407	1425.61	-0.1263940	0.0006019	3.982	36.283	21.90	5.504	0.0001093
240	2014	0.008651203	1546.74	-0.1379077	0.0005746	3.982	36.283	21.90	5.504	0.0001044

ตารางที่ ค.69 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในตัวดูดซึม SDS 1 CMC (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 2.00 มิลลิลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$\ln[(C_L^* - C_L)/C_L^*]$	$K_L a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_L
30	895	0.010185501	673.92	-0.0577635	0.0019254	4.704	36.682	22.00	7.730	0.0002491
60	1483	0.010558166	1213.54	-0.1065480	0.0017758	4.704	36.682	22.00	7.730	0.0002297
90	1795	0.009829692	1663.59	-0.1491380	0.0016571	4.704	36.682	22.00	7.730	0.0002144
120	2038	0.009509145	2049.62	-0.1871724	0.0015598	4.704	36.682	22.00	7.730	0.0002018
150	2172	0.008765133	2387.58	-0.2217026	0.0014780	4.704	36.682	22.00	7.730	0.0001912
180	2290	0.008293496	2688.15	-0.2534460	0.0014080	4.704	36.682	22.00	7.730	0.0001821
210	2473	0.008716647	2958.76	-0.2829154	0.0013472	4.704	36.682	22.00	7.730	0.0001743
240	2628	0.009155518	3204.87	-0.3104907	0.0012937	4.704	36.682	22.00	7.730	0.0001674

ตารางที่ ค.70 ผลการทดลองสารอินทรีย์ระเหยชนิดละลายน้ำน้อย (เบนซีน) ในตัวดูดซึม SDS 1 CMC (OR 0.65) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 3.50 มิลลิลิตรต่อวินาที

Time	$C_{G(out)}$	k (constant)	C_L	$\ln[(C_L^* - C_L)/C_L^*]$	$K_L a$	D_B (mm.)	F_B (s ⁻¹)	U_B (cm/s.)	a (m ⁻¹)	K_L
30	1242	0.011903393	1442.51	-0.1279892	0.0042663	5.002	53.390	21.70	12.898	0.0003308
60	1875	0.010984183	2581.42	-0.2420580	0.0040343	5.002	53.390	21.70	12.898	0.0003128
90	2349	0.011008013	3522.57	-0.3472501	0.0038583	5.002	53.390	21.70	12.898	0.0002991
120	2651	0.010677461	4324.58	-0.4465459	0.0037212	5.002	53.390	21.70	12.898	0.0002885
150	2815	0.009851269	5023.35	-0.5419053	0.0036127	5.002	53.390	21.70	12.898	0.0002801
180	2901	0.008860180	5642.44	-0.6347295	0.0035263	5.002	53.390	21.70	12.898	0.0002734
210	3089	0.009018715	6198.19	-0.7260950	0.0034576	5.002	53.390	21.70	12.898	0.0002681
240	3195	0.008729508	6702.35	-0.8168846	0.0034037	5.002	53.390	21.70	12.898	0.0002639

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพัชรพร ประจักษ์สูตร เกิดเมื่อวันที่ 22 สิงหาคม พ.ศ. 2526 ที่จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมต้นและปลาย จากโรงเรียนสุนทรวิจิตรวิทยา จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2544 จบการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปีการศึกษา 2548 และในปีการศึกษา 2549 เข้ารับการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย