

การประยุกต์ใช้วัสดุยืดหยุ่น ในกระบวนการเติมอากาศแบบฟองอากาศของระบบบำบัดน้ำเสีย  
แบบใช้ออกซิเจน



นางสาวจิตภา วชิรศักดิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

APPLICATION OF THE ELASTIC MATERIAL IN AERATION PROCESS  
FOR AEROBIC WASTEWATER TREATMENT



Miss Jidapa Wachirasak

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 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประยุกต์ใช้วัสดุค้ำหุ่น ในกระบวนการเติมอากาศแบบ  
ฟองอากาศของระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจน

โดย

นางสาวจิตภา วชิรศักดิ์


สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


 ..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

 ..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเชียร)

 ..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(อาจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล)

 ..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ)

 ..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธีกุล)

ศูนย์วิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นางสาวจิตาภา วชิรศักดิ์ : การประยุกต์ใช้วัสดุยืดหยุ่น ในกระบวนการเติมอากาศแบบ  
 ฟองอากาศของระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจน. (Application of the elastic material  
 in aeration process for aerobic wastewater treatment) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ.  
 คร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล, 153 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการประยุกต์ใช้วัสดุยืดหยุ่นประเภทยางเป็นอุปกรณ์เติมอากาศแบบ  
 ฟองอากาศ (Diffused-air aerator or diffuser) โดยวิเคราะห์ลักษณะต่างๆ ได้แก่ ด้านกายภาพ  
 (ความหนาแน่น ความยืดหยุ่น และความต้านลคในการสร้างฟองอากาศ) ด้านอุทกพลศาสตร์ของ  
 ฟองอากาศ (ขนาดและความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ ความถี่การเกิดฟองและพื้นที่ผิวสัมผัส  
 จำเพาะ) และด้านการถ่ายเทออกซิเจน (สัมประสิทธิ์และประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน) โดยดั่ง  
 ปฏิกริยาแบบฟองอากาศขนาดเล็กที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาดกว้าง ยาว และสูงเท่ากับ 0.4 0.4 และ  
 0.3 เมตร ตามลำดับ วัสดุประเภทยางที่ศึกษาได้แก่ ยางในรถยนต์ (มิชลินและบริดส โคน) และ  
 ยางพาราธรรมชาติ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 เซนติเมตรและเจาะรูเติมอากาศที่มีขนาด จำนวน  
 และระยะห่างระหว่างรูเติมอากาศต่างๆ เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้น รวมถึงประยุกต์ใช้ข้อมูล  
 ดังกล่าวเพื่อออกแบบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของอุปกรณ์

จากผลการทดลองพบว่า ยางพารามีความหนาแน่นและความยืดหยุ่นที่ต่ำที่สุด รวมไปถึงมีค่า  
 ความต้านลคในการสร้างฟองอากาศที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับยางอีกสองชนิด โดยเมื่อพิจารณาตัวแปร  
 ด้านอุทกพลศาสตร์พบว่ายางมิชลินที่มีหนึ่งรูเติมอากาศขนาดกลางสามารถให้ฟองอากาศขนาดเล็ก  
 ทำให้ได้พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ ( $a$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ( $K_L a$ ) ที่มีค่าสูง โดยให้  
 ความต้านลคต่ำในการสร้างฟองอากาศ ระยะห่างระหว่างรูเติมอากาศที่เหมาะสมมีค่า 4 มม ซึ่ง  
 สอดคล้องกับขนาดฟองอากาศจากอุปกรณ์เติมอากาศ จากการศึกษาแผ่นยางที่เจาะหลายรูเติม  
 อากาศด้วยขนาดและระยะห่างที่เหมาะสมบนยางมิชลินพบว่า จำนวนรูเติมอากาศ อัตราการไหล  
 อากาศและปริมาตรเฟสน้ำส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน (OTE) ซึ่งมีค่าสูงสุด  
 ประมาณร้อยละ 6.3 สมการทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายขนาด ( $D_b$ ) และความเร็วยลอยตัวของ  
 ฟองอากาศ ( $U_b$ ) รวมไปถึงค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายผ่านฟิล์มของเหลว ( $K_L$ ) สามารถใช้  
 ทำนายค่า  $K_L a$  โดยมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดประมาณร้อยละ 30 โดยแนวทางการดังกล่าวสามารถ  
 ช่วยลดความยุ่งยากและเวลาการทดลองหาค่า  $K_L a$  เพื่อการเปรียบเทียบอุปกรณ์เติมอากาศอย่างง่าย

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิสิต จิตาภา วชิรศักดิ์  
 สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา...2552

## 4870650221: MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: AERATION PROCESS / ELASTIC MATERIAL / FLEXIBLE GAS  
DIFFUSER / INTERFACIAL AREA / OXYGEN TRANSFER

JIDAPA WACHIRASAK: APPLICATION OF THE ELASTIC MATERIAL IN  
AERATION PROCESS FOR AEROBIC WASTEWATER TREATMENT.  
THESIS ADVISOR: PISUT PAINMANAKUL, Ph.D., 153 pp.

The objective of this research is to study the application of elastic materials as the diffused-air aerator in term of physical, bubble hydrodynamic and oxygen transfer parameters. Thus, the durability, elasticity and pressure drop ( $\Delta P$ ) were analyzed and the bubble size ( $D_B$ ), bubble formation frequency ( $f_B$ ), bubble rising velocity ( $U_B$ ) and interfacial area ( $a$ ) were considered as the hydrodynamic parameters. Moreover, the mass transfer coefficients ( $K_L a$  and  $K_L$ ) and oxygen transfer efficiency (OTE) were determined. The small bubble column used in this work was 0.4\*0.4\*0.3 m in dimension. In order to analyze the effect of different gas diffuser design factors, the synthetic used rubber (Michelin and Bridgestone types) and natural rubber with 60 mm in diameter were studied with different types of hole diameter ( $D_{OR}$ ), orifice number ( $N_{OR}$ ) and distance between crifice ( $\Delta D_o$ ).

The results have shown that the durability and elasticity obtained with the natural rubber were lesser than those obtained with the other one, whereas higher  $\Delta P$  value was observed. The Michelin rubber with one medium-orifice size can provide the small bubble size and thus high values of  $a$  and  $K_L a$  coefficients with low associated  $\Delta P$  values. Moreover, the suitable  $\Delta D_o$  values obtained was 4 mm corresponding with the generated bubble size: these results can be applied to define the optimal design for studying the multi-orifices diffuser. The orifice number, gas flow rate and liquid volume can affect the OTE value: the maximum value was 6.3%. Finally, the mathematic equations for calculating the values of  $D_B$ ,  $U_B$  and  $K_L$  can be used for predicting the  $K_L a$  coefficients with 30% error. This can facilitate the difficult experiment and time for easily comparing the  $K_L a$  from whatever the gas diffuser.

Department : Environmental Engineering.....

Student's Signature

Jidapa Wachirasak

Field of Study : Environmental Engineering.....

Advisor's Signature

Pisut P.

Academic Year : 2009.....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์ ดร. พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูง ที่คอยให้กำลังใจ คำแนะนำ และแนวทางที่ดีๆ ในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้การดูแล และให้คำปรึกษาตลอดการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว อาจารย์ผู้ทำหน้าที่เป็นประธาน อาจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธีกุล คณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้คำแนะนำ คำติชม ในการแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ครูผู้ดูแลห้องปฏิบัติการของตึกภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกๆ ท่าน ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ในการทดลองและคอยให้คำแนะนำเกี่ยวกับการทดลอง



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
<b>บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>6</b>
2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับยาง.....	6
2.1.1 ยางในประเทศไทย.....	6
2.1.2 ยางธรรมชาติ.....	7
2.2 แนวทางการประยุกต์ใช้ยางเพื่อเป็นอุปกรณ์เติมอากาศ.....	16
2.3 ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจน.....	18
2.3.1 ระบบแเอเอส.....	18
2.3.2 ประเภทของระบบแเอเอส.....	20
2.3.3 การนำวัสดุยึดหยุ่นมาใช้ในระบบเติมอากาศ.....	22
2.4 การเติมอากาศ.....	22
2.4.1 ทฤษฎีในการเติมอากาศ.....	22
2.4.2 ขั้นตอนของการเกิดการแอเรชันหรือการเติมอากาศ.....	23
2.4.3 ทฤษฎี Two film theory.....	25
2.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเติมอากาศ.....	32
2.5.1 แบบตัวกระจายอากาศ.....	32
2.5.2 แบบตีน้ำ.....	41
2.6 การศึกษาและเปรียบเทียบวัสดุยึดหยุ่น.....	43

2.6.1 ความดันลด.....	43
2.6.2 ความยืดหยุ่นและโมเดลในการคำนวณ.....	45
2.6.3 กลไกการเกิดฟองอากาศและความเร็วในการลอยตัว.....	46
2.6.4 พื้นที่ผิวสัมผัสในการถ่ายเทออกซิเจน.....	49
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	52
<b>บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>63</b>
3.1 แผนการวิจัย.....	63
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	63
3.2.1 โมเดลทดลอง.....	63
3.2.2 เครื่องเติมอากาศ.....	64
3.2.3 เครื่องวัดอัตราการไหลอากาศ.....	64
3.2.4 เครื่องวัดและควบคุมความดัน.....	64
3.2.5 ชุดอุปกรณ์วัดค่าความสามารถในการถ่ายเทออกซิเจน.....	64
3.2.6 วัสดุยืดหยุ่น.....	64
3.2.7 อุปกรณ์วิเคราะห์ผลด้วยภาพถ่าย.....	65
3.2.8 อุปกรณ์เจาะรูเติมอากาศ.....	65
3.2.9 สารเคมี.....	65
3.3 ตัวแปรที่ศึกษา.....	66
3.4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	67
3.4.1 ศึกษาทางกายภาพของวัสดุยืดหยุ่น.....	67
3.4.2 ศึกษาสภาพทางกายภาพ.....	68
3.4.3 ศึกษาขนาดอุปกรณ์เจาะรู.....	69
3.4.4 ศึกษาระยะห่างระหว่างรูเติมอากาศ.....	72
3.4.5 ออกแบบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพอุปกรณ์เติมอากาศ.....	73
3.4.6 ศึกษาอัตราการถ่ายเทและประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจน.....	74
3.4.7 โมเดลการทำนายด้วยสมการทางคณิตศาสตร์.....	74
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....</b>	<b>75</b>
4.1 การศึกษาสภาพกายภาพของวัสดุยืดหยุ่น.....	75
4.1.1 การศึกษาสภาพกายภาพ.....	75
4.2 ศึกษาขนาดอุปกรณ์เจาะรูเติมอากาศและขนาดรูเติมอากาศ.....	82
4.2.1 การศึกษาขนาดฟองอากาศ.....	82



4.2.2 ความถี่ในการเกิดฟองอากาศ.....	85
4.2.3 ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ.....	87
4.2.4 พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร.....	88
4.2.5 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร.....	90
4.2.6 สัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายผ่านฟิล์ม.....	92
4.3 ศึกษาระยะห่างระหว่างรู.....	95
4.3.1 การศึกษาขนาดฟองอากาศ.....	95
4.3.2 ความถี่ในการเกิดฟองอากาศ.....	97
4.3.3 ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ.....	99
4.3.4 พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร.....	99
4.4 ออกแบบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพอุปกรณ์เติมอากาศ.....	102
4.4.1 การศึกษาขนาดฟองอากาศ.....	102
4.4.2 ความถี่ในการเกิดฟองอากาศ.....	103
4.4.3 ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ.....	104
4.4.4 พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร.....	105
4.4.5 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร.....	107
4.4.6 สัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายผ่านฟิล์มของเหลว.....	108
4.4.7 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ( $K_L a$ ) ที่จำนวนรูเติมอากาศต่างๆ.....	110
4.4.8 ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน.....	111
4.5 การใช้โมเดลในการทำนายด้านอุทกพลศาสตร์.....	117
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>130</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	130
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	133
รายการอ้างอิง.....	134
ภาคผนวก.....	137
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	153

## สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
ตารางที่ 2.1	การประยุกต์ใช้วัสดุยึดหยุ่น ในงานด้านต่างๆ.....	16
ตารางที่ 2.2	ค่าคงที่การละลายของก๊าซ.....	23
ตารางที่ 2.3	ข้อมูลการทดลองเพื่อหา $K_L a$ .....	27
ตารางที่ 2.4	ลักษณะตัวกระจายอากาศแบบ Nonporous diffusers.....	37
ตารางที่ 2.5	โมเดลทางคณิตศาสตร์คำนวณฟองอากาศ.....	47
ตารางที่ 2.6	โมเดลทางคณิตศาสตร์คำนวณความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ.....	48
ตารางที่ 3.1	ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ศึกษา.....	65
ตารางที่ 3.2	การเปรียบเทียบความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์และการลงทุน.....	74
ตารางที่ 4.1	แสดงผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของวัสดุยึดหยุ่นทั้ง 3 ชนิด.....	75
ตารางที่ 4.2	แสดงค่า $K$ และ $n$ ของยางทั้ง 3 ชนิด.....	80
ตารางที่ 4.3	แสดงตัวแปรที่ศึกษาขนาดอุปกรณ์เจาะรูและขนาดรูเดิมอากาศ.....	98
ตารางที่ 4.4	แสดงตัวแปรที่ศึกษาระยะห่างระหว่างรูที่เหมาะสม.....	100
ตารางที่ 4.5	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง.....	113
ตารางที่ 4.6	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่าความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ....	115
ตารางที่ 4.7	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่าพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างของเหลวและก๊าซ.....	117
ตารางที่ 4.8	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายผ่านฟิล์ม.....	119
ตารางที่ 4.9	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายผ่านฟิล์มของเหลว.....	121

## สารบัญรูป

รูป		หน้า
รูปที่ 1.1	สถานการณ์คุณภาพน้ำปี 2545 –2548.....	1
รูปที่ 2.1	ลักษณะของน้ำยาง.....	7
รูปที่ 2.2	ยางแผ่น.....	8
รูปที่ 2.3	ยางเครฟ.....	8
รูปที่ 2.4	ยางแท่ง.....	9
รูปที่ 2.5	ยางสไตรีนบิวตาไดอิน.....	12
รูปที่ 2.6	ยางไฮโครเจนเนตอะโครโลไนไตรล์บิวตาไดอิน.....	13
รูปที่ 2.7	ยางคลอโรพรีน.....	13
รูปที่ 2.8	ยางบิวไทล์.....	14
รูปที่ 2.9	ยางเอทธิลีนโพรพิลีนไดอิน.....	15
รูปที่ 2.10	ยางซิลิโคน.....	16
รูปที่ 2.11	ระบบเอ็คติเว้ตเต็คสตัคจ์.....	19
รูปที่ 2.12	การถ่ายเทมวลสารในแบบ Two-film theory.....	25
รูปที่ 2.13	Fine bubble.....	33
รูปที่ 2.14	Coarse bubble.....	34
รูปที่ 2.15	Plate diffusers.....	35
รูปที่ 2.16	Tube diffusers.....	35
รูปที่ 2.17	Dome diffuser.....	36
รูปที่ 2.18	การจัดวางตัวกระจายอากาศในถังเติมอากาศ.....	39
รูปที่ 2.19	เครื่องเติมอากาศแบบอยู่บนผิวน้ำในแนวตั้ง.....	42
รูปที่ 2.20	เครื่องเติมอากาศแบบจุ่มอยู่ในน้ำในแนวตั้ง.....	42
รูปที่ 2.21	เครื่องเติมอากาศแบบอยู่บนผิวน้ำในแนวนอน.....	43
รูปที่ 2.22	การขยายของอุปกรณ์เติมอากาศ.....	45
รูปที่ 2.23	ถังปฏิกริยาแบบใบพัด.....	53
รูปที่ 2.24	ถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ.....	53
รูปที่ 2.25	การเกิดฟองแบบ dubble jet.....	55

รูป	หน้า
รูปที่ 2.26 การใช้เทคนิค CSP สำหรับการวัดขนาดฟองอากาศที่มีความหนาแน่นสูง.....	56
รูปที่ 2.27 ขนาดฟองอากาศกับความสูงของถังปฏิกริยาที่ $Q_g = 0.38 \text{ dm}^3$ .....	56
รูปที่ 2.28 ขนาดฟองอากาศกับความสูงของถังปฏิกริยาที่ $Q_g = 1.14 \text{ dm}^3$ .....	57
รูปที่ 2.29 ขนาดฟองอากาศกับความเร็วของก๊าซ.....	58
รูปที่ 2.30 พลังงานลดกับอัตราการไหลของก๊าซ.....	58
รูปที่ 2.31 แรงต่างๆ ที่ทำให้เกิดฟองอากาศ.....	60
รูปที่ 2.32 ขนาดฟองอากาศกับอัตราการไหลของก๊าซ.....	60
รูปที่ 2.33 การเปรียบเทียบขนาดฟองอากาศโดยใช้โมเดลกับวิธีการทดลอง.....	61
รูปที่ 3.1 ถังปฏิกริยา.....	62
รูปที่ 3.2 ขางพารา.....	63
รูปที่ 3.3 ขางมิชลิน.....	64
รูปที่ 3.4 ขางบริดสโตน.....	64
รูปที่ 3.5 เข็มที่นำมาเจาะรู.....	65
รูปที่ 3.6 การศึกษาความทนทาน.....	67
รูปที่ 3.7 แผนผังการศึกษาลักษณะความยืดหยุ่น.....	68
รูปที่ 3.8 การเจาะรูยาง 1 รู.....	68
รูปที่ 3.9 แผนผังการศึกษาขนาดอุปกรณ์เจาะรู.....	69
รูปที่ 3.10 แผนผังการหาความดันลด.....	69
รูปที่ 3.11 แผนผังการหาเส้นผ่านศูนย์กลางฟอง.....	70
รูปที่ 3.12 แผนผังการหาพื้นที่ผิวสัมผัส.....	70
รูปที่ 3.13 แผนผังการศึกษาระยะห่างระหว่างรูเดิมอากาศ.....	71
รูปที่ 3.14 แผนผังการศึกษาออกแบบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของอุปกรณ์เดิมอากาศ....	72
รูปที่ 3.15 แผนผังการหาค่า $K_L a$ และ $K_L$ .....	72
รูปที่ 3.16 การหาค่า OC, $R_0$ และ OTE.....	73
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความยืดหยุ่นที่จุดศูนย์กลางกับความดันลดของ ขางมิชลิน.....	75
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความยืดหยุ่นที่จุดศูนย์กลางกับความดันลดของขาง บริดส โตน.....	75
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความยืดหยุ่นที่จุดศูนย์กลางกับความดันลดของขางพารา..	76

รูป		หน้า
รูปที่ 4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงจากความยืดหยุ่นของยางมิชลินที่ความดันต่างๆ .....	77
รูปที่ 4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงจากความยืดหยุ่นของยางบริดส โตนที่ความดัน ต่างๆ.....	77
รูปที่ 4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงจากความยืดหยุ่นของยางพาราที่ความดันต่างๆ .....	77
รูปที่ 4.7	การหาค่า $K, n$ .....	78
รูปที่ 4.8	ความดันลดที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกันของยางมิชลิน.....	79
รูปที่ 4.9	ความดันลดที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกันของยางบริดส โตน.....	80
รูปที่ 4.10	ความดันลดที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกันของยางพารา.....	80
รูปที่ 4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟองอากาศกับอัตราการไหลอากาศของยางมิชลิน...	82
รูปที่ 4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟองอากาศกับอัตราการไหลอากาศของยาง บริดส โตน.....	82
รูปที่ 4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟองอากาศกับอัตราการไหลอากาศของยางพารา....	82
รูปที่ 4.14	ลักษณะการไหลของฟองอากาศที่อัตราการไหลต่ำๆ ในถึงปฏิกรณ์แบบ ฟองอากาศ.....	83
รูปที่ 4.15	ลักษณะการไหลของฟองอากาศที่อัตราการไหลสูง ในถึงปฏิกรณ์แบบ ฟองอากาศ.....	83
รูปที่ 4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ในการเกิดฟองอากาศกับอัตราการไหลอากาศของ ยางมิชลิน.....	85
รูปที่ 4.17	ความถี่ในการเกิดฟองอากาศกับอัตราการไหลอากาศของยางบริดส โตน.....	85
รูปที่ 4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ในการเกิดฟองอากาศกับอัตราการไหลอากาศของ ยางพารา.....	85
รูปที่ 4.19	ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ ของยางมิชลิน ยางบริดส โตน และ ยางพารา ที่อัตราการไหลของก๊าซต่างๆ.....	85
รูปที่ 4.20	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะกับอัตราการไหลอากาศ ของ ยางมิชลิน.....	88
รูปที่ 4.21	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะกับอัตราการไหลอากาศ ของยางบริดส โตน.....	88

รูป		หน้า
รูปที่ 4.22	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะกับอัตราการไหลของอากาศ.....	88
รูปที่ 4.23	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ( $K_L a$ ) ของยางมิชลินที่อัตราการไหลของก๊าซต่างๆ.....	90
รูปที่ 4.24	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ( $K_L a$ ) ของยางบริดสโตนที่อัตราการไหลของก๊าซต่างๆ.....	90
รูปที่ 4.25	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ( $K_L a$ ) ของยางพาราที่อัตราการไหลของก๊าซต่างๆ.....	90
รูปที่ 4.26	สัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายผ่านฟิล์มของเหลวที่อัตราการไหลต่างๆ ของยางมิชลิน.....	96
รูปที่ 4.27	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟองอากาศกับอัตราการไหลอากาศที่ระยะห่างต่างๆ.....	92
รูปที่ 4.28	การเจาะรูเดิมอากาศให้มีระยะห่างระหว่างรูเดิมอากาศที่เหมาะสม.....	96
รูปที่ 4.29	ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ในการเกิดฟองอากาศกับอัตราการไหลอากาศที่ระยะห่างต่างๆ.....	96
รูปที่ 4.30	การเกิดฟองอากาศจากการเจาะรูเดิมอากาศ.....	97
รูปที่ 4.31	ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศกับขนาดฟองอากาศที่ระยะห่างต่างๆ	98
รูปที่ 4.32	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะกับอัตราการไหลของอากาศ.....	99
รูปที่ 4.33	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟองอากาศกับอัตราการไหลอากาศที่ระยะห่าง 4 มม. จำนวน 160 รู.....	100
รูปที่ 4.34	ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ในการเกิดฟองอากาศกับอัตราการไหลอากาศที่ระยะห่าง 4 มม. จำนวน 160 รู.....	102
รูปที่ 4.35	ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ ที่อัตราการไหลของก๊าซต่างๆ จำนวนรู 160 รู.....	103
รูปที่ 4.36	ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสารฟองอากาศกับอัตราการไหลอากาศที่ระยะห่าง 4 มม. จำนวน 160 รู.....	104
รูปที่ 4.37	สัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายผ่านฟิล์มของเหลวที่อัตราการไหลต่างๆ ของยางมิชลิน 160 รู.....	105
รูปที่ 4.38	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ที่จำนวนรูต่างๆ.....	107
รูปที่ 4.39	ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนกับจำนวนรูเดิมอากาศ.....	108
รูปที่ 4.40	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ที่จำนวนรู 1, 4 และ 160 รู.....	110
รูปที่ 4.41	ผลการประยุกต์ใช้สมการทำนายขนาดฟองอากาศ ที่อัตราการไหลต่างๆ.....	114

รูป	หน้า
รูปที่ 4.42 ผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนระหว่างขนาดฟองอากาศที่ได้จากการทดลองและจากสมการทำนายทฤษฎี.....	115
รูปที่ 4.43 ผลการประยุกต์ใช้สมการทำนายความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ ที่อัตราการไหลต่างๆ.....	116
รูปที่ 4.44 ผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนระหว่างความเร็วลอยตัวของฟองอากาศที่ได้จากการทดลองและจากสมการทำนายทฤษฎี.....	117
รูปที่ 4.45 การประยุกต์ใช้สมการทำนายค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทออกซิเจนของฟองอากาศ ที่อัตราการไหลต่างๆ.....	118
รูปที่ 4.46 ผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสารของฟองอากาศที่ได้จากการทดลองและจากสมการทำนายทฤษฎี.....	119
รูปที่ 4.47 ผลการประยุกต์ใช้สมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายผ่านฟิล์มของเหลว ที่อัตราการไหลต่างๆ.....	120
รูปที่ 4.48 ผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายผ่านฟิล์มของเหลว ( $K_L$ ) ที่ได้จากการทดลองและจากสมการทำนายทฤษฎี.....	121
รูปที่ 4.49 ผลการประยุกต์ใช้สมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร.....	123
รูปที่ 4.50 ผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ( $K_{La}$ ) ที่ได้จากการทดลองและจากสมการทำนายทฤษฎี.....	123

# บทที่ 1

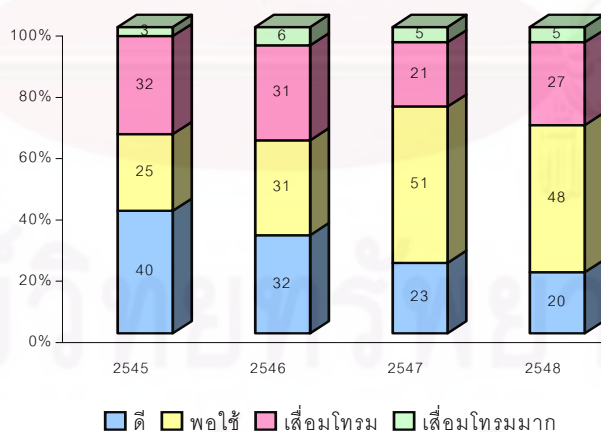
## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วิถีชีวิตคนไทยมีความผูกพันกับสายน้ำมาเนิ่นนาน โดยแม่น้ำเป็นทั้งแหล่งอาหาร เป็นเส้นทางคมนาคมที่สำคัญในสมัยสังคมเกษตรกรรม และเป็นแหล่งน้ำสำหรับอุปโภคบริโภคในครอบครัว ดังนั้น เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของประชากร ตลอดจนการขยายตัวทางเศรษฐกิจและอุตสาหกรรม การเกษตรที่เคยอาศัยธรรมชาติเปลี่ยนเป็นระบบชลประทานแบบเร่งรัดเพื่อเพิ่มปริมาณผลผลิตต่อหน่วยพื้นที่ ทำให้แหล่งน้ำต่างๆ ต้องรับบทบาทในการรองรับของเสียจากแหล่งกำเนิดต่างๆ เพิ่มมากขึ้น จนเกินขีดความสามารถที่จะฟอกตัวเองตามธรรมชาติได้ จนก่อให้เกิดปัญหามลพิษจากภาวะน้ำเน่าเสีย ซึ่งแหล่งกำเนิดมลพิษที่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษของแหล่งน้ำที่สำคัญมาจาก 3 แหล่ง ได้แก่

- น้ำเสียจากชุมชน (อาคาร บ้านเรือน โรงแรม โรงพยาบาล)
- น้ำเสียจากการอุตสาหกรรม (โรงงานอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ)
- น้ำเสียจากกิจกรรมการเกษตร (การปศุสัตว์และการเพาะปลูก)

ในปัจจุบัน ปัญหาน้ำเสียนี้มีแนวโน้มทวีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้น และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้เกิดความเสื่อมโทรมของแหล่งน้ำโดยรวม ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 สถานการณ์คุณภาพน้ำปี 2545 – 2548 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2545)



จากปัญหามลพิษทางน้ำที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลต่อความจำเป็นในการประยุกต์ใช้กระบวนการต่างๆ ในการจัดการกับปัญหาน้ำเสีย เช่น

- กระบวนการทางกายภาพ (Physical treatment process) เป็นการกำจัดของแข็งแขวนลอยขนาดใหญ่ซึ่งตกตะกอนด้วยตัวเองได้ง่าย เช่น การกรองด้วยตะแกรง (Screening) การแยกหรือตกตะกอนกรวดทราย (Grit chamber) เป็นต้น

- กระบวนการทางเคมี (Chemical treatment process) เป็นการกำจัดของแข็งแขวนลอยขนาดเล็กหรือของแข็งที่ตกตะกอนด้วยตัวเองได้ช้า หรือจัดการกับน้ำเสียลักษณะต่างๆ เช่น มีกรดหรือด่างสูงเกินไป มีโลหะหนักที่เป็นพิษ มีไขมันหรือน้ำมันละลายน้ำ เป็นต้น โดยวิธีการบำบัดที่ใช้ ได้แก่ การรวมตะกอน (Coagulation/flocculation) การตกผลึก (Precipitation) เป็นต้น

- กระบวนการทางชีวภาพ (Biological treatment process) เป็นการบำบัดน้ำเสียด้วยจุลินทรีย์ที่ใช้จะเป็นแบบใช้หรือไม่ใช้ออกซิเจนโดยสารอินทรีย์ซึ่งเป็นความสกปรกจะถูกใช้เป็นอาหารของจุลินทรีย์ที่ถูกเลี้ยงไว้ในถังเลี้ยงเชื้อ ทำให้น้ำเสียมีความสกปรกลดลง ระบบบำบัดที่อาศัยหลักทางชีวภาพมีหลายชนิด อาทิ ระบบเอเอส (AS – Activated Sludge) ระบบโปรยกรอง (Trickling Filter) ระบบบ่อบำบัดน้ำเสีย (Aerated Lagoon) ระบบถังกรองไร้ออกซิเจน (Anaerobic Filter) เป็นต้น

ทั้งนี้ การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางชีวภาพ เป็นกระบวนการที่นิยมใช้กันมากที่สุดในงานบำบัดน้ำเสียเพราะเป็นวิธีที่ประหยัดที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการบำบัดอื่นๆ (เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์, 2539) โดยในประเทศไทย กล่าวได้ว่าร้อยละ 80 หรือมากกว่าของระบบบำบัดแบบชีวภาพเป็นระบบเอเอส ซึ่งจัดเป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจนและมีส่วนประกอบหลัก 2 อย่าง ได้แก่ 1) ถังเติมอากาศที่ใช้เลี้ยงจุลินทรีย์และ 2) ถังตกตะกอนที่ใช้แยกจุลินทรีย์ออกจากน้ำก่อนระบายทิ้ง ทั้งนี้ จุลินทรีย์ในถังเติมอากาศในระบบเอเอส รวมไปถึงพวกที่อยู่ในระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ออกซิเจนแบบอื่นๆ ต้องการออกซิเจน (ละลายน้ำได้น้อยมาก 8 ส่วนต่อ 1 ล้านส่วน) สำหรับการสันดาปสารอินทรีย์ที่เป็นต้นเหตุของความสกปรกในน้ำเสีย ดังแสดงในสมการแสดงการเจริญเติบโต ดังนี้



ดังนั้น กล่าวได้ว่าการเติมอากาศ (Aeration process) ให้กับน้ำเสีย จึงมีความจำเป็นต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางชีวภาพ รวมไปถึงค่าใช้จ่ายโดยรวมของการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยทั่วไป เครื่องเติมอากาศ (Aerator) ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางชีวภาพ มี 2 ชนิด คือ

1) แบบตีน้ำ (Mechanical aerator) เป็นการสร้างความปั่นป่วนให้กับน้ำเสีย เพื่อให้เกิดการสัมผัสกับอากาศและเกิดการถ่ายเทออกซิเจนสู่น้ำเสีย ซึ่งมีข้อเสียในเรื่องของพลังงานที่จำเป็นของมอเตอร์ในการหมุนใบพัด (Power consumption)

2) แบบตัวกระจายอากาศ (Gas diffuser) เป็นการเป่าลมผ่านรูเล็กๆ ให้เกิดเป็นฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมากซึ่งเคลื่อนที่ภายในถังเติมอากาศและเป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัส (Interfacial area) ของการถ่ายเทออกซิเจนระหว่างฟองอากาศกับส่วนที่เป็นน้ำเสีย ซึ่งส่งผลดีต่อประสิทธิภาพและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของระบบบำบัดน้ำเสีย

จากข้อดีในการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการถ่ายเทออกซิเจนจากฟองอากาศขนาดเล็กๆ ที่ได้จากเครื่องเติมอากาศแบบฟองอากาศ ทำให้ในปัจจุบันสัดส่วนของการทำงานของเครื่องเติมอากาศแบบฟองอากาศจึงเพิ่มขึ้นมากเมื่อเทียบกับอดีตที่ผ่านมา อย่างไรก็ตาม จากปัญหาการอุดตันที่รูระบายอากาศของตะกอนจุลินทรีย์และสิ่งสกปรกต่างๆ (Orifice clogging) เมื่อหยุดเดินเครื่องสูบลม (Air blower) ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของการเติมอากาศลดลงและทำให้เสียเวลาในการบำรุงรักษา ทำให้มีการประยุกต์ใช้อุปกรณ์เติมอากาศแบบยืดหยุ่น (Flexible gas diffuser) เพื่อลดปัญหาดังกล่าว (เริ่มใช้งานกว่า 20 ปี) โดยอาศัยคุณสมบัติที่รูระบายอากาศจะปิดลงโดยอัตโนมัติ เมื่อหยุดเดินเครื่องสูบลม และให้ฟองขนาดเล็ก (Rice และคณะ, 1986) ทั้งนี้ ในส่วนของการผลิตของอุปกรณ์ดังกล่าว โดยทั่วไปจะใช้วัสดุคิบพอกยางสังเคราะห์ (Synthesis rubber) และมีการปรับปรุงองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันออกไป ตามกระบวนการผลิตของแต่ละบริษัท ซึ่งเป็นเหตุที่ทำให้อุปกรณ์ดังกล่าวมีราคาแพงและจัดเป็นข้อจำกัดในการนำไปใช้ในระบบบำบัดน้ำเสีย รวมไปถึงการตัดสินใจในการปรับปรุงระบบเติมอากาศจากแบบใช้ใบพัดมาเป็นแบบฟองอากาศอีกด้วย

งานวิจัยนี้ มุ่งเน้นในการประยุกต์ใช้วัสดุยืดหยุ่นที่มีราคาถูกและหาได้ง่ายภายในประเทศ เช่น ยางพารา ยางรถยนต์ มาออกแบบและประยุกต์ใช้ในระบบเติมอากาศของการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางชีวภาพ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจน รวมไปถึงเหมาะสมกับการใช้งานในประเทศ อย่างแท้จริง โดยพิจารณาถึงตัวแปรที่เกี่ยวข้องด้านต่าง ๆ เช่น

#### ➤ ด้านกายภาพ (Physical parameters)

- ชนิดของวัสดุที่เลือกใช้
- ความทนทานและอายุการใช้งาน
- ความดันลดและพลังงานที่ใช้ (Pressure drop and power consumption)
- ความยืดหยุ่นของวัสดุที่เลือกใช้ (Elasticity)
- ขนาดของรูระบายอากาศ (Hole diameter)
- ระยะห่างระหว่างรูระบายอากาศ (Distance between hole diameter)
- จำนวนรูระบายอากาศที่เหมาะสม (Orifice number)

- **ด้านการเกิดฟองอากาศ (Bubble phenomena)**
  - ขนาดของฟองอากาศที่เกิดขึ้น (Bubble diameter)
  - ความถี่ของการเกิดฟองอากาศ (Bubble frequency)
  - ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (Bubble rising velocity)
- **ด้านการถ่ายเทมวลสารหรือออกซิเจน (Mass or Oxygen transfer parameters)**
  - พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับเฟสน้ำ (Interfacial area)
  - ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจน (Volumetric Mass Transfer Coefficient)
  - ค่าความสามารถในการถ่ายเทออกซิเจน (Oxygenation Capacity), อัตราการถ่ายเทออกซิเจน (Oxygen Transfer Rate) และประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุยืดหยุ่นที่หาง่ายและราคาถูก เช่น ยางในรถยนต์ และยางพาราที่จัดเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศ มาใช้เป็นอุปกรณ์เติมอากาศแบบฟองอากาศในระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจน
2. เพื่อศึกษาลักษณะและเปรียบเทียบวัสดุยืดหยุ่นที่นำมาประยุกต์ใช้ ในด้านกายภาพและพลังงานในการสร้างฟองอากาศ ในด้านการเกิดฟองอากาศ และในด้านการถ่ายเทออกซิเจน
3. เพื่อให้ได้แนวทางในการออกแบบอุปกรณ์เติมอากาศแบบฟองอากาศจากวัสดุยืดหยุ่นที่มีประสิทธิภาพและประหยัดงบประมาณในการดูแลรักษา รวมไปถึงพลังงานที่ใช้ในการสร้างฟองอากาศ

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นแนวทางในการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์เติมอากาศในระบบบำบัดน้ำเสีย โดยมีการนำวัสดุที่มีความยืดหยุ่น (Elastic material) มาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุคิบในการผลิต ซึ่งสามารถจัดปัญหาการอุดตันที่รูการกระจายอากาศ (Clogging orifice problem - Self cleaning) ขณะปิดระบบอัดอากาศ และเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนสำหรับระบบเติมอากาศ

การออกแบบและการประยุกต์ใช้วัสดุยืดหยุ่น ในระบบเติมอากาศแบบฟองอากาศของระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจน มีขอบเขตการศึกษาดังต่อไปนี้

1. ทำการทดลองศึกษาลักษณะทางกายภาพของวัสดุยึดหยุ่น โดยเลือกใช้ยางธรรมชาติ (ยางพารา) และยางสังเคราะห์ (ยางในรถบรรทุกแบบแข็งและแบบอ่อน) ตัดยางเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มม.

2. ทำการทดลองหาขนาดอุปกรณ์เจาะรูและขนาดรูเดิมอากาศที่เหมาะสม โดยใช้เข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.185, 0.120 และ 0.055 ซม. โดยพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาได้แก่ พลังงานลด ขนาดฟองอากาศ พื้นที่ผิวสัมผัส และพลังงานที่จำเป็นในการสร้างฟองอากาศ

3. ทำการทดลองหาระยะห่างระหว่างรูเดิมอากาศที่เหมาะสม โดยเจาะรูให้มีระยะห่างระหว่างรูประมาณขนาดฟองอากาศ ครึ่งหนึ่งของฟองอากาศ และสองเท่าของฟองอากาศ โดยพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาได้แก่ พลังงานลด ขนาดฟองอากาศ และพื้นที่ผิวสัมผัส

4. ทำการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทมวลสาร อัตราการถ่ายเทออกซิเจน และประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจน

5. ออกแบบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของอุปกรณ์เดิมอากาศแบบยึดหยุ่น โดยเปรียบเทียบกับอุปกรณ์เดิมอากาศที่มีขายอยู่ตามท้องตลาดและเสนอแนะโมเดลการทำงานค่าขนาดฟองอากาศและค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทมวลสาร

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นการนำวัสดุที่มีอยู่ในท้องถิ่น ซึ่งหาง่ายและราคาถูก เช่น ยางพารา ยางในรถยนต์เก่ามาใช้ให้เกิดประโยชน์

2. ทราบแนวทางในการออกแบบและประยุกต์ใช้วัสดุยึดหยุ่นในการเดิมอากาศให้กับระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยจะลดปัญหาการอุดตันและค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงถังเดิมอากาศ

3. เรียนรู้และเข้าใจพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์เดิมอากาศแบบฟองอากาศ

4. เป็นแนวทางหนึ่งที่จะลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพ และพัฒนาประสิทธิภาพของกระบวนการเดิมอากาศของระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้งานอยู่ทั่วไป อาทิ ระบบแเอ็คติเวเต็ดสลัดจ์ และระบบเอสแบบกึ่งเท (Sequential Batch Reactor, SBR)

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับยาง

ยางเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมากและมีสมบัติเด่นหลายประการ โดยเฉพาะความยืดหยุ่น (elasticity) นั่นคือ เมื่อมีแรงดึง ยางที่คงรูปแล้วจะสามารถยืดตัวได้หลายเท่าของความยาวเดิม และเมื่อปล่อยแรงออก ยางก็จะสามารถกลับคืนสู่รูปร่างและความยาวเดิมได้นอกจากนี้ยางยังมีสมบัติเด่นอื่นๆ อีกด้วย เช่น มีความเหนียว (toughness) และมีความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion resistance) สูง สามารถป้องกันการซึมผ่านของน้ำ อากาศ และสารเคมีอีกด้วย

##### 2.1.1 ยางในประเทศไทย (ยาง, 2548)

ยางธรรมชาติเป็นหนึ่งในสินค้าเกษตรอุตสาหกรรมที่สำคัญของประเทศไทย โดยจัดเป็นประเทศที่สามารถผลิตยางธรรมชาติได้มากที่สุดในโลก จากสภาพอากาศร้อนชื้นที่เอื้ออำนวยต่อการเจริญเติบโตของยางพารา จากการทำไทยสามารถผลิตน้ำยางดิบได้เป็นจำนวนมากนี้เอง จึงทำให้ไทยมีอุตสาหกรรมต่อเนื่อง เกี่ยวกับยางพาราเกิดขึ้นมากมาย เช่น โรงงานผลิตยางแท่ง ยางแผ่น ยางรถยนต์ ปัจจุบันไทยสามารถส่งออกยางพาราได้เป็นอันดับหนึ่งของโลก ซึ่งไทยมีการผลิตยางพาราประมาณปีละ 2.62 ล้านตัน โดยใช้ในการส่งออกประมาณ 2.35 ล้านตัน ส่วนที่เหลือใช้ในการบริโภคในประเทศ ประมาณ 240,000 ตัน (ยาง, 2548)

ความรู้เรื่องยางอาจแบ่งได้เป็น 2 ส่วนหลักๆ ได้แก่ การผลิตยางดิบ (raw rubber) และการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง (rubber product) ในส่วนของยางดิบนั้น สามารถแบ่งยางดิบออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ยางดิบที่ได้มาจากต้นพืชเรียกว่ายางธรรมชาติ (natural rubber, NR) และยางดิบที่ได้จากการสังเคราะห์โดยกระบวนการพอลิเมอไรเซชันเรียกว่ายางสังเคราะห์ (synthetic rubber, SR) ทั้งยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์อาจอยู่ในรูปของยางแห้ง (dry rubber) หรือน้ำยาง (latex) ก็ได้ สำหรับในส่วนของการผลิตผลิตภัณฑ์จากยางนั้น โดยทั่วไปสามารถแบ่งผลิตภัณฑ์ยางออกได้เป็น 2 กลุ่มตามลักษณะวัตถุดิบที่ใช้ คือ กลุ่มผลิตภัณฑ์จากวัตถุดิบที่เป็นยางแห้ง และน้ำยาง

ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ต่างก็มีสมบัติเด่นที่แตกต่างกัน เช่น ยางธรรมชาติมีสมบัติดีเยี่ยมในด้านความเหนียวติดกัน (tack) ซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางล้อรถ นอกจากนี้ ยางธรรมชาติยังมีสมบัติความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ที่สูงมากโดยที่ไม่ต้องเติมสารตัวเติมเสริมแรง ส่วนยาง

สังเคราะห์นั้นมีมากมายหลายชนิด ซึ่งยางสังเคราะห์แต่ละชนิดก็จะมีสมบัติเด่นที่แตกต่างกันไป เช่น ยางบิวตาไดอีนมีสมบัติเด่นในด้านความต้านทานต่อการกัดฉีก เป็นต้น

### 2.1.2 ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR)

ยางธรรมชาติหรือยางพาราในประเทศไทยส่วนมากเป็นยางที่ได้มาจากต้นยางพาราสายพันธุ์ *Hevea Braziliensis* ซึ่งเป็นไม้ป่าที่มีต้นกำเนิดจากกลุ่มแม่น้ำอเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ โดยทั่วไปยางธรรมชาติแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบใหญ่ ๆ ได้แก่

#### ■ ส่วนที่เป็นน้ำยาง

เป็นน้ำยางสดที่กรี๊ดได้จากต้นยาง เนื่องจากมีปริมาณน้ำมากเกินไปจึงไม่เหมาะที่จะนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์และยังสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการขนส่ง (รูปที่ 3.1) ดังนั้น ต้องนำน้ำยางไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (centrifugation) จนได้ปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 30 เป็นร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก เรียกว่าน้ำยางที่ได้ชื่อว่า น้ำยางข้น (concentrated latex) เนื่องจากในน้ำยางมีสารอินทรีย์ผสมอยู่ ดังนั้น น้ำยางจึงสามารถบดเน่าส่งกลิ่นเหม็นได้ จึงต้องมีการเติมสารแอมโมเนียร่วมกับสารเคมีอื่นๆ เพื่อรักษาสภาพของน้ำยางข้นให้เก็บไว้ได้นาน



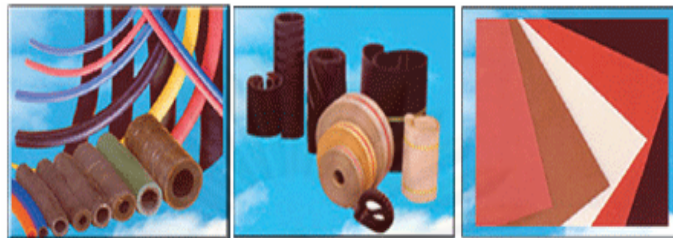
รูปที่ 2.1 ลักษณะของน้ำยางที่ได้จากการกรี๊ดต้นยาง

โดยทั่วไป ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากน้ำยางจะต้องเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถกำจัดน้ำออกได้ง่าย นั่นคือผลิตภัณฑ์นั้นต้องบางหรือมีรูพรุนเพื่อให้ น้ำระเหยออกได้ง่ายตามรูพรุนเหล่านั้น ได้แก่ ถุงมือยาง จุกหัวนม ฟองน้ำที่นอน เป็นต้น

#### ■ ส่วนที่เป็นยางแห้ง

เป็นยางแห้งได้จากการนำน้ำยางสดที่กรี๊ดได้มาเติมกรดอะซิติก กรดฟอร์มิก หรือ กรดซัลฟูริก เพื่อให้อนุภาคน้ำยางจับตัวกันเป็นของแข็งแยกตัวออกจากน้ำ จากนั้นก็ทำการไล่ความชื้นออกจากเนื้อยาง เพื่อป้องกันการเกิดเชื้อรา ยางแห้งมีหลายรูปแบบ ได้แก่

## 1. ยางแผ่น (Rubber Sheet)



รูปที่ 2.2 ยางแผ่น

ยางแผ่นได้จากการนำน้ำยางสดมาใส่ในตะกุง จากนั้นจึงเติมน้ำเพื่อเจือจางน้ำยางให้มีปริมาณเนื้อยางแห้งเหลือเพียงประมาณร้อยละ 12 – 18 ก่อนทำการเติมกรดเพื่อให้ยางจับตัวกันและแยกตัวออกจากน้ำ หากทำการเจือจางมากก็จำเป็นต้องใช้กรดมากขึ้นเช่นกัน หลังจากนั้นจึงนำยางที่ได้ไปรีดให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง นำไปล้างน้ำ แล้วจึงทำให้ยางแห้ง ซึ่งอาจทำได้ 2 วิธี คือ 1. นำไปตากแดดหรือผึ่งในอากาศร้อนเพื่อไล่ความชื้น ยางที่ได้เรียกว่า ยางแผ่นไม่รมควัน 2. นำไปอบรมควันที่อุณหภูมิประมาณ 60 – 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2-3 วัน ยางที่ได้เรียกว่า ยางแผ่นรมควัน ดังแสดงในรูปที่ 2.2

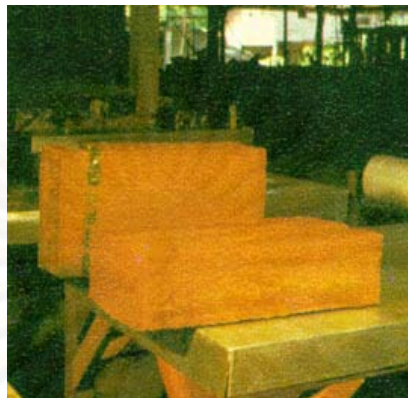
## 2. ยางเครฟ (Crepe Rubber)



รูปที่ 2.3 ยางเครฟ

ยางเครฟส่วนใหญ่เป็นยางที่ได้จากการนำเศษยางไปรีดในเครื่องเครฟ (รูปที่ 2.3) พร้อมทั้งใช้น้ำทำความสะอาดเอาสิ่งสกปรกต่างๆ ออกไปจากยางในระหว่างการรีด จากนั้นจึงนำยางแผ่นที่ได้ไปผึ่งลมให้แห้ง

### 3. ยางแท่ง (Technically Classified Rubber)

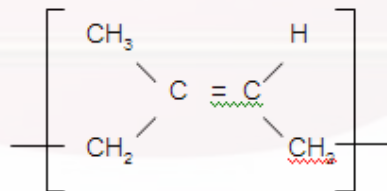


รูปที่ 2.4 ยางแท่ง

ยางชนิดนี้ กระบวนการผลิตเริ่มต้นนำยางมาทำให้เป็นก้อนเล็กๆ เพื่อให้ง่ายต่อการชำระล้างสิ่งสกปรกออกไปด้วยน้ำและง่ายต่อการทำให้แห้งในขั้นตอนถัดไป หลังจากอบยางให้แห้งด้วยอากาศร้อนแล้วก็นำยางแห้งที่เป็นก้อนเล็กๆ เหล่านี้ไปอัดเป็นแท่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.4

#### ■ โครงสร้างของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีคือ ซิส-1,4 – พอลิไอโซพรีน (cis-1,4-polyisoprene) กล่าวคือ โมเลกุลของ 1 โมเลกุลจะประกอบด้วยหน่วยของไอโซพรีน ( $C_5H_8$ ) มาต่อกันเป็นสายยาว (แบบเส้นตรง)



โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 200,000 ถึง 400,000 และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างมาก ยางธรรมชาติมีความหนาแน่นเท่ากับ  $0.93 \text{ g/cm}^3$  ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส โดยทั่วไป ยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (amorphous) แต่ในบางสภาวะ เช่น ที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อยางถูกยืด ยางสามารถเกิดผลึกได้ ยางจะมีอัตราเร็วในการตกผลึกสูงสุดที่อุณหภูมิต่ำประมาณ  $-26$  องศาเซลเซียส การตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำนี้จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น ไม่สามารถนำยางไปผสมให้เข้ากับสารเคมีหรือสารตัวเติมอื่นๆ ได้ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ผลึกที่เกิดขึ้นจะถูกทำลาย ยางจะอ่อนตัวลงและกลับสู่สภาพเดิม ส่วนการเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัวของยางจะทำให้ยางมีสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน แต่



ทำให้ยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น นั่นคือ ยางจะมีความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการขัดถูสูงขึ้น

#### ▪ สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ

1. ความยืดหยุ่น (elasticity) ยางธรรมชาติที่คงรูปแล้วจะมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับยางหมดไป ยางจะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม ได้อย่างรวดเร็ว
2. ความเหนียวติดกัน (tack) เป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางล้อรถยนต์
3. ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ยางธรรมชาติสามารถดกผลึกได้ง่ายเมื่อถูกยืด ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยาง ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงมาก โดยที่ไม่ต้องใส่สารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วย
4. ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength) ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อการฉีกขาดสูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง
5. สมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties) ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัตที่ดี ยางมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนต่ำในระหว่างการใช้งาน
6. ความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion resistance) ยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อการขัดถูสูง
7. ความทนทานต่อของเหลวและสารเคมี (liquid and chemical resistance) ยางธรรมชาติไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วต่างๆ แต่ยางจะทนทานต่อของเหลวที่มีขั้ว เช่น อะซิโตน หรืออัลกอฮอล์ นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังทนต่อกรดและด่างเจือจางได้ดี แต่ไม่ทนต่อกรดไนตริกและกรดกำมะถันเข้มข้น

#### การปรับปรุงคุณสมบัติของยางธรรมชาติ

ยางดิบจะมีขีดจำกัดในการทำงานเนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำ และมีลักษณะทางกายภาพที่ไม่เสถียร คือ ยางจะอ่อนตัวและเหนียวเยิ้มเมื่อร้อน แต่จะแข็งเปราะที่อุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้ การใช้ประโยชน์จากยางจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่างๆ เช่น กำมะถัน ผงเขม่าดำ เป็นต้น

#### ▪ การผสมเคมียางเพื่อเพิ่มคุณสมบัติเชิงกล

ยางผสมที่ได้หรือที่เรียกว่ายางคอมพาวด์ (rubber compound) จะถูกนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดัน กระบวนการนี้เรียกว่ากระบวนการคงรูปยาง ยางที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวแล้วจะเรียกว่า ยางสุกหรือยางคงรูป (vulcanizate) ซึ่งสมบัติของยางคงรูปที่ได้นี้จะเสถียร ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนักและมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น

- การผสมยางธรรมชาติกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น

เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นยางที่ไม่มีขั้ว จึงสามารถผสมให้เข้ากันได้ดีกับยางที่ไม่มีขั้วชนิดต่างๆ ได้ดี เช่น ยางสไตรีนบิวตาไดอีน (SBR) ยางพอลิไอโซพรีน (IR) การนำยางธรรมชาติมาผสมกับยางสังเคราะห์จะเป็นการรวมเอาสมบัติที่ดีของทั้งยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ไว้ด้วยกัน อย่างไรก็ตาม ผู้ผสมจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยต่างๆ ที่อาจมีผลโดยตรงต่อสมบัติของยางผสมอันได้แก่ ความหนืดและระบบการคงรูปของยางที่จะนำมาผสมกัน

#### การประยุกต์ใช้งานของยางธรรมชาติ

1. ยางธรรมชาติมีสมบัติดีเยี่ยมในด้านความทนทานต่อแรงดึงและมีความยืดหยุ่นสูงมาก จึงเหมาะที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ถุงมือยาง ยางรัดของ
2. นำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิด เช่น ยางล้อรถบรรทุก ยางล้อเครื่องบิน ยางกันกระแทกท่าเรือ หรือใช้ผสมกับยางสังเคราะห์ในการผลิตยางล้อรถยนต์ (ยางเรเดียนท์)
3. ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อการฉีกขาดสูง จึงเหมาะสำหรับการผลิตยางกระเปาะน้ำร้อน

#### 2.1.2 ยางสังเคราะห์ (Synthetic rubber, SR)

เป็นยางที่ผลิตได้จากกระบวนการทางเคมี โดยทั่วไป การผลิตยางสังเคราะห์แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ 1) ขั้นตอนการผลิตโมโนเมอร์ (monomer) ซึ่งโมโนเมอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ยางส่วนใหญ่เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและ 2) ขั้นตอนการนำโมโนเมอร์หลายๆ โมโนเมอร์มาต่อกันให้ได้เป็นพอลิเมอร์

#### ชนิดของยางสังเคราะห์ที่ใช้งานกันในปัจจุบัน

##### 1. ยางพอลิไอโซพรีน (Cis-1,4-polyisoprene, IR)

เป็นยางสังเคราะห์ที่เกิดจากความพยายามที่จะสังเคราะห์ยางที่มีโครงสร้างทางเคมีและมีสมบัติเหมือนกับยางธรรมชาติ ยาง IR มีโครงสร้างทางเคมีเหมือนยางธรรมชาติ จึงมีสมบัติต่างๆ ใกล้เคียงกับยางธรรมชาติมากและสามารถใช้แทนยางธรรมชาติในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้ โดยมีสมบัติทั่วไป ได้แก่ มีความทนทานต่อแรงดึงและความทนทานต่อการฉีกขาดต่ำกว่ายางธรรมชาติเล็กน้อย มีราคาสูงกว่ายางธรรมชาติ มีสิ่งเจือปนน้อย และมีคุณภาพที่สม่ำเสมอกว่ายางธรรมชาติ

## 2. ยางสไตรีนบิวตาไดอิน (Styrene-Butadiene Rubber, SBR)



รูปที่ 2.5 ยางสไตรีนบิวตาไดอิน

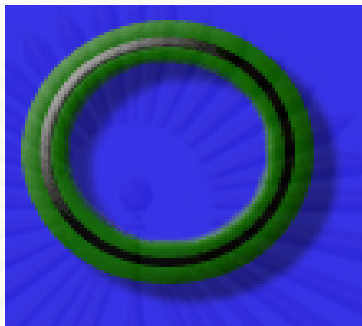
ยาง SBR (รูปที่ 2.5) เป็นยางสังเคราะห์ที่สำคัญและใช้กันมากที่สุดในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นโคพอลิเมอร์ของสไตรีนและโมโนเมอร์ของบิวตาไดอิน โดยมีปริมาณของสไตรีนอยู่ในช่วงร้อยละ 23-40 โดยมีคุณสมบัติ เช่น มีกระบวนการแปรรูปที่ง่ายกว่าประหยัดทั้งกำลังงานและเวลาตลอดจนต้นทุนการผลิต มีสมบัติความเหนียวติดกันและความยืดหยุ่นต่ำกว่ายางธรรมชาติ มีความทนทานต่อการฉีกขาดต่ำมากโดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง ๆ

## 3. ยางไนไตรล์ (Nitrile or Acrylonitrile – Butadiene Rubber, NBR)

ยาง NBR เป็นโคพอลิเมอร์ของอะคริโลไนไตรล์ (acrylonitrile monomer) และบิวตาไดอิน (butadiene monomer) ซึ่งประกอบด้วยอะคริโลไนไตรล์ตั้งแต่ร้อยละ 18-51 ยางชนิดนี้มีสมบัติเด่นคือทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมและตัวทำละลายไม่มีขั้วต่างๆ ได้ดี เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของยางชนิดนี้ ต้องทำการเติมกำมะถันเข้าไปช่วงต้นของการผสมเพื่อเพิ่มระยะเวลาการผสมให้กำมะถันเข้ากับยางได้มากขึ้นและสารกลุ่มที่ทำให้ยางนิ่ม เช่น น้ำมัน ลงไปในยาง NBR เพื่อช่วยในกระบวนการแปรรูป (ลดความเหนียวของยาง) ปรับปรุงสมบัติด้านต่างๆ โดยเฉพาะสมบัติความเหนียวติดกัน สมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำ และความยืดหยุ่นของยาง

นอกจากนี้ ยาง NBR เกรดที่มีปริมาณอะคริโลไนไตรล์ค่อนข้างสูง (มากกว่าร้อยละ 25) ก็อาจใช้ผสมกับพลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) จะทำให้ยางมีความทนทานต่อโอโซน สภาพอากาศ เปลวไฟ น้ำมัน และยังช่วยเพิ่มความทนทานต่อแรงดึง ยางผสมนี้จะใช้ในการผลิตท่อยางและปลอกหุ้มสายเคเบิ้ล หรือนำมาใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องสัมผัสกับน้ำมัน เช่น ยางโอริง ยางซีล ยางเชื่อมต่อ ยางบุภาชนะ รองเท้าบูท เป็นต้น

4. ยางไฮโดรเจนเนตอะไครโลไนไตรล์บิวตาไดอิน (Hydrogenated Acrylonitrile – Butadiene Rubber, HNBR)



รูปที่ 2.6 ยางไฮโดรเจนเนตอะไครโลไนไตรล์บิวตาไดอิน

ยาง HNBR ได้จากการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเจนเนชัน (hydrogenation) ของยาง NBR ยางชนิดนี้จะมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อน ทนต่อน้ำมันได้เป็นอย่างดี นิยมใช้กันมากในการผลิตชิ้นส่วนยางที่ใช้ในแนวจุดเจาะน้ำมัน ดังแสดงในรูปที่ 2.6

5. ยางคลอโรพรีน (Chloroprene Rubber, CR)

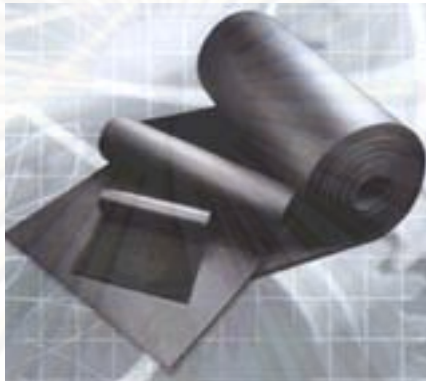


รูปที่ 2.7 ยางคลอโรพรีน

ยาง CR (รูปที่ 2.7) มีชื่อทางการค้าว่ายางนีโอพรีน (neoprene) เป็นยางที่สังเคราะห์จากมอนอเมอร์ของคลอโรพรีน (chloroprene monomer) ยางชนิดนี้สามารถดกผลึกได้เช่นเดียวกับยางธรรมชาติ ยาง CR ที่อยู่ในรูปของแข็งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ ได้แก่ ประเภทใช้งานทั่วไปและประเภทใช้งานพิเศษ ซึ่งประเภทใช้งานพิเศษ จะใช้สำหรับงานเฉพาะ เช่น ทำกาวยาง ยางใช้เคลือบ (coating) และวัสดุอุดรอยรั่ว (sealants) เป็นต้น โครงสร้างของยาง CR ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการสังเคราะห์ (อุณหภูมิของการพอลิเมอร์ไรซ์) ซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อกระบวนการดกผลึกหรือต่อความยืดหยุ่นของยาง ถ้าอุณหภูมิของการพอลิเมอร์ไรซ์สูงขึ้น ยาง CR ที่สังเคราะห์

ได้ก็จะมีโครงสร้างที่สม่ำเสมอของยาง โดยนิยมใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสมบัติเชิงกลที่ดี ได้แก่ ยางซีล ยางกันกระแทก (bearing) ยางบุพื้นรองเท้า และใช้ในการผลิตกาวยาง เป็นต้น

#### 6. ยางบิวไทล์ (Butyl Rubber, IIR)



รูปที่ 2.8 ยางบิวไทล์

ยาง IIR เป็นโคพอลิเมอร์ระหว่างมอนอเมอร์ของไอโซพรีน (isoprene) และไอโซบิวทิลีน (isobutylene) โดยมีปริมาณไอโซพรีนน้อยมาก เพียงเพื่อให้สามารถเกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลด้วยกำมะถันได้เท่านั้น ยางชนิดนี้มีสมบัติทั่วไป ได้แก่ มีความยืดหยุ่นค่อนข้างต่ำ มีความทนทานต่อแรงดึงค่อนข้างสูง และมีความทนทานต่อน้ำมันพืช น้ำมันสัตว์ น้ำมันไฮดรอลิก สังกะหร้าห้กรด ต่าง เกลือ ตัวทำละลายที่มีขั้วได้เป็นอย่างดี โดยการผสมเคมียาง เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของยางบิวไทล์ทำได้ 3 ระบบ คือ

1. ระบบการใช้กำมะถัน เป็นระบบที่เหมาะสมสำหรับใช้คงรูปยางเกรดที่มีปริมาณพันธะคู่สูงและต้องใช้ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวสูง
2. ระบบการใช้ควิโนนไดออกไซด์ (CDO) ร่วมกับการใช้ตัวออกซิไดซ์ เช่น  $PbO_2$  หรือ  $Pb_3O_4$  ระบบนี้จะทำให้ยางคงรูปที่ได้มีความทนทานต่อความร้อน
3. ระบบการใช้เรซิน สารทำให้ยางคงรูปในระบบนี้ประกอบด้วยฟินอลฟอร์มอลดีไฮด์ ยาง IIR นิยมใช้ในการผลิตยางในรถยนต์ ใช้ทำถุงยางลมสำหรับอบยางล้อให้คงรูปในอุตสาหกรรมผลิตยางรถยนต์ จุกปิดภาชนะทางเภสัชกรรม และใช้ในการผลิตปลอกหุ้มสายไฟฟ้าหรือปลอกหุ้มสายเคเบิล เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.8

#### 7. ยางบิวตาไดอิน (Butadiene Rubber, BR)

ยาง BR เป็นพอลิเมอร์ของบิวตาไดอิน (butadiene) ที่มีการจัดเรียงต่อกันหลายแบบ เช่น แบบ cis-1,4 แบบ tran-1,4 หรือแบบ vinyl-1,2 ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวริเริ่มที่ใช้

ในปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ในอดีต ยางชนิดนี้เป็นที่รู้จักกันในนาม “Buna” ยาง BR ที่ใช้ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ผลิตจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบสารละลายโดยมีไทเทเนียม โคบอลต์ หรือนิกเกิล เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ยางชนิดนี้มีสมบัติทั่วไป ได้แก่ มีความยืดหยุ่นและมีความต้านทานต่อการขีดถูสูง ทนต่อสารเคมี และเสื่อมสภาพเร็วในสภาวะที่มีออกซิเจน โอโซน หรือแสงแดด ยาง BR นี้มักมีการปรับปรุงคุณสมบัติโดยการผสมกับกับยางธรรมชาติหรือยาง SBR จะทำให้ยางคงรูปที่ได้มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น ในทำนองเดียวกันสมบัติบางประการของยางธรรมชาติและยาง SBR ก็จะถูกปรับให้ดีขึ้น โดยเฉพาะสมบัติความต้านทานต่อการขีดถู ความยืดหยุ่น ด้วยเหตุนี้ ยาง BR มากกว่าร้อยละ 90 จึงถูกใช้ร่วมกับยางธรรมชาติและยาง SBR ในการผลิตดอกยางของยางรถยนต์ รวมไปถึงการผลิตลูกฟุตบอล ใส้ในของลูกกอล์ฟ ยางพื้นรองเท้า เป็นต้น

#### 8. ยางเอทิลีน โพรพิลีน ไดอีน (Ethylene – propylene Diene Rubber, EPDM)



รูปที่ 2.9 ยางเอทิลีน โพรพิลีน ไดอีน

ยางชนิดนี้ ในระยะแรกเริ่มที่ได้มีการสังเคราะห์พอลิเมอร์จากการทำปฏิกิริยาโคพอลิเมอร์ไรเซชันระหว่างมอนอเมอร์ของเอทิลีน (ethylene) กับโพรพิลีน (propylene) จะได้พอลิเมอร์มีสมบัติเป็นยางเรียกว่า EPM ข้อเสียของยางชนิดนี้ก็คือไม่สามารถใช้กำมะถันในการคงรูปได้ การทำให้ยางคงรูปจึงต้องใช้เพอร์ออกไซด์เท่านั้น ปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนายางชนิดใหม่โดยการเติมมอนอเมอร์ตัวที่สามคือไดอีนลงไปเล็กน้อยในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ยางจึงสามารถคงรูปได้ด้วยกำมะถันและเรียกกยางชนิดนี้ว่า EPDM ยางชนิดนี้มีคุณสมบัติ ได้แก่ มีความยืดหยุ่นสูงกว่ายางสังเคราะห์ชนิดอื่นๆ แต่ต่ำกว่ายางธรรมชาติ มีความทนทานต่อแรงดึงค่อนข้างต่ำ และไม่ทนต่อน้ำมันหรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว แต่ทนต่อกรด ด่าง น้ำได้เป็นอย่างดี ส่วนใหญ่นิยมนำยาง EPDM ไปผสมกับยางไดอีน เช่น ยางธรรมชาติ IR SBR, BR และ NBR เพื่อนำมาใช้ในการผลิตยางชิ้นส่วนรถยนต์ เช่น ยางขอบหน้าต่าง ยางขอบประตู แก้มยางรถยนต์ และผลิตภัณฑ์ของเครื่องซักผ้า แผ่นยางกันน้ำ แผ่นยางมุงหลังคา เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.9

## 9. ยางซิลิโคน (Silicone Rubber, Q)



รูปที่ 2.10 ยางซิลิโคน

แกนสายโซ่หลักของยางซิลิโคนไม่ได้ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนเหมือนยางชนิดอื่นๆ แต่จะประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอนและออกซิเจน ยางซิลิโคน (รูปที่ 3.10) มีหลายชนิด ยางแต่ละชนิดจะแตกต่างกันที่หมู่ R ที่เกาะอยู่บนโซ่สายหลัก แต่เกรดที่ใช้กันมากที่สุดจะเป็นพอลิเมอร์ของไดเมทิลไซลอกเซน ใช้ชื่อว่า MQ และมีสมบัติทั่วไป ได้แก่ มีความทนทานต่อแรงดึงและมีค่าความต้านต่อการขัดถูต่ำมาก ทนต่อน้ำมันได้ปานกลาง แต่ไม่ทนต่อกรด ด่าง น้ำมันเชื้อเพลิง และมีความทนทานต่อแบคทีเรียและเชื้อราได้ดี ยางซิลิโคนโดยมากนิยมนำมาใช้ในการผลิตชิ้นส่วนของยานอวกาศ เครื่องบินและรถยนต์ ใช้ทำฉนวนหุ้มสายเคเบิล และใช้ในทางการแพทย์และเกษตรกรรม เป็นต้น

### 2.2 แนวทางการประยุกต์ใช้ยางเพื่อเป็นอุปกรณ์เติมอากาศ

ตารางที่ 2.1 แสดงการประยุกต์ใช้วัสดุยืดหยุ่น (ยาง) ในงานด้านต่างๆ โดยแยกออกตามประเภทของยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์

การประยุกต์ใช้งาน	ชนิดของยาง	
	ยางธรรมชาติ	ยางสังเคราะห์
ยางรถยนต์	ผสมเคมียางหรือกับยางสังเคราะห์	SBR, BR, XIIR, IIR
ยางอุตสาหกรรม	ผสมเคมียางหรือกับยางสังเคราะห์	SBR, NBR, HNBR, CR, BR, FKM ซิลิโคน (Q), AU/EU, CSM, IIR CO/ECO
เครื่องใช้ภายในบ้าน	ยางคอมพาวด์ (ยางสุก)	IR, EPDM, NBR, IIR, XIIR, BR

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นว่ายางธรรมชาติ มีการนำไปใช้งานน้อยในงานด้านอุตสาหกรรม เพราะว่า ยางธรรมชาติมีข้อเสียในด้านการทนต่อความร้อน สภาพอากาศ น้ำมัน และสารเคมีอื่นๆ ทั้งนี้ การผสมเคมียางและพอลิเมอร์ รวมไปถึงผสมกับยางสังเคราะห์ จะทำให้ยางธรรมชาติที่ได้มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่แรงๆ ได้ เช่น ทนต่อความร้อนแล โอโซนสูง ทนต่อแรงดึงและมีความยืดหยุ่นสูงขึ้น ในส่วนของยางสังเคราะห์ กล่าวได้ว่า ยาง IIR มีการนำมาใช้งานมากที่สุดไม่ว่าจะนำไปผลิตเป็นยางในรถยนต์ จุกปิดภาชนะทางเภสัชกรรม หรือปลอกหุ้มสายไฟฟ้า เนื่องจากข้อดีของยาง IIR ที่ทนทานต่อแรงดึงสูงและมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อน ออกซิเจน และสภาพอากาศได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังมีความทนทานต่อน้ำมัน กรด ด่างได้เป็นอย่างดีอีกด้วย

จากคุณสมบัติด้านความยืดหยุ่นของวัสดุประเภทยาง รวมไปถึงความสามารถในการใช้งานที่สภาพแวดล้อมต่างๆ ได้ดีนั้น จึงมีการนำวัสดุดังกล่าวไปประยุกต์และออกแบบใช้งานเป็นอุปกรณ์เติมอากาศแบบฟองอากาศมาเป็นเวลากว่า 20 ปี โดยลักษณะที่ต้องการได้แก่ 1. ให้ฟองอากาศขนาดเล็กๆ จำนวนมากในระบบบำบัดน้ำเสีย 2. สามารถรับแรงดึงหรือแรงอัดอากาศจากเครื่องสูบลมอากาศได้ดี และคงความสามารถในการคืนรูปของวัสดุได้ดี เพื่อจัดการกับปัญหาการอุดตันที่รูระบายอากาศของตะกอนจุลินทรีย์และสิ่งสกปรกต่างๆ (Orifice clogging) เมื่อหยุดเดินเครื่องสูบลม (Air blower) ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของการเติมอากาศลดลงและทำให้เสียเวลาในการบำรุงรักษา 3. มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมของถังเติมอากาศในระบบบำบัดน้ำเสียได้ อาทิ ค่าพีเอช ความสกปรกจากสารอินทรีย์ และสารเคมีต่างๆ ในน้ำเสีย อีกด้วย

ในปัจจุบันวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตอุปกรณ์เติมอากาศชนิดยืดหยุ่น ได้แก่ ยางสังเคราะห์ (Synthetic rubber) ซึ่งผ่านการปรับปรุงองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันออกไป ตามกระบวนการผลิตของแต่ละบริษัท จึงเป็นเหตุให้อุปกรณ์ดังกล่าวมีราคาแพง (ราคาประมาณ 3,000 – 10,000 บาทต่อหนึ่งหน่วยอุปกรณ์) และจัดเป็นข้อจำกัดในการนำไปใช้ในระบบบำบัดน้ำเสีย รวมไปถึงการตัดสินใจในการปรับปรุงระบบเติมอากาศจากแบบใช้ใบพัดมาเป็นแบบฟองอากาศ อีกด้วย ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับราคายางธรรมชาติในท้องตลาดในปัจจุบัน เช่น ยางแผ่นดิบราคาประมาณ 99.99 บาทต่อกิโลกรัม (มีนาคม, 2550) และยางแผ่นรมควันราคาประมาณ 102.99 บาทต่อกิโลกรัม (มีนาคม, 2550) รวมไปถึงพวกยางสังเคราะห์ที่หาได้ง่ายตามท้องตลาด เช่น พวกยางในรถยนต์ซึ่งมีราคาประมาณ 60 บาทต่อเส้นนั้น (พฤษภาคม, 2550) จะเห็นได้ว่า ทั้งยางพาราซึ่งเป็นธรรมชาติและยางสังเคราะห์ที่ได้จากยางในรถยนต์นั้น น่าจะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์เติมอากาศชนิดฟองอากาศ อย่างไรก็ตาม การจะนำวัสดุดังกล่าวมาใช้จะต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติต่างๆ ด้วย เช่น ความยืดหยุ่นซึ่งส่งผลต่อค่าความดันลมที่ได้ ความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด ความทนทานต่อสารเคมี รวมไปถึงขนาดของฟองอากาศและพื้นที่ผิวสัมผัสในการถ่ายเทออกซิเจน เป็นต้น



ดังนั้น กล่าวได้ว่า ขางที่จะมีความเหมาะสมและมีความเป็นไปได้สำหรับนำมาใช้สามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ

1. ขางธรรมชาติซึ่งจะเลือกขางพารามาใช้ เพราะขางธรรมชาติมีความทนทานต่อการฉีกขาด มีความทนทานต่อแรงดึง และมีความยืดหยุ่นสูง

2. ขางสังเคราะห์ซึ่งจะเลือกขางในรถยนต์มาใช้ ซึ่งเป็นขางสังเคราะห์ที่หาง่ายและมีราคาถูก มีความทนทานต่อแรงดึงสูง ทนทานต่อน้ำมันและสารเคมี และจะมีความยืดหยุ่นสูงขึ้น เมื่อเติมน้ำมันพาราฟินนิคหรือ dioctyl sebacate

3. ขางพาราหรือขางธรรมชาติที่มีการผสมเคมีขาง เนื่องจากขางดิบตามลำพังจะมีขีดจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากสมบัติเชิงกลต่ำและมีลักษณะทางกายภาพไม่เสถียร โดยสมบัติต่างๆ จะแปรผันตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างมาก คือ ขางจะอ่อนตัวและเหนียวเมื่อร้อน แต่จะแข็งเพราะที่อุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้ การใช้ประโยชน์จากขางจำเป็นต้องมีการผสมขางกับสารเคมีต่างๆ เช่น กำมะถัน ผงเขม่าดำ และสารตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเมื่อนำขางพารามาผสมเคมีขางแล้ว จะทำให้มีความยืดหยุ่นสูง มีความทนทาน

4. ขางพาราที่มีการผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากขางธรรมชาติเป็นขางที่ไม่มีขั้ว จึงสามารถผสมให้เข้ากันได้กับขางที่ไม่มีขั้วชนิดต่างๆ ได้ดี การนำขางธรรมชาติมาผสมกับขางสังเคราะห์จะเป็นการรวมเอาสมบัติที่ดีของทั้งขางธรรมชาติและขางสังเคราะห์ไว้ด้วยกัน

## 2.3 ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจน

การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางชีวภาพจัดเป็นกระบวนการที่นิยมใช้กันมากที่สุด เพราะเป็นวิธีที่ประหยัด และสัดส่วนของระบบบำบัดแบบแอสซึ่งเป็นการบำบัดแบบใช้ออกซิเจนในประเทศไทยที่กว่าร้อยละ 80 มีการใช้ระบบนี้ ดังนั้น ก่อนที่จะนำวัสดุยึดหยุ่นพวกขางต่างๆ ไปใช้เป็นอุปกรณ์เติมอากาศเพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจนให้กับระบบบำบัด จึงควรทำความเข้าใจและทราบถึงรายละเอียดเกี่ยวกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอสก่อน เพื่อเป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการเลือกชนิดและออกแบบอุปกรณ์เติมอากาศแบบฟองอากาศจากวัสดุประเภทขางได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้งาน

### 2.3.1 ระบบแอส (Activated sludge)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.11 ระบบแอ็คติเวเต็ดสลัดจ์

กระบวนการเอส (รูปที่ 2.11) เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจน เป็นการบำบัดน้ำเสียด้วยจุลินทรีย์ เป็นวิธีที่เลียนแบบธรรมชาติ ระบบเอสต้องการออกซิเจนสำหรับให้แบคทีเรียไว้ใช้สัณดาปอาหารซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่เป็นต้นเหตุของความสกปรกในน้ำเสีย

■ ส่วนประกอบของระบบเอส (เกรียงศักดิ์, 2539) โดยทั่วไป ระบบเอสมีส่วนประกอบที่สำคัญ 7 อย่าง คือ

#### 1. ถังเติมอากาศ (Aeration Tank)

เป็นถังที่เกิดปฏิกิริยาทางชีวภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์หรือความสกปรก โดยการที่สารอินทรีย์ซึ่งมีความสกปรกจะถูกใช้เป็นอาหารของจุลินทรีย์ที่ถูกเลี้ยงไว้ในถังเติมอากาศ ทำให้น้ำเสียมีความสกปรกลดลง ทั้งนี้ถังเติมอากาศเปรียบเสมือนบ้านของจุลินทรีย์ ซึ่งต้องมีขนาดพอเหมาะ ถ้าถังมีขนาดเล็กเกินไปจุลินทรีย์ จะอยู่กันอย่างแออัด ทำให้ตกตะกอนไม่ดีหรือทำให้ต้องเติมออกซิเจนมากขึ้น ถังมีขนาดใหญ่เกินไปทำให้จุลินทรีย์มีความเข้มข้นต่ำมาก จะควบคุมการทำงานได้ยาก ขนาดของถังเติมอากาศขึ้นอยู่กับปริมาณความสกปรกในน้ำเสีย (ซึ่งเป็นผลคูณของปริมาณอัตราไหลและความเข้มข้นของน้ำเสีย)

#### 2. ระบบเติมอากาศ (Aeration System)

ระบบแอ็คติเวเต็ดสลัดจ์ที่ทำงานได้อย่างปกติ ต้องมีการเติมอากาศหรือออกซิเจนโดยทางใดทางหนึ่งเสมอ มิฉะนั้นแล้วจุลินทรีย์ จะมีชีวิตอยู่ไม่ได้ เครื่องเติมอากาศเรียกว่า แอเรเตอร์ (Aerators) ถ้าต้องการตรวจสอบว่าเครื่องแอเรเตอร์มีขนาดใหญ่พอเพียงหรือไม่ทำได้โดยการตรวจวิเคราะห์ระดับออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ (Dissolved Oxygen หรือ DO) ถ้าค่า DO ในน้ำสูงกว่า 0.5 มก./ลิตร ถือว่าเครื่องแอเรเตอร์มีขนาดพอเพียง ทั้งนี้ ค่า DO ไม่ควรสูงกว่า 1-2 มก./ลิตร เพราะแสดงว่าเครื่องแอเรเตอร์ใหญ่เกินไป ซึ่งเป็นการไม่ประหยัด นอกจากนี้ หน้าที่อีกประการหนึ่งของเครื่องเติมอากาศ คือ กวนน้ำเพื่อให้จุลินทรีย์ เกิดการแขวนลอยอยู่ในน้ำตลอดเวลา และเพื่อให้เกิดการสัมผัสระหว่างจุลินทรีย์ กับน้ำเสียอย่างทั่วถึง ถ้าหยุดเติมจุลินทรีย์ จะตกตะกอนจมลงสู่ก้นถัง

### 3. ถังตกตะกอน (Sedimentation Tank)

น้ำที่ออกจากถังเติมอากาศยังมีตะกอนแขวนลอย (MLSS) สูงมากยังระบายทิ้งไม่ได้ การใช้ถังตกตะกอนแยกสารแขวนลอยออกจากน้ำเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องทำ น้ำจะถูกส่งให้ไหลเข้ามาในถังอย่างสงบเพื่อให้เกิดการตกตะกอน น้ำใสจะล้นออกทางขอบถัง ส่วนตะกอนจะจมลงก้นถังและสะสมตัวจนมีความเข้มข้นสูง จากนั้นตะกอนจะถูกส่งคืนไปยังถังเติมอากาศเพื่อรักษาระดับความเข้มข้นของจุลินทรีย์ มิให้ต่ำเกินไปจนการทำลายความสกปรกเกิดขึ้นไม่ทัน ถังตกตะกอนมักมีขนาดประมาณ 2-4 เท่าของอัตราไหลเฉลี่ย

### 4. ระบบหมุนเวียนตะกอนสลัดจ์ (Sludge Recirculation Process)

การบำบัดน้ำเสียจะได้ผลเต็มที่ต่อเมื่อมีจำนวนจุลินทรีย์ มากพอเพียงที่จะกินอาหารได้หมดภายในเวลาจำกัด การหมุนเวียนตะกอนจากก้นถังตกตะกอนมายังถังเติมอากาศเป็นวิธีการรักษาระดับความเข้มข้นของจุลินทรีย์ ให้สูงถึงประมาณ 1500-5000 มก./ล.

### 5. ระบบระบายตะกอนทิ้ง (Sludge treatment Disposal Process)

จุลินทรีย์ ใช้ความสกปรกเป็นอาหาร การเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์ จึงเกิดขึ้นและจำเป็นต้องระบายทิ้งออกจากระบบเสียบ้าง เพื่อมิให้มีจุลินทรีย์ ล้น และท่วมถังตกตะกอนจนหนีออกไปกับน้ำใส

### 6. ระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำทิ้งสุดท้าย (Disinfecton Process)

นิยมเติมคลอรีน มักเป็นคลอรีนผงนำมาผสมกับน้ำสะอาดและบรรจุอยู่ในถัง จะได้ผลดีมีปัจจัยที่เหมาะสม 2 ประการ คือ ปริมาณคลอรีนมีเพียงพอ และมีเวลาสัมผัสพอเพียง

### 7. ระบบบำบัดน้ำออกจากสลัดจ์ (Sludge Dewatering Process)

นิยมใช้วิธีตากสลัดจ์ด้วยแสงแดดในบ่อตากสลัดจ์ มีข้อเสียคือ ต้องใช้เวลา เปลืองเนื้อที่ และใช้ไม่ได้ในฤดูฝน ถ้าไม่สามารถใช้บ่อตากสลัดจ์ได้ อาจใช้เครื่องจักรที่บีบน้ำออกจากสลัดจ์ เรียกว่า Filter Press สลัดจ์จะถูกสูบอัดเข้าเครื่องกรองด้วยแรงดันประมาณ 5-10 บาร์ น้ำจะถูกกรองผ่านผ้ากรองออกมา และสลัดจ์ถูกเก็บอยู่ในเครื่องกรอง น้ำที่ถูกบีบออกมาจะทำให้สลัดจ์มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ การบีบน้ำออกจากสลัดจ์ด้วยวิธีนี้ จะต้องมีการเติมสารเคมีพอลิเมอร์จำพวก Cationic Polymer เพื่อให้สลัดจ์จับตัวแน่น น้ำใสกรองง่าย

## 2.3.2 ประเภทของระบบบำบัดเอเอส

### 1. ระบบเอเอสแบบธรรมดา (Conventional Activated Sludge, CAS)

หมายถึงระบบเอเอสที่มีถังตกตะกอนขั้นแรกและถังย่อยสลัดจ์ การเติมอากาศอาจใช้แอร์เรเตอร์ใบพัดหรือแบบฟองอากาศก็ได้ น้ำเสียและตะกอนที่หมุนเวียนกลับมาเข้าถังเติมอากาศจะถูกกระจายไปทั่ว ทำให้จุลินทรีย์ได้รับอาหารและออกซิเจนอย่างทั่วถึง มีเวลา

กักตะกอนหรือ SRT ประมาณ 5-10 วัน ทำให้ต้องมีการกำจัดสลัดจ์ที่ระบายนี้อย่างทันท่วงทีด้วยวิธีหมักก่อนนำไปตากแห้งหรือคังน้ำออก บางคนเรียก ระบบเอสแบบกวนสมบูรณ์ (CMAS)

## 2. ระบบเอสแบบย่อยตัวเอง (Extended Aeration Activated Sludge, EAAS)

จัดเป็นระบบบำบัดแบบไม่มีถังหมัก Sludge ถังเติมอากาศของระบบ EAAS จึงมีหน้าที่ 2 อย่าง คือ บำบัดน้ำเสีย (หรือเลี้ยงจุลินทรีย์) และย่อยสลายสลัดจ์ (เป็นถังหมัก) การควบคุมระบบ EAAS มีความมุ่งหมายให้จุลินทรีย์ อยู่ในถังเติมอากาศนานๆ และได้รับอาหารน้อยๆ เพื่อให้เกิดการย่อยสลายตัวเอง ที่ใช้ในประเทศไทยมี 2 ชนิด คือ แบบธรรมดา คล้ายกับแบบ CMAS และแบบกวนเวียน โดยลักษณะเฉพาะตัวของระบบ EAAS ได้แก่

- มี SRT ประมาณ 20 วันหรือมากกว่า
- ไม่ต้องมีถังตกตะกอนเบื้องต้น
- ไม่ต้องมีถังย่อยสลัดจ์
- สามารถผลิตสลัดจ์ส่วนเกินที่สามารถนำไปตากหรือบิบน้ำได้เลย

## 3. ระบบเอสแบบปรับเสถียรสัมผัส (Contact Stabilization Activated Sludge, CSAS)

ระบบบำบัดประเภทนี้ มักไม่ต้องการถังตกตะกอนชั้นแรก แต่อาจต้องการถังปรับความสม่ำเสมอของน้ำเสีย (Equalization Tank) เพื่อลดความแปรปรวนของน้ำเสีย ถังเติมอากาศมี 2 ใบ ใบแรกเรียก ถังคอนแทคท์ (Contact) ใบที่ 2 เรียก ถังเสถียรปิบลไลเซชัน (Stabilization Tank) หรือถังสแต็ป น้ำเสียและสลัดจ์หมุนเวียนจะถูกส่งเข้าถังคอนแทคท์ ความสกปรกจะถูกออกจากน้ำเสียทันทีภายในถังคอนแทคท์ เป็นผลให้มีการเพิ่มปริมาณของจุลินทรีย์เกิดขึ้น น้ำตะกอนจะถูกส่งไปยังถังตกตะกอนเพื่อแยกเอาจุลินทรีย์ออก น้ำใสจะล้นออกจากขอบบนของถังตกตะกอน สลัดจ์จะถูกสะสมไว้ที่ก้นถังตกตะกอนและส่งไปยังถังสแต็ป

## 4. บ่อหรือสระเติมอากาศ (Aerated Lagoon)

เป็นระบบเอสที่ไม่มีการหมุนเวียนสลัดจ์ มักเป็นบ่อดินขนาดใหญ่ มีเวลากักน้ำหลายวัน มีการเติมอากาศด้วยแอร์เรเตอร์แบบลอยน้ำแต่ไม่มีถังตกตะกอน ความเข้มข้นของ MLSS ของบ่อเติมอากาศจะมีระดับต่ำ เพราะไม่มีการหมุนเวียนตะกอนนั่นเอง

## 5. ระบบเอสแบบกึ่งเท (Sequential Batch Reactor, SBR)

ระบบนี้มักใช้บำบัดน้ำเสียจากโรงงานขนาดเล็ก ลักษณะทั่วไปเหมือนบ่อเติมอากาศต่างกันว่า วิธีการควบคุมระบบ SBR จะมีการเดินเครื่องเติมอากาศเพียงประมาณ 22 ชม./วัน ในระหว่าง 2 ชม. ที่ปิดแอร์เรเตอร์ การตกตะกอนจะเกิดขึ้น ทำให้ระบายน้ำใสออกไปทิ้งได้ ระบบ SBR ไม่มีถังตกตะกอน จึงไม่ต้องมีระบบหมุนเวียนสลัดจ์

## 6. ระบบ Deep Shaft

ในระบบนี้ ถังเติมอากาศแบบท่อกลมขุดลึกลงไปใต้ดิน การเติมอากาศใช้ระบบเป่าอากาศเป็นแบบพิเศษที่มีแรงดันสูงกว่าแบบธรรมดา

### 2.3.4 การนำวัสดุยึดหยุ่นมาใช้ในระบบเติมอากาศ

โดยปกติระบบแอ็คติเวเต็ดสลัดจ์ ต้องมีการเติมอากาศหรือออกซิเจน (ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในการเติมอากาศคิดเป็นร้อยละ 70 ของค่าใช้จ่ายรวมของระบบบำบัดน้ำเสีย) โดยเครื่องเติมอากาศมักเรียกว่าแอเรเตอร์ (Aerators) โดยขนาดของเครื่องเติมอากาศจะต้องใหญ่พอเพียงที่จะให้ออกซิเจนได้ตามที่จุลินทรีย์ต้องการ รวมไปถึงเพียงพอสำหรับการกวนผสม (Mixing) ภายในถังเติมอากาศ เครื่องเติมอากาศจะมี 2 ชนิด คือ แบบตีน้ำ และแบบหัวกระจายอากาศ แบบตีน้ำทำได้โดยตีน้ำให้กระเด็นเป็นละอองน้ำปลิวขึ้นไปในอากาศเพื่อรับออกซิเจนจากอากาศ วิธีนี้มีข้อเสียในเรื่องของพลังงานที่ใช้ไป ส่วนแบบหัวกระจายอากาศ จะใช้ท่อเจาะรูและเป่าลมผ่านรูเล็กๆ ให้เกิดเป็นฟองอากาศ แต่การใช้ท่อเจาะรูจะมีปัญหา คือ เมื่อปิดเครื่องอากาศ (Air Blower) น้ำเสียภายในถังมีโอกาสที่จะไหลซึมเข้าไปและเกิดการอุดตันของจุลินทรีย์ที่รูระบายอากาศ ทำให้เสียเวลาในการดูแลรักษา เพราะต้องหยุดระบบ ในกรณีที่ใช้เป็นท่อเหล็กเจาะรูจะทำให้เกิดการกัดกร่อน เป็นสนิมในระหว่างการซ่อมบำรุง ดังนั้นการนำวัสดุยึดหยุ่นที่เจาะรู มาใช้ในระบบแอ็คติเวเต็ดสลัดจ์ ในส่วนของถังเติมอากาศนั้น นอกจากข้อดีในการแก้ปัญหาการอุดตันในรูระบายอากาศแล้ว วัสดุยึดหยุ่นยังสามารถสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส (Interfacial area) สำหรับถ่ายเทออกซิเจนจากในฟองอากาศไปสู่เฟสน้ำเสียที่ต้องการบำบัด และทำให้ประสิทธิภาพการเติมอากาศโดยรวมสูงขึ้น

## 2.4 การเติมอากาศ

การเติมอากาศ (Aeration process) เป็นขั้นตอนที่สำคัญในกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจนในถังปฏิกรณ์ (Biological reactor) ซึ่งมีการประยุกต์ใช้กระบวนการทางวิศวกรรมในการเลียนแบบวิธีการทางธรรมชาติในการฟอกตัวเองของแหล่งน้ำ โดยอาศัยประโยชน์จากจุลินทรีย์มาใช้ในการย่อยสลายสิ่งสกปรก หรือเปลี่ยนรูปของมวลสารอินทรีย์และอนินทรีย์ในน้ำเสีย ให้มีค่าความสกปรกน้อยลง

### 2.4.1 ทฤษฎีในการเติมอากาศ (มันสิน, 2537)

- กฎของเฮนรี (Henry's Law)

กฎของเฮนรีช่วยทำให้สามารถคำนวณความสามารถในการละลายน้ำของก๊าซต่างๆ ซึ่งไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ กฎข้อนี้กล่าวว่า สำหรับก๊าซที่ละลายน้ำได้น้อยหรือปานกลาง ความสามารถในการละลายน้ำ ขึ้นอยู่กับปริมาณของก๊าซ (Partial Pressure) ในบรรยากาศเหนือผิวน้ำ และสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$C^* = K_h \cdot \bar{P} \quad (2.1)$$

$C^*$	=	ความเข้มข้นของก๊าซที่ละลายน้ำ (โมล/ลิตร)
$K_h$	=	ค่าคงที่ (โมล/ลิตร - บรรยากาศ)
$\bar{P}$	=	ปริมาณของก๊าซวัดเป็น Partial Pressure (บรรยากาศ)

โดยกฎของเฮนรีบอกให้รู้เพียงแต่ว่า เมื่อถึงสภาวะสมดุลจะมีก๊าซละลายน้ำอยู่ได้มากน้อยเพียงใด แต่ไม่ได้บอกอะไรเกี่ยวกับอัตราการเปลี่ยนแปลง เช่น จะต้องใช้เวลานานเพียงใดจึงจะถึงสภาวะสมดุล เมื่อต้องการรู้เกี่ยวกับอัตราเร็วของการเปลี่ยนแปลง จำเป็นต้องพิจารณาถึงหลักการเคลื่อนย้ายมวลสารจากสถานะหนึ่งไปยังอีกสถานะหนึ่ง (Mass Transfer)

ตารางที่ 2.2 ค่าคงที่การละลายของก๊าซ (มันลิน, 2537)

$T, ^\circ C$	Air	$CO_2$	CO	$C_2H_6$	$H_2$	$H_2S$	$CH_4$	NO	$N_2$	$O_2$
0	12.9	764	15.8	44.2	9.62	2,070	24.8	32.9	10.5	21.8
10	10.1	535	12.6	29.4	8.75	1,520	18.7	25.5	8.33	17.0
20	8.38	392	10.4	21.2	8.14	1,150	14.8	21.1	6.93	13.8
30	7.20	299	8.96	16.3	7.63	914	12.4	17.9	6.03	11.7
40	6.40	239	7.98	13.2	7.40	748	10.7	15.8	5.35	10.4
50	5.88	197	7.30	11.1	7.28	630	9.64	14.2	4.92	9.46
60	5.50	163	6.77	9.85	7.28	540	8.88	13.3	4.63	8.85
70	5.30		6.58	8.93	7.30	467	8.34	12.7	4.44	8.40
80	5.20		6.58	8.40	7.37	412	8.15	12.4	4.41	8.10
90	5.15		6.57	8.10	7.40	386	8.04	12.3	4.41	7.98
100	5.20		6.57	8.03	7.46	376	7.93	12.2	4.41	7.93

#### 2.4.2 ขั้นตอนของการเกิดการแอเรชันหรือการเติมอากาศ

แอเรชันเป็นการเคลื่อนย้ายก๊าซหรือสารไวแลไทล์อื่นจากอากาศไปสู่น้ำหรือของเหลวอื่น เช่น การเคลื่อนย้ายออกซิเจนในอากาศให้กับน้ำ การเกิดแอเรชันเป็นไปตามขั้นตอนดังนี้

1. ทำให้มีการสัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำเกิดขึ้นมากที่สุด วิธีปฏิบัติคือ เป่าฟองอากาศลงไปในน้ำ หรือทำให้น้ำเป็นละอองเล็กๆ พ่นขึ้นไปในอากาศ ทั้งสองวิธีเป็น การเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอากาศและน้ำ ดังนั้น ฟองอากาศหรือละอองน้ำมีขนาดยิ่งเล็กลงยิ่งดี
2. โมเลกุลของก๊าซในอากาศ เคลื่อนย้ายผ่านฟิล์มบางๆ บนผิวน้ำ แรงขับเคลื่อนที่ทำให้มีการเคลื่อนย้ายของโมเลกุลก๊าซ คือ ความแตกต่างระหว่างก๊าซที่มีความเข้มข้นสูงในอากาศ และก๊าซที่มีความเข้มข้นต่ำ (หรือไม่มีเลย) ในน้ำ
3. โมเลกุลของก๊าซจะแพร่กระจาย จากบริเวณใต้ฟิล์มไปสู่จุดอื่นๆ ของน้ำ จนกระทั่งน้ำทุกส่วนมีความเข้มข้นของก๊าซถึงจุดอิ่มตัว

ทั้งนี้ การเคลื่อนย้ายก๊าซหรือออกซิเจนจากฟองอากาศไปสู่ น้ำ ขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ ดังต่อไปนี้

➤ ขนาดของละอองน้ำหรือฟองอากาศ

ละอองน้ำหรือฟองอากาศที่มีขนาดเล็ก จะมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าละอองน้ำหรือฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่ ในเมื่อมีปริมาตรอากาศหรือน้ำเท่ากัน ดังนั้นการ เคลื่อนย้ายก๊าซจะเกิดขึ้นได้ดี เมื่อละอองน้ำหรือฟองอากาศมีขนาดเล็ก เนื่องจากมีผิวสัมผัสมากกว่า

➤ ความเข้มข้นของก๊าซที่มีอยู่เดิมในน้ำ

ตามทฤษฎีของเฮนรี ก๊าซสามารถละลายน้ำได้ไม่เกินระดับหนึ่งซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของก๊าซนั้นที่อยู่เหนือ น้ำ ถ้าในน้ำมีก๊าซน้อยกว่าความเข้มข้นสูงสุดที่เป็นไปได้ จะมีการเคลื่อนย้ายก๊าซจากอากาศเข้าสู่ น้ำจนกระทั่งมีการอิ่มตัวของน้ำเกิดขึ้น อัตราการเคลื่อนย้ายก๊าซ ขึ้นอยู่กับผลต่างระหว่างความเข้มข้นที่จุดอิ่มตัวกับความเข้มข้นที่มีอยู่เดิมคือ ถ้าผลต่างมีค่าสูง อัตราการเคลื่อนย้ายก๊าซก็สูงตามด้วย ดังนั้น จึงอาจถือได้ว่าผลต่างของความเข้มข้นเป็นเสมือนแรงผลักดันที่ทำให้มีการเคลื่อนย้ายก๊าซเกิดขึ้น

➤ ความเข้มข้นของก๊าซในอากาศ

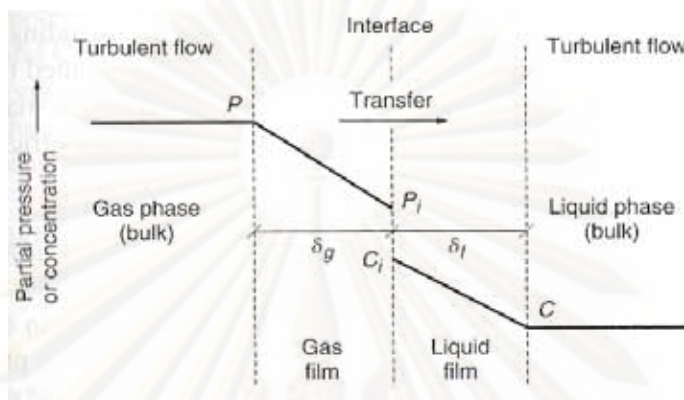
ผลต่างของความเข้มข้นสูงสุด (อิ่มตัว) และความเข้มข้นที่จุดเริ่มต้น เป็นแรงผลักดันที่ทำให้เกิดแอเรนชัน การเพิ่มความเข้มข้นที่จุดอิ่มตัวของก๊าซ โดยเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซในอากาศ ย่อมทำให้อัตราการเคลื่อนย้ายก๊าซหรืออัตราแอเรนชันเกิดขึ้นได้รวดเร็วมากยิ่งขึ้น

➤ เวลาสัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำ

เวลาสัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำจะต้องพอเพียงเพื่อให้โมเลกุลของก๊าซมีเวลาเคลื่อนย้ายจากสถานะหนึ่งไปยังอีกสถานะหนึ่ง นั่นคือ ละอองน้ำต้องอยู่ในอากาศนานพอ

หรือฟองอากาศจะต้องอยู่ในน้ำนานพอเพียง จนกระทั่งก๊าซทะลุผ่านฟิล์มน้ำและแพร่กระจายเข้า

### 2.4.3 ทฤษฎี Two film theory (มันลิน, 2537)



รูปที่ 2.12 การถ่ายเทมวลสารในแบบ Two-film theory

จากงานวิจัยเกี่ยวกับการเติมอากาศของ ได้มีการอธิบายการถ่ายเทของก๊าซ โดยพิจารณาเป็น 2 ชั้นคือชั้นของเหลว และชั้นก๊าซ ในการเติมอากาศโมเลกุลของก๊าซ (เช่น ออกซิเจน) จะซึมผ่านชั้นก๊าซและชั้นของเหลว จนกระทั่งเข้าถึงระดับลึกของของเหลว ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวถึงในขั้นต้น โดยความเข้มข้นของก๊าซจะค่อยๆ ลดลง ในขณะที่ก๊าซได้ซึมผ่านชั้นกลางทั้งสอง รูปที่ 2.12 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นของก๊าซ ณ ตำแหน่งต่างๆ

#### ■ โมเดลทางคณิตศาสตร์ในการพิจารณาการเติมอากาศ (มันลิน, 2537)

โดยทั่วไป อัตราการเคลื่อนย้ายก๊าซหรือออกซิเจนจากฟองอากาศไปสู่เฟสน้ำ สามารถแสดงได้ดังสมการด้านล่าง

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C^* - C) \quad (2.2)$$

$dC/dt$  = อัตราการเกิดแอเรชัน (Aeration rate) มีหน่วยเป็น มก./ลิตรต่อชม.

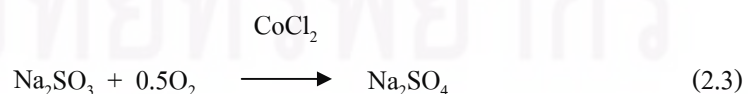
$K_L$  = สัมประสิทธิ์ของการเคลื่อนย้ายของโมเลกุลอากาศผ่านชั้นตัวกลาง (Liquid side mass transfer coefficient) ซึ่งขึ้นกับลักษณะของเฟสน้ำที่มีการเติมอากาศเกิดขึ้น มีหน่วยเป็น เมตรต่อชั่วโมง



- a = พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะระหว่างอากาศกับน้ำ (Interfacial area) โดยเป็นตัวแปรที่ขึ้นกับขนาดของฟองอากาศที่สัมผัสกับเฟสน้ำ ดังนั้นจึงสัมพันธ์โดยตรงกับการเลือกชนิดของอุปกรณ์เติมอากาศ มีหน่วยเป็น ต่อเมตร
- $C_s, C$  = ความเข้มข้นของก๊าซที่อิ่มตัวในน้ำและที่เวลาใดๆ (oxygen saturation concentration in solution, concentration of oxygen in solution) มีหน่วยเป็น มก./ลิตร

เนื่องจากการวัดค่า a ทำได้ยากมาก จึงมักนิยมนรวมค่า  $K_L$  และ a ไว้ด้วยกัน และเรียก  $K_L a$  ว่าสัมประสิทธิ์ของการเคลื่อนย้ายรวมของก๊าซหรือออกซิเจน (Overall Mass Transfer Coefficient) มีหน่วย ต่อชม โดยค่า  $K_L a$  นี้เป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับระบบการเติมอากาศ รูปร่างของถังเติมอากาศ ลักษณะของน้ำ และอุณหภูมิ โดยทั่วไปจะหาได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการหรือในสนามจริง และใช้เป็นค่าอ้างอิงที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการทำงานของระบบเติมอากาศโดยรวม อีกทางหนึ่งด้วย ดังนั้น ในกรณีที่พิจารณาระบบเติมอากาศที่มีรูปร่างของถังเติมอากาศ ชนิดของเฟสน้ำและสภาพแวดล้อมในการทำงานที่เหมือนกัน จะกล่าวได้ว่า ค่าพื้นที่ผิวสัมผัส (a) ซึ่งสอดคล้องกับชนิดของอุปกรณ์เติมอากาศที่เลือกใช้นั้น จะเป็นตัวแปรหลักที่สามารถนำมาใช้เปรียบเทียบอุปกรณ์เติมอากาศที่นำมาใช้งานว่าชนิดใดให้ประสิทธิภาพในการเติมอากาศสูงกว่ากัน

- การหาค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจน (เกรียงศักดิ์, 2539)
  1. ติดตั้งเครื่องเติมอากาศสำหรับการเติมอากาศ เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุดโดยอาจพิจารณาว่า สามารถเติมอากาศลงไปในน้ำให้ได้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen, DO) ถึง 90 %
  2. เติมน้ำที่ต้องการศึกษา จนถึงปริมาณที่ต้องการลงไปในถังเติมอากาศ โดยยังคงปิดเครื่องเติมอากาศอยู่
  3. ทำการดึงออกซิเจนออกจากรู้น้ำให้หมด (DO = 0 มก./ลิตร) โดยการเติมสาร  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  และ  $\text{CoCl}_2$  ลงไปในน้ำ ตามปฏิกิริยาข้างล่าง



จากความสัมพันธ์ข้างบนจะได้ว่าจำเป็นต้องใช้  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  อย่างน้อย 7.9 มก./ลิตร จึงจะกำจัดหรือลดปริมาณ DO ได้ 1 มก./ลิตร แต่โดยทั่วไปควรเติมปริมาณ  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  ประมาณ 9-10 มก./ลิตร เพื่อให้เพียงพอกับการลด DO ลงไป 1 มก./ลิตร และปริมาณของ  $\text{CoCl}_2$  ควรเติมลงไปผสมอยู่ด้วย

อย่างน้อย 1.5 มก./ลิตร สำหรับอีกวิธีในการดึงออกซิเจนออกจากน้ำอาจกระทำได้เติมก๊าซไนโตรเจนลงไปใต้น้ำ

- 1) หลังจากปริมาณ DO ในน้ำมีเท่ากับ 0 การทดลองจึงได้เริ่มขึ้น ( $t = 0$ )
- 2) เริ่มเปิดเครื่องเติมอากาศ และทำการวัดปริมาณ DO ทุกๆ 5 หรือ 10 นาที แล้วแต่ความเหมาะสม จนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัว ซึ่งอาจใช้เวลาถึงหนึ่งชั่วโมง
- 3) นำข้อมูลที่วัดได้จากการทดลองมาเติมลงในตารางข้อมูล ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ข้อมูลจากการทดลองเพื่อหาค่า  $K_L a$

เวลาของการเติมอากาศ (นาที)	$C$ (มก/ลิตร)	$(C_s - C)$ (มก/ลิตร)
0	$C_0$	$C_s - C_0$
$t_1$	$C_1$	$C_s - C_1$
$t_2$	$C_2$	$C_s - C_2$
$t_3$	$C_3$	$C_s - C_3$
$t_4$	$C_4$	$C_s - C_4$

1. นำข้อมูลจากตารางที่ 2.3 มาคำนวณหาค่า  $K_L a$  โดยเขียนกราฟ ซึ่งมาจากสมการดังนี้

$$\text{Log } (C_s - C_1) = \log (C_s - C_0) - K_L a t / 2.303 \quad (2.4)$$

$$K_L a = 2.303 (\log C_1 - \log C_2 / t_2 - t_1) \quad (2.5)$$

- การหาค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปใต้น้ำเสียหรือน้ำตะกอนจุลชีพ

การหาค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปใต้น้ำเสียหรือน้ำตะกอนจุลชีพ (Sludge) จะมีความแตกต่างกับของน้ำสะอาดใต ทั้งนี้เนื่องจากใต้น้ำเสียหรือน้ำตะกอนจุลชีพมีพวกตัวจุลชีพที่ต้องการใช้ออกซิเจนทำให้ความเข้มข้นของออกซิเจนใต้น้ำเสียมีน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของออกซิเจนใต้น้ำสะอาด โดยมีปริมาณอากาศที่เติมลงไปเท่ากัน โดยทั่วไปความเข้มข้นของออกซิเจนใต้น้ำตะกอนจุลชีพจะมีประมาณ 1-3 มก./ลิตร ซึ่งการหาค่า  $K_L a$  สำหรับน้ำเสียหรือน้ำตะกอนจุลชีพ เป็นดังสมการ 2.6

$$\frac{dC}{dt} = K_L a(C_s - C) - r_m \quad (2.6)$$

$r_m$  = ปริมาณของออกซิเจนที่ถูกใช้โดยตัวจุลชีพ, กรัม ของออกซิเจน/(วัน. กรัมของ MLVSS) (โดยทั่วไปค่า  $r_m$  มีประมาณ 2-7 กรัม/(วัน.กรัมของ MLVSS)) และนิยมเรียกค่า  $r_m$  ว่า Oxygen Uptake Rate, มก/(ลิตร.วัน)

เมื่อ  $dC/dt$  ไม่เท่ากับ 0 (อยู่ในสภาวะไม่คงที่) สามารถหาค่า  $K_L a$  ได้โดยจัดรูปสมการเป็น

$$\frac{dC}{dt} = (K_L a C_s - r_m) - K_L a C \quad (2.7)$$

หาค่า  $dC/dt$  ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยการวัดค่า  $C$  ณ เวลาใดๆ และหาค่าความลาดของเส้นกราฟ (ค่า  $C$  กับเวลา) เมื่อได้ค่า  $dC/dt$  ต่างๆ สำหรับ  $C_1, C_2, C_3, \dots$  นำค่า  $dC/dt$  มาทำการเขียนกราฟ เพื่อหาค่า  $K_L a$  และ  $r_m$

ถ้าควบคุมปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนในถังเดิมอากาศที่มีน้ำตะกอนจุลชีพให้คงที่ ซึ่งก็คือ  $dC/dt$  เท่ากับ 0 ทำให้สมการ 2.6 เปลี่ยนเป็นสมการ 2.8 โดยค่า  $C_s$  และ  $C$  มีค่าคงที่ด้วย

$$K_L a = \frac{r_m}{(C_s - C)} \quad (2.8)$$

ค่า  $r_m$  สามารถคำนวณหาได้จากเครื่อง Warburg Respirometer ซึ่งใช้หลักการของ Manometric ในการหาจำนวนของออกซิเจนที่ถูกใช้โดยตัวจุลชีพ เมื่อทราบค่า  $r_m$  แล้ว ค่า  $K_L a$  ก็สามารรถคำนวณหาได้จากสมการ 2.8

- การหาค่าความสามารถในการเติมออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศ

ค่าความสามารถในการเติมออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศ (Oxygenation Capacity, OC) จะคำนวณหาได้จากสมการ 2.9 ซึ่งต้องทราบค่า  $K_L a$  จากการทดลอง และกำหนดให้ค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำ ณ จุดเริ่มต้นเท่ากับ 0 ( $C = 0$ )

$$OC, \text{ มก. O}_2 / (\text{ลิตร.ชม.}) = dC/dt = K_L a(C_s - 0) = K_L a C_s \quad (2.9)$$

กำหนดให้  $V$  คือ ปริมาตรของถังเติมอากาศ (ลิตร) จะได้

$$OC, \text{ มก. } O_2 / \text{ ชม.} = K_L a C_S V \quad (2.10)$$

หรือ

$$OC, \text{ มก. } O_2 / \text{ ชม.} = K_L a C_S V \times 10^{-6} \quad (2.11)$$

เนื่องจากการทดลองหาค่า  $K_L a$  จะกระทำในสภาวะต่างๆ ซึ่งอาจไม่ได้อยู่ในสภาวะมาตรฐาน ดังนั้นค่า  $K_L a$  ที่ได้รับจากการทดลองจำเป็นต้องทำการคำนวณปรับค่าสำหรับอุณหภูมิและความดันบรรยากาศที่มีค่าแตกต่างกันกับสภาวะมาตรฐาน (อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และความดันบรรยากาศ 10.33 ม. ของน้ำ หรือ 760 มม.ปรอท)

- การคำนวณปรับค่า  $K_L a$  สำหรับอุณหภูมิใดๆ

ค่า  $K_L a$  ณ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส สามารถคำนวณหาได้จากสมการ 2.12 ซึ่งเป็นสมการที่นิยมเรียกว่าสมการ van't Hoff-Arrhenius โดยจะเห็นได้ว่าค่า  $K_L a$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อสภาวะแวดล้อมมีอุณหภูมิสูงขึ้น

$$K_{L a(T)} = K_{L a(20^\circ\text{C})} \theta^{(T-20)} \quad (2.12)$$

$K_{L a(T)}$  = ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจน ณ อุณหภูมิ T องศาเซลเซียส

$K_{L a(20^\circ\text{C})}$  = ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจน ณ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

$\theta$  = ค่าคงที่โดยมากอยู่ในช่วง 1.015 ถึง 1.040 โดยทั่วไปค่า  $\theta$  เท่ากับ 1.024 สำหรับเครื่องเติมอากาศแบบเป่าอากาศจุ่มใต้น้ำและแบบเติมอากาศบริเวณผิวน้ำ

T = อุณหภูมิของน้ำ, องศาเซลเซียส

การคำนวณปรับค่า  $C_S$  สำหรับอุณหภูมิและความดันบรรยากาศใดๆ

ค่า  $C_S$  สำหรับ ณ อุณหภูมิใดๆ สามารถอ่านค่าได้จากตารางหรือคำนวณได้จากสมการ 2.13

$$C_{S(T)} = 14.652 + 10.53 (e^{-0.03896T} - 1) \quad (2.13)$$

เมื่อทำการปรับค่า  $C_S$  แล้ว นำค่า  $C_{S(T)}$  มาคำนวณปรับแก้เพื่อหาค่า  $C_S$  สำหรับ ณ ความดันบรรยากาศใดๆ ซึ่งสามารถคำนวณหาได้จากสมการ 2.14

$$\frac{C'_S}{C_{S(T)}} = \frac{P-p}{760-p} \quad (2.14)$$

- $C_{S(T)}$  = ค่า  $C_s$  ณ ความดันบรรยากาศมาตรฐาน, มก/ลิตร  
 $C'_s$  = ค่า  $C_s$  ณ ความดันบรรยากาศ  $P$  มม. ของปรอท, มก/ลิตร  
 $P$  = ค่าความดันบรรยากาศใดๆ, มม.ของปรอท  
 $p$  = ค่าความดันไอของน้ำ, มม. ของปรอท

นำค่า  $C_s$  ที่ถูกปรับแก้สำหรับ ณ อุณหภูมิ และความดันบรรยากาศจริงในสนามแล้ว จากนั้นจึงทำการปรับแก้สำหรับประเภทของเครื่องเติมอากาศแบบจุ่มใต้น้ำ เพราะจะมีความดันเนื่องจากความลึกของน้ำมาเกี่ยวข้องด้วยที่นิยมเรียกความดันนี้ว่า Hydrostatic Pressure ซึ่งจะคำนวณหาได้โดยใช้สมการ 3.14 โดยจะคำนวณหาค่า  $P$  ใหม่ ดังสมการ 2.15

$$P' = P + 73.53d \quad (2.15)$$

- $P'$  = ความดันที่มีทั้งหมด ณ ความลึกใดๆ ของน้ำในถังเติมอากาศ, มม. ปรอท  
 $P$  = ความดันบรรยากาศบริเวณถังเติมอากาศในขณะนั้น, มม. ปรอท  
 $d$  = ความลึกของน้ำในถังเติมอากาศ, ม.

$$73.53 = \frac{1000 \text{ มม.น้ำ}}{13.6 \text{ มม.น้ำ/1 มม.ปรอท}}$$

▪ การคำนวณปรับค่าความสามารถในการเติมออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศ

เมื่อได้ค่า  $K_L a$  และค่า  $C_s$  ที่ถูกปรับแก้สำหรับสภาวะจริงแล้ว จึงนำค่าเหล่านี้มาคำนวณหาค่า OC ได้อย่างถูกต้อง โดยอาจใช้สมการ 2.16 และ 2.17 สำหรับเครื่องเติมอากาศแบบที่เติมอากาศบริเวณผิวน้ำ

$$OC, \text{ มก } O_2/\text{ชม.} = (K_L a_{(T)} 1.024^{(20-T)}) \left( C_{S(T)} \frac{P-p}{760-p} \right) V \quad (2.16)$$

สำหรับเครื่องเติมอากาศแบบที่เติมอากาศบริเวณใต้น้ำ

$$OC, \text{ มก } O_2/\text{ชม.} = (K_L a_{(T)} 1.024^{(20-T)}) \left( C_{S(T)} \frac{P+73.53d-p}{(760-p)} \right) V \quad (2.17)$$

▪ การคำนวณหาค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจน

ค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ( $R_o$ ) หรือที่นิยมเรียกเป็นภาษาอังกฤษว่า Oxygen Transfer Rate คือค่า Oxygenation Capacity, OC หารด้วยกำลังงานที่ให้กับเครื่องเติมอากาศนั้น ดังสมการ 2.18

$$R_o = OC/P \quad (2.18)$$

$R_o$  = ค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ณ สภาวะมาตรฐาน ( $20^\circ$  ซ ความดัน 1 บรรยากาศ และมี DO เท่ากับ 0), มก. $O_2$ /(กิโวลต์.ชม.)

OC = ค่าความสามารถในการเติมออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศ (มก.  $O_2$ /ชม.)

P = กำลังงานที่ให้กับเครื่องเติมอากาศ (กิโวลต์)

▪ การคำนวณหาประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจน  
ประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศต่างๆ สามารถคำนวณได้จาก สมการ 2.19

$$E = \frac{OC}{A} \times 100 \quad (2.19)$$

E = ประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศต่างๆ (เปอร์เซ็นต์)

A = ปริมาณออกซิเจนที่เติมลงไปใต้น้ำ ณ สภาวะมาตรฐาน (มก. $O_2$ /ชม.)

▪ ค่าแปรเปลี่ยนของ  $K_{La}$   
เมื่อเติมอากาศสำหรับระบบบำบัดน้ำเสีย เช่น ถังย่อยสลายสารอินทรีย์ของน้ำเสีย ถังเพิ่มปริมาณออกซิเจน เป็นต้น ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจน ( $K_{La}$ ) จะมีค่าที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับประเภทของน้ำที่มีการเติมอากาศลงไป โดยกำหนดค่า  $\alpha$  คืออัตราส่วนระหว่าง  $K_{La}$  สำหรับการเติมอากาศลงในน้ำเสียกับค่า  $K_{La}$  สำหรับการเติมอากาศลงในน้ำประปา ดังสมการ 2.20

$$\alpha = K_{La}(\text{น้ำเสีย}) / K_{La}(\text{น้ำประปา}) \quad (2.20)$$

ค่า  $\alpha$  จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

- อุณหภูมิของน้ำ
- ปริมาณของสารอินทรีย์ต่างๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำ

- ปริมาณของแร่ธาตุต่างๆ ในน้ำ
- ปริมาณสารตะกอนแขวนลอยในน้ำ
- ขนาดความรุนแรงของการกวน
- ความสามารถของเครื่องอากาศ หรือประเภทของเครื่องเติมอากาศ
- ขนาดของถังเติมอากาศ หรือรูปร่างลักษณะของถัง

ประสิทธิภาพในการกำจัด BOD น้ำเสียที่ถูกย่อยสลายได้ง่าย ค่า  $\alpha$  จะมีค่าสูงเข้าใกล้ 1 เมื่อขนาดความรุนแรงของการกวนมีน้อย ค่า  $\alpha$  จะมีค่าสูงเข้าใกล้ 1 ทำให้การกวนของน้ำไม่มีผลต่อค่า  $\alpha$  เพราะการยับยั้งในการกระจายอากาศลงไปใต้น้ำเป็นปัจจัยที่สำคัญกว่าของแผ่นฟิล์มน้ำ ซึ่งทำให้การถ่ายเทอากาศลงไปใต้น้ำเสียหรือใต้น้ำประปามีปริมาณเท่าๆ กัน เมื่อขนาดความรุนแรงของการกวนมีปานกลาง ค่า  $\alpha$  จะมีค่าลดลงจนถึง 0.5 เพราะการยับยั้งในการกระจายอากาศลงไปใต้น้ำเริ่มมีน้อยลง แต่จะทำให้แผ่นฟิล์มน้ำเป็นปัจจัยที่สำคัญกว่า ซึ่งแผ่นฟิล์มของน้ำเสียจะมีความต้านทานในการถ่ายเทอากาศลงไปใต้น้ำสูงกว่าของน้ำประปา เมื่อขนาดความรุนแรงของการกวนมีมาก ค่า  $\alpha$  จะมีค่าสูงเข้าใกล้ 1 เพราะการปั่นป่วนของน้ำทั้งของน้ำเสียและน้ำประปามีมาก ทำให้ปัจจัยของการยับยั้งในการกระจายอากาศลงไปใต้น้ำและปัจจัยของแผ่นฟิล์มน้ำไม่มีผลต่อการถ่ายเทอากาศลงไปใต้น้ำ ซึ่งทำให้การถ่ายเทอากาศลงไปใต้น้ำเสียหรือใต้น้ำประปามีปริมาณเท่าๆ กัน ค่า  $\alpha$  ที่ได้กล่าวถึงเป็นค่าที่ใช้ในการคำนวณหา  $K_L a$  สำหรับสภาวะจริง โดยมากค่า  $\alpha$  จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.3-1.2 จากข้อมูลในทางปฏิบัติค่า  $\alpha$  มีเท่ากับ 0.4-0.8 สำหรับเครื่องเติมอากาศแบบเป่าอากาศ และค่า  $\alpha$  มีเท่ากับ 0.6-1.2 สำหรับเครื่องเติมอากาศแบบตีน้ำ

## 2.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเติมอากาศ

ในการเติมอากาศลงไปใต้น้ำเสียจะใช้เครื่องเติมอากาศ ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ โดยสามารถแบ่งออกได้เป็นประเภทใหญ่ๆ ดังนี้ แบบตัวกระจายอากาศ (Diffused Aeration) และแบบตีน้ำ (Mechanical Aeration)

### 2.5.1 แบบตัวกระจายอากาศ (Diffused Aeration)

ระบบเติมอากาศแบบใช้ตัวกระจายอากาศ อาศัยหลักการให้อากาศที่เกิดจากเครื่องเป่าอากาศ หรือเครื่องดูดอากาศทำการพ่นหรือเป่าลงไปในน้ำเสีย โดยอาศัยตัวกระจายอากาศเป็นตัวจ่ายอากาศ โดยมากอากาศที่ถูกพ่นลงไปในน้ำจะมีลักษณะเป็นฟองอากาศ ซึ่งตัวกระจายอากาศ

สามารถแบ่งออกได้เป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 2 ลักษณะ คือ แบ่งตามขนาดฟองอากาศและแบ่งตามลักษณะทางกายภาพ

#### 1. แบ่งตามขนาดฟองอากาศ

##### ■ ขนาดเล็ก (Fine bubble)

ตัวกระจายอากาศจะมีรูพรุนขนาดเล็กมาก อาจมีลักษณะเป็นแผ่น เป็นท่อ หรือเป็นหมวกยอดกลม (Dome) ซึ่งทำจากซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide,  $\text{SiO}_2$ ) หรืออลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum Oxide,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) โดยมีวัสดุยึดประสานพวกเซรามิก (Ceramic) เป็นตัวช่วยยึดประสานเป็นรูปร่างที่ต้องการ ตัวกระจายแบบนี้จะมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนประมาณร้อยละ 10-30 มีอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ณ สภาวะมาตรฐาน (น้ำประปาที่  $20^\circ\text{C}$  ณ ความดันหนึ่งบรรยากาศ เท่ากับ 1.2-2.0 กก.  $\text{O}_2$ /กิโวลต์.ชม.) ขนาดของฟองอากาศจะมีขนาด 2.0-2.5 มม. โดยทั่วไปตัวกระจายอากาศแบบนี้จะออกแบบให้สามารถจ่ายอากาศได้ในอัตรา 0.1-0.4 ลบ.ม. ต่อ นาทีต่อหัว ข้อดีของตัวกระจายอากาศแบบนี้ คือ สามารถทำการกวนน้ำให้ทั่วถึงได้ดี สามารถปรับอัตราไหลของอากาศที่พ่นเข้าไปในน้ำได้มากหรือน้อย และมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนที่สูง สำหรับข้อเสียคือมีราคาแพงทั้งค่าวัสดุและค่าบำรุงรักษา และควรมีการติดตั้งเครื่องกรองอากาศด้วยเพื่อป้องกันการอุดตันในรูพรุนนั้น รูปลักษณะทั่วไปของตัวกระจายอากาศแสดงไว้ในรูป 2.13



รูปที่ 2.13 Fine bubble



- ขนาดกลาง (Medium bubble)

ตัวกระจายอากาศจะมีรูพรุนขนาดรูจะมีขนาดกลาง โดยมากจะมีลักษณะเป็นท่อ ซึ่งทำด้วยเหล็กไร้สนิม (Stainless Steel) เจาะเป็นรูๆ และหุ้มด้วยถุงผ้ามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเท่ากับ 7.5 ซม. และมีความยาวท่อเท่ากับ 61 ซม. ตัวกระจายอากาศแบบนี้จะมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนประมาณ 6-15% มีอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ณ สภาวะมาตรฐาน เท่ากับ 1.0-1.6 กก. O<sub>2</sub>/กิโวลต์.ชม. มีขนาดฟองอากาศใหญ่กว่า 2.5 มม. เล็กน้อย ข้อดีของตัวกระจายอากาศแบบนี้คือสามารถทำการกวนน้ำให้ทั่วถึงได้ดี ค่าบำรุงรักษาต่ำโดยเพียงแค่เปลี่ยนถุงผ้าที่หุ้มท่อเท่านั้น สำหรับข้อเสียคือมีราคาแพง และควรมีการติดตั้งเครื่องกรองอากาศด้วยเพื่อป้องกันการอุดตันในรูพรุนและช่วยยืดอายุการใช้งาน

- ขนาดใหญ่ (Coarse bubble)

ตัวกระจายอากาศจะมีรูที่มีขนาดใหญ่กว่าของขนาดเล็กและขนาดกลาง อาจมีลักษณะเป็นท่อ หรือเป็นหมวกยอดกลม (Dome) ตัวกระจายอากาศแบบนี้มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนต่ำกว่าของขนาดเล็กและขนาดกลาง โดยมีค่าประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนประมาณ 4-8% มีอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ณ สภาวะมาตรฐาน เท่ากับ 0.6-12. กก. O<sub>2</sub>/กิโวลต์.ชม. มีขนาดฟองอากาศใหญ่กว่า 2.5 มม. ข้อดีของตัวกระจายอากาศแบบนี้คือไม่ค่อยจะมีปัญหาเกี่ยวกับการอุดตัน ดังนั้นค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษามีต่ำ ไม่จำเป็นต้องติดตั้งเครื่องกรองอากาศสำหรับข้อเสียคือมีราคาแพง มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนต่ำมาก ลักษณะของตัวกระจายอากาศแบบนี้ได้แสดงไว้ดังรูป 2.14



รูปที่ 2.14 Coarse bubble

## 2. แบ่งตามลักษณะทางกายภาพ

### ▪ แบบรูพรุนเล็ก (Porous diffusers)

ตัวกระจายอากาศแบบรูพรุนเล็กมีรูปลักษณะต่างๆ ได้แก่ แบบแผ่น (Plate diffusers) แบบท่อ (Tube diffusers) แบบหมวกยอดกลม (Dome diffusers) และแบบแผ่นจาน (Disc diffusers) ตัวกระจายนี้จะมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนประมาณร้อยละ 6-30 มีอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ณ สภาวะมาตรฐานเท่ากับ 1.0-2.0 กก. O<sub>2</sub>/กิโวลต์.ชม.

### ▪ แบบแผ่น (Plate diffusers)

ตัวกระจายอากาศแบบแผ่นอยู่ในกลุ่มของแบบรูพรุนเล็กมีลักษณะเป็นแผ่น Ceramic สีเหลือง ขนาด 30 ซม. × 30 ซม. ×หนา 25-38 มม. ตัวกระจายอากาศแบบนี้จะยึดติดกับพื้นของถังเดิมอากาศ ดังรูป 2.15 แผ่นกระจายอากาศจะถูกออกแบบจัดวางในตำแหน่งที่เหมาะสมเป็นกลุ่มๆ โดยมีท่ออากาศเดินไปยังแต่ละกลุ่ม ซึ่งจะมีวาล์วควบคุมเปิดปิดของแต่ละกลุ่ม ข้อเสียของระบบนี้คือมีปัญหาการกระจายอากาศของแต่ละกลุ่มอาจมีไม่เท่ากัน ไม่สะดวกในการถอดขึ้นมาบำรุงรักษาหรือเปลี่ยนแผ่นเนื่องจากได้ถูกยึดติดกับพื้นถังเดิมอากาศ มีความยุ่งยากมากถ้าต้องการเพิ่มตัวกระจายอากาศขึ้นในถังเดิมอากาศนี้ ไม่นิยมใช้มากนัก สำหรับข้อดีของตัวกระจายอากาศแบบแผ่นคือ มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนสูงและมีอายุการใช้งานนาน



รูปที่ 2.15 Plate diffusers

- แบบท่อ (Tube diffusers)

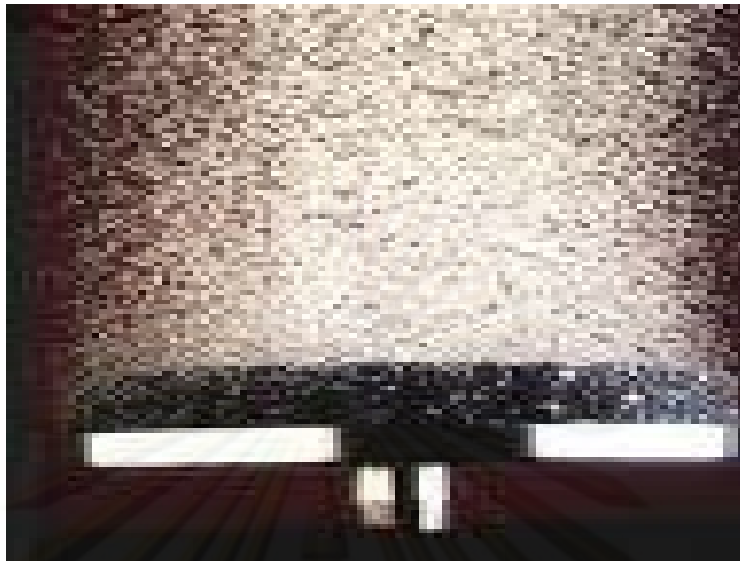
ตัวกระจายอากาศแบบท่ออยู่ในกลุ่มของแบบรูปทรงเล็กมีลักษณะเป็นท่อ ซึ่งทำจาก Aluminum Oxide หรือพวกร HDPE (High Density Polyethylene) โดยอาจเป็นแบบแข็ง (Rigid) หรือแบบโค้งงอ (Nonrigid) ดังรูป 2.16 ตัวกระจายอากาศแบบท่อแข็งนี้ โดยทั่วไปมีขนาดยาว 50-60 ซม. มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 6.5-7.5 ซม. ซึ่งผิวของตัวกระจายอากาศแบบเชื่อมผิว จะมีความหนาเพียง 0.6-2.5 มม. โดยทั่วไปตัวกระจายอากาศแบบท่อที่มีความยาว 50-60 ซม. สามารถออกแบบให้มีอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 0.5-4.7 ลิตร ต่อวินาทีต่อตัวกระจายอากาศหนึ่งตัว



รูปที่ 2.16 Tube diffusers

- แบบหมวกยอดกลม (Dome diffusers)

ตัวกระจายอากาศแบบหมวกยอดกลมอยู่ในกลุ่มของแบบรูปทรงเล็กมีลักษณะเป็นหมวกกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 18 ซม. มีความหนาประมาณ 38 มม. มีแผ่นกระจายอากาศ (Media) บริเวณขอบรอบๆ หมวกและบริเวณส่วนผิวบนของหมวก ซึ่งมีความหนาประมาณ 15 มม. และ 19 มม. ลักษณะของตัวกระจายอากาศแบบหมวกยอดกลมได้แสดงไว้ดังรูป 2.17



รูปที่ 2.17 Dome diffuser

- แบบแผ่นจาน (Disc Diffusers)

ตัวกระจายอากาศแบบแผ่นจานอยู่ในกลุ่มของแบบรูพรุนเล็กมีลักษณะเป็นแผ่นจานมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 18-24 มม. มีความหนา 13-19 มม. แผ่นจานนี้มีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ได้แก่ แผ่นจาน Ceramic แผ่นจาน Glass bead แผ่นจาน Aluminum Oxide แผ่นจาน Polyethylene ซึ่งได้ถูกยึดติดกับท่อกระจายอากาศ PVC

### 3. แบบไม่ใช้รูพรุนขนาดเล็ก (Nonporous diffusers)

ตัวกระจายอากาศแบบ Nonporous diffusers มีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ได้แก่พวก Fix Orifice พวก Valved Orifice พวก Static tubes และพวก Perforated hose ตัวกระจายแบบนี้จะมีฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่กว่าของแบบรูพรุนเล็ก ดังนั้นจึงมีประสิทธิภาพในการเติมอากาศต่ำกว่าแบบรูพรุนเล็ก แต่มีข้อดีตรงที่มีราคาถูกลงและการบำรุงรักษาต้องการน้อยกว่า สำหรับตัวกระจายแบบไม่ใช้รูพรุนเล็กนี้จะมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนประมาณร้อยละ 4-8 มีอัตราการถ่ายเทออกซิเจนประมาณ 0.6-1.0 กก.O<sub>2</sub>/(กิโลวัตต์.ชม.) ยกเว้นของแบบ Static tube aerator ที่มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนประมาณร้อยละ 7-10 มีอัตราการถ่ายเทออกซิเจนประมาณ 1.2-1.6 กก.O<sub>2</sub>/(กิโลวัตต์.ชม.)

ตารางที่ 2.4 ลักษณะของตัวกระจายอากาศแบบ Nonporous diffusers

ชนิดของตัวกระจายอากาศ	ลักษณะของตัวกระจาย
<p>อากาศ</p> <p><i>Fixed Orifice</i></p> <p>แบบ <i>Perforated piping</i></p> <p>แบบ <i>Spargers</i></p> <p>แบบ <i>Slotted tube</i></p>	<p>- ท่อกระจายอากาศที่มีรูเล็กตลอดตามยาวของท่อ อาจเป็น PVC, PE</p> <p>- เป็นตัวกระจายอากาศทำด้วยพลาสติกและติดตั้งกับท่อกระจายอากาศ</p> <p>- ท่อกระจายอากาศถูกเจาะเป็นช่องแคบและยาว</p>
<p><i>Valved Orifice</i></p>	<p>- ตัวกระจายอากาศแบบนี้จะมี Check valve เพื่อไม่ให้เกิดน้ำไหลเข้าไปขณะที่ปิดเครื่องจ่ายอากาศ</p>
<p><i>Static Tubes</i></p>	<p>- ตัวกระจายอากาศจะติดตั้งอยู่บนพื้นถังเดิมอากาศในแนวตั้ง ทำหน้าที่เสมือนกับเครื่องสูบน้ำแบบ Airlift</p>
<p><i>Perforated Hose</i></p>	<p>- ตัวกระจายอากาศแบบนี้เป็น ท่อยาว และอ่อนที่มีรูเล็ก ตลอดตามยาวของท่อ และจะยึดติดกับพื้นถังเดิมอากาศ</p>

#### 4. แบบอื่นๆ

##### ■ แบบ Jet aerator

มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนค่อนข้างสูงพอประมาณ มีขนาดฟองอากาศตั้งแต่ขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ หลักการ คือ อาศัยการผสมกันระหว่างอากาศที่ถูกจ่ายเข้าไปด้วยเครื่องอัดอากาศ และน้ำที่ถูกสูบเข้าไป เมื่อผสมกันตรงบริเวณช่องแคบ (Nozzle) ทำให้เกิดความเร็วสูงมาก โดยทั่วไปจะติดตั้งไว้บริเวณใกล้ๆ กับพื้นถังเติมอากาศ ตัวกระจายอากาศแบบนี้เหมาะสมกับถังเติมอากาศที่มีความลึกมากถึง 7-8 เมตร มีราคาพอประมาณ สำหรับประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนจะมีประมาณร้อยละ 10-25 และมีอัตราการถ่ายเทออกซิเจนประมาณ 1.2 - 2.4 กก. O<sub>2</sub>/(กิโวลต์.ชม.)

##### ■ แบบ Aspirating device

เป็นเครื่องเติมอากาศแบบอาศัยมอเตอร์หมุนแกน เพื่อดูดอากาศจากภายนอกเข้าสู่บริเวณรอบๆ แกน เพื่อพ่นอากาศเข้าไปในน้ำ โดยอาศัยความเร็วของอากาศและความเร็วหมุนของแกน ซึ่งทำให้เกิดการปั่นป่วนขึ้นในน้ำ โดยทำให้เกิดการผสมกันระหว่างอากาศกับน้ำเป็นฟองอากาศมากมาย เครื่องมือนี้อาจถูกยึดเกาะติดกับ โครงสร้างใดๆ ก็ได้ หรือลอยอยู่บนทุ่นลอยน้ำก็ได้ สำหรับประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนจะมีได้สูงสุดประมาณ 1.5 กก. O<sub>2</sub>/(กิโวลต์.ชม.) โดยทั่วไปเครื่องเติมอากาศแบบนี้สามารถทำงานได้กับถังเติมอากาศที่มีความลึกมากถึง 3.5 ม.

##### ■ แบบ U-tube

ระบบเติมอากาศแบบนี้อาศัยแรงดันที่มีถังเติมอากาศลึกมากๆ ทำให้การถ่ายเทออกซิเจนลงไปในน้ำมีสูงมาก ถังเติมอากาศมีลักษณะเป็นถังลึกมากประมาณ 120-150 ม. ประกอบด้วย 2 ส่วน โดยน้ำเสียที่ลงสู่ก้นถังจะถูกเติมอากาศด้วยเครื่องอัดอากาศที่มีความดันสูงมาก จากนั้นน้ำจะไหลขึ้นมาโดยจะถูกเติมอากาศอีกครั้ง ระบบนี้ต้องอาศัยพลังงานของเครื่องเติมอากาศมาก เหมาะสมกับการบำบัดน้ำเสียที่มีค่า BOD สูง

#### ➤ สมรรถภาพของตัวกระจายอากาศ

การพิจารณาเลือกใช้ตัวกระจายอากาศควรพิจารณาถึงประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจน โดยมีปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

- ชนิด ขนาด รูปร่างของตัวกระจายอากาศ
- อัตราการไหลของอากาศที่พ่นเข้าไปในน้ำ
- ความลึกของน้ำที่ต้องการพ่นอากาศเข้าไป
- ขนาดรูปร่าง กว้าง ยาว ลึก ของถัง
- การเลือกตำแหน่งของตัวกระจายอากาศบนพื้นถังเติมอากาศ
- ลักษณะของน้ำเสีย

ตัวกระจายอากาศที่ได้กล่าวถึงมาแล้ว ได้ถูกนำมาหาสมรรถภาพของตัวกระจายอากาศแต่ละตัวในน้ำสะอาด ทำภาวะมาตรฐาน (น้ำประปาที่ 20°C ความดันหนึ่งบรรยากาศ)

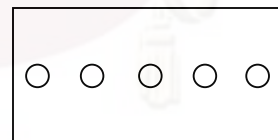
ค่าประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปใต้น้ำ (Oxygen-Transfer Efficiency, OTE) ของตัวกระจายอากาศจะมีค่าลดลง เนื่องจากสิ่งสกปรกต่างๆ ที่เป็นตะกอน หรือเศษดินทรายต่างๆ และอาจเนื่องจากการอุดตันขึ้นภายในตัวกระจายอากาศ ซึ่งเป็นสาเหตุที่เกิดขึ้นมาจากสิ่งสกปรกในอากาศ โดยปราศจากการติดตั้งเครื่องกรองอากาศ ดังนั้นจำเป็นต้องติดตั้งเครื่องกรองอากาศ และจำเป็นต้องหมั่นทำความสะอาดตัวกระจายอากาศ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปใต้น้ำ สำหรับลักษณะของน้ำเสียจะมีผลอย่างมากต่อการถ่ายเทออกซิเจนลงไปใต้น้ำเสีย โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบเติมอากาศแบบที่ใช้ตัวกระจายอากาศ ยกตัวอย่างเช่น พวกผงซักฟอก พวกตะกอนละลายน้ำและพวกตะกอนแขวนลอยต่างๆ ซึ่งอาจจะมีผลต่อประสิทธิภาพของการเติมอากาศ โดยทั่วไปค่า สำหรับระบบเติมอากาศแบบมีฟองอากาศขนาดเล็กจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.4-0.9

➤ การจัดวางตัวกระจายอากาศในถังเติมอากาศ

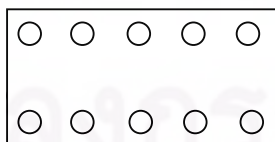
การจัดวางตัวกระจายอากาศในพื้นที่ถังเติมอากาศมีความสำคัญมากต่อการเติมอากาศให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด คือ มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนสูงที่สุด สามารถทำการบำรุงรักษาได้สะดวกที่สุด และใช้พลังงานน้อยที่สุด ในการจัดวางตัวกระจายอากาศในถังเติมอากาศต้องการให้มีการกวนน้ำที่พอเพียงทั่วทั้งถัง โดยการจัดวางตัวกระจายอากาศแบบต่างๆ แสดงไว้ดังรูป 2.18 ระยะห่างระหว่างตัวกระจายอากาศเพื่อให้มีเพียงพอกับการเดินไปทำการบำรุงรักษาตัวกระจายอากาศแต่ละตัวได้สะดวก โดยปกติระยะห่างระหว่างขอบถึงขอบของตัวกระจายอากาศควรมีอย่างต่ำ 50 ซม.



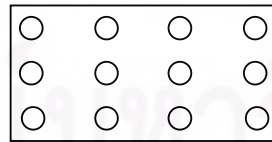
แบบ Single spiral roll



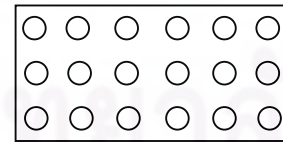
แบบ Mid-width



แบบ Dual spiral roll



แบบ Cross roll



แบบครอบคลุม

รูปที่ 2.18 การจัดวางตัวกระจายอากาศในถังเติมอากาศ (เกรียงศักดิ์, 2539)

➤ เครื่องเป่าอากาศ (เกรียงศักดิ์, 2539)

1. เครื่องเป่าอากาศ (Blower) คือ เครื่องที่ทำให้อากาศมีความดันสูงถึง 1.0 ความดันบรรยากาศ หรือประมาณ 15 ปอนด์ต่อตร.นิ้ว
2. พัดลม (Fan) คือ เครื่องที่ทำให้อากาศมีความดันสูงถึง 0.14 ความดันบรรยากาศ หรือประมาณ 2 ปอนด์ต่อตร.นิ้ว
3. เครื่องอัดอากาศ (Compressor) คือ เครื่องที่ทำให้อากาศมีความดันมากกว่า 1.0 ความดันบรรยากาศหรือมากกว่า 15 ปอนด์ต่อตร.นิ้ว

โดยทั่วไประบบเติมอากาศสำหรับถังเติมอากาศ ต้องการความดันของอากาศประมาณ 0.65-1.0 ความดันบรรยากาศ (10-15 ปอนด์ต่อตร.นิ้ว) ดังนั้นเมื่อพิจารณาจะพบว่าต้องการเครื่องเป่าอากาศ (Blower) ในการเติมอากาศ ซึ่งนิยมใช้ประเภท Rotary positive displacement units หรือประเภท Centrifugal units ทั้งแบบ Single stage และ Multiple stage สำหรับความสามารถในการเป่าอากาศของ Rotary positive displacement blowers และ Centrifugal blowers จะอยู่ในช่วง 0.12-1416 ลบ.ม./นาที่ และ 14.4-4248 ลบ.ม./นาที่ ตามลำดับ เครื่องเป่าอากาศแบบ Rotary Positive Displacement Unit สามารถเพิ่มความดันอากาศสูงขึ้นในขณะที่อัตราการไหลของอากาศมีคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ซึ่งแตกต่างกับแบบ Centrifugal unit ที่สามารถเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ โดยในขณะที่ค่าความดันอากาศมีคงที่หรือค่อยๆ ลดลงเล็กน้อยในระดับหนึ่ง

กำลังงานที่ต้องการใช้สำหรับเครื่องเป่าอากาศ โดยคำนวณหาได้จากข้อมูลของอัตราไหลของอากาศ ความดันอากาศเข้าออกและอุณหภูมิของอากาศจากสมการ 2.21 หรือ 2.22 ซึ่งเป็นสมการสำหรับหน่วย SI และ U.S. ตามลำดับ

$$P_w = \frac{wRT_1}{29.7ne} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{0.283} - 1 \right] \quad \text{สำหรับหน่วย SI} \quad (2.21)$$

$$P_w = \frac{wRT_1}{550ne} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{0.283} - 1 \right] \quad \text{สำหรับหน่วย U.S.} \quad (2.22)$$

$P_w$  = กำลังงานที่ต้องการของเครื่องเป่าอากาศ (kW), (HP)

$w$  = ปริมาณอากาศที่เป่าลงในน้ำ (กก./วินาที, ปอนด์ต่อวินาที)

$R$  = ค่าคงที่ของอากาศ = 8.314 กิโลจูล/กิโลโมล. $^{\circ}$ K

= 53.3 ปอนด์.ฟุต/ปอนด์ของอากาศ. $^{\circ}$ R



- $T_1$  = อุณหภูมิสมบูรณ์ของอากาศบริเวณช่องทางเข้า ( $^{\circ}\text{K}$ ,  $^{\circ}\text{R}$ )  
 $P_1$  = ความดันสมบูรณ์ของอากาศ ณ ช่องทางเข้า, ความดันบรรยากาศ (ปอนด์/ตร.นิ้ว)  
 $P_2$  = ความดันสมบูรณ์ของอากาศ ณ ช่องทางออก, ความดันบรรยากาศ (ปอนด์/ตร.นิ้ว)  
 $n$  =  $(k-1)/k = 0.283$  สำหรับอากาศ  
 $k$  = 1.395 สำหรับอากาศ  
 $e$  = ประสิทธิภาพของเครื่องเป่าอากาศ (โดยปกติอยู่ในช่วง 0.70-0.90)  
 29.7 = ค่าเปลี่ยนหน่วย สำหรับหน่วย SI  
 550 = ปอนด์.ฟุต/(วินาที.แรงม้า)

### ➤ ท่ออากาศ

ท่ออากาศในระบบเติมอากาศแบบใช้ตัวกระจายอากาศประกอบด้วยท่อเมน วาล์ว มิเตอร์ วัตถุประสงค์การไหลของอากาศและอื่นๆ ที่ใช้จ่ายอากาศไปตามจุดต่างๆ ภายในถังเติมอากาศ โดยอาศัยเครื่องเป่าอากาศ ท่ออากาศควรใช้วัสดุของท่อที่สามารถรับแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้นได้ สามารถป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากการใช้พวกสารละลายล้างท่ออากาศ เช่น พวก HCl วัสดุของท่ออากาศที่นิยมใช้กันมาก คือ ท่อเหล็กคาร์บอน ท่อเหล็กสเตนเลส ท่อพลาสติกไฟเบอร์กลาส และท่อ Polyvinyl Chloride (PVC) สำหรับท่ออากาศที่ติดตั้งอยู่ภายในถังเติมอากาศอาจเลือกใช้ท่อเหล็กสเตนเลส ท่อ PVC หรือท่อ HDPE ซึ่งเป็นท่อที่สามารถทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดี

### 2.5.2 แบบตีน้ำ (Mechanical Aeration)

ระบบเติมอากาศแบบนี้สามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่ม ดังต่อไปนี้

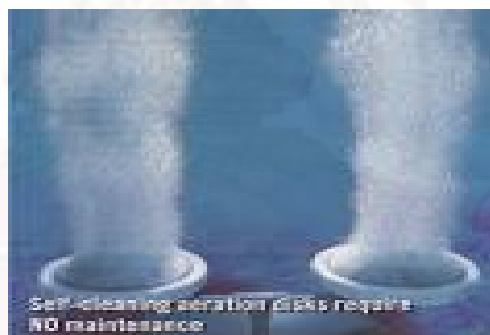
#### ▪ แบบอยู่บนผิวน้ำในแนวตั้ง (Surface Mechanical Aerators with Vertical Axis)

เครื่องเติมอากาศแบบอยู่บนผิวน้ำในแนวตั้งมีลักษณะลอยอยู่ผิวน้ำ โดยอาจยึดเกาะกับโครงสร้างถาวร หรือสามารถลอยได้ด้วยตัวเอง ดังรูป 2.19 หลักการในการเติมอากาศลงไปใต้น้ำอาศัยการตีน้ำบริเวณผิวน้ำ เพื่อให้ชั้นผิวอากาศกับน้ำเกิดการสับเปลี่ยนกันอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการถ่ายเทอากาศลงไปใต้น้ำมากๆ



รูปที่ 2.19 เครื่องเติมอากาศแบบอยู่บนผิวน้ำในแนวตั้ง

▪ แบบจุ่มอยู่ในน้ำในแนวตั้ง (Submerged Mechanical Aerators with Vertical Axis) จะมีการเติมอากาศแบบการกระจายอากาศ (Diffusion) ลงไปในน้ำที่ระดับลึกระดับหนึ่งในถังเติมอากาศ แกนเพลลาจะถูกหมุนด้วยมอเตอร์ที่ติดตั้งอยู่เหนือผิวน้ำ ซึ่งทำหน้าที่กวนฟองอากาศ และน้ำที่อยู่ในถังเติมอากาศ เครื่องเติมอากาศแบบนี้นิยมเรียกเป็นภาษาอังกฤษว่า Turbine Aeration Unit ตัวใบพัดกั้นที่จุ่มอยู่ใต้น้ำจะทำหน้าที่เขี่ยฟองอากาศให้แตกกระจายออกด้วยความเร็วหมุนที่สูงมาก ดังรูป 2.20



รูปที่ 2.20 เครื่องเติมอากาศแบบจุ่มอยู่ในน้ำในแนวตั้ง

▪ แบบอยู่บนผิวน้ำในแนวนอน (Surface Mechanical Aerators with Horizontal Axis) นิยมใช้ในถังเติมอากาศแบบคลองวนเวียน ซึ่งจะทำหน้าที่ทั้งเติมอากาศและการหมุนเวียนของน้ำในถัง นิยมเรียกเป็นภาษาอังกฤษว่า Brush Type Aerator มีลักษณะเป็นแผ่นเหล็กกันสนิมขนาดเล็กหลายๆ แผ่นติดอยู่รอบๆ แกนหมุน โดยตัวแกนหมุนจะกึ่งจุ่มกึ่งลอยอยู่ในน้ำถูกหมุนด้วยเครื่องมอเตอร์ เพื่อให้แผ่นเหล็กเหล่านี้ตีน้ำทำให้มีการถ่ายเทออกซิเจนจากบริเวณผิวน้ำเข้าสู่ในน้ำ ดังรูป 2.21



รูปที่ 2.21 เครื่องเติมอากาศแบบอยู่บนผิวน้ำในแนวนอน

- แบบจุ่มอยู่ในน้ำในแนวนอน (Submerged Mechanical Aerators with Horizontal Axis) เครื่องเติมอากาศแบบนี้จะมีหลักการเช่นเดียวกับแบบอยู่บนผิวน้ำในแนวนอน เพียงแต่แตกต่างกันที่แผ่นตีน้ำ ซึ่งจะใช้แผ่นจานหรือแผ่นตีน้ำที่ถูกหมุนด้วยมอเตอร์และแกนเพลลา

## 2.6 การศึกษาและเปรียบเทียบวัสดุยืดหยุ่นที่ใช้เป็นอุปกรณ์เติมอากาศแบบตัวกระจายอากาศ

ในส่วนของการศึกษาและเปรียบเทียบวัสดุยืดหยุ่นที่ใช้เป็นอุปกรณ์เติมอากาศแบบตัวกระจายอากาศนี้ ตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องและวิธีการวิเคราะห์ สามารถสรุปได้ดังนี้

### 2.6.1 ความดันลดและพลังงานที่จำเป็นในการสร้างฟองอากาศ

- ความดันลดในการสร้างฟองอากาศ,  $\Delta P$  (pressure drop)

จาก Loubiere (2006) ในการเกิดฟอง 1 ฟองต้องมีแรงดันต่างๆ ที่มากระทำกับฟอง 5 ชนิด คือ แรงดันจากแรงตึงผิวของน้ำที่รูเติมอากาศ ( $P_C$ ) แรงดันที่มาจากความสูงของน้ำ ( $P_H$ ) แรงดันจากความสูงฟองอากาศ ( $P_{HB}$ ) แรงดันจากความยืดหยุ่นของวัสดุยืดหยุ่น ( $P_0$ ) และแรงดันภายในภาชนะหรือห้องอากาศ ( $P_G$ ) โดยถ้าต้องการให้เกิดฟอง 1 ฟอง ต้องใส่แรงดันกับระบบให้เป็นไปตามสมการ 2.23

$$\Delta P > P_C - P_H + P_{HB} - P_G - P_0 \quad (2.23)$$

$\Delta P$  = ความดันลด (pressure drop, Pa)

$P_C$  = แรงดันที่มาจากภายในภาชนะ (pressure in the gas chamber, Pa)

$P_H$  = แรงดันที่มาจากความสูงของน้ำ (hydrostatic pressure, Pa)

- $P_{HB}$  = แรงดันเนื่องจากความสูงของฟองอากาศ (hydrostatic pressure for bubble height, Pa)
- $P_{\sigma}$  = แรงดันจากแรงตึงผิวของน้ำ (pressure due to surface tension, Pa)
- $P_0$  = แรงดันจากความยืดหยุ่นของวัสดุยืดหยุ่น (pressure due to the membrane elasticity, Pa)

ทั้งนี้ เมื่อจัดรูปสมการ 2.23 ใหม่ จะพบว่า ความดันที่ต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟองอากาศฟองแรก เรียกว่า Critical pressure ซึ่งหาได้จากการทดลองนั้นเป็นผลรวมระหว่างแรงดัน  $P_{\sigma}$  และแรงดัน  $P_0$  ดังสมการ 3.24 ดังนั้น แรงดันจากความยืดหยุ่นของวัสดุ ( $P_0$ ) จึงสามารถคำนวณได้โดยตรงจากสมการ 2.24 เมื่อทราบค่า  $\Delta P_c$  และ  $P_{\sigma}$  ซึ่งขึ้นกับค่าแรงตึงผิวของเฟสน้ำ และขนาดรูเดิมอากาศ

$$\Delta P_{Critical} = \frac{4\sigma_L}{D_{OR}} + P_0 \quad (2.24)$$

- $\sigma_L$  = แรงตึงผิวของของเหลว (liquid surface tension, N/m)
- $D_{OR}$  = เส้นผ่านศูนย์กลางรูเดิมอากาศ (equivalent hole diameter, m)
- $P_0$  = แรงดันจากความยืดหยุ่นของวัสดุยืดหยุ่น (pressure due to the membrane elasticity)

โดยในทางปฏิบัติ ค่าความดันลด ( $\Delta P$ ) และอัตราการไหลของก๊าซที่ผ่านรูเดิมอากาศ ( $Q_g$ ) ที่สอดคล้องกัน สามารถวัดค่าได้จากการทดลอง โดยอาศัยอุปกรณ์วัดความดันพวก Manometer และอุปกรณ์วัดอัตราการไหลพวก Gas flow meter หรือ Soap film meter ตามลำดับ

- พลังงานในการสร้างฟองอากาศ,  $P_g$  (Power consumption)

เป็นความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของก๊าซ ( $Q_g$ ) และความดันลดทั้งหมด ( $\Delta P_{Total}$ ) ของระบบเดิมอากาศ ซึ่งคำนวณจากสมการ

$$\frac{P_G}{V_{Total}} = Q \times \frac{\Delta P_{Total}}{V_{Total}} = Q \times \frac{\rho_L g H_L + \Delta P}{V_{total}} \quad (2.25)$$

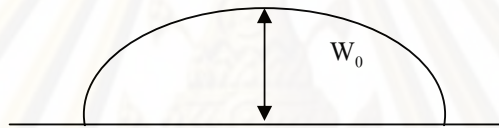
- $P_G$  = พลังงานในการสร้างฟองอากาศ (power consumption in aerated liquid, W)

- $\Delta P_{\text{Total}}$  = ความดันลดทั้งหมด (total gas pressure drop, Pa)  
 $V_{\text{Total}}$  = ปริมาตรทั้งหมดในถังปฏิกรณ์ (total volume in reactor, m<sup>3</sup>)  
 $\Delta P$  = ความดันลดที่เกิดจากวัสดุยืดหยุ่น (pressure drop created by the membrane sparger, Pa)

### 2.6.2 ความยืดหยุ่นและโมเดลในการคำนวณ

- ความยืดหยุ่นที่จุดศูนย์กลาง (deflection at the pole,  $W_0$ )

ในการทดสอบความยืดหยุ่นของอุปกรณ์เติมอากาศแบบฟองอากาศนั้น กล่าวได้ว่า เมื่อมีการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านรูเติมอากาศ ( $Q_g$ ) ทำให้เกิดการขยายขนาดของอุปกรณ์เติมอากาศในลักษณะที่เป็นรูปครึ่งวงกลม (ดังรูป 2.22) ทำให้สามารถวัดค่าความสูงของอุปกรณ์เติมอากาศที่ขยายตัวที่จุดกึ่งกลาง ( $W_0$ ) ได้ที่อัตราการไหล ( $Q_g$ ) หรือที่ความดันลด ( $\Delta P$ ) ต่างๆ ได้



รูปที่ 2.22 การขยายของอุปกรณ์เติมอากาศ

เมื่อทราบค่า  $W_0$  ที่สอดคล้องกับค่าของ  $\Delta P$ ใด สามารถนำมาคำนวณหาค่าแรงดึงจากความยืดหยุ่นของอุปกรณ์เติมอากาศ (Excess tension,  $T$ ) ได้จากสมการด้านล่าง (Rice และคณะ, 1986)

$$T = \frac{\Delta P Z^2}{4W_0} \quad \text{เมื่อ } W_0 \ll Z \quad (2.26)$$

$$T = \frac{\Delta P Z^2}{4W_0} + \frac{\Delta P W_0}{4} \quad \text{เมื่อ } W_0 \gg Z \quad (2.27)$$

$Z$  = รัศมีของวัสดุยืดหยุ่น

โดยค่าของแรงดึง  $T$  ที่คำนวณได้จากสมการด้านบน มีความสัมพันธ์กับค่าความดันลด ( $\Delta P$ ) ดังสมการ 2.28

$$T = K\Delta P^n \quad (2.28)$$

ดังนั้นจากสมการที่ 2.28 เมื่อนำค่า T และ  $\Delta P$  มาเขียนกราฟ จะได้ค่า K กับ n ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความยืดหยุ่น (Flexibility) และเส้นผ่านศูนย์กลางรู (hole diameter) ตามลำดับ

### 2.6.3 กลไกการเกิดฟองอากาศและความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ

#### ▪ ขนาดฟองอากาศ, $D_B$ (Bubble diameter)

การวัดขนาดฟองอากาศที่อัตราไหลของก๊าซ ( $Q_g$ ) ใดๆ สามารถทำได้โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย (Image Treatment Techniques) ทำการเก็บและวิเคราะห์ภาพของฟองอากาศจำนวน 200-300 ฟอง ต่อการศึกษาที่อัตราการไหลของก๊าซ ( $Q_g$ ) ต่างๆ เพื่อให้ได้ค่าที่เป็นตัวแทนที่นำเชื่อถือทางสถิติ โดยในงานวิจัยนี้ขนาดฟองอากาศโดยเฉลี่ย ( $d_{avg}$ ) และค่าฟองอากาศแบบ Sauter diameter ( $d_{32}$ ) คำนวณได้จากสมการ 2.29 และ 2.30 ตามลำดับ

$$d_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^N d_i}{N} \quad (2.29)$$

$$d_{32} = \frac{\sum_{i=1}^N d_i^3}{\sum_{i=1}^N d_i^2} \quad (2.30)$$

$d_i$  = size of an individual bubble (mm)

นอกจากนี้ขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้น ยังได้จากโมเดลทางคณิตศาสตร์ ดังตาราง 2.5

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 2.5 โมเดลทางคณิตศาสตร์คำนวณขนาดฟองอากาศ (Painmanakul and Jamnongwong, 2007)

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	$\frac{g \rho_L d_B^2}{\sigma} = 8.8 \left( \frac{u_G \mu_L}{\sigma} \right)^{-0.04} \left( \frac{\sigma^3 \rho_L}{g \mu_L^4} \right)^{-0.12} \left( \frac{\rho_L}{\rho_G} \right)^{0.22}$	

- ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ,  $U_B$  (Bubble rising velocity)

จาก Painmanakul (2005) ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ หาได้จากการทดลองโดยใช้กล้องถ่ายภาพฟองอากาศที่ลอยตัวขึ้นในถังปฏิกรณ์ เพื่อวิเคราะห์หาระยะทางที่ฟองอากาศลอยขึ้น ( $\Delta D$ ) ณ ช่วงเวลาหนึ่งๆ หรือ ณ ช่วงเวลาการเก็บภาพของกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง ( $t_{\text{frame}}$ ) โดยค่าของความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ ( $U_B$ ) สามารถหาได้สมการ 2.31

$$U_B = \frac{\Delta D}{t_{\text{frame}}} \quad (2.31)$$

$U_B$  = ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (Bubble rising velocity)

$\Delta D$  = ระยะทางที่ฟองอากาศลอยขึ้น

$t_{\text{frame}}$  = ช่วงเวลาการเก็บภาพของกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง

นอกจากการหาความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศด้วยการทดลองแล้วสามารถวิเคราะห์ค่าความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ ( $U_B$ ) ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการลอยตัวและขนาดของฟองอากาศ จากการศึกษาของ Grace and Wairegi, 1986 รวมไปถึงโมเดลทางคณิตศาสตร์ ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตาราง 2.6 โมเดลทางคณิตศาสตร์คำนวณความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (Painmanakul and Jamnongwong, 2007)

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	

- ความถี่ในการเกิดฟอง,  $f_B$  (bubble formation frequency)

ความถี่ในการเกิดฟอง คือ จำนวนฟองที่เกิดขึ้นในเวลา 1 วินาที ซึ่งคำนวณจากจำนวนรูเดิมอากาศคูณกับอัตราการไหลของก๊าซต่อหนึ่งรูเดิมอากาศ แล้วหารด้วยปริมาตรของฟองอากาศ ดังสมการ 2.32 (Painmanakul, 2005)

$$f_B = \frac{N_{OR} \times q}{V_B} \quad (2.32)$$

$f_B$  = 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,  $m^3$ )



## 2.6.4 พื้นที่ผิวสัมผัสในการถ่ายเทออกซิเจน

- พื้นที่ผิวสัมผัสในการถ่ายเทออกซิเจน,  $a$  (interfacial area)

พื้นที่ผิวสัมผัสในการถ่ายเทออกซิเจน (interfacial area,  $a$ ) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการศึกษาการถ่ายเทมวลสาร โดยเป็นสัดส่วนระหว่างพื้นที่ผิวในการถ่ายเทมวลสารทั้งหมดของฟองอากาศต่อปริมาตรของถังปฏิกรณ์ ณ เวลาใดๆ ทั้งนี้ เนื่องจากข้อจำกัดในด้านวิธีการวิเคราะห์ผล เช่น วิธีทางเคมี (Chemical Method) รวมไปถึงตัวแปรที่เกี่ยวข้องจำนวนมาก เช่น ขนาดของถังปฏิกรณ์ ชนิดตัวเติมอากาศ สภาพแวดล้อมในการทำงาน ดังนั้น ในทางปฏิบัติ จึงมักรวมค่า  $a$  นี้ไว้กับค่า  $K_L$  (Liquide side mass transfer coefficient) และวัดค่ารวมกันในรูปของค่า  $K_L a$  ดังที่กล่าวถึงในทฤษฎีการเติมอากาศ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการถ่ายเทมวลสารผ่านผิวสัมผัสระหว่างเฟสก๊าซและของเหลว

เพื่อให้เข้าใจถึงกลไกในการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศที่เลือกใช้นั้น ในงานวิจัยนี้ จึงทำการวิเคราะห์ค่า  $a$  และ  $K_L$  ออกจากกัน โดยทั่วไป ค่า  $K_L$  จะมีค่าเท่ากับ  $4 \times 10^{-4}$  m/s สำหรับเฟสของเหลวที่เป็นน้ำสะอาด ดังนั้นค่า  $K_L$  ในงานวิจัยนี้ จึงกำหนดให้มีค่าคงที่ ในขณะที่ค่าของ  $a$  สามารถหาจากจำนวนฟองอากาศคูณกับพื้นที่ผิวของฟองอากาศโดยให้คิดจากฟองอากาศเป็นทรงกลม แล้วหารด้วยปริมาตรของถังปฏิกรณ์ ซึ่งก็คือปริมาตรของน้ำรวมกับปริมาตรของอากาศ

สำหรับการคำนวณจำนวนฟองอากาศ ( $N_B$ ) นั้น คำนวณจากความถี่ในการเกิดฟอง ( $f_B$ ) คูณกับระยะเวลาที่ฟองอากาศอยู่ในถังปฏิกรณ์ ของฟองอากาศหนึ่งๆ ในถังปฏิกรณ์ ดังสมการ 2.33 และค่าของ  $a$  หาได้จากสมการ 2.34

$$N_B = f_B \times \frac{H_L}{U_B} \quad (2.33)$$

$$a = N_B \times \frac{S_B}{V_{Total}} = f_B \times \frac{H_L}{U_B} \times \frac{\pi D_B^2}{4 H_L + N_B V_B} \quad (2.34)$$

$a$  = พื้นที่ผิวสัมผัสในการถ่ายเทออกซิเจน (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,  $m^2$ )

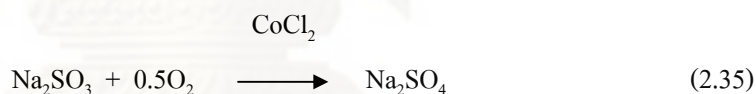
$V_B$  = ปริมาตรฟอง (bubble volume,  $m^3$ )

### 2.6.5 ความสามารถในการถ่ายเทออกซิเจน, $K_L a$ (Volumetric Mass Transfer Coefficient)

$K_L a$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ทั้งหมดในการถ่ายเทออกซิเจน ในการตรวจสอบประสิทธิภาพการเติมอากาศของเครื่องเติมอากาศที่ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสีย จำเป็นต้องตรวจวัดค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนนี้ แล้วจึงนำไปเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพที่แท้จริงของเครื่อง ซึ่งอัตราการแพร่นี้มีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องเติมอากาศ รูปร่างลักษณะของถัง อุณหภูมิ ความดัน และ ลักษณะของของเหลว

#### ■ การหาค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจน (เกรียงศักดิ์, 2537)

1. ติดตั้งเครื่องเติมอากาศสำหรับการเติมอากาศ เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุดโดยอาจพิจารณาว่า สามารถเติมอากาศลงไปใต้น้ำให้ได้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen, DO) ถึง 90 %
2. เติมน้ำที่ต้องการศึกษา จนถึงปริมาตรที่ต้องการลงไปใต้งเติมอากาศ โดยยังคงปิดเครื่องเติมอากาศอยู่
3. ทำการดึงออกซิเจนออกจากรู้น้ำให้หมด ( $DO = 0$  มก/ลิตร) โดยการเติมสาร  $Na_2SO_3$  และ  $CoCl_2$  ลงไปในน้ำ ตามปฏิกิริยาข้างล่าง



จากความสัมพันธ์ข้างบนจะได้ว่าจำเป็นต้องใช้  $Na_2SO_3$  อย่างน้อย 7.9 มก/ลิตร จึงจะกำจัดหรือลดปริมาณ DO ได้ 1 มก/ลิตร แต่โดยทั่วไปควรเติมปริมาณ  $Na_2SO_3$  ประมาณ 9-10 มก/ลิตร เพื่อให้เพียงพอต่อการลด DO ลงไป 1 มก/ลิตร และปริมาณของ  $CoCl_2$  ควรเติมลงไปผสมอยู่ด้วยอย่างน้อย 1.5 มก/ลิตร สำหรับอีกวิธีในการดึงออกซิเจนออกจากรู้น้ำอาจกระทำได้เติมก๊าซไนโตรเจนลงไปใต้น้ำ

1. หลังจากปริมาณ DO ในน้ำมีเท่ากับ 0 การทดลองจึงได้เริ่มขึ้น ( $t = 0$ )
2. เริ่มเปิดเครื่องเติมอากาศ และทำการวัดปริมาณ DO ทุกๆ 5 หรือ 10 นาที แล้วแต่ความเหมาะสม จนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัว ซึ่งอาจใช้เวลาถึงหนึ่งชั่วโมง
3. นำข้อมูลที่วัดได้จากการทดลองคำนวณหาค่า  $K_L a$  โดยวาดกราฟ ซึ่งมาจากสมการดังนี้

$$\text{Log}(C_s - C_t) = \log(C_s - C_0) - K_L a t / 2.303 \quad (2.36)$$

$$K_L a = 2.303 (\log C_1 - \log C_2 / t_2 - t_1) \quad (2.37)$$

- การหาค่าความสามารถในการเติมออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศ

ค่าความสามารถในการเติมออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศ (Oxygenation Capacity, OC) จะคำนวณหาได้จากสมการ 2.39 ซึ่งต้องทราบค่า  $K_L a$  จากการทดลอง และกำหนดให้ค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำ ณ จุดเริ่มต้นเท่ากับ 0 ( $C = 0$ )

$$OC, \text{ มก. O}_2 / (\text{ลิตร. ชม.}) = dC/dt = K_L a(C_s - 0) = K_L a C_s \quad (2.38)$$

กำหนดให้  $V$  คือ ปริมาตรของถังเติมอากาศ (ลิตร) จะได้

$$OC, \text{ มก. O}_2 / \text{ชม.} = K_L a C_s V \quad (2.39)$$

หรือ

$$OC, \text{ มก. O}_2 / \text{ชม.} = K_L a C_s V \times 10^{-6} \quad (2.40)$$

เนื่องจากการทดลองหาค่า  $K_L a$  จะกระทำในสภาวะต่างๆ ซึ่งอาจไม่ได้อยู่ในสภาวะมาตรฐาน ดังนั้นค่า  $K_L a$  ที่ได้รับจากการทดลองจำเป็นต้องทำการคำนวณปรับค่าสำหรับอุณหภูมิและความดันบรรยากาศที่มีค่าแตกต่างกันกับสภาวะมาตรฐาน (อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และความดันบรรยากาศ 10.33 ม. ของน้ำ หรือ 760 มม.ปรอท โดยทำการคำนวณปรับค่า  $K_L a$  และค่า  $C_s$  ดังกล่าวถึงในหัวข้อ 2.3.1 ดังนั้น ค่า OC ของเครื่องเติมอากาศที่สภาวะการทำงานใดๆ สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

สำหรับเครื่องเติมอากาศแบบที่เติมอากาศบริเวณผิวน้ำ

$$OC, \text{ มก O}_2/\text{ชม.} = (K_L a_{(T)} 1.024^{(20-T)}) \left( C_{s(T)} \frac{P-p}{760-p} \right) V \quad (2.41)$$

สำหรับเครื่องเติมอากาศแบบที่เติมอากาศบริเวณใต้น้ำ

$$OC, \text{ มก O}_2/\text{ชม.} = (K_L a_{(T)} 1.024^{(20-T)}) \left( C_{s(T)} \frac{P+73.53d-p}{(760-p)} \right) V \quad (2.42)$$

- การคำนวณหาอัตราการถ่ายเทออกซิเจน

ค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ( $R_o$ ) หรือที่นิยมเรียกเป็นภาษาอังกฤษว่า Oxygen Transfer Rate คือค่า Oxygenation Capacity, OC หากด้วยกำลังงานที่ให้กับเครื่องเติมอากาศนั้น ดังสมการ 2.43

$$R_o = OC/P \quad (2.43)$$

$R_o$  = ค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ณ สภาวะมาตรฐาน ( $20^{\circ}$  ซ ความดัน 1 บรรยากาศ และมี DO เท่ากับ 0), มก. $O_2$ /(กิโวลต์.ชม.)

OC = ค่าความสามารถในการเติมออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศ (มก.  $O_2$ /ชม.)

P = กำลังงานที่ให้กับเครื่องเติมอากาศ (กิโวลต์)

- การคำนวณหาประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจน

ประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศต่างๆ สามารถคำนวณได้จาก สมการ 2.44

$$E = \frac{OC}{A} \times 100 \quad (2.44)$$

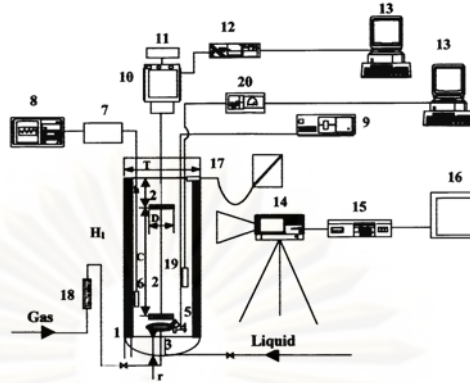
E = ประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศต่างๆ (%)

A = ปริมาณออกซิเจนที่เติมลงไปใต้น้ำ ณ สภาวะมาตรฐาน (มก. $O_2$ /ชม.)

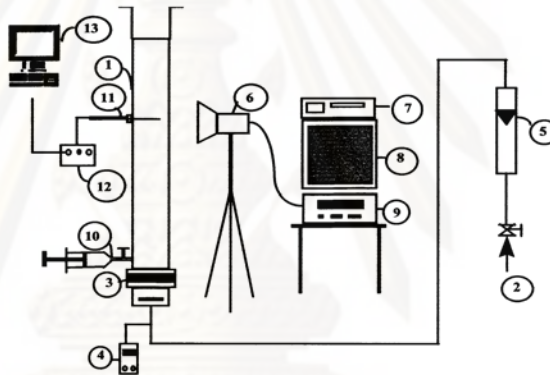
## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.7.1 Bouaifi และคณะ (2000)

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบค่าของ สัดส่วนของก๊าซ ขนาดฟองอากาศ พื้นที่ผิวสัมผัส และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ที่สอดคล้องกับการเลือกใช้ถังปฏิกรณ์แบบใช้ใบพัด (ดังรูป 2.23) และแบบฟองอากาศ (ดังรูป 2.24) โดยในส่วนของถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ จะศึกษาถึงผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ อัตราการไหลของก๊าซ ชนิดของตัวเติมอากาศ และเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ ในขณะที่ในถังปฏิกรณ์แบบใช้ใบพัด จะศึกษาถึงผลของ ความเร็วในการกวน อัตราการไหลของก๊าซ ชนิดและเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด เป็นต้น



รูปที่ 2.23 ถังปฏิกรณ์แบบใบพัด (Bouaifi, 2001)



รูปที่ 2.24 ถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (Bouaifi, 2001)

สำหรับผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า ค่าสัดส่วนของก๊าซ และขนาดของฟองอากาศ ที่ได้จาก ถังปฏิกรณ์ทั้งสองแบบ มีความสัมพันธ์กับพลังงานที่จำเป็นในการสร้างฟองอากาศ ซึ่งส่งผล โดยตรงต่อค่าพื้นที่ผิวสัมผัส ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง  $20-133 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$  โดยค่าพื้นที่ผิวสัมผัสที่ได้จากถัง ปฏิกรณ์แบบใบพัดมีค่าต่ำกว่าค่าพื้นที่ผิวสัมผัสที่ได้จากถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ ดังนั้น ผลจาก ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสที่แตกต่างกันจากการศึกษาถังปฏิกรณ์สองแบบข้างต้น จึงส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ การถ่ายเทมวลสารที่แตกต่างระหว่างถังปฏิกรณ์สองแบบ โดยในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ มีค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารสูงกว่าของถังปฏิกรณ์แบบใบพัด

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศดีกว่าถังปฏิกรณ์แบบใบพัดเพราะถัง ปฏิกรณ์แบบฟองอากาศให้ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสมาก และมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารสูง

### 2.7.2 Loubiere และ Hebrard (2004)

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงผลการเติมสารลดแรงตึงผิวลงไปในน้ำ โดยใช้อุปกรณ์เติมอากาศแบบแข็งและแบบยืดหยุ่น ซึ่งวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ

1. ศึกษาผลกระทบจากการเติมสารลดแรงตึงผิว ได้แก่ anionic, non-ionic และ cationic ซึ่งมีความเข้มข้น  $3.75 \times 10^{-3}$  โมลต่อลิตร และเติมสารละลายบิวทานอล ซึ่งมีความเข้มข้น  $5.5 \times 10^{-2}$  โมลต่อลิตร ลงไปโดยเปรียบเทียบกับน้ำประปา

2. ศึกษาและเปรียบเทียบผลกระทบในการเกิดฟองอากาศ จากอุปกรณ์เติมอากาศแบบแข็งและแบบยืดหยุ่น

ในการทดลองนี้ใช้ตัวเติมอากาศสองแบบ คือ อุปกรณ์เติมอากาศแบบแข็ง จะเป็นหลอดสแตนเลส มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 12 มิลลิเมตร ภายใน 8 มิลลิเมตร และอุปกรณ์เติมอากาศแบบยืดหยุ่น ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 60 มิลลิเมตร สำหรับการศึกษาผลกระทบของสารลดแรงตึงผิวกับการเกิดฟองอากาศ

- อุปกรณ์เติมอากาศแบบแข็ง เปรียบเทียบฟองอากาศที่เกิดจากน้ำกับฟองอากาศที่เกิดในสารละลายลดแรงตึงผิว จะได้ว่า ฟองอากาศที่เกิดในสารละลายลดแรงตึงผิว จะมีขนาดเล็กกว่า และความถี่ในการเกิดฟองสูงกว่าฟองอากาศที่เกิดจากน้ำ ซึ่งลักษณะของฟองอากาศจะขึ้นอยู่กับความเร็วที่ผ่านรู ส่วนการใช้สารละลายบิวทานอลจะไม่มีผลต่อการเกิดฟองอากาศ

- อุปกรณ์เติมอากาศแบบยืดหยุ่น ขนาดของฟองอากาศจะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของก๊าซ เปรียบเทียบฟองอากาศที่เกิดจากน้ำกับฟองอากาศที่เกิดในสารละลายลดแรงตึงผิว จะได้ว่า ฟองอากาศที่เกิดในสารละลายลดแรงตึงผิว จะมีขนาดเล็กกว่าซึ่งฟองอากาศที่เกิดในน้ำ นอกจากนี้ปรากฏการณ์การฟองอากาศแบบ double jet (ดังรูป 2.25) เมื่อความเร็วที่ผ่านรูเติมอากาศต่ำกว่า 3 เมตรต่อวินาที ทั้งนี้การศึกษาผลกระทบของสารลดแรงตึงผิวกับการเกิดฟองนี้ ไม่สามารถวิเคราะห์โดย static surface tension เพียงอย่างเดียว แต่จะขึ้นอยู่กับลักษณะการเกิดฟองจากอุปกรณ์เติมอากาศแบบแข็ง หรืออุปกรณ์เติมอากาศแบบยืดหยุ่น รวมไปถึงความเกี่ยวข้องกับกลไกของการดูดซับและกลไกของการแพร่ของโมเลกุล ซึ่งควรที่จะมีการศึกษาในรายละเอียดเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงค่าแรงตึงผิวต่อเวลา (Dynamic surface tension) ต่อไป



รูปที่ 2.25 การเกิดฟองแบบ double jet

### 2.7.3 Hasanen, Orivuori และ Aittamaa (2005)

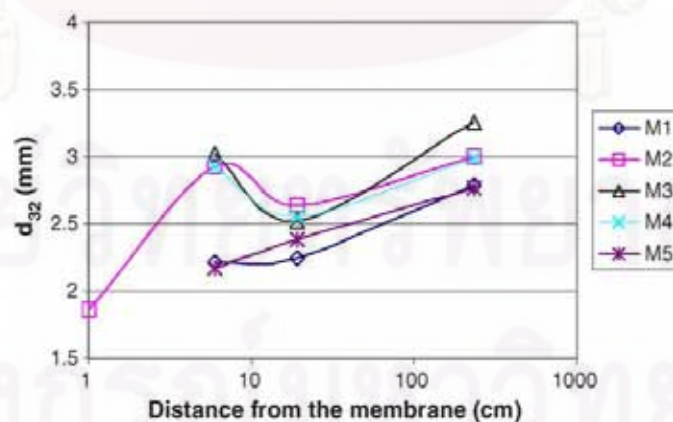
งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายของฟองอากาศที่เกิดจากตัวเติมอากาศแบบยัดหยุ่น 5 ชนิด โดยใช้เทคนิค capillary suction probe (CSP) และการถ่ายภาพและศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการผลิตของก๊าซ ขนาดรูเติมอากาศ และความหนาแน่นของจำนวนรูเติมอากาศ โดยทั่วไปเทคนิค CSP เหมาะสำหรับการวัดขนาดฟองอากาศในบริเวณที่มีความหนาแน่นของฟองอากาศสูงมากๆ (ดังรูป 2.26) ซึ่งเทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายไม่สามารถทำได้ การทำงานของ CSP คือฟองอากาศจะถูกดูดเข้าไปในหลอด capillary ระยะเวลาและความเร็วของฟองอากาศวัดจาก 2 แหล่งกำเนิดแสงและ photosensitive detectors ซึ่ง detectors จะทำให้แสงเข้มขึ้นเมื่อฟองอากาศผ่าน โดยขนาดของฟองอากาศวิเคราะห์จากความยาวของมวลอากาศหรือฟองอากาศที่อยู่ในหลอด capillary โดยวิธีนี้มีค่าความผิดพลาดประมาณ  $\pm 10\%$



รูปที่ 2.26 การใช้เทคนิค CSP สำหรับการวัดขนาดฟองอากาศที่มีความหนาแน่นสูง

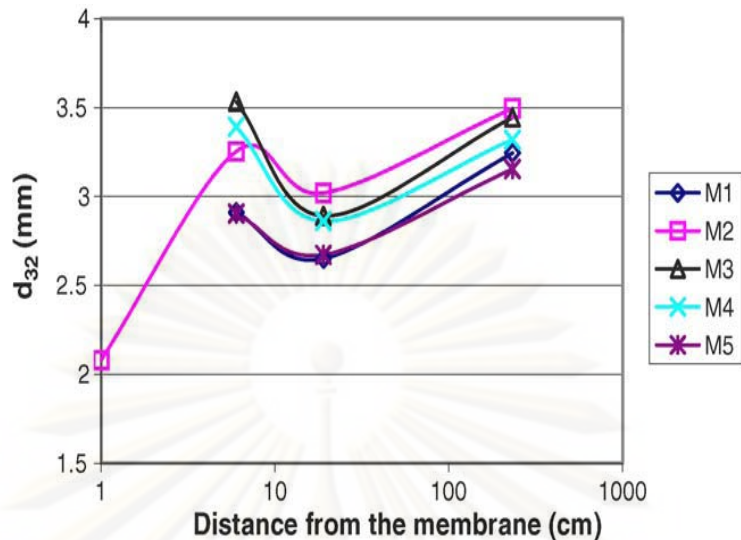
อุปกรณ์ที่ใช้ในการงานวิจัยนี้มี 2 แบบ คือ ถังปฏิกริยาทรงลูกบาศก์ และแบบคอลัมน์ การวัดขนาดฟองอากาศที่เกิดจากถังปฏิกริยาแบบลูกบาศก์ จะวัด 6 จุด ซึ่งอยู่สูงจากผิววัสดุยึดหยุ่น 0.06 เมตร และ 0.19 เมตร ส่วนการวัดขนาดฟองอากาศที่เกิดจากถังปฏิกริยาแบบคอลัมน์ จะวัดที่ระยะห่างจากผนังคอลัมน์ 0.385 เมตร และสูงจากผิวน้ำ 0.3 เมตร

สำหรับผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า ขนาดฟองอากาศจะเพิ่มตามอัตราการไหลของก๊าซ ความหนาแน่นของจำนวนรูเดิมอากาศ และความสูงของถังปฏิกริยา ถ้ายิ่งสูง ฟองยิ่งมีขนาดใหญ่ แต่ลักษณะของถังปฏิกริยาจะมีผลต่อขนาดฟองอากาศค่อนข้างน้อย ซึ่งขนาดฟองอากาศที่เล็กที่สุดเกิดขึ้นที่ความสูง 0.19 เมตร



รูปที่ 2.27 ขนาดฟองอากาศกับความสูงของถังปฏิกริยา ที่  $Q_g = 0.38 \text{ dm}^3 / (\text{h} \times \text{hole})$





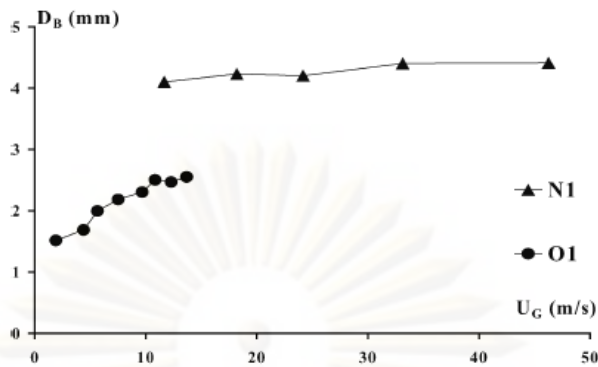
รูปที่ 2.28 ขนาดฟองอากาศกับความสูงของถังปฏิกรณ์ ที่  $Q_g = 1.14 \text{ dm}^3 / (\text{h} \times \text{hole})$

#### 2.7.4 Painmanakul และคณะ (2004)

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและเปรียบเทียบวัสดุยึดหยุ่นสองชนิด ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย โดยศึกษาความแตกต่างของ ขนาดรูเดิมอากาศ พลังงานลดในการสร้างฟองอากาศ ความยืดหยุ่นที่ศูนย์กลางของวัสดุยึดหยุ่น ขนาดของฟองอากาศที่เกิดขึ้น ความถี่ของการเกิดฟองอากาศ การถ่ายเทมวลสาร พื้นที่ผิวสัมผัส และพลังงานในการสร้างฟองอากาศ

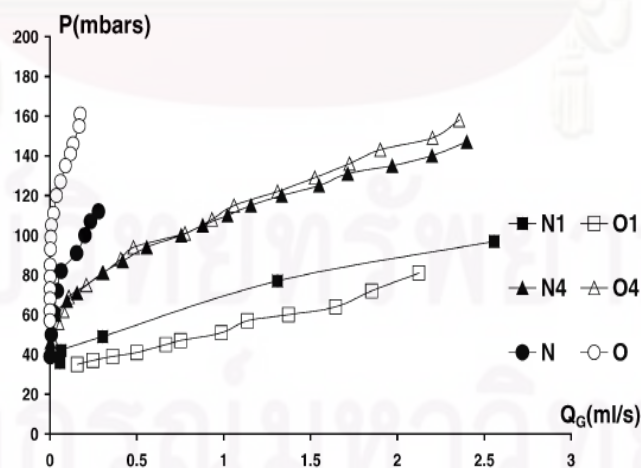
อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด  $0.4 \times 0.4 \times 0.3$  เมตร และวัสดุยึดหยุ่นที่นำมาใช้เป็นของบริษัท Degremont คือวัสดุยึดหยุ่นแบบเก่า และวัสดุยึดหยุ่นแบบใหม่ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร นำมาเจาะรู 1 รู กับ 4 รู ซึ่งการหาความยืดหยุ่นที่ศูนย์กลางของวัสดุยึดหยุ่น ขนาดของฟองอากาศ และความถี่ในการเกิดฟองอากาศจะใช้เทคนิคการถ่ายภาพ

สำหรับผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า พลังงานลด ขนาดรูเดิมอากาศ และความยืดหยุ่นที่ศูนย์กลางของวัสดุยึดหยุ่น จะเพิ่มตามอัตราการไหลของก๊าซ โดยที่ความเร็วของก๊าซเดียวกัน ขนาดรูเดิมอากาศของวัสดุยึดหยุ่นแบบใหม่จะเล็กกว่าแบบเก่า ซึ่งเกิดจากวัสดุยึดหยุ่นแบบใหม่มีความยืดหยุ่นน้อยกว่าแบบเก่า จึงส่งผลให้พลังงานลดของวัสดุยึดหยุ่นแบบใหม่จะมากกว่าแบบเก่า และขนาดฟองอากาศที่เกิดจากวัสดุยึดหยุ่นแบบใหม่จะมีขนาดใหญ่กว่าและความถี่ในการเกิดฟองต่ำกว่าแบบเก่า นอกจากนี้ คุณสมบัติความแข็งของเนื้อเยื่อจากอุปกรณ์เดิมอากาศชนิดใหม่ ยังส่งผลต่อปรากฏการณ์การเกิดฟองอากาศที่คล้ายคลึงกับอุปกรณ์เดิมอากาศแบบแข็ง (Rigid diffusers) ที่ให้ขนาดฟองอากาศคงที่และไม่ขึ้นกับอัตราการไหลของก๊าซ (ดังรูป 2.29)



รูปที่ 2.29 ขนาดฟองอากาศกับความเร็วของก๊าซ

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ของวัสดุยึดหยุ่น 1 รู 4 รู และหลายรู จะได้ว่า อัตราการไหลของก๊าซกับพลังงานลดของวัสดุยึดหยุ่น 4 รูและหลายรู จะมีค่ามากกว่าวัสดุยึดหยุ่น 1 รู พลังงานลดของวัสดุยึดหยุ่นแบบใหม่ที่เจาะ 4 รู และหลายรู มีค่าต่ำกว่าของวัสดุยึดหยุ่นแบบเก่า ทั้งนี้ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาที่จำนวน 1 รูเดิมอากาศ มีสาเหตุมาจากลักษณะความยืดหยุ่นของวัสดุเป็นตัวกำหนด แทนที่ขนาดของรูเดิมอากาศ ซึ่งทำให้ค่าความดันลดในการสร้างฟองอากาศต่ำเหมือนในกรณีของอุปกรณ์เดิมอากาศแบบแข็ง (ดังรูป 2.30) ส่วนขนาดฟองอากาศที่เกิดจากวัสดุยึดหยุ่นที่เจาะ 4 รู จะมีขนาดเล็กกว่าของวัสดุยึดหยุ่นที่เจาะ 1 รู ในขณะที่ความถี่ในการเกิดฟองอากาศของวัสดุยึดหยุ่นที่เจาะ 4 รู และเจาะ 1 รู จะไม่แตกต่างกัน และความถี่ในการเกิดฟองจากวัสดุยึดหยุ่นแบบใหม่จะมีค่าน้อยกว่าแบบเก่า



รูปที่ 2.30 พลังงานลดกับอัตราการไหลของก๊าซ

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุยึดหยุ่นทั้งสองชนิดในด้านพลังงานและการถ่ายเทมวลสาร พบว่าที่ความเร็วของก๊าซเดียวกัน พื้นที่ผิวสัมผัส จะเพิ่มทั้ง 2 วัสดุยึดหยุ่น โดยค่าพื้นที่ผิวสัมผัสของวัสดุยึดหยุ่นแบบใหม่จะมีค่าน้อยกว่าแบบเก่า และค่าพลังงานในการสร้างฟองอากาศของทั้งสองวัสดุยึดหยุ่น ให้ค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้น แนวทางการศึกษาและเปรียบเทียบอุปกรณ์เติมอากาศแบบยึดหยุ่นในงานวิจัยนี้ จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงาน รวมไปถึงออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์เติมอากาศต่อไป

### 2.7.5 Loubiere และ Hebrard (2002)

งานวิจัยนี้ได้ศึกษากลไกในการเกิดฟองอากาศจากวัสดุที่มีความยืดหยุ่น 4 ชนิด ได้แก่ ยางในรถยนต์เจาะรู และอุปกรณ์เติมอากาศที่ใช้ทั่วไป 3 ชนิด ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร โดยพิจารณาถึงคุณสมบัติของวัสดุยึดหยุ่น เช่น ค่าแรงตึงผิวของวัสดุ ขนาดรูเติมอากาศ ความยืดหยุ่น ความดันวิกฤต และความดันยึดหยุ่น เป็นต้น นอกจากนี้ ได้มีการศึกษารูปแบบการเปลี่ยนแปลงของขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลาและอัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกัน และทำการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับโมเดลคณิตศาสตร์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์โมเดลของ Terasaka et al., 1990 เพื่อศึกษากลไกการเกิดฟองอากาศจากรูเติมอากาศที่มีความยืดหยุ่น ซึ่งโมเดลจะกล่าวถึงแรงต่างๆ ที่ทำให้เกิดฟองอากาศ (ดังรูป 2.31) และดังสมการ 2.45-2.49

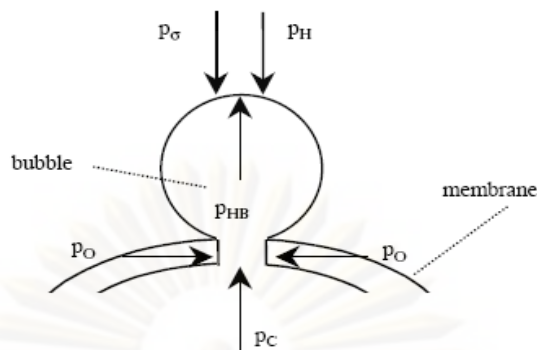
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right) \quad (2.45)$$

$$p_B - p_h = \rho_L \left[ R \frac{d^2}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 \right] + \frac{2\sigma_L}{R} + \frac{4\mu_L}{R} \frac{dR}{dt} \quad (2.46)$$

$$(\rho_G + C_I \rho_L) \frac{d}{dt} (V_B U_B) = (\rho_L - \rho_G) g V_B - \frac{\pi D_{\max}^2}{8} C_D \rho_L U_B^2 - \pi d_w \sigma_L \sin \theta_a + \frac{4\rho_G q^2}{\pi d_{OR}^2} \quad (2.47)$$

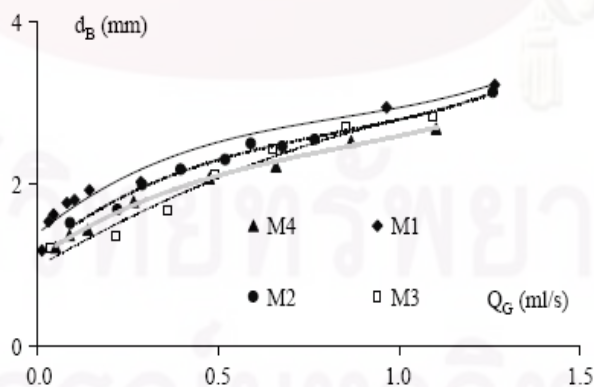
$$\frac{dp_C}{dt} = \frac{\chi p_C}{V_C} (Q_G - q) = \frac{\chi p_C}{V_C} \left( Q_G - \frac{dV_B}{dt} \right) \quad (2.48)$$

$$|p_C - p_B| = \left( \frac{q}{k_{OR}} \right)^2 = \frac{1}{k_{OR}^2} \left( \frac{dV_B}{dt} \right)^2 \quad (2.49)$$

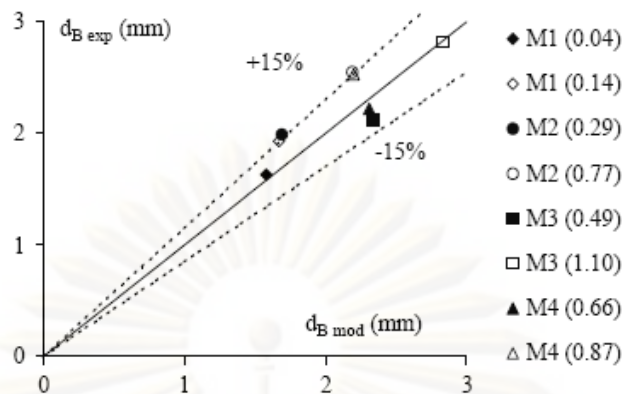


รูปที่ 2.31 แรงต่างๆ ที่ทำให้เกิดฟองอากาศ

ค่าความดันวิกฤตและความดันยืดหยุ่นที่ได้จากอุปกรณ์เติมอากาศแบบยืดหยุ่นมีค่าค่อนข้างต่ำ และใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการศึกษาอุปกรณ์เติมอากาศชนิดหัวเติมอากาศแบบแข็งทั่วไป นอกจากนี้ พบว่า ขนาดฟองอากาศมีขนาดใหญ่มากขึ้นเมื่อค่าอัตราการไหลของก๊าซเพิ่มขึ้น (ดังรูป 2.32) ในขณะที่ขนาดฟองอากาศที่ได้จากวัสดุยืดหยุ่นประเภทยางไนรยอนดั้นั้น มีขนาดใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากอุปกรณ์เติมอากาศ 3 ชนิดที่เหลือ แต่มีความแตกต่างกันที่ค่าของความถี่ในการเกิดฟองอากาศ ซึ่งสามารถส่งผลต่อจำนวนฟองอากาศและค่าพื้นที่ผิวสัมผัสสำหรับการเติมอากาศได้ จากการประยุกต์ใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์ในการทำนายค่าของขนาดฟองอากาศ พบว่า โมเดล สามารถใช้ทำนาย ขนาดฟองอากาศ และเวลาการเกิดฟองอากาศ ซึ่งได้ผลใกล้เคียงกับผลการทดลอง (ดังรูป 2.33) ดังนั้นความเป็นไปได้ในการนำยางไนรยอนทุกมาใช้เป็นหัวเติมอากาศ นอกจากจะศึกษาถึงขนาดของฟองอากาศแล้ว ยังจำเป็นต้องศึกษาถึงพื้นที่ผิวสัมผัส และความสามารถในการถ่ายเทออกซิเจนด้วย



รูปที่ 2.32 ขนาดฟองอากาศกับอัตราการไหลของก๊าซ



รูปที่ 2.33 การเปรียบเทียบขนาดฟองอากาศโดยใช้โมเดลกับวิธีการทดลอง

### สรุป

1. ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสที่ได้จากถังปฏิบัติการแบบใบพัด มีค่าต่ำกว่า แบบฟองอากาศ
2. ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ในถังปฏิบัติการแบบฟองอากาศ สูงกว่า ของใบพัด
3. ถังปฏิบัติการแบบฟองอากาศ จึงน่าสนใจที่จะศึกษาในรายละเอียดเกี่ยวกับวัสดุยึดหยุ่น ซึ่งในการศึกษา ต้องการขนาดฟองอากาศที่เล็ก และค่าพื้นที่ผิวสัมผัสมาก
4. ขนาดฟองอากาศที่ได้จากวัสดุยึดหยุ่นประเภทยางในรถยนต์ มีขนาดใกล้เคียงกับ ค่าที่ได้จากอุปกรณ์เติมอากาศทั่วไป ดังนั้นการนำยางในรถยนต์มาใช้เป็นตัวเติมอากาศ นอกจากศึกษาถึงขนาดฟองอากาศแล้ว ยังจำเป็นต้องศึกษาถึง พื้นที่ผิวสัมผัส และความสามารถในการถ่ายเทออกซิเจนด้วย
5. แนวทางการศึกษาและเปรียบเทียบอุปกรณ์เติมอากาศแบบยืดหยุ่นในงานวิจัยนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงาน รวมถึงการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์เติมอากาศ

## บทที่ 3

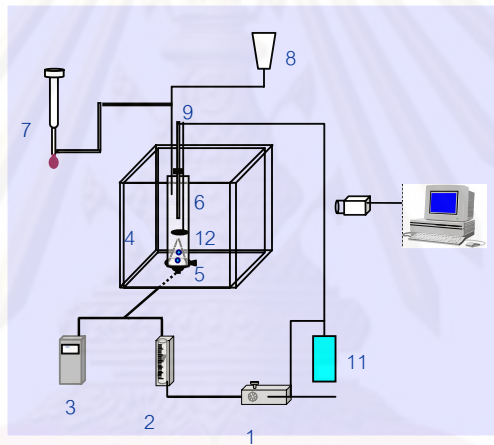
### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 แผนการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะและเปรียบเทียบวัสดุยึดหยุ่น เพื่อประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์เติมอากาศแบบฟองอากาศ ได้แก่ ขางพารา ขางในบรทุกประเภทต่างๆ โดยจะพิจารณาสมบัติต่างๆ ในด้านกายภาพ ในด้านลักษณะการเกิดฟองอากาศ และในด้านการถ่ายเทออกซิเจน

#### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.1. โมเดลทดลองพร้อมด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์ตัวแปรต่างๆ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ดังปฏิบัติการ

- |                             |                                     |
|-----------------------------|-------------------------------------|
| 1. เกจวัดความดัน            | 7. มาตรวัดอัตราการไหลแบบฟองสปู      |
| 2. ชุดควบคุมอัตราการไหล     | 8. ที่ใส่สารเคมี                    |
| 3. เครื่องวัดความดันลด      | 9. อุปกรณ์ที่วัดค่าออกซิเจนละลายน้ำ |
| 4. ภาชนะที่เกิดฟอง          | 10. ระบบถ่ายภาพและวิเคราะห์ภาพ      |
| 5. ตัวยึดวัสดุยึดหยุ่น      | 11. เกจวัดความดันไนโตรเจน           |
| 6. ดังปฏิบัติการแบบฟองอากาศ | 12. ระบบกวนผสมสารเคมี               |

ในการทดลองนี้ใช้ดังปฏิบัติการที่มีขนาด  $0.4 \times 0.4 \times 0.9$  เมตร (รูป 3.1) โดยเมื่ออัดอากาศ จะเกิดฟองอากาศขึ้น จากนั้นก็ทำการถ่ายภาพด้วยกล้องความเร็วสูง และควบคุมอัตราการไหลของ ก๊าซโดยชุดควบคุมอัตราการไหล (2) โดยวัสดุยึดหยุ่นอยู่บนที่รองซึ่งมีตัวยึด (5) สำหรับการวัด

พลังงานลด (pressure drop) ที่เกิดจากวัสดุยืดหยุ่น ใช้ เครื่องมือวัดความดัน (electronic manometer) (3) ในขณะที่การวัดอัตราการไหลของก๊าซ ใช้มาตรวัดอัตราการไหลของก๊าซ (soap film meter) (7) เนื่องจากอัตราการไหลของก๊าซ ( $Q_g$ ) ต่ำมากๆ และเพื่อให้ได้ค่าอัตราการไหลของก๊าซที่ถูกต้อง ( $Q_g$ ) ส่วนฟองที่เกิดขึ้น จะใช้กล้องถ่ายภาพรูปถ่ายภาพของฟองเพื่อนำไปคำนวณต่อถึงขนาดฟองอากาศ ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ ความถี่ในการเกิดฟองอากาศ และพื้นที่ผิวสัมผัสในการถ่ายเทออกซิเจนได้

3.2.2 เครื่องเติมอากาศ (Air Pump) ยี่ห้อ Puma

3.2.3 เครื่องวัดอัตราการไหลอากาศ บริษัท New Flow 0 – 10 ลิตรต่อนาที

3.2.4 เครื่องวัดและควบคุมความดัน บริษัท Nuova Fima 0 - 1 บาร์

3.2.5 ชุดอุปกรณ์วัดค่าความสามารถในการถ่ายเทออกซิเจน ( $K_L a$ )

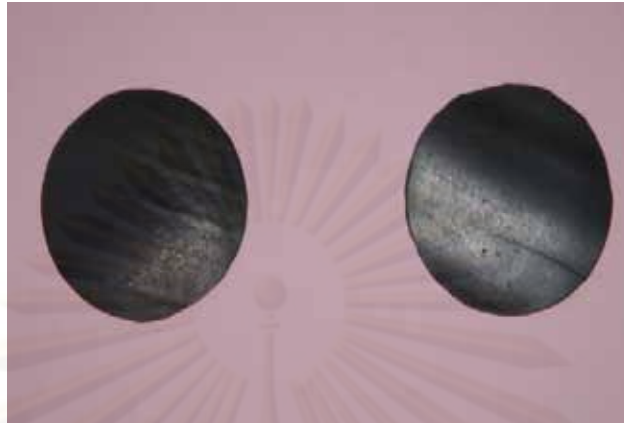
จากโมเดลทดลอง (รูปที่ 3.1) อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน ถูกควบคุมโดยเกจวัดความดัน ไนโตรเจน (Nitrogen pressure gauge) (11) สำหรับใช้ในการดึงออกซิเจนออกจากน้ำ แต่ในการทดลองนี้จะใช้วิธีเติมสารเคมี โดยสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ โซเดียมซัลไฟต์ ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) และ โคบอลต์คลอไรด์ ( $\text{CoCl}_2$ ) ซึ่งจะปล่อยลงมาจากส่วนบนของคอลัมน์ (8) และถูกกวนผสมด้วย อุปกรณ์กวนผสมสารเคมี (12) ดังสมการการกำจัดออกซิเจน สมการที่ 2.35 หน้า 51

3.2.6 วัสดุยืดหยุ่น

- ยางพารา หนา 2 มิลลิเมตร นำมาตัดให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร ดังรูป 3.2
- ยางมิซลิน หนา 2 มิลลิเมตร นำมาตัดให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร ดังรูป 3.3
- ยางบริดสโตน หนา 1 มิลลิเมตร นำมาตัดให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร ดังรูป 3.4



รูปที่ 3.2 ยางพารา



รูปที่ 3.3 ยางมิชลิน



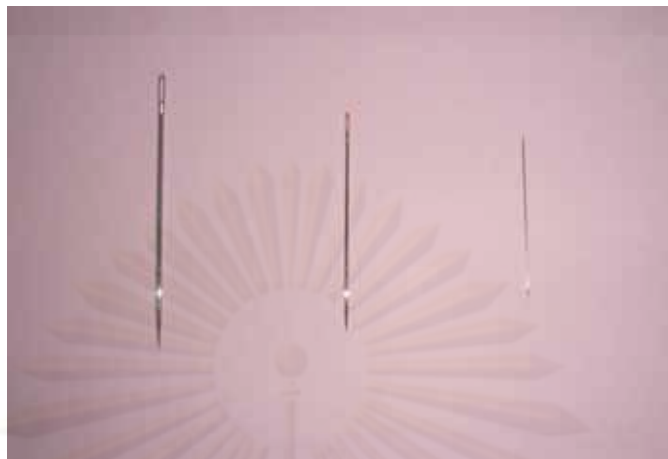
รูปที่ 3.4 ยางบริดสโตน

3.2.7. อุปกรณ์วิเคราะห์ผลด้วยภาพถ่าย (Image Treatment Techniques) ได้แก่ กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง (100 ภาพต่อวินาที) และกล้องวิดีโอ

3.2.8. อุปกรณ์เจาะรูเติมอากาศ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.185, 0.120 และ 0.055 เซนติเมตร ดังรูป 3.5

3.2.9 สารเคมีที่ใช้ในการดึงออกซิเจนจากเฟสน้ำ ได้แก่ โซเดียมซัลไฟต์ ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) และโคบอลต์คลอไรด์ ( $\text{CoCl}_2$ )





Ø 0.185 cm.      Ø 0.120 cm.      Ø 0.055 cm.

รูปที่ 3.5 เข็มที่นำมาเจาะรู

### 3.3 ตัวแปรที่ศึกษา

ตาราง 3.1 ตัวแปรต่างๆที่ใช้ศึกษา

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. อุณหภูมิ	1. อุณหภูมิห้อง
3. ขนาดถังปฏิบัติการ	2. 0.4 □ 0.4 □ 0.9 เมตร
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ชนิดของยาง	1. ยางพารา ยางมิชลิน ยางบริดส์โตน
2. ขนาดรูเติมอากาศ	2. ขนาดเล็ก กลาง ใหญ่
3. จำนวนรู	3. จำนวนรู 1, 4 รู และเต็มพื้นที่ยาง (160 รู)
4. ระยะห่างรูเติมอากาศ	4. ระยะห่าง 2, 3, 4, 5 และ 6 มม.

ตาราง 3.1 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ศึกษา (ต่อ)

ตัวแปรที่ศึกษา	วิธีวิเคราะห์
1. ขนาดฟองอากาศ ( $D_B$ )	1. กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง
2. ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ ( $U_B$ )	2. กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง
3. ความถี่ในการเกิดฟองอากาศ ( $f_B$ )	3. จำนวนรูเดิมอากาศคูณกับอัตราการไหลของก๊าซต่อ 1 รู แล้วหารด้วยปริมาตรถังปฏิบัติการ
4. ความดันตกในการสร้างฟองอากาศ ( $\Delta P$ )	4. เครื่องวัดความดัน
5. พลังงานในการสร้างฟองอากาศ	5. ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของก๊าซและพลังงานลดทั้งหมด
6. ความยืดหยุ่นของวัสดุยืดหยุ่น ( $W_s$ )	6. กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง
7. ค่าคงที่จากโมเดลความยืดหยุ่น $K$ และ $n$	7. ความสัมพันธ์ระหว่าง $T$ กับ $\Delta P$
8. พื้นที่ผิวสัมผัสในการถ่ายเทออกซิเจน ( $a$ )	8. สัดส่วนระหว่างพื้นที่ผิวทั้งหมดของฟองอากาศต่อปริมาตรถังปฏิบัติการ
9.สัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจน ( $K_L a$ )	9. จากการทดลอง นำข้อมูลมาเขียนกราฟ
10. ประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจน ( $OTE$ )	10. อัตราการถ่ายเทออกซิเจน/มวลของออกซิเจนในอากาศที่เติมให้แก่ระบบ

### 3.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

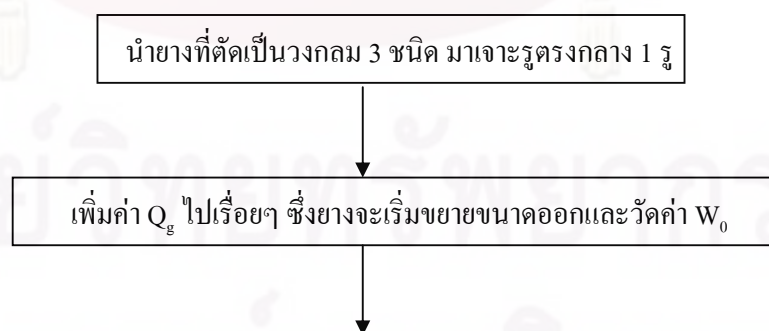
#### 3.4.1 ศึกษาสภาพทางกายภาพของวัสดุยืดหยุ่น (ความทนทาน)

ในการทดลองนี้ใช้วัสดุยืดหยุ่น 3 ชนิด คือ ยางพารา ยางมิชลิน ยางบริดสโตนนำมาทำการศึกษาสภาพทางกายภาพ เพื่อศึกษาว่าวัสดุยืดหยุ่นชนิดใดมีความทนทานต่อสารเคมีมากกว่ากัน สำหรับการศึกษความทนต่อสารเคมี เป็นการนำวัสดุยืดหยุ่นทั้ง 3 ชนิด ไปทดสอบกับสารเคมีที่เป็นกรดและด่าง ( $H_2SO_4$  และ  $NaOH$ ) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งในขั้นต้นทำการทดสอบโดยใช้เครื่องมือจากสถาบันวิจัยยาง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

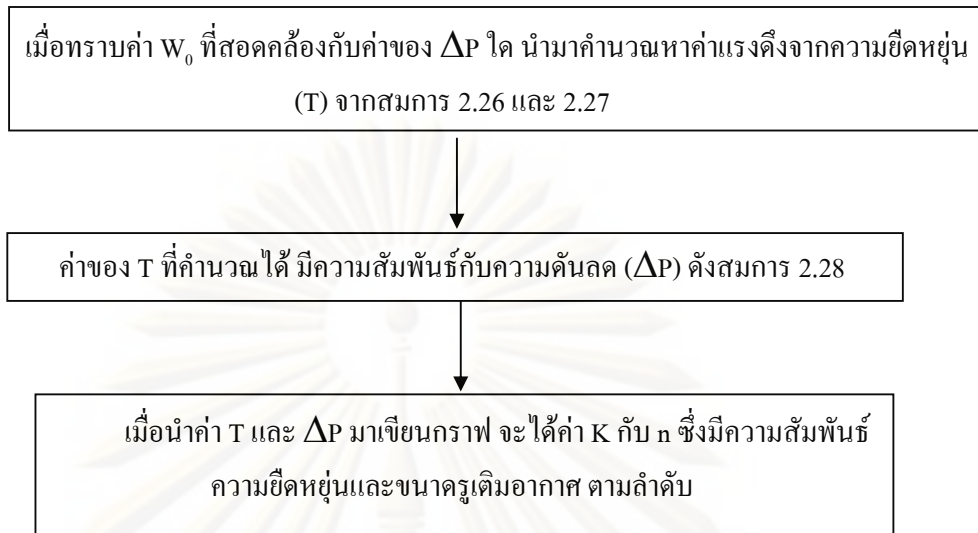


รูปที่ 3.6 แผนผังการศึกษาความทนทาน

3.4.2 ศึกษาสภาพทางกายภาพ ในด้านความยืดหยุ่นของวัสดุ สำหรับการศึกษาลักษณะความยืดหยุ่น ยังได้ทำการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย เพื่อวัดค่าความยืดหยุ่นที่จุดศูนย์กลางของวัสดุยืดหยุ่น ( $W_0$ ) จากการใช้อุปกรณ์เจาะรูขนาดต่างๆ (0.185, 0.120 และ 0.055 มม.) รวมไปถึงคำนวณค่าคงที่  $K$ ,  $n$  ดังสรุปในรูป 3.7 โดยการหาค่าความยืดหยุ่นที่จุดศูนย์กลาง (membrane deflection at the pole,  $W_0$ ) ที่สัมพันธ์กับอัตราการใช้ของอากาศต่างๆ ( $Q_g$ ) รวมไปถึงประยุกต์ใช้สมการความสัมพันธ์เพื่อการวิเคราะห์คุณลักษณะของวัสดุยืดหยุ่นในด้านความแข็งแรงหรือความยืดหยุ่น และขนาดรูเดิมอากาศของวัสดุที่ใช้



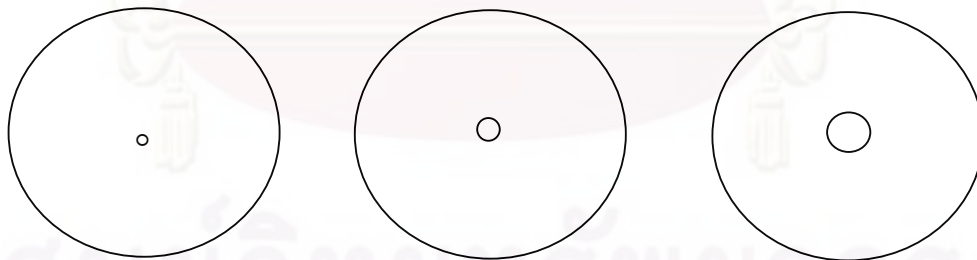
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.7 แผนผังการศึกษาลักษณะความยืดหยุ่น

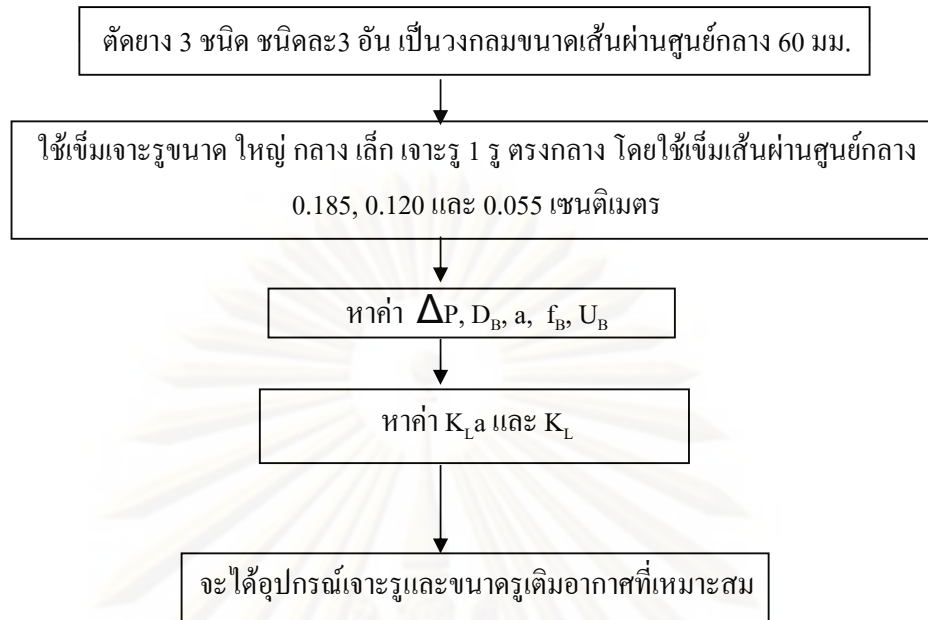
### 3.4.3 ศึกษาขนาดอุปกรณ์เจาะรูและขนาดรูเดิมอากาศที่เหมาะสม

การศึกษารูเดิมอากาศที่เหมาะสม ทำโดยใช้เข็มเจาะรูซึ่งมี 3 ขนาด คือ ขนาดใหญ่ กลาง เล็ก มาเจาะรูยางทั้ง 3 ชนิด โดยเจาะรู 1 รูตรงกลาง (รูป 3.8) เพื่อคัดเลือกชนิดของอุปกรณ์เจาะรูที่มีความเหมาะสมมากที่สุด กล่าวคือมีพื้นที่ผิวในการถ่ายเทออกซิเจนมากที่สุด และความดันลดในการสร้างฟองอากาศน้อยสุด โดยวิธีการทดลองสามารถสรุปได้ดังรูป 3.9



รูปที่ 3.8 การเจาะรูยาง 1 รู

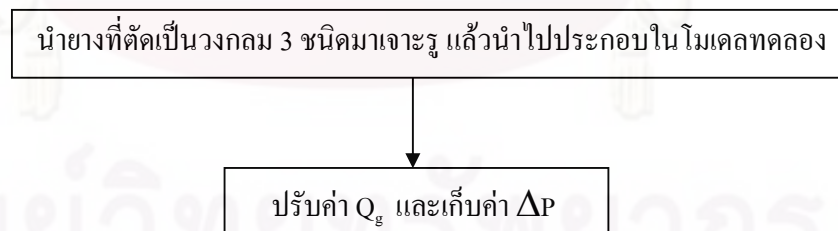
ศูนย์วิทยุทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.9 แผนผังการศึกษาขนาดอุปกรณ์เจาะรู

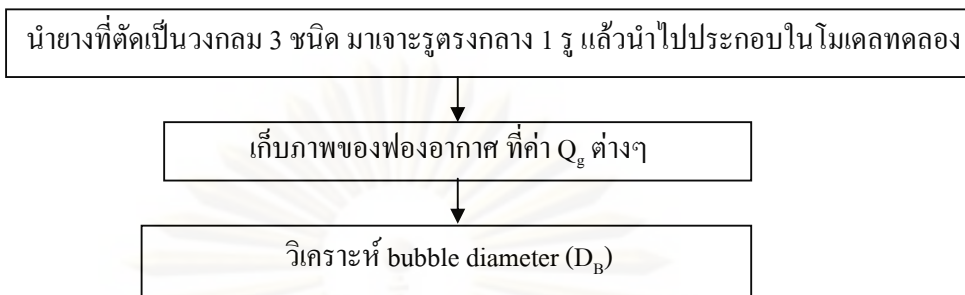
ทั้งนี้ในการทดลองนี้ ทำการวิเคราะห์และคำนวณตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ความดันลด ( $\Delta P$ ) ค่าขนาดฟองอากาศ ( $D_B$ ) ค่าพื้นที่ผิวสัมผัส ( $a$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ( $K_L a$ ) มีความจำเป็นสำหรับใช้ในการเปรียบเทียบความสามารถในการเติมอากาศของแต่ละอุปกรณ์ โดยวิธีการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง สามารถสรุปได้ ดังรูปที่ 3.10-3.12

- การหา  $\Delta P$  (pressure drop)



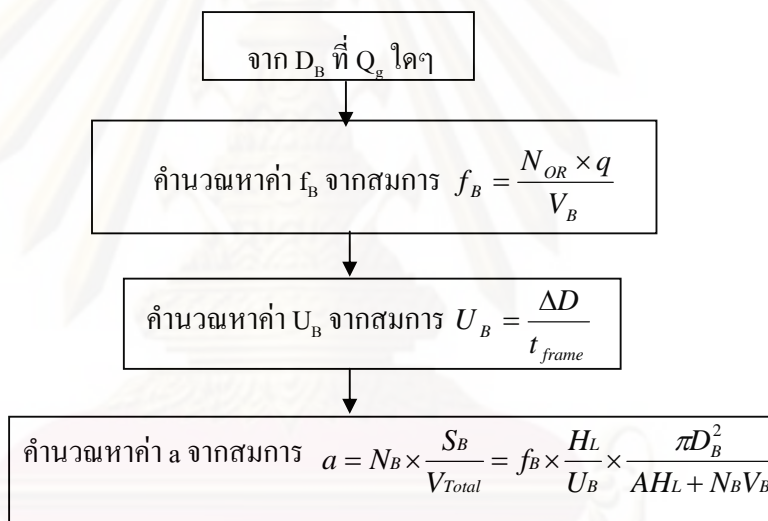
รูปที่ 3.10 แผนผังการหาความดันลด

- การหา  $D_B$  (bubble diameter)



รูปที่ 3.11 แผนผังการหาเส้นผ่านศูนย์กลางฟอง

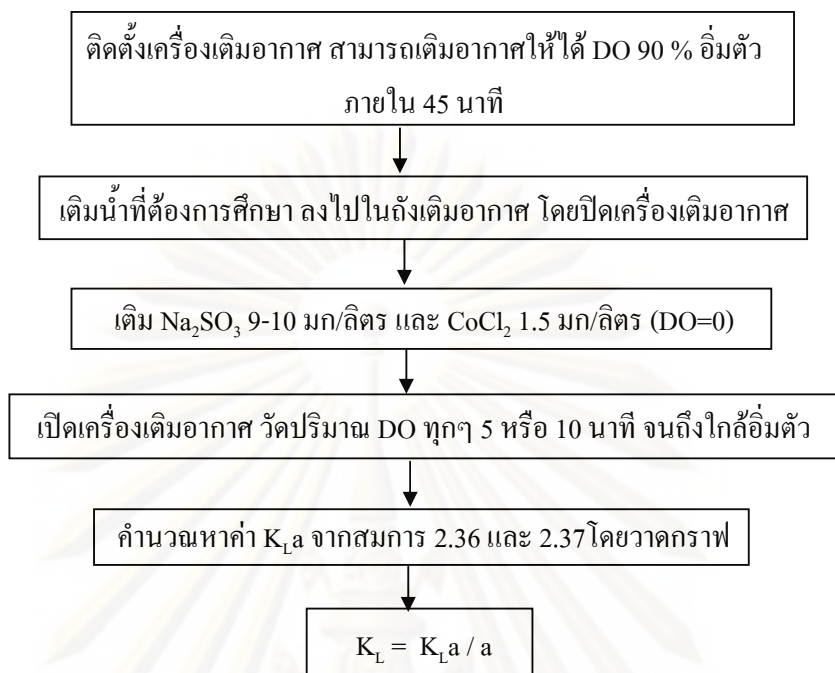
- การหา  $a$  (interfacial area)



รูปที่ 3.12 แผนผังการหาพื้นที่ผิวสัมผัส

- ศึกษาความสัมพันธ์ในการถ่ายเทมวลสาร ( $K_L a$ )

ในส่วนนี้ จะทำการศึกษาความสามารถในการถ่ายเทออกซิเจนของวัสดุยึดหยุ่นประเภทยางที่มีความเหมาะสมในด้านพื้นที่ผิวสัมผัสและด้านพลังงาน จากการทดลองที่ 3.4.3 – 3.4.5 โดยจะทำการวิเคราะห์ค่า  $K_L a$  และค่า  $K_L$  และการคำนวณจากสัดส่วนระหว่าง  $K_L a$  และ  $a$  ตามลำดับ โดยขั้นตอนในการวิจัย แสดงดังรูป 3.13

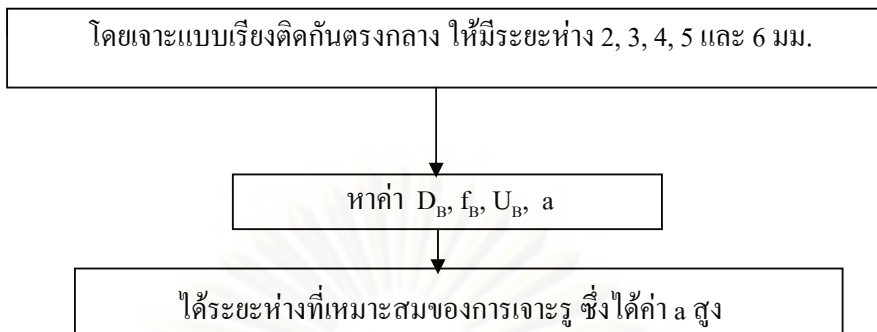


รูปที่ 3.13 แผนผังการหาค่า  $K_{La}$  และ  $K_L$

#### 3.4.4 ศึกษาระยะห่างระหว่างรูเติมอากาศที่เหมาะสม

จากการทดลองในข้อ 3.4.3 จะทำให้ทราบถึงชนิดอุปกรณ์เจาะรูและขนาดรูเติมอากาศที่เหมาะสม สำหรับการศึกษานี้ มีวัตถุประสงค์ เพื่อวิเคราะห์หาค่าระยะห่างระหว่างรูเติมอากาศ ที่จะไม่ทำให้เกิดมีการรวมตัวของฟองเกิดขึ้นที่ผิวของตัวเติมอากาศแบบยึดหยุ่น (Coalescence phenomenon at membrane sparger surface) ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าว อาจส่งผลทำให้  $D_B$  สูงขึ้น และค่าประสิทธิภาพในการเติมอากาศลดลง โดยการทดลองจะนำยางทั้ง 3 ชนิดมาเจาะรูจำนวน 4 รู บริเวณตรงกลางของยาง ในแนวเส้นตรง โดยมีระยะห่างระหว่างรูเติมอากาศที่แตกต่างกัน คือ 2, 3, 4, 5 และ 6 มม. โดยจะใช้เวอร์เนียร์วัดระยะห่างระหว่างรูเติมอากาศ ซึ่งค่าความผิดพลาดอยู่ที่  $\pm 10$  เปอร์เซ็นต์ วิธีการทดลองดังแสดงในรูป 3.14

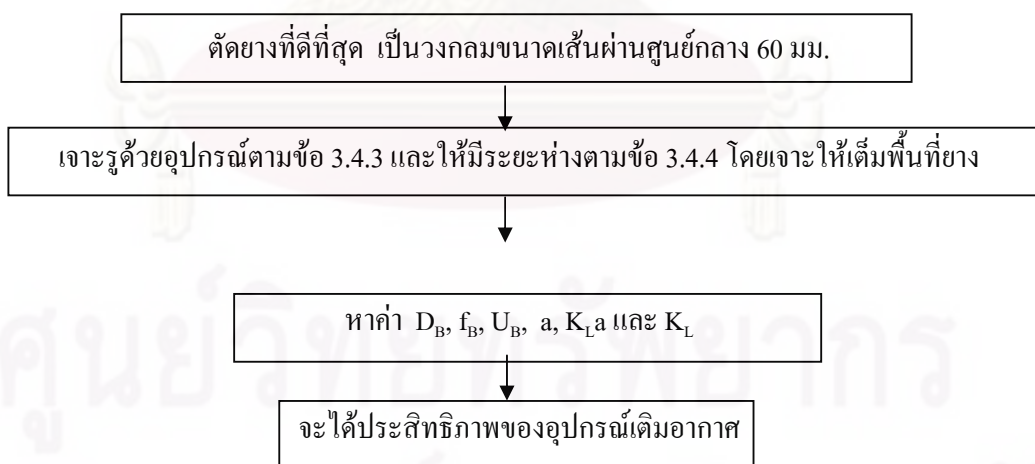




รูปที่ 3.14 แผนผังการศึกษาระยะห่างระหว่างรูเดิมอากาศ

### 3.4.5 ออกแบบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของอุปกรณ์เดิมอากาศแบบยึดหยุ่น

จากการทดลองในข้อ 3.4.3 และ 3.4.4 ทำให้ได้ขนาดรูเดิมอากาศ และระยะห่างระหว่างรูที่เหมาะสม ในหัวข้อนี้จะศึกษา เพื่อเสนอแนะแนวทางการออกแบบอุปกรณ์เดิมอากาศแบบยึดหยุ่น รวมไปถึงการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจน และเปรียบเทียบกับอุปกรณ์เดิมอากาศที่มีขายอยู่ตามท้องตลาด โดยจะนำยางที่ดีที่สุด มาเจาะรูให้เต็มพื้นที่ยาง โดยให้มีระยะห่างระหว่างรูตามข้อ 3.4.4 ในส่วนนี้จะใช้ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง เช่น  $D_B$ ,  $f_B$ ,  $U_B$  และ  $a$  เหมือนกับการศึกษาในหัวข้อที่ผ่านมา ในการเลือกรูปแบบการเรียงตัวของรูเดิมอากาศที่เหมาะสม โดยวิธีการทดลองสามารถสรุปได้ดังรูป 3.15



รูปที่ 3.15 แผนผังการศึกษาออกแบบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของอุปกรณ์เดิมอากาศแบบยึดหยุ่น



### 3.4.6 ศึกษาอัตราการถ่ายเทและประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจน

เมื่อทราบค่า  $K_{La}$  แล้ว และกำหนดให้ค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำ ณ จุดเริ่มต้น เท่ากับ 0 สามารถคำนวณหาความสามารถในการเติมออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศได้จาก สมการ 2.9 แต่การหาค่า  $K_{La}$  จะกระทำในสภาวะต่างๆ ซึ่งอาจไม่ได้อยู่ในสภาวะมาตรฐาน ดังนั้น จำเป็นต้องทำการคำนวณปรับค่าสำหรับอุณหภูมิและความดันบรรยากาศที่มีค่าแตกต่างกันกับ สภาวะมาตรฐาน เมื่อได้ค่า  $K_{La}$  และค่า  $C_s$  ที่ถูกปรับแก้สำหรับสภาวะจริงแล้ว จึงนำค่าเหล่านี้ มา คำนวณหาค่า OC ดังรูป 3.16 โดยเทียบกับอุปกรณ์เติมอากาศที่มีขายตามท้องตลาด



รูปที่ 3.16 การหาค่า OC และ OTE

### 3.4.7 โมเดลการทำนายด้วยสมการทางคณิตศาสตร์

ใช้โมเดลทำนายค่าขนาดของฟองอากาศ ( $D_B$ ), ค่าความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ ( $U_B$ ), ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ ( $a$ ), ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนโดยรวม ( $K_{La}$ ), ด้วยสมการ ทางคณิตศาสตร์ โดยนำมาเปรียบเทียบกับวิธีการทดลอง และเทียบกับอุปกรณ์เติมอากาศที่มีขาย ตามท้องตลาด จากตาราง 2.6 สามารถวิเคราะห์ค่า  $D_B$  และ  $f_B$  จากโมเดลได้ และจากตาราง 2.7 สามารถวิเคราะห์ค่า  $U_B$  ได้ ซึ่งจากค่า  $D_B$ ,  $f_B$  และ  $U_B$  ที่ได้สามารถหาค่า  $a$ ,  $K_L$  และ  $K_{La}$  ได้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

#### 4.1 การศึกษาสภาพกายภาพของวัสดุยืดหยุ่น

##### 4.1.1 การศึกษาสภาพทางกายภาพของวัสดุยืดหยุ่นในด้านความทนทาน

ในการทดลองนี้จะนำวัสดุยืดหยุ่น 3 ชนิด คือ ยางมิชลิน (Michelin Rubber) ยางบริดสโตน (Bridgestone Rubber) และยางพารา (Natural Rubber) มาศึกษาสภาพทางกายภาพ ในงานวิจัยนี้ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ ความยืดหยุ่น ความทนทานต่อสารเคมีที่เป็นกรดและด่างประเภทกรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ ) กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ตามลำดับ โดยทำการวิเคราะห์ที่สถาบันวิจัยยาง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์และได้ผลดังตารางที่ 4.1

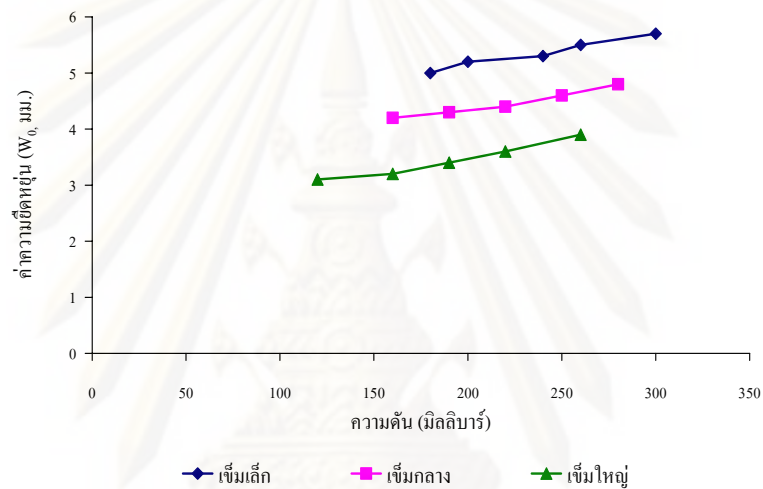
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของวัสดุยืดหยุ่นทั้ง 3 ชนิด

สมบัติที่ทดสอบ	ตัวอย่าง		
	ยางมิชลิน	ยางบริดสโตน	ยางพารา
การต้านแรงดึง (MPa)	1	8	12
การทนต่อแรงยืดจนขาด (%)	568	561	236
การทนต่อกรด			
- การต้านแรงดึง (MPa)	1	9	12
- การทนต่อแรงยืดจนขาด (%)	620	614	198
การทนต่อเบส			
- การต้านแรงดึง (MPa)	1	9	12
- การทนต่อแรงยืดจนขาด (%)	600	597	213

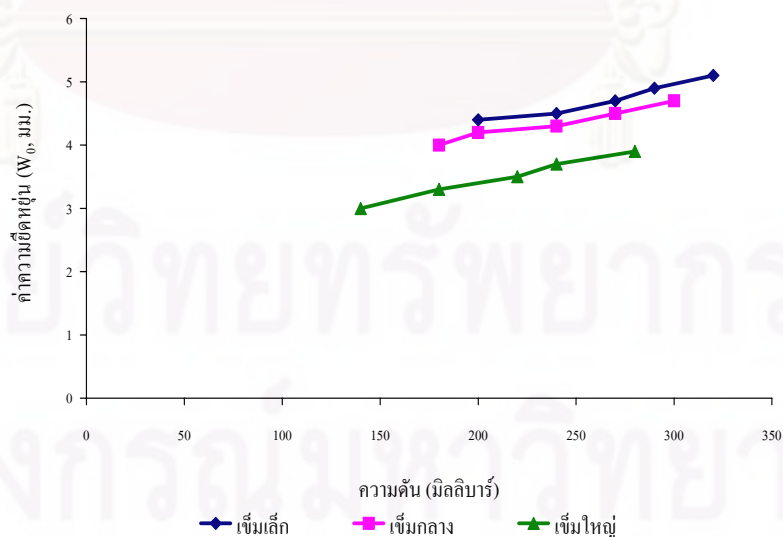
จากตาราง 4.1 พบว่ายางมิชลิน ยางบริดสโตน และยางพารามีการทนต่อแรงยืดจนขาดคือ ร้อยละ 568 ร้อยละ 561 และ ร้อยละ 236 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่าการต้านดึง (ยางมีความยืดหยุ่นมาก ค่าการต้านแรงดึงจะน้อย) ดังนั้นกล่าวได้ว่ายางมิชลินมีค่าการต้านแรงดึงน้อยที่สุดในขณะที่ยางพารามีการต้านแรงดึงมากที่สุด ซึ่งแสดงว่ายางมิชลินมีความยืดหยุ่นมากที่สุด ในขณะที่ยางพารามีความยืดหยุ่นน้อยที่สุด ทั้งนี้ ถ้านำยางทั้ง 3 ชนิดมาทดสอบความทนทานโดยนำมาทดสอบกับกรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ ) กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) พบว่าค่าการทนต่อแรงยืดจนขาดของทั้งยางมิชลินและยางบริดสโตนมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าการทนต่อแรงดึงกล่าวของ

ยางพารามีค่าลดลงซึ่งแสดงว่ายางมิซลินและยางบริดสโตน มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพทางเคมี (กรดและเบส) มากกว่ายางพารา

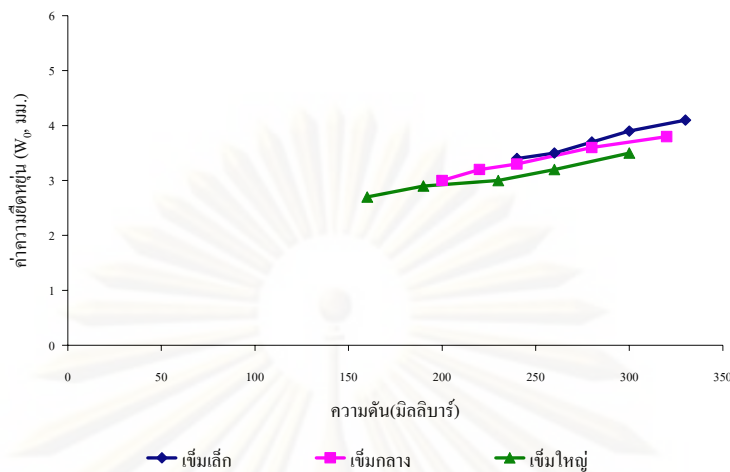
นอกจากนี้ ในงานวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาสมบัติความยืดหยุ่นของวัสดุทั้ง 3 ชนิด โดยประยุกต์ใช้วิธีการวิเคราะห์หัตถ์ภาพถ่ายเพื่อวัดค่าความยืดหยุ่นที่จุดศูนย์กลางของวัสดุยืดหยุ่น ( $W_0$ ) จากการใช้อุปกรณ์เจาะรูเดิมอากาศที่มีขนาดแตกต่างกัน 3 ชนิด (เข็มเล็ก เข็มกลาง และเข็มใหญ่) รูปที่ 4.1-4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยืดหยุ่นที่จุดศูนย์กลางของวัสดุยืดหยุ่นกับความดันของยางมิซลิน ยางบริดสโตน และยางพารา ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความยืดหยุ่นที่จุดศูนย์กลางกับความดันลดยางมิซลิน



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความยืดหยุ่นที่จุดศูนย์กลางกับความดันลดยางบริดสโตน

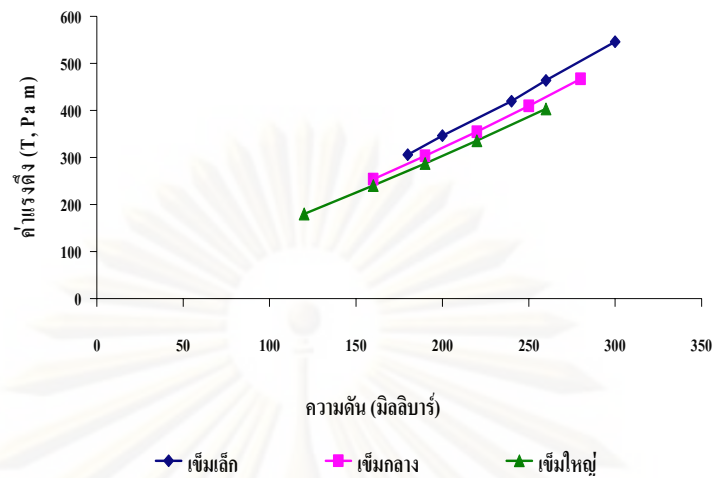


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความยืดหยุ่นที่จุดศูนย์กลางกับความดันลดของยางพารา

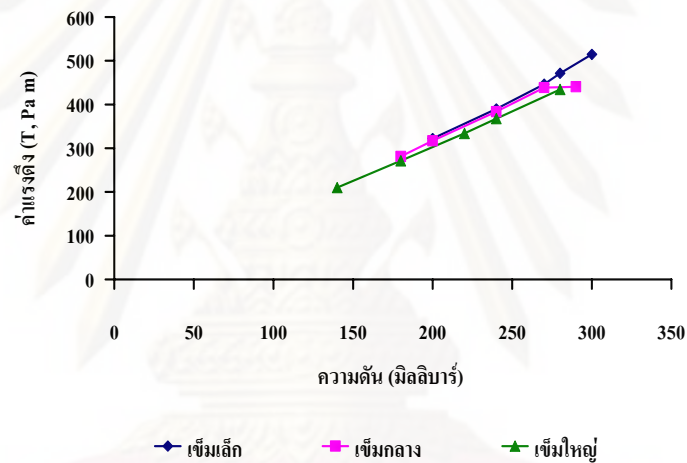
จากรูปที่ 4.1- 4.3 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความยืดหยุ่นที่จุดศูนย์กลาง ( $W_0$ ) กับความดันลด ( $\Delta P$ ) ของยางมิซลิน ยางบริดสโตน และยางพารา โดยนำยางทั้ง 3 ชนิด มาเจาะรูเติมอากาศจำนวน 1 รูด้วยอุปกรณ์เจาะรู (เจ็มน้อย) ขนาดต่างๆ คือ เจ็มน้อย เจ็มน้อย เจ็มน้อย โดยจากการทดลองพบว่า ในช่วงความดันลด 180 – 330 มิลลิบาร์ ยางมิซลินและยางบริดสโตนมีค่าความยืดหยุ่นที่จุดศูนย์กลางใกล้เคียงกันคือ อยู่ในช่วง 3.1-5.7 มิลลิเมตร ส่วนยางพารามีค่าความยืดหยุ่นที่จุดศูนย์กลางน้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบในตาราง 4.1 นอกจากนี้ การเจาะรูเติมอากาศด้วยอุปกรณ์ขนาดเล็กให้ค่า  $W_0$  ที่สูงกว่าการเจาะรูเติมอากาศด้วยอุปกรณ์ขนาดกลางและใหญ่ โดยผลดังกล่าวสอดคล้องกับการสะสมของอากาศภายในวัสดุยืดหยุ่นในกรณีที่มีรูเติมอากาศขนาดเล็กที่เกิดขึ้นมากกว่าผลที่ได้จากการเติมอากาศขนาดกลางและขนาดใหญ่ ซึ่งมีการระบายออกของอากาศได้ง่ายกว่า

ทั้งนี้ เมื่อทราบค่าความยืดหยุ่นที่จุดศูนย์กลาง ( $W_0$ ) ที่สอดคล้องกับค่าความดันลด ( $\Delta P$ ) จากการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย เรายังสามารถนำมาคำนวณหาค่าแรงดึงจากความยืดหยุ่นของอุปกรณ์เติมอากาศ (Excess tension, T) จากสมการ 2.26 และ 2.27 โดยค่า T ที่คำนวณได้ มีความสัมพันธ์กับค่าความดันลด ในสมการ 2.28

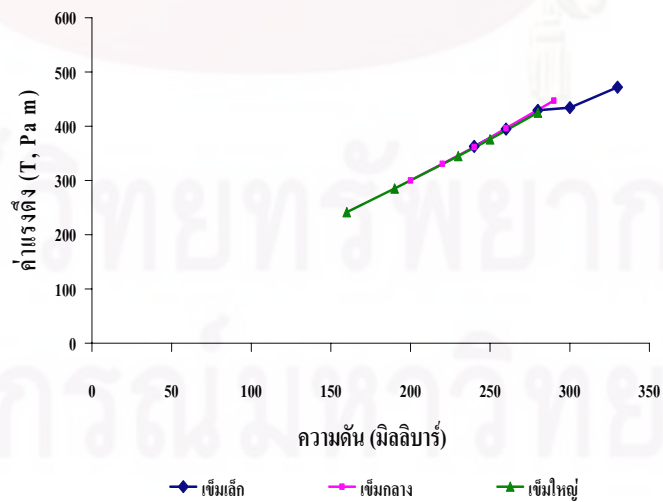
รูปที่ 4.4 - 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงจากความยืดหยุ่น (T) และความดันลด ( $\Delta P$ ) ของยางมิซลิน ยางบริดสโตน และยางพารา ที่ประยุกต์ใช้อุปกรณ์เจาะรูเติมอากาศที่แตกต่างกัน 3 ชนิด (เจ็มน้อย เจ็มน้อย และเจ็มน้อย)



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงจากความยืดหยุ่นของยางมิชลินที่ความดันต่างๆ

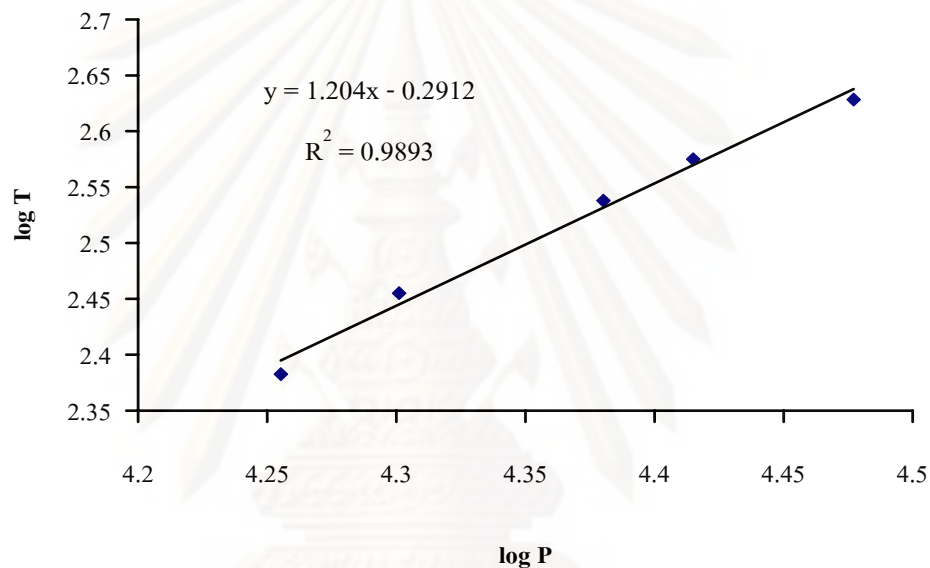


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงจากความยืดหยุ่นของยางบริดสโตนที่ความดันต่างๆ



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงจากความยืดหยุ่นของยางพาราที่ความดันต่างๆ

จากรูป 4.4 – 4.6 พบว่าแรงดึงจากความยืดหยุ่น (T) จะแปรผันตรงกับความดัน ( $\Delta P$ ) กล่าวคือเมื่อเพิ่มความดันจะส่งผลทำให้แรงดึง T มีค่าเพิ่มขึ้น โดยยวทั้ง 3 ชนิดมีค่าแรงดึงจากความยืดหยุ่นใกล้เคียงกันคือ 180.09 – 514.85 ปาสคาลเมตร นอกจากนี้ ค่าแรงดึง T ที่คำนวณได้จากสมการ 2.26 และ 2.27 (รัศมีของยางเท่ากับ 60 มม.) มีความสัมพันธ์กับค่า  $\Delta P$  ดังสมการ 2.28 ดังนั้น เมื่อนำค่า T และ  $\Delta P$  มาเขียนกราฟ จะได้ค่าคงที่ K กับ n ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความยืดหยุ่น (Flexibility) และเส้นผ่านศูนย์กลางรูเติมอากาศ (Hole diameter) ตามลำดับ (Painmanakul, และคณะ 2004) โดยรูปที่ 4.7 แสดงการหาค่า K กับ n ของยางพารา ซึ่งเจาะรูด้วยเข็มใหญ่ โดยนำค่า  $\log T$  กับ  $\log P$  มาเขียนกราฟ



รูปที่ 4.7 แนวทางการคำนวณค่าคงที่ K และ n

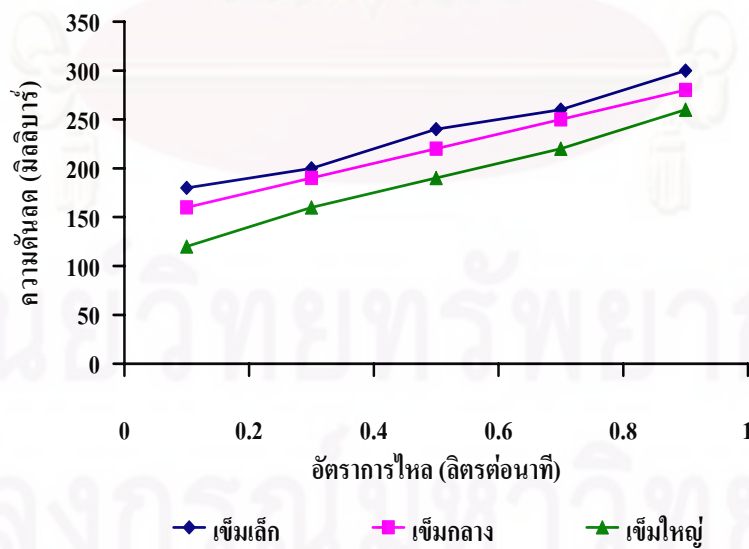
จากรูปที่ 4.7 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า T และค่า  $\Delta P$  ในลักษณะของสมการเส้นตรง  $y = 1.204x - 0.2912$  ซึ่งทำให้เราทราบค่าคงที่ n เท่ากับ 1.20 ส่วนการหาค่า K จะได้ว่า  $\log K = -0.2912$  จากนั้นทำการแก้สมการลอการิทึมเพื่อหาค่า K จากสมการนี้ จะได้ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 0.51 โดยผลสรุปของค่าคงที่ K และ n ที่สอดคล้องกับวัสดุยืดหยุ่นชนิดต่างๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าคงที่ K และ n ของยางทั้ง 3 ชนิด

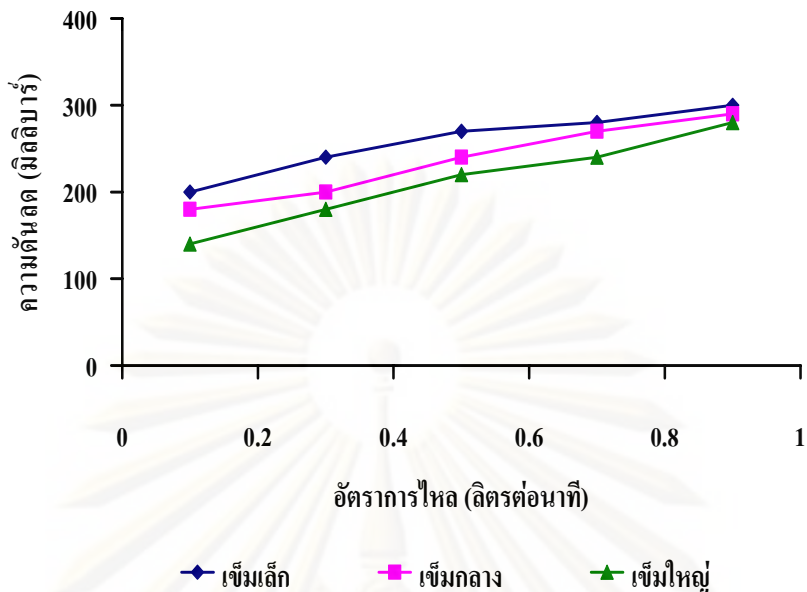
ชนิดยาง	เข็มเล็ก		เข็มกลาง		เข็มใหญ่	
	K	n	K	n	K	n
มิชลิน	0.51	1.20	0.52	1.24	0.52	1.29
บริดสโตน	0.57	1.21	0.58	1.26	0.61	1.28
พารา	0.62	1.22	0.62	1.25	0.64	1.27

จากตาราง 4.2 พบว่าค่าคงที่ K ที่ได้มีค่าแตกต่างกันระหว่างยางที่นำมาศึกษา 3 ชนิด โดยจะแปรผกผันกับความยืดหยุ่นหรือแปรผันตรงกับความแข็งของวัสดุ ในงานวิจัยนี้ ยางมิชลินมีค่า K คือ 0.51 – 0.52 ยางบริดสโตนมีค่า K คือ 0.57 – 0.61 และยางพารามีค่า K คือ 0.62 – 0.64 ดังนั้น จากค่าคงที่ K ที่ได้แสดงว่ายางมิชลินมีความยืดหยุ่นมากที่สุดเมื่อเทียบกับยางบริดสโตนและยางพารา ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองดังแสดงในรูป 4.1 – 4.3 ส่วนค่าคงที่ n จะแปรผันตรงกับขนาดรูเดิมอากาศ ในงานวิจัยนี้พบว่าค่า n ที่ได้จากอุปกรณ์เจาะรูชนิดเดียวกัน จะมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่ จะมีค่าแตกต่างกันเมื่อใช้อุปกรณ์เจาะรูเดิมอากาศขนาดแตกต่างกัน โดยค่า n ที่ได้จากอุปกรณ์เจาะรูขนาดเล็กคือ 1.20 – 1.22 ขนาดกลางคือ 1.24 – 1.26 และขนาดใหญ่คือ 1.27 - 1.29 ดังนั้น กล่าวได้ว่าสมการของ Rice และคณะ, 1986 สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของวัสดุยืดหยุ่นที่นำมาสร้างเป็นอุปกรณ์เติมอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ

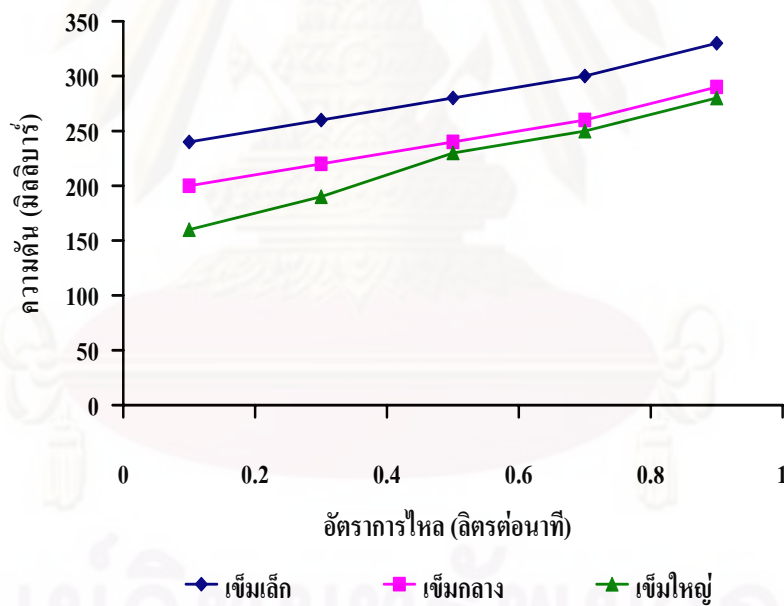
ทั้งนี้ จากการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้านความทนทาน ด้านความยืดหยุ่นที่จุดศูนย์กลางและการประยุกต์ใช้สมการความสัมพันธ์ที่กล่าวถึงข้างต้น กล่าวได้ว่าค่าความดันลด (Pressure drop) จัดเป็นอีกหนึ่งตัวแปรที่สามารถบ่งบอกถึงพลังงานที่จำเป็นในการสร้างฟองอากาศจากวัสดุยืดหยุ่นที่สนใจศึกษาแต่ละชนิดได้ โดยรูปที่ 4.8 – 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันลด ( $\Delta P$ ) และอัตราการไหลของก๊าซ ( $Q_g$ ) ระหว่าง 0.1 ถึง 0.9 ลิตรต่อนาที โดยมีความสูงของน้ำในถังปฏิกริยา คือ 0.23 เมตรและประยุกต์ใช้อุปกรณ์เติมอากาศที่มีรูเดิมอากาศแบบยืดหยุ่นรูเดียวจากวัสดุยืดหยุ่น 3 ชนิด (ยางมิชลิน ยางบริดสโตน และยางพารา) โดยเจาะรูเดิมอากาศด้วยอุปกรณ์เจาะรูเติมอากาศขนาดแตกต่างกัน 3 ชนิด (เข็มเล็ก เข็มกลาง และเข็มใหญ่)



รูปที่ 4.8 ความดันลดที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกันของยางมิชลิน



รูปที่ 4.9 ความดันตกที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกันของยางบริดจแมน



รูปที่ 4.10 ความดันตกที่อัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกันของยางพารา

จากรูป 4.8–4.10 พบว่าความดันตก ( $\Delta P$ ) ที่ได้จากการทดลองจะแปรผันตรงกับอัตราการไหลของอากาศ ( $Q_g$ ) โดยยางมิชลินและยางบริดจแมนมีค่าความดันตกใกล้เคียงกัน โดยค่า  $\Delta P$  จากการใช้อุปกรณ์เจาะรูขนาดใหญ่จะมีค่าต่ำกว่าที่ได้จากอุปกรณ์เจาะรูขนาดเล็กและขนาดกลาง ทั้งนี้ค่า  $\Delta P$  จะมีค่าน้อยและมากที่สุดที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.1 และ 0.9 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ



สำหรับกรณีของยางพาราพบว่ามีค่าความดันลดยิ่งกว่ายางมิซลินและยางบริดสโตน โดยอาจกล่าวได้ว่าความดันลดยิ่งขึ้นนั้นจะแปรผันตรงกับความแข็งของวัสดุ (Rigidity) โดยถ้าวัสดุยืดหยุ่นที่นำมาใช้เพื่อการเติมอากาศมีความแข็งค่อนข้างสูงนั้น ในการปล่อยอากาศออกในรูปของฟองอากาศ อาจมีความจำเป็นต้องใช้พลังงานในการเปิดและขยายขนาดของรูเติมอากาศมากขึ้น จึงเป็นผลให้ความดันลดยิ่งขึ้น (Loubiere และคณะ, 2004) ดังนั้นในการนำไปใช้งานจริงๆ ควรเลือกยางที่ไม่ควรมีความแข็งมาก

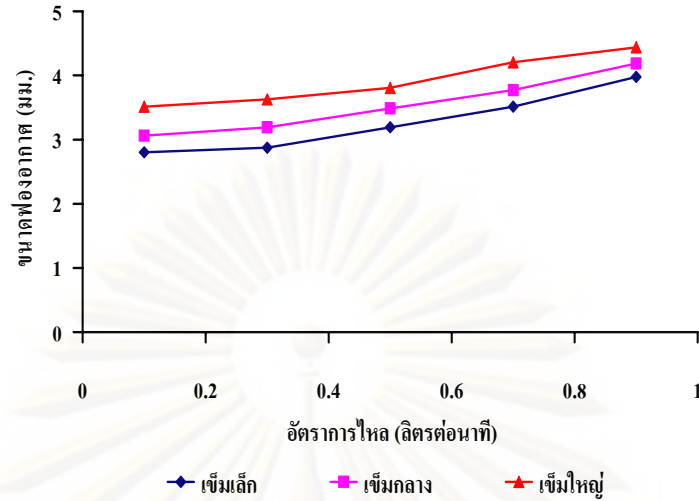
#### 4.2 ศึกษาขนาดอุปกรณ์เจาะรูเติมอากาศและขนาดรูเติมอากาศที่เหมาะสม

ในส่วนนี้จะทำการศึกษารูเติมอากาศที่เหมาะสม โดยทำการวิเคราะห์ตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์และการถ่ายเทออกซิเจนของฟองอากาศ ซึ่งจากผลการทดลองในข้อ 4.1 อาจกล่าวในขั้นต้นได้ว่าควรเลือกยางมิซลินที่เจาะรูเติมอากาศด้วยอุปกรณ์เติมอากาศขนาดใหญ่ เนื่องจากใช้พลังงานและให้ความดันลดยิ่งต่ำ สำหรับการประยุกต์ใช้งานที่อัตราไหลอากาศที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม เราควรพิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นในด้านขนาดฟองอากาศและการถ่ายเทออกซิเจนของฟองอากาศด้วย เนื่องจากทั้งสองตัวแปรดังกล่าวจัดเป็นประเด็นสำคัญสำหรับประยุกต์ใช้งานในกระบวนการเติมอากาศของระบบบำบัดน้ำเสีย

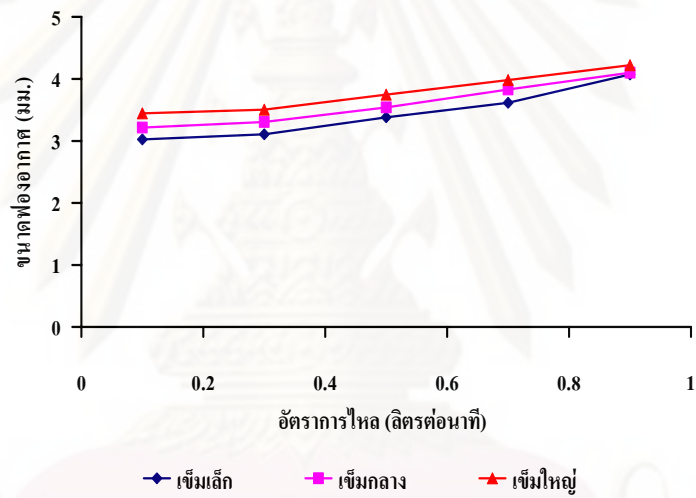
โดยในงานวิจัยนี้ จะดำเนินการวิจัยโดยใช้อุปกรณ์เจาะรูเติมอากาศซึ่งมีขนาดแตกต่างกัน 3 ขนาด (ใหญ่ กลาง และเล็ก) มาเจาะรูเติมอากาศบนวัสดุยืดหยุ่น 3 ชนิดจำนวน 1 รูตรงกลาง เพื่อคัดเลือกชนิดของอุปกรณ์เจาะรูที่มีความเหมาะสมมากที่สุด กล่าวคือควรมีค่าพื้นที่ผิวในการถ่ายเทออกซิเจน (Interfacial area) สูงและความดันลดยิ่งต่ำ ในการสร้างฟองอากาศที่ต่ำ โดยทำการเก็บข้อมูลขนาดฟองอากาศด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงความเร็ว 100 ภาพต่อวินาที (Basler camera) และทำการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยชุดคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งโปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์ภาพถ่าย (Pylon Store and Bubble measuring program) โดยค่าขนาดฟองอากาศที่ได้จะเป็นค่าเฉลี่ยจาก 100 – 150 ภาพของฟองอากาศที่ได้จากการทดลอง

##### 4.2.1 การศึกษาขนาดฟองอากาศ ( $D_B$ )

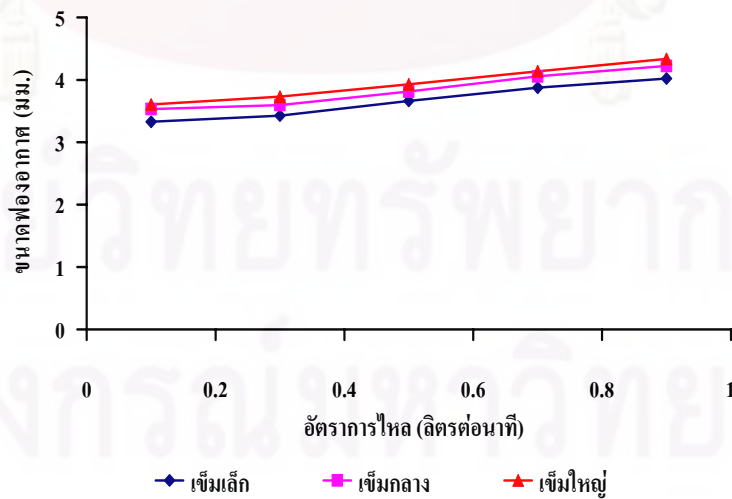
รูปที่ 4.11 – 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าขนาดฟองอากาศ ( $D_B$ ) และอัตราการไหลอากาศ ( $Q_g$ ) ของยางมิซลิน ยางบริดสโตน และยางพารา โดยใช้อุปกรณ์เจาะรูเติมอากาศ 3 ขนาด (ขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่) และทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.1 – 0.9 ลิตรต่อวินาที (ดังภาคผนวก ก 1.1 – 1.3)



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟองอากาศกับอัตราการไหลอากาศของยางมิชลิน



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟองอากาศกับอัตราการไหลอากาศของยางบริดสโตน

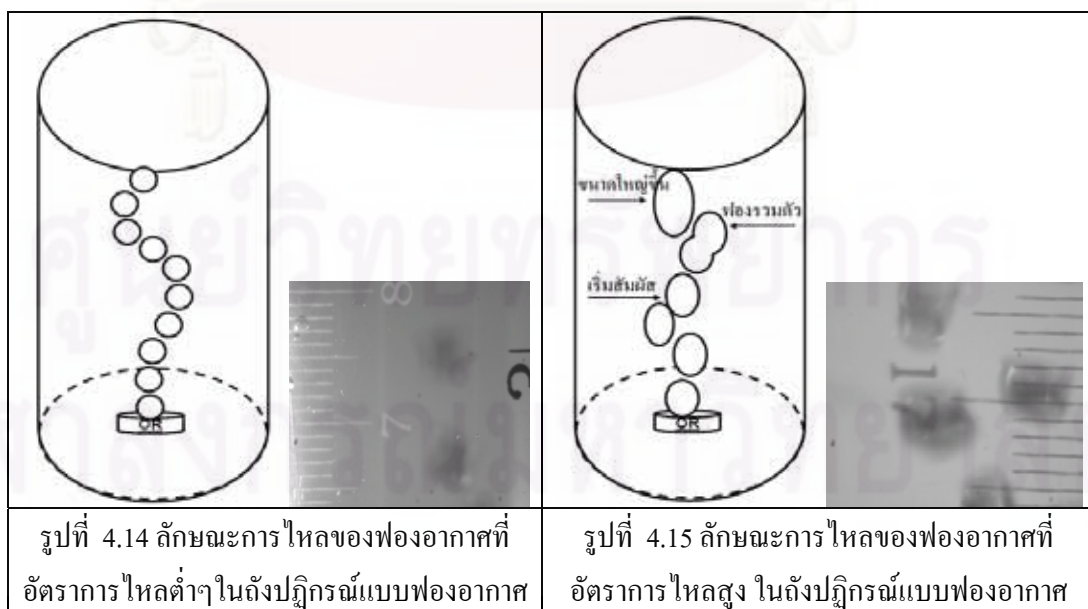


รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟองอากาศกับอัตราการไหลอากาศของยางพารา

จากรูปที่ 4.11 – 4.13 พบว่าขนาดฟองอากาศ ( $D_B$ ) มีค่าระหว่าง 2.803 – 4.637 มิลลิเมตร ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซระหว่าง 0.1 - 0.9 ลิตรต่อนาที โดยค่า  $D_B$  จะแปรผันตรงกับอัตราการไหลของอากาศ ( $Q_g$ ) นอกจากนี้ ที่อัตราการไหลของก๊าซเท่ากัน จะพบว่าขนาดของฟองอากาศจะแปรผันตรงกับขนาดรูเดิมอากาศ โดยที่รูเดิมอากาศขนาดเล็กจะให้ฟองอากาศที่มีขนาดเล็ก ในขณะที่เมื่อขนาดรูเดิมอากาศที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะส่งผลให้ฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่ โดยความสัมพันธ์ดังกล่าว สามารถอธิบายได้ด้วยสมการของ Tate ซึ่งพิจารณาถึงสมดุลระหว่างแรงลอยตัวของฟองอากาศ (Buoyancy Force) และแรงตึงผิวรอบๆ รูเดิมอากาศ (Surface tension around orifice) ดังแสดงในสมการที่ 4.1 (Loubiere และคณะ, 2004)

$$D_B = \left[ \frac{\sigma \cdot d_{or} \cdot \sigma}{g(\rho_L - \rho_g)} \right]^{1/3} \quad (4.1)$$

นอกจากนี้ จากการทดลองยังพบว่าที่ขนาดรูเดิมอากาศขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ มีแนวโน้มของการเกิดฟองอากาศที่คล้ายกัน กล่าวคือ จะได้ฟองอากาศขนาดเล็กที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.1 ลิตรต่อนาที และขนาดของฟองอากาศใหญ่ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.9 ลิตรต่อนาที โดยที่ค่า  $Q_g$  ต่ำ (0.1 – 0.5 ลิตรต่อนาที) พบว่าจะมีขนาดฟองอากาศค่อนข้างคงที่ ซึ่งค่า  $D_B$  ที่เกิดขึ้นในช่วงดังกล่าวถูกควบคุมด้วยขนาดของรูเดิมอากาศ (Hole diameter or Orifice size) และแรงตึงผิว (Surface tension) แต่เมื่ออัตราการไหลของก๊าซเพิ่มสูงขึ้น (0.7 – 0.9 ลิตรต่อนาที) พบว่าขนาดฟองอากาศมีค่าสูงขึ้น โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวมีสาเหตุมาจากการชนกันและรวมกันของฟองอากาศที่มีจำนวนมากขึ้นภายในระบบเดิมอากาศ (Painmanakul และคณะ, 2004) โดยปรากฏการณ์การเกิดฟองอากาศที่เกิดขึ้นสามารถแสดงดังรูป 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ



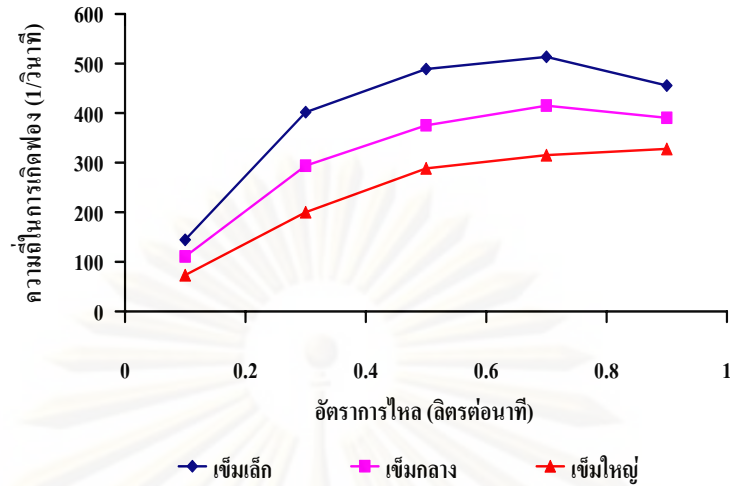
นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังพบว่าขนาดฟองอากาศแปรผันตรงกับความยืดหยุ่น (Elasticity) โดยขนาดฟองอากาศที่เกิดจากยางมิชลิน มีขนาดแตกต่างกันค่อนข้างมาก เมื่อเทียบกับยางบริดสโตนและยางพารา ซึ่งแสดงว่าความยืดหยุ่นส่งผลต่อการเปิดหรือขยายของรูเดิมอากาศ ดังนั้นขนาดฟองอากาศที่เกิดจากยางพาราจึงค่อนข้างคงที่ ในกรณีนี้ เราจึงสามารถสรุปได้ว่าความยืดหยุ่น ขนาดรูเดิมอากาศ และแรงตึงผิวรอบๆ รูเดิมอากาศจัดเป็นตัวแปรหลักที่ควบคุมค่าขนาดฟองอากาศ แต่ในกรณีที่อัตราการไหลอากาศสูงขึ้น จะเป็นพลังงานการชนและการรวมกันของฟองอากาศที่เป็นอีกหนึ่งตัวแปรที่สำคัญต่อขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้น

#### 4.2.2 ความถี่ในการเกิดฟองอากาศ (Bubble formation frequency, $f_b$ )

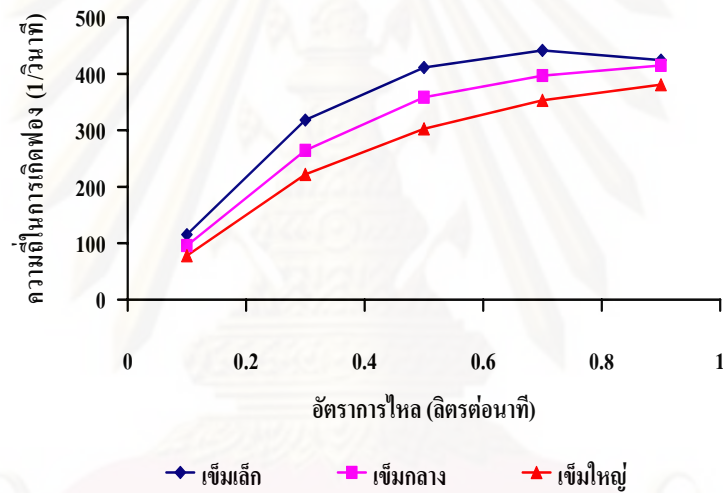
รูปที่ 4.16 – 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ในการเกิดฟองอากาศ ( $f_b$ ) กับอัตราการไหลอากาศ ( $Q_g$ ) ของยางมิชลิน ยางบริดสโตน และยางพารา โดยใช้เข็มเจาะรู 3 ขนาดและทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.1 – 0.9 ลิตรต่อวินาที ทั้งนี้ความถี่ในการเกิดฟองคือจำนวนฟองที่เกิดขึ้นในเวลา 1 วินาที ซึ่งคำนวณจากจำนวนรูเดิมอากาศ ( $N_{OR}$ ) คูณกับอัตราการไหลของก๊าซต่อหนึ่งรูเดิมอากาศ ( $q$ ) แล้วหารด้วยปริมาตรของฟองอากาศ ( $V_b$ ) ดังสมการ 2.32

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.16 – 4.18 พบว่าความถี่ในการเกิดฟองอากาศ ( $f_b$ ) มีค่าระหว่าง 67.941 - 513.503 ต่อวินาทีในช่วงอัตราการไหลของก๊าซระหว่าง 0.1 - 0.9 ลิตรต่อวินาที สำหรับรูเดิมอากาศที่ใช้อุปกรณ์เจาะรูขนาดแตกต่างกัน โดยเมื่อเปรียบเทียบขนาดของรูเดิมอากาศขนาดแตกต่างกันที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากัน พบว่าค่า  $f_b$  มีค่ามากที่สุดที่ขนาดรูเดิมอากาศที่มีขนาดเล็กและมีค่าน้อยสุดที่ขนาดรูเดิมอากาศขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นผลมาจากขนาดฟองอากาศที่ได้จากรูเดิมอากาศขนาดต่างๆ และส่งผลต่อระยะเวลาในการสร้างฟองอากาศ (Bubble formation time,  $T_b$ ) สำหรับฟองอากาศขนาดใหญ่ที่นานกว่าฟองอากาศขนาดเล็ก โดยอาจกล่าวได้ว่าค่า  $f_b$  นั้นเป็นส่วนกลับของค่า  $T_b$  ดังนั้นอุปกรณ์เดิมอากาศที่สร้างฟองอากาศขนาดใหญ่จึงให้ค่า  $f_b$  ที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการใช้งานอุปกรณ์เดิมอากาศที่ให้ขนาดฟองอากาศเล็กเมื่อพิจารณาที่ค่า  $Q_g$  เดียวกัน และผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับสมการ 4.5 ดังที่กล่าวถึงข้างต้น (ดังภาคผนวก ก 1.4)

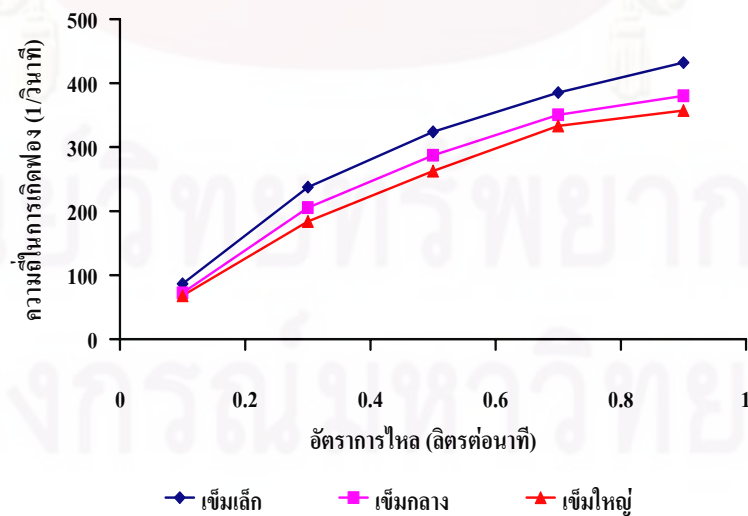
ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.16 ความถี่ในการเกิดฟองอากาศกับอัตราการใช้ปุ๋ยของขางมิชลิน



รูปที่ 4.17 ความถี่ในการเกิดฟองอากาศกับอัตราการใช้ปุ๋ยของขางบริดสตัน

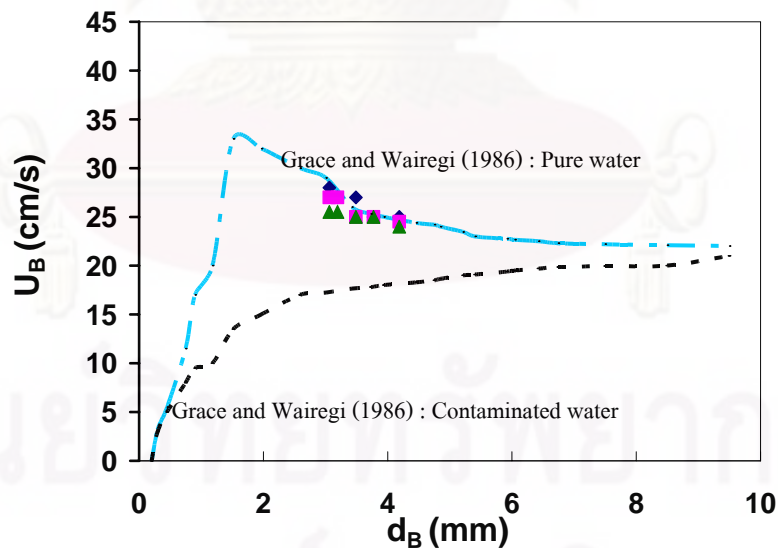


รูปที่ 4.18 ความถี่ในการเกิดฟองอากาศกับอัตราการใช้ปุ๋ยของขางพารา

ทั้งนี้ เนื่องจากความถี่ของฟองอากาศ ( $f_b$ ) มีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของอากาศ ( $Q_g$ ) และปริมาตรของฟองอากาศ ( $V_B$ ) ที่ขนาดรูเดิมอากาศขนาดแตกต่างกัน (ขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่) ดังนั้น จะพบว่าในกรณีของยางมิชลินและยางบริดสโตน ค่า  $f_b$  จะเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของอากาศจนถึงค่า  $Q_g$  เท่ากับ 0.5 ลิตรต่อนาที หลังจากนั้นค่า  $f_b$  จะเริ่มคงที่และลดลงอย่างช้า จนถึงค่า  $Q_g$  เท่ากับ 0.9 ลิตรต่อนาที โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้โดยเมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มสูงขึ้นนั้น จะส่งผลทำให้ขนาดฟองอากาศใหญ่ขึ้น เนื่องจากการรวมตัวของฟองอากาศภายในคอลัมน์ (ดังแสดงในรูปที่ 4.15) ซึ่งส่งผลทำให้เวลาในการสร้างฟองอากาศ ( $T_B$ ) และความถี่ในการเกิดฟองอากาศ ( $f_b$ ) มีค่าลดลงและเพิ่มสูงขึ้น ตามลำดับ ในขณะที่ ค่า  $f_b$  ในกรณีของยางพารามีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อค่า  $Q_g$  เพิ่มขึ้น โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวสอดคล้องกับการเกิดฟองอากาศของอุปกรณ์เติมอากาศแบบแข็ง (Rigid orifice) ซึ่งจะให้ขนาดฟองอากาศคงที่ (Painmanakul และคณะ, 2004) เนื่องจากขนาดของรูเดิมอากาศที่มีการเปลี่ยนแปลงหรือเปิดกว้างได้ค่อนข้างน้อยกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุยืดหยุ่นอีก 2 ชนิดที่เหลือ (ยางมิชลินและยางบริดสโตน)

#### 4.2.3 ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (Bubble rising velocity, $U_B$ )

รูปที่ 4.19 แสดงค่าความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ ( $U_B$ ) กับขนาดฟองอากาศ ( $D_B$ ) ของยางมิชลิน ยางบริดสโตน และยางพารา โดยใช้อุปกรณ์เจาะรูเดิมอากาศ 3 ขนาดและทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.1 – 0.9 ลิตรต่อนาที



◆ ยางมิชลิน      ■ ยางบริดสโตน      ▲ ยางพารา

รูปที่ 4.19 ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ ของยางมิชลิน ยางบริดสโตน และยางพารา ที่ขนาดฟองอากาศต่างๆ (Painmanakul และคณะ, 2004)

จากรูปที่ 4.19 พบว่าความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศมีค่าอยู่ระหว่าง 25 - 28 เซนติเมตรต่อวินาที โดยที่ขนาดของรูเดิมอากาศและที่อัตราการไหลของก๊าซแตกต่างกัน พบว่าส่งผลกระทบต่อข้างน้อยต่อค่า  $U_B$  ซึ่งผลลัพธ์ดังกล่าวส่งผลต่อค่าเวลาการกักฟองอากาศ (Bubble detention time,  $t_{DB}$ ) ดังแสดงในสมการที่ 4.6 ภายในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศที่แตกต่างกันน้อยตามไปด้วย โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวแตกต่างเมื่อเทียบกับผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นกับขนาดของฟองอากาศ ( $D_B$ ) และความถี่ในการเกิดฟอง ( $f_B$ ) ดังที่กล่าวถึงข้างต้น นอกจากนี้ค่า  $U_B$  ยังสอดคล้องกับกราฟการทดลองของ Grace and Wairegi (1986) ในกรณีที่เฟสของเหลวไม่มีการปนเปื้อน (Pure water) ซึ่งสอดคล้องกับน้ำประปาได้นำมาใช้ในการทดลองนี้

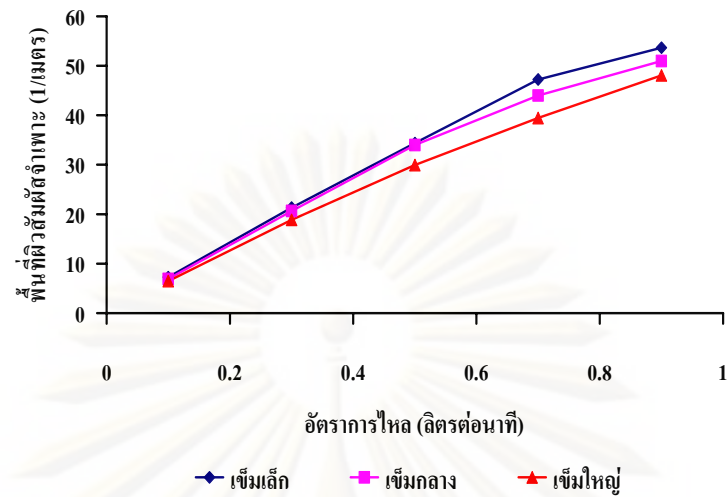
$$t_{DB} = \frac{H_L}{U_B} \quad (4.2)$$

$$H_L = \text{ความสูงของของเหลว (m)}$$

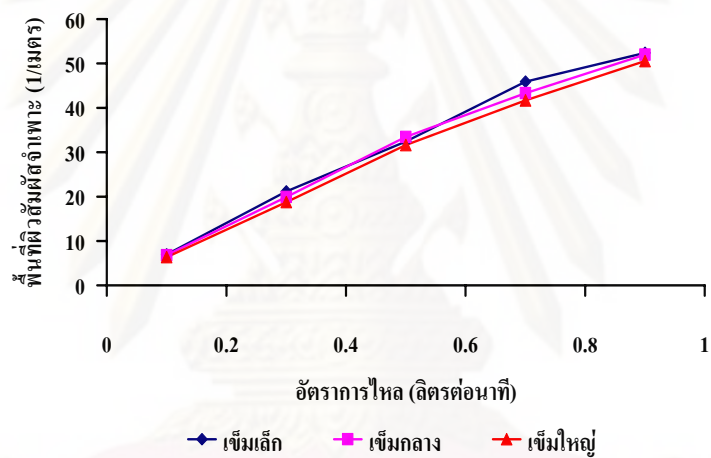
ทั้งนี้ จากขนาดฟองอากาศ ( $D_B$ ) ความถี่ในการเกิดฟองอากาศ ( $f_B$ ) และความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ ( $U_B$ ) สามารถนำไปคำนวณหาพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร ( $a$ ) จากจำนวนฟองอากาศคูณกับพื้นที่ผิวของฟองอากาศโดยกำหนดให้ฟองอากาศมีลักษณะเป็นทรงกลม หรือค่าสัมประสิทธิ์ความกลม (Sphericity) มีค่าเท่ากับ 1 (สมมติให้มีการสร้างฟองอากาศที่อัตราการไหลของอากาศมีค่าต่ำ) แล้วหารด้วยปริมาตรของถังปฏิกริยา (ปริมาตรของน้ำรวมกับปริมาตรของอากาศที่ใส่เข้าสู่ระบบ) ดังสมการ 2.34 สำหรับจำนวนฟองอากาศ ( $N_B$ ) สามารถคำนวณจากความถี่ในการเกิดฟอง ( $f_B$ ) คูณกับระยะเวลาที่ฟองอากาศอยู่ในถังปฏิกริยา ( $T_{DB}$ ) ของฟองอากาศหนึ่งๆ ในถังปฏิกริยา ดังสมการ 2.33

#### 4.2.4 พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (Interfacial area, $a$ )

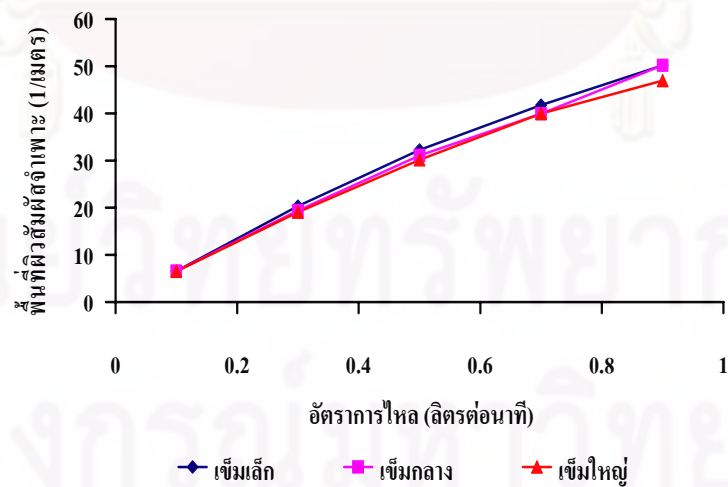
รูปที่ 4.20 – 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ ( $a$ ) กับอัตราการไหลอากาศ ( $Q_g$ ) ของยางมิซลิน ยางบริดสโตน และยางพารา โดยใช้อุปกรณ์เจาะรูเดิมอากาศ 3 ขนาด และทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.1 – 0.9 ลิตรต่ออนาที



รูปที่ 4.20 พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะกับอัตรการไหลอากาศของยางมิชลิน



รูปที่ 4.21 พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะกับอัตรการไหลอากาศของยางบริดสโตน



รูปที่ 4.22 พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะกับอัตรการไหลของอากาศของยางพารา



จากรูปที่ 4.20 – 4.22 เมื่อพิจารณารูเดิมอากาศแบบยี่ดหุ่่นรูเดียวที่มีขนาดแตกต่างกัน จะพบว่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร ( $a$ ) มีค่าอยู่ระหว่าง  $6.482 - 53.6418 \text{ m}^{-1}$  ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซระหว่าง  $0.1 - 0.9$  ลิตรต่อนาที นอกจากนี้ ค่า  $a$  จะเพิ่มขึ้นในลักษณะที่ค่อนข้างเป็นเส้นตรง (Linear trendline) โดยมีค่ามากและน้อยที่สุดที่อัตราการไหลของก๊าซ  $0.90$  และ  $0.1$  ลิตรต่อนาที ตามลำดับ ทั้งนี้ ค่าความชัน (Slope) การเพิ่มขึ้นของค่า  $a$  ของยางมิชลินและยางบริดสโตนจะเริ่มลดลงที่อัตราการไหลของก๊าซมากกว่า  $0.5$  ลิตรต่อนาที โดยค่า  $Q_g$  ดังกล่าวสอดคล้องกับค่า  $f_B$  ซึ่งมีค่าลดลงจนกระทั่งคงที่เมื่ออัตราการไหลของก๊าซสูงขึ้นในกรณีของยางมิชลินและยางบริดสโตนดังแสดงในรูปที่ 4.16 และ 4.17 ตามลำดับ นอกจากนี้กล่าวได้ว่าค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ ( $a$ ) ที่ค่ามากที่สุดได้จากการเลือกใช้อุปกรณ์เดิมอากาศแบบยี่ดหุ่่นที่ทำจากยางมิชลินขนาดรูเดิมอากาศเล็ก ( $a = 33.642 \text{ m}^{-1}$ ) และค่าที่น้อยสุดจากยางพาราที่มีขนาดรูเดิมอากาศขนาดใหญ่ ( $a = 24.946 \text{ m}^{-1}$ ) โดยค่า  $a$  ที่ได้จะแปรผกผันกับขนาดของฟองอากาศที่กล่าวถึงในขั้นต้น

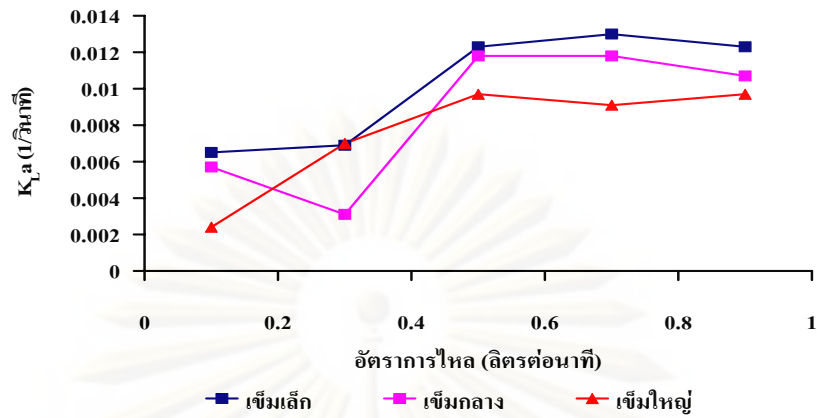
ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสารแปรผกผันกับขนาดรูเดิมอากาศ และส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ( $K_L a$ ) เมื่ออัตราการไหลของก๊าซสูงขึ้น เนื่องจากค่า  $K_L a$  เป็นผลคูณระหว่างค่า  $a$  และค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายผ่านฟิล์มของเหลว ( $K_L$ )

#### 4.2.5 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร (Volumetric mass transfer coefficient, $K_L a$ )

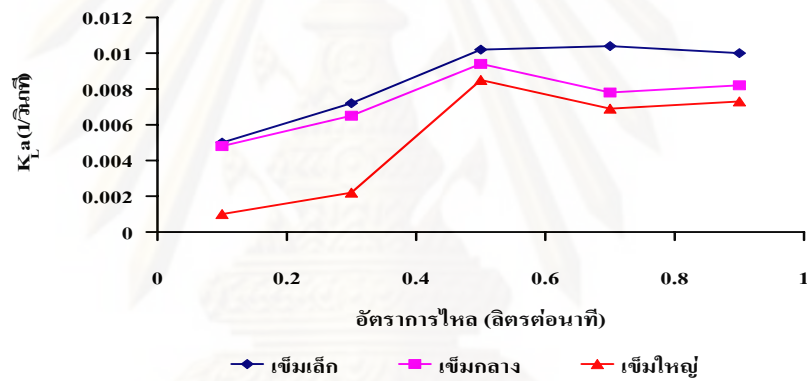
รูปที่ 4.23 – 4.25 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ( $K_L a$ ) ที่อัตราการไหลของอากาศที่แตกต่างกันของยางมิชลิน ยางบริดสโตน และยางพารา ตามลำดับ โดยใช้อุปกรณ์เจาะรูเดิมอากาศ 3 ขนาดและทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซ  $0.1 - 0.9$  ลิตรต่อนาที ทั้งนี้ ค่าสัมประสิทธิ์ ( $K_L a$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.9 โดยรายละเอียดในการคำนวณดังแสดงในบทที่ 3

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C_s - C) \quad (4.3)$$

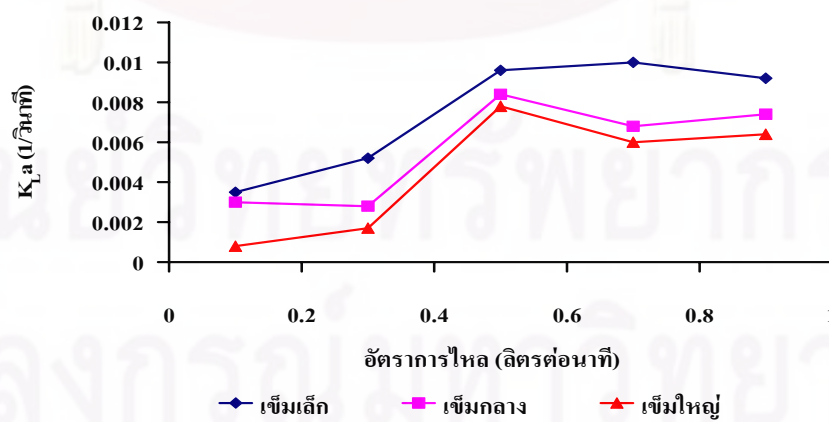
โดย  $\frac{dC}{dt}$  = อัตราการเกิดแอเรชัน (ก๊าซถูกเคลื่อนย้ายจากอากาศไปสู่ น้ำ)  
 $K_L$  = สัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายผ่านฟิล์มของเหลว  
 $a$  = พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะระหว่างอากาศกับน้ำ  
 $C_s, C$  = ความเข้มข้นของก๊าซที่อิ่มตัวในน้ำและที่เวลาใดๆ ตามลำดับ



รูปที่ 4.23 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ( $K_{La}$ ) ของยางมิชลินที่อัตราการไหลอากาศ



รูปที่ 4.24 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ( $K_{La}$ ) ของยางบริดสโตนที่อัตราการไหลอากาศ



รูปที่ 4.25 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ( $K_{La}$ ) ของยางพาราที่อัตราการไหลอากาศต่างๆ

จากรูป 4.23 – 4.25 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์  $K_{La}$  แปรผกผันกับขนาดรูเดิมอากาศ ( $D_{OR}$ ) และแปรผันตรงกับค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ ( $a$ ) โดยค่า  $K_{La}$  ของยางมิชลินที่ได้จากอุปกรณ์เจาะรูขนาดกลางและเล็กมีค่าใกล้เคียงกัน โดยจากงานวิจัยนี้ การเปลี่ยนแปลงของค่า  $K_{La}$  สามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ

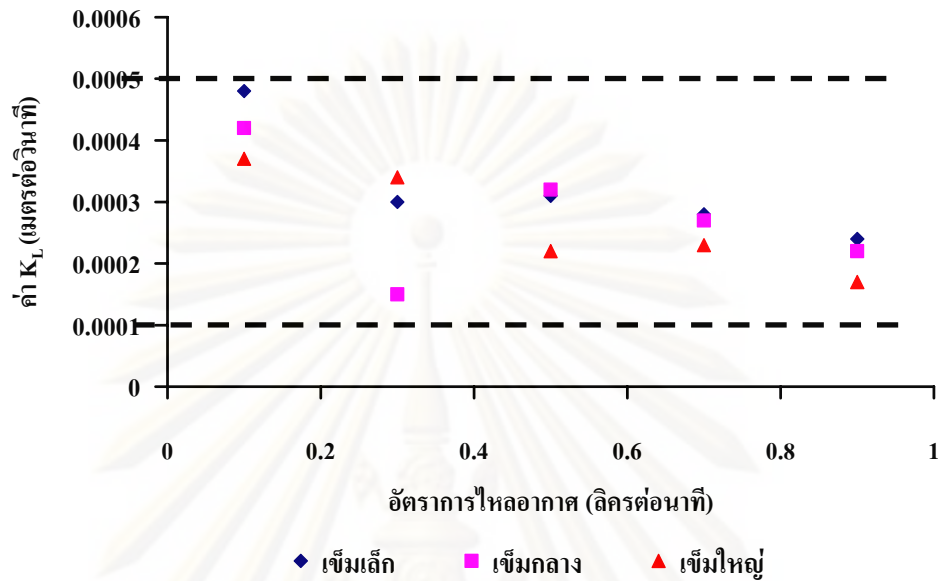
- 1) ค่า  $K_{La}$  มีค่าต่ำ (0.0036 ต่อวินาที) ที่อัตราการไหลของอากาศน้อยกว่า 0.1 ลิตรต่อนาที เนื่องจากที่อัตราการไหลของอากาศต่ำๆ มีฟองอากาศเกิดขึ้นค่อนข้างน้อย และส่งผลต่อค่า  $a$  ที่ได้ค่อนข้างต่ำ
- 2) ค่า  $K_{La}$  เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้นในช่วง 0.1 – 0.5 ลิตรต่อนาที โดยค่า  $K_{La}$  ที่สูงสุด คือ 0.0123 ต่อวินาที ที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที เนื่องจากฟองอากาศมีขนาดใหญ่และมีจำนวนฟองอากาศเพิ่มขึ้น ทำให้มีพื้นที่ผิวในการถ่ายเทออกซิเจนโดยรวมที่สูงมากขึ้น
- 3) ค่า  $K_{La}$  ค่อนข้างคงที่ (ไม่เปลี่ยนแปลงตามอัตราการเดิมอากาศ) เมื่ออัตราการไหลของอากาศมีค่าสูงกว่า 0.5 ลิตรต่อนาที เนื่องจากฟองอากาศมีขนาดใหญ่และมีจำนวนฟองอากาศมากจนเต็มความสามารถของน้ำในการรับออกซิเจนของถังปฏิบัติการ

โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ (กชกร และคณะ, 2009) ที่ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์  $K_{La}$  ของอุปกรณ์เดิมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่น (Flexible tube diffuser) นอกจากนี้ จากการทดลองยังพบว่า ยางมิชลินซึ่งใช้อุปกรณ์เจาะรูเดิมอากาศขนาดเล็กสามารถให้ค่าสัมประสิทธิ์  $K_{La}$  สูงสุด (0.013 ต่อวินาที) ที่อัตราการไหลของอากาศ 0.7 ลิตรต่อนาที โดยค่า  $K_{La}$  ที่ได้นี้จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนต่อไป ทั้งนี้ ค่าสัมประสิทธิ์  $K_{La}$  ที่ได้จากการทดลองนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ ( $a$ ) ที่จากการวิเคราะห์ตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ ( $D_b$ ,  $f_b$  และ  $U_b$ ) เพื่อคำนวณหาค่าการเคลื่อนย้ายผ่านฟิล์มของเหลว ( $K_L$ ) โดยจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

#### 4.2.6 สัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายผ่านฟิล์มของเหลว (Liquid-side Mass Transfer Coefficient, $K_L$ )

รูปที่ 4.26 แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายผ่านฟิล์มของเหลว ( $K_L$ ) ที่อัตราการไหลของอากาศที่แตกต่างกันของยางมิชลิน ยางบริดสโตน และยางพารา โดยใช้อุปกรณ์เจาะรูเดิมอากาศที่แตกต่างกัน 3 ขนาดและทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.1 – 0.9 ลิตรต่อนาที โดยค่าสัมประสิทธิ์  $K_L$  ในการทดลองนี้จะเป็นสัดส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ( $K_{La}$ ) และพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร ( $a$ ) ดังแสดงในสมการ 4.11 (Painmanakul และคณะ, 2005) ดังนั้น กล่าวได้ว่าเราสามารถแยกวิเคราะห์ตัวแปร  $K_{La}$  ซึ่งเป็นผลคูณระหว่างค่า  $a$  และค่า  $K_L$  ออกมาได้ และทำให้เข้าใจกลไกในการเดิมอากาศของอุปกรณ์ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

$$K_L = \frac{K_L a}{a} \quad (4.4)$$



รูปที่ 4.26 สัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายผ่านฟิล์มของเหลวที่อัตราการไหลต่างๆ ของยางมิชลิน

จากรูปที่ 4.26 พบว่าค่า  $K_L$  มีค่า 0.00015 – 0.00048 เมตรต่อวินาที ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซระหว่าง 0.1 - 0.9 ลิตรต่อนาที โดยค่า  $K_L$  ที่วิเคราะห์ได้ในงานวิจัยนี้สอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดลองของงานวิจัยต่างๆ (Painmanakul และคณะ, 2005) รวมไปถึงค่า  $K_L$  ที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการความสัมพันธ์สำหรับการวิเคราะห์การถ่ายเทมวลสารจากฟองอากาศ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่า  $K_L$  พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องกับ 3 ช่วงของค่าอัตราการไหลของอากาศ ดังที่กล่าวถึงจากการศึกษาค่า  $K_L a$  กล่าวคือ

- 1) ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซน้อยกว่า 0.1 ลิตรต่อนาที ซึ่งค่า  $a$  มีค่าต่ำ แต่ค่า  $K_L$  มีค่าสูง แสดงว่าการถ่ายเทออกซิเจนจะถูกควบคุมด้วยค่า  $K_L$  เนื่องจากมีจำนวนฟองอากาศน้อย ดังนั้นการถ่ายเทออกซิเจนผ่านฟิล์มของเหลวรอบฟองอากาศจึงเกิดได้อย่างสมบูรณ์ และมีการด้านการถ่ายเทมวลสารต่ำ
- 2) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.1 – 0.5 ลิตรต่อนาที ค่า  $a$  มีค่าเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับค่า  $K_L a$  แต่ค่า  $K_L$  มีแนวโน้มกระจายตัวโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $4 \times 10^{-4}$  เมตรต่อวินาที และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.0031 แสดงว่าการถ่ายเทออกซิเจนถูกควบคุมด้วยค่า  $a$  เนื่องจากฟองอากาศจำนวนมาก ซึ่งให้ค่าพื้นที่การถ่ายเทออกซิเจนและการกวนผสมสูงด้วย
- 3) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.5 – 0.9 ลิตรต่อนาที ค่า  $a$  มีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่ค่า  $K_L$  มีค่าลดลง เนื่องจากเกิดการรวมตัวและการแตกตัวของฟองอากาศจำนวนมาก รวมไปถึงพลังงานกวน

ผสมที่ก่อให้เกิดความปั่นป่วนในเฟสน้ำ จึงส่งผลให้เกิดการรบกวนฟิล์มน้ำรอบฟองอากาศ และทำให้ค่า  $K_L$  มีค่าลดลง (กชกร และคณะ, 2009)

ดังนั้น ในทางปฏิบัติ แนวทางการเพิ่มค่า  $K_{La}$  เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเติมอากาศด้วยการเพิ่มค่า  $a$  ให้สูงที่สุดนั้น อาจส่งผลเสียต่อการลดลงของค่า  $K_L$  ซึ่งการแปรผกผันซึ่งกันและกันระหว่างทั้ง 2 ตัวแปรนั้น อาจทำให้เราได้ค่า  $K_{La}$  ก่อนข้างคงที่หรือลดลง ในขณะที่ต้องเสียค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่เพิ่มสูงขึ้นโดยไม่จำเป็น โดยค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการประยุกต์ใช้วัสดุยืดหยุ่น 3 ชนิด เป็นอุปกรณ์เติมอากาศชนิดฟองอากาศในด้านลักษณะทางกายภาพ ด้านอุทกพลศาสตร์และการถ่ายเทออกซิเจนของฟองอากาศสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าตัวแปรที่ศึกษาจากการทดลองการศึกษานาอุปกรณ์เจาะรูเติมอากาศและขนาดรูเติมอากาศที่เหมาะสม ที่อัตราการไหลอากาศ 0.5 ลิตรต่อนาที

อุปกรณ์เติมอากาศ		$W_0$		$\Delta P$ (mbar)	$D_B$ (mm.)	$a$ ( $m^{-1}$ )	$K_{La}$ ( $s^{-1}$ )	$K_L$ (m/s)
		K	n					
มิชลิน	เล็ก	0.51	1.20	300	3.977	33.642	0.0123	0.00035
	กลาง	0.52	1.28	280	4.186	31.964	0.0118	0.00033
	ใหญ่	0.52	1.25	260	4.438	28.069	0.0097	0.00030
บริดส โตน	เล็ก	0.57	1.21	300	4.072	32.390	0.0104	0.00300
	กลาง	0.58	1.26	290	4.102	30.007	0.0095	0.00031
	ใหญ่	0.52	1.25	280	4.221	29.550	0.0089	0.00030
พารา	เล็ก	0.62	1.22	330	4.021	29.174	0.0092	0.00032
	กลาง	0.62	1.25	290	4.224	27.231	0.0084	0.00030
	ใหญ่	0.64	1.27	280	4.337	24.946	0.0074	0.00030

จากตาราง 4.3 สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

- ถ้าพิจารณาความยืดหยุ่นของยางทั้ง 3 ชนิด พบว่าค่า K จะแปรผกผันกับความยืดหยุ่น โดยพบว่ายางมิชลินมีความยืดหยุ่นมากที่สุด รองลงมาคือยางบริดส โตน และยางพารา ตามลำดับ โดยปัจจัยดังกล่าวส่งผลต่อค่าความดันลด ( $\Delta P$ ) ที่เกิดขึ้นในการขยายรูเติมอากาศเพื่อสร้างฟองอากาศ
- ค่าความดันลดที่ได้จากอุปกรณ์เจาะรูเติมอากาศขนาดกลางของยางมิชลิน มีค่าค่อนข้างต่ำและมีค่าใกล้เคียงกับที่ได้จากอุปกรณ์ขนาดใหญ่

- ขยายมิชลินที่เจาะรูด้วยอุปกรณ์ขนาดเล็กและขนาดกลางจะให้ฟองอากาศที่ใกล้เคียงกันและมีขนาดเล็ก จึงส่งผลให้ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (a) มีค่ามาก และเป็นปัจจัยสำคัญทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ( $K_L a$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายผ่านฟิล์มของเหลว ( $K_L$ ) พบว่ามีค่าค่อนข้างคงที่ระหว่าง  $3 - 5 \times 10^{-4}$  เมตรต่อวินาที

ดังนั้นในการทดลองนี้ จึงเลือกขยายมิชลินที่เจาะรูด้วยเข็มขนาดกลางเป็นอุปกรณ์เติมอากาศแบบยืดหยุ่นสำหรับการศึกษาในด้านอื่นต่อไป นอกจากนี้ อาจกล่าวได้ว่าการเปรียบเทียบอุปกรณ์เติมอากาศชนิดฟองอากาศ (Diffused-Air Aerator) ในการทดลองกับน้ำสะอาดนั้น เราอาจไม่มีความจำเป็นที่ต้องวัดค่า  $K_L a$  เนื่องจากโดยทั่วไป  $K_L$  มักมีค่าค่อนข้างคงที่คือ  $3 - 5 \times 10^{-4}$  เมตรต่อวินาที ดังนั้น การพิจารณาจากค่า a อย่างเดียวก็อาจเพียงพอสำหรับการเปรียบเทียบการทำงานในขั้นต้น รวมไปถึงช่วยประหยัดเวลาและความยุ่งยากในการวัดค่าสัมประสิทธิ์  $K_L a$  โดยในหัวข้อถัดไป จะเป็นการศึกษาระยะห่างระหว่างรูเติมอากาศที่เหมาะสม โดยใช้ขยายมิชลินที่เจาะรูด้วยเข็มขนาดกลาง 4 รู เพื่อจะดูว่าควรมีระยะห่างเท่าใดที่จะไม่ทำให้เกิดมีการรวมตัวของฟองเกิดขึ้นที่ผิวของตัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่น (Coalescence phenomenon at membrane sparger surface) ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าว อาจส่งผลทำให้ขนาดฟองอากาศ ( $D_B$ ) สูงขึ้น และค่าประสิทธิภาพในการเติมอากาศ (Oxygen Transfer Efficiency, OTE) ที่ลดลง

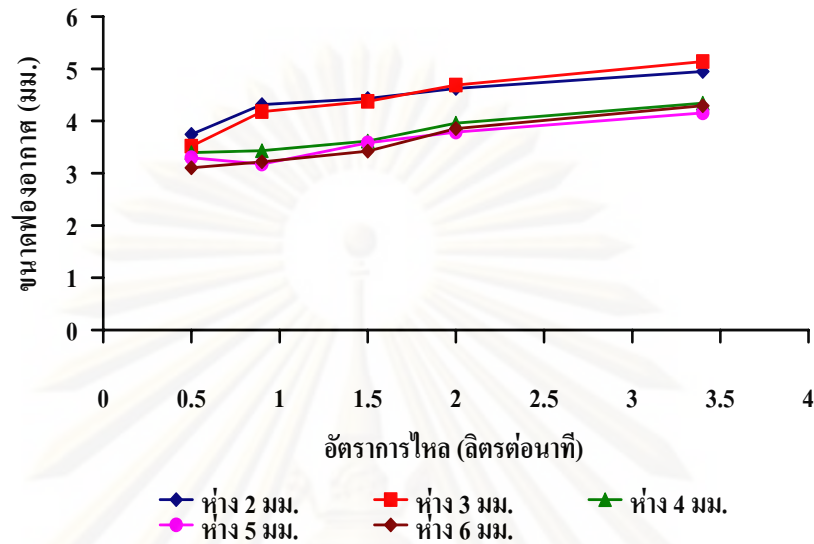
#### 4.3 การศึกษาระยะห่างระหว่างรูเติมอากาศที่เหมาะสม

จากการทดลองในข้อ 4.2 เพื่อศึกษาขนาดอุปกรณ์เจาะรูเติมอากาศและขนาดรูเติมอากาศที่เหมาะสม พบว่าขยายมิชลินที่มีรูเติมอากาศขนาดกลางมีความเหมาะสมมากที่สุดกล่าวคือ มีพื้นที่ผิวสัมผัส (a) และค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจน ( $K_L a$ ) สูง (ค่า  $a = 33.64 \text{ m}^{-1}$  ค่า  $K_L a = 0.0123 \text{ s}^{-1}$ ) และมีความดันลดในการสร้างฟองอากาศ ( $\Delta P$ ) ค่อนข้างต่ำ (280 mbar) โดยการศึกษาในส่วนนี้ จะได้นำมาขยายขนาดดังกล่าวมาเจาะรูเติมอากาศจำนวน 4 รู บริเวณตรงกลางของยางในแนวเส้นตรงและมีระยะห่างระหว่างรูเติมอากาศที่แตกต่างกันคือ 2, 3, 4, 5 และ 6 มิลลิเมตร ตามลำดับ

##### 4.3.1 การศึกษาขนาดฟองอากาศ ( $D_B$ )

รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟองอากาศ ( $D_B$ ) และอัตราการไหลอากาศ ( $Q_g$ ) ของขยายมิชลินที่เจาะรูเติมอากาศด้วยอุปกรณ์ขนาดกลาง และทำการทดลองที่อัตราการไหลของอากาศ 0.5 – 3.4 ลิตรต่อนาที ทั้งนี้ ค่า  $Q_g$  ที่ศึกษาในส่วนนี้มีค่าประมาณ 4 เท่าของค่า  $Q_g$

สำหรับ 1 รูเดิมอากาศ เพื่อช่วยให้เกิดการกระจายตัวของฟองอากาศที่เท่ากันสำหรับทุกรูเดิมอากาศ (Uniform bubble generation form diffuser orifice)

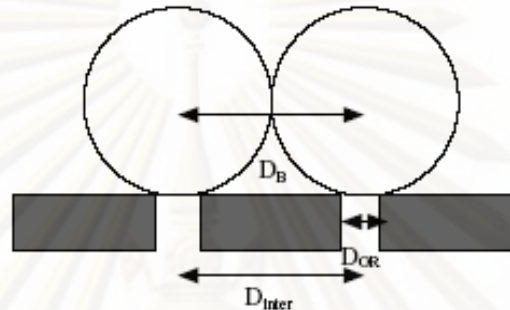


รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟองอากาศกับอัตราการไหลอากาศที่ระยะห่างต่างๆ

จากรูปที่ 4.27 พบว่าขนาดฟองอากาศที่ระยะห่างระหว่างรูเดิมอากาศเท่ากับ 4 5 และ 6 มิลลิเมตร มีขนาดใกล้เคียงกัน (3.104 – 4.344 มิลลิเมตร) และมีขนาดใกล้เคียงกับการศึกษาด้วย 1 รูเดิมอากาศ (รูปที่ 4.11) ส่วนขนาดฟองอากาศที่ระยะห่าง 2 และ 3 มิลลิเมตรมีค่าระหว่าง 3.618 – 5.136 มิลลิเมตร โดยมีขนาดใหญ่กว่าขนาดฟองอากาศที่ระยะห่าง 4 - 6 มิลลิเมตรและมีขนาดฟองอากาศใหญ่กว่าที่ 1 รู โดยอาจมีสาเหตุมาจากการชนกันและรวมกันของฟองอากาศเกิดบริเวณผิวหน้าของอุปกรณ์เดิมอากาศที่เรียงตัวอยู่ใกล้กัน (Painmanakul และคณะ, 2005) นอกจากนี้ขนาดฟองอากาศที่เกิดจากปรากฏการณ์ดังกล่าวยังมีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของอากาศ ( $Q_g$ ) กล่าวคือเมื่อค่า  $Q_g$  เพิ่มขึ้นจะพบว่าความแตกต่างของฟองอากาศหรือผลกระทบจากการรวมตัวของฟองอากาศที่ผิวหน้าของอุปกรณ์เดิมอากาศเพิ่มสูงขึ้น โดยพบว่าที่อัตราการเดิมอากาศที่ 0.5 ลิตรต่อ นาที ขนาดฟองอากาศของทุกรูเดิมอากาศมีค่าใกล้เคียงกัน (ประมาณ 3.5 มม.) และเริ่มแตกต่างกันอย่างชัดเจนเมื่อค่าอัตราการเดิมอากาศสูงขึ้น

ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาระยะห่างระหว่างรูเดิมอากาศค่าที่สุดที่ไม่ส่งผลเสียต่อการรวมตัวของฟองอากาศ พบว่ามีค่าประมาณ 4 มม. โดยที่ค่าดังกล่าวสัมพันธ์กับขนาดฟองอากาศเฉลี่ยที่เกิดขึ้น (ประมาณ 4 มม.) ดังนั้นอาจกล่าวโดยสรุปได้ว่า ในการเจาะรูเดิมอากาศควรเจาะให้มีระยะห่างระหว่างรูเดิมอากาศมากกว่าหรือเท่ากับขนาดฟองอากาศ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการรวมกันของฟองอากาศ เนื่องจากถ้าปล่อยให้มีการรวมกันของฟองอากาศเกิดขึ้น จะส่งผลให้ขนาดฟองอากาศ ( $D_B$ ) ที่ได้ใหญ่ขึ้น ซึ่งส่งผลเสียต่อการลดลงของค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ ( $a$ ) ที่แปรผกผันกับขนาด

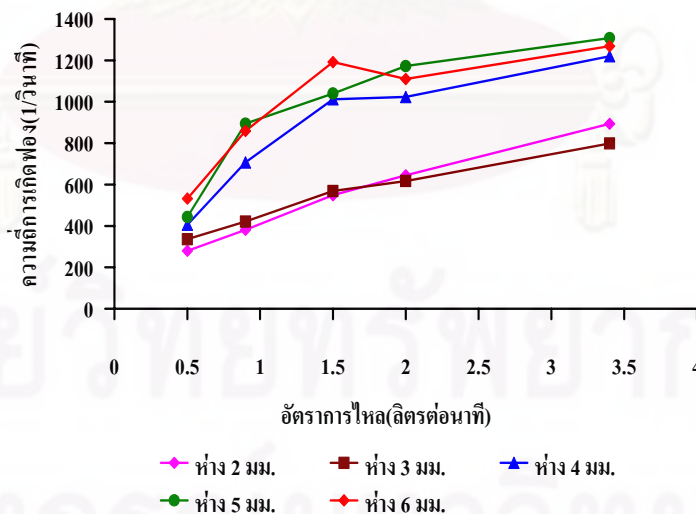
ฟองอากาศ และประสิทธิภาพในการเติมอากาศลดลงดังที่กล่าวไว้ข้างต้น (Painmanakul และคณะ, 2004) ซึ่งพบว่า ในการที่จะเจาะรูเติมอากาศให้มีระยะห่างที่เหมาะสม เพื่อป้องกันการรวมกันของ ฟองอากาศ ควรพิจารณาถึงขนาดฟองอากาศเป็นสำคัญ ดังรูป 4.28 โดยในอนาคต อาจมีความ เป็นไปได้ที่จะสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง ขนาดฟองอากาศ ( $D_B$ ) และอุปกรณ์เจาะรูเติมอากาศ ซึ่ง สัมพันธ์ต่อขนาดรูเติมอากาศ ( $D_{OR}$ ) และระยะห่างระหว่างรู ( $D_{inter}$ ) เพื่อใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ แบบยึดหยุ่นต่อไป



รูปที่ 4.28 การเจาะรูเติมอากาศให้มีระยะห่างระหว่างรูเติมอากาศที่เหมาะสม

#### 4.3.2 ความถี่ในการเกิดฟองอากาศ (Bubble formation frequency, $f_B$ )

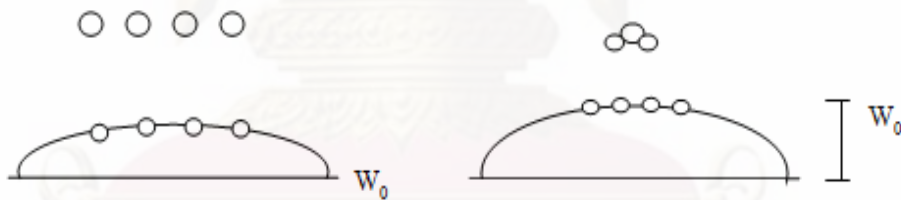
รูปที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ในการเกิดฟองอากาศ ( $f_B$ ) กับอัตราการไหล อากาศ ( $Q_g$ ) ที่ระยะห่างระหว่างรูเติมอากาศที่แตกต่างกัน (2, 3, 4, 5 และ 6 มิลลิเมตร) โดยใช้เข็ม ขนาดกลางเจาะรูเติมอากาศ ซึ่งทำการทดลองที่อัตราการไหลของอากาศ 0.5 – 3.4 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.29 ความถี่ในการเกิดฟองอากาศกับอัตราการไหลอากาศที่ระยะห่างรูเติมอากาศต่างๆ



ดังแสดงในรูป 4.29 เมื่อพิจารณาผลกระทบจากระยะห่างระหว่างรูเดิมอากาศที่ 4 5 และ 6 มม พบว่าความถี่ในการเกิดฟองอากาศ ( $f_B$ ) มีค่าระหว่าง 406.366 - 1,507.657 ต่อวินาที ในขณะที่ระยะห่างระหว่างรูเดิมอากาศที่ 2 และ 3 มม ให้ค่าความถี่ในการเกิดฟองอากาศมีค่าระหว่าง 280.420 - 893.930 ต่อวินาที (ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซระหว่าง 0.5 - 3.4 ลิตรต่อนาที) ซึ่งผลดังกล่าวสัมพันธ์กับระยะห่างระหว่างรูเดิมอากาศน้อยกว่าขนาดฟองอากาศและทำให้เกิดการรวมกันของฟองอากาศบริเวณผิวหน้าของอุปกรณ์เดิมอากาศ จึงส่งผลให้ขนาดของฟองอากาศมีขนาดใหญ่ นอกจากนี้ เนื่องจากค่า  $f_B$  มีความสัมพันธ์กับค่า  $Q_g$  และปริมาตรของฟองอากาศ ( $V_B$ ) ดังนั้นจะพบว่าความถี่ในการเกิดฟองจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามอัตราการไหลของอากาศ จนถึงอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 1.5 ลิตรต่อนาที ซึ่งอธิบายได้ว่าที่ค่า  $Q_g$  ต่ำๆ นั้นจะได้ค่าความยืดหยุ่นของอุปกรณ์เดิมอากาศที่เพิ่มขึ้นน้อย จึงทำให้ขนาดรูเดิมอากาศไม่เปลี่ยนแปลง (เหมือนรูเดิมอากาศแบบแข็ง) และส่งผลให้ได้ขนาดฟองอากาศที่ค่อนข้างคงที่ เมื่อทำการคำนวณค่า  $f_B$  จึงได้ค่าที่เพิ่มสูงขึ้นในลักษณะเส้นตรง แต่ที่อัตราการไหลของอากาศเพิ่มสูงขึ้น (1.5 - 3.4 ลิตรต่อนาที) พบว่าค่า  $f_B$  ที่ได้มีค่าค่อนข้างเริ่มคงที่หรือเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวสัมพันธ์กับการที่ฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้นที่อัตราการไหลของก๊าซเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากทั้งการขยายตัวของรูเดิมอากาศและการรวมตัวของฟองอากาศภายในระบบทดลอง ซึ่งส่งผลทำให้จำนวนฟองที่เกิดขึ้นต่อเวลาหรือความถี่ในการเกิดฟองอากาศ ( $f_B$ ) นั้นมีค่าลดลงหรือค่อนข้างคงที่ ตามสมการที่ 2.32



ระยะห่างมากกว่าขนาดฟองอากาศ

ระยะห่างน้อยกว่าขนาดฟองอากาศ

รูปที่ 4.30 การเกิดฟองอากาศจากการเจาะรูเดิมอากาศที่มีระยะห่างมากและน้อยกว่าขนาดฟองอากาศ

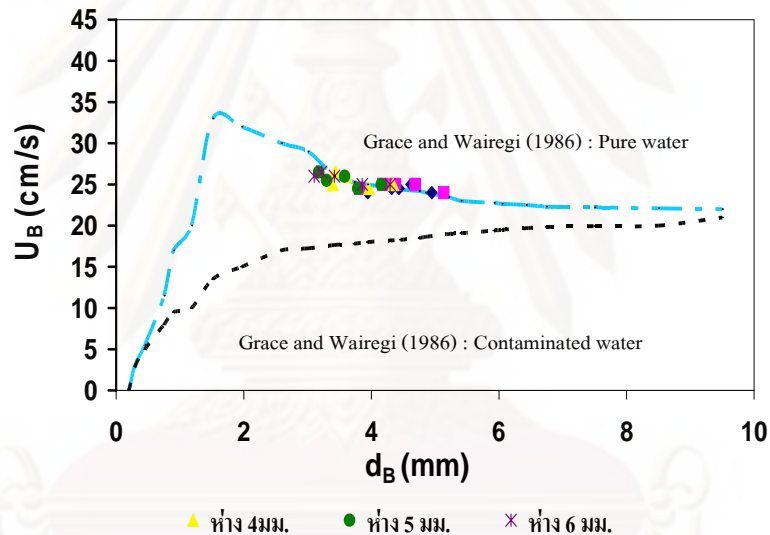
นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาค่า  $f_B$  ในกรณีระยะห่างรูเดิมอากาศเท่ากับ 2 และ 3 มม. พบว่ามีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อค่า  $Q_g$  สูงขึ้นตลอดช่วงที่ทำการทดลอง โดยอาจกล่าวได้ว่าการเจาะรูเดิมอากาศที่มีระยะห่างแตกต่างกันนั้น สามารถส่งผลต่อการขยายตัวของแผ่นยาง ( $W_0$ ) รวมไปถึงค่าขนาดรูเดิมอากาศ ( $D_{OR}$ ) และขนาดของฟองอากาศ ( $D_B$ ) ที่เกิดขึ้นในที่สุด โดยการเจาะรูที่มีระยะห่างใกล้ๆ กันนั้น ทำให้ค่า  $W_0$  มีค่ามากกว่าที่ได้จากการเจาะรูที่มีระยะห่างมากกว่า (4 - 6 มม.) และน่าจะเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ค่าขนาดฟองอากาศมีขนาดใหญ่และค่อนข้างคงที่สำหรับทุกค่าอัตราการไหลของอากาศที่ทำการทดลอง (จากการรวมตัวของฟองอากาศ) ดังนั้นจึงส่งผลต่อค่า  $f_B$  ที่เพิ่มขึ้นเมื่อค่า  $Q_g$

สูงขึ้น โดยผลที่คาดว่าจะเกิดขึ้นจากการศึกษาทั้ง 2 กรณี คือ ที่ระยะห่าง 2-3 มม. และที่ 4-6 มม. สามารถสรุปได้ดังรูป 4.30

โดยสรุป ระยะห่างระหว่างรูเดิมอากาศที่เลือกใช้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการออกแบบ อุปกรณ์เดิมอากาศชนิดฟองอากาศจากวัสดุยืดหยุ่น โดยสามารถส่งผลกระทบต่อทั้งค่าความยืดหยุ่นที่จุดศูนย์กลาง ( $W_0$ ) ขนาดรูเดิมอากาศ ( $D_{OR}$ ) ขนาดฟองอากาศ ( $D_B$ ) ความถี่ในการเกิดฟองอากาศ ( $f_B$ ) พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ ( $a$ ) และประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน (OTE) จากอุปกรณ์เดิมอากาศ

#### 4.3.3 ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (Bubble rising velocity, $U_B$ )

รูปที่ 4.31 แสดงความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ ( $U_B$ ) กับขนาดฟองอากาศ ( $D_B$ ) ของยางมิชลินที่ระยะห่างของรูเดิมอากาศแตกต่างกัน (2, 3, 4, 5 และ 6 มิลลิเมตร) โดยใช้อุปกรณ์เจาะรูเดิมอากาศขนาดกลางและทำการทดลองที่อัตราการไหลของอากาศ 0.5 – 3.4 ลิตรต่อนาที

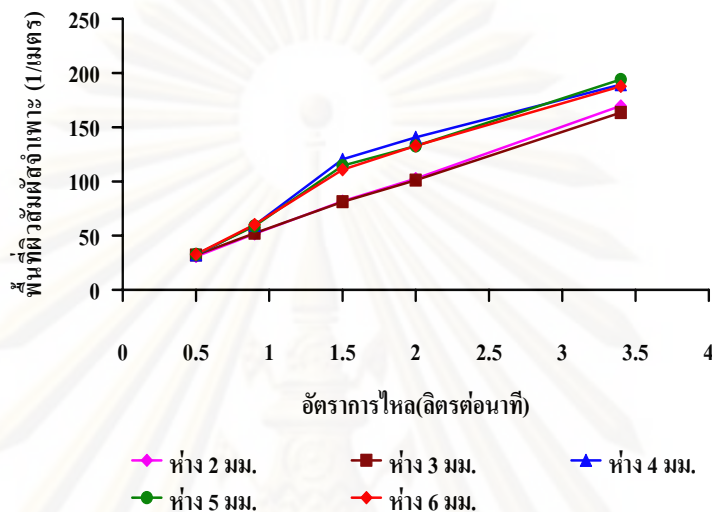


รูปที่ 4.31 ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศกับขนาดฟองอากาศที่ระยะห่างต่างๆ

จากรูปที่ 4.31 พบว่าความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศมีค่าระหว่าง 25 - 29 เซนติเมตรต่อวินาที โดยค่า  $U_B$  จะขึ้นอยู่กับขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้นจากการสร้างฟองของ อุปกรณ์เดิมอากาศชนิดต่างๆ ดังนั้นจึงส่งผลกระทบต่อข้อข้างน้อยต่อค่าเวลาการกักฟองอากาศ (Bubble detention time,  $t_{DB}$ ) ภายในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศหรือกระบวนการเดิมอากาศในรูป ฟองอากาศ โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวแตกต่างจากผลการทดลองของขนาดฟองอากาศ ( $D_B$ ) และ ความถี่ในการเกิดฟอง ( $f_B$ ) ดังที่กล่าวถึงข้างต้น นอกจากนี้ พบว่าค่า  $U_B$  ที่ได้สอดคล้องกับผล การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $U_B$  และค่า  $D_B$  ในสภาวะการทำงานต่างๆ ของ Grace and Wairegi (1996) ในกรณีที่เฟสของเหลวไม่มีการปนเปื้อน (Pure water) เนื่องจากน้ำประปาได้ถูก เลื่อนนำมาใช้เป็นเฟสน้ำในการทดลองนี้

#### 4.3.4 พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (Interfacial area, $a$ )

รูปที่ 4.32 แสดงพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร ( $a$ ) กับอัตราการไหลอากาศ ( $Q_g$ ) ของยางมิซลินที่มีระยะห่างระหว่างรูเดิมอากาศต่างๆ โดยใช้อุปกรณ์เจาะรูเดิมอากาศขนาดกลางและทำการทดลองที่อัตราการไหลของอากาศในช่วง 0.5 – 3.4 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะกับอัตราการไหลของอากาศ

จากรูปที่ 4.32 พบว่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร ( $a$ ) ที่ระยะห่างระหว่างรูเดิมอากาศที่ 4.5 และ 6 มม. มีค่าใกล้เคียงกัน (ระหว่าง 32.3143 – 193.9187 ต่อเมตร) ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซระหว่าง 0.5 - 3.4 ลิตรต่อนาที ในขณะที่ระยะห่าง 2 และ 3 มม. พบว่ามีค่า  $a$  ที่ต่ำกว่า (อยู่ระหว่าง 30.8401 – 169.7001 ต่อเมตร) ทั้งนี้จากการที่ค่า  $a$  แปรผกผันกับค่า  $D_b$  ดังที่กล่าวถึงในขั้นต้น ดังนั้น การที่ระยะห่าง 4, 5 และ 6 มม. ให้ขนาดฟองอากาศที่เล็กกว่าที่ระยะห่าง 2 และ 3 มม. จึงส่งผลให้เกิดความแตกต่างระหว่างค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะประมาณร้อยละ 10 นอกจากนี้ ยังพบว่าค่า  $a$  ที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะของสมการเส้นตรง (Linear equation) โดยมีค่ามากและน้อยที่สุดที่อัตราการไหลของก๊าซ 3.4 และ 0.5 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

ในกรณีศึกษาที่ระยะห่างระหว่างรูเดิมอากาศที่ 4 - 6 มม. พบว่าค่าความชันของการเพิ่มขึ้นของค่า  $a$  เริ่มลดลงที่อัตราการไหลของก๊าซมากกว่า 1.5 ลิตรต่อนาที โดยช่วงของค่า  $Q_g$  ดังกล่าวสอดคล้องกับค่าความถี่ในการเกิดฟองอากาศซึ่งมีค่าลดลงจนกระทั่งคงที่เมื่ออัตราการไหลของก๊าซสูงขึ้น (รูปที่ 4.29) ในขณะที่ในกรณีระยะห่างที่ 2 - 3 มม. พบว่าค่า  $a$  มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามอัตราการไหลอากาศ ( $Q_g$ ) ตลอดช่วงการทดลอง โดยผลที่ได้สัมพันธ์กับแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าความถี่ในการเกิดฟองอากาศ (รูปที่ 4.29) อย่างไรก็ตาม ด้วยข้อเสียด้านฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่ นั้น จึงส่งผลเสียต่อค่าพื้นที่ผิวสัมผัส ( $a$ ) ที่คำนวณได้

ดังนั้น การเจาะรูเดิมอากาศให้มีระยะห่างที่เหมาะสม (มากกว่าขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้น) รวมไปถึงเลือกเดินระบบเดิมอากาศที่อัตราการไหลของก๊าซที่สูงเกินไปจนทำให้เกิดผลเสียจากการชนและรวมตัวจนทำให้ได้ฟองอากาศขนาดใหญ่ จึงเป็นประเด็นสำคัญที่ควรหลีกเลี่ยงในการออกแบบและประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์เดิมอากาศแบบฟองอากาศที่ทำจากวัสดุยืดหยุ่น โดยค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาผลกระทบจากระยะห่างระหว่างรูเดิมอากาศในด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ และพื้นที่ผิวสัมผัสในการถ่ายเทมวลสาร ( $a$ ) สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.4 ในกรณีนี้ ค่า  $a$  ถูกประยุกต์ใช้เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนจากฟองอากาศแทนที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ( $K_L a$ ) เนื่องจากโดยทั่วไป  $K_L$  มักมีค่าค่อนข้างคงที่ คือ  $3 - 5 \times 10^{-4}$  เมตรต่อวินาที ดังนั้น การพิจารณาจากค่า  $a$  อย่างเดียวก็อาจเพียงพอสำหรับการเปรียบเทียบการทำงานในขั้นต้น รวมไปถึงช่วยประหยัดเวลาและความยุ่งยากในการวัดค่าสัมประสิทธิ์  $K_L a$

ตาราง 4.4 แสดงค่าตัวแปรที่ศึกษาจากการทดลองการศึกษาระยะห่างระหว่างรูเดิมอากาศ

จำนวนรู	ระยะห่างระหว่างรูเดิมอากาศ	$D_B$ (มม.)	$f_B$ (ต่อวินาที)	$a$ (ต่อเมตร)
1 รู	-	3.062	390.5665	50.9635
4 รู	2 มม.	3.843	893.9296	169.7001
	3 มม.	3.618	798.8293	163.4553
	4 มม.	3.396	1,320.26	189.3125
	5 มม.	3.298	1,507.657	193.3187
	6 มม.	3.104	1,367.875	187.3102

จากตาราง 4.4 สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

- ยางมิชลินที่มีรูเดิมอากาศขนาดกลางและมีระยะห่างระหว่างรู 4 - 6 มม. ให้ขนาดฟองอากาศที่มีขนาดใกล้เคียงกันและมีขนาดเล็กกว่าค่าที่ได้จากระยะห่าง 2 - 3 มม. ดังนั้น จึงส่งผลต่อค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร ( $a$ ) ที่ได้
- เมื่อพิจารณาขนาดฟองอากาศที่ 1 รู และ 4 รู พบว่า ขนาดฟองอากาศที่ 4 รู มีขนาดใหญ่กว่า 1 รู เนื่องจากเกิดปรากฏการณ์รวมตัวของฟองอากาศภายในถังปฏิกิริยา แต่จำนวนฟองที่เกิดในกรณี 4 รูที่สูงกว่า 1 รู จึงส่งผลให้มีค่าความถี่ในการเกิดฟองอากาศ ( $f_B$ ) และพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร ( $a$ ) มีค่ามากกว่า

- ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ( $K_{La}$ ) และประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจน (OTE) จึงแปรตรงกับจำนวนรูเติมอากาศและระยะห่างระหว่างรูเติมอากาศที่เหมาะสม

โดยสรุปในการทดลองนี้ เราจึงเลือกขางมิชลินที่เจาะรูเติมอากาศด้วยอุปกรณ์ขนาดกลาง โดยมีระยะห่างระหว่างรูเติมอากาศเท่ากับ 4 มม. เพื่อเป็นอุปกรณ์เติมอากาศแบบยืดหยุ่น โดยจะได้ทำการศึกษาเพื่อออกแบบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจน ในหัวข้อต่อไป

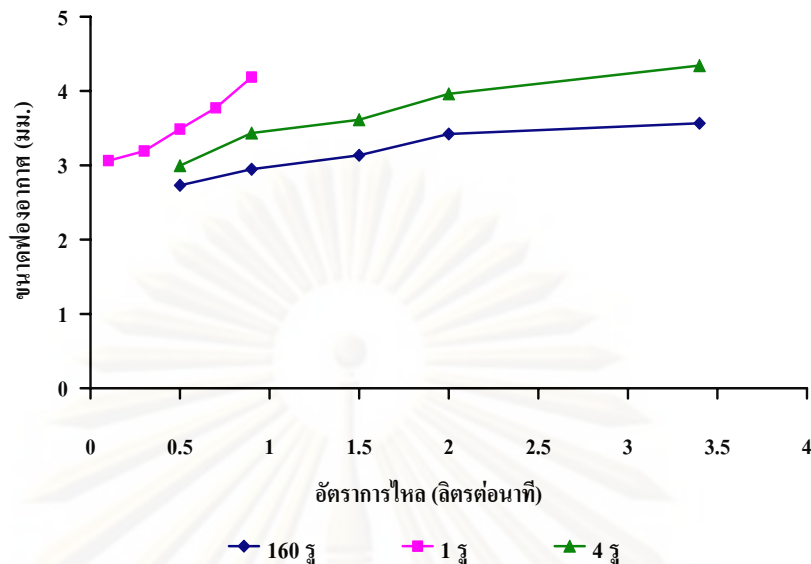
#### 4.4 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของอุปกรณ์เติมอากาศแบบยืดหยุ่น

จากการทดลองในข้อ 4.1 – 4.3 กล่าวได้ว่า ขางมิชลินที่มีการเจาะรูเติมอากาศด้วยอุปกรณ์เจาะขนาดกลาง (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.120 ซม.) โดยมีระยะห่างระหว่างรูเติมอากาศ 4 มม. มีความเหมาะสมมากที่สุดในการประยุกต์ใช้เพื่อเสนอแนวทางการออกแบบอุปกรณ์เติมอากาศแบบยืดหยุ่นจากขางชนิดดังกล่าว รวมไปถึงวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจน และเปรียบเทียบกับอุปกรณ์เติมอากาศที่มีขายอยู่ตามท้องตลาด โดยได้ทำการเจาะรูเติมอากาศให้เต็มพื้นที่ของขางมิชลินด้วยระยะห่าง 4 มม. ซึ่งสอดคล้องกับจำนวนรูเติมอากาศเท่ากับ 160 รู ซึ่งจะเป็นอุปกรณ์ที่จะนำมาศึกษาในด้านอุทกพลศาสตร์และการถ่ายเทออกซิเจนของฟองอากาศ รวมไปถึงการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน (OTE) ต่อไป

##### 4.4.1 การศึกษาขนาดฟองอากาศ ( $D_B$ )

รูปที่ 4.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟองอากาศ ( $D_B$ ) กับอัตราการไหลอากาศ ( $Q_g$ ) ของขางมิชลินที่เจาะรูเติมอากาศด้วยอุปกรณ์เจาะขนาดกลางจำนวน 160 รู และทำการทดลองที่อัตราการไหลของอากาศ 0.5 – 3.4 ลิตรต่อวินาที โดยผลการทดลองที่ได้จะทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากจำนวนรูเติมอากาศ 1 และ 4 รู ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



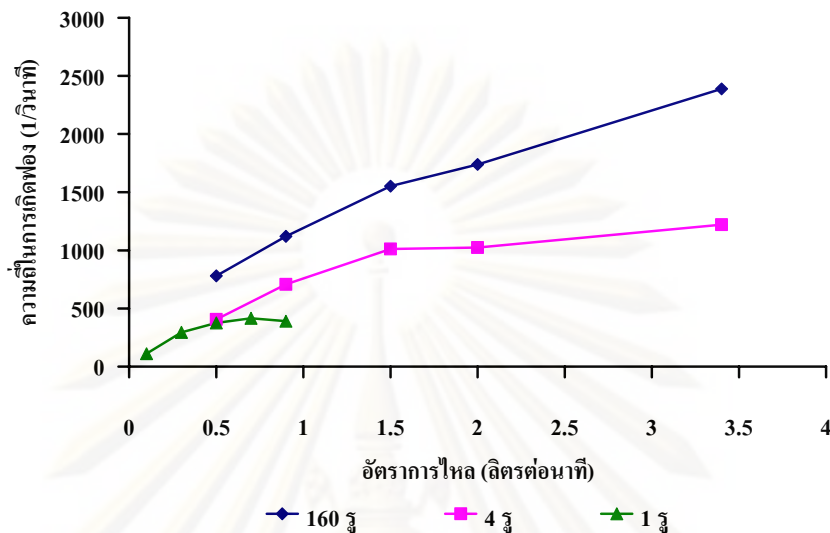
รูปที่ 4.33 ขนาดฟองอากาศที่จำนวนรูเดิมอากาศ 1, 4 และ 160 รูกับอัตราการไหลอากาศ

จากรูป 4.33 พบว่าขนาดฟองอากาศที่มีการเจาะรูเดิมอากาศระยะห่าง 4 มม. จนเต็มพื้นที่แผ่นยาง (จำนวน 160 รู) มีค่าระหว่าง 2.732 – 3.565 มิลลิเมตร ในช่วงอัตราการไหลอากาศระหว่าง 0.5 - 3.4 ลิตรต่อนาที โดยค่า  $D_B$  ที่ได้มีค่าค่อนข้างคงที่ (ประมาณ 2.8 มม.) และมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับค่า  $D_B$  ที่ได้จากอุปกรณ์เดิมอากาศชนิด 1 และ 4 รูเดิมอากาศ โดยสัมพันธ์กับการที่อัตราการไหลอากาศที่ผ่าน 1 รู ( $q$ ) ที่มีค่าต่ำมากๆ เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จาก 1 และ 4 รู ทำให้ค่าความยืดหยุ่น ( $W_p$ ) มีค่าต่ำที่สุดและส่งผลให้ขนาดรูเดิมอากาศ ( $D_{OR}$ ) ที่ขยายตัวมีขนาดเล็กตามไปด้วย ดังนั้น ขนาดฟองอากาศที่ได้จึงมีขนาดเล็กที่สุด นอกจากนี้ อาจกล่าวได้ว่าค่า  $q$  ที่ต่ำมากๆ (ในช่วงอัตราการไหลที่เราศึกษา) ดังนั้น แผ่นยางที่เราใช้ในการสร้างฟองอากาศนั้น จึงมีลักษณะคล้ายกับอุปกรณ์ที่มีรูเดิมอากาศแบบแข็ง (Rigid orifice) ซึ่งจะให้ค่าขนาดฟองอากาศที่ค่อนข้างคงที่และขึ้นกับขนาดรูเดิมอากาศที่เลือกใช้เป็นหลัก ดังกล่าวถึงข้างต้นในสมการของ Tate (สมการ 4.4) อย่างไรก็ตาม ถ้าค่าอัตราการไหลของอากาศที่ใช้มีค่าสูงขึ้น ลักษณะของค่าขนาดฟองอากาศที่ได้ อาจมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะการไหลหรือพลังงานการกวนผสม ซึ่งส่งผลต่อการชนและการรวมตัวของฟองอากาศต่อไป โดยที่ปรากฏการณ์ดังกล่าว อาจยังส่งผลกระทบต่อสภาพการทดลองที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้

#### 4.4.2 ความถี่ในการเกิดฟองอากาศ (Bubble formation frequency, $f_b$ )

รูปที่ 4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ในการเกิดฟองอากาศ ( $f_b$ ) กับอัตราการไหลอากาศ ( $Q_g$ ) ของยางมิชลินที่เจาะรูด้วยอุปกรณ์ขนาดกลางจำนวน 160 รูและทำการทดลองที่อัตรา

การไหลของอากาศ 0.5 – 3.4 ลิตรต่อวินาที โดยผลการทดลองที่ได้จะทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากจำนวนรูเติมอากาศ 1 และ 4 รู ตามลำดับ



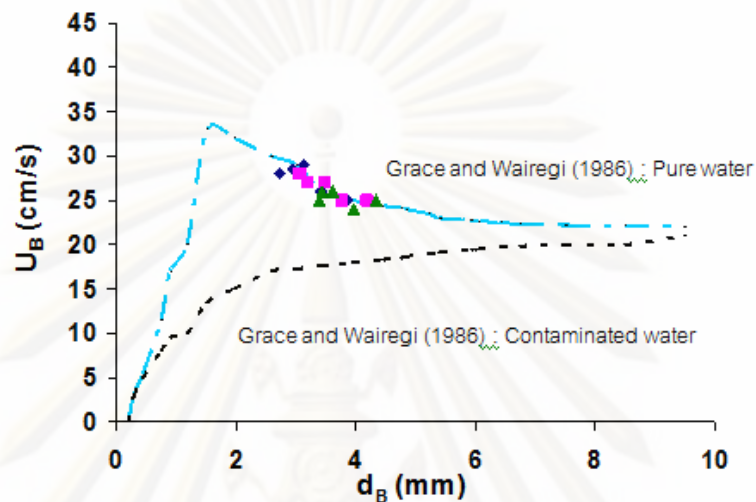
รูปที่ 4.34 ความถี่ในการเกิดฟองอากาศที่จำนวนรูเติมอากาศเท่ากับ 1 4 และ 160 รู กับอัตราการไหลอากาศต่างๆ

จากรูป 4.34 พบว่าแผ่นยางมิชลินที่เจาะรูเติมอากาศที่ระยะห่าง 4 มม. (จำนวน 160 รู) ให้ค่าความถี่ในการเกิดฟองอากาศมีค่าระหว่าง 780.5092 – 2,388.639 ต่อวินาทีในช่วงอัตราการไหลของก๊าซระหว่าง 0.5 - 3.4 ลิตรต่อวินาที โดยค่า  $f_b$  ที่ได้มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากกรณี 1 และ 4 รูอย่างชัดเจน โดยค่า  $f_b$  สูงกว่าร้อยละ 22 เนื่องจากการที่อัตราการไหลอากาศต่อ 1 รูของ 160 รู ต่ำมาก ทำให้ได้ขนาดฟองอากาศเล็กและส่งผลกระทบต่อรวมตัวของฟองอากาศน้อยกว่าแบบ 4 รู นอกจากนี้ ปรัชการณณ์ดังกล่าวอาจสัมพันธ์กับทฤษฎีเกี่ยวกับผิวสัมผัสของฟองอากาศที่ว่า ฟองอากาศเล็กๆ จะมีผิวสัมผัสที่แข็งกว่าฟองอากาศขนาดใหญ่ (More Rigid bubble surface) ทำให้ค่า  $f_b$  ของอุปกรณ์ที่มีรูเติมอากาศ 160 รูที่คำนวณได้จากสมการ 4.5 มีลักษณะเหมือนกับอุปกรณ์เติมอากาศแบบแข็ง โดยค่าความถี่ในการเกิดฟองที่สูงขึ้นตามค่าอัตราการไหลของอากาศในลักษณะเส้นตรง (Loubiere และคณะ, 2003)

ทั้งนี้ จะเห็นได้ว่าระหว่างอุปกรณ์เติมอากาศที่มีการเจาะรูเติมอากาศ 4 และ 160 รู และมีการเดินระบบด้วยค่า  $Q_g$  ในช่วงเดียวกันนั้น ส่งผลต่อค่า  $f_b$  และแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าดังกล่าวที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ดังนั้น กล่าวได้ว่า การควบคุมค่าอัตราการไหลอากาศต่อรูเติมอากาศ ( $q$ ) ให้มีค่าต่ำนั้น พบว่าส่งผลดีต่อทั้งขนาดฟองอากาศ ความถี่ในการเกิดฟองอากาศ รวมไปถึงประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนในที่สุด

#### 4.4.3 ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (Bubble rising velocity, $U_B$ )

รูปที่ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ ( $U_B$ ) กับอัตราการไหลของอากาศ ( $Q_g$ ) ของยางมิชลินที่เจาะรูเดิมอากาศด้วยอุปกรณ์ขนาดกลางจำนวน 160 รูและทำการทดลองที่อัตราการไหลของอากาศ 0.5 – 3.4 ลิตรต่อนาที



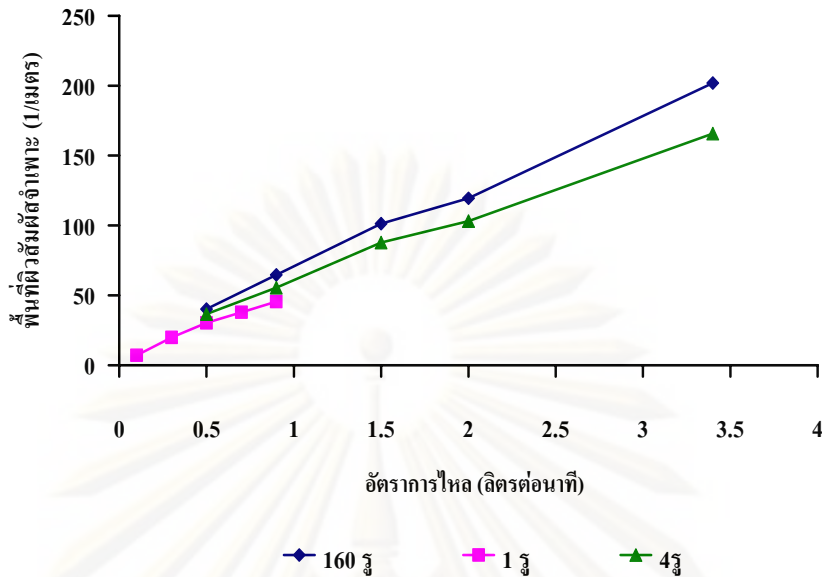
รูปที่ 4.35 ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศที่เกิดจากอุปกรณ์เดิมอากาศที่มีรูเดิมอากาศจำนวน 14 และ 160 รูที่อัตราการไหลของก๊าซต่างๆ

จากรูปที่ 4.35 พบว่าความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศมีค่าค่อนข้างคงที่ (25 - 30 เซนติเมตรต่อวินาที) และมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากกรณี 1 และ 4 รูเดิมอากาศ ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่าค่า  $U_B$  ขึ้นอยู่กับขนาดฟองอากาศ ( $D_B$ ) และลักษณะของเฟสน้ำที่เกี่ยวข้อง (liquid phase characteristics) เท่านั้น โดยพลังงานที่เกิดขึ้นจากจำนวนฟองอากาศที่เพิ่มขึ้นภายในถังปฏิกริยานั้นไม่ได้ส่งผลต่อค่าความเร็ว  $U_B$  รวมไปถึงค่าเวลากักของฟองอากาศ ( $T_B$ ) ภายในถังปฏิกริยานอกจากนี้ ค่า  $U_B$  ที่ได้สอดคล้องกับผลการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $U_B$  และค่า  $D_B$  ในสภาวะการทำงานต่างๆ ของ Grace and Wairegi (1996) ในกรณีที่เฟสของเหลวไม่มีการปนเปื้อน (Pure water) เหมือนกับการศึกษาในหัวข้อที่ผ่านมา

#### 4.4.4 พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (Interfacial area, $a$ )

รูปที่ 4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร ( $a$ ) กับอัตราการไหลของอากาศ ( $Q_g$ ) ของยางมิชลินที่เจาะรูด้วยอุปกรณ์ขนาดกลางจำนวน 160 รูและทำการทดลองที่อัตราการไหลของอากาศ 0.5 – 3.4 ลิตรต่อนาที โดยผลการทดลองที่ได้จะทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากจำนวนรูเดิมอากาศ 1 และ 4 รู ตามลำดับ





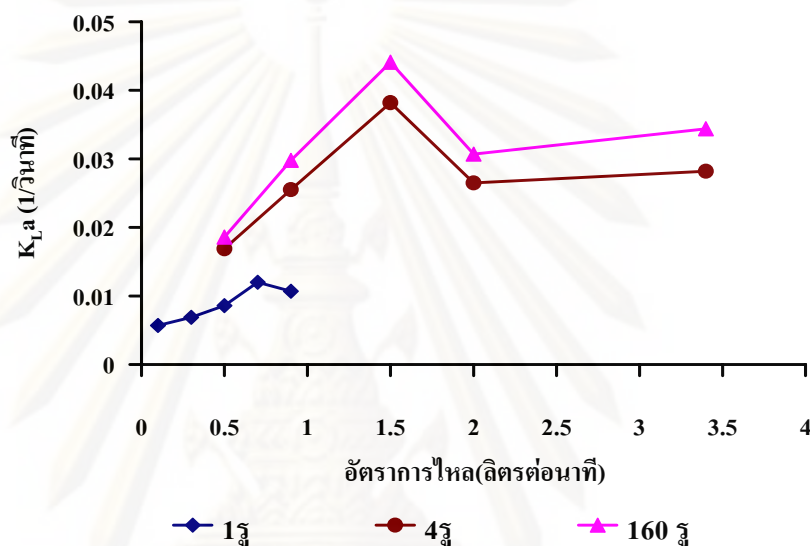
รูปที่ 4.36 พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสารที่จำนวนรูเดิมอากาศเท่ากับ 1 4 และ 160 รู กับอัตราการใช้เลนส์อากาศต่างๆ

จากรูปที่ 4.36 พบว่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (a) ของยางมิชลินที่เจาะ 160 รูมีค่าอยู่ระหว่าง 40.168 – 201.845 ต่อเมตรในช่วงอัตราการใช้เลนส์ของก๊าซระหว่าง 0.5 - 3.4 ลิตรต่อนาที โดยค่า a ที่ได้จาก 160 รูเดิมอากาศมีค่ามากกว่า 1 และ 4 รูเดิมอากาศ นอกจากนี้ที่ค่า  $Q_g$  ต่ำๆ พบว่าค่า a ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับ 4 รูเดิมอากาศ เนื่องจากอัตราการใช้เลนส์อากาศต่อจำนวนรู (q) ที่มีค่าต่ำนั้น จะส่งผลต่อค่าความถี่ในการเกิดฟองอากาศแต่ละรูเดิมอากาศและจำนวนฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีจำนวนน้อยลงด้วย ดังนั้นค่า a ที่ได้จึงมีค่าต่ำและใกล้เคียงกันระหว่าง 4 และ 160 รูเดิมอากาศเสมือนว่าค่า a ในช่วงอัตราการใช้เลนส์ต่างๆนี้ถูกคุมด้วยปริมาณอากาศที่เข้ารูอุปกรณ์เดิมอากาศ โดยผลที่ได้รับนี้สอดคล้องกับสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าดังกล่าว (สมการ 4.8) ซึ่งขึ้นกับตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่  $Q_g$ ,  $D_b$ ,  $U_b$  และ  $f_b$  เป็นหลัก ทั้งนี้ เมื่อค่า  $Q_g$  เพิ่มสูงขึ้น เราพบว่าแนวโน้มค่า a ในกรณี 4 รูเดิมอากาศนั้น เริ่มมีการลดลงของค่าความชันจากความสัมพันธ์  $a = f(Q_g)$  เนื่องมาจากค่า  $f_b$  ดังที่กล่าวถึงข้างต้น ในขณะที่แนวโน้มดังกล่าวไม่เกิดขึ้นสำหรับกรณี 160 รูเดิมอากาศ

ดังนั้น นอกจากค่าอัตราการใช้เลนส์อากาศโดยรวม ( $Q_g$ ) และปัจจัยด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ ที่ส่งผลต่อค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (a) แล้ว จำนวนรูเดิมอากาศและการกระจายตัวของจำนวนรูก็เป็นอีกประเด็นสำคัญที่ควบคุมการเพิ่มขึ้นของค่า a รวมไปถึงประสิทธิภาพการเดิมออกซิเจนของอุปกรณ์เดิมอากาศที่เลือกใช้

#### 4.4.5 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร (Volumetric mass transfer coefficient, $K_{L,a}$ )

รูปที่ 4.37 แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ( $K_{L,a}$ ) ที่อัตราการไหลของอากาศ ( $Q_g$ ) ต่างๆ ของยางมิชลินที่เจาะรูด้วยอุปกรณ์ขนาดกลางจำนวน 160 รูและทำการทดลองที่อัตราการไหลของอากาศ 0.5 – 3.4 ลิตรต่อวินาที โดยผลการทดลองที่ได้จะทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากจำนวนรูเดิมอากาศ 1 และ 4 รู ตามลำดับ



รูปที่ 4.37 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ที่จำนวนรู 1, 4 และ 160 รู ที่อัตราการไหลต่างๆ

จากรูปที่ 4.37 พบว่าค่า  $K_{L,a}$  จากอุปกรณ์เดิมอากาศจำนวน 1 รูมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงของอัตราการไหลอากาศ 0.1 – 0.3 ลิตรต่อวินาทีและมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากในกรณี 4 และ 160 รู โดยค่า  $K_{L,a}$  ของ 160 รูมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากกรณี 4 รูเดิมอากาศเล็กน้อย (15%) ในงานวิจัยนี้พบว่าค่า  $K_{L,a}$  ของยางที่เจาะ 160 รูนั้นมีค่ามากที่สุดและน้อยที่สุด คือ 0.0441 ต่อวินาที และ 0.0186 ต่อวินาทีตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า  $K_{L,a}$  ที่ 160 รู มีลักษณะเหมือนกรณี 1 และ 4 รูเดิมอากาศ กล่าวคือ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ

- 1) อัตราการไหลของอากาศ น้อยกว่า 0.5 ลิตรต่อวินาที ค่า  $K_{L,a}$  มีค่าต่ำ คือ 0.0186 ต่อวินาที เนื่องจากที่อัตราการไหลของอากาศต่ำๆ มีฟองอากาศเกิดขึ้นค่อนข้างน้อย ซึ่งมีพื้นที่ผิวสัมผัสในการถ่ายเทออกซิเจน ( $a$ ) ค่อนข้างต่ำ
- 2) ค่า  $K_{L,a}$  เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้นในช่วง 0.5 – 1.0 ลิตรต่อวินาที เนื่องจากฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีจำนวนฟองอากาศเพิ่มขึ้นทำให้มีพื้นที่ผิวในการถ่ายเทออกซิเจนมากขึ้น

- 3) ค่า  $K_L a$  ก่อนข้างคังที่หรือเปลี่ยนแปลงก่อนข้างน้อยตามอัตราการเติมอากาศ เมื่ออัตราการไหลของอากาศมีค่าสูงกว่า 1.5 ลิตรต่ออนาที เนื่องจากที่ค่า  $Q_g$  ดังกล่าวจะมีจำนวนฟองอากาศและค่า  $a$  ที่สูงมากจนเต็มความสามารถในการรับออกซิเจนหรือถ่ายเทออกซิเจนของเฟสน้ำ (ปริมาตรถึงปฏิกิริยาที่ค่อนข้างเล็ก คือ 0.75 ลิตร)
- ดังนั้น ความสามารถในการถ่ายเทมวลสารของออกซิเจนซึ่งสัมพันธ์กับค่าความแตกต่างของความเข้มข้นออกซิเจนระหว่างความเข้มข้นของออกซิเจนที่สมดุลและออกซิเจนที่ละลายในน้ำเวลาใดๆ (Concentration gradient,  $\Delta C$ ) จึงมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วภายในปริมาตรน้ำของถังปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยสังเกตได้จากแนวโน้มค่า  $K_L a$  เพิ่มขึ้นและลดลงจนเข้าสู่ค่าคงที่อย่างรวดเร็ว ในกรณีที่ค่า  $Q_g$  มีการเปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์ที่มี 160 รูเติมอากาศเมื่อเทียบกับที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ที่มี 1 และ 4 รูเติมอากาศ

#### 4.4.6 สัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายผ่านฟิล์มของเหลว ( $K_L$ )

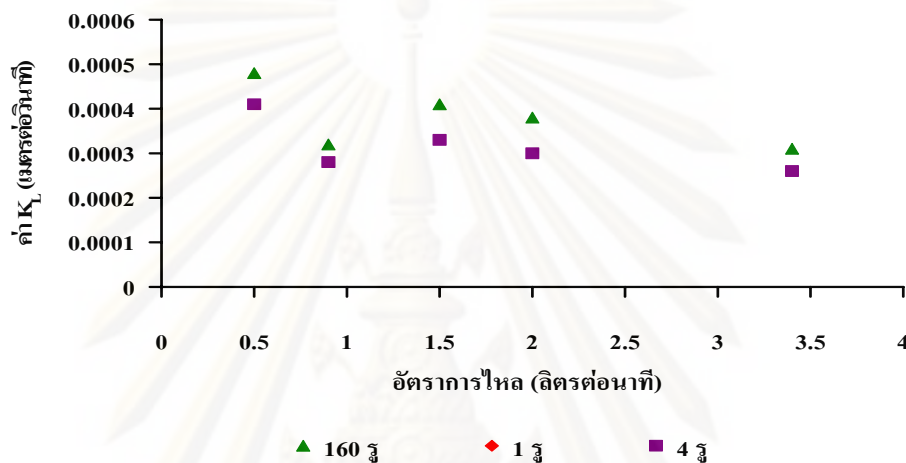
รูปที่ 4.38 แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายผ่านฟิล์มของเหลว ( $K_L$ ) ที่อัตราการไหลของอากาศ ( $Q_g$ ) ต่างๆ ของยางมิชลินที่เจาะรูด้วยอุปกรณ์ขนาดกลางจำนวน 160 รูและทำการทดลองที่อัตราการไหลของอากาศ 0.5 – 3.4 ลิตรต่ออนาที โดยผลการทดลองที่ได้จะทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากจำนวนรูเติมอากาศ 1 และ 4 รู ตามลำดับ โดยค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายผ่านฟิล์มของเหลว ( $K_L$ ) ในการทดลองนี้จะเป็นส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ( $K_L a$ ) และพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร ( $a$ ) ซึ่งได้มาจากการทดลองในงานวิจัยนี้

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.38 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์  $K_L$  ของอุปกรณ์เติมอากาศที่มี 160 รูเติมอากาศมีค่าระหว่าง 0.0031 – 0.0048 เมตรต่อวินาที โดยแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่า  $K_L$  สามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วงตามค่าอัตราการไหลของอากาศดังนี้

- 1) อัตราการไหลของก๊าซน้อยกว่า 0.5 ลิตรต่ออนาที พบว่าค่า  $K_L$  อยู่ในช่วง  $3 - 5 \times 10^{-4}$  เมตรต่อวินาที โดยจากการที่ค่า  $a$  ในช่วงดังกล่าวมีค่าต่ำ แต่ค่า  $K_L$  มีค่าสูง กล่าวได้ว่าการถ่ายเทออกซิเจนจะถูกควบคุมด้วยค่า  $K_L$  เนื่องจากมีจำนวนฟองอากาศน้อยและมีความปั่นป่วนต่ำในเฟสน้ำ ดังนั้นการถ่ายเทออกซิเจนผ่านฟิล์มของเหลวรอบฟองอากาศจึงเกิดได้อย่างสมบูรณ์ (มีการต้านการถ่ายเทมวลสารต่ำ)
- 2) อัตราการไหลของก๊าซ 0.5 – 1.5 ลิตรต่ออนาที พบว่า ค่า  $a$  มีค่าเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับค่า  $K_L a$  และทำให้ได้ค่า  $K_L$  มีแนวโน้มกระจายตัว ซึ่งมีค่าเฉลี่ย  $4 \times 10^{-4}$  เมตรต่อวินาที และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.0002 แสดงว่าการถ่ายเทออกซิเจนถูกควบคุมด้วยค่า  $a$  เนื่องจากฟองอากาศจำนวนมาก ซึ่งให้ค่าพื้นที่การถ่ายเทออกซิเจนและมีพลังงานในการ

กวนผสมในเฟสน้ำที่ไม่สูงเกินไป กล่าวคือยังมีการถ่ายเทออกซิเจนผ่านฟิล์มของเหลวที่ค่อนข้างสมบูรณ์ หรือมีความต้านทานค่อนข้างต่ำ

- 3) อัตราการไหลของก๊าซเพิ่มสูงขึ้นที่ 1.5 – 3.4 ลิตรต่อนาที พบว่าค่า  $a$  มีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่ค่า  $K_L$  มีค่าลดลง จึงส่งผลให้ค่า  $K_L a$  มีค่าคงที่ เนื่องจากเกิดการรวมตัวและการแตกตัวของฟองอากาศจำนวนมาก ทำให้เกิดการรบกวนฟิล์มน้ำรอบฟองอากาศ เนื่องจากพลังงานกวนผสมจากฟองอากาศ (Mixing energy) ที่มากเกินไป จึงส่งผลต่อการลดลงของค่า  $K_L$



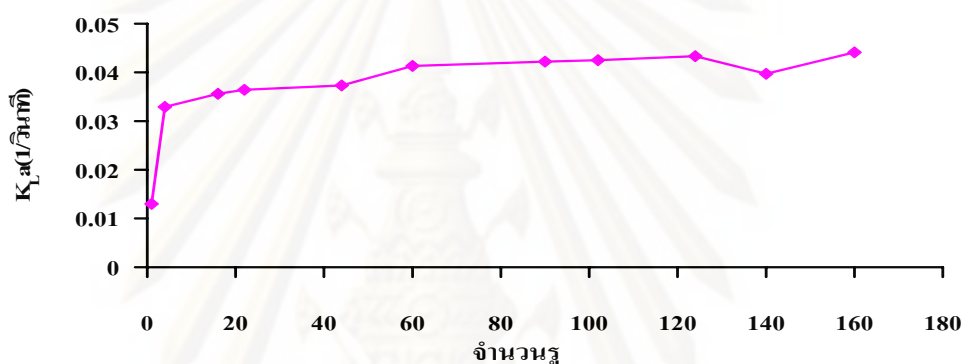
รูปที่ 4.38 สัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายผ่านฟิล์มของเหลวที่อัตราการไหลต่างๆ ของอุปกรณ์เดิม อากาศที่มี 1 4 และ 160 รูเดิมอากาศ

โดยเมื่อพิจารณาในภาพรวม อาจกล่าวได้ว่า ค่า  $a$  และ  $K_L$  มีแนวโน้มที่จะแปรผกผันซึ่งกันและกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อัตราการไหลของอากาศสูงๆ ดังนั้น ในทางปฏิบัติ อาจไม่เป็นจริงเสมอไปสำหรับการเพิ่มค่า  $K_L a$  โดยการเพิ่มค่าอัตราการไหลของอากาศ เพื่อให้ได้ค่า  $a$  มากๆ เนื่องจากอาจส่งผลต่อการลดลงของค่า  $K_L$  ทำให้เราได้ค่า  $K_L a$  ที่ค่อนข้างคงที่ หรือลดลงได้ในที่สุด

นอกจากนี้ จะสังเกตได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์  $K_L$  ที่ได้จากกรณี 160 รูเดิมอากาศมีค่าสูงกว่าที่ได้จากทั้ง 1 และ 4 รูเดิมอากาศ โดยปริมาณอากาศที่เข้าสู่ระบบเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างค่า  $K_L$  ของ 1 รูที่น้อยกว่าค่า  $K_L$  ของ 160 รูเดิมอากาศที่มีอัตราการไหลอากาศที่สูงกว่า ในขณะที่ความแตกต่างที่เกิดขึ้นในกรณีของ 4 และ 160 รูเดิมอากาศนั้น น่าจะมีความสัมพันธ์กับการกระจายตัวของฟองอากาศขนาดเล็กที่เกิดขึ้นจาก 160 รูเดิมอากาศ ทำให้เกิดการกวนผสมที่เกิดจากฟองอากาศในลักษณะที่แตกต่างจากที่ได้จากกรณีของ 4 รูเดิมอากาศ (กชกร และคณะ, 2009) โดยปัจจัยดังกล่าวจึงน่าจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานในการถ่ายเทมวลสารผ่านฟิล์มของเหลว และเป็นประเด็นที่น่าสนใจที่จะศึกษาและวิจัยต่อไป

#### 4.4.7 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ( $K_La$ ) ที่จำนวนรูเดิมอากาศต่างๆ

จากการศึกษาในข้อ 4.41 – 4.46 กล่าวได้ว่าจำนวนรูเดิมอากาศบนอุปกรณ์เดิมอากาศเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สามารถส่งผลต่อทั้งลักษณะทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ดังนั้นจึงน่าสนใจที่จะศึกษาหรือเข้าใจผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงจำนวนรูเดิมอากาศ โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ( $K_La$ ) ที่จำนวนรูต่างๆ ของยางมิชลินที่เจาะรูด้วยอุปกรณ์ขนาดกลางจำนวน 160 รูและทำการทดลองที่อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลิตรต่อนาทีแสดงดังรูปที่ 4.39



#### รูปที่ 4.39 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารที่สัมพันธ์กับจำนวนรูเดิมอากาศ

จากรูปที่ 4.39 พบว่าค่า  $K_La$  เพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนรูเดิมอากาศเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก โดยเพิ่มร้อยละ 33.33 ในช่วงจำนวนรู 22 รูเดิมอากาศ ในขณะที่ เมื่อจำนวนรูเดิมอากาศมากกว่า 44 รู จะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์  $K_La$  ที่ได้มีค่าจะเริ่มคงที่ (ประมาณ 0.049 ต่อวินาที) โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวอาจมีความสัมพันธ์กับข้อจำกัดของถังปฏิกรณ์ในการถ่ายเทออกซิเจนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ดังกล่าวถึงในข้อ 4.45 อย่างไรก็ตาม การเจาะรูเดิมอากาศที่จำนวนน้อยเกินไปนั้น (น้อยกว่า 44 รู) ก็อาจส่งผลเสียต่อการถ่ายเทออกซิเจนได้ เนื่องจากการกระจายตัวของฟองอากาศที่ไม่ทั่วถึงหรือครอบคลุมปริมาตรของเฟสน้ำในถังปฏิกรณ์ทั้งหมด จึงส่งผลทำให้ได้ค่า  $K_La$  ต่ำ นอกจากนี้ ข้อจำกัดดังกล่าวยังส่งผลเสียต่อการแขวนลอยจุลินทรีย์ภายในถังเดิมอากาศของระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Suspended Growth เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย (เกรียงศักดิ์, 2539) โดยในงานวิจัยนี้ พบว่าค่าสัดส่วนระหว่างพื้นที่ข้างต่อจำนวนรูเดิมอากาศ เท่ากับ 0.68

ดังนั้นในทางปฏิบัติ การเจาะรูเดิมอากาศจำนวนต่างๆ จึงมีความสำคัญและควรพิจารณาให้เหมาะสมกับปริมาตรน้ำภายในระบบเดิมออกซิเจน เพื่อไม่ให้เกิดข้อจำกัดด้านปริมาตรน้ำในการ

ถ่ายเทออกซิเจน ซึ่งส่งผลทำให้เกิดการใช้พลังงานในรูปของการเพิ่มค่า  $Q_g$  หรือการเพิ่มจำนวนรูเติมอากาศที่เกินความจำเป็น

#### 4.4.8 ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน (Oxygen Transfer Efficiency, OTE)

ในส่วนนี้ จะทำการคำนวณค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศแบบยัดหยุ่นที่ได้จากขางมิชลินที่เจาะรูด้วยระยะห่าง 4 มม ด้วยอุปกรณ์เจาะรูขนาดกลางจำนวน 160 รู เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์เติมอากาศสำหรับระบบบำบัดน้ำเสีย โดยค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน (OTE) เป็นค่าเปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนที่ถูกถ่ายเทให้แก่น้ำเทียบกับออกซิเจนที่เติมให้แก่ระบบและหาได้จากสมการ 4.5

$$OTE = \frac{OTR}{W_{O_2}} \quad (4.5)$$

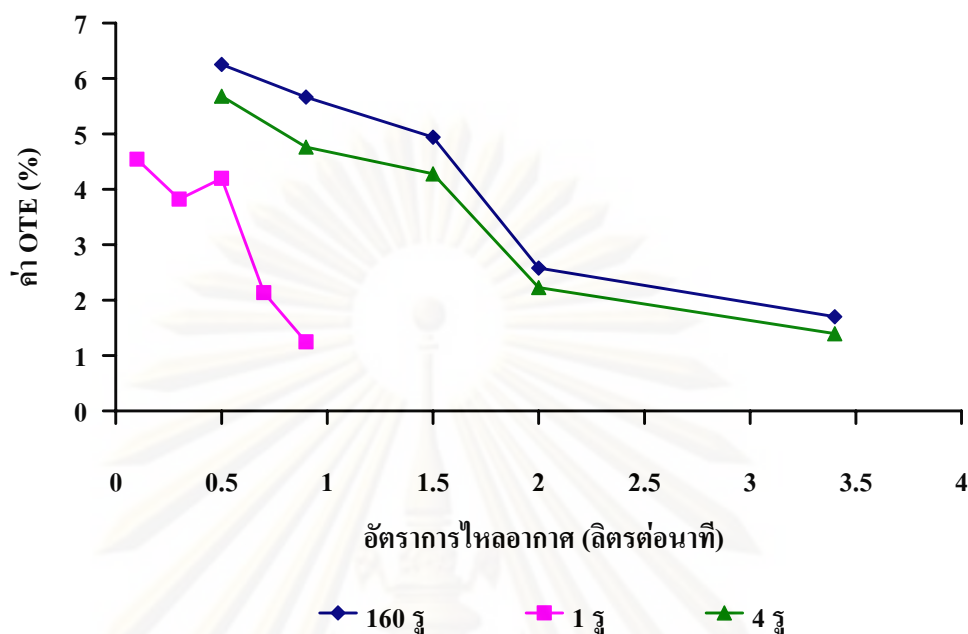
เมื่อ OTR คือ อัตราการถ่ายเทออกซิเจน (Oxygen Transfer Rate) หรือปริมาณออกซิเจนที่ถูกถ่ายเทให้แก่น้ำในหนึ่งชั่วโมงซึ่งคำนวณได้จากสมการ 4.6 และ  $W_{O_2}$  คือ มวลของออกซิเจนในอากาศที่เติมให้แก่ระบบ โดยค่า  $W_{O_2}$  สามารถคำนวณได้จากสมการ 4.7

$$OTR = K_L a \times C_s \times V \quad (4.6)$$

โดย  $V$  คือปริมาตรของน้ำในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศที่ใช้ในงานวิจัยนี้ และ  $C_s$  คือ ความเข้มข้นของออกซิเจนที่อิ่มตัวในน้ำ

$$W_{O_2} = \rho_g \times Q_g \quad (4.7)$$

เมื่อ  $\rho_g$  และ  $Q_g$  คือความหนาแน่นของออกซิเจนในอากาศและอัตราการไหลอากาศที่ใช้ ตามลำดับรูปที่ 4.40 แสดงถึงประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน (OTE) ที่อัตราการไหลของอากาศต่างๆ ของขางมิชลินที่เจาะรูด้วยอุปกรณ์ขนาดกลางจำนวน 160 รูและทำการทดลองที่อัตราการไหลของอากาศ 0.5 – 3.4 ลิตรต่อนาที โดยผลการทดลองที่ได้จะทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากจำนวนรูเติมอากาศ 1 และ 4 รู ตามลำดับ



รูปที่ 4.40 ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนที่อัตราการไหลต่างๆ ของอุปกรณ์เติมอากาศที่มีจำนวนรูเติมอากาศเท่ากับ 1, 4 และ 160 รูเติมอากาศ

จากรูป 4.40 พบว่าที่อัตราการเติมอากาศที่ 0.5 ลิตรต่อนาที วัสดุยึดหยุ่นที่เจาะรูเติมอากาศ 160 รู จะให้ค่า OTE สูงที่สุดประมาณ 6.3 % และมีค่ามากกว่าที่ได้จากกรณีของ 1 และ 4 รูเติมอากาศ ตามลำดับ โดยที่ข้อจำกัดด้านปริมาณอากาศ (กรณี 1 รู) และลักษณะการกระจายของฟองอากาศที่แตกต่างกัน (กรณี 4 รู) น่าจะเป็นที่มาของความแตกต่างดังกล่าว นอกจากนี้ พบว่าค่า OTE จะลดลงเมื่ออัตราการไหลอากาศเพิ่มขึ้น ในงานวิจัยนี้พบว่าค่า OTE สูงสุดและต่ำสุดจะพบที่อัตราการไหลอากาศ 0.5 และ 3.4 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ โดยการที่ OTE ลดลงที่อัตราการไหลสูงขึ้น สอดคล้องกับการที่  $KLa$  คงที่ เมื่อ  $Q_g$  สูงขึ้น คือมากกว่าที่ 1.5 ลิตรต่อนาที (สำหรับ 1 รูเติมอากาศ) และ 2 ลิตรต่อนาที (สำหรับ 4 และ 160 รูเติมอากาศ) ตามสมการ 4.5

นอกจากนี้ จากผลการวิจัยที่พบข้างต้นอาจกล่าวได้ว่า ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน (OTE) สูงสุดที่น่าจะได้จากการประยุกต์ใช้อุปกรณ์เติมอากาศจากยางมิชลิน (ในกรณีที่ไม่มีข้อจำกัดในด้านต่างๆ) จะมีค่าประมาณร้อยละ 6.3 ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับอุปกรณ์เติมอากาศแบบฟองอากาศที่มีขายตามท้องตลาด (Flexible Membrane sparger จากบริษัท Degremont<sup>®</sup> ประเทศฝรั่งเศส) พบว่าอุปกรณ์ในงานวิจัยนี้มีค่าน้อยกว่าอุปกรณ์เติมอากาศแบบฟองอากาศดังกล่าวซึ่งมีค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนประมาณร้อยละ 35.12 (Painmanakul และคณะ, 2005) นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากงานวิจัยที่ได้ทำการทดลองหาประสิทธิภาพในการเติมอากาศและการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศยึดหยุ่นแบบท่อ (Flexible tube aerator) ซึ่งผลิตจากของเสีย

จำพวกยางรถยนต์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์เติมอากาศสำหรับระบบบำบัดน้ำเสีย (กชกร และคณะ, 2009) พบว่าอุปกรณ์เติมอากาศแบบท่อมี่ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนร้อยละ 7 – 23 ซึ่งจะเห็นว่าอุปกรณ์เติมอากาศจากยางมิชลินที่ใช้ในการทดลองนี้ ยังคงมีค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนน้อยกว่าทั้งอุปกรณ์เติมอากาศจากบริษัท Degremont® และอุปกรณ์เติมอากาศแบบท่อยืดหยุ่น โดยอาจเป็นเพราะว่า ยางในรถยนต์ที่นำมาใช้นั้นเป็นยางเก่า และไม่มีกระบวนการปรับสภาพพื้นผิวและคุณสมบัติด้านกายภาพที่เหมาะสม ในขณะที่ยางพาราธรรมชาติ นั้นก็มีข้อจำกัดด้านความทนทานและความยืดหยุ่นจึงส่งผลให้ไม่เหมาะสมกับการนำมาใช้งาน โดยตรงในระบบบำบัดน้ำเสียและยังคงมีประสิทธิภาพต่ำกว่าเมื่อเทียบกับยางสังเคราะห์ทั้งสอง ชนิดที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ นอกจากนี้ ปัญหาดังกล่าวอาจเกิดจากอุปกรณ์เจาะรูเติมอากาศที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ไม่ได้มาตรฐาน ซึ่งแตกต่างจากกรณีท่อยางเติมอากาศที่ใช้ปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อสร้างรูพรุนบนพื้นผิวหรือการใช้เทคโนโลยีขั้นสูงในการสร้างรูเติมอากาศสำหรับอุปกรณ์จากบริษัท Degremont® ดังนั้น ในอนาคตจึงควรมีการศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ยางชนิดอื่น ๆ รวมไปถึงการปรับปรุงสภาพยางพาราเพื่อเพิ่มคุณค่าทางเศรษฐกิจให้กับผลิตภัณฑ์ รวมทั้งนำไปประยุกต์ใช้และศึกษาในสภาพการทำงานที่กว้างมากขึ้น และใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น เพื่อลดข้อจำกัดด้านเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นยางที่เลือกใช้ (60 มม.) และปริมาตรน้ำที่ใช้ในการทดลอง

ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาอุปกรณ์เติมอากาศแบบยืดหยุ่นที่มีขายทั่วไป (หัวกระจายอากาศแบบจานกลมของบริษัท อควา นิซิซาร์่า คอร์ปอเรชัน) ซึ่งมีราคาประมาณ 1,000 บาทต่อหนึ่งแผ่นยางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 ซม. ในขณะที่ยางในรถบรรทุกที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้มีราคาประมาณ 80 บาทต่อเส้น โดยจะเห็นได้ว่ายางในรถบรรทุกมีราคาถูกกว่า 10 เท่าสำหรับการนำมาผลิตอุปกรณ์เติมอากาศที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติมีความจำเป็นต้องพิจารณาถึงราคาต้นทุนโครงสร้างสำหรับผลิตแผ่นจานกลมอีกทางหนึ่งด้วย โดยสรุป เราอาจกล่าวได้ว่า ถึงแม้จะมีข้อจำกัดในด้านประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน แต่ข้อดีในการนำยางในรถบรรทุกมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์เติมอากาศนั้นสามารถลดต้นทุนในขั้นตอนการเติมอากาศในการบำบัดน้ำเสียได้ (ค่าใช้จ่ายร้อยละ 70 เป็นค่าพลังงานที่ใช้ในกระบวนการเติมอากาศ) และยังมีผลดีในด้านของความทนทานและลดปัญหาการอุดตันของอุปกรณ์เติมอากาศแบบแข็งได้ ในอนาคตถ้ามีการศึกษาเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนอย่างจริงจังนั้น ก็น่าจะช่วยลดค่าใช้จ่ายทั้งในด้านการนำเข้าอุปกรณ์เติมอากาศจากต่างประเทศ การบำรุงรักษา และยังเป็นการเพิ่มคุณค่าของเสียประเภทยางมาใช้ประโยชน์ หรือแม้กระทั่งช่วยส่งเสริมการใช้ประโยชน์จากยางพาราซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศอีกทางหนึ่ง จากผลการทดลองในส่วนนี้ สามารถสรุปในประเด็นต่างๆ ดังนี้



- ขนาดฟองอากาศ ที่เกิดจากขงมิชลินที่มีการเจาะรูเดิมอากาศระยะห่าง 4 มม. จำนวน 160 รูเดิมอากาศ มีค่าค่อนข้างคงที่ (ประมาณ 2.8 มม.) และมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับค่า  $D_B$  ที่ได้จากอุปกรณ์เดิมอากาศชนิด 1 และ 4 รูเดิมอากาศ โดยสัมพันธ์กับการที่อัตราการไหลอากาศที่ผ่าน 1 รู ( $q$ ) ที่มีค่าต่ำมากๆ เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จาก 1 และ 4 รู ทำให้ค่าความยืดหยุ่น ( $W_0$ ) มีค่าต่ำที่สุดและส่งผลให้ขนาดรูเดิมอากาศ ( $D_{OR}$ ) ที่ขยายตัวมีขนาดเล็กตามไปด้วย ดังนั้น ขนาดฟองอากาศที่ได้จึงมีขนาดเล็กที่สุด
- ค่าความถี่ในการเกิดฟองอากาศ จากขงมิชลินที่มีการเจาะรูเดิมอากาศระยะห่าง 4 มม. จำนวน 160 รูเดิมอากาศ มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากกรณี 1 และ 4 รู อย่างชัดเจนเนื่องจากการที่อัตราการไหลอากาศต่อ 1 รู ของ 160 รู ต่ำมาก ทำให้ได้ขนาดฟองอากาศเล็กและส่งผลต่อการรวมตัวของฟองอากาศน้อยกว่าแบบ 4 รู
- ค่าความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ จากขงมิชลินที่มีการเจาะรูเดิมอากาศระยะห่าง 4 มม. จำนวน 160 รูเดิมอากาศ มีค่าค่อนข้างคงที่ (25 - 30 เซนติเมตรต่อวินาที) และมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากกรณี 1 และ 4 รูเดิมอากาศ ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่าค่า  $U_B$  ขึ้นอยู่กับขนาดฟองอากาศ ( $D_B$ ) และลักษณะของเฟสน้ำที่เกี่ยวข้อง (liquid phase characteristics) เท่านั้น โดยพลังงานที่เกิดขึ้นจากจำนวนฟองอากาศที่เพิ่มขึ้นภายในถังปฏิกริยานั้น ไม่ได้ส่งผลต่อค่าความเร็ว  $U_B$  รวมไปถึงค่าเวลากักของฟองอากาศ ( $T_B$ ) ภายในถังปฏิกริยา
- ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร จากขงมิชลินที่มีการเจาะรูเดิมอากาศระยะห่าง 4 มม. จำนวน 160 รูเดิมอากาศ มีค่าใกล้เคียงกับ 4 รูเดิมอากาศ เนื่องจากอัตราการไหลอากาศต่อจำนวนรู ( $q$ ) ที่มีค่าต่ำนั้น จะส่งผลต่อค่าความถี่ในการเกิดฟองอากาศแต่ละรูเดิมอากาศและจำนวนฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีจำนวนน้อยลงด้วย ดังนั้นค่า  $a$  ที่ได้จึงมีค่าต่ำและใกล้เคียงกันระหว่าง 4 และ 160 รูเดิมอากาศเสมือนว่าค่า  $a$  ในช่วงอัตราการไหลต่ำๆนี้ถูกคุมด้วยปริมาณอากาศที่เข้ารูอุปกรณ์เดิมอากาศ
- ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร จากขงมิชลินที่มีการเจาะรูเดิมอากาศระยะห่าง 4 มม. จำนวน 160 รูเดิมอากาศ มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากกรณี 4 รูเดิมอากาศเล็กน้อย (15%) ในงานวิจัยนี้พบว่าค่า  $K_{La}$  ของขงที่เจาะ 160 รูนั้น มีค่ามากที่สุดและน้อยที่สุด คือ 0.0441 ต่อวินาที และ 0.0186 ต่อวินาที โดยค่า  $K_{La}$  จะเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนรูเดิมอากาศเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก ในขณะที่ เมื่อจำนวนรูเดิมอากาศมากกว่า 44 รู จะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์  $K_{La}$  ที่ได้มีค่าจะเริ่มคงที่ (ประมาณ 0.049 ต่อวินาที)

- ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายผ่านฟิล์มของเหลว ของยางมิชลินที่มีการเจาะรูเดิมอากาศ ระยะห่าง 4 มม. จำนวน 160 รูเดิมอากาศ มีค่าระหว่าง 0.0031 – 0.0048 เมตรต่อวินาที ค่าสัมประสิทธิ์  $K_L$  ที่ได้จากกรณี 160 รูเดิมอากาศมีค่าสูงกว่าที่ได้จากทั้ง 1 และ 4 รูเดิมอากาศ
- ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน (OTE) ของอุปกรณ์เดิมอากาศแบบยัดหยุ่นที่ได้จากยางมิชลินที่เจาะรูด้วยระยะห่าง 4 มม ด้วยอุปกรณ์เจาะรูขนาดกลางจำนวน 160 รูเดิมอากาศ พบว่าที่อัตราการเติมอากาศที่ 0.5 ลิตรต่อนาที วัสดุยืดหยุ่นที่เจาะรูเดิมอากาศ 160 รู จะให้ค่า OTE สูงที่สุดประมาณร้อยละ 6.3 และมีค่ามากกว่าที่ได้จากกรณีของ 1 และ 4 รูเดิมอากาศ และค่า OTE จะลดลงเมื่ออัตราการไหลอากาศเพิ่มขึ้น ในงานวิจัยนี้พบว่าค่า OTE สูงสุดและต่ำสุดจะพบที่อัตราการไหลอากาศ 0.5 และ 3.4 ลิตรต่อนาที

นอกจากผลการวิจัยที่พบข้างต้นแล้ว กล่าวได้ว่า ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน (OTE) สูงสุดที่น่าจะได้จากการประยุกต์ใช้อุปกรณ์เดิมอากาศจากยางมิชลิน มีค่าประมาณร้อยละ 6.3 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับตัวกระจายอากาศแบบ Single spiral roll (ร้อยละ 9 - 12) ดังตาราง 4.5

ตาราง 4.5 สมรรถภาพของตัวกระจายอากาศแบบต่างๆ

ชนิดของตัวกระจายอากาศ	อัตราการไหลของอากาศ ผ่านตัวกระจายอากาศ (ลบ.ม./(นาที.ตัวกระจาย อากาศ))	ประสิทธิภาพในการถ่ายเท ออกซิเจนลงไปใต้น้ำ (%) ณ สภาวะมาตรฐานของระดับน้ำ ลึกต่างๆ		
		3 ม.	4.5 ม.	6.0 ม.
แบบแผ่นจาน Ceramic-Grid	000.01-0.10	20-25	25-40	31-41
แบบหมวกกลม Ceramic-Grid	0.01-0.07	16-26	27-39	28-47
แบบแผ่น Ceramic-Grid	0.60-1.50 (ลบ.ม./ตร.ม.ตัว กระจายอากาศ.นาที)	-	26-33	-
แบบท่อพลาสติกแข็งที่มีรูพรุนเล็ก				
Grid	0.07-0.11	-	28-32	-
Dual spiral roll	0.08-0.31	10-16	17-28	21-32
Single spiral roll	0.06-0.34	10-15	13-25	22-25
แบบท่อพลาสติกโค้งงอได้ที่มีรู พรุนเล็ก				
Grid	0.03-0.20	-	26-36	-
Single spiral roll	0.06-0.20	-	19-37	-
แบบ Perforated membrane tubes				
Grid	0.03-0.11	14-18	22-29	29-35
Quarter points	0.06-0.17	13-15	19-24	24-29
Single spiral roll	0.06-0.17	7-11	15-19	21-28
แบบ Jet aeration				
Side header	1.50-8.50	-	15-24	-
แบบไม่ใช้รูพรุนเล็ก				
Dual spiral roll	0.09-0.28	-	12-13	-
Mid-width	0.12-1.27	-	10-13	-
Single spiral roll	0.28-1.00	-	9-12	-

#### 4.5 การประยุกต์ใช้สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อลักษณะทางอุทกพลศาสตร์และการถ่ายเทออกซิเจนของฟองอากาศที่เกิดจากอุปกรณ์เติมอากาศชนิดยัดหยุน

โดยทั่วไป การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ( $K_La$ ) ด้วยวิธีการทดลอง (Experimental method) นั้น สามารถกระทำได้หลากหลายวิธี เช่น วิธี Dynamic method (ซึ่งให้ในงานวิจัยนี้) วิธีการดูดซึมทางเคมี (Chemical absorption method) เป็นต้น โดยพบว่ายังมีข้อจำกัดที่เกี่ยวกับความยุ่งยากในการเตรียมระบบวิเคราะห์ อุปกรณ์วิเคราะห์ที่มีราคาแพง ต้องการอุปกรณ์และสารเคมีอื่นๆ ประกอบการวิเคราะห์หลายชนิด รวมไปถึงต้องการบุคลากรที่มีความรู้และมีประสบการณ์ในการวิเคราะห์ ซึ่งข้อจำกัดที่กล่าวถึงข้างต้นนั้น สามารถส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์  $K_La$  โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองประมาณ ร้อยละ 15 และร้อยละ 20 สำหรับวิธี Dynamic method และวิธี Chemical absorption method (Roustan, 2005) ตามลำดับ รวมไปถึงการประยุกต์ใช้งานหรือปรับปรุงระบบเติมอากาศอย่างไม่เหมาะสม ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงได้นำเสนอแนวทางในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์  $K_La$  ทางทฤษฎีอย่างง่าย โดยการประยุกต์ใช้สมการความสัมพันธ์เพื่อคำนวณค่าขนาดฟองอากาศ ( $D_B$ ) ความเร็วในการเกิดฟอง ( $U_B$ ) พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ ( $a$ ) และสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายผ่านฟิล์มของเหลว ( $K_L$ ) เพื่อนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์  $K_La$  ซึ่งเป็นผลคูณระหว่างค่า  $a$  และสัมประสิทธิ์  $K_L$  นอกจากนี้ เมื่อทราบค่า  $K_La$  เรายังสามารถประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน (OTE) ของอุปกรณ์เติมอากาศ ซึ่งน่าจะช่วยอำนวยความสะดวกและทำให้เราสามารถประเมินความเหมาะสมของอุปกรณ์เติมอากาศที่จะเลือกใช้งานได้ในขั้นต้น

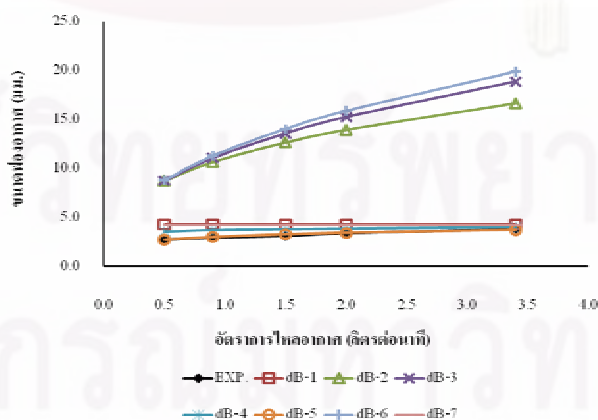
##### 4.5.1 แนวทางการทำนายขนาดฟองอากาศ

รูปที่ 4.41 แสดงความสัมพันธ์ขนาดฟองอากาศ ( $D_B$ ) ที่อัตราการไหลของอากาศต่างๆ ของขงามิซลินที่เจาะรูด้วยอุปกรณ์ขนาดกลางจำนวน 160 รูและทำการทดลองที่อัตราการไหลของอากาศ 0.5 – 3.4 ลิตรต่อนาที โดยผลการทดลองที่ได้จะทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการความสัมพันธ์ทางทฤษฎี ดังแสดงในตารางที่ 4.5

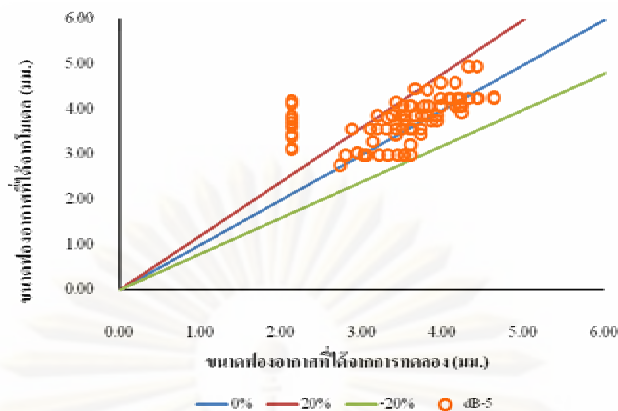
ตาราง 4.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ ( $d_B$ )

ลำดับที่	ความสัมพันธ์	ข้อกำหนด	อ้างอิง
$d_B-1$	$d_B = \left( \frac{6d_{OR}\sigma g_c}{g\Delta\rho} \right)^{1/3}$	$Q_{g0} < \left[ \frac{20(\sigma d_0 g_c)^5}{(g\Delta\rho)^2 \rho_L^3} \right]^{1/6}$	Van Krevelen (1994)
$d_B-2$	$d_B = 0.0287 d_{OR}^{1/2} Re^{1/3}$	$Re < 2100$	Leibson (1956)
$d_B-3$	$d_B = \left( \frac{72\rho_L}{\pi^2 g\Delta\rho} \right)^{1/5} Q_{g0}^{0.4}$		Van Krevelen (1994)
$d_B-4$	$d_B = 7.1 \times 10^{-4} \Delta P^{0.328}$		Hebrard et al. (1996)
$d_B-5$	$d_B = 15.73 \times 10^{-3} D_c^{0.32} \left( \frac{Q_g}{A_{or}} \right)^{0.16}$		Hebrard et al. (1996)
$d_B-6$	$d_B = 1.56 Re^{0.058} \left( \frac{d_{OR}^2 \sigma}{\Delta\rho g} \right)^{1/4}$	$1 < Re < 10$	Kumar et al. (1976)
	$d_B = 0.32 Re^{0.425} \left( \frac{d_{OR}^2 \sigma}{\Delta\rho g} \right)^{1/4}$	$10 < Re < 21000$	
$d_B-7$	$\frac{g\rho_L d_B^2}{\sigma} = 8.8 \left( \frac{u_G \mu_L}{\sigma} \right)^{-0.04} \left( \frac{\sigma^3 \rho_L}{g\mu_L^4} \right)^{-0.12} \left( \frac{\rho_L}{\rho_G} \right)^{0.22}$		Wilkinson et al. (1994)

นอกจากนี้ ผลการเปรียบเทียบขนาดฟองอากาศที่ได้จากการทำนายด้วยสมการความสัมพันธ์ที่ดีที่สุด (Suitable theoretical equation) และที่ได้ผลจากการทดลองจากการประยุกต์ใช้สมการดังกล่าวกับอุปกรณ์เดิมอากาศที่มีรูเดิมอากาศ 1, 4 และ 160 รูเดิมอากาศ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.42



รูปที่ 4.41 ผลการประยุกต์ใช้สมการทำนายขนาดฟองอากาศ (ตารางที่ 4.5) ที่อัตราการไหลต่างๆ



รูปที่ 4.42 ผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนระหว่างขนาดฟองอากาศที่ได้จากการทดลองและจากสมการทำนายทฤษฎี

จากการทำนายขนาดฟองอากาศโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าขนาดฟองอากาศมีความสัมพันธ์กับขนาดรูเดิมอากาศ ( $D_{OR}$ ) ในงานวิจัยนี้ได้อ้างอิงค่า  $D_{OR}$  จากงานวิจัยอื่นๆซึ่งวิเคราะห์ได้จากภาพถ่ายวัสดุเดิมอากาศโดยกล้องจุลทรรศน์ขณะเดิมอากาศด้วยอัตราการไหลของก๊าซที่ใกล้เคียงกัน พบว่า  $D_{OR}$  มีค่าอยู่ในช่วง  $1.2 \times 10^{-4}$  ถึง  $4.8 \times 10^{-4}$  เมตร ซึ่งเป็นค่าตัวแทนในสมการดังตารางที่ 4.5 และมีแนวโน้มสูงขึ้นตามการเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซ ( $Q_g$ ) เพราะมีแรงดันของก๊าซมากขึ้น (Painmanakul และคณะ, 2004) ดังนั้นการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายขนาดฟองอากาศ ( $D_B$ ) จึงมีข้อจำกัดจากการวิเคราะห์ค่า  $D_{OR}$  ซึ่งมีความยุ่งยากและมีโอกาสคลาดเคลื่อนสูง การทำนายค่า  $D_B$  โดยไม่ต้องใช้ค่า  $D_{OR}$  จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวซึ่งสมการ dB-4 อาจเป็นอีกสมการที่สามารถประยุกต์ใช้เพื่อการทำนายค่า  $D_B$  ได้

จากรูป 4.41 – 4.42 พบว่าการทำนายค่าขนาดฟองอากาศของยางมิชลิน ที่เจาะรูเดิมอากาศด้วยเข็มขนาดกลาง จำนวนรูเดิมอากาศ 160 รู ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ พบว่าสมการ dB-5 (ตารางที่ 4.5) สามารถใช้ทำนายค่าขนาดฟองอากาศได้และความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 20 ทั้งนี้ จากค่า  $D_B$  ที่คำนวณได้นี้ เราสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อคำนวณค่าความถี่ในการเกิดฟองอากาศที่สอดคล้องกับค่าอัตราการไหลอากาศตามสมการที่ 4.5 ต่อไป

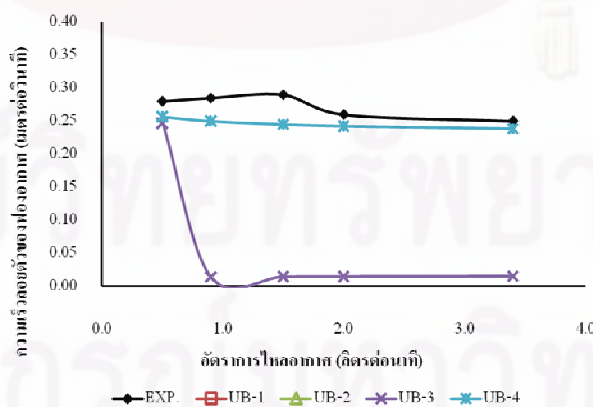
#### 4.5.2 แนวทางการทำนายความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ

รูปที่ 4.43 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วในการลอยขึ้นของฟองอากาศ ( $U_B$ ) ที่อัตราการไหลของอากาศต่างๆ ของยางมิชลินที่เจาะรูด้วยอุปกรณ์ขนาดกลางจำนวน 160 รูและทำการทดลองที่อัตราการไหลของอากาศ 0.5 – 3.4 ลิตรต่อวินาที โดยผลการทดลองที่ได้จะทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการความสัมพันธ์ทางทฤษฎี ดังแสดงในตารางที่ 4.6 นอกจากนี้ ผลการเปรียบเทียบความเร็วในการลอยตัวของ

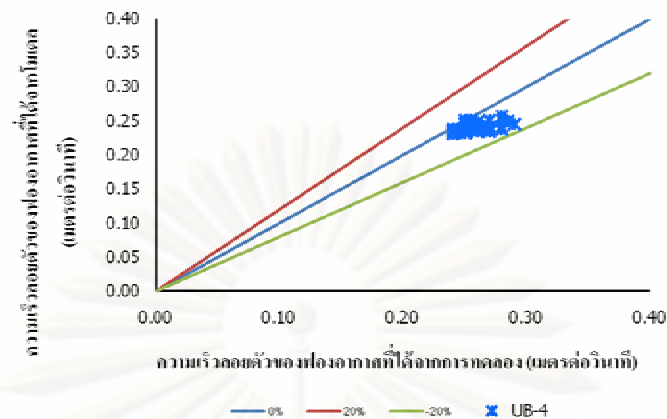
ฟองอากาศที่ได้จากการทำนายด้วยสมการความสัมพันธ์ที่ดีที่สุด (Suitable theoretical equation) และที่ได้ผลจากการทดลองจากการประยุกต์ใช้สมการดังกล่าว กับอุปกรณ์เดิมอากาศที่มีรูเดิมอากาศ 1, 4 และ 160 รูเดิมอากาศสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.44

ตาราง 4.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่าความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ ( $U_B$ )

ลำดับที่	ความสัมพันธ์	ข้อกำหนด	อ้างอิง
U <sub>B</sub> -1	$U_B = \frac{g \cdot \Delta \rho \cdot d_B^2}{12 \cdot \mu_L}$	$Re < 250, \frac{\mu_G}{\mu_L} = 0$	Hadamard et Rybczynski (1911)
U <sub>B</sub> -2	$U_B = \frac{g \cdot \Delta \rho \cdot d_B^2}{18 \cdot \mu_L}$	$Re < 250, \frac{\mu_G}{\mu_L} \rightarrow \infty$	Frumkin et Levich (1947)
U <sub>B</sub> -3	$U_B = \frac{\mu_L}{\rho_L d_B} (J - 0.857) M_o^{-0.149}$ $J = 0.94 H^{0.757} \quad (2 < H \leq 59.3)$ $J = 0.32 H^{0.441} \quad (H > 59.3)$ $H = \frac{4}{3} Eo M_o^{-0.149} \left( \frac{\mu_L}{0.0009} \right)^{-0.14}$	$250 < Re < 6000$	Grace & Wairegi (1986)
U <sub>B</sub> -4	$U_B = \left( \frac{2\sigma}{d_B \rho} + 0.5 d_B g \right)^{0.5}$	$0.2 \leq d_B \leq 8 \text{ cm}$	Mendelson (1967)
U <sub>B</sub> -5	Experimental curve for the bubble rising velocity		Grace & Wairegi (1986)



รูปที่ 4.43 ผลการประยุกต์ใช้สมการทำนายความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (ตารางที่ 4.6) ที่อัตราการใช้ฟองอากาศ



รูปที่ 4.44 ผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนระหว่างความเร็วลมตัวของฟองอากาศที่ได้จากการทดลองและจากสมการทำนายทฤษฎี

จากรูป 4.43 – 4.44 พบว่าจากการทำนายค่าความเร็วลมตัวของฟองอากาศ ( $U_B$ ) ด้วยสมการทางทฤษฎี พบว่าสมการ  $U_B-4$  (ตาราง 4.6) สามารถประยุกต์ใช้ทำนายค่า  $U_B$  ได้และความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 20 สำหรับสภาพการทำงานในงานวิจัยนี้ นอกจากนี้ ค่า  $U_B$  ยังสามารถทำนายได้โดยประยุกต์ใช้ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $U_B$  และค่า  $D_B$  ในสภาวะการทำงานต่างๆ ของ Grace and Wairegi (1986) โดยใช้ค่าขนาดฟองอากาศที่คำนวณได้จากสมการในการหาค่า  $D_B$  ที่เหมาะสม โดยอ่านค่าความเร็วลมตัวที่สัมพันธ์กับเฟสของเหลวไม่มีการปนเปื้อน (Pure water) ซึ่งให้ผลใกล้เคียงดังที่แสดงให้เห็นในหัวข้อการศึกษาในหัวข้อที่ผ่านมา

ดังนั้น เมื่อพิจารณาสมการ 2.34 กล่าวได้ว่าค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ ( $a$ ) สัมพันธ์กับขนาดของฟองอากาศ ( $D_B$ ) ความถี่ในการเกิดการเกิดฟอง ( $f_B$ ) และค่าความเร็วลมตัวของฟองอากาศ ( $U_B$ ) ดังนั้น ค่าของตัวแปรดังกล่าวข้างต้นที่ได้จากการประยุกต์ใช้สมการทำนายทางทฤษฎีจึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อทำนายค่า  $a$  ที่เกิดขึ้นจากสภาพการทำงานต่างๆ ในงานวิจัยนี้ได้

#### 4.5.3 แนวทางการทำนายค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ

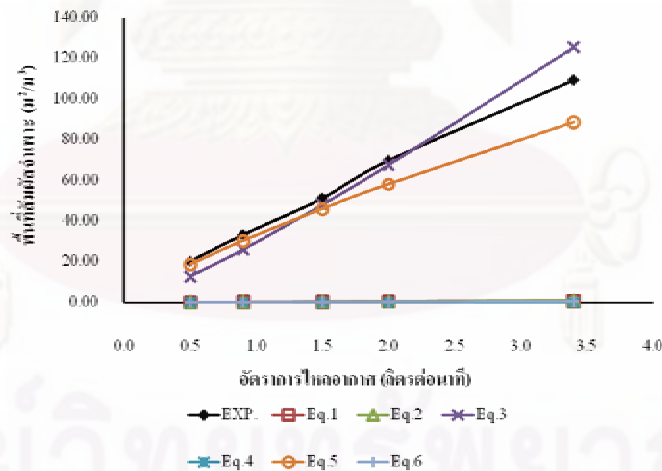
รูปที่ 4.45 แสดงความสัมพันธ์ของค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ ( $a$ ) ที่อัตราการไหลของอากาศต่างๆ ของยางมิชลินที่เจาะรูด้วยอุปกรณ์ขนาดกลางจำนวน 160 รูและทำการทดลองที่อัตราการไหลของอากาศ 0.5 – 3.4 ลิตรต่อนาที โดยผลการทดลองที่ได้จะทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการความสัมพันธ์ทางทฤษฎี ดังตารางที่ 4.7



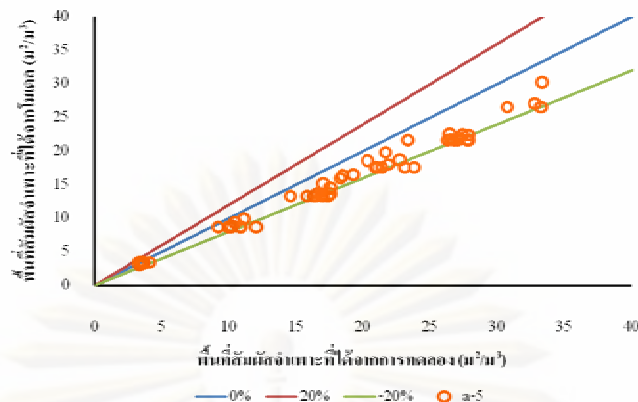
ตาราง 4.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่าพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างของเหลวและก๊าซ (a)

ลำดับที่	ความสัมพันธ์	อ้างอิง
a-1	$a = 34.4 * U_G^{0.25} * \varepsilon_G$	Deckwer (1974)
a-2	$a = 26. \left( \frac{L_R}{d_R} \right)^{-0.3} \left( \frac{\rho_L \cdot \sigma_L^3}{g \cdot \mu_L^4} \right)^{-0.003} * \varepsilon_G$	Gestrich and Krauss (1975)
a-3	$a = \frac{6}{2.5} \cdot \left( \frac{\sigma_L}{\rho_L \cdot g} \right)^{-0.5} \cdot \left( \frac{\mu_L \cdot U_G}{\sigma_L} \right)^{0.25} \cdot \left( \frac{\rho_L \cdot \sigma_L^3}{g \cdot \mu_L^4} \right)^{0.125} \cdot \varepsilon_G$	Van dierendonck et al. (1968)
a-4	$a = 4.65 * 10^{-12} * \left( \frac{U_G}{\mu_L} \right)^{0.51}$	Tomida et al. (1978)
a-5	$a = \frac{6\varepsilon_G}{d_B(1-\varepsilon_G)}$	Mendelson (1967)
a-6	$a = 8.54 * U_G^{0.12} * \varepsilon_G$	Deckwer (1974)

นอกจากนี้ ผลการเปรียบเทียบค่า a ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการความสัมพันธ์ที่ดีที่สุด (Suitable theoretical equation) และที่ได้ผลจากการทดลองจากการประยุกต์ใช้สมการดังกล่าวกับอุปกรณ์เดิมอากาศที่มีรูเดิมอากาศ 1, 4 และ 160 รูเดิมอากาศ จะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.46



รูปที่ 4.45 ผลการประยุกต์ใช้สมการทำนายค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทออกซิเจนของฟองอากาศ (ตารางที่ 4.7) ที่อัตราการไหลต่างๆ



รูปที่ 4.46 ผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสารของฟองอากาศที่ได้จากการทดลองและจากสมการทำนายทฤษฎี

จากรูป 4.45 – 4.46 พบว่าจากการทำนายค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (a) ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ พบว่าสมการ a-5 (ตาราง 4.7) สามารถใช้ทำนายค่า a ได้และความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 20 อย่างไรก็ตาม เนื่องจากงานวิจัยนี้ทำการศึกษาในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศที่มีขนาดเล็กและทำการทดลองด้วยอัตราไหลอากาศที่ค่อนข้างต่ำ ดังนั้น ในการประยุกต์ใช้สมการดังกล่าวในการทำนายค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (a) ซึ่งขึ้นกับหลากหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้องไม่ว่าจะเป็นด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ ด้านองค์ประกอบของถังปฏิกรณ์ที่เลือกใช้ รวมไปถึงลักษณะของเฟสน้ำที่ทำงานด้วย เป็นต้น

ดังนั้นในทางปฏิบัติ จึงควรพิจารณาหรือมีการใส่ค่าปรับแก้ (Correction factor) เพื่อสามารถนำสมการทำนายผลไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป ในกรณีนี้ เมื่อเราได้ค่า a จากการทำนายด้วยสมการในหัวข้อนี้ ดังนั้น ในหัวข้อต่อไปจะเป็นการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายผ่านฟิล์มของเหลว ( $K_L$ ) ซึ่งเป็นอีกหนึ่งองค์ประกอบของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ( $K_L a$ )

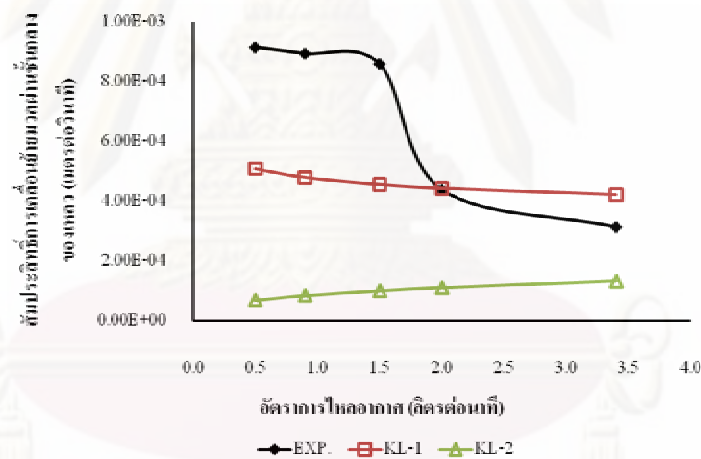
#### 4.5.4 แนวทางการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายผ่านฟิล์มของเหลว ( $K_L$ )

รูปที่ 4.47 แสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายผ่านฟิล์มของเหลว ( $K_L$ ) ที่อัตราการไหลของอากาศต่างๆ ของยางมิชลินที่เจาะรูด้วยอุปกรณ์ขนาดกลางจำนวน 160 รูและทำการทดลองที่อัตราการไหลของอากาศ 0.5 – 3.4 ลิตรต่อนาที โดยผลการทดลองที่ได้ จะทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการความสัมพันธ์ทางทฤษฎีซึ่งนิยมใช้ในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์  $K_L$  ที่เกิดจากการถ่ายเทมวลสารในรูปฟองอากาศ ดังตารางที่ 4.8

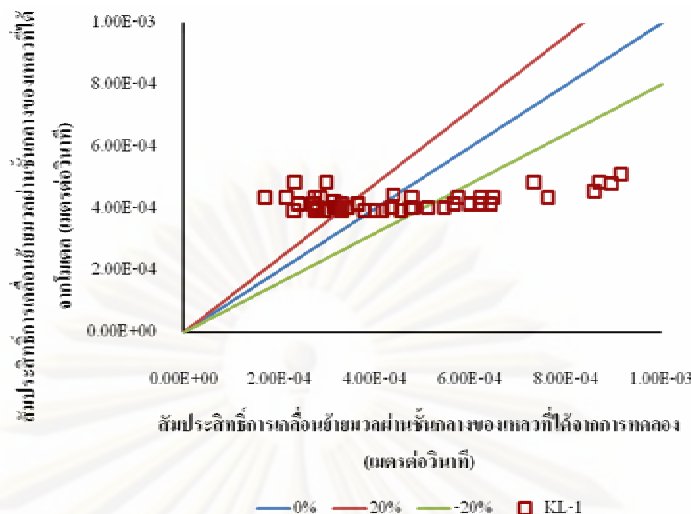
ตาราง 4.8 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายผ่านฟิล์มของเหลว ( $K_L$ )

ลำดับที่	ความสัมพันธ์	อ้างอิง
$K_{L-1}$	$K_L = 2 \left[ \frac{D_{O_2} \cdot UB}{\pi \cdot h} \right]^{0.5}$	Higbie (1972)
$K_{L-2}$	$K_L = \frac{D}{d_B} (2 + 0.6RE^{(1/2)} \cdot Sc^{(1/3)})$	Frossling (1978)

นอกจากนี้ ผลการเปรียบเทียบค่า  $K_L$  ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการความสัมพันธ์ที่ดีที่สุด (Suitable theoretical equation) และที่ได้ผลจากการทดลองจากการประยุกต์ใช้สมการดังกล่าวกับอุปกรณ์เดิมอากาศที่มีรูเดิมอากาศ 1, 4 และ 160 รูเดิมอากาศ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.48



รูปที่ 4.47 ผลการประยุกต์ใช้สมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายผ่านฟิล์มของเหลว ( $K_L$ ) (ตารางที่ 4.8) ที่อัตราการไหลต่างๆ



รูปที่ 4.48 ผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายผ่านฟิล์มของเหลว ( $K_L$ ) ที่ได้จากการทดลองและจากสมการทำนายทฤษฎี

จากรูป 4.47 – 4.48 พบว่ามีข้อจำกัดของการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์  $K_L$  โดยจากผลการทำนายค่า  $K_L$  ด้วยสมการ  $K_L-1$  แสดงให้เห็นว่าช่วงของค่า  $K_L$  ที่แม่นยำคือ  $3 \times 10^{-4}$  ถึง  $5 \times 10^{-4}$  ม./วินาที ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ค่า  $K_L$  เท่ากับ  $4 \times 10^{-4}$  ม./วินาที เพื่อเป็นตัวแทนของค่าสัมประสิทธิ์  $K_L$  โดยค่าดังกล่าวสอดคล้องกับค่าตามทฤษฎีที่วิเคราะห์การถ่ายเทมวลสารในรูปฟองอากาศ (Gillot และคณะ, 2005) ในอนาคตจึงน่าสนใจที่จะประยุกต์ใช้สมการทางทฤษฎีแบบอื่นๆ รวมไปถึงการเลือกใช้สมการทำนายค่า  $K_L$  ตามช่วงของขนาดฟองอากาศซึ่งมีการแบ่งออกเป็น 3 ส่วนจากการศึกษาของ Sardeing เพื่อพัฒนาความสามารถในการทำนายค่าตัวแปรดังกล่าวอย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

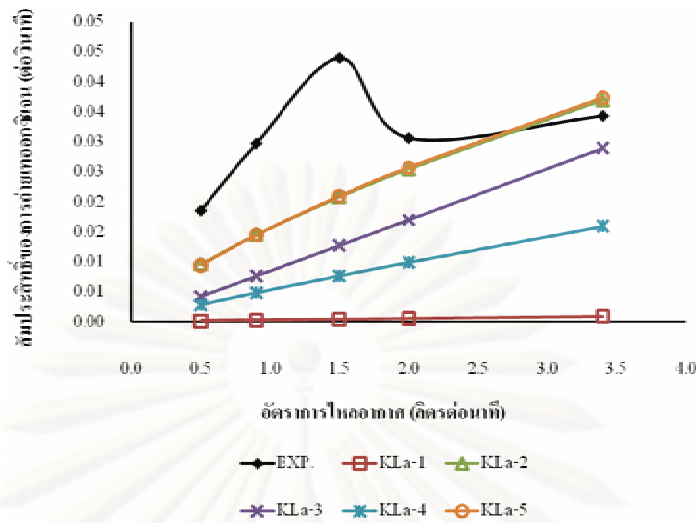
#### 4.5.5 แนวทางการทำนายค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทมวลสาร ( $K_{La}$ )

รูปที่ 4.49 แสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ( $K_{La}$ ) ที่อัตราการไหลของอากาศต่างๆ ของยางมิชลินที่เจาะรูด้วยอุปกรณ์ขนาดกลางจำนวน 160 รูและทำการทดลองที่อัตราการไหลของอากาศ 0.5 – 3.4 ลิตรต่อนาที โดยผลการทดลองที่ได้จะทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการความสัมพันธ์ทางทฤษฎีซึ่งนิยมใช้ในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์  $K_{La}$  ที่เกิดจากการถ่ายเทมวลสารในรูปฟองอากาศ ดังตารางที่ 4.9

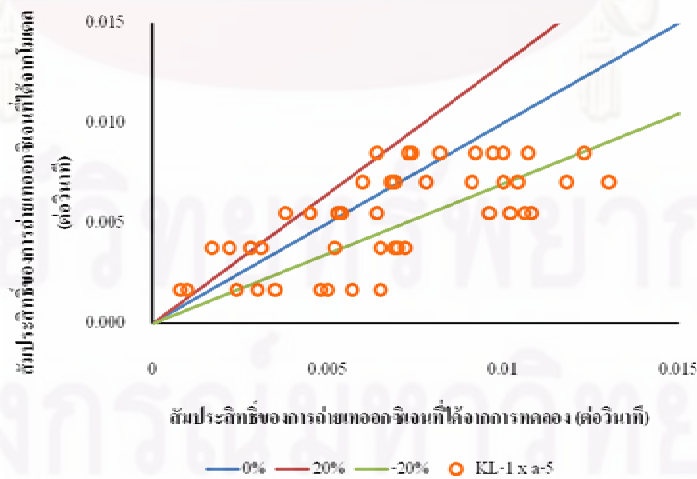
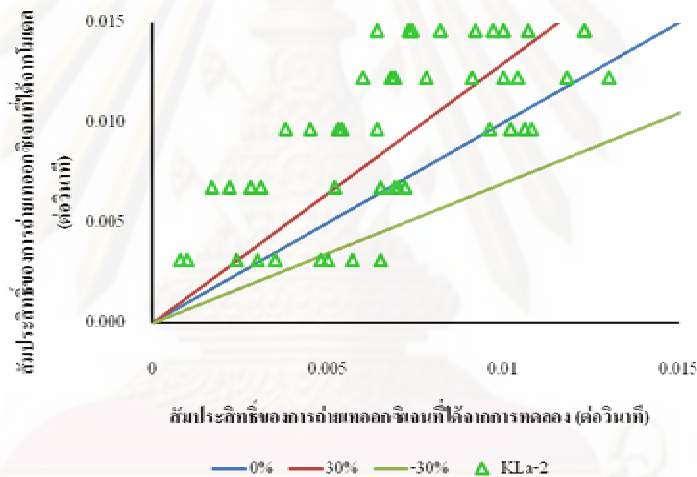
ตาราง 4.9 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายผ่านฟิล์มของเหลว ( $K_L a$ )

ลำดับที่	ความสัมพันธ์	อ้างอิง
$k_L a-1$	$k_L a = 0.0269 * U_G^{0.82}$	Deckwer et al. (1974)
$k_L a-2$	$k_L a = d_c^{0.17} * U_G^{0.7}$	Akita and Yoshida (1973)
$k_L a-3$	$\frac{k_L a}{U_G} \left( \frac{v_L^2}{g} \right)^{0.33} = 3.9 \cdot 10^{-5} * \left[ \frac{\mu_G}{(v_L \cdot g)^{0.33}} \right]^{-0.1}$	Deckwer et al. (1974)
$k_L a-4$	$k_L a = 0.041 \cdot \alpha \cdot \left( \frac{H_L}{d_B^{0.67}} \right) \cdot \left( \frac{d_{OR}}{D_C} \right)^{0.18} \cdot \left( \frac{U_G}{H_L} \right)$	Tomida et al. (1978)

นอกจากนี้ ค่า  $K_L a$  ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการความสัมพันธ์ที่ดีที่สุด (Suitable theoretical equation) รวมไปถึงค่าที่ได้จากผลคูณระหว่างค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ ( $a$ ) ที่ได้จากสมการทำนายค่าฟองอากาศ ( $D_B$ ) และความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ ( $U_B$ ) และค่าสัมประสิทธิ์  $K_L$  เท่ากับ 0.0004 เมตรต่อวินาที ( $K_L a = K_L * a$ ) จะได้นำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการประยุกต์ใช้สมการดังกล่าวกับอุปกรณ์เติมอากาศที่มีรูเติมอากาศ 1, 4 และ 160 รูเติมอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.50 และ 4.51 ตามลำดับ



รูปที่ 4.49 ผลการประยุกต์ใช้สมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ( $K_{La}$ ) (ตารางที่ 4.6) ที่อัตราการใช้ต่าง ๆ



รูปที่ 4.50 ผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ( $K_{La}$ ) ที่ได้จากการทดลองและจากสมการทำนายทฤษฎี

จากรูป 4.49 – 4.50 กล่าวได้ว่าการทำงานค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ( $K_{La}$ ) ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ (สมการที่  $K_{La-2}$ ) สามารถให้ค่าที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุดเมื่อเทียบกับอีก 3 สมการที่เหลือ อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ที่ได้ยังคงมีความคลาดเคลื่อนในการทำงานที่ค่อนข้างสูง โดยอาจมีสาเหตุมาจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับลักษณะทางกายภาพของระบบเดิมอากาศ เช่น ขนาดถังปฏิกรณ์ อุณหภูมิเดิมอากาศที่เลือกใช้ ลักษณะของเฟสน้ำ เป็นต้น จึงส่งผลให้เกิดข้อจำกัดในการเลือกใช้ฐานแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีการนำเสนอจากงานวิจัยอื่นๆ

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับแนวการทำงานค่า  $K_{La}$  ด้วยผลคูณระหว่างค่าสัมประสิทธิ์  $K_L$  และค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ ( $a$ ) ที่ทำนายได้ข้างต้น จะพบว่าสามารถทำนายค่าสัมประสิทธิ์  $K_{La}$  ที่มีความแม่นยำมากกว่า (แต่ยังมีความคลาดเคลื่อนในการทำงานประมาณร้อยละ 30) โดยพบว่ามีความคลาดเคลื่อนในการทำงานโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อัตราไหลอากาศต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับข้อจำกัดในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์  $K_L$  ในช่วงดังกล่าว (รูปที่ 4.47) โดยอาจกล่าวได้ว่า ในขณะที่การทดลองเพื่อวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์  $K_{La}$  มีประเด็นสำคัญหลายข้อที่ควรพิจารณา ได้แก่ ระยะเวลาและความยุ่งยากในการวิเคราะห์ การเตรียมอุปกรณ์ที่จำเป็น และทักษะของผู้วิเคราะห์ ดังนั้นการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้เพื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์  $K_{La}$  ซึ่งเป็นผลคูณระหว่างค่า  $K_L$  และค่า  $a$  ซึ่งมาจากการทำนายค่าขนาดของฟองอากาศ ( $D_B$ ) และความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ ( $U_B$ ) จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยอำนวยความสะดวก และบรรเทาความยุ่งยากดังกล่าว

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบวัสดุยึดหยุ่น ได้แก่ ยางมิชลิน ยางบริดสโตน และยางพารา เพื่อประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์เติมอากาศแบบฟองอากาศ โดยจะพิจารณาลักษณะสมบัติต่างๆ ทั้งในด้านกายภาพ ในด้านลักษณะการเกิดฟองอากาศ และในด้านการถ่ายเทออกซิเจน โดยมีข้อสรุปดังนี้

5.1.1 การศึกษาสภาพทางกายภาพของวัสดุยึดหยุ่นพบว่า ยางมิชลินและบริดสโตนมีความทนทานและความยืดหยุ่นที่สูงกว่ายางพารา นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาในด้านของความดันลดพบว่า ยางมิชลินและยางบริดสโตนมีค่าความดันลดใกล้เคียงกันและมีค่าน้อยกว่ายางพารา เนื่องจากความดันลดแปรผันตรงกับความแข็งของวัสดุซึ่งต้องใช้พลังงานในการเป่าหรือขยายรูเติมอากาศเพื่อสร้างฟองอากาศ

5.1.2 การศึกษาขนาดอุปกรณ์เจาะรูเติมอากาศและขนาดรูเติมอากาศที่เหมาะสม เราสามารถสรุปประเด็นต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้ดังนี้

- จากการศึกษาตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศภายใต้ปฏิกิริยา เช่น ขนาดของฟองอากาศ ( $D_B$ ) ความถี่ในการเกิดฟอง ( $f_B$ ) ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ ( $U_B$ ) และพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร ( $a$ ) พบว่ารูเติมอากาศขนาดเล็กจะให้ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสารที่มีค่าสูงที่สุด โดยค่า  $a$  จะเพิ่มขึ้นค่อนข้างเป็นเส้นตรงเมื่ออัตราการไหลของก๊าซสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม พลังงานที่ใช้ในการก่อกำเนิดฟองให้มีขนาดเล็กนั้นต้องใช้พลังงานมาก
- ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ( $K_L a$ ) มีการเปลี่ยนแปลงเป็น 3 ช่วง คือ 1) อัตราการไหลของอากาศ 0.1 – 0.3 ลิตรต่อนาที ค่า  $K_L a$  มีค่าต่ำ เนื่องจากที่อัตราการไหลของอากาศต่ำ มีฟองอากาศเกิดขึ้นค่อนข้างน้อย 2) ค่า  $K_L a$  เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้นในช่วง 0.3 – 0.5 ลิตรต่อนาที เนื่องจากฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีจำนวนฟองอากาศเพิ่มขึ้นทำให้พื้นที่ผิวในการถ่ายเทออกซิเจนมากขึ้น 3) ค่า  $K_L a$  ค่อนข้างคงที่ คือไม่เปลี่ยนแปลงตามอัตราการเติมอากาศ เมื่ออัตราการไหลของอากาศมีค่าสูงกว่า 0.5 ลิตรต่อนาที เนื่องจาก



ฟองอากาศมีขนาดใหญ่และมีจำนวนฟองอากาศมากจนเต็มความสามารถของน้ำในการรับออกซิเจน

- ขางมิชลินที่เจาะรูด้วยอุปกรณ์ขนาดเล็กและขนาดกลางจะให้ฟองอากาศที่ใกล้เคียงกันและมีขนาดเล็ก จึงส่งผลให้ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (a) มีค่ามาก และเป็นปัจจัยสำคัญทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ( $K_L a$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายผ่านฟิล์มของเหลว ( $K_L$ ) พบว่ามีค่าค่อนข้างคงที่ระหว่าง  $3 - 5 \times 10^{-4}$  เมตรต่อวินาที
- ดังนั้นจากผลการทดลองนี้ จึงเลือกขางมิชลินที่เจาะรูด้วยเข็มขนาดกลางเป็นอุปกรณ์เติมอากาศแบบยัดหยุ่นสำหรับการศึกษาในด้านอื่นต่อไป

5.1.3 การศึกษาระยะห่างระหว่างรูเติมอากาศที่เหมาะสม เราสามารถสรุปประเด็นต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้ดังนี้

- ขางมิชลินที่มีรูเติมอากาศขนาดกลางและมีระยะห่างระหว่างรู 4 - 6 มม. ให้ขนาดฟองอากาศที่มีขนาดใกล้เคียงกันและมีขนาดเล็กกว่าค่าที่ได้จากระยะห่าง 2 - 3 มม. ดังนั้น จึงส่งผลดีต่อค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (a) ที่ได้
- เมื่อพิจารณาขนาดฟองอากาศที่ 1 รู และ 4 รู พบว่าขนาดฟองอากาศที่ 4 รู มีขนาดใหญ่กว่า 1 รู เนื่องจากเกิดปรากฏการณ์รวมตัวของฟองอากาศภายในถังปฏิกิริยา แต่จำนวนฟองที่เกิดในกรณี 4 รูที่สูงกว่า 1 รู จึงส่งผลให้มีค่าความถี่ในการเกิดฟองอากาศ ( $f_b$ ) และพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร (a) มีค่ามากกว่า
- ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ( $K_L a$ ) และประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจน (OTE) จึงแปรตรงกับจำนวนรูเติมอากาศและระยะห่างระหว่างรูเติมอากาศที่เหมาะสม
- จากผลการทดลองในส่วนนี้ จึงเลือกขางมิชลินที่เจาะรูเติมอากาศด้วยอุปกรณ์ขนาดกลาง โดยมีระยะห่างระหว่างรูเติมอากาศเท่ากับ 4 มม. เพื่อเป็นอุปกรณ์เติมอากาศแบบยัดหยุ่น โดยจะได้ทำการศึกษาเพื่อออกแบบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจน ในหัวข้อต่อไป

5.1.4 การออกแบบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของอุปกรณ์เติมอากาศแบบยัดหยุ่น เราสามารถสรุปประเด็นต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้ดังนี้

- ขนาดฟองอากาศ ที่เกิดจากขางมิชลินที่มีการเจาะรูเติมอากาศระยะห่าง 4 มม. จำนวน 160 รูเติมอากาศ มีค่าค่อนข้างคงที่ (ประมาณ 2.8 มม.) และมีค่าต่ำที่สุด

เมื่อเทียบกับค่า  $D_B$  ที่ได้จากอุปกรณ์เติมอากาศชนิด 1 และ 4 รูเติมอากาศ โดยสัมพันธ์กับการที่อัตราการไหลอากาศที่ผ่าน 1 รู ( $q$ ) ที่มีค่าต่ำมากๆ เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จาก 1 และ 4 รู ทำให้ค่าความยืดหยุ่น ( $W_0$ ) มีค่าต่ำที่สุดและส่งผลให้ขนาดรูเติมอากาศ ( $D_{OR}$ ) ที่ขยายตัวมีขนาดเล็กตามไปด้วย ดังนั้น ขนาดฟองอากาศที่ได้จึงมีขนาดเล็กที่สุด

- ค่าความถี่ในการเกิดฟองอากาศ จากขงามิซลินที่มีการเจาะรูเติมอากาศระยะห่าง 4 มม. จำนวน 160 รูเติมอากาศ มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากกรณี 1 และ 4 รู อย่างชัดเจน เนื่องจากการที่อัตราการไหลอากาศต่อ 1 รู ของ 160 รู ต่ำมาก ทำให้ได้ขนาดฟองอากาศเล็กและส่งผลต่อการรวมตัวของฟองอากาศน้อยกว่าแบบ 4 รู
- ค่าความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ จากขงามิซลินที่มีการเจาะรูเติมอากาศระยะห่าง 4 มม. จำนวน 160 รูเติมอากาศ มีค่าค่อนข้างคงที่ (25 - 30 เซนติเมตรต่อวินาที) และมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากกรณี 1 และ 4 รูเติมอากาศ ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่าค่า  $U_B$  ขึ้นอยู่กับขนาดฟองอากาศ ( $D_B$ ) และลักษณะของเฟสน้ำที่เกี่ยวข้อง (liquid phase characteristics) เท่านั้น โดยพลังงานที่เกิดขึ้นจากจำนวนฟองอากาศที่เพิ่มขึ้นภายในถังปฏิกริยานั้น ไม่ได้ส่งผลต่อค่าความเร็ว  $U_B$  รวมไปถึงค่าเวลากักของฟองอากาศ ( $T_B$ ) ภายในถังปฏิกริยา
- ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร จากขงามิซลินที่มีการเจาะรูเติมอากาศระยะห่าง 4 มม. จำนวน 160 รูเติมอากาศ มีค่าใกล้เคียงกับ 4 รูเติมอากาศ เนื่องจากการที่อัตราการไหลอากาศต่อจำนวนรู ( $q$ ) ที่มีค่าต่ำนั้น จะส่งผลต่อค่าความถี่ในการเกิดฟองอากาศแต่ละรูเติมอากาศและจำนวนฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีจำนวนน้อยลงด้วย ดังนั้นค่า  $a$  ที่ได้จึงมีค่าต่ำและใกล้เคียงกันระหว่าง 4 และ 160 รูเติมอากาศเสมือนว่าค่า  $a$  ในช่วงอัตราการไหลต่ำๆ นี้ถูกคุมด้วยปริมาณอากาศที่เข้ารูอุปกรณ์เติมอากาศ
- ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร จากขงามิซลินที่มีการเจาะรูเติมอากาศระยะห่าง 4 มม. จำนวน 160 รูเติมอากาศ มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากกรณี 4 รูเติมอากาศเล็กน้อย (15%) ในงานวิจัยนี้พบว่าค่า  $K_L a$  ของขงามิซลินที่เจาะ 160 รูนั้น มีค่ามากที่สุดและน้อยที่สุด คือ 0.0441 ต่อวินาที และ 0.0186 ต่อวินาที โดยค่า  $K_L a$  จะเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนรูเติมอากาศเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก ในขณะที่ เมื่อจำนวนรูเติมอากาศมากกว่า 44 รู จะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์  $K_L a$  ที่ได้มีค่าจะเริ่มคงที่ (ประมาณ 0.049 ต่อวินาที)

- ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายผ่านฟิล์มของเหลว ของยางมิชลินที่มีการเจาะรูเติมอากาศระยะห่าง 4 มม. จำนวน 160 รูเติมอากาศ มีค่าระหว่าง 0.0031 – 0.0048 เมตรต่อวินาที ค่าสัมประสิทธิ์  $K_L$  ที่ได้จากกรณี 160 รูเติมอากาศมีค่าสูงกว่าที่ได้จากทั้ง 1 และ 4 รูเติมอากาศ
- ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน (OTE) ของอุปกรณ์เติมอากาศแบบยึดหยุ่นที่ได้จากยางมิชลินที่เจาะรูด้วยระยะห่าง 4 มม ด้วยอุปกรณ์เจาะรูขนาดกลางจำนวน 160 รูเติมอากาศ พบว่าที่อัตราการเติมอากาศที่ 0.5 ลิตรต่อนาที วัสดุยึดหยุ่นที่เจาะรูเติมอากาศ 160 รู จะให้ค่า OTE สูงที่สุดประมาณ 6.3 % และมีค่ามากกว่าที่ได้จากกรณีของ 1 และ 4 รูเติมอากาศ และค่า OTE จะลดลงเมื่ออัตราการไหลอากาศเพิ่มขึ้น ในงานวิจัยนี้พบว่าค่า OTE สูงสุดและต่ำสุดจะพบที่อัตราการไหลอากาศ 0.5 และ 3.4 ลิตรต่อนาที

#### 5.1.5 การประยุกต์ใช้สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อลักษณะทางอุทกพลศาสตร์และการถ่ายเทออกซิเจนของฟองอากาศที่เกิดจากอุปกรณ์เติมอากาศชนิดยึดหยุ่น

- ขนาดฟองอากาศ ( $d_b$ ) สามารถใช้เป็นตัวแปรหลักในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว ( $K_L$ ) พื้นที่สัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร ( $a$ ) และสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทมวลสาร ( $K_L a$ ) ได้โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
- การทำนายค่าขนาดของฟองอากาศ ( $d_b$ ) ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ ( $U_b$ ) และพื้นที่สัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร ( $a$ ) สามารถทำนายได้โดยสมการของ Hebrard ( $d_b$ -5) Mendelson ( $U_b$ -4) และ Moustiri ( $a$ -5) ได้ตามลำดับโดยที่มีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 20
- แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Higbie ( $K_L$ -1) และ Frossling ( $K_L$ -2) ไม่สามารถใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว ( $K_L$ ) ได้ แต่ใช้เป็นแนวทางในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์  $K_L$  เพื่อการทำนายค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทออกซิเจน ( $K_L a$ ) โดยในงานวิจัยนี้พบว่าสัมประสิทธิ์  $K_L$  มีค่าประมาณ  $4 \times 10^{-4}$  ม./วินาที
- การทำนายค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทมวลสาร ( $K_L a$ ) สามารถทำนายได้โดยสมการของ Akita และ Yoshida ( $K_L a$ -2) ซึ่งให้ค่าที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสมการอื่นๆ แต่ยังคงมีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง

เนื่องจากข้อจำกัดของการเลือกใช้งานแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีการนำเสนอจากงานวิจัยอื่นๆ

- การทำนายค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทมวลสาร ( $K_L a$ ) จากผลคูณของค่าสัมประสิทธิ์  $K_L$  และพื้นที่สัมผัสจำเพาะในการถ่ายเทมวลสาร ( $a$ ) สามารถให้ผลการทำนายค่าได้ และมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 30

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาและเปรียบเทียบผลกระทบในการเกิดฟองอากาศจากอุปกรณ์สร้างฟองอากาศแบบแข็ง (Rigid orifice) เพื่อเปรียบเทียบกับที่ได้จากแบบยืดหยุ่น (Flexible orifice)

5.2.2 ควรศึกษาผลกระทบจากการปนเปื้อนของเฟสน้ำ เช่น การเติมสารลดแรงตึงผิวของแข็งแขวนลอย จุลินทรีย์แขวนลอย เป็นต้น เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์และการถ่ายเทมวลสารของฟองอากาศ รวมไปถึงการอุดตันของอุปกรณ์เดิมอากาศที่ใช้

5.2.3 ควรดำเนินการศึกษาและยืนยันผลการทดลองที่ได้ในช่วงหรือสภาพการทำงาน (Operating condition) ที่กว้างมากขึ้น เช่น คอลัมน์ที่มีขนาดใหญ่ อัตราการไหลของก๊าซที่สูงขึ้น เป็นต้น

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- กชกร ก้องกังวาลย์. การศึกษาอุปกรณ์เติมอากาศชนิดหุ่นแบบท่อในด้านการถ่ายเทออกซิเจนและอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14, 2552.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. ตำราฉบับดัดแปลง. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. วิศวกรรมการกำจัดน้ำเสีย. เล่มที่ 3 พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มิตรนราการพิมพ์, 2537.
- มันสิน ตันฑุลเวศม์. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม. เล่มที่ 1. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- มันสิน ตันฑุลเวศม์. วิศวกรรมการประปา. เล่มที่ 1. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. ยาง. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร, 2548.

### ภาษาอังกฤษ

- Akita, K., and Yoshi, F. Gas holdup and volumetric mass transfer coefficient in bubble column Chemical Engineering Journal 12(1973): 76.
- Bouaifi, M., Hebrard, G., Bastoul, D., and Roustan, M. A comparative study of gas hold-up, bubble size, interfacial area and mass transfer coefficients in stirred gas-liquid reactors and bubble columns. Chemical Engineering Science 40 (2001): 97-111.
- Deckwer, W.D., Burckart, R., and Zoll, G. Mixing and mass transfer in tall bubble Column. Chemical Engineering Science 29(1974): 2177 – 2188.
- Frossling, P. Mass transfer from very small bubble the optimum bubble size for aeration. Chemical Engineering Science 41(1978): 1415-1423.
- Frumkin, A. and Levich V.G. (1947), On surfactants an interfacial motion. Chemical Engineering Journal 21(1947) :1183 – 1204.

- Gestrich, W., and Krauss, W. Dynamic of bubble growth and detachment from rigid and flexible orifice. Chemical Engineering Science 47(1975): 360.
- Grace, J.R., and Wairegi, T. Properties and Characteristics of Drops and Bubbles. Encyclopedia of Fluid Mechanics. Huston: Cheremisinoff. Gulf Publishing Corporation, 1986
- Hadamard, J.S., and Ryazantsev. Chemical Engineering Journal 152(1911): 1735 – 1738.
- Hasanen, A., Orivuori, P., and Aittamaa, J. Measurements of local bubble size distributions from various flexible membrane diffusers. Chemical Engineering Science 45 (2006): 291-302.
- Hebrard, G., Bastoul D., and Roustan M. Influence of the gas spargers on the hydrodynamic behaviour of bubble columns. Chemical Engineering Science 74 (1996): 406-414.
- Higbie, R. Fundamentals of the hydrodynamic mechanism of splitting in dispersion processes. Chemical Engineering Science 50(1972): 321-332
- Kumar, A., Delgaleesan, T.E., Laddha, G.S., and Hoelscher, H.E. Canadian Journal of Chemical Engineering 54(1976): 503.
- Leibson, I., Helcomb E.G., Cocoso A.G., and Jacmie J.J. Chemical Engineering Science 152(1956): 1735-1738.
- Loubiere, K., and Hebrard, G. Bubble formation from a flexible hole submerged in an inviscid liquid. Chemical Engineering Science 58 (2003): 135-148.
- Loubiere, K., and Hebrard, G. Influence of liquid surface tension (surfactants) on bubble formation at rigid and flexible orifices. Chemical Engineering Science 43 (2004): 1361-1369.
- Mendelson, H.D. The prediction of bubble terminal velocities from wave theory. Chemical Engineering Journal 13(1967): 250-253.
- Painmanakul, P., Loubiere, K., Hebrard, G., and Buffiere, P. Study of different membrane spargers uses in waste water treatment: characterisation and performance. Chemical Engineering Science 43 (2004): 1347-1359.
- Painmanakul, P., and Jamnongwong, M. Theoretical Prediction of Mass Transfer Parameters in Small Bubble Column. Asian-Pacific Regional conference on Practical Environmental Technology, Thailand. (2007)
- Roustan, M. Two-phase hydrodynamic study for a rectangular air-lift loop reactor with an internal baffle. Chemical Engineering Science 54(2005): 5245-5252.

- Sardeing, R., Painmanakul, P., And Hebrard, G. Effect of surfactants on liquid side mass transfer coefficient in gas-liquid systems . Chemical engineering science 37(2006): 534 – 539.
- Tomida, T., Yusa F and Okazaki. Chemical Engineering Journal 16(1978): 81.
- Van Dierendonck, L.J., Fortuin, J.M., and Venderbos D. Industrial Engineering Chemical Program 52(1968): 205.
- Van Krevelen, W. and Jackson, M.J. Industrial Engineering Chemical Program, 46(1959): 29.
- Wilkinson P.M., Haringa H. and Van Dierendonck L.L. Mass transfer and Bubble Size in a bubble column under pressur. Chemical Engineering Science 49(1994): 1417-1427.



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



### ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ก-1 ผลการศึกษาผลการศึกษาดัชนีแปรผันด้านอุทกพลศาสตร์ ได้แก่ ขนาดฟองอากาศ ( $D_B$ ) ความเร็วฟองอากาศ ( $U_B$ ) พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะฟองอากาศ (a)

ภาคผนวก ก-1.1 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟองอากาศ ( $D_B$ ) กับอัตราการไหลอากาศของยางมิชลินที่เจาะ 1 รู

อัตราการไหลอากาศ (ล./นาที)	ขนาดฟองอากาศ (มม.)		
	เข็มเล็ก	เข็มกลาง	เข็มใหญ่
0.1	2.803	3.062	3.515
0.3	2.875	3.191	3.627
0.5	3.193	3.487	3.807
0.7	3.514	3.772	4.206
0.9	3.977	4.186	4.438

ภาคผนวก ก-1.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟองอากาศ ( $D_B$ ) กับอัตราการไหลอากาศของยางบริดส โตนที่เจาะ 1 รู

อัตราการไหลอากาศ (ล./นาที)	ขนาดฟองอากาศ (มม.)		
	เข็มเล็ก	เข็มกลาง	เข็มใหญ่
0.1	3.024	3.216	3.443
0.3	3.108	3.305	3.504
0.5	3.382	3.541	3.746
0.7	3.615	3.829	3.981
0.9	4.072	4.102	4.221

ภาคผนวก ก-1.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟองอากาศ ( $D_B$ ) กับอัตราการไหลอากาศของยางพาราที่เจาะ 1 รู

อัตราการไหลอากาศ (ล./นาที)	ขนาดฟองอากาศ (มม.)		
	เข็มเล็ก	เข็มกลาง	เข็มใหญ่
0.1	3.328	3.531	3.605
0.3	3.425	3.596	3.731
0.5	3.662	3.812	3.928
0.7	3.973	4.155	4.236
0.9	4.321	4.424	4.637

ภาคผนวก ก-1.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วฟองอากาศ ( $U_B$ ) กับอัตราการไหลอากาศของยางมิชลินที่เจาะ 1 รู

อัตราการไหลอากาศ (ล./นาที)	ความเร็วฟองอากาศ (m/s)		
	เข็มเล็ก	เข็มกลาง	เข็มใหญ่
0.1	0.280	0.270	0.270
0.3	0.270	0.270	0.260
0.5	0.270	0.250	0.250
0.7	0.260	0.250	0.250
0.9	0.260	0.245	0.250

ภาคผนวก ก-1.5 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วฟองอากาศ ( $U_B$ ) กับอัตราการไหลอากาศของยางบริดส์โตนที่เจาะ 1 รู

อัตราการไหลอากาศ (ล./นาที)	ความเร็วฟองอากาศ (m/s)		
	เข็มเล็ก	เข็มกลาง	เข็มใหญ่
L/min.	m/s.	m/s.	m/s.
0.1	0.280	0.270	0.270
0.3	0.270	0.270	0.260
0.5	0.270	0.250	0.250
0.7	0.260	0.250	0.250
0.9	0.260	0.245	0.250

ภาคผนวก ก-1.6 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วฟองอากาศ ( $U_B$ ) กับอัตราการไหลอากาศของยางพาราที่เจาะ 1 รู

อัตราการไหลอากาศ (ล./นาที)	ความเร็วฟองอากาศ (m/s)		
	เข็มเล็ก	เข็มกลาง	เข็มใหญ่
0.1	0.270	0.255	0.250
0.3	0.250	0.255	0.250
0.5	0.250	0.250	0.250
0.7	0.260	0.250	0.240
0.9	0.250	0.240	0.240

ภาคผนวก ก-1.7 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะฟองอากาศ (a) กับอัตราการไหลอากาศของยางมิชลินที่เจาะ 1 รู

อัตราการไหลอากาศ (ล./นาท)	พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ ( $m^2/m^3$ )		
	เข็มเล็ก	เข็มกลาง	เข็มใหญ่
0.1	7.290	6.912	6.482
0.3	21.322	20.634	18.852
0.5	34.369	33.989	29.934
0.7	47.219	43.989	39.450
0.9	53.642	50.964	48.070

ภาคผนวก ก-1.8 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะฟองอากาศ (a) กับอัตราการไหลอากาศของยางบริดสโตนที่เจาะ 1 รู

อัตราการไหลอากาศ (ล./นาท)	พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ ( $m^2/m^3$ )		
	เข็มเล็ก	เข็มกลาง	เข็มใหญ่
0.1	6.999	6.825	6.375
0.3	21.185	19.922	18.791
0.5	32.448	33.470	31.639
0.7	45.899	43.334	41.679
0.9	52.390	52.007	50.541

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก-1.9 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะของอากาศ (a) กับอัตราการไหลอากาศของยางพาราที่เจาะ 1 รู

อัตราการไหลอากาศ (ล./นาที)	พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ ( $m^2/m^3$ )		
	เข็มเล็ก	เข็มกลาง	เข็มใหญ่
L/min.	$m^2/m^3$	$m^2/m^3$	$m^2/m^3$
0.1	6.595	6.581	6.515
0.3	20.356	19.387	19.060
0.5	32.236	31.091	30.173
0.7	41.763	39.934	39.970
0.9	50.174	50.231	46.946

ภาคผนวก ก-1.10 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟองอากาศ ( $D_b$ ) กับอัตราการไหลอากาศของยางมิซลินเจาะ 4 รู ที่ระห่างต่างๆ

อัตราการไหลอากาศ (ล./นาที)	ขนาดฟองอากาศ (mm.)				
	ระยะห่าง				
	2 mm.	3 mm.	4 mm.	5 mm.	6 mm.
0.5	3.843	3.618	3.396	3.298	3.104
0.9	4.217	4.082	3.434	3.176	3.219
1.5	4.431	4.378	3.614	3.581	3.422
2.0	4.622	4.689	3.962	3.787	3.857
3.4	4.947	5.136	4.344	4.156	4.293

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก-1.11 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วฟองอากาศ ( $U_b$ ) กับอัตราการไหลอากาศของยางมิชลินเจาะ 4 รู ที่ระยะห่างต่างๆ

อัตราการไหลอากาศ (ล./นาที)	ความเร็วฟองอากาศ (m/s.)				
	ระยะห่าง				
	2 mm.	3 mm.	4 mm.	5 mm.	6 mm.
0.5	0.240	0.245	0.250	0.255	0.260
0.9	0.245	0.250	0.265	0.265	0.265
1.5	0.245	0.250	0.260	0.260	0.260
2.0	0.250	0.250	0.245	0.245	0.250
3.4	0.240	0.240	0.250	0.250	0.250

ภาคผนวก ก-1.12 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะฟองอากาศ (a) กับอัตราการไหลอากาศของยางมิชลินเจาะ 4 รู ที่ระยะห่างต่างๆ

อัตราการไหลอากาศ (ล./นาที)	พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะฟองอากาศ ( $m^2/m^3$ )				
	ระยะห่าง				
	2 mm.	3 mm.	4 mm.	5 mm.	6 mm.
0.5	30.84	32.12	32.31	32.67	32.92
0.9	51.62	52.26	59.73	58.92	60.25
1.5	81.88	81.21	96.45	95.47	99.91
2.0	102.57	101.10	119.66	122.73	122.91
3.4	169.70	163.46	189.31	193.92	187.73

ภาคผนวก ก-1.13 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟองอากาศ ( $D_B$ ) กับอัตราการไหลอากาศของยางมิชลินเจาะ 160 รู

อัตราการไหล (ล./นาท)	ขนาดฟองอากาศ (mm.)
0.5	2.732
0.9	2.946
1.5	3.134
2.0	3.421
3.4	3.865

ภาคผนวก ก-1.14 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วฟองอากาศ ( $U_B$ ) กับอัตราการไหลอากาศของยางมิชลินเจาะ 160 รู

อัตราการไหล (ล./นาท)	ความเร็วฟองอากาศ (m/s)
0.5	0.280
0.9	0.285
1.5	0.290
2.0	0.260
3.4	0.250

ภาคผนวก ก-1.14 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะฟองอากาศ (a) กับอัตราการไหลอากาศของยางมีซิลินเจอะ 160 รู

อัตราการไหล (ล./นาท)	พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะฟองอากาศ ( $m^2/m^3$ )
0.5	36.151
0.9	61.368
1.5	97.803
2.0	133.248
3.4	208.519

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก ก-2 ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของยางมิซลินแข็งกลาง

เวลา (วินาที)	$C_t$ (มก./ล.)				
	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
0	0.10	0.05	0.09	0.12	0.04
5	0.22	0.22	0.31	0.67	1.13
10	0.34	0.34	0.54	0.85	2.58
15	0.43	0.46	0.74	1.03	3.50
20	0.54	0.56	1.24	1.23	4.17
25	0.71	0.72	1.36	1.45	4.59
30	0.88	0.90	1.57	1.71	4.71
35	1.04	1.10	2.03	1.90	4.62
40	1.24	1.32	2.67	2.14	4.93
45	1.49	1.56	2.86	2.38	5.18
50	1.67	1.74	2.87	2.62	5.19
55	1.87	1.91	2.89	2.85	4.95

ภาคผนวก ก-2 ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของยางมิชลินเข็มกลาง

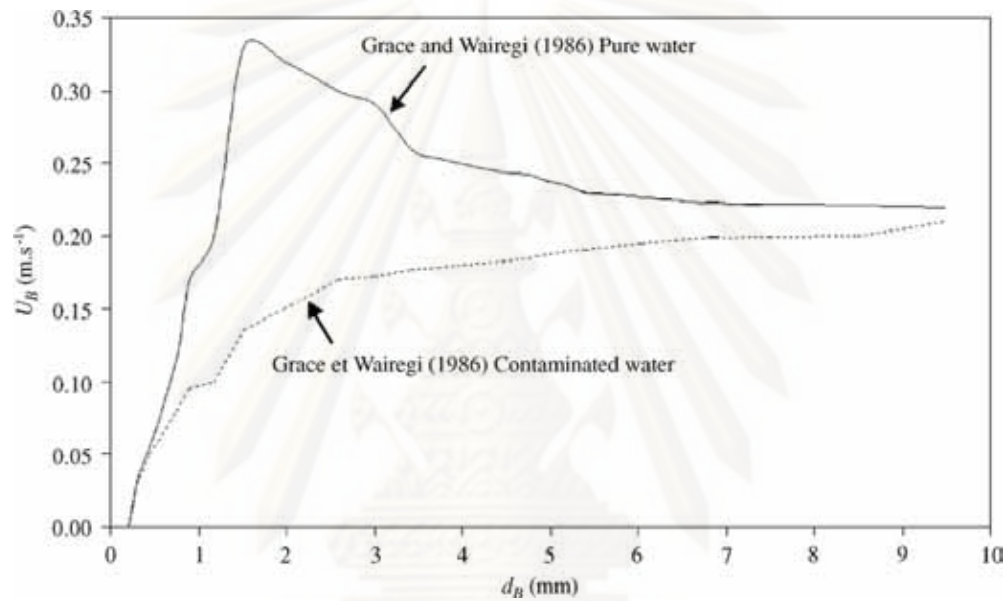
เวลา (วินาที)	$C_t$ (มก./ล.)				
อัตราการไหล (ล./นาที)	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
60	2.08	2.10	4.15	3.07	5.17
90	2.92	3.28	4.86	4.24	5.28
120	3.69	4.08	5.58	5.25	5.50
150	4.20	4.73	6.31	5.81	5.54
180	4.65	5.18	6.75	6.29	5.36
210	5.06	5.59	6.85	6.59	5.58
240	5.44	5.91	6.97	6.82	6.27
270	5.65	6.22	7.17	6.97	6.57
300	5.80	6.37	7.18	7.09	6.86
330	6.00	6.55	7.22	7.16	6.93
360	6.21	6.70	7.26	7.21	7.17
390	6.32	6.82	7.30	7.25	7.29

## ภาคผนวก ก-2 ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของยางมิชลินเข็มกลาง

เวลา (วินาที)	$C_t$ (มก./ล.)				
	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
อัตราการไหล (ล./นาที)					
420	6.47	6.87	7.33	7.29	7.42
450	6.54	6.94	7.45	7.31	7.43
480	6.62	7.00	7.38	7.32	7.45
510	6.70	7.04	7.36	7.33	7.47
540	6.77	7.07	7.37	7.34	7.49
570	6.80	7.10	7.38	7.34	7.49
600	6.82	7.12	7.38	7.35	7.51
630	7.02	7.14	7.38	7.35	7.51
660	7.00	7.16	7.25	7.35	7.51
690	7.04	7.21	7.24	7.35	7.50
720	7.03	7.25	7.25	7.35	7.51
750	7.09	7.24	7.25	7.36	7.51

### ภาคผนวก ข

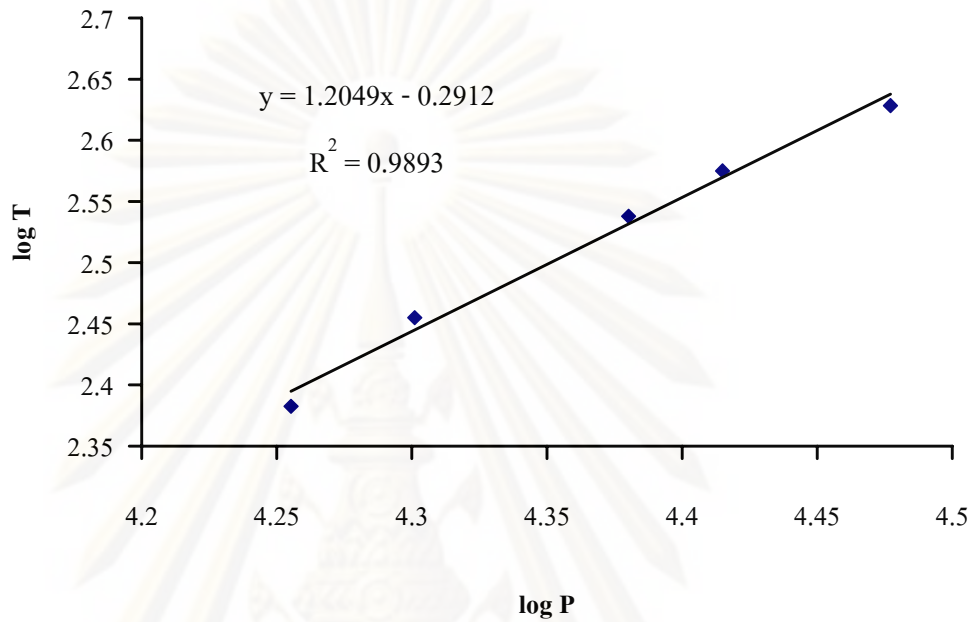
ภาคผนวก ข-1 รูปความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของฟองอากาศ และขนาดฟองอากาศ ใช้สำหรับ หาคความเร็วของฟองอากาศจากการทดลอง (Grace และ Wairegi, 1986)



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

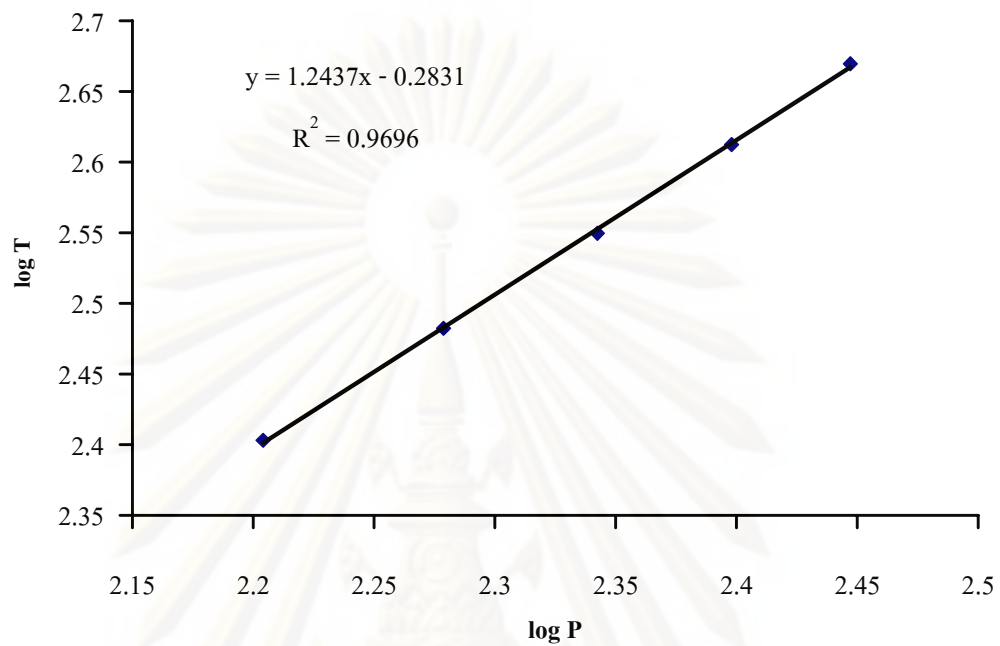
ภาคผนวก ข-2 รูปการวิเคราะห์ค่า K กับ n ของยางมิชลิน

ภาคผนวก ข-2.1 รูปการวิเคราะห์ค่า K กับ n ของยางมิชลิน โดยใช้เข็มเล็กเจาะรู



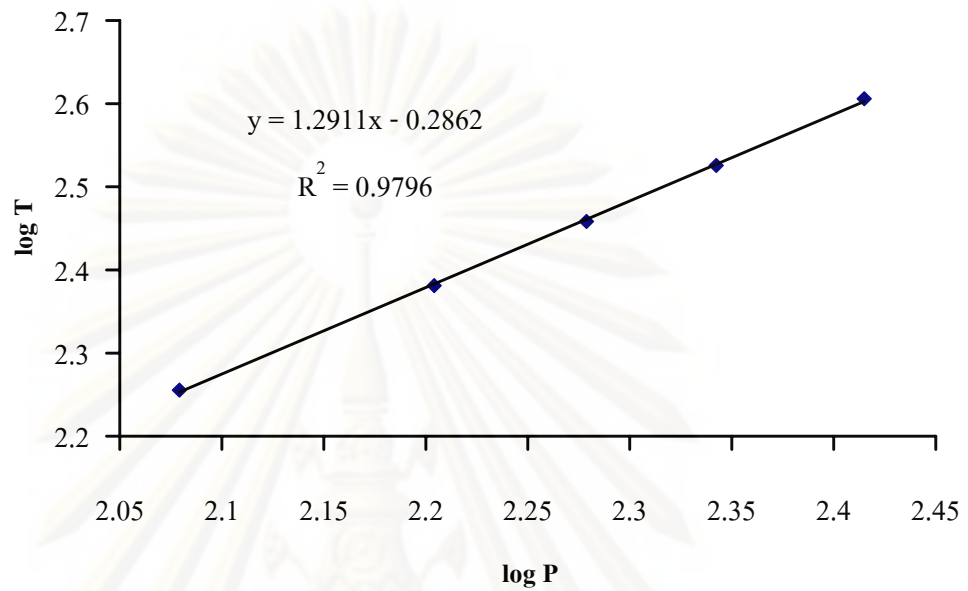
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข-2.2 รูปการวิเคราะห์ค่า K กับ n ของยางมิชลิน โดยใช้เข็มกลางเจาะรู



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข-2.3 รูปการวิเคราะห์ค่า K กับ n ของยางมิชลิน โดยใช้เข็มใหญ่เจาะรู



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวจิตาภา วชิรศักดิ์ เกิดวันที่ 5 มิถุนายน 2525 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ในปีการศึกษา 2547 ก่อนเข้าศึกษาต่อ  
ในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย