

การวิเคราะห์อุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่นจากของเสียประเภทยาง
ในกระบวนการเติมอากาศ



นายนราพงศ์ หงส์ประสิทธิ์

ศูนย์วิทยพัทยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

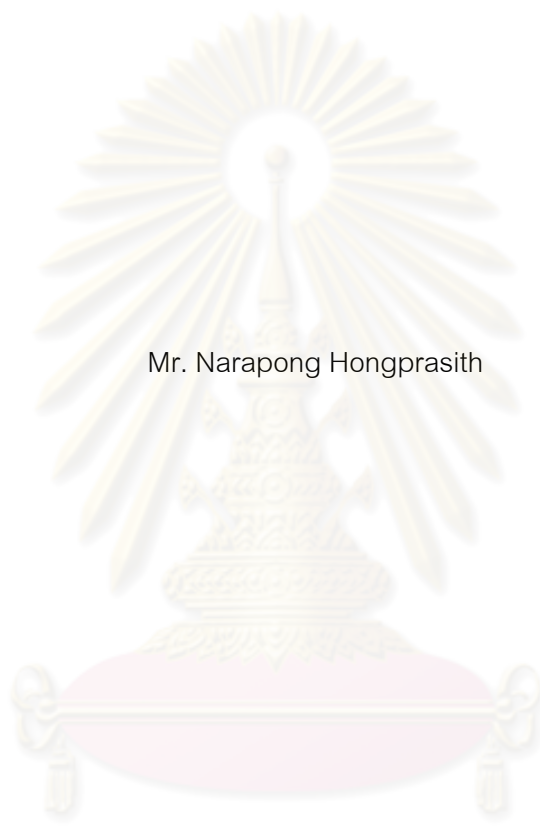
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ANALYSIS OF FLEXIBLE AERATION DIFFUSER TUBE
FROM RUBBER WASTE IN AERATION PROCESS



Mr. Narapong Hongprasith

ศูนย์วิทยทรัพยากร
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 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์อุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่นจาก
ของเสียประเภทยางในกระบวนการเติมอากาศ

โดย

นายนราพงศ์ หงส์ประสิทธิ์


สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

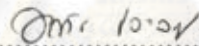
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

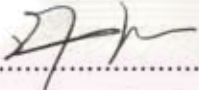
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล

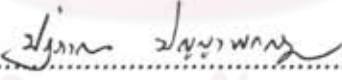
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้แก่นักศึกษานี้ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

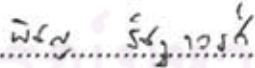

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศนिरุญวงศ์)

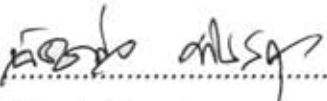
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อรัทัย ขวาลภาฤทธิ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล)

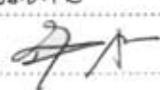

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ฉัตรแก้ว ตันตกุล)

นายนาพงศ์ หงส์ประสิทธิ์ : การวิเคราะห์อุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่นจากของเสียประเภทยางในกระบวนการเติมอากาศ. (ANALYSIS OF FLEXIBLE AERATION DIFFUSER TUBE FROM RUBBER WASTE IN AERATION PROCESS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ เทียมมนกุล, 185 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาแนวทางการประยุกต์ใช้ท่อยืดหยุ่นเป็นอุปกรณ์เติมอากาศแบบท่อ โดยศึกษาสมบัติทางกายภาพของท่อยืดหยุ่น ได้แก่ ความหนาแน่นท่อ ความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) ความแข็ง (Hardness) และ ความยืด (Elongation) เพื่อเลือกตัวอย่างท่อที่เหมาะสม โดยเปรียบเทียบสมรรถภาพด้วยการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ($k_L a$) และประสิทธิภาพเชิงพลังงานในถังเติมอากาศปริมาตรประมาณ 10 ลิตร โดยศึกษากลไกการถ่ายเทออกซิเจนและผลกระทบจากสารเจือปนในน้ำ (ดินขาว เกสโซ และเซลลูลูส) ต่อการถ่ายเทออกซิเจนโดยวิเคราะห์ตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสารและอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ รวมถึงวิเคราะห์การอุดตันและวิธีทำความสะอาดที่เหมาะสม จากนั้นศึกษารูปแบบการจัดเรียงท่อที่เหมาะสมในถังเติมอากาศขนาด 2,500 ลิตร รูปแบบการกระจายของเรซิเดนซ์ไทม์ (RTD) และประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์ $k_L a$ เพื่อให้ผลการวิจัยเป็นข้อมูลเบื้องต้นประกอบการออกแบบและประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่นในกระบวนการเติมอากาศได้อย่างเหมาะสม

จากผลการทดลอง พบว่า ท่อยืดหยุ่นตัวอย่างที่ 6.3 มีความเหมาะสมในการประยุกต์เป็นอุปกรณ์เติมอากาศแบบท่อ เนื่องจากมีสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมทั้งในด้านการถ่ายเทออกซิเจน และในด้านการใช้พลังงาน การเติมอากาศในน้ำเกลือทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กและมีพื้นที่สัมผัสจำเพาะมาก ส่วนน้ำที่มีเซลลูลูสส่งผลกระทบต่อกระบวนการซึมของออกซิเจนผ่านชั้นกลางของเหลวทำให้สัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว (k_c) ลดลงอย่างมาก ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยการวิเคราะห์ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการถ่ายเทมวลสาร จากการวิเคราะห์การอุดตันของอุปกรณ์พบว่าไม่ควรหยุดเติมอากาศนานเกิน 3 วัน และควรทำความสะอาดด้วยวิธีการเป่าลมด้วยความดัน 3 บาร์ นาน 30 นาที สำหรับผลกระทบจากรูปแบบการจัดเรียงท่อเติมอากาศพบว่าให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนประมาณร้อยละ 15.08 และให้รูปแบบการกระจายของเรซิเดนซ์ไทม์ใกล้เคียงกัน โดยควรออกแบบโดยใช้ท่อยาว 7.5 ม. ต่อพื้นที่กั้นถังเติมอากาศ 1.33 ตร.ม. นอกจากนี้จากการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์ $k_L a$ พบว่ามีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าร้อยละ 20

ภาควิชา วิศวกรรมศาสตร์สิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต นายนาพงศ์ หงส์ประสิทธิ์
สาขาวิชา วิศวกรรมศาสตร์สิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก 

ปีการศึกษา 2553

5170345521: MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: AERATION PROCESS / FLEXIBLE AERATION DIFFUSER TUBE /
VOLUMETRIC MASS TRANSFER COEFFICIENT / BUBBLE HYDRODYNAMIC PARAMETERS

NARAPONG HONGPRASITH: ANALYSIS OF FLEXIBLE AERATION DIFFUSER
TUBE FROM RUBBER WASTE IN AERATION PROCESS.

THESIS ADVISOR: ASSISTANT PROFESSOR PISUT PAINMANAKUL, Ph.D., 185 pp.

The objective of this research is to study flexible aeration diffuser due to obtaining the optimal diffuser. The physical properties of the various rubber tubes (tube wall thickness, tensile strength, hardness and elongation) were analyzed. The oxygen transfer performances were compared in the term of volumetric mass transfer coefficient ($k_L a$) and energy efficiency occur in 10 liters of aeration tank. The effect of different contaminants (kaolin, NaCl and MLSS) on aeration mechanism was investigated in terms of bubble hydrodynamic and mass transfer parameters. Moreover, the tube fouling was studied and then the suitable cleaning method was proposed. In this study, the effect of tube layout located in tank with 2500 L was also considered by determining the $k_L a$ coefficients and residence time distribution (RTD). In addition, the theoretical prediction model was proposed and applied as a primary data in aeration system design and operation.

The result has shown that, from oxygen transfer and energy consumption, the tube No. 6.3 should be chosen as the suitable aeration diffuser. The aeration in NaCl solution affected on small bubble size which increased interfacial area (a). While the MLSS condition affected on the oxygen transfer which decreased liquid-side mass transfer coefficient (k_L) significantly. The aeration should not be stopped longer than 3 days for avoiding the tube clogging. Air purging should be chosen as the suitable cleaning method with 3 bars of pressure in 30 min. From the study of tube layout, it can be found that the closed oxygen transfer efficiency (15.08%) and the residence time distribution were obtained. Note that the arrangement was applied with 7.5 m. of tube length per 1.33 m^2 of the bottom area of the tank. In addition, the suitable model was proposed for predicting the $k_L a$ with errors less than 20%.

Department: Environmental Engineering..... Student's Signature Narapong H.

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

Academic Year: 2010

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ผู้ให้คำปรึกษา คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆของการวิจัยมาโดยตลอด

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ์ รัฎาวงศ์ และดร.ฉัตรแก้ว ต้นสกุล ที่กรุณาใช้เวลาตรวจสอบเล่มวิทยานิพนธ์และร่วมเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทุกๆท่านที่ได้ให้ความรู้ในทุกๆรายวิชา

ขอกราบขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาให้ทุนสนับสนุนการวิจัยจนสำเร็จการศึกษา

ขอขอบพระคุณ บริษัท เจริญภัทรพานิช จำกัด ผู้สนับสนุนอุปกรณ์ในการทดลอง

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ ผู้กรุณาให้ทุนการศึกษาตลอดจนกำลังใจมาโดยตลอด

ขอกราบขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทุกๆท่านที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ และให้คำแนะนำในการใช้งานห้องปฏิบัติการและเครื่องมือเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ พี่ เพื่อน และน้องทุกคนที่ให้ความช่วยเหลืออยู่เสมอ

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์นี้ ขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ชื่อวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 คำสำคัญ.....	1
1.3 ที่มา และความสำคัญของปัญหา.....	1
1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 กระบวนการเติมอากาศ (Aeration process).....	6
2.2 ทฤษฎี “Two film theory”.....	7
2.3 การถ่ายเทออกซิเจน (Oxygen transfer).....	8
2.3.1 ขั้นตอนของการถ่ายเทออกซิเจนจากสถานะก๊าซไปสู่ สถานะของเหลวหรือการเติมอากาศ.....	9
2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเติมอากาศ.....	9
2.4 การประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน.....	10
2.4.1 การประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำสะอาด.....	10
2.4.2 การประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำเสีย.....	12
2.5 ความสามารถในการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศ (Oxygenation Capacity, OC).....	13
2.6 อัตราการถ่ายเทออกซิเจน (Oxygen transfer rate, OTR).....	13
2.7 ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน (Oxygen transfer efficiency, OTE).....	14

2.8	ผลกระทบจากอุณหภูมิต่อการถ่ายเทออกซิเจน	14
2.9	ผลกระทบจากสภาวะการทำงานจริงต่อการถ่ายเทออกซิเจน	15
2.10	ผลกระทบจากส่วนประกอบในน้ำต่อการถ่ายเทออกซิเจน	16
2.11	ผลกระทบจากการอุดตันต่อการถ่ายเทออกซิเจน	16
2.12	การปรับแก้ค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนโดยใช้ตัวคูณปรับแก้	17
2.13	ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ (Bubble hydrodynamic parameters)	18
2.13.1	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (Bubble diameter, d_B)	19
2.13.2	ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (Bubble rising velocity, U_B)	19
2.13.3	ระยะเวลาการเกิดฟองอากาศ (Bubble formation time, T_B) และ ความถี่ของการเกิดฟองอากาศ (Bubble formation frequency, f_B)	20
2.13.4	พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างก๊าซและของเหลว (Interfacial area, a)	22
2.14	ความดันขณะเติมอากาศ (Pressure, P) และกำลังที่จำเป็น (Energy consumption)	23
2.15	การทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ	25
2.16	อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการเติมอากาศ	28
2.16.1	อุปกรณ์กระจายอากาศ (Diffused aeration)	28
2.16.2	อุปกรณ์เติมอากาศทางกล (Mechanical aeration)	37
2.16.3	เครื่องเป่าอากาศ (Blower)	39
2.16.4	ท่ออากาศ (Air piping)	41
2.17	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	41
บทที่ 3 ขั้นตอน และวิธีดำเนินการวิจัย		48
3.1	วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	48
3.1.1	ตัวอย่างยี่ดหยุ่น	48
3.1.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	49
3.1.3	สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	50
3.2	ตัวแปรที่สนใจศึกษา	51
3.3	วิธีการดำเนินงานวิจัย	53

3.3.1	การศึกษาสมบัติทางกายภาพของอุปกรณ์ เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่น.....	53
3.3.2	การศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสาร (Aeration performance parameters).....	53
3.3.3	การศึกษาผลกระทบจากสภาวะการทำงานต่างๆต่อประสิทธิภาพ การเติมอากาศ การอุดตัน และวิธีทำความสะอาดที่เหมาะสม.....	54
3.3.4	การศึกษารูปแบบการจัดเรียงท่อยืดหยุ่นในถังเติมอากาศ.....	56
3.3.5	การทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน.....	59
3.4	สรุปขั้นตอน และวิธีดำเนินงานวิจัย.....	59
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....		61
4.1	การศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารของอุปกรณ์เติมอากาศ ชนิดท่อยืดหยุ่น.....	61
4.1.1	การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน.....	61
4.1.2	การศึกษาสมบัติทางกายภาพของท่อยืดหยุ่น.....	64
4.1.3	การศึกษาตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ.....	68
4.2	การศึกษาผลกระทบจากสภาวะการทำงานต่างๆต่อประสิทธิภาพ การเติมอากาศ การอุดตัน และวิธีทำความสะอาดที่เหมาะสม.....	76
4.2.1	การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของท่อยืดหยุ่น ในสภาวะการทำงานต่างๆ.....	77
4.2.2	การศึกษาตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศขณะเติม อากาศในสภาวะการทำงานต่างๆ.....	85
4.2.3	การศึกษาระยะเวลาที่อาจก่อให้เกิดการอุดตันจากการหยุดเติมอากาศ.....	97
4.2.4	การศึกษาวิธีทำความสะอาดที่เหมาะสม.....	104
4.3	การศึกษารูปแบบการจัดเรียงท่อยืดหยุ่นในถังเติมอากาศ.....	111
4.3.1	การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน.....	112
4.3.2	ฟังก์ชันการกระจายเรซีเดนซ์ไทม์ (Retention Time Distribution, RTD).....	115
4.4	การทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน.....	117
4.4.1	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (d_B).....	117
4.4.2	ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (U_B).....	120
4.4.3	พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำ (a).....	123

4.4.4	สัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว (k_L)	126
4.4.5	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ($k_L a$)	130
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ		133
5.1	สรุปผลการวิจัย	133
5.2	ข้อเสนอแนะ	138
รายการอ้างอิง		139
ภาคผนวก		143
ภาคผนวก ก		144
ภาคผนวก ข		164
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์		185



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1	ตารางแสดงปริมาณก๊าซต่างๆในบรรยากาศ..... 6
ตารางที่ 2.2	ตารางแสดงปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิ และความดันบรรยากาศต่างๆ..... 7
ตารางที่ 2.3	ตารางแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (d_b)..... 26
ตารางที่ 2.4	ตารางแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่า ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (U_b)..... 27
ตารางที่ 2.5	ตารางแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่า พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างของเหลวและก๊าซ (a)..... 27
ตารางที่ 2.6	ตารางแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่า สัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว (k_L)..... 27
ตารางที่ 2.7	ตารางแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ($k_L a$)..... 28
ตารางที่ 3.1	ตารางแสดงสมบัติของท่อยึดหยุ่นในเบื้องต้นจากผู้ผลิต..... 48
ตารางที่ 3.2	ตารางแสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย และภาพประกอบ..... 50
ตารางที่ 3.3	ตารางแสดงสมบัติที่สนใจศึกษา และวิธีวิเคราะห์..... 51
ตารางที่ 3.4	ตารางแสดงลักษณะของน้ำที่สนใจศึกษา..... 52
ตารางที่ 4.1	สมบัติทางกายภาพของท่อยึดหยุ่น..... 64
ตารางที่ 4.2	ประสิทธิภาพและตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศของท่อยึดหยุ่น ตัวอย่างต่างๆ..... 75
ตารางที่ 4.3	สมบัติของน้ำที่ต้องการเติมอากาศ..... 76
ตารางที่ 4.4	ประสิทธิภาพและตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศของท่อยึดหยุ่น ในสภาวะการเติมอากาศต่างๆ..... 110
ตารางที่ 4.5	ตัวคูณปรับแก้ของการดูดตันของท่อยึดหยุ่นจากการศึกษาวิธีทำความสะอาด ที่เหมาะสม..... 110
ตารางที่ 4.6	ความดันขณะเติมอากาศของท่อยึดหยุ่นจากการศึกษาวิธีทำความสะอาด ที่เหมาะสม..... 111

ตารางที่ 4.7	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับทำนายขนาดฟองอากาศ.....	119
ตารางที่ 4.8	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับทำนายความเร็ว ลอยตัวของฟองอากาศ.....	122
ตารางที่ 4.9	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับทำนายค่าสัมประสิทธิ์ การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว.....	129
ตารางที่ 5.1	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับการทำนายค่าสัมประสิทธิ์ การถ่ายเทออกซิเจน.....	136



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

	หน้า	
รูปที่ 1.1	แผนผังแสดงกระบวนการรีไซเคิลของเสียประเภทยาง และผลิตเป็นอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่น.....	2
รูปที่ 1.2	ภาพแสดงผลสัมฤทธิ์อุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่นจากการรีไซเคิล ของเสียประเภทยาง และการใช้งานในกระบวนการเติมอากาศ.....	2
รูปที่ 2.1	การถ่ายเทมวลสารตามทฤษฎี “Two film theory”.....	8
รูปที่ 2.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในน้ำกับเวลา.....	11
รูปที่ 2.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(C_s - C_t)$ กับเวลา เพื่อหาค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน.....	12
รูปที่ 2.4	ภาพจำลองแสดงระยะเวลาการเกิดฟองอากาศ.....	20
รูปที่ 2.5	ภาพแสดงสมมูลของความดันขณะเกิดฟองอากาศบนอุปกรณ์เติมอากาศ ชนิดท่อยืดหยุ่น.....	23
รูปที่ 2.6	ภาพแสดงอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดฟองอากาศขนาดเล็ก.....	29
รูปที่ 2.7	ภาพแสดงอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดฟองอากาศขนาดใหญ่.....	30
รูปที่ 2.8	ภาพแสดงอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดแผ่น.....	31
รูปที่ 2.9	ภาพแสดงอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดท่อ.....	32
รูปที่ 2.10	ภาพแสดงอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดโดม.....	32
รูปที่ 2.11	ภาพแสดงอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดแผ่นจาน.....	33
รูปที่ 2.12	ภาพแสดงอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดฟิกซ์ออร์ฟิส.....	34
รูปที่ 2.13	ภาพแสดงอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดสแตติกทิวบ์.....	34
รูปที่ 2.14	ภาพแสดงอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดสล๊อตทิวบ์.....	34
รูปที่ 2.15	ภาพแสดงอุปกรณ์เติมอากาศชนิดเจ็ท.....	35
รูปที่ 2.16	ภาพแสดงอุปกรณ์เติมอากาศชนิดแอสไปเรติง.....	36
รูปที่ 2.17	ภาพแสดงระบบเติมอากาศแบบยูทิวบ์.....	36
รูปที่ 2.18	ภาพแสดงอุปกรณ์เติมอากาศทางกลบนผิวน้ำในแนวตั้ง.....	37
รูปที่ 2.19	ภาพแสดงอุปกรณ์เติมอากาศทางกลใต้น้ำในแนวตั้ง.....	38
รูปที่ 2.20	ภาพแสดงอุปกรณ์เติมอากาศทางกลบนผิวน้ำในแนวนอน (ก้านขั้วพัฒนา).....	38
รูปที่ 2.21	ภาพแสดงอุปกรณ์เติมอากาศทางกลใต้น้ำในแนวนอน.....	39
รูปที่ 2.22	ภาพแสดงเครื่องเป่าอากาศชนิดเซนตริฟูกอล.....	40

รูปที่ 2.23	ภาพแสดงเครื่องเป่าอากาศชนิดโรตารีโลบ.....	40
รูปที่ 2.24	ภาพแสดงเครื่องเป่าอากาศชนิดอินเล็ตไทด์เวนวาเรียเบิลดีฟฟิวเซอร์.....	41
รูปที่ 2.25	ภาพแสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	42
รูปที่ 2.26	ภาพแสดงรูปแบบการจัดเรียงท่อยึดหยุ่นเป็นวงกลมรูปก้นหอย.....	43
รูปที่ 2.27	ภาพแสดงการเกิดฟองอากาศโดยเมมเบรนที่ถูกเจาะรู 4 รู.....	45
รูปที่ 2.28	ภาพแสดงการเกิดฟองอากาศจากอุปกรณ์กระจายอากาศซึ่งถูกใช้งาน เป็นระยะเวลานาน.....	46
รูปที่ 3.1	ภาพแสดงท่อยึดหยุ่นที่ใช้เป็นอุปกรณ์เติมอากาศ.....	49
รูปที่ 3.2	ภาพแสดงชุดอุปกรณ์วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ในห้องปฏิบัติการ.....	49
รูปที่ 3.3	ภาพจำลองแสดงรูปแบบการจัดเรียงท่ออย่างยึดหยุ่นในถังเติมอากาศ.....	52
รูปที่ 3.4	ภาพแสดงการติดตั้งท่อยึดหยุ่นกับชุดอุปกรณ์วิเคราะห์ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน.....	53
รูปที่ 3.5	แผนผังแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำประปา.....	54
รูปที่ 3.6	แผนผังแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ การถ่ายเทออกซิเจนในสภาวะต่างๆ.....	55
รูปที่ 3.7	แผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษาการอุดตันจากการหยุดเติมอากาศ.....	56
รูปที่ 3.8	ภาพแสดงตัวอย่างรูปแบบการจัดเรียงอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยึดหยุ่น.....	57
รูปที่ 3.9	ภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์วิเคราะห์ฟังก์ชันการกระจายเวซิเดนซ์ใหม่.....	57
รูปที่ 3.10	แผนผังสรุปขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	60
รูปที่ 4.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และอัตราการไหลของอากาศ.....	61
รูปที่ 4.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน และอัตราการไหลของอากาศ.....	62
รูปที่ 4.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทออกซิเจน และอัตราการไหลของอากาศ.....	63
รูปที่ 4.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและอัตรา การไหลของอากาศ ของตัวอย่างท่อยึดหยุ่นที่วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ.....	65

รูปที่ 4.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันขณะเติมอากาศและอัตราการไหลของอากาศ ของตัวอย่างท่อยึดหยุ่นที่วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ.....	66
รูปที่ 4.6	ภาพแสดงพื้นผิวผนังท่อและรูเติมอากาศของท่อยึดหยุ่น.....	67
รูปที่ 4.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศ.....	69
รูปที่ 4.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันขณะเติมอากาศและอัตราการไหลของอากาศ.....	70
รูปที่ 4.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลอยตัวของฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศ.....	71
รูปที่ 4.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศและน้ำและอัตราการไหลของอากาศ.....	72
รูปที่ 4.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศ.....	72
รูปที่ 4.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวและอัตราการไหลของอากาศ.....	73
รูปที่ 4.13	ภาพถ่ายฟองอากาศขณะเติมอากาศด้วยตัวอย่างท่อยึดหยุ่นที่ 6.3.....	74
รูปที่ 4.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาว.....	77
รูปที่ 4.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาว.....	78
รูปที่ 4.16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาว.....	79
รูปที่ 4.17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเกลือ.....	80
รูปที่ 4.18	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเกลือ.....	81
รูปที่ 4.19	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเกลือ.....	82
รูปที่ 4.20	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยของแข็งแขวนลอยในรูปเซลล์จุลชีพ.....	83

รูปที่ 4.21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยของแข็งแขวนลอยในรูปแบบเซลล์จุลชีพ.....	84
รูปที่ 4.22	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยของแข็งแขวนลอยในรูปแบบเซลล์จุลชีพ.....	84
รูปที่ 4.23	ภาพถ่ายฟองอากาศขณะเติมอากาศในน้ำที่ถูกเจือปนด้วยดินขาวเปรียบเทียบกับในน้ำประปา.....	86
รูปที่ 4.24	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาว.....	86
รูปที่ 4.25	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลอยตัวของฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาว.....	87
รูปที่ 4.26	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศและน้ำและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาว.....	88
รูปที่ 4.27	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาว.....	88
รูปที่ 4.28	ภาพถ่ายฟองอากาศขณะเติมอากาศในน้ำที่ถูกเจือปนด้วยเกลือเปรียบเทียบกับในน้ำประปา.....	89
รูปที่ 4.29	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเกลือ.....	90
รูปที่ 4.30	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลอยตัวของฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเกลือ.....	91
รูปที่ 4.31	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศและน้ำและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเกลือ.....	92
รูปที่ 4.32	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเกลือ.....	92
รูปที่ 4.33	ภาพถ่ายฟองอากาศขณะเติมอากาศในน้ำที่ถูกเจือปนด้วยเซลล์จุลชีพเปรียบเทียบกับในน้ำประปา.....	93
รูปที่ 4.34	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพ.....	94
รูปที่ 4.35	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลอยตัวของฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพ.....	95

รูปที่ 4.36	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศและน้ำและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพ.....	96
รูปที่ 4.37	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพ.....	96
รูปที่ 4.38	ภาพถ่ายท่อยืดหยุ่นที่ถูกแช่ในสภาวะต่างๆ.....	98
รูปที่ 4.39	ภาพถ่ายท่อยืดหยุ่นที่ถูกแช่ในสภาวะต่างๆโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน.....	98
รูปที่ 4.40	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวคูณการปรับแก้ของการอุดตันและอัตราการไหลของอากาศของท่อยืดหยุ่นที่ถูกแช่ในสภาวะต่างๆ.....	100
รูปที่ 4.41	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันขณะเต็มอากาศและอัตราการไหลของอากาศของท่อยืดหยุ่นที่ถูกแช่ในน้ำประปา.....	101
รูปที่ 4.42	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันขณะเต็มอากาศและอัตราการไหลของอากาศของท่อยืดหยุ่นที่ถูกแช่ในสภาวะต่างๆ.....	102
รูปที่ 4.43	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวคูณการปรับแก้ของการอุดตันและอัตราการไหลของอากาศของท่อยืดหยุ่นที่ถูกแช่ในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพ.....	103
รูปที่ 4.44	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันขณะเต็มอากาศและอัตราการไหลของอากาศของท่อยืดหยุ่นที่ถูกแช่ในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพ.....	104
รูปที่ 4.45	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวคูณการปรับแก้ของการอุดตันหลังทำความสะอาดและอัตราการไหลของอากาศของท่อยืดหยุ่นที่อุดตันด้วยดินขาว.....	105
รูปที่ 4.46	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันขณะเต็มอากาศหลังทำความสะอาดและอัตราการไหลของอากาศของท่อยืดหยุ่นที่อุดตันด้วยดินขาว.....	106
รูปที่ 4.47	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวคูณการปรับแก้ของการอุดตันหลังทำความสะอาดและอัตราการไหลของอากาศของท่อยืดหยุ่นที่อุดตันด้วยเซลล์จุลชีพ.....	107
รูปที่ 4.48	ภาพถ่ายท่อยืดหยุ่นที่อุดตันด้วยเซลล์จุลชีพ.....	107
รูปที่ 4.49	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันขณะเต็มอากาศหลังทำความสะอาดและอัตราการไหลของอากาศของท่อยืดหยุ่นที่อุดตันด้วยเซลล์จุลชีพ.....	108
รูปที่ 4.50	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวคูณการปรับแก้ของการอุดตันหลังทำความสะอาดและอัตราการไหลของอากาศของท่อยืดหยุ่นที่อุดตันด้วยเซลล์จุลชีพในช่วง 3 วัน.....	109
รูปที่ 4.51	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันขณะเต็มอากาศหลังทำความสะอาดและอัตราการไหลของอากาศของท่อยืดหยุ่นที่อุดตันด้วยเซลล์จุลชีพในช่วง 3 วัน.....	109

รูปที่ 4.52	รูปแบบการจัดเรียงท่อยึดหยุ่น.....	112
รูปที่ 4.53	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหล ของอากาศของการจัดเรียงท่อยึดหยุ่นรูปแบบต่างๆ.....	113
รูปที่ 4.54	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศของการจัดเรียงท่อยึดหยุ่นรูปแบบต่างๆ.....	113
รูปที่ 4.55	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันขณะเต็มอากาศและอัตราการไหลของอากาศของการจัดเรียงท่อยึดหยุ่นรูปแบบต่างๆ.....	114
รูปที่ 4.56	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศของการจัดเรียงท่อยึดหยุ่นรูปแบบต่างๆ.....	114
รูปที่ 4.57	กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ฟังก์ชันการกระจายเวลากักน้ำ.....	116
รูปที่ 4.58	กราฟแสดงผลการทำนายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ.....	117
รูปที่ 4.59	กราฟแสดงความแม่นยำของผลทำนายขนาดฟองอากาศ.....	119
รูปที่ 4.60	กราฟแสดงผลการทำนายความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ.....	120
รูปที่ 4.61	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลอยตัวของฟองอากาศกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ โดย Grace และ Wairegi (1986).....	122
รูปที่ 4.62	กราฟแสดงความแม่นยำของผลทำนายความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ.....	123
รูปที่ 4.63	กราฟแสดงผลการทำนายพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำ.....	123
รูปที่ 4.64	กราฟแสดงความแม่นยำของผลทำนายพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำ.....	125
รูปที่ 4.65	กราฟแสดงผลการทำนายสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว.....	126
รูปที่ 4.66	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ.....	128
รูปที่ 4.67	กราฟแสดงความแม่นยำของผลทำนายค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว.....	129
รูปที่ 4.68	กราฟแสดงผลการทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน.....	130
รูปที่ 4.69	กราฟแสดงความแม่นยำของผลทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน.....	132

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ชื่อวิทยานิพนธ์

ภาษาไทย : การวิเคราะห์อุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่นจากของเสียประเภทยาง
ในกระบวนการเติมอากาศ

ภาษาอังกฤษ : Analysis of flexible aeration diffuser tube from rubber waste in aeration
process

1.2 คำสำคัญ

กระบวนการเติมอากาศ	(Aeration process)
อุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่น	(Flexible aeration diffuser tube)
ปรากฏการณ์การเกิดฟอง	(Bubble generation phenomena)
การถ่ายเทออกซิเจน	(Oxygen transfer)
ของเสียประเภทยาง	(Rubber waste)

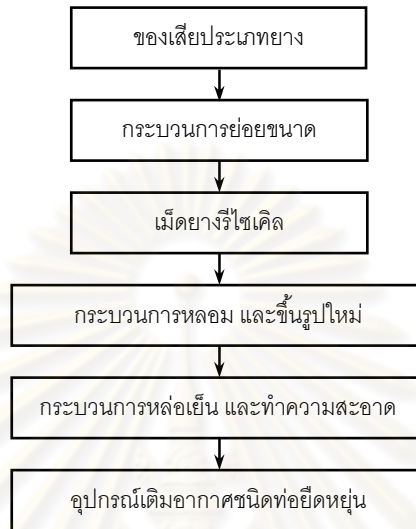
1.3 ที่มา และความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากยางมีคุณสมบัติความยืดหยุ่น (Elasticity) ความเหนียว (Toughness) ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear Strength) และความทนทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) เป็นวัสดุที่ทนทานต่อแรงดึง และแรงกดทับได้ดี มีความสามารถคืนรูปได้จึงนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น ยางรถยนต์ ส่วนประกอบในยานพาหนะ ฉนวนหุ้มสายไฟ ท่อยาง ผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ และภาชนะหีบห่ออาหาร เป็นต้น ทำให้ปริมาณของเสียประเภทยางเพิ่มมากขึ้น และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามจำนวนประชากร

ปัจจุบันการกำจัดของเสียประเภทยางในประเทศไทยมีหลายวิธี เช่น การทิ้งในที่โล่ง (Dumping) แต่มีข้อเสียคือ อาจเป็นแหล่งเพาะพันธุ์สัตว์พาหะนำโรค เสี่ยงต่อการเกิดเพลิงไหม้ และทำให้ทัศนียภาพไม่สวยงาม การฝังกลบ (Landfill disposal) จัดเป็นแนวทางหนึ่งที่มีการประยุกต์ใช้ในปัจจุบันแต่มีข้อเสียคือ ลิ่นเบลอพื้นที่หลุมฝังกลบเพราะของเสียประเภทยางย่อยสลายตามธรรมชาติได้ยากเนื่องจากการปรับปรุงสมบัติทางเคมี นอกจากนั้นการนำไปเผา (Incineration) หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาของโรงปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นวิธีที่ดีทำให้ได้พลังงานมาใช้ประโยชน์ และสามารถลดปริมาณของเสียได้รวดเร็ว แต่จำเป็นต้องมีการควบคุมมลพิษอากาศที่ดีด้วย และบางกรณีการนำไปเผาทำให้สูญเสียทรัพยากรโดยไม่จำเป็น เนื่องจากของเสียประเภทยางยังไม่สูญเสียคุณสมบัติของยางซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นได้ เพราะฉะนั้นการนำของเสียกลับไปใช้ใหม่ (Reuse) และการรีไซเคิล (Recycle) จึงเป็นวิธีที่ควรคำนึงถึงเป็นอันดับแรกเพื่อลดปริมาณของเสียที่ต้องกำจัด และเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า

การนำของเสียประเภทยางมารีไซเคิลเพื่อผลิตเป็นท่อยืดหยุ่นสำหรับใช้ในกระบวนการเติมอากาศเป็นแนวทางหนึ่งช่วยลดปริมาณของเสียที่ต้องกำจัด และส่งเสริมการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่ามากขึ้น

เนื่องจากกระบวนการรีไซเคิลดังกล่าวสามารถทำได้ในประเทศไทย ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถใช้งานได้หลากหลาย เช่น ใช้ในกระบวนการเติมอากาศเพื่อเลี้ยงสัตว์น้ำ ใช้ในกระบวนการเติมอากาศเพื่อบำบัดน้ำเสีย และใช้กระจายน้ำเพื่อรดน้ำต้นไม้ในการเกษตร หรืองานตกแต่งสวน เป็นต้น อีกทั้งต้นทุนในการรีไซเคิลไม่สูงทำให้สามารถทดแทนอุปกรณ์เติมอากาศที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีราคาแพงได้



รูปที่ 1.1 แผนผังแสดงกระบวนการรีไซเคิลของเสียประเภทยาง และผลิตเป็นอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่น



รูปที่ 1.2 ภาพแสดงผลิตภัณฑ์อุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่นจากการรีไซเคิลของเสียประเภทยาง และการใช้งานในกระบวนการเติมอากาศ

กระบวนการเติมอากาศ (Aeration process) คือ กระบวนการถ่ายเทออกซิเจนจากสถานะก๊าซไปสู่สถานะของเหลวเพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายในของเหลวหรือน้ำให้สูงขึ้น แต่เนื่องจากความสามารถในการละลาย (Solubility) ของออกซิเจนต่ำทำให้ปริมาณการถ่ายเทออกซิเจนสู่น้ำต่ำไปด้วย พื้นที่สัมผัสจำเพาะ (Interfacial area) ระหว่างผิวอากาศกับน้ำตามปกติจึงไม่ทำให้เกิดการถ่ายเทออกซิเจนที่เพียงพอ กับความต้องการของสัตว์น้ำซึ่งใช้ออกซิเจนในการหายใจ หรือการใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ เพื่อให้ได้ปริมาณออกซิเจนเพียงพอต่อความต้องการจึงจำเป็นต้องเพิ่มอัตราการถ่ายเทออกซิเจน (Oxygen transfer rate) โดยการลดขนาดฟองอากาศ เพิ่มความถี่ของการเกิดฟองอากาศ เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัส และควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการเติมอากาศให้เหมาะสม เพื่อควบคุมความเร็วลอยตัวของฟองอากาศให้มีเวลาสัมผัสกับน้ำนานขึ้น และป้องกันการปั่นป่วนของพื้นที่สัมผัสซึ่งจะรบกวนการถ่ายเทออกซิเจน เนื่องจากอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยึดหยุ่นซึ่งผลิตมาจากการรีไซเคิลของเสียประเภทยางมีสมบัติความพรุน และความยืดหยุ่นที่ดีซึ่งทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กได้ จึงมีความเป็นไปได้ที่จะประยุกต์ใช้ในระบบการเติมอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อย่างไรก็ตาม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการเติมอากาศ และปรับปรุงสมบัติของท่อยึดหยุ่นให้เหมาะแก่การใช้ในระบบการเติมอากาศมากยิ่งขึ้น จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเรื่องสมบัติของท่อยึดหยุ่นที่เหมาะสมสำหรับการใช้ในระบบการเติมอากาศ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ($k_L a$) ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ (Bubble hydrodynamic parameters) ประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสาร (Aeration performance parameters) ความดันขณะเติมอากาศ (Pressure, P) พลังงานที่จำเป็น (Energy consumption) การจัดเรียงท่อยึดหยุ่นในถังเติมอากาศ ผลกระทบจากของแข็งแขวนลอย ของแข็งละลาย และของแข็งแขวนลอยในรูปของเซลล์จุลินทรีย์ (Mixed Liquor Suspended Solids, MLSS) ต่อค่าสัมประสิทธิ์ $k_L a$ การอุดตันของท่อยึดหยุ่นจากการหยุดเติมอากาศ และวิธีการทำความสะอาด เนื่องจากปัญหาหลักจากการใช้อุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยึดหยุ่นในระบบการเติมอากาศเป็นเวลานานคือ การอุดตันที่ผิวและการตกตะกอนสะสมในช่องว่างของท่อยึดหยุ่น ค่าความดันลดเพิ่มขึ้น ฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้น และการเกิดฟองอากาศไม่สม่ำเสมอตลอดความยาวของท่อยึดหยุ่น ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนลดลง และสิ้นเปลืองพลังงานในการเดินระบบ (Rosso และคณะ, 2008) นอกจากนี้การอุดตันของท่อยึดหยุ่นยังทำให้สมบัติของท่อยึดหยุ่นเปลี่ยนแปลง ความแข็งของท่อยึดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) เปลี่ยนแปลง ช่องเปิดของท่อยึดหยุ่นขยายขนาดและฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้น จึงส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนลดลงได้เช่นกัน (Kaliman และคณะ, 2008)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงมีความสนใจประยุกต์ใช้ท่อยึดหยุ่นในระบบการเติมอากาศซึ่งเป็นกระบวนการที่ต้องใช้พลังงานมาก สมบัติของท่อยึดหยุ่นที่เหมาะสม ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ ประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสาร การศึกษาความดันลดและพลังงานที่จำเป็น การจัดเรียงท่อยึดหยุ่นในถังเติมอากาศ ผลกระทบจากสารปนเปื้อนในน้ำต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน การอุดตันของท่อยึดหยุ่นจากการหยุดเติมอากาศ และวิธีทำความสะอาด จึงเป็นประเด็นหลักที่ควรศึกษาในงานวิจัยนี้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน ประหยัดพลังงานในการเติมอากาศ เข้าใจผลกระทบจากการใช้งานในสภาวะต่างๆ และการบำรุงรักษาเพื่อรักษาอายุการใช้งานให้ยาวนาน นอกจากนี้ การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมเพื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์การ

ถ่ายเทออกซิเจนก็เป็นเรื่องหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากความยุ่งยากจากการวิเคราะห์ในด้านเตรียมอุปกรณ์ การใช้สารเคมีและระยะเวลาสำหรับการวิเคราะห์ การทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยอำนวยความสะดวก และสามารถใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นประกอบการออกแบบกระบวนการเติมอากาศได้

1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.4.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่น ซึ่งผลิตมาจากการรีไซเคิลของเสียประเภทยาง
- 1.4.2 เพื่อศึกษาผลกระทบจากสภาวะการทำงานซึ่งประกอบด้วย ของแข็งแขวนลอย หรือของแข็งละลายต่อประสิทธิภาพการทำงาน และการอุดตันของอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่น
- 1.4.3 เพื่อศึกษาวิธีทำความสะอาดที่เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่น
- 1.4.4 เพื่อศึกษารูปแบบการจัดเรียงอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่นที่เหมาะสมในถังเติมอากาศ

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.5.1 ศึกษาสมบัติทางกายภาพของอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่นซึ่งผลิตมาจากการรีไซเคิลของเสียประเภทยาง สมบัติของอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่นที่สนใจศึกษา ได้แก่
 - 1.) ความหนาแน่นต่อ วิเคราะห์โดยเวอร์เนีย ไมโครมิเตอร์ (Vernier micrometer)
 - 2.) ความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) วิเคราะห์โดยการทดสอบแรงดึง (Tension Test)
 - 3.) ความแข็ง (Hardness) วิเคราะห์โดยเครื่องวัดความแข็งของยาง (Durometer)
 - 4.) ความยืด (Elongation) วิเคราะห์โดยการทดสอบแรงดึง (Tension Test)
- 1.5.2 ศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสาร (Aeration performance parameters) ของอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่นในระดับห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานกับอุปกรณ์เติมอากาศชนิดอื่นๆ ตัวแปรที่สนใจศึกษา ได้แก่
 - 1.) ค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทออกซิเจน ($k_L a$)
 - 2.) ค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน ($k_L a_{20}$)
 - 3.) พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างอากาศ และน้ำ (a)
 - 4.) อัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (SOTR)
 - 5.) ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (SOTE)
 - 6.) ความดันขณะเติมอากาศ (P)
- 1.5.3 ศึกษาผลกระทบจากสภาวะการทำงานซึ่งประกอบด้วย ของแข็งแขวนลอย ของแข็งละลาย หรือของแข็งแขวนลอยในรูปของเซลล์จุลชีพ (Mixed liquor suspended solids: MLSS) ต่อประสิทธิภาพการเติมอากาศ และการอุดตันของอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่น โดยใช้ดินขาว (Kaolin) ปรับความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย ใช้เกลือ (NaCl) ปรับความเข้มข้นของ

ของแข็งละลาย เลี้ยงเซลล์จุลชีพที่ความเข้มข้นต่างๆ และวิเคราะห์การดูดตันด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscope : SEM)

สภาวะการทำงานที่สนใจศึกษา ได้แก่

- 1.) สภาวะที่มีของแข็งแขวนลอย โดยใช้ดินขาวความเข้มข้น 0 50 100 และ 200 มก./ลิตร
 - 2.) สภาวะที่มีของแข็งละลาย โดยใช้เกลือความเข้มข้น 0 7,500 20,000 และ 35,000 มก./ลิตร
 - 3.) สภาวะที่มีเซลล์จุลชีพ โดยเลี้ยงเซลล์จุลชีพที่ความเข้มข้น 0 1,000 2,000 และ 3,000 มก./ลิตร
- หลังจากนั้นศึกษาการดูดตันในสภาวะการทำงานต่างๆ ที่ความเข้มข้นมากที่สุด เนื่องจากอาจก่อให้เกิดการดูดตันได้ง่าย และมีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทออกซิเจนมากที่สุด โดยแช่ไว้เป็นระยะเวลา 8 72 168 และ 240 ชั่วโมง

1.5.4 ศึกษาแนวทางการใช้งานเรื่องรูปแบบการจัดเรียงอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่นที่เหมาะสมในถังเติมอากาศ และการบำรุงรักษาที่เหมาะสมของอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่น วิธีการทำความสะอาดที่สนใจศึกษา ได้แก่

- 1.) การขัดถู
- 2.) เป่าด้วยแรงดันสูงประมาณ 3 บาร์ (300 กิโลปาสคาล หรือ 43.51 ปอนด์/ตร.นิ้ว)
- 3.) สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ (NaOCl) ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยมวลต่อปริมาตร
- 4.) สารละลายกรดซิตริก ($C_6H_8O_7$) ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยมวลต่อปริมาตร

หลังจากทำความสะอาดแล้ว นำตัวอย่างอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่นวิเคราะห์การดูดตันด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน และหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน

1.5.5 ศึกษาการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อพิจารณาเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมโดยเปรียบเทียบความแม่นยำระหว่างผลทำนายกับผลวิเคราะห์ซึ่งคาดหวังไม่ให้เกิดความคลาดเคลื่อนมากกว่าร้อยละ 20

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 สามารถประยุกต์ใช้อุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่นซึ่งผลิตมาจากการรีไซเคิลของเสียประเภทยาง ในกระบวนการเติมอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ และใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย
- 1.6.2 สามารถปรับปรุงสมบัติของอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่นให้เหมาะแก่การใช้ในกระบวนการเติมอากาศได้
- 1.6.3 สามารถออกแบบวิธีการใช้งานอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่นในกระบวนการเติมอากาศ และวิธีบำรุงรักษาที่เหมาะสมได้เพื่อรักษาอายุการใช้งานให้ยาวนาน
- 1.6.4 สามารถทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม เพื่อบรรเทาความยุ่งยากจากการวิเคราะห์และใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นประกอบการออกแบบกระบวนการเติมอากาศได้

บทที่ 2

เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการเติมอากาศ (Aeration process)

กระบวนการเติมอากาศ คือ กระบวนการถ่ายเทออกซิเจนจากสถานะก๊าซไปสู่สถานะของเหลวเพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายในของเหลวหรือน้ำให้สูงขึ้น เพื่อใช้ในการหายใจของสัตว์น้ำหรือใช้ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำได้เป็นไปตามกฎของเฮนรี (Henry's law)

กฎของเฮนรี (Henry's law) อธิบายปริมาณก๊าซที่สามารถละลายน้ำได้ ณ สภาวะสมดุล ซึ่งเป็นก๊าซที่มีความสามารถในการละลายในน้ำได้น้อยโดยไม่เกิดปฏิกิริยากับน้ำ มีความสัมพันธ์กับความดันของก๊าซในก๊าซผสม หรือปริมาณก๊าซนั้นในบรรยากาศเหนือผิวน้ำ (Partial pressure) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$C = K_h \cdot P \quad (2.1)$$

- เมื่อ C คือ ความเข้มข้นของก๊าซที่ละลายน้ำ (โมล/ลิตร)
 K_h คือ ค่าคงที่ของ Henry (โมล/ลิตร-บรรยากาศ)
 P คือ ความดันย่อยของก๊าซในก๊าซผสม (Partial pressure : บรรยากาศ)

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงปริมาณก๊าซต่างๆในบรรยากาศ

ก๊าซ	สูตรเคมี	ร้อยละโดยปริมาตร	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ไนโตรเจน	N ₂	78.03	75.47
ออกซิเจน	O ₂	20.99	23.18
อาร์กอน	Ar	0.94	1.30
คาร์บอนไดออกไซด์	CO ₂	0.03	0.05
อื่นๆ	-	0.01	-

หมายเหตุ : ก๊าซอื่นๆคือก๊าซที่มีปริมาณน้อยในบรรยากาศ ได้แก่ ไฮโดรเจน นีออน ฮีเลียม คริปตอน และซีนอน เป็นต้น

ที่มา : Metcalf และ Eddy, 2004

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิ และความดันบรรยากาศต่างๆ

อุณหภูมิ	ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายที่สภาวะสมดุล (มก./ลิตร)									
	ความดันบรรยากาศ (มม.ปรอท)									
°C.	735	740	745	750	755	760	765	770	775	780
0	14.12	14.22	14.31	14.41	14.51	14.60	14.70	14.80	14.89	14.99
5	12.33	12.42	12.50	12.59	12.67	12.76	12.84	12.93	13.01	13.10
10	10.90	10.98	11.05	11.13	11.20	11.28	11.35	11.43	11.50	11.58
15	9.73	9.80	9.87	9.94	10.00	10.07	10.14	10.21	10.27	10.34
20	8.77	8.83	8.89	8.95	9.02	9.08	9.14	9.20	9.26	9.32
25	7.96	8.02	8.08	8.13	8.19	8.24	8.30	8.36	8.41	8.47
30	7.28	7.33	7.38	7.44	7.49	7.54	7.59	7.64	7.69	7.75
35	6.69	6.74	6.79	6.84	6.89	6.93	6.98	7.03	7.08	7.13
40	6.18	6.23	6.27	6.32	6.36	6.41	6.46	6.50	6.55	6.59

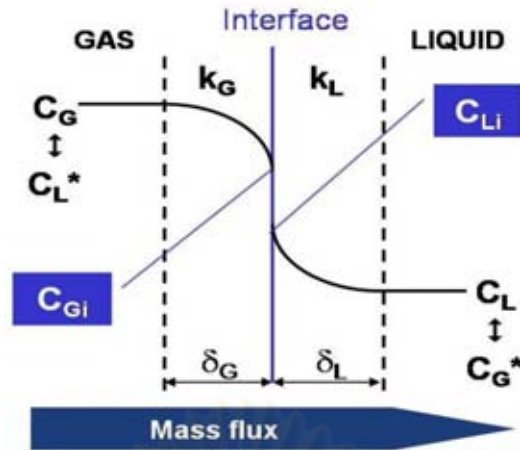
ที่มา : Metcalf และ Eddy, 2004

จากตารางที่ 2.1 พบว่าปริมาณออกซิเจนในบรรยากาศมีประมาณร้อยละ 20.99 โดยปริมาตรและมีค่าคงที่ของเฮนรีเท่ากับ 1.27×10^{-3} โมล/ลิตร-บรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (Benjamin, 2002) เมื่อนำค่าดังกล่าวไปคำนวณตามสมการที่ 2.1 จะได้ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายที่สภาวะสมดุลที่สอดคล้องกับค่าในตารางที่ 2.2 คือ 9.08 มก./ลิตร เมื่อมีค่าความเค็ม (Salinity) ในน้ำเท่ากับ 0 พีพีที (Part per thousand, ppt.) แสดงให้เห็นว่าออกซิเจนละลายในน้ำได้น้อย อย่างไรก็ตามการคำนวณความเข้มข้นของออกซิเจนละลายที่สภาวะสมดุลตามกฎของเฮนรีเพียงอย่างเดียวไม่สามารถประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการเติมอากาศ หรืออุปกรณ์เติมอากาศได้ จึงจำเป็นต้องคำนึงถึงการถ่ายเทออกซิเจนด้วยซึ่งอธิบายถึงอัตราเร็วของการละลายของออกซิเจนจนกระทั่งถึงสภาวะสมดุล

2.2 ทฤษฎี "Two film theory"

คือ ทฤษฎีที่อธิบายถึงการถ่ายเทสารระหว่างสถานะก๊าซและของเหลว โดยการซึมผ่านชั้นกลางระหว่างก๊าซกับของเหลวซึ่งชั้นกลางถูกพิจารณาออกเป็นสองชั้น คือ ชั้นกลางของก๊าซ และชั้นกลางของของเหลว ปัจจัยที่ผลต่อการละลายหรือซึมผ่านชั้นกลาง ได้แก่

- ความสามารถในการละลายของสาร
- ความดันย่อยของก๊าซในก๊าซผสม
- ความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิ
- ปริมาณสารเจือปน (Impurities) ในของเหลว เช่น ค่าความเค็ม และของแข็งแขวนลอย เป็นต้น



รูปที่ 2.1 การถ่ายเทมวลสารตามทฤษฎี “Two film theory”

ที่มา : Spartan Environmental Technologies : Air and Water Treatment (ออนไลน์), 2004

จากรูปที่ 2.1 แสดงการถ่ายเทสารจากสถานะก๊าซไปสู่สถานะของเหลว โดยมีความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสารในก๊าซและของเหลวเป็นแรงขับเคลื่อน (Driving force) ทำให้สารในสถานะก๊าซซึ่งมีความเข้มข้นมากกว่าซึมผ่านชั้นกลางทั้งสองชั้นละลายสู่สถานะของเหลวซึ่งมีความเข้มข้นต่ำกว่า หลังจากนั้นจึงแพร่กระจายจากบริเวณใกล้ชั้นกลางของเหลวไปสู่บริเวณอื่นๆ จนกระทั่งความเข้มข้นของสารทั้งในสถานะก๊าซและของเหลวอยู่ในสภาวะสมดุล ในกระบวนการเติมอากาศซึ่งนิยมเป่าอากาศได้น้ำสามารถใช้ทฤษฎี “Two film theory” อธิบายการละลายของออกซิเจนจากอากาศสู่น้ำได้เช่นกัน

2.3 การถ่ายเทออกซิเจน (Oxygen transfer)

การถ่ายเทออกซิเจน คือ กระบวนการถ่ายเทออกซิเจนจากสถานะก๊าซไปสู่สถานะของเหลว ซึ่งกล่าวถึงอัตราเร็วของการเพิ่มความเข้มข้นของออกซิเจนในสถานะของเหลวเข้าใกล้สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิ และความดันบรรยากาศขณะนั้น โดยสามารถประเมินอัตราการถ่ายเทออกซิเจนได้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (Volumetric mass transfer coefficient, $k_L a$) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\frac{dC}{dt} = k_L a (C_S - C) \quad (2.2)$$

เมื่อ $\frac{dC}{dt}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของออกซิเจน หน่วย มก./ลิตร-วินาที

k_L คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว (The liquid-side mass transfer coefficient) หน่วย ม./วินาที

- a คือ พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างก๊าซและของเหลว หน่วย ตร.ม./ลบ.ม.
- C_s คือ ความเข้มข้นของออกซิเจน ณ สภาวะสมดุล หน่วย มก./ลิตร
- C คือ ความเข้มข้นของออกซิเจนที่เวลาใดๆ หน่วย มก./ลิตร
- 2.3.1 ขั้นตอนของการถ่ายเทออกซิเจนจากสถานะก๊าซไปสู่สถานะของเหลว หรือการเติมอากาศ
- 1.) การทำให้เกิดการสัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำ ในทางปฏิบัติสามารถทำได้โดยการใช้เครื่องจักรสร้างความปั่นป่วนบริเวณผิวน้ำทำให้เกิดละอองน้ำกระจายในอากาศ หรือการปล่อยอากาศได้น้ำ ซึ่งขนาดละอองน้ำที่เกิดขึ้นหรือฟองอากาศที่ถูกปล่อยได้น้ำที่มีขนาดเล็ก จึงเกิดพื้นที่สัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำได้มาก ทำให้เกิดการเติมอากาศที่มีประสิทธิภาพ
 - 2.) เมื่ออากาศสัมผัสกับน้ำออกซิเจนในอากาศซึ่งมีความเข้มข้นมากกว่าออกซิเจนละลายในน้ำ จึงเกิดแรงขับเคลื่อนทำให้ออกซิเจนในอากาศเคลื่อนผ่านชั้นกลางระหว่างอากาศกับน้ำตามทฤษฎี "Two film theory" กลายเป็นออกซิเจนละลายในน้ำ
 - 3.) ออกซิเจนที่ละลายในน้ำบริเวณพื้นที่สัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำจะมีความเข้มข้นมากกว่าบริเวณอื่นๆในน้ำ จึงเกิดการแพร่จากบริเวณพื้นที่สัมผัสไปสู่บริเวณอื่นๆของน้ำ จนกระทั่งมีความเข้มข้นของออกซิเจนละลายสม่ำเสมอทุกบริเวณในน้ำและมีความเข้มข้นถึงจุดอิ่มตัว
- 2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเติมอากาศ
- 1.) ความเข้มข้นของออกซิเจนในก๊าซ และในของเหลว ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของออกซิเจนในอากาศกับน้ำส่งผลให้เกิดแรงขับเคลื่อนทำให้ออกซิเจนละลายในน้ำได้ ในทางปฏิบัติสามารถเลือกใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ในกระบวนการเติมอากาศ เพื่อเพิ่มความแตกต่างของความเข้มข้น และขับเคลื่อนทำให้ออกซิเจนละลายในน้ำได้ดีขึ้น
 - 2.) ความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิ ความดันบรรยากาศโดยทั่วไปสามารถทำให้เกิดแรงขับเคลื่อนต่อออกซิเจนและปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ ตามกฎของเฮนรีการเพิ่มความดันทำให้ออกซิเจนละลายน้ำมากขึ้นได้ ส่วนอุณหภูมิมิผลต่อความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนละลายในน้ำ และอัตราการถ่ายเทออกซิเจน อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนละลายในน้ำต่ำลง แต่มีอัตราการถ่ายเทออกซิเจนสูงขึ้น ในทางปฏิบัติจึงควรควบคุมอุณหภูมิของน้ำให้เหมาะสม และสามารถเพิ่มความดันเพื่อให้ออกซิเจนละลายน้ำมากขึ้นได้
 - 3.) ขนาดฟองอากาศ กรณีการเติมอากาศโดยปล่อยอากาศได้น้ำ ขนาดฟองอากาศมีผลต่อพื้นที่สัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำ ฟองอากาศขนาดเล็กมีพื้นที่สัมผัสมากทำให้เกิดการถ่ายเทออกซิเจนที่ดี ในทางปฏิบัติจึงควรเลือกอุปกรณ์เติมอากาศที่ทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็ก และควบคุมปริมาณการเติมอากาศให้เหมาะสม เพื่อป้องกันการรวมตัวของฟองอากาศขณะลอยขึ้นสู่น้ำซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการเติมอากาศลดลง
 - 4.) ความถี่ของการเกิดฟองอากาศ ส่งผลต่อจำนวนฟองอากาศและพื้นที่สัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำ ความถี่ของการเกิดฟองอากาศมากทำให้มีพื้นที่สัมผัสมากและเกิดการถ่ายเทออกซิเจนที่ดี ในกระบวนการเติมอากาศจึงควรควบคุมความถี่การเกิดฟองอากาศให้เหมาะสม ความถี่

ที่มากเกินไปอาจทำให้เกิดความปั่นป่วนในน้ำมาก จนทำให้เกิดการรวมตัวของฟองอากาศ และควรเลือกใช้อุปรกรณ์เติมอากาศที่ทำให้เกิดฟองอากาศกระจายอย่างสม่ำเสมอ

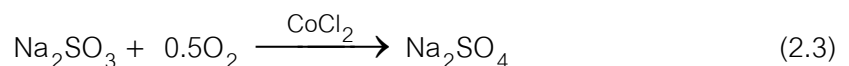
- 5.) ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ และระยะเวลาสัมผัสระหว่างก๊าซกับของเหลว กรณีการเติมอากาศโดยปล่อยอากาศใต้น้ำ ฟองอากาศที่ถูกปล่อยใต้น้ำจะลอยขึ้นสู่ผิวน้ำด้วยความเร็วลอยตัวค่าหนึ่งซึ่งสัมพันธ์กับขนาดฟองอากาศ ฟองอากาศขนาดเล็กจะมีความเร็วลอยตัวน้อยกว่าฟองอากาศขนาดใหญ่ตามกฎของสโตกส์ (Stoke's law) ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศที่น้อยทำให้เกิดระยะเวลาสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับน้ำที่นาน ในกระบวนการเติมอากาศจึงควรเลือกอุปรกรณ์เติมอากาศที่ทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็ก และออกแบบถังเติมอากาศให้มีความลึกที่เหมาะสมเพื่อให้มีความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ และระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมแก่การเติมอากาศ การสร้างความปั่นป่วนให้กับน้ำในระดับที่เหมาะสมโดยการกวนน้ำเป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยยืดระยะเวลาสัมผัสได้
- 6.) ความปั่นป่วนของน้ำ ตามทฤษฎี "Two film theory" ออกซิเจนในอากาศจะเคลื่อนผ่านชั้นกลางของอากาศ และชั้นกลางของน้ำ ซึ่งชั้นกลางของน้ำเป็นอุปสรรคหลักที่ออกซิเจนต้องใช้เวลาในการเคลื่อนผ่าน การสร้างความปั่นป่วนให้กับน้ำในระดับที่เหมาะสมทำให้เกิดแรงเฉือนที่ชั้นกลางของน้ำ ส่งผลให้ชั้นกลางของน้ำบางลงออกซิเจนจึงสามารถเคลื่อนผ่านได้ง่ายขึ้น ดังนั้นการกวนน้ำขณะเติมอากาศเพื่อให้เกิดการปั่นป่วนในระดับที่เหมาะสมจะช่วยให้มีอัตราการถ่ายเทออกซิเจนสูงขึ้น

2.4 การประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน

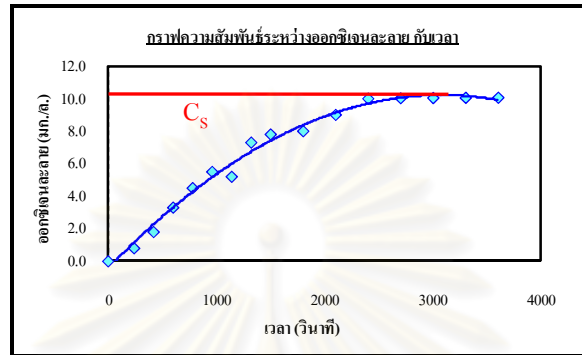
การประเมินประสิทธิภาพของอุปรกรณ์เติมอากาศสามารถประเมินได้จากปริมาณออกซิเจนที่ถ่ายเทสู่น้ำต่อปริมาณอากาศที่ถูกเติมเข้าสู่ระบบภายใต้สภาวะเดียวกัน เช่น อุณหภูมิ สารเจือปนในน้ำ ความลึกของจุดเติมอากาศ (กรณีเติมอากาศโดยปล่อยอากาศใต้น้ำ) เป็นต้น ซึ่งสามารถประเมินประสิทธิภาพได้โดยวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน แต่เนื่องจากประสิทธิภาพของอุปรกรณ์เติมอากาศอาจเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะการใช้งาน ดังนั้นจึงควรวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนทั้งในน้ำสะอาดหรือน้ำประปา และในน้ำจากสภาวะการทำงานจริง

2.4.1 การประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำสะอาด

องค์กรวิศวกรรมโยธาแห่งสหรัฐอเมริกา (American Society of Civil Engineers, ASCE) ได้ระบุวิธีการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำสะอาด ซึ่งประกอบไปด้วยการกำจัดออกซิเจนละลายในน้ำ (Dissolved oxygen, DO) โดยการเติมโซเดียมซัลไฟต์ (Na_2SO_3) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนละลายในน้ำดังสมการ



นอกจากนี้ยังสามารถเติมโคบอลต์คลอไรด์ (CoCl_2) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้กำจัดออกซิเจนละลายในน้ำเร็วขึ้นได้ โดยเติมในปริมาณ 1.5 มก./ลิตร เพื่อกำจัดออกซิเจนละลาย 1 มก./ลิตร เมื่อปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในน้ำมีค่าเท่ากับ 0 มก./ลิตร หรือมีค่าต่ำ จึงเริ่มเติมอากาศพร้อมกับวัดค่าความเข้มข้นของออกซิเจนละลายที่เพิ่มขึ้น ณ เวลาต่างๆ ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเข้าใกล้จุดอิ่มตัว ดังแสดงในภาพ



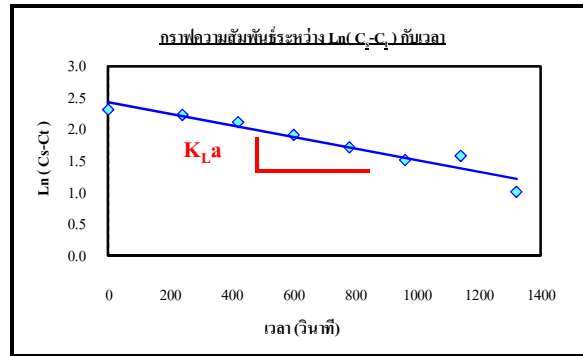
รูปที่ 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในน้ำกับเวลา

จากรูปที่ 2.2 แสดงความเข้มข้นของออกซิเจนละลายขณะเติมอากาศ ณ เวลาใดๆ เมื่อเติมอากาศอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายจะเข้าใกล้จุดอิ่มตัวซึ่งสามารถวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้น ณ สภาวะสมดุลได้ จากข้อมูลความเข้มข้นของออกซิเจนละลายที่วัดได้สามารถนำมาวิเคราะห์เป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนโดยสมการการถ่ายเทมวลสารซึ่งได้จากการอินทิเกรตสมการที่ 2.2 จนได้รูปสมการเป็นดังนี้

$$\frac{C_s - C_t}{C_s - C_0} = e^{-(k_L a) \times t} \quad (2.4)$$

$$\ln(C_s - C_t) = \ln(C_s - C_0) - k_L a \times t \quad (2.5)$$

เมื่อ	$k_L a$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนโดยรวม หน่วย 1/วินาที
	C_s	คือ ความเข้มข้นของออกซิเจน ณ สภาวะสมดุล หน่วย มก./ลิตร
	C_t	คือ ความเข้มข้นของออกซิเจน ณ เวลาใดๆ หน่วย มก./ลิตร
	C_0	คือ ความเข้มข้นของออกซิเจนที่มีอยู่เดิมในน้ำ หน่วย มก./ลิตร
	t	คือ ระยะเวลาการเติมอากาศ หน่วย วินาที



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(C_s - C_t)$ กับเวลา เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน

จากสมการที่ 2.4 เมื่อใส่เครื่องหมายลอการิทึมสามัญ (ln) และจัดรูปสมการใหม่เป็นสมการที่ 2.5 จะได้สมการที่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง และมีความชันเท่ากับค่าลบของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ดังนั้น เมื่อนำข้อมูลความเข้มข้นของออกซิเจนละลายที่วัดได้ขณะเติมอากาศ ณ เวลาต่างๆ มาคำนวณตามสมการที่ 2.5 และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(C_s - C_t)$ กับเวลาตามรูปที่ 2.3 จะสามารถวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนได้

2.4.2 การประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำเสีย

การเติมอากาศในน้ำเสีย ออกซิเจนละลายบางส่วนจะถูกใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลชีพในน้ำ โดยทั่วไปการเติมอากาศในกระบวนการบำบัดน้ำเสียจะควบคุมความเข้มข้นของออกซิเจนละลายประมาณ 1 ถึง 3 มก./ลิตร ซึ่งจะถูกใช้โดยจุลชีพอย่างรวดเร็ว ดังนั้น การประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำเสียจึงต้องคำนึงถึงอัตราการใช้ออกซิเจนของจุลชีพด้วย ตามสมการดังนี้

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

เมื่อ C คือ ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในน้ำ หน่วย มก./ลิตร
 r_M คือ อัตราการใช้ออกซิเจนโดยจุลชีพ

โดยทั่วไป อัตราการใช้ออกซิเจนของจุลชีพมีค่าประมาณ 2 ถึง 7 ก.(ออกซิเจน)/วัน-ก.(เซลล์จุลชีพ หรือ MLVSS) จากสมการที่ 2.6 ถ้ามีการควบคุมปริมาณการเติมออกซิเจนให้คงที่ หรือ “ dC/dt ” เท่ากับศูนย์ ดังนั้น จึงได้ความสัมพันธ์ตามสมการดังนี้

$$r_M = k_L a (C_s - C) \quad (2.7)$$

จากสมการที่ 2.7 ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในน้ำ (C) จะมีค่าคงที่ตามปริมาณการเติมออกซิเจนที่ถูกควบคุม อัตราการใช้ออกซิเจนโดยจุลินทรีย์สามารถหาค่าได้โดยเครื่องวัดอัตราการหายใจ (Respirometer) ดังนั้น จึงคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนได้ตามสมการดังนี้

$$k_L a = \frac{r_M}{(C_S - C)} \quad (2.8)$$

เนื่องจากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในห้องปฏิบัติการอ้างอิงจากการใช้สมการการถ่ายเทออกซิเจนเป็นหลัก ซึ่งในสภาวะการทำงานจริงมีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทออกซิเจน เช่น อุณหภูมิ ส่วนประกอบในน้ำที่เติมอากาศ รูปทรงของถังเติมอากาศ และระดับความปั่นป่วนในถังเติมอากาศ เป็นต้น ดังนั้น นอกจากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในห้องปฏิบัติการแล้ว จึงควรทำการวิเคราะห์ในสภาวะการทำงานจริงด้วย เพื่อสามารถวิเคราะห์การถ่ายเทออกซิเจนในสภาวะการทำงานจริงได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

2.5 ความสามารถในการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศ (Oxygenation Capacity, OC)

ความสามารถในการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศ คือ ปริมาณออกซิเจนที่ถ่ายเทสู่น้ำโดยอุปกรณ์เติมอากาศ โดยมีความสัมพันธ์ตามสมการดังนี้

$$OC = k_L a \times C_S \times V \quad (2.9)$$

เมื่อ OC คือ ความสามารถในการถ่ายเทออกซิเจน หน่วย มก./วินาที

V คือ ปริมาตรของน้ำที่เติมอากาศ หน่วย ลิตร

จากสมการที่ 2.9 หลังจากวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศ และความเข้มข้นของออกซิเจน ณ สภาวะสมดุลแล้วสามารถนำค่าดังกล่าวมาวิเคราะห์ความสามารถในการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศ ซึ่งสามารถใช้ในการวิเคราะห์อัตราการถ่ายเทออกซิเจน และประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศต่อไปได้

2.6 อัตราการถ่ายเทออกซิเจน (Oxygen transfer rate, OTR)

อัตราการถ่ายเทออกซิเจน คือ อัตราส่วนความสามารถในการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศต่อกำลังงานที่ใช้ในการเติมอากาศ โดยมีความสัมพันธ์ตามสมการดังนี้

$$OTR = \frac{OC}{P} = \frac{k_L a \times C_S \times V}{P} \quad (2.10)$$

เมื่อ	OTR	คือ อัตราการถ่ายเทออกซิเจน หน่วย มก./วินาที-กิโลวัตต์ (mg/s-kW.)
	P	คือ กำลังงานที่ใช้ในการเติมอากาศ หน่วย กิโลวัตต์

อัตราการถ่ายเทออกซิเจนสามารถอธิบายถึงความสามารถในการเติมอากาศ และการใช้พลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์เติมอากาศ ซึ่งใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์เติมอากาศแต่ละประเภทได้ แต่เนื่องจากมีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเติมอากาศ และอาจทำให้การเปรียบเทียบคลาดเคลื่อนได้ จึงนิยมเปรียบเทียบประสิทธิภาพภายใต้สภาวะมาตรฐาน ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 1 บรรยากาศ เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และความเข้มข้นของออกซิเจน ณ สภาวะสมดุลภายใต้สภาวะมาตรฐานมาคำนวณตามสมการที่ 2.10 จะได้เป็นอัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (Standard oxygen transfer rate, SOTR)

2.7 ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน (Oxygen transfer efficiency, OTE)

ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน คือ อัตราส่วนร้อยละของปริมาณออกซิเจนที่ถ่ายเทลงสู่น้ำต่อปริมาณออกซิเจนที่เติมให้กับระบบ โดยมีความสัมพันธ์ตามสมการดังนี้

$$OTE = \frac{\text{Oxygen}_{\text{Transferred}}}{\text{Oxygen}_{\text{Added}}} = \frac{OC}{p_G \times Q_G} \quad (2.11)$$

เมื่อ	OTE	คือ ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน หน่วย ร้อยละ (%)
	$\text{Oxygen}_{\text{Transferred}}$	คือ ปริมาณออกซิเจนที่ถ่ายเทลงสู่น้ำ
	$\text{Oxygen}_{\text{Added}}$	คือ ปริมาณออกซิเจนที่เติมเข้าสู่ระบบ
	p_G	คือ ความหนาแน่นของอากาศ หน่วย กก./ลิตร หรือ มก./ลิตร
	Q_G	คือ อัตราการไหลของอากาศ หน่วย ลิตร/วินาที

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศนิยมเปรียบเทียบโดยใช้ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (Standard oxygen transfer efficiency, SOTE) ซึ่งคำนวณจากสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และความเข้มข้นของออกซิเจน ณ สภาวะสมดุลภายใต้สภาวะมาตรฐาน

2.8 ผลกระทบจากอุณหภูมิต่อการถ่ายเทออกซิเจน

เนื่องจากอุณหภูมิมีความสัมพันธ์ต่อความสามารถในการละลายของออกซิเจน และอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ดังนั้น การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศแต่ละประเภทจึงควรเปรียบเทียบที่อุณหภูมิเดียวกัน ซึ่งสามารถปรับค่าได้ตามสมการดังนี้

$$k_L a_{(T)} = k_L a_{(20^\circ\text{C})} \times \theta^{T-20} \quad (2.12)$$

- เมื่อ $k_L a_{(T)}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่อุณหภูมิใดๆ หน่วย 1/วินาที
 $k_L a_{(20^\circ\text{C})}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส หน่วย 1/วินาที
 θ คือ ค่าคงที่ของการปรับค่า
 T คือ อุณหภูมิขณะเติมอากาศ หน่วย องศาเซลเซียส

โดยทั่วไปค่า θ ได้จากการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการซึ่งมีค่าประมาณ 1.015 ถึง 1.040 สำหรับอุปกรณ์เติมอากาศประเภทหัวกระจายอากาศ และเครื่องเติมอากาศที่ผิวน้ำนิยมใช้ค่า θ เท่ากับ 1.024

2.9 ผลกระทบจากสภาวะการทำงานจริงต่อการถ่ายเทออกซิเจน

การเติมอากาศในสภาวะการทำงานจริงมีหลายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการถ่ายเทออกซิเจน เช่น รูปทรงของถังเติมอากาศ ลักษณะของอุปกรณ์เติมอากาศ และสารเจือปนในน้ำ เป็นต้น ซึ่งมีความสัมพันธ์กับระดับการกวนผสมของน้ำที่ทำให้เกิดการแพร่ของออกซิเจนละลายอย่างทั่วถึงในถังเติมอากาศ สารเจือปนในน้ำส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของน้ำ ลักษณะการเกิดฟองอากาศ และความสามารถในการละลายของออกซิเจน เช่น สารลดแรงตึงผิวทำให้ฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กลงเป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัสจำเพาะขณะเติมอากาศ แต่ในขณะเดียวกันอ็อกโซนในน้ำล้อมรอบผิวฟองอากาศขัดขวางการถ่ายเทออกซิเจนทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวลดลง เป็นต้น เพื่อให้สามารถอธิบายการถ่ายเทออกซิเจนในสภาวะการทำงานจริงได้อย่างชัดเจน จึงควรมีการศึกษาอัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในสภาวะการทำงานจริงกับผลวิเคราะห์ในน้ำสะอาดเป็นตัวคูณปรับแก้ตามสมการดังนี้

$$\alpha = \frac{k_L a \text{ (Actual system)}}{k_L a \text{ (Experiment)}} \quad (2.13)$$

- เมื่อ α คือ ตัวคูณปรับแก้อัลฟา
 $k_L a \text{ (Actual system)}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในสภาวะการทำงานจริง หน่วย 1/วินาที
 $k_L a \text{ (Experiment)}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนจากการวิเคราะห์ หน่วย 1/วินาที

โดยทั่วไป ตัวคูณปรับแก้อัลฟาหาได้จากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำจากสภาวะการทำงานจริงเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ในน้ำประปาในระดับห้องปฏิบัติการซึ่งมีค่าประมาณ

0.3 ถึง 1.2 และทำให้สามารถอธิบายผลกระทบจากสารเจือปนในน้ำได้อย่างชัดเจนไม่มีปัจจัยอื่นๆจากรูปทรงของถังเติมอากาศมาเกี่ยวข้อง

2.10 ผลกระทบจากส่วนประกอบในน้ำต่อการถ่ายเทออกซิเจน

เนื่องจากส่วนประกอบในน้ำมีความสัมพันธ์ต่อความสามารถในการละลายของออกซิเจน การเติมอากาศในสภาวะการทำงานจริงซึ่งมีส่วนประกอบในน้ำแตกต่างจากน้ำประปาจึงส่งผลต่อการถ่ายเทออกซิเจน ดังนั้น การวิเคราะห์การถ่ายเทออกซิเจนในสภาวะการทำงานจริงซึ่งมีสารเจือปนในน้ำจึงควรปรับแก้ค่าตามความสามารถในการละลายของออกซิเจน โดยการใช้อัตราคูณปรับแก้ตามสมการดังนี้

$$\beta = \frac{C_S \text{ (Aerated water)}}{C_S \text{ (Clean water)}} \quad (2.14)$$

เมื่อ	β	คือ ตัวคูณปรับแก้เบต้า
	$C_S \text{ (Aerated water)}$	คือ ความเข้มข้นของออกซิเจน ณ สภาวะสมดุลในน้ำเสีย หรือในสภาวะการทำงานจริง หน่วย มก./ลิตร
	$C_S \text{ (Clean water)}$	คือ ความเข้มข้นของออกซิเจน ณ สภาวะสมดุลในน้ำสะอาด หรือน้ำประปา หน่วย มก./ลิตร

โดยทั่วไป ตัวคูณปรับแก้เบต้าแปรผันตามส่วนประกอบของน้ำที่เติมอากาศ หาค่าโดยการวัดค่าความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในน้ำที่เติมอากาศ ณ สภาวะสมดุลเปรียบเทียบกับน้ำสะอาดหรือน้ำประปา ซึ่งมีค่าประมาณ 0.7 ถึง 0.98 สำหรับน้ำเสียทั่วไปนิยมใช้ตัวคูณปรับแก้เบต้าเท่ากับ 0.95

2.11 ผลกระทบจากการอุดตันต่อการถ่ายเทออกซิเจน

เนื่องจากขนาดฟองอากาศเป็นปัจจัยหนึ่งซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน ฟองอากาศขนาดเล็กมีพื้นที่สัมผัสกับน้ำมากทำให้เกิดการถ่ายเทออกซิเจนได้ดีกว่าฟองอากาศขนาดใหญ่ อุปกรณ์เติมอากาศส่วนใหญ่จึงถูกออกแบบให้มีรูพรุนขนาดเล็ก เพื่อความสามารถในการสร้างฟองอากาศขนาดเล็กได้ แต่รูพรุนขนาดเล็กเกิดการอุดตันได้ง่ายจากสารเจือปนในน้ำภายใต้สภาวะการทำงานจริง การอุดตันที่เกิดขึ้นจากการใช้งานอุปกรณ์เติมอากาศเป็นเวลานานอาจส่งผลให้เกิดฟองอากาศกระจายตัวไม่สม่ำเสมอบนอุปกรณ์เติมอากาศ และทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนลดลง ดังนั้น การประเมินประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศในสภาวะการทำงานจริง จึงควรปรับแก้ค่า โดยการใช้อัตราคูณปรับแก้ตามสมการดังนี้

$$F = \frac{SOTE_{Used}}{SOTE_{New}} \quad (2.15)$$

เมื่อ	F	คือ ตัวคูณปรับแก้ของการดูดตัน
	$SOTE_{Used}$	คือ ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน ณ สภาวะมาตรฐาน ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 1 บรรยากาศ ของอุปกรณ์เติมอากาศหลังการใช้งานหน่วย ร้อยละ
	$SOTE_{New}$	คือ ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน ณ สภาวะมาตรฐาน ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 1 บรรยากาศ ของอุปกรณ์เติมอากาศก่อนการใช้งานหน่วย ร้อยละ

โดยทั่วไป ตัวคูณปรับแก้ของการดูดตันสามารถวิเคราะห์ได้จากประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศหลังการใช้งานเปรียบเทียบกับก่อนใช้งาน หรือหลังจากดูดตันเปรียบเทียบกับก่อนเกิดการดูดตัน ซึ่งมีค่าประมาณ 0.65 ถึง 0.9 ขึ้นอยู่กับสมบัติของอุปกรณ์เติมอากาศ

2.12 การปรับแก้ค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนโดยใช้ตัวคูณปรับแก้

เนื่องจากกระบวนการเติมอากาศในสภาวะการทำงานจริงมีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น อุณหภูมิ ความดันบรรยากาศ ลักษณะของน้ำหรือสารเจือปนในน้ำ รูปทรงของถังเติมอากาศ ประเภทอุปกรณ์เติมอากาศ และปริมาณออกซิเจนในอากาศที่เติมให้กับระบบ เป็นต้น ซึ่งส่งผลต่อการถ่ายเทออกซิเจน ดังนั้น การประเมินการถ่ายเทออกซิเจนในสภาวะการทำงานจริงจึงควรคำนึงถึงปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง โดยการใช้ตัวคูณปรับแก้มาคำนวณเป็นค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนตามสมการดังนี้

$$AOTR = SOTR \times \left(\frac{\beta C_{S,T,H} - C_L}{C_{S,20}} \right) \times (1.024)^{T-20} \times \alpha \times F \quad (2.16)$$

$$C_{\bar{S},T,H} = C_{S,T,H} \times \frac{1}{2} \times \left(\frac{P_d}{P_{atm,H}} + \frac{O_t}{21} \right) \quad (2.17)$$

$$C_{\bar{S},T,H} = C_{S,T,H} \times \left(\frac{P_{atm,H} + P_{w,mid\ depth}}{P_{atm,H}} \right) \quad (2.18)$$

เมื่อ	AOTR	คือ อัตราการถ่ายเทออกซิเจนในสภาวะการทำงานจริง หน่วย มก./วินาที-กิโลวัตต์
	SOTR	คือ อัตราการถ่ายเทออกซิเจน ณ สภาวะมาตรฐาน ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 1 บรรยากาศ หน่วย มก./วินาที-กิโลวัตต์
	$C_{S,T,H}$	คือ ความเข้มข้นของออกซิเจนอิ่มตัวโดยเฉลี่ย ในน้ำสะอาด ในถังเติมอากาศที่อุณหภูมิ และระดับความสูงในสภาวะการทำงานจริง หน่วย มก./ลิตร

C_L	คือ ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ควบคุมในถังเติมอากาศ หน่วย มก./ลิตร
$C_{S,20}$	คือ ความเข้มข้นของออกซิเจนอิ่มตัว ณ สภาวะมาตรฐาน ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 1 บรรยากาศ ในน้ำสะอาด หน่วย มก./ลิตร
T	คือ อุณหภูมิขณะเติมอากาศ หน่วย องศาเซลเซียส
$C_{S,T,H}$	คือ ความเข้มข้นของออกซิเจนอิ่มตัวในน้ำสะอาด ที่อุณหภูมิ และระดับความสูง ในสภาวะการทำงานจริง หน่วย มก./ลิตร
P_d	คือ ความดัน ณ จุดเติมอากาศใต้น้ำ หน่วย กิโลปาสคาล
$P_{atm,H}$	คือ ความดันบรรยากาศที่ระดับความสูงในสภาวะการทำงานจริง หน่วย กิโลปาสคาล
O_t	คือ ร้อยละความเข้มข้นของออกซิเจนในอากาศที่เหลือจากถังเติมอากาศ ปกติ เหลือประมาณร้อยละ 18 ถึง 20
$P_{w,mid\ depth}$	คือ ความดันที่ระดับความลึกกึ่งกลางระหว่างผิวน้ำ และจุดเติมอากาศ หน่วย กิโลปาสคาล

จากสมการที่ 2.16 เป็นสมการที่ใช้คำนวณอัตราการถ่ายเทออกซิเจนในสภาวะการทำงานจริง โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ณ สภาวะมาตรฐาน และตัวคูณปรับแก้ต่างๆ สำหรับตัวคูณปรับแก้ของการดูดซับออกซิเจนรวมทั้งการดูดซับภายนอกและการดูดซับภายในของอุปกรณ์เติมอากาศ ซึ่งอาจเกิดจากการตกตะกอนทับถมของสิ่งเจือปนในน้ำ การสร้างเมือกของจุลินทรีย์บริเวณผิวนอก หรือการดูดซับภายในจากสิ่งเจือปนในอากาศที่เติมให้กับระบบ เป็นต้น สำหรับความเข้มข้นของออกซิเจนอิ่มตัวโดยเฉลี่ย สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.17 หรือ 2.18 เนื่องจากในถังเติมอากาศขนาดใหญ่อาจมีความลึกมากจนทำให้ความดันบรรยากาศบริเวณผิวน้ำกับความดันบริเวณจุดเติมอากาศใต้น้ำมีค่าแตกต่างกันมาก ความสามารถในการละลายของออกซิเจนที่ระดับทั้งสองจึงแตกต่างกันมากด้วย ดังนั้นในการประเมินความเข้มข้นของออกซิเจนอิ่มตัวจึงคิดเป็นค่าเฉลี่ยที่ระดับกึ่งกลางระหว่างผิวน้ำ และจุดเติมอากาศ

2.13 ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ (Bubble hydrodynamic parameters)

ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ คือ การศึกษาลักษณะการเกิดฟองอากาศเพื่อให้สามารถอธิบายกลไกการถ่ายเทออกซิเจนได้อย่างชัดเจน โดยใช้กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง (ประมาณ 100 ภาพ/วินาที หรือมากกว่า) ถ่ายภาพการเกิด และการเคลื่อนที่ของฟองอากาศขณะเติมอากาศ เพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆดังนี้

2.13.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (Bubble diameter, d_b)

ขนาดฟองอากาศมีความสัมพันธ์กับพื้นที่สัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำ และประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน ฟองอากาศขนาดเล็กทำให้มีพื้นที่สัมผัสมากกว่า และมีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูงกว่า ฟองอากาศขนาดใหญ่เมื่อเติมอากาศให้กับระบบในปริมาณเท่ากัน นอกจากนั้น ขนาดฟองอากาศยังมีความสัมพันธ์กับตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศตัวอื่นๆ เช่น ฟองอากาศแต่ละขนาดมีความเร็วลอยตัวที่แตกต่างกัน ฟองอากาศขนาดเล็กอาจแสดงถึงการใช้ระยะเวลาการเกิดฟองอากาศน้อยกว่า หรือมีความถี่ของการเกิดฟองอากาศสูงกว่าฟองอากาศขนาดใหญ่เมื่อเติมอากาศในปริมาณเท่ากัน เป็นต้น การศึกษาขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์เติมอากาศจึงสามารถอธิบายถึงตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศตัวอื่นๆ และประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์ชนิดนั้นในเบื้องต้นได้

2.13.2 ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (Bubble rising velocity, U_B)

ในกรณีการเติมอากาศโดยวิธีปล่อยอากาศได้นำ ฟองอากาศที่ถูกปล่อยได้นำจะมีรูปร่างเป็นทรงกลม และลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำด้วยความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ ซึ่งสอดคล้องกับกฎของสโตกส์ (Stoke's law) ที่อธิบายถึงการเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกลมผ่านของไหลที่มีความหนืด โดยมีความสัมพันธ์ตามสมการดังนี้

$$V_T = \frac{g (\rho_L - \rho_a) d^2}{18\mu} \quad (2.19)$$

เมื่อ	V_T	คือ ความเร็วปลาย (Terminal velocity) หน่วย ม./วินาที
	ρ_L	คือ ความหนาแน่นของน้ำ หน่วย กก./ลบ.ม.
	ρ_a	คือ ความหนาแน่นของอากาศ หรือฟองอากาศ หน่วย กก./ลบ.ม.
	d	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค หรือฟองอากาศ หน่วย ม.
	μ	คือ ความหนืดของน้ำ หน่วย ปาสคาล-วินาที (Pa-s.) หรือ กก./ม.-วินาที

จากสมการที่ 2.19 ในกรณีของการเติมอากาศความเร็วปลาย (V_T) คือความเร็วลอยตัวของฟองอากาศซึ่งมีความสัมพันธ์แปรผันตามขนาดฟองอากาศ คือฟองอากาศขนาดใหญ่มีความเร็วลอยตัวมากกว่า ฟองอากาศขนาดเล็กมีความเร็วลอยตัวน้อยกว่าแต่มีช่วงระยะเวลาสัมผัสกับน้ำนานกว่า ช่วงระยะเวลาที่ฟองอากาศใช้ลอยตัวขึ้นจนถึงผิวน้ำคือช่วงเวลาฟองอากาศสัมผัสกับน้ำ และเกิดการถ่ายเทออกซิเจน ในทางปฏิบัติสามารถวัดค่าความเร็วลอยตัวของฟองอากาศได้โดยใช้กล้องถ่ายภาพความเร็วสูงถ่ายภาพการเคลื่อนที่ของฟองอากาศขณะเติมอากาศ แล้วนำภาพมาวิเคราะห์ความเร็วลอยตัวตามสมการดังนี้

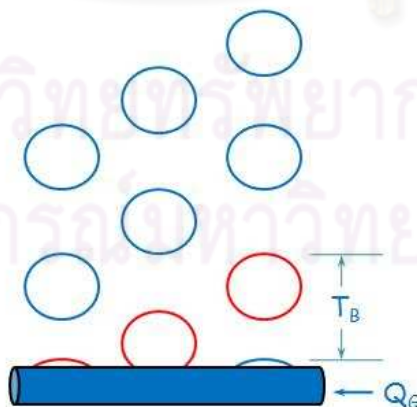
$$U_B = \frac{\Delta D}{T_{\text{Frames}}} \quad (2.20)$$

เมื่อ	U_B	คือ ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ หน่วย ม./วินาที
	ΔD	คือ ระยะทางการเคลื่อนที่ของฟองอากาศ หน่วย ม.
	T_{Frames}	คือ ช่วงเวลาของการถ่ายภาพ หน่วย วินาที

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการถ่ายภาพด้วยกล้องความเร็วสูงวิเคราะห์ค่าความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ เนื่องจากสามารถวิเคราะห์ความเร็วลอยตัวได้โดยตรง และลดความคลาดเคลื่อนจากการใช้สมการคำนวณ นอกจากนี้ สามารถใช้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟองอากาศ และความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ เพื่อสามารถอธิบายประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนเบื้องต้นได้จากการวิเคราะห์ขนาดฟองอากาศ

2.13.3 ระยะเวลาการเกิดฟองอากาศ (Bubble formation time, T_B) และความถี่ของการเกิดฟองอากาศ (Bubble formation frequency, f_B)

เนื่องจากระยะเวลาการเกิดฟองอากาศ และความถี่ของการเกิดฟองอากาศมีความสัมพันธ์กับจำนวนฟองอากาศที่เกิดขึ้น และพื้นที่สัมผัสระหว่างฟองอากาศกับน้ำที่ทำให้เกิดการถ่ายเทออกซิเจน จึงมีความสำคัญที่ต้องศึกษาตัวแปรดังกล่าวประกอบกับวิเคราะห์ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศแต่ละชนิด โดยใช้กล้องถ่ายภาพความเร็วสูงถ่ายภาพและจับเวลาการเกิดฟองอากาศ ระยะเวลาการเกิดฟองอากาศประกอบด้วยช่วงเวลาที่เริ่มเกิดฟองอากาศ ฟองอากาศขยายขนาด จนกระทั่งฟองอากาศหลุดออกจากอุปกรณ์เติมอากาศและเริ่มเกิดฟองใหม่ โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2.4 ภาพจำลองแสดงระยะเวลาการเกิดฟองอากาศ

$$T_B = T_{\text{Growing}} + T_{\text{Out}} \quad (2.21)$$

$$f_B = \frac{1}{T_B} \quad (2.22)$$

เมื่อ	T_B	คือ ระยะเวลาการเกิดฟองอากาศ หน่วย วินาที
	T_{Growing}	คือ ระยะเวลาที่เริ่มเกิดฟองอากาศ และขยายขนาด หน่วย วินาที
	T_{out}	คือ ระยะเวลาที่ฟองอากาศหลุดออกจากอุปกรณ์เติมอากาศ หน่วย วินาที
	f_B	คือ ความถี่ของการเกิดฟองอากาศ หน่วย 1/วินาที

จากรูปที่ 2.4 แสดงระยะเวลาการเกิดฟองอากาศซึ่งประกอบด้วย ระยะที่เริ่มเกิดฟองอากาศและขยายขนาด รวมกับระยะเวลาที่ฟองอากาศหลุดออกจากอุปกรณ์เติมอากาศและเริ่มเกิดฟองอากาศฟองใหม่มาแทนที่ตามสมการที่ 2.21 และมีความสัมพันธ์กับความถี่ของการเกิดฟองอากาศตามสมการที่ 2.22 นอกจากนั้น ความถี่ของการเกิดฟองอากาศสามารถคำนวณได้โดยความสัมพันธ์ดังนี้

$$f_B = \frac{Q_G}{V_B} \quad (2.23)$$

$$V_B = \frac{1}{6} \pi \times d_B^3 \quad (2.24)$$

เมื่อ	Q_G	คือ อัตราการไหลของก๊าซที่เติมให้กับระบบ หน่วย ลบ.ม./วินาที
	V_B	คือ ปริมาตรฟองอากาศ (ปริมาตรทรงกลม) หน่วย ลบ.ม.
	d_B	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ หน่วย ม.

จากสมการที่ 2.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของการเกิดฟองอากาศกับอัตราการไหลของก๊าซที่เติมให้กับระบบ และปริมาตรของฟองอากาศ เมื่อฟองอากาศมีรูปร่างเป็นทรงกลมหรือมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า (Equivalent diameter, d_e) สามารถคำนวณปริมาตรของฟองอากาศได้ตามสมการที่ 2.24 และความถี่ของการเกิดฟองอากาศมีความสัมพันธ์กับจำนวนฟองอากาศที่เกิดขึ้นขณะเติมอากาศตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$N_B = \frac{f_B \times H_L}{U_B} \quad (2.25)$$

เมื่อ	N_B	คือ จำนวนฟองอากาศ หน่วย ฟอง
-------	-------	-----------------------------

H_L คือ ความสูงของผิวน้ำเหนือจุดเดิมอากาศ หน่วย ม.

จากสมการที่ 2.25 จำนวนฟองอากาศที่เกิดขึ้นขณะเดิมอากาศมีความสัมพันธ์กับความถี่ของการเกิดฟองอากาศ ความสูงของผิวน้ำเหนือจุดเดิมอากาศและความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ ซึ่งส่งผลต่อพื้นที่สัมผัสระหว่างฟองอากาศกับน้ำและประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน ความถี่ของการเกิดฟองอากาศที่มากทำให้เกิดฟองอากาศจำนวนมาก มีพื้นที่สัมผัสมากและประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูงในกรณีที่ไม่เกิดการรวมตัวของฟองอากาศ และจากสมการที่ 2.19 ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศมีความสัมพันธ์กับขนาดฟองอากาศ จึงอาจมีความเป็นไปได้ในการประเมินค่าความถี่ของการเกิดฟองอากาศ และจำนวนฟองอากาศเบื้องต้นได้เมื่อทราบค่าขนาดฟองอากาศ ซึ่งอาจเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยอำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เดิมอากาศได้

2.13.4 พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างก๊าซและของเหลว (Interfacial area, a)

พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างก๊าซและของเหลว คือ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่สัมผัสของฟองอากาศทั้งหมดกับปริมาตรของน้ำที่เดิมอากาศ แสดงถึงพื้นที่ทั้งหมดที่เกิดการถ่ายเทออกซิเจนได้ขณะเดิมอากาศโดยมีความสัมพันธ์ตามสมการดังนี้

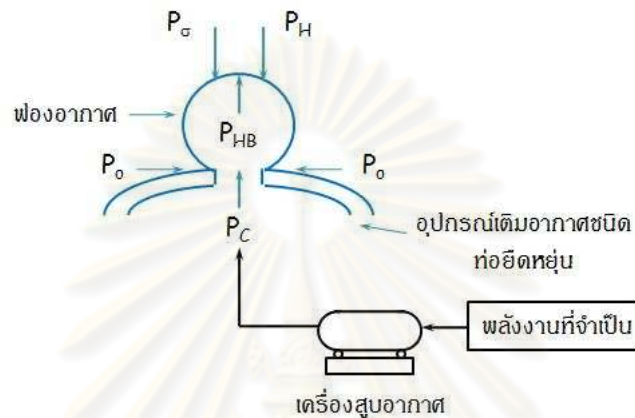
$$a = \frac{N_B \times S_B}{V_{\text{Total}}} = \frac{N_B \times \pi \times d_B^2}{A \times H_L + N_B \times V_B} \quad (2.26)$$

เมื่อ	a	คือ พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างก๊าซและของเหลว หน่วย ตร.ม./ลบ.ม. หรือ 1/ม.
	S_B	คือ พื้นที่ผิวของฟองอากาศ (พื้นที่ผิวทรงกลม) หน่วย ตร.ม.
	V_{Total}	คือ ปริมาตรโดยรวมระหว่างปริมาตรของน้ำ และฟองอากาศ หน่วย ลบ.ม.
	A	คือ พื้นที่หน้าตัดขวางของน้ำในถังเดิมอากาศ หน่วย ตร.ม.
	H_L	คือ ความสูงของน้ำในถังเดิมอากาศ หน่วย ม.

เนื่องจากพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างก๊าซและของเหลวมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวของฟองอากาศทั้งหมดหรือผลคูณระหว่างจำนวนฟองอากาศที่เกิดขึ้นกับพื้นที่ผิวของฟองอากาศหนึ่งฟอง และปริมาตรโดยรวมระหว่างปริมาตรน้ำกับปริมาตรฟองอากาศทั้งหมดหรือผลคูณระหว่างจำนวนฟองอากาศกับปริมาตรฟองอากาศตามสมการที่ 2.26 (Painmanakul และคณะ, 2004) เมื่อสมมติให้ฟองอากาศมีรูปร่างเป็นทรงกลม ปริมาตรฟองอากาศจึงสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.24 จากความสัมพันธ์ข้างต้นจะพบว่าพื้นที่สัมผัสมีความสัมพันธ์กับขนาดฟองอากาศ ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้ในการประเมินค่าพื้นที่สัมผัสจำเพาะในเบื้องต้นเมื่อทราบค่าขนาดฟองอากาศ ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยอำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เดิมอากาศได้

2.14 ความดัน (Pressure, P) และกำลังที่จำเป็น (Power required)

เนื่องจากการเติมอากาศโดยวิธีปล่อยอากาศใต้น้ำจำเป็นต้องใช้เครื่องเป่าอากาศเพื่อไล่เสียงอากาศ และอัดด้วยความดันผ่านอุปกรณ์เติมอากาศที่ติดตั้งอยู่ใต้น้ำทำให้อากาศกระจายตัวเป็นฟองอากาศขนาดเล็กลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ จึงเกิดการสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับน้ำและเกิดการถ่ายเทออกซิเจนในกระบวนการเติมอากาศ ความดันเริ่มต้นที่ทำให้เกิดฟองอากาศได้ เรียกว่า ความดันวิกฤต (Critical pressure, ΔP) มีความสัมพันธ์กับความเย็ดหยุ่นของอุปกรณ์เติมอากาศ โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2.5 ภาพแสดงสมดุลของความดันขณะเกิดฟองอากาศบนอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่น

ที่มา : Painmanakul และคณะ, 2004

$$\Delta P > P_C - P_H + P_{HB} - P_G - P_o \quad (2.27)$$

$$\Delta P_{\text{Critic}} = \frac{4 \times \sigma_L}{d_{\text{OR}}} + P_o \quad (2.28)$$

$$P_H = P_{\text{atm}} + \rho_L \times g \times H_L \quad (2.29)$$

$$P_{HB} = \rho_L \times g \times R_B \quad (2.30)$$

เมื่อ	ΔP	คือ ความดันลดที่เกิดจากอุปกรณ์เติมอากาศ หน่วย ปาสคาล
	P_C	คือ ความดันจากก๊าซ หน่วย ปาสคาล
	P_H	คือ ความดันไฮโดรสแตติก (Hydrostatic pressure) หน่วย ปาสคาล
	P_{HB}	คือ ความดันไฮโดรสแตติกของฟองอากาศ หน่วย ปาสคาล
	P_G	คือ ความดันจากแรงตึงผิวของน้ำ หน่วย ปาสคาล

P_0	คือ ความดันจากความยืดหยุ่นของอุปกรณ์เติมอากาศ หน่วย ปาสคาล
ΔP_{Critic}	คือ ความดันวิกฤต หน่วย ปาสคาล
σ_L	คือ แรงตึงผิวของของเหลว หน่วย นิวตัน/ม.
d_{OR}	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของรูเติมอากาศ (Equivalent hole diameter) หน่วย ม.
P_{atm}	คือ ความดันบรรยากาศ หน่วย ปาสคาล
ρ_L	คือ ความหนาแน่นของของเหลว หน่วย กก./ลบ.ม.
R_B	คือ รัศมีของฟองอากาศ (รูปร่างทรงกลม) หน่วย ม.

จากรูปที่ 2.5 แสดงสมดุลของความดันขณะเกิดฟองอากาศบนอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่น เครื่องเป่าอากาศอัดอากาศเข้าสู่อุปกรณ์เติมอากาศที่ติดตั้งอยู่ใต้น้ำด้วยความดัน (P_0) เพื่อทำให้เกิดฟองอากาศเครื่องเป่าอากาศต้องมีความดันมากกว่าความดันจากความยืดหยุ่นของอุปกรณ์เติมอากาศ (P_0) ซึ่งเป็นความดันที่เกิดจากการหดตัวของรูเติมอากาศต้านทานการไหลของอากาศ เมื่อเริ่มเกิดฟองอากาศความดันจากเครื่องเป่าอากาศต้องทำให้ฟองอากาศมีความดันไฮโดรสแตติก (P_{HB}) มากกว่าความดันไฮโดรสแตติกจากความลึกของน้ำ (P_H) และความดันจากแรงตึงผิวของน้ำ (P_σ) จึงสามารถทำให้เกิดฟองอากาศและลอยขึ้นสู่น้ำได้ โดยความดันที่จำเป็นเพื่อทำให้เกิดฟองอากาศหรือความดันขณะเติมอากาศมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.27 และสามารถคำนวณเป็นค่าความดันวิกฤตได้ตามสมการที่ 2.28 ในทางปฏิบัติสามารถวัดค่าความดันวิกฤตได้โดยตรง ดังนั้นจึงสามารถใช้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.28 คำนวณค่าความดันจากความยืดหยุ่นของอุปกรณ์เติมอากาศได้ ส่วนความดันไฮโดรสแตติกสามารถคำนวณได้โดยความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.29 และ 2.30 เมื่อทราบค่าความดันที่จำเป็นเพื่อทำให้เกิดฟองอากาศจึงสามารถเลือกเครื่องเป่าอากาศเพื่อใช้ในกระบวนการเติมอากาศได้อย่างเหมาะสม

เนื่องจากเครื่องเป่าอากาศที่ใช้ในกระบวนการเติมอากาศต้องมีความดันมากกว่าความดันลดทั้งหมด เพื่อทำให้เกิดฟองอากาศได้ซึ่งส่งผลต่อการใช้พลังงาน เครื่องเป่าอากาศที่มีความดันสูงจะใช้พลังงานมากตามไปด้วย โดยปริมาณพลังงานที่จำเป็นในการเติมอากาศสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$P_w = \frac{w \times R \times T_1}{29.7 \times n \times e} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{0.283} - 1 \right] \quad (2.31)$$

$$\frac{P_G}{V_{\text{Total}}} = Q_G \times \frac{\Delta P_{\text{Total}}}{V_{\text{Total}}} = Q_G \times \frac{\rho_L \times g \times H_L + \Delta P}{V_{\text{Total}}} \quad (2.32)$$

เมื่อ	P_w	คือ กำลังที่จำเป็นในกระบวนการเติมอากาศ หน่วย กิโลวัตต์
	w	คือ น้ำหนักอากาศที่เติมให้กับระบบ หน่วย กก./วินาที

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

เนื่องจากพลังงานที่จำเป็นในกระบวนการเติมอากาศมีความสัมพันธ์กับกำลังที่จำเป็นของเครื่องเป่าอากาศเพื่อทำให้เกิดฟองอากาศซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าความดัน การวัดค่าความดันที่จุดต่างๆของอุปกรณ์เติมอากาศจึงสามารถวิเคราะห์ค่าพลังงานที่จำเป็นได้ โดยใช้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.31 คำนวณค่ากำลังที่จำเป็นในกระบวนการเติมอากาศ (Metcalf และ Eddy, 2004) หรือใช้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่จำเป็นกับความดันลดที่เกิดจากอุปกรณ์เติมอากาศตามสมการที่ 2.32 (Painmanakul และ คณะ, 2004) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีวัดค่าความดันลดที่เกิดจากอุปกรณ์เติมอากาศ และใช้ คำนวณค่ากำลังที่จำเป็นตามสมการที่ 2.32 เนื่องจากสามารถใช้อุปกรณ์วัดค่าความดันได้โดยตรง หลังจากนั้นจึงใช้ค่ากำลังที่จำเป็นประกอบกรวิเคราะห์ค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศชนิดที่อัดยัดหยุ่นตามสมการที่ 2.10

2.15 การทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของ ฟองอากาศ

เนื่องจากกระบวนการเติมอากาศสามารถควบคุมได้โดยอัตราการไหลของก๊าซที่เติมให้กับระบบ อัตราการไหลของอากาศแต่ละค่าทำให้เกิดการถ่ายเทออกซิเจนที่แตกต่างกัน เช่น การเติมอากาศด้วย อัตราการไหลต่ำอาจทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กและมีความเร็วลอยตัวค่าหนึ่ง แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหล อาจทำให้ฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีความเร็วลอยตัวลดลง เป็นต้น แสดงว่าอัตราการไหลของ อากาศมีความสัมพันธ์กับตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ นอกจากนั้นยังมีความสัมพันธ์ระหว่าง ขนาดฟองอากาศกับตัวแปรอื่นๆ เช่น ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ และพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่าง ฟองอากาศกับน้ำ เป็นต้น จึงมีความน่าสนใจในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซกับ ขนาดฟองอากาศเพื่อใช้เป็นตัวแปรหลักในการทำนายค่าตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ ค่า สัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างก๊าซและของเหลว และ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน การประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนตามหัวข้อที่ 3.4.1 ทำ ให้ทราบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ซึ่งเป็นตัวแปรที่เกิดจากผลคูณระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การ เคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวกับพื้นที่สัมผัสจำเพาะตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$k_L a = k_L \times a \quad (2.33)$$

$$k_L = \frac{k_L a}{a} \quad (2.34)$$

จากสมการที่ 2.34 แสดงให้เห็นว่า เมื่อทราบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และพื้นที่สัมผัส จำเพาะทำให้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวได้ และสามารถอธิบายถึงการถ่ายเทออกซิเจนได้อย่างชัดเจน ในปัจจุบันจึงได้มีการศึกษาการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆดังนี้

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (d_B)

ลำดับที่	ความสัมพันธ์	ข้อกำหนด	อ้างอิง
d_{B-1}	$d_B = \left(\frac{6 \cdot d_{OR} \cdot \sigma \cdot g_c}{g \cdot \Delta p} \right)^{1/3}$	$Q_{go} < \left(\frac{20(\sigma \cdot d_o \cdot g_c)^5}{(g \cdot \Delta p)^2 \cdot \rho_L^3} \right)^{1/6}$	Krevelen et al. (1959)
d_{B-2}	$d_B = 0.0287 d_{OR}^{1/2} \cdot Re^{1/3}$	$Re < 2100$	Leibson et al. (1956)
d_{B-3}	$d_B = \left(\frac{72 \rho_L}{\pi^2 \cdot g \cdot \Delta p} \right)^{1/5} \cdot Q_{go}^{0.4}$		Krevelen et al. (1959)
d_{B-4}	$d_B = 7.1 \times 10^{-4} \cdot \Delta p^{0.328}$		Hebrard (1995)
d_{B-5}	$d_B = 15.73 \times 10^{-3} \cdot D_C^{0.32} \left(\frac{Q_g}{D_{OR}} \right)^{0.16}$		Hebrard (1995)
d_{B-6}	$d_B = 1.56 Re^{0.058} \left(\frac{d_{OR}^2 \cdot \sigma}{\Delta p g} \right)^{1/4}$ $d_B = 0.32 Re^{0.425} \left(\frac{d_{OR}^2 \cdot \sigma}{\Delta p g} \right)^{1/4}$	$1 < Re < 10$ $10 < Re < 21000$	Kumar et al. (1976)
d_{B-7}	$\frac{g \cdot \rho_L \cdot d_B^2}{\sigma} = 8.8 \left(\frac{u_G \cdot \mu_L}{\sigma} \right)^{-0.04} \left(\frac{\sigma^3 \cdot \rho_L}{g \cdot \mu_L} \right)^{-0.12} \left(\frac{\rho_L}{\rho_G} \right)^{0.22}$		Wilkinson et al. (1994)

ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่าความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (U_B)

ลำดับที่	ความสัมพันธ์	ข้อกำหนด	อ้างอิง
U _B -1	$U_B = \frac{g \cdot \Delta \rho \cdot d_b^2}{12 \cdot \mu}$	$Re < 250$, $\frac{\mu_G}{\mu} = 0$	Hadamard and Ryazantsev (1911)
U _B -2	$U_B = \frac{g \cdot \Delta \rho \cdot d_b^2}{18 \cdot \mu}$	$Re < 250$, $\frac{\mu_G}{\mu} = \infty$	Frumkin and Levich (1947)
U _B -3	$U_B = \frac{\mu}{\rho_L \cdot d_b} (J - 0.875) M_o^{-0.149}$ $J = 0.94H^{0.757} ; 2 < H \leq 59.3$ $J = 0.32H^{0.441} ; H > 59.3$ $H = \frac{4}{3} E_o \cdot M_o^{-0.149} \left(\frac{\mu}{0.0009} \right)^{-0.14}$	$250 < Re < 6000$	Grace et al. (1976)
U _B -4	$U_B = \left(\frac{2\sigma}{d_b \cdot \rho} + 0.5d_b \cdot g \right)^{0.5}$	$0.2 \leq d_b \leq 8 \text{ cm.}$	Mendelson (1967)
U _B -5	Experimental curve for the bubble rising velocity		Grace and Wairegi (1986)

ตารางที่ 2.5 ตารางแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่าพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างของเหลวและก๊าซ (a)

ลำดับที่	ความสัมพันธ์	อ้างอิง
a-1	$a = 34.4 U_G^{0.25} \cdot \epsilon_G$	Deckwer (1992)
a-2	$a = 26 \left(\frac{L_R}{d_R} \right)^{-0.3} \cdot \left(\frac{\rho_L \cdot \sigma_L^3}{g \cdot \mu^4} \right)^{-0.003} \cdot \epsilon_G$	Gestrich and Krauss (1975)
a-3	$a = \frac{6}{2.5} \left(\frac{\sigma_L}{\rho_L \cdot g} \right)^{-0.5} \cdot \left(\frac{\mu_L \cdot U_G}{\sigma_L} \right)^{0.25} \cdot \left(\frac{\rho_L \cdot \sigma_L^3}{g \cdot \mu^4} \right)^{0.125} \cdot \epsilon_G$	Van Dierendonck et al. (1968)
a-4	$a = 4.65 \times 10^{-12} \cdot \left(\frac{U_G}{\mu} \right)^{0.51}$	Tomida et al. (1978)
a-5	$a = \frac{6 \cdot \epsilon_G}{d_b (1 - \epsilon_G)}$	Moustiri (2000)
a-6	$a = 8.54 \cdot U_G^{0.12} \cdot \epsilon_G$	Deckwer (1992)
a-7	$a = \frac{f_B \cdot H_L \cdot \pi \cdot d_b^2}{U_B \cdot V_{Total}}$	Painmanakul et al. (2004)

ตารางที่ 2.6 ตารางแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว (k_L)

ลำดับที่	ความสัมพันธ์	อ้างอิง
K _L -1	$K_L = 2 \left(\frac{D_{O_2} \cdot U_B}{\pi \cdot h} \right)^{0.5}$	Higbie's equation (Roustan, 2003)
K _L -2	$K_L = \frac{D}{d_b} (2 + 0.6Re^{(1/2)} \cdot Sc^{(1/3)})$	Frossling's equation (Roustan, 2003)

ตารางที่ 2.7 ตารางแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ($k_L a$)

ลำดับที่	ความสัมพันธ์	อ้างอิง
KLa-1	$K_L a = 0.0269 U_G^{0.82}$	Deckwer et al. (1974)
KLa-2	$K_L a = d_c^{0.17} \cdot U_G^{0.7}$	Akita and Yoshida (1973)
KLa-3	$\frac{K_L a}{U_G} \cdot \left(\frac{v_L^2}{g} \right)^{0.33} = 3.9 \times 10^{-5} \cdot \left(\frac{\mu_g}{(v_L \cdot g)^{0.33}} \right)^{-0.1}$	Zlaskarnik (1981)
KLa-4	$K_L a = 0.041 \alpha \cdot \frac{H_L}{d_b^{0.67}} \cdot \left(\frac{d_{OR}}{D_c} \right)^{0.18} \cdot \frac{U_G}{H_L}$	Khudenko and Shpirt (1986)
KLa-5	$K_L a = K_L \times a$	Painmanakul et al. (2004)

จากตารางที่ 2.3 ถึง 2.7 แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศที่ถูกนำเสนอในปัจจุบันซึ่งมาจากการศึกษาความสัมพันธ์ในระดับห้องปฏิบัติการ หรือศึกษาความสัมพันธ์จากข้อมูลทุติยภูมิโดยอ้างอิงจากทฤษฎี โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซกับขนาดฟองอากาศเป็นตัวแปรหลักในการทำนายค่าต่างๆ เพื่อช่วยอำนวยความสะดวกและบรรเทาความยุ่งยากจากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน เช่น ระยะเวลาและความยุ่งยากในการวิเคราะห์ การเตรียมอุปกรณ์ที่จำเป็น และทักษะของผู้วิเคราะห์ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม แบบจำลองดังกล่าวยังมีข้อจำกัดในการใช้งานเนื่องจากจุดประสงค์การใช้งานที่แตกต่างกัน และปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทออกซิเจนทำให้มีความคลาดเคลื่อนจากการทำนายค่อนข้างมาก ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่ต้องศึกษาการประยุกต์ใช้แบบจำลองเพิ่มเติมเพื่อสามารถใช้ในการทำนายได้อย่างแม่นยำ และมีความคลาดเคลื่อนลดลงจนอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ เพื่อสามารถประยุกต์ใช้ผลจากการทำนายในการวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศ และประเมินความเหมาะสมของอุปกรณ์เติมอากาศในขั้นต้นได้ (Painmanakul และ Jamnongwong, 2007)

2.16 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการเติมอากาศ

ในกระบวนการเติมอากาศส่วนใหญ่ประกอบด้วย เครื่องเป่าอากาศ อุปกรณ์เติมอากาศหรือ อุปกรณ์กระจายอากาศ และท่ออากาศ เป็นต้น อุปกรณ์เติมอากาศที่นิยมใช้ทั่วไปมีหลายประเภทโดยขึ้นกับลักษณะการใช้งาน รูปทรงของถังเติมอากาศ ราคาค่าติดตั้งและค่าเดินระบบ เป็นต้น ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.16.1 อุปกรณ์กระจายอากาศ (Diffused aeration)

กระบวนการเติมอากาศที่ใช้อุปกรณ์กระจายอากาศอาศัยความดันจากเครื่องเป่าอากาศอัดอากาศลงใต้น้ำ เมื่ออากาศผ่านอุปกรณ์กระจายอากาศทำให้เกิดเป็นฟองอากาศและเกิดการถ่ายเทออกซิเจน ซึ่งอุปกรณ์กระจายอากาศสามารถแบ่งเป็นประเภทได้ 2 ลักษณะ คือ แบ่งตามขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้น และแบ่งตามลักษณะทางกายภาพของอุปกรณ์กระจายอากาศ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.) แบ่งตามขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้น

1.1) ฟองอากาศขนาดเล็ก (Fine bubble)

อุปกรณ์กระจายอากาศประเภทนี้จะมีรูพรุนขนาดเล็กมาก อาจมีลักษณะเป็นแผ่น ท่อ หรือโดม (Dome) ผลิตจากซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide, SiO_2) อะลูมินัมออกไซด์ (Aluminum oxide, Al_2O_3) โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) ซึ่งอาจเป็นอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดที่มีความแข็งหรือความยืดหยุ่นยืดหยุ่น โดยมีวัสดุยึดประสานประเภทเซรามิก (Ceramic) เป็นตัวช่วยยึดประสานให้มีรูปร่างตามที่ต้องการ อุปกรณ์กระจายอากาศประเภทนี้มีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนประมาณร้อยละ 10 ถึง 30 มีอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ณ สภาวะมาตรฐานประมาณ 1.2 ถึง 2.0 กก./ชม.-กิโวลต์ตต์ และขนาดฟองอากาศประมาณ 2.0 ถึง 2.5 มม. โดยทั่วไปถูกออกแบบให้สามารถจ่ายอากาศได้ในอัตรา 0.1 ถึง 0.4 ลบ.ม./นาที่-อุปกรณ์ ข้อดีของอุปกรณ์กระจายอากาศประเภทนี้ คือ มีความสามารถในการกวนผสมน้ำได้อย่างทั่วถึง สามารถปรับอัตราการไหลของอากาศที่เติมให้กับระบบได้ในช่วงกว้าง และมีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูงทำให้ประหยัดพลังงานมากกว่าอุปกรณ์ชนิดฟองอากาศขนาดใหญ่ แต่มีข้อเสีย คือ มีราคาแพงทั้งค่าวัสดุและค่าบำรุงรักษา และเกิดการอุดตันได้ง่ายเนื่องจากมีรูพรุนขนาดเล็ก จึงควรติดตั้งเครื่องกรองอากาศก่อนเป่าอากาศเข้าอุปกรณ์กระจายอากาศ



รูปที่ 2.6 ภาพแสดงอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดฟองอากาศขนาดเล็ก

ที่มา : Triveni : ENGINEERING AND INDUSTRIES LTD. (ออนไลน์), 2003

1.2) ฟองอากาศขนาดกลาง (Medium bubble)

อุปกรณ์กระจายอากาศประเภทนี้จะมีรูพรุนขนาดกลาง โดยทั่วไปมีลักษณะเป็นท่อซึ่งผลิตมาจากเหล็กไร้สนิม (Stainless steel) เจาะเป็นรูและหุ้มด้วยถุงผ้ามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 7.5 ซม. และมีความยาวประมาณ 61 ซม. อุปกรณ์กระจายอากาศประเภทนี้มีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนประมาณร้อยละ 6 ถึง 15 มีอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ณ สภาวะมาตรฐานประมาณ 1.0 ถึง 1.6 กก./ชม.-กิโวลต์ตต์ และมีขนาดฟองอากาศใหญ่กว่า 2.5 มม. เล็กน้อย ข้อดีของอุปกรณ์กระจายอากาศประเภทนี้ คือ มีความสามารถในการกวนผสมน้ำได้อย่างทั่วถึง ค่าบำรุงรักษาถูกเนื่องจากการเปลี่ยนถุงหุ้มท่อเท่านั้น แต่

มีข้อเสีย คือ ราคาตัววัสดุแพง และควรมีการติดตั้งเครื่องกรองอากาศก่อนเป่าอากาศเข้าอุปกรณ์กระจายอากาศเพื่อป้องกันการอุดตันภายในอุปกรณ์

1.3) ฟองอากาศขนาดใหญ่ (Coarse bubble)

อุปกรณ์กระจายอากาศประเภทนี้มีรูขนาดใหญ่ อาจมีลักษณะเป็นท่อหรือโดม มีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนค่อนข้างต่ำโดยมีค่าประมาณร้อยละ 4 ถึง 8 มีอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ณ สภาวะมาตรฐานประมาณ 0.6 ถึง 1.2 กก./ชม.-กิโลวัตต์ และมีขนาดฟองอากาศใหญ่กว่า 2.5 มม. ข้อดีของอุปกรณ์กระจายอากาศประเภทนี้ คือ เกิดการอุดตันได้ยากจึงมีค่าบำรุงรักษาถูก ไม่จำเป็นต้องติดตั้งเครื่องกรองอากาศ และมีความสามารถในการรบกวนผสมสูง แต่มีข้อเสีย คือ มีราคาแพง และมีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนต่ำมาก



รูปที่ 2.7 ภาพแสดงอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดฟองอากาศขนาดใหญ่

ที่มา : ENVIRONMENTAL DYNAMICS INC. (ออนไลน์), 2005

2.) แบ่งตามลักษณะทางกายภาพของอุปกรณ์กระจายอากาศ

2.1) ชนิดรูพรุนขนาดเล็ก (Porous diffusers)

อุปกรณ์กระจายอากาศชนิดรูพรุนขนาดเล็กโดยทั่วไปผลิตจากวัสดุที่มีรูพรุนจำนวนมาก เช่น เซรามิก พลาสติกทั้งชนิดแข็งและยืดหยุ่น ยาง และวัสดุหุ้มด้วยถุงผ้า เป็นต้น เมื่ออากาศถูกอัดผ่านรูพรุนขนาดเล็กจึงเกิดเป็นฟองอากาศขนาดเล็ก และมีการถ่ายเทออกซิเจนที่ดี แต่รูพรุนขนาดเล็กทำให้เกิดการอุดตันได้ง่ายจากสิ่งเจือปนประเภทฝุ่นในอากาศ จึงควรติดตั้งอุปกรณ์กำจัดฝุ่นประเภทถุงกรอง (Bag filter) หรือเครื่องกรองฝุ่นชนิดไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic filter) บริเวณขาเข้าของเครื่องเป่าอากาศ อุปกรณ์กระจายอากาศชนิดนี้มักมีรูปร่างลักษณะหลากหลาย เช่น ชนิดแผ่น ชนิดท่อ ชนิดโดม และชนิดแผ่นจาน เป็นต้น มีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนประมาณร้อยละ 6 ถึง 30 มีอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ณ สภาวะมาตรฐานประมาณ 1.0 ถึง 2.0 กก./ชม.-กิโลวัตต์

2.1.1) ชนิดแผ่น (Plate diffusers)

อุปกรณ์กระจายอากาศชนิดแผ่นอยู่ในกลุ่มของอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดรูปวงรีขนาดเล็กผลิตจากเซรามิกมีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 30 ซม. ยาว 30 ซม. และหนาประมาณ 2.5 ถึง 3.8 ซม. อุปกรณ์กระจายอากาศชนิดนี้จะถูกติดตั้งที่พื้นของถังเติมอากาศ และจัดเรียงเป็นกลุ่มๆ ให้กระจายทั่วบริเวณพื้น เติบโตอากาศเพื่อลำเลียงไปยังอุปกรณ์แต่ละกลุ่มและมีวาล์วควบคุมการเปิดปิดของแต่ละกลุ่ม ข้อเสียของระบบเติมอากาศแบบนี้ คือ การกระจายตัวของฟองอากาศจากอุปกรณ์กระจายอากาศแต่ละกลุ่มอาจไม่เท่ากันหรือไม่สม่ำเสมอ มีความยุ่งยากในการบำรุงรักษาเนื่องจากอุปกรณ์ถูกติดตั้งอยู่ที่พื้นของถังเติมอากาศ และกระจายตัวอยู่ทั่วบริเวณพื้นจึงมีความยุ่งยากในการถอดอุปกรณ์ขึ้นมาบำรุงรักษา และมีความยุ่งยากมากในกรณีที่ต้องการเพิ่มจำนวนอุปกรณ์กระจายอากาศซึ่งต้องจัดเรียงอุปกรณ์และท่ออากาศใหม่ จึงไม่นิยมใช้ระบบเติมอากาศแบบนี้ แต่มีข้อดี คือ มีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูง และมีอายุการใช้งานนาน



รูปที่ 2.8 ภาพแสดงอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดแผ่น

ที่มา : ALAB, LLC : QuickPure™ TECHNOLOGIES (ออนไลน์), 1996

2.1.2) ชนิดท่อ (Tube diffusers)

อุปกรณ์กระจายอากาศชนิดท่ออยู่ในกลุ่มของอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดรูปวงรีขนาดเล็กผลิตจากวัสดุประเภทอะลูมิเนียมออกไซด์ หรือพลาสติกประเภทโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง โดยอาจเป็นท่อแข็งหรือท่อยืดหยุ่นก็ได้ มีความยาวประมาณ 50 ถึง 60 ซม. มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกประมาณ 6.5 ถึง 7.5 ซม. และมีความหนาของผนังท่อประมาณ 0.6 ถึง 2.5 มม. โดยทั่วไปอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดท่อที่มีขนาดดังกล่าวสามารถทำงานได้ในช่วงอัตราการไหลของอากาศประมาณ 0.5 ถึง 4.7 ลิตร/วินาที ซึ่งเป็นช่วงการทำงานที่กว้าง ลักษณะที่เป็นท่อจึงสามารถติดตั้ง และเคลื่อนย้ายได้ง่าย การถอดอุปกรณ์ขึ้นมาบำรุงรักษาทำได้ง่ายกว่าอุปกรณ์ชนิดแผ่น จึงสามารถเพิ่มจำนวนอุปกรณ์ในถังเติมอากาศ และจัดเรียงอุปกรณ์ใหม่ได้สะดวกทำให้เป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย กรณีอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดท่อที่มีความยืดหยุ่นหรือโค้งงอได้ทำให้สามารถติดตั้งในถังเติมอากาศที่มีรูปทรงต่างๆ ได้อย่างหลากหลาย หรือติดตั้ง

หลบหลีกสิ่งกีดขวางได้อย่างสะดวก แต่ข้อเสียของอุปกรณ์ชนิดนี้ คือ มีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนต่ำกว่า และมีอายุการใช้งานสั้นกว่าอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดแผ่น



รูปที่ 2.9 ภาพแสดงอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดท่อ

ที่มา : HYDRO-LOGIC ENVIRONMENTAL (ออนไลน์), 2001

2.1.3) ชนิดโดม (Dome diffusers)

อุปกรณ์กระจายอากาศชนิดโดมอยู่ในกลุ่มของอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดรูพรุนขนาดเล็กมีลักษณะเป็นแผ่นจานวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 18 ซม. และความหนาประมาณ 3.8 ซม. ที่กึ่งกลางของแผ่นมีวัสดุซึ่งมีรูพรุนติดตั้งอยู่ทำหน้าที่เป็นตัวกระจายอากาศ บางชนิดผลิตจากวัสดุที่มีความยืดหยุ่น เมื่อหยุดเติมอากาศแผ่นยืดหยุ่นนี้จะยุบตัวลงเป็นระนาบเรียบ ความยืดหยุ่นของแผ่นทำให้ขนาดรูหดตัวลงจนปิดสนิทซึ่งช่วยป้องกันการอุดตันขณะหยุดเติมอากาศ เมื่อเริ่มเติมอากาศแผ่นยืดหยุ่นจะพองขึ้นตามความดันอากาศจนมีลักษณะเป็นรูปโดม ขนาดรูที่ขยายใหญ่ขึ้นจึงกระจายอากาศเป็นฟองขนาดเล็กได้ การขยายและหดตัวของแผ่นยืดหยุ่นตลอดการใช้งานทำให้ขนาดของรูใหญ่ขึ้น และมีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนต่ำลงเมื่อถูกใช้งานเป็นเวลานาน อายุการใช้งานของอุปกรณ์ชนิดนี้จึงสั้นกว่าชนิดอื่น



รูปที่ 2.10 ภาพแสดงอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดโดม

ที่มา : Spartan Environmental Technologies : Air and Water Treatment (ออนไลน์), 2004

2.1.4) ชนิดแผ่นจาน (Disc diffusers)

อุปกรณ์กระจายอากาศชนิดแผ่นจานอยู่ในกลุ่มของอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดรูพรุนขนาดเล็กมีลักษณะเป็นแผ่นจานวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 18 ถึง 24 ซม. และมีความหนาประมาณ 1.3 ถึง 1.9 ซม. ผลิตจากวัสดุประเภทเซรามิก อะลูมิเนียมออกไซด์ หรือพลาสติกประเภทโพลีเอทิลีน ซึ่งอุปกรณ์ชนิดนี้จะถูกติดตั้งกับท่ออากาศที่กั้นถังเติมอากาศ มีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูง และมีอายุการใช้งานนานเช่นเดียวกับอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดแผ่น แต่มีความยุ่งยากในการบำรุงรักษาเช่นเดียวกันด้วย



รูปที่ 2.11 ภาพแสดงอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดแผ่นจาน

ที่มา : BRIGHTWATER F.L.I. : WATER AND WASTEWATER TREATMENT (ออนไลน์), 2007

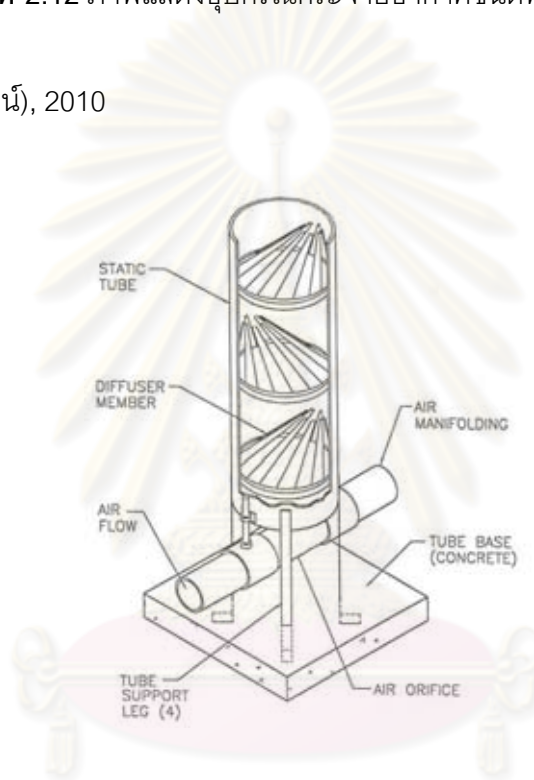
2.2) ชนิดไม่มีรูพรุน (Nonporous diffusers)

อุปกรณ์กระจายอากาศชนิดไม่มีรูพรุน คืออุปกรณ์กระจายอากาศที่ถูกออกแบบให้มีรูทรงที่ปิด เบี้ยวหรือเป็นเกลียว เพื่อสร้างความปั่นป่วนหรือแรงเฉือนต่ออากาศที่ไหลผ่านทำให้เกิดเป็นฟองอากาศ ในปัจจุบันอุปกรณ์ชนิดนี้มีอยู่หลายชนิด เช่น ฟิกซ์ออริฟิส (Fixed orifice) วาล์วออริฟิส (Valved orifice) สเตติกทิวบ์ (Static tube) เพอร์ฟอเรทฮอส (Perforated hose) และสล๊อตทิวบ์ (Slotted tube) เป็นต้น อุปกรณ์ชนิดนี้สร้างฟองอากาศขนาดใหญ่กว่าอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดรูพรุนขนาดเล็กจึงมีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนต่ำกว่า โดยทั่วไปอุปกรณ์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนประมาณร้อยละ 4 ถึง 8 และมีอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ณ สภาวะมาตรฐานประมาณ 0.6 ถึง 1.0 กก./ชม.-กิโลวัตต์ แต่ชนิดสเตติกทิวบ์มีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูงกว่าคือร้อยละ 7 ถึง 10 และมีอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ณ สภาวะมาตรฐานประมาณ 1.2 ถึง 1.6 กก./ชม.-กิโลวัตต์ ข้อดีของอุปกรณ์ชนิดนี้คือ มีราคาถูกและมีการบำรุงรักษาาง่ายกว่าเนื่องจากไม่มีรูพรุนหรือมีรูเติมอากาศขนาดใหญ่กว่าจึงอุดตันได้ยาก



รูปที่ 2.12 ภาพแสดงอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดฟลักซ์ออริฟิส

ที่มา : SIEMENS (ออนไลน์), 2010



รูปที่ 2.13 ภาพแสดงอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดสแตติกทิวบ์

ที่มา : VENTUSE (ออนไลน์), 2001



รูปที่ 2.14 ภาพแสดงอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดสล๊อตทิวบ์

ที่มา : ERE CORPORATE (ออนไลน์), 2009

2.3) อุปกรณ์เติมอากาศประเภทอื่นๆ

2.3.1) อุปกรณ์เติมอากาศชนิดเจ็ท (Jet aerator)

อุปกรณ์เติมอากาศชนิดเจ็ทเป็นอุปกรณ์เติมอากาศที่มีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนค่อนข้างสูง สามารถสร้างฟองอากาศให้มีขนาดอยู่ในช่วงขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ โดยการผสมระหว่างอากาศที่ถูกอัดเข้าอุปกรณ์กับน้ำที่ถูกสูบเข้าไปพร้อมกัน เมื่ออากาศกับน้ำผสมกันที่ช่องแคบ (Nozzle) ในอุปกรณ์ทำให้เกิดความเร็วสูงแล้วจึงถูกฉีดพ่นออกมาภายนอกอุปกรณ์ โดยทั่วไปอุปกรณ์ชนิดนี้จะถูกติดตั้งไว้บริเวณใกล้พื้นของถังเติมอากาศ นิยมใช้กับถังเติมอากาศที่มีความลึกมากประมาณ 7 ถึง 8 ม. มีราคาค่อนข้างแพง มีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนประมาณร้อยละ 10 ถึง 25 และมีอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ณ สภาวะสมดุลประมาณ 1.2 ถึง 2.4 กก./ชม.-กิโลวัตต์



รูปที่ 2.15 ภาพแสดงอุปกรณ์เติมอากาศชนิดเจ็ท

ที่มา : FLYMAR LTD. (ออนไลน์), 2008

2.3.2) อุปกรณ์เติมอากาศชนิดแอสไพเรติง (Aspirating aerator)

อุปกรณ์เติมอากาศชนิดแอสไพเรติงเป็นอุปกรณ์เติมอากาศที่ใช้มอเตอร์หมุนแกนซึ่งติดตั้งอยู่กลางท่ออากาศ เพื่อดูดอากาศจากภายนอกเข้าสู่ท่อแล้วฉีดพ่นลงน้ำ โดยอาศัยความเร็วของการหมุนรอบแกน ทำให้อากาศมีความเร็วจึงสร้างความปั่นป่วนเกิดเป็นฟองอากาศขณะถูกฉีดพ่นได้น้ำ และเกิดการกวนผสมระหว่างอากาศกับน้ำ โดยทั่วไปอุปกรณ์ชนิดนี้จะถูกติดตั้งไว้กับโครงสร้างเหนือผิวน้ำ หรือติดตั้งบนทุ่นลอยน้ำให้ปลายท่ออากาศจุ่มอยู่ใต้น้ำ สามารถทำงานได้กับถังเติมอากาศที่มีความลึกไม่เกิน 3.5 ม. มีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนประมาณร้อยละ 9 ถึง 12 และมีอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ณ สภาวะสมดุลประมาณ 1.5 กก./ชม.-กิโลวัตต์

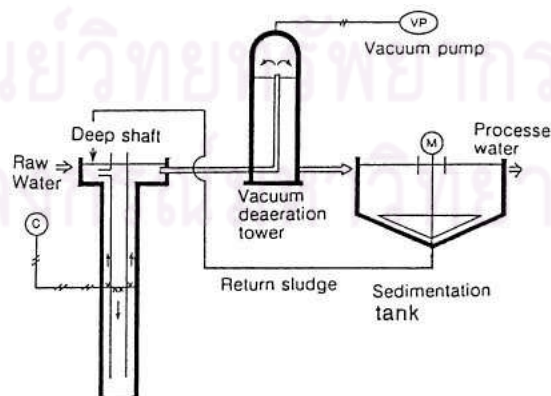


รูปที่ 2.16 ภาพแสดงอุปกรณ์เติมอากาศชนิดแอสไปเรตติ้ง

ที่มา : GRG ENVIRO SOUND SOLUTIONS (P) LTD. (ออนไลน์), 2009

2.3.3) ระบบเติมอากาศแบบยูทิวบ์ (U-tube aerator)

ระบบเติมอากาศแบบยูทิวบ์คือระบบเติมอากาศในถังเติมอากาศที่มีความลึกมากจากระดับพื้นดิน ถังเติมอากาศมีลักษณะเป็นถังแคบแต่มีความลึกประมาณ 120 ถึง 150 ม. ที่ระดับความลึกมากจะมีความดันสูงทำให้ความสามารถในการละลายของออกซิเจนสูงมากขึ้น และเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน การไหลของน้ำภายในถังเติมอากาศมีลักษณะเป็นแบบปลั๊กโฟลว์ (Plug flow) ไหลวนตามแนวตั้งจากผิวน้ำลงสู่ก้นถังที่มีความดันสูง แล้วไหลย้อนขึ้นสู่ผิวน้ำอีกครั้งก่อนถูกระบายออกจากถังเติมอากาศ มีอุปกรณ์เติมอากาศติดตั้งอยู่ระหว่างทางของการไหล และเติมอากาศสวนทางกับทิศทางการไหลของน้ำเพื่อสร้างความปั่นและการกวนผสมระหว่างอากาศกับน้ำ ระบบเติมอากาศแบบนี้มีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูงมากจึงเหมาะกับการบำบัดน้ำเสียที่มีค่าบีโอดีสูง (Biochemical oxygen demand, BOD) แต่มีข้อเสีย คือ ใช้พลังงานในการเติมอากาศมาก ค่าบำรุงรักษา และค่าก่อสร้างถังเติมอากาศแพง



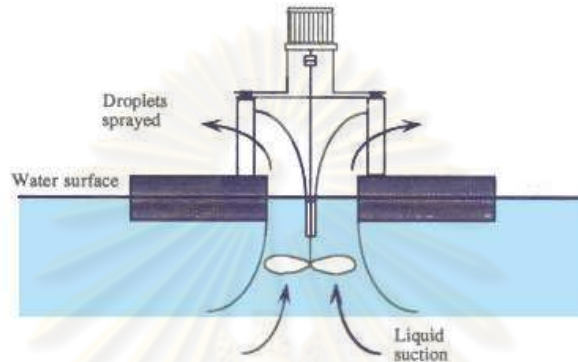
รูปที่ 2.17 ภาพแสดงระบบเติมอากาศแบบยูทิวบ์

ที่มา : Japanese Advanced Environment Equipment (JSIM) (ออนไลน์), 2001

2.16.2 อุปกรณ์เติมอากาศทางกล (Mechanical aeration)

1.) อุปกรณ์เติมอากาศทางกลบนผิวน้ำในแนวตั้ง (Surface mechanical aerator with vertical axis)

คือ อุปกรณ์เติมอากาศทางกลที่ลอยอยู่บนผิวน้ำมีใบพัดหรือกังหันติดตั้งกับแกนหมุนในแนวตั้ง อุปกรณ์อาจถูกยึดกับโครงสร้างถาวรหรือสามารถลอยน้ำได้ด้วยตัวเอง เติมอากาศโดยใช้ใบพัดหมุนตีน้ำ บริเวณผิวน้ำให้เกิดความปั่นป่วน และเกิดการพลิกกลับของชั้นน้ำอย่างรวดเร็ว เพื่อให้เกิดการสัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำอย่างทั่วถึงและเกิดการถ่ายเทออกซิเจน



รูปที่ 2.18 ภาพแสดงอุปกรณ์เติมอากาศทางกลบนผิวน้ำในแนวตั้ง

ที่มา : FAO CORPORATE DOCUMENT REPOSITORY (ออนไลน์), 2000

2.) อุปกรณ์เติมอากาศทางกลใต้น้ำในแนวตั้ง (Submerged mechanical aerator with vertical axis)

คือ อุปกรณ์เติมอากาศทางกลที่ถูกจุ่มลงใต้น้ำเติมอากาศโดยใช้อุปกรณ์กระจายอากาศ และมีกังหันติดตั้งกับแกนหมุนในแนวตั้งเหนืออุปกรณ์กระจายอากาศ ติดตั้งมอเตอร์ไว้เหนือผิวน้ำเพื่อหมุนแกนของกังหัน เมื่อการหมุนกังหันด้วยความเร็วทำให้เกิดความปั่นป่วนและแรงเฉือนต่อฟองอากาศที่ถูกสร้างจากอุปกรณ์กระจายอากาศ ทำให้ฟองอากาศมีขนาดเล็กและฟุ้งกระจายทั่วถึงเติมอากาศ จึงเป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัสและระยะเวลาสัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำ อุปกรณ์เติมอากาศทางกลใต้น้ำชนิดนี้มีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เทอร์ไบน์แอเรชันยูนิต (Turbine aeration unit)



รูปที่ 2.19 ภาพแสดงอุปกรณ์เติมอากาศทางกลใต้น้ำในแนวตั้ง

ที่มา : Nanjing DeTech Pumps Co., Ltd. (ออนไลน์) , 2007

3.) อุปกรณ์เติมอากาศทางกลบนผิวน้ำในแนวนอน (Surface mechanical aerator with horizontal axis)

คือ อุปกรณ์เติมอากาศทางกลที่ลอยอยู่บนผิวน้ำมีใบพัดหรือกังหันติดตั้งกับแกนหมุนในแนวนอน ใบพัดอาจผลิตจากเหล็กกันสนิมขนาดเล็กติดตั้งรอบแกนหมุนจำนวนหลายแผ่น บางส่วนของใบพัดจมอยู่ใต้น้ำเมื่อใบพัดหมุนจึงตักน้ำให้เกิดการปั่นป่วน น้ำบางส่วนกระจายเป็นหยดน้ำในอากาศขณะเดียวกันอากาศบางส่วนถูกพัดลงสู่ใต้น้ำ ทั้งสองเหตุการณ์ทำให้เกิดการสัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำและเกิดการถ่ายเทออกซิเจนอย่างทั่วถึง โดยทั่วไปนิยมใช้ในถังเติมอากาศแบบคลองวนเวียน (Oxidation ditch)



รูปที่ 2.20 ภาพแสดงอุปกรณ์เติมอากาศทางกลบนผิวน้ำในแนวนอน (กังหันชัยพัฒนา)

ที่มา : มูลนิธิชัยพัฒนา (ออนไลน์), 2531

- 4.) อุปกรณ์เติมอากาศทางกลใต้น้ำในแนวนอน (Submerged mechanical aerator with horizontal axis)

คือ อุปกรณ์เติมอากาศทางกลที่ถูกจุ่มลงใต้น้ำมีใบพัดหรือกังหันติดตั้งกับแกนหมุนในแนวนอน เช่นเดียวกับอุปกรณ์เติมอากาศทางกลบนผิวน้ำในแนวนอน แต่ทำงานอยู่ใต้น้ำและมีลักษณะของใบพัดแตกต่างกันเล็กน้อย มีหลักการเติมอากาศคล้ายกับแต่การหมุนแกนใช้มอเตอร์และแกนเพลลาที่ต้อต้องมีกำลังมากกว่า



รูปที่ 2.21 ภาพแสดงอุปกรณ์เติมอากาศทางกลใต้น้ำในแนวนอน

ที่มา : Triumph Machinery Corporation (ลอนดอน), 1971

2.16.3 เครื่องเป่าอากาศ (Blower)

เครื่องเป่าอากาศ คือ อุปกรณ์ที่ดึงอากาศจากภายนอกแล้วเป่าหรืออัดเข้าไปในท่ออากาศเพื่อลำเลียงอากาศไปใช้ประโยชน์ตามต้องการ โดยอาศัยแรงดูดจากการหมุนของใบพัด หรือใช้แรงเหวี่ยงของกังหันเพื่อถ่ายเทอากาศไปในทิศทางที่ต้องการ เครื่องเป่าอากาศที่ใช้ในการเติมอากาศมีหลายประเภท ซึ่งอาจแบ่งประเภทของเครื่องเป่าอากาศได้ 2 ลักษณะดังนี้

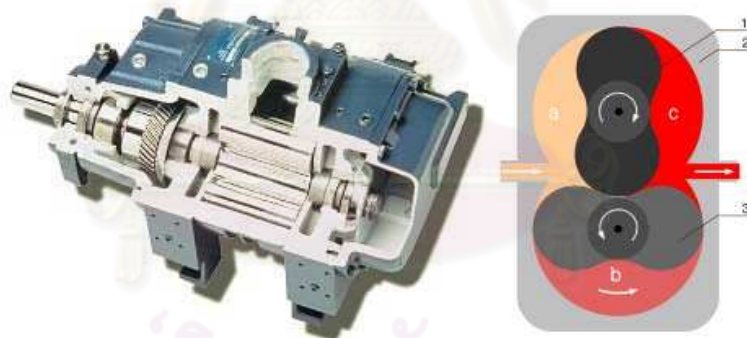
- 1.) แบ่งตามความดันที่สร้างได้
 - 1.1) พัดลม (Fan) คือ เครื่องเป่าอากาศที่สามารถสร้างความดันประมาณ 0.14 บรรยากาศ หรือประมาณ 2 ปอนด์/ตร.นิ้ว
 - 1.2) เครื่องเป่าอากาศ (Blower) คือ เครื่องเป่าอากาศที่สามารถสร้างความดันสูงถึง 1 บรรยากาศ หรือ 15 ปอนด์/ตร.นิ้ว
 - 1.3) เครื่องอัดอากาศ (Compressor) คือ เครื่องเป่าอากาศที่สามารถสร้างความดันมากกว่า 1 บรรยากาศ หรือมากกว่า 15 ปอนด์/ตร.นิ้ว
- 2.) แบ่งตามกลไกการสร้างความดัน
 - 2.1) เครื่องเป่าอากาศชนิดเซนตริฟูกอล (Centrifugal blower) คือ เครื่องเป่าอากาศชนิดอาศัยแรงเหวี่ยงของกังหันภายในเครื่องเพื่อเหวี่ยงอากาศเข้าสู่ท่ออากาศขาออกและเกิดความดัน เป็นชนิดที่นิยมใช้ในงานเติมอากาศ เนื่องจากทำงานได้ที่อัตราการไหลมากกว่า 425 ลบ.ม./นาที่ และมีความดันประมาณ 48 ถึง 62 กิโลปาสคาล หรือ 7 ถึง 9 ปอนด์/ตร.นิ้ว



รูปที่ 2.22 ภาพแสดงเครื่องเป่าอากาศชนิดเซนตริฟูกอล

ที่มา : CSH INC. (ออนไลน์), 2006

2.2) เครื่องเป่าอากาศชนิดโรตารีโบลบ (Rotary lobe blower) คือ เครื่องเป่าอากาศชนิดอาศัยการหมุนของเฟืองซึ่งถูกออกแบบให้มีช่องว่างที่สามารถกักอากาศได้ เมื่อเฟืองหมุนจะกักอากาศจากขาเข้าของเครื่องแล้วหมุนไปปล่อยทางขาออก เครื่องเป่าอากาศชนิดนี้ทำงานได้ที่อัตราการไหลของอากาศต่ำกว่า 425 ลบ.ม./นาที และมีความดันมากกว่า 55 กิโลปาสคาล หรือประมาณ 8 ปอนด์/ตร.นิ้ว



รูปที่ 2.23 ภาพแสดงเครื่องเป่าอากาศชนิดโรตารีโบลบ

ที่มา : DIRECT INDUSTRY (ออนไลน์), 2005

2.3) เครื่องเป่าอากาศชนิดอินเล็ตไกด์เวนวาเรียเบิลดิฟฟิวเซอร์ (Inlet guide vane-variable diffuser) คือ เครื่องเป่าอากาศชนิดอาศัยการหมุนของใบพัดซึ่งถูกติดตั้งไว้กลางช่องลมของเครื่องเป่าอากาศ เมื่อใบพัดหมุนจะดูดอากาศทางขาเข้าของเครื่องและเป่าออกทางขาออกโดยตรงทำให้เกิดการไหลของอากาศอย่างต่อเนื่อง เครื่องเป่าอากาศชนิดนี้สามารถปรับค่าอัตราการไหลของอากาศได้จึงมีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีในสภาวะที่มีการแกว่งค่าของอุณหภูมิอากาศขาเข้า อัตราการไหลของอากาศขาออกและความดันที่ต้องการ ช่วงของอัตรา

การไหลที่สามารถทำงานได้คือ 85 ถึง 1,700 ลบ.ม./นาที่ และสร้างความดันได้สูงถึง 170 กิโลปาสคาล หรือ 25 ปอนด์/ตร.นิ้ว แต่มีข้อเสียคือราคาแพง และต้องการคอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงาน



รูปที่ 2.24 ภาพแสดงเครื่องเป่าอากาศชนิดอินเล็ตทไกด์เวนวาเรียเบิลดีฟิวเซอร์

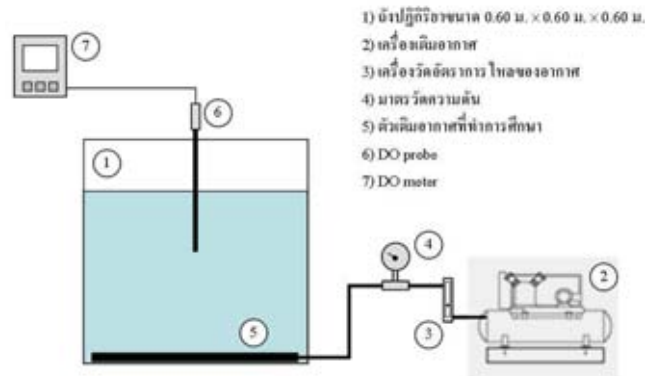
ที่มา : Grupa Powen-Wafapomp SA (ออนไลน์), 2006

2.16.4 ท่ออากาศ (Air piping)

ท่ออากาศในระบบเติมอากาศที่ใช้อุปกรณ์กระจายอากาศโดยทั่วไปประกอบด้วยท่อหลัก วาล์ว และอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ ใช้ลำเลียงอากาศไปยังอุปกรณ์กระจายอากาศที่ถูกติดตั้งอยู่ทั่วบริเวณถังเติมอากาศโดยอาศัยความดันจากเครื่องเป่าอากาศ ท่ออากาศควรผลิตจากวัสดุที่มีสมบัติทนต่อแรงต่างๆ ได้ดี สามารถป้องกันการกัดกร่อนจากน้ำในถังเติมอากาศหรือสิ่งเจือปนในอากาศได้ เช่น ท่อเหล็กคาร์บอน ท่อเหล็กกัสนิม ท่อพลาสติกไฟเบอร์กลาส และท่อพีวีซี (Polyvinyl chloride, PVC) เป็นต้น สำหรับท่ออากาศที่ถูกติดตั้งภายในถังเติมอากาศอาจเลือกใช้ท่อเหล็กกัสนิม ท่อพีวีซี หรือท่อเอชดีพีอี (High density polyethylene, HDPE) ก็ได้เนื่องจากมีความทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดี

2.17 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กชกร ก้องกังวาลย์ และคณะ (2552) ศึกษาอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่นในด้านการถ่ายเทออกซิเจน และอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ เพื่อการประยุกต์ใช้ท่อที่ยืดหยุ่นซึ่งผลิตจากของเสียประเภทยางในกระบวนการเติมอากาศ ทำการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการโดยใช้ถังเติมอากาศปริมาตร 140 ลิตร ขนาดกว้าง 0.6 ม. ยาว 0.6 ม. และสูง 0.6 ม. ดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 ภาพแสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ทำการทดลองเติมอากาศเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของท่อยืดหยุ่นที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 ขนาด คือ 0.25 0.50 และ 0.75 นิ้ว ที่อัตราการเติมอากาศต่าง ๆ โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน ประกอบกับการศึกษาตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศเพื่อการอธิบายการถ่ายเทออกซิเจนได้อย่างชัดเจน จากการศึกษาพบว่า

- 1.) อัตราการไหลของอากาศที่เติมให้กับระบบมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน และตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วง คือ
 - อัตราการไหล 5-10 ลิตร/นาที มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน และประสิทธิภาพเชิงพลังงาน (Energy Efficiency, E_p) สูง แต่มีการกวนผสมต่ำจึงไม่เหมาะกับการบำบัดน้ำเสีย แต่เหมาะกับการเลี้ยงสัตว์น้ำ
 - อัตราการไหล 10-30 ลิตร/นาที มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน และการกวนผสมสูงขึ้นจึงเหมาะกับการบำบัดน้ำเสีย
 - อัตราการไหลมากกว่า 30 ลิตร/นาที ไม่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนให้สูงขึ้น ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน และประสิทธิภาพเชิงพลังงานลดลง มีการกวนผสมมากขึ้น แต่ยังไม่เหมาะกับการใช้งานจริงเพราะสิ้นเปลืองพลังงาน
- 2.) ท่อยืดหยุ่นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75 นิ้วมีความเหมาะสมกับการใช้งานจริง เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนประมาณ 60 1/ชั่วโมง ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนประมาณร้อยละ 20 และประสิทธิภาพเชิงพลังงานประมาณ 20 กก./ชั่วโมง-กิโลวัตต์ ซึ่งเป็นค่าสูงที่สุดในช่วงอัตราการไหล 10 ถึง 30 ลิตร/นาที



รูปที่ 2.26 ภาพแสดงรูปแบบการจัดเรียงท่อยึดหยุ่นเป็นวงกลมรูปก้นหอย

- 3.) การจัดเรียงท่อยึดหยุ่นในถังเติมอากาศควรวางให้มีระยะห่างระหว่างท่อมากกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ เพื่อป้องกันการรวมตัวของฟองอากาศซึ่งทำให้พื้นที่สัมผัสจำเพาะลดลง และการถ่ายเทออกซิเจนลดลงตามไปด้วย จากการศึกษพบว่าความยาวของท่อที่ใช้คือ 4 ม. ต่อพื้นที่ก้นถังเติมอากาศกว้าง 0.6 ม. และยาว 0.6 ม. มีค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูงที่สุดโดยวางชุดเป็นวงกลมรูปก้นหอยดังรูปที่ 2.26

Devatine และ Mietton-Peuchot (2009) ศึกษาการคำนวณปริมาณการเติมออกซิเจนในกระบวนการผลิตไวน์ เนื่องจากกระบวนการหมักไวน์มีขั้นตอนการเติมออกซิเจนเพื่อเลี้ยงยีสต์และการปรับสีให้สม่ำเสมอ ซึ่งต้องเติมออกซิเจนให้เพียงพอกับความต้องการของยีสต์แต่ไม่ต้องการให้มีออกซิเจนสะสมในไวน์จึงต้องเติมออกซิเจนด้วยอัตราการไหลต่ำ แต่คาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นระหว่างการหมักจะละลายอยู่ในไวน์ทำให้ความสามารถในการละลายของออกซิเจน และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนลดลงจนไม่เพียงพอกับความต้องการ งานวิจัยนี้ศึกษาการเติมออกซิเจนทั้งการเป่าด้วยอากาศและการเป่าด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์ สำหรับการเป่าด้วยอากาศได้ศึกษาทั้งกรณีการถ่ายเทออกซิเจนต่ำจนไม่ทำให้ฟองอากาศลดขนาด และกรณีที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่มากจนทำให้เกิดการถ่ายเทออกซิเจนอย่างรวดเร็วและฟองอากาศลดขนาดลงขณะลอยขึ้น ทำการทดลองเติมอากาศทั้งในคอลัมน์รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 ซม. สูงประมาณ 7 ม. และถังเติมอากาศรูปทรงกระบอกขนาดใหญ่ที่มีความลึกเท่ากัน

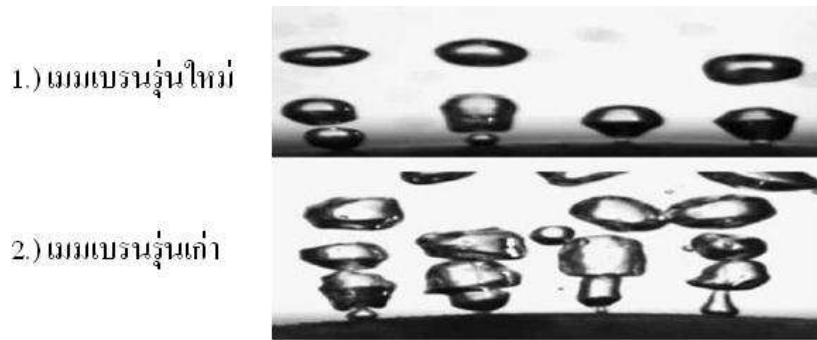
$$Y_{O_2} = \frac{k_L a \times C_S \times V}{Q_G \times \frac{P_{O_2}}{P_{atm}} \times M_{O_2}} = k_L \times \frac{18 \times \mu \times P_{atm} \times V_{mol}}{M_{O_2} \times H_{O_2}} \times \frac{6}{g(P_L - P_G)} \times \frac{H}{d_B^3} \quad (2.35)$$

จากการศึกษาพบว่าค่าyieldของการถ่ายเทออกซิเจน (Oxygen transfer yield, Y_{O_2}) หรือประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมีความสัมพันธ์กับความสูงของระดับน้ำและขนาดฟองอากาศ ทำให้

สามารถคำนวณความสูงของน้ำที่ทำให้ค่าอีลด์เท่ากับ 1 หรือถ่ายเทออกซิเจนได้ทั้งหมดเมื่อทราบขนาดฟองอากาศ จากกรณีของการเติมอากาศที่มีการถ่ายเทออกซิเจนต่ำและฟองอากาศมีขนาดคงที่ ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในห้องปฏิบัติการซึ่งใช้น้ำประปาและมีการถ่ายเทออกซิเจนค่อนข้างช้าจนฟองอากาศมีขนาดคงที่ การคำนวณประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนในถังเติมอากาศที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจึงสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.35 ดังนั้นผลจากงานวิจัยนี้จึงสามารถประยุกต์ใช้ในการพัฒนาอุปกรณ์เติมอากาศ และการออกแบบกระบวนการเติมอากาศในขั้นต้นได้

Hebrard และคณะ (2000) ศึกษาการวิเคราะห์ค่าตัวคูณปรับแก้อัลฟาในน้ำที่มีคุณภาพต่างกัน 3 ชนิด คือ น้ำเสีย น้ำส่วนบน (Supernatant) จากถังเติมอากาศ และน้ำที่ผ่านการบำบัดจากถังตกตะกอนชั้นที่สอง โดยวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในคอลัมน์เติมอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 ม. และสูงประมาณ 0.9 ม. เติมอากาศโดยใช้ก๊าซโพรเพนและวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างการถ่ายเทมวลสารของก๊าซโพรเพนกับก๊าซออกซิเจน เพื่อแปลงผลเป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน จากผลการศึกษาพบว่า ตัวคูณปรับแก้อัลฟาในน้ำแต่ละชนิดมีค่าต่างกันเนื่องจากค่าแรงตึงผิวและสิ่งเจือปนในน้ำที่แตกต่างกัน วิเคราะห์ปริมาณสิ่งเจือปนในน้ำโดยใช้ค่าอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total organic carbon, TOC) ลักษณะน้ำที่แตกต่างกันส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว และพื้นที่สัมผัสจำเพาะซึ่งทำให้ผลคูณจากตัวแปรทั้งสองเป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมีค่าแตกต่างกันด้วย เช่น ในน้ำเสียมีค่าแรงตึงผิวต่ำแสดงถึงน้ำถูกเจือปนด้วยสารลดแรงตึงผิว ทำให้ฟองอากาศมีขนาดเล็กซึ่งมีพื้นที่สัมผัสมาก แต่สารลดแรงตึงผิวถูกดูดซับที่ผิวของฟองอากาศจึงมีความแข็งและขัดขวางการถ่ายเทออกซิเจน ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวต่ำลงมาก ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและค่าตัวคูณปรับแก้อัลฟาจึงต่ำลงด้วย สำหรับอัตราส่วนการถ่ายเทมวลสารของก๊าซทั้งสองในงานวิจัยนี้มีค่าประมาณ 1.396 ± 0.091 การศึกษาลักษณะของน้ำที่เติมอากาศ เช่น แรงตึงผิวและปริมาณสารปนเปื้อนในน้ำ ควบคู่กับการวิเคราะห์ตัวคูณปรับแก้อัลฟาจึงมีความสำคัญเพื่ออธิบายการถ่ายเทออกซิเจนได้อย่างชัดเจน

Painmanakul และคณะ (2004) ศึกษาผลจากความแตกต่างทางสมบัติต่อการถ่ายเทออกซิเจนของเมมเบรนที่ผลิตจากวัสดุประเภทยาง 2 ชนิด คือ เมมเบรนรุ่นเก่าที่ใช้อยู่เดิมและเมมเบรนรุ่นที่ผลิตใหม่ ซึ่งถูกใช้เป็นอุปกรณ์กระจายอากาศในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย เพื่อเปรียบเทียบขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้น ความถี่ของการเกิดฟองอากาศ และประสิทธิภาพการทำงานโดยใช้ค่าพื้นที่สัมผัสจำเพาะและปริมาณการใช้พลังงาน สมบัติที่สนใจศึกษา เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเติมอากาศ ความดันลด ความดันวิกฤต และความยืดหยุ่นที่ศูนย์กลางของเมมเบรน เป็นต้น ทำการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการโดยใช้เมมเบรนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มม. ซึ่งถูกเจาะรู 1 รู และ 4 รู เติมอากาศในภาชนะแก้วรูปทรงสี่เหลี่ยมกว้าง 0.4 ม. ยาว 0.4 ม. และสูง 0.3 ม. ศึกษาขนาดฟองอากาศ ความถี่ของการเกิดฟองอากาศ และความยืดหยุ่นที่ศูนย์กลางของเมมเบรนโดยใช้กล้องถ่ายภาพความเร็วสูงมีความเร็วประมาณ 360 ภาพวินาที



รูปที่ 2.27 ภาพแสดงการเกิดฟองอากาศโดยเมมเบรนที่ถูกเจาะรู 4 รู

จากการศึกษาพบว่า เมมเบรน 2 ชนิดมีสมบัติแตกต่างกันซึ่งส่งผลต่อการถ่ายเทออกซิเจน และการเกิดฟองอากาศ โดยเมมเบรนรุ่นใหม่มีสมบัติความแข็งแรงมากกว่าและคล้ายคลึงกับอุปกรณ์เดิมอากาศชนิดแข็ง มีขนาดรูเดิมอากาศเล็กกว่า ผลของการมีความยืดหยุ่นน้อยจึงมีการขยายขนาดรูเดิมอากาศตามอัตราการไหลของอากาศน้อย ทำให้สร้างฟองอากาศขนาดใหญ่แต่มีขนาดและความถี่ของการเกิดฟองอากาศสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 2.27 มีความยืดหยุ่นที่ศูนย์กลางของเมมเบรนน้อย และมีความดันลดน้อยกว่าแต่มีอัตราส่วนพื้นที่สัมผัสจำเพาะต่อพลังงานที่ใช้เท่ากับเมมเบรนรุ่นเก่าจึงกล่าวได้ว่าใช้พลังงานเท่ากัน ดังนั้น การศึกษาสมบัติของอุปกรณ์เดิมอากาศจึงมีความสำคัญต่อการเลือกใช้อุปกรณ์เดิมอากาศ การออกแบบ และการพัฒนาอุปกรณ์เดิมอากาศ ทั้งด้านประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน และพลังงานที่จำเป็น

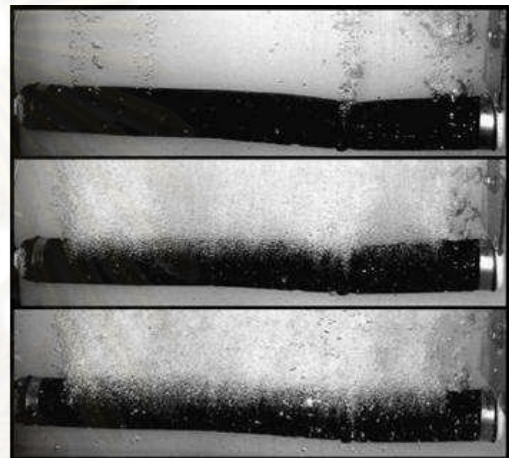
Painmanakul และ Jamnongwong (2007) ศึกษาการทำนายค่าพารามิเตอร์ต่างๆในการถ่ายเทออกซิเจนหรือตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ ในงานวิจัยนี้ได้สนใจทำนายค่าขนาดฟองอากาศ ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ และพื้นที่สัมผัสจำเพาะโดยวิเคราะห์ค่าตัวแปรต่างๆในระดับห้องปฏิบัติการ ทำการเดิมอากาศในคอลัมน์รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.05 ม. และสูง 0.4 ม. ใช้เมมเบรนเป็นอุปกรณ์กระจายอากาศ ควบคู่กับการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกนำเสนอในปัจจุบันดังแสดงในตารางที่ 2.3 ถึง 2.7 ซึ่งมาจากการศึกษาความสัมพันธ์ในระดับห้องปฏิบัติการหรือศึกษาความสัมพันธ์จากข้อมูลทฤษฎีโดยอ้างอิงจากทฤษฎี เพื่อช่วยอำนวยความสะดวกในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน อธิบายกลไกการถ่ายเทออกซิเจนได้อย่างชัดเจน ทำให้สามารถประเมินประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เดิมอากาศ และความเหมาะสมของอุปกรณ์ในขั้นต้นได้ จากการศึกษพบว่า อัตราการไหลของอากาศที่เดิมให้กับระบบมีความสัมพันธ์กับตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศซึ่งมีขนาดฟองอากาศเป็นตัวแปรหลักที่ใช้ทำนายค่าตัวแปรอื่นๆ ขนาดฟองอากาศ ความเร็วลอยตัว และพื้นที่สัมผัสจำเพาะสามารถทำนายได้โดยใช้สมการของ Leibson (1956) Mendelson (1967) และ Moustiri (2000) ตามลำดับ แต่ยังคงมีความคลาดเคลื่อนระหว่างการวิเคราะห์กับการทำนายประมาณร้อยละ 15 เนื่องจากข้อจำกัดของการใช้แบบจำลอง และปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทออกซิเจน จึงควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อการทำนายที่แม่นยำมากขึ้น

Rosso และคณะ (2008) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติของเมมเบรนที่ถูกใช้เป็นอุปกรณ์กระจายอากาศ ชนิดฟองละเอียดเนื่องจากการอุดตันและการตกตะกอนที่บวม ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนต่ำลง ความดันลดมีค่าสูงขึ้น และสิ้นเปลืองพลังงานในการเติมอากาศ โดยการศึกษาเมมเบรนที่ผลิตจากวัสดุประเภทโพลีเมอร์สังเคราะห์ 3 ชนิด ทั้งก่อนและหลังการใช้งานในโรงงานบำบัดน้ำเสีย 2 แห่ง เมมเบรนจากโรงงานแห่งแรกมีอายุการใช้งานประมาณ 12 เดือน และเมมเบรนจากโรงงานอีกแห่งมีอายุการใช้งานประมาณ 7 ถึง 10 ปี วิเคราะห์ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนในห้องปฏิบัติการโดยเติมอากาศในถังขนาดกว้าง 0.915 ม. ยาว 0.610 ม. และสูง 0.610 ม. ประเมินการอุดตันโดยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน วิเคราะห์ตัวคูณปรับแก้ของการอุดตัน และอัตราส่วนระหว่างความดันลดก่อนกับหลังการใช้งาน

อัตราการไหลของอากาศ 1.70 ลบ.ม./ชั่วโมง

อัตราการไหลของอากาศ 5.10 ลบ.ม./ชั่วโมง

อัตราการไหลของอากาศ 8.50 ลบ.ม./ชั่วโมง



รูปที่ 2.28 ภาพแสดงการเกิดฟองอากาศจากอุปกรณ์กระจายอากาศซึ่งถูกใช้งานเป็นระยะเวลานาน

จากการศึกษาพบว่าเมมเบรนที่ถูกใช้งานเป็นเวลานานจะเกิดการอุดตันทั้งภายนอกและภายในทำให้เมมเบรนมีสมบัติความแข็งแรงมากขึ้น เกิดการฉีกขาดตามรอยพับของเมมเบรนทำให้ขนาดรูเติมอากาศและฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้น การเกิดฟองอากาศไม่สม่ำเสมอทั่วบริเวณเมมเบรนดังรูปที่ 2.28 จึงทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนต่ำลง การเพิ่มอัตราการไหลของอากาศเพื่อเพิ่มการถ่ายเทออกซิเจนให้เพียงพอส่งผลให้ความดันลดมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วยจึงเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน หลังถูกใช้งานเมมเบรนมีค่าตัวคูณปรับแก้ของการอุดตันประมาณ 1.23 ถึง 1.3 และอัตราส่วนระหว่างความดันลดก่อนกับหลังการใช้งานประมาณ 2.2 เท่า จากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการตรวจวัดค่าความดันลดระหว่างการเติมอากาศ การศึกษาสมบัติของอุปกรณ์เติมอากาศในช่วงการใช้งานมีความสำคัญต่อการควบคุมระบบเติมอากาศ และการทำความสะอาดอุปกรณ์ ซึ่งวิธีวิเคราะห์การอุดตันในงานวิจัยนี้สามารถประยุกต์ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนในเบื้องต้นได้ และการออกแบบระบบเติมอากาศที่รองรับผลกระทบจากการอุดตัน เพื่อการรักษาประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนให้คงที่และการประหยัดพลังงาน

Van Halem และคณะ (2008) ศึกษาการใช้เซรามิกเมมเบรนเคลือบด้วยสารประกอบเงินเพื่อกรองน้ำดื่มภายในบ้านเรือนอย่างยั่งยืน โดยการเก็บตัวอย่างจากหลายประเทศมาศึกษาปัจจัยต่างๆ คือ สามารถผลิตได้ คุณภาพและปริมาณของน้ำที่ผ่านการกรอง การใช้งาน การทำความสะอาด และรอยเท้าทางนิเวศน์ (Environmental footprint) เพื่อให้กระบวนการกรองโดยเซรามิกเมมเบรนเป็นวิธีหนึ่งในการผลิตน้ำดื่มได้อย่างยั่งยืนโดยการผลิตเซรามิกเมมเบรนซึ่งใช้วัสดุที่มีในพื้นที่ สามารถกรองน้ำดื่มให้มีคุณภาพดีและมีปริมาณเพียงพอกับความต้องการ ต้นทุนการผลิตน้ำดื่มมีราคาถูกลง มีการใช้งานและการทำความสะอาดอย่างถูกวิธีเพื่ออายุการใช้งานที่ยาวนาน และไม่มีความเป็นพิษหรือทิ้งสิ่งตกค้างต่อสิ่งแวดล้อมในระหว่างการใช้งานและการกำจัดเมื่อหมดอายุการใช้งาน จากการศึกษาพบว่า เซรามิกเมมเบรนสามารถกรองจุลินทรีย์ก่อโรคได้ตามคุณภาพของน้ำดื่ม ความเข้มข้นของสารประกอบเงินที่ถูกชะมาที่น้ำดื่มมีค่าน้อยจนไม่เป็นอันตรายต่อผู้ดื่ม ปริมาณน้ำที่กรองได้ลดลงตามระยะเวลาการใช้งานเนื่องจากการอุดตัน ซึ่งเกิดจากการสะสมของสารอินทรีย์บริเวณผิวเมมเบรน การตกตะกอนของสารอินทรีย์ภายในรูเมมเบรน เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และการอุดตันจากสารประเภทคอลลอยด์ การทำความสะอาดโดยวิธีการขัดไม่สามารถเพิ่มอัตราการกรองได้ในระยะยาวเพราะเป็นการทำความสะอาดที่ผิวเท่านั้น หลังการขัดอัตราการกรองลดลงอย่างรวดเร็ว การนำเซรามิกเมมเบรนออกมาขัดบ่อยๆ ทำให้มีความเสี่ยงต่อการแตกหักซึ่งส่งผลต่ออายุการใช้งานที่สั้นลง ในขณะที่การเป่าด้วยความดันสูงเป็นวิธีทำความสะอาดได้ในระยะยาวเพราะสามารถกำจัดการอุดตันได้ทั้งที่ผิวและภายในรูเมมเบรน หลังการเป่าอัตราการกรองจึงลดลงช้ากว่าวิธีอื่นๆ จากผลการศึกษาจึงมีความน่าสนใจในการประยุกต์ใช้การเป่าด้วยความดันสูงในการทำความสะอาดอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่น ซึ่งมีรูพรุนคล้ายกับเซรามิกเมมเบรนเพื่อการทำความสะอาดทั้งที่ผิวท่อและภายในรูพรุน รักษาอายุการใช้งานให้ยาวนาน และไม่มีสารเคมีตกค้างต่อสิ่งแวดล้อม

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทำให้ทราบถึงแนวทางการประยุกต์ใช้ท่อยืดหยุ่นเป็นอุปกรณ์เติมอากาศทั้งด้านการกำหนดช่วงอัตราการไหลของอากาศ การติดตั้งอุปกรณ์วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และการจัดเรียงท่อยืดหยุ่นในถังเติมอากาศ เป็นต้น เพื่อประเมินประสิทธิภาพของอุปกรณ์เติมอากาศทั้งในด้านการถ่ายเทออกซิเจนและประสิทธิภาพเชิงพลังงาน ทำให้ทราบถึงแนวทางการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของอุปกรณ์เติมอากาศเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพของอุปกรณ์กับกลไกการถ่ายเทออกซิเจน ทำให้ทราบถึงแนวทางการศึกษาตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศเพื่ออธิบายกลไกการถ่ายเทออกซิเจนได้อย่างชัดเจน และทำให้ทราบถึงแนวทางการศึกษาผลกระทบจากการอุดตันและวิธีทำความสะอาดที่เหมาะสม ดังนั้น จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจึงใช้เป็นแนวทางในการออกแบบวิธีการทดลองในงานวิจัยนี้ เพื่อให้เกิดผลการทดลองที่สอดคล้องกับจุดประสงค์ของงานวิจัย และเกิดผลประโยชน์ดังที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 3
ขั้นตอน และวิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 ท่อยางยืดหยุ่น

ท่อยางยืดหยุ่นที่ใช้เป็นอุปกรณ์เติมอากาศซึ่งผลิตมาจากการรีไซเคิลของเสียประเภทยาง ผลิตโดย บริษัท เจริญภัทรพานิช จำกัด มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5/8 นิ้ว มีความหนาผนังท่อ ความแข็ง และความเหนียวแตกต่างกันรวมทั้งหมด 18 ตัวอย่างโดยมีรายละเอียดดังนี้

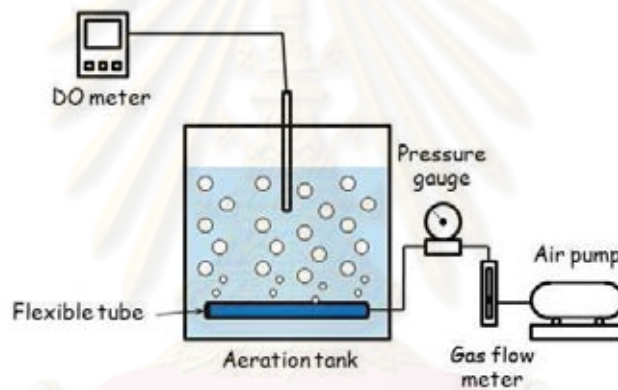
ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงสมบัติของท่อยืดหยุ่นในเบื้องต้นจากผู้ผลิต

ตัวอย่างที่	ขนาดท่อ	ผนังท่อ	ความเหนียว	ความทนต่อแรงดึง
	นิ้ว	-	-	เมกะปาสคาล
1.1	0.625	บาง	ปกติ	16
1.2	0.625	บาง	ปกติ	10
1.3	0.625	บาง	ปกติ	10
2.1	0.625	บาง	เหนียว	27
2.2	0.625	บาง	เหนียว	23
2.3	0.625	บาง	เหนียว	20
3.1	0.625	บาง	แข็ง	21
3.2	0.625	บาง	แข็ง	17
3.3	0.625	บาง	แข็ง	13
6.1	0.625	หนา	ปกติ	16
6.2	0.625	หนา	ปกติ	15
6.3	0.625	หนา	ปกติ	8
7.1	0.625	หนา	เหนียว	25
7.2	0.625	หนา	เหนียว	22
7.3	0.625	หนา	เหนียว	19
8.1	0.625	หนา	แข็ง	22
8.2	0.625	หนา	แข็ง	20
8.3	0.625	หนา	แข็ง	15



รูปที่ 3.1 ภาพแสดงท่อยืดหยุ่นที่ใช้เป็นอุปกรณ์เติมอากาศ

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 3.2 ภาพแสดงชุดอุปกรณ์วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในห้องปฏิบัติการ

- 1.) ถังเติมอากาศขนาด 10 และ 2,500 ลิตร
- 2.) เครื่องเป่าอากาศขนาด 0.25 แรงม้า บริษัท PUMA
- 3.) อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซ ขนาดอัตราการไหลสูงสุด 5 30 และ 100 ลิตร/นาที บริษัท NEW-FLOW
- 4.) อุปกรณ์วัดความดันลด ขนาดความดันสูงสุด 15 และ 60 ปอนด์/ตร.นิ้ว บริษัท IK
- 5.) อุปกรณ์วัดออกซิเจนละลาย บริษัท EUTECH รุ่น DO110
- 6.) กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง บริษัท Hi-Tech Resources (Thailand) Co., Ltd. รุ่น InLine 2000 ความเร็ว 2,000 ภาพ/วินาที และซอฟต์แวร์วิเคราะห์ภาพ
- 7.) นาฬิกาจับเวลา บริษัท TAKSUN รุ่น TS-613A

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย และภาพประกอบ

อุปกรณ์	ภาพประกอบ	อุปกรณ์	ภาพประกอบ
ถังเติมอากาศขนาด 10 ลิตร		ถังเติมอากาศขนาด 2,500 ลิตร	
เครื่องเป่าอากาศ		อุปกรณ์วัดอัตราการไหล ของก๊าซ	
อุปกรณ์วัดความดันลด		อุปกรณ์วัดออกซิเจน ละลาย	
กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง		นาฬิกาจับเวลา	

3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

- 1.) โซเดียมซัลไฟต์ (Na_2SO_3) ชนิดผง บริษัท Fisher Scientific
- 2.) โคบอลต์คลอไรด์ (CoCl_2) ชนิดเกล็ด บริษัท UNIVAR
- 3.) แร่ดินขาว (Kaolinite) ชนิดผง บริษัท ศรีจันทร์สหโอสถ จำกัด
- 4.) เกลือ (NaCl) เกลือสมุทรจากร้านค้าทั่วไป
- 5.) เซลล์จุลชีพจากโรงงานบำบัดน้ำเสียดินแดง และโรงงานบำบัดน้ำเสียสีพระยา
- 6.) สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ (NaOCl) ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวลต่อปริมาตร บริษัท พลวัตเคมีคอล จำกัด
- 7.) กรดซิตริก ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) ชนิดผง บริษัท Fisher Scientific
- 8.) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ชนิดเม็ด ชนิดผง บริษัท Fisher Scientific
- 9.) กลูโคส ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) ชนิดผง บริษัท Fisher Scientific

- 10.) สารละลายยูเรีย ($(\text{NH}_2)_2\text{CO}$) จากห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
- 11.) โดโทแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K_2HPO_4) จากห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
- 12.) โปแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) จากห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

3.2 ตัวแปรที่สนใจศึกษา

- 1.) สมบัติของท่อที่ยืดหยุ่น เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพของท่อที่ยืดหยุ่นที่เหมาะสมต่อการถ่ายเทออกซิเจน สมบัติที่สนใจศึกษา คือ ความหนาผนังท่อ ความแข็ง และความยืดหยุ่น

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงสมบัติที่สนใจศึกษา และวิธีวิเคราะห์

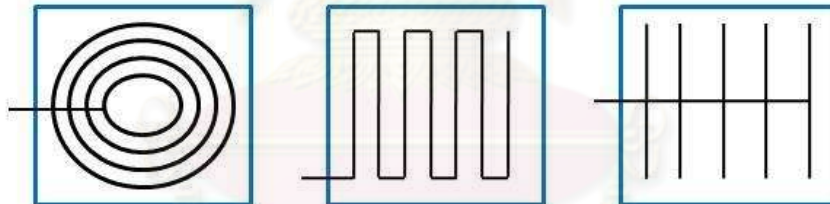
สมบัติที่สนใจศึกษา		วิธีวิเคราะห์
1.	ความหนาผนังท่อ	เวอร์เนียไมโครมิเตอร์ (Vernier micrometer)
2.	ความแข็ง (Hardness)	เครื่องวัดความแข็งของยาง (Durometer)
3.	ความยืดหยุ่น (Elasticity)	การทดสอบแรงดึง (Tensile test)

- 2.) อัตราการไหลของอากาศ เพื่อศึกษาอัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมในการเติมอากาศที่มี การถ่ายเทออกซิเจนดีที่สุด โดยศึกษาที่อัตราการไหล 1 2 และ 4 ลิตร/นาที สำหรับการ วิเคราะห์ในถังเติมอากาศขนาด 10 ลิตร และศึกษาอัตราการไหลช่วง 10 ถึง 100 ลิตร/นาที สำหรับการวิเคราะห์ในถังเติมอากาศขนาด 2,500 ลิตร
- 3.) ลักษณะของเหลวที่เติมอากาศ เพื่อศึกษาผลกระทบจากของเหลวต่อการถ่ายเทออกซิเจน และการดูดซับจากการหยุดเติมอากาศ โดยศึกษาการเติมอากาศและการดูดซับในน้ำที่มี ของแข็งแขวนลอยขนาดเล็ก น้ำเค็ม และน้ำที่มีเซลล์จุลชีพ เปรียบเทียบกับการเติมอากาศใน น้ำประปาสำหรับถังเติมอากาศขนาด 10 ลิตร แต่สำหรับถังเติมอากาศขนาด 2,500 ลิตร ศึกษาการถ่ายเทออกซิเจนในน้ำประปาเท่านั้น

ตารางที่ 3.4 ตารางแสดงลักษณะของน้ำที่สนใจศึกษา

สภาวะที่สนใจศึกษา	สารที่ใช้	ความเข้มข้น
		มก./ลิตร
1. น้ำที่มีของแข็งแขวนลอย	แร่ดินขาว (Kaolinite)	50 100 และ 200
2. น้ำที่มีของแข็งละลาย	เกลือ (NaCl)	7,500 20,000 และ 35,000
3. น้ำที่มีเซลล์จุลชีพ	เซลล์จุลชีพ	1,000 2,000 และ 3,000

- 4.) ช่วงระยะเวลาที่อาจก่อให้เกิดการอุดตันจากการหยุดเติมอากาศ เพื่อศึกษาแนวทางการใช้งานของท่อที่ยืดหยุ่นในกระบวนการเติมอากาศในน้ำที่มีของแข็งแขวนลอยขนาดเล็ก น้ำเค็ม และน้ำที่มีเซลล์จุลชีพ โดยศึกษาระยะเวลาการหยุดเติมอากาศที่ 6 72 168 และ 240 ชั่วโมง
- 5.) วิธีทำความสะอาด เพื่อศึกษาวิธีทำความสะอาดที่เหมาะสมของท่อที่ยืดหยุ่น โดยศึกษาวิธีทำความสะอาดโดยการขัดที่ผิวของท่อ และการเป่าด้วยความดันสูง
- 6.) รูปแบบการจัดเรียงท่อที่ยืดหยุ่น เพื่อศึกษารูปแบบการจัดเรียงท่อที่เหมาะสมในถังเติมอากาศเพื่อการถ่ายเทออกซิเจนที่ดี โดยศึกษารูปแบบต่างๆประมาณ 3 รูปแบบ และในแต่ละรูปแบบใช้ท่อยาวเท่ากัน



รูปที่ 3.3 ภาพจำลองแสดงรูปแบบการจัดเรียงท่อที่ยืดหยุ่นในถังเติมอากาศ

- 7.) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ใช้ประเมินการถ่ายเทออกซิเจนในสภาวะต่างๆที่สนใจศึกษาในงานวิจัย โดยการวัดค่าความเข้มข้นของออกซิเจนละลาย ณ เวลาใดๆขณะเติมอากาศ และวิเคราะห์เป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนตามหัวข้อที่ 3.4 เพื่อการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน และประสิทธิภาพเชิงพลังงาน
- 8.) ขนาดฟองอากาศ ใช้ประกอบการประเมินการถ่ายเทออกซิเจนในสภาวะต่างๆที่สนใจศึกษาในงานวิจัย โดยการถ่ายภาพด้วยกล้องความเร็วสูง และวิเคราะห์ขนาดโดยซอฟต์แวร์วิเคราะห์ภาพ เพื่อการอธิบายการถ่ายเทออกซิเจนอย่างชัดเจน

- 9.) ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ ใช้ประกอบการประเมินการถ่ายเทออกซิเจนในสภาวะต่างๆ ที่สนใจศึกษาในงานวิจัย โดยการถ่ายภาพด้วยกล้องความเร็วสูง และวิเคราะห์ความเร็วโดยซอฟต์แวร์วิเคราะห์ภาพ เพื่อการอธิบายการถ่ายเทออกซิเจนอย่างชัดเจน
- 10.) ความดันขณะเติมอากาศ ใช้ประเมินกำลังที่จำเป็นของเครื่องเป่าอากาศ โดยอุปกรณ์วัดความดันขณะเติมอากาศเพื่อการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน

3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่น

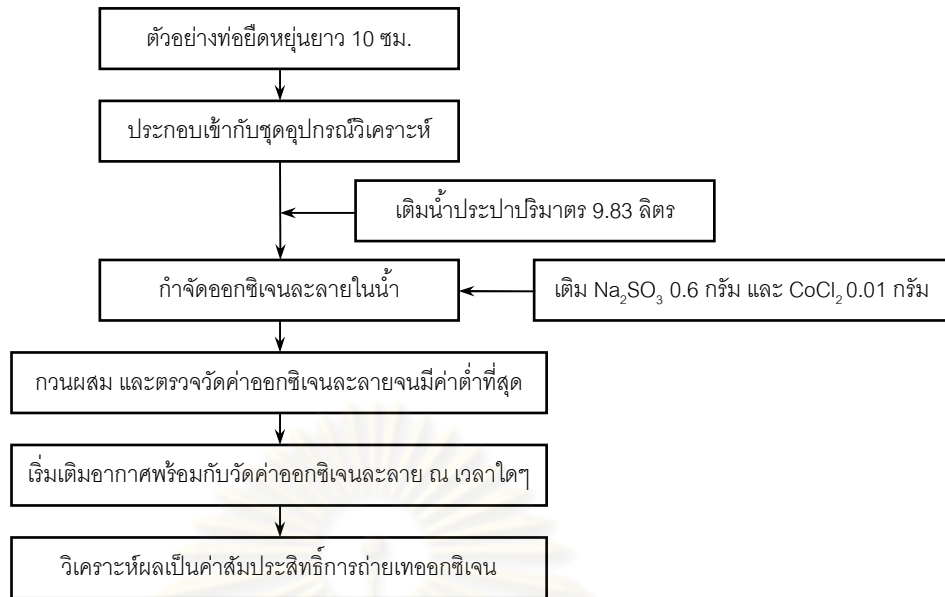
วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่นซึ่งผลิตมาจากการรีไซเคิลของเสียประเภทยาง สมบัติทางกายภาพที่สนใจศึกษา คือ ความหนาแน่นท่อ ความแข็ง และความยืดหยุ่น วิเคราะห์โดยวิธีดังแสดงในตารางที่ 3.3 วิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการกรมวิทยาศาสตร์บริการ

3.3.2 การศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสาร (Aeration performance parameters)

- 1.) ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของตัวอย่างท่อยืดหยุ่นต่างๆตามตารางที่ 3.1 มีความยาว 10 ซม. ประกอบเข้ากับชุดอุปกรณ์วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนดังรูปที่ 4.4 ในถังเติมอากาศขนาด 10 ลิตร เติมอากาศในน้ำประปาปริมาตร 9.83 ลิตร โดยอัตราการไหลของอากาศ 1 ถึง 4 ลิตร/นาที ตรวจวัดค่าความเข้มข้นของออกซิเจนละลาย ณ เวลาใดๆ บันทึกผลและวิเคราะห์เป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนตามหัวข้อที่ 2.4.1

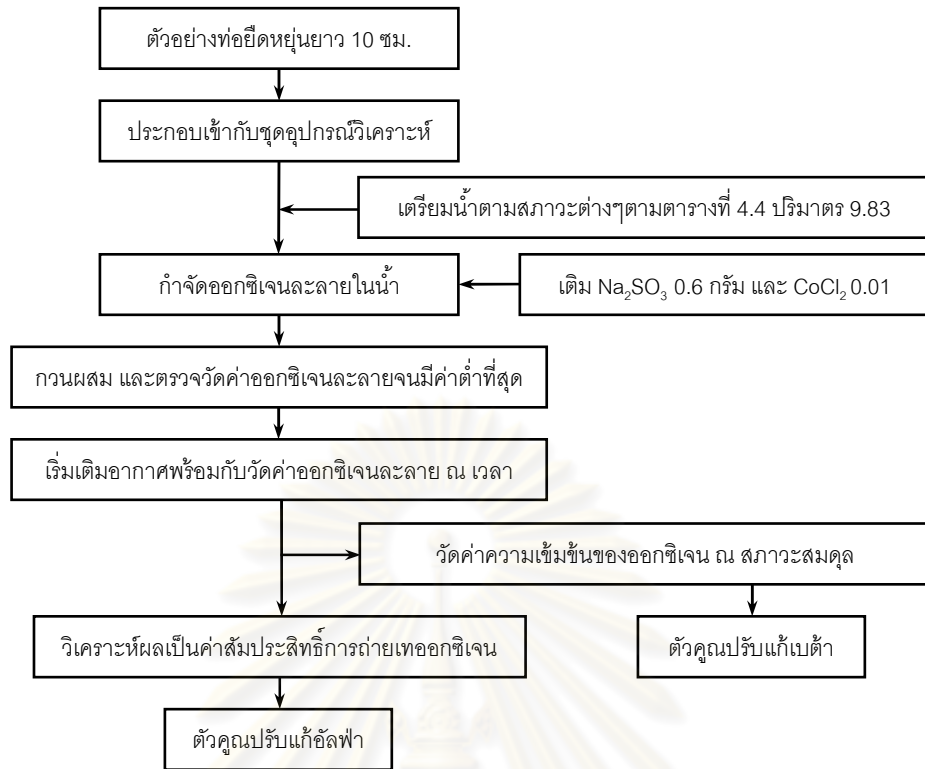


รูปที่ 3.4 ภาพแสดงการติดตั้งท่อยืดหยุ่นกับชุดอุปกรณ์วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน



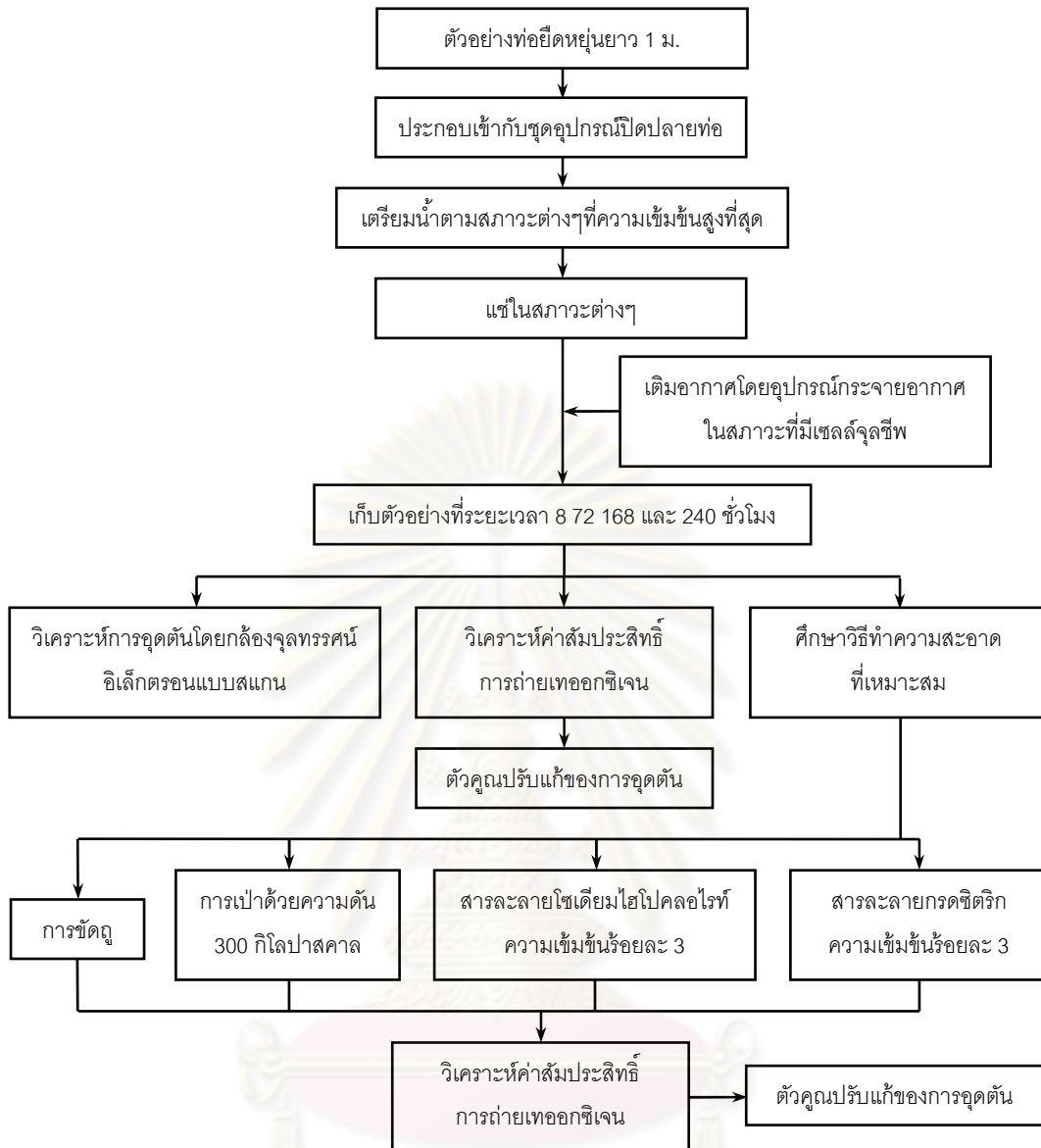
รูปที่ 3.5 แผนผังแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำประปา

- 2.) ศึกษาตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ โดยนำตัวอย่างท่อยืดหยุ่นต่างๆตามตารางที่ 3.1 มีความยาว 10 ซม. ประกอบเข้ากับชุดอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.4 เติมอากาศที่อัตราการไหล 1 และ 4 ลิตร/นาที่ ในถังเติมน้ำขนาด 10 ลิตร เติมน้ำประปาปริมาตร 9.83 ลิตร ระหว่างการเติมน้ำอากาศถ่ายเทฟองอากาศโดยกลั่นความเร็วสูงและตรวจวัดค่าความดัน แล้วใช้ซอฟต์แวร์วิเคราะห์ขนาดฟองอากาศและความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ หลังจากนั้นจึงวิเคราะห์ความถี่ของการเกิดฟองอากาศ พื้นที่สัมผัสจำเพาะ และพลังงานที่จำเป็นตามสมการที่ 2.23 2.26 และ 2.32 ตามลำดับ
- 3.3.3 การศึกษาผลกระทบจากสภาวะการทำงานต่างๆต่อประสิทธิภาพการเติมน้ำอากาศ การอุดตัน และวิธีทำความสะอาดที่เหมาะสม
 - 1.) ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของตัวอย่างท่อยืดหยุ่นในสภาวะการทำงานต่างๆตามตารางที่ 3.4 โดยใช้ตัวอย่างท่อที่มีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน และประสิทธิภาพเชิงพลังงานเหมาะสมที่สุดจากผลการศึกษาหัวข้อที่ 3.3.2



รูปที่ 3.6 แผนผังแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในสภาวะต่างๆ

- 2.) ศึกษาตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศขณะเติมอากาศในสภาวะการทำงานต่างๆตามตารางที่ 3.4 โดยใช้ตัวอย่างท่อที่เหมาะสมที่สุด เติมอากาศที่อัตราการไหล 1 และ 4 ลิตร/นาที่ในถังเติมอากาศขนาด 10 ลิตร เติมน้ำที่มีลักษณะตามตารางที่ 3.4 ปริมาตร 9.83 ลิตร ระหว่างการเติมอากาศถ่ายภาพฟองอากาศโดยกล้องความเร็วสูงและตรวจวัดค่าความดันเพื่อศึกษาตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ และประสิทธิภาพเชิงพลังงาน
- 3.) ศึกษาระยะเวลาที่อาจก่อให้เกิดการอุดตันจากการหยุดเติมอากาศ โดยนำตัวอย่างท่อขี้ดหุ่ยที่เหมาะสมที่สุดในสภาวะต่างๆที่ความเข้มข้นสูงที่สุดเป็นระยะเวลา 8 72 168 และ 240 ชั่วโมง เนื่องจากอาจก่อให้เกิดการอุดตันได้ง่าย และมีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมากที่สุด เมื่อครบกำหนดจึงเก็บตัวอย่างแบ่งเป็น 3 ส่วน เพื่อศึกษาลักษณะการอุดตันโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และศึกษาวิธีทำความสะอาดที่เหมาะสม
- 4.) ศึกษาวิธีทำความสะอาดที่เหมาะสม โดยนำตัวอย่างท่อขี้ดหุ่ยที่ถูกแช่ในสภาวะต่างๆตามระยะเวลาที่กำหนดเพื่อทำให้อุดตันมาทำความสะอาดโดยวิธีการขัดถูทั้ง 4 ด้านของท่อ การเป่าด้วยความดันสูงประมาณ 300 กิโลปาสคาล นาน 30 นาที แช่ในสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์หรือสารละลายกรดซิตริก ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยมวลต่อปริมาตร นาน 30 นาที หลังจากนั้นจึงนำตัวอย่างมาวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และตัวคูณปรับแก้ของการอุดตันเพื่อเปรียบเทียบการทำความสะอาดด้วยวิธีการต่างๆ



รูปที่ 3.7 แผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษาการดูดน้ำจากการหยุดเติมอากาศ

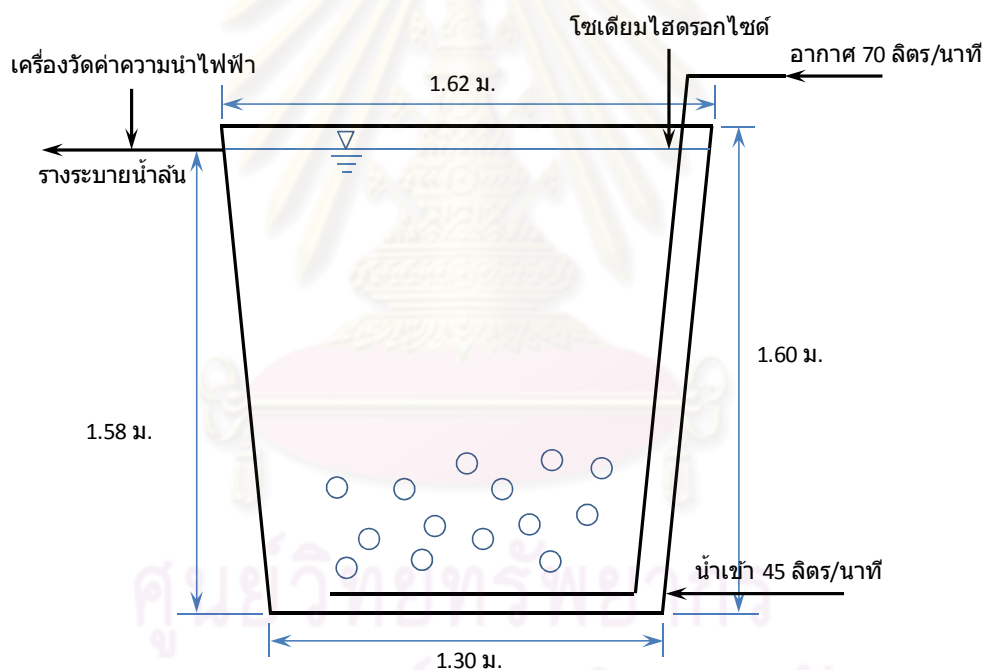
3.3.4 การศึกษารูปแบบการจัดเรียงท่อยืดหยุ่นในถังเติมอากาศ

- 1.) เตรียมตัวอย่างท่อยาวประมาณ 4 ม. มาจัดเรียงเป็นรูปร่างต่างๆดังแสดงในรูปที่ 3.3 เพื่อทำให้เกิดการถ่ายเทออกซิเจนอย่างทั่วถึง และหลีกเลี่ยงการดูดน้ำ
- 2.) วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในถังเติมอากาศขนาด 2,500 ลิตร เติมอากาศในน้ำประปาด้วยอัตราการไหลของอากาศ 10 ถึง 100 ลิตร/นาที กำจัดออกซิเจนละลายเริ่มต้นในน้ำประปาโดยใช้โซเดียมซัลไฟด์ และโคบอลต์คลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เริ่มเติมอากาศพร้อมกับวัดค่าความเข้มข้นของออกซิเจนละลาย ณ เวลาใดๆ และวัดความดันขณะเติมอากาศ วิเคราะห์ผลเป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน และประสิทธิภาพเชิงพลังงาน (กชกร ก้องกังวาลย์ และคณะ, 2552)



รูปที่ 3.8 ภาพแสดงตัวอย่างรูปแบบการจัดเรียงอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยัดหยุ่น

- 3.) วิเคราะห์ฟังก์ชันการกระจายเวลาดำเนิน (Residence Time Distribution, RTD) เพื่อศึกษา ระดับความปั่นป่วนในน้ำที่เกิดจากการเติมอากาศ โดยติดตั้งอุปกรณ์ดังรูป



รูปที่ 3.9 ภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์วิเคราะห์ฟังก์ชันการกระจายเวลาดำเนิน

ทำการทดลองในถังเติมอากาศขนาด 2,500 ลิตร มีการสูบน้ำเข้าที่ก้นถังด้วยอัตราการไหล 45 ลิตร/นาที และมีรางระบายน้ำล้นที่ผิวน้ำ ใช้ท่อยัดหยุ่นที่ถูกจัดเรียงเป็นรูปแบบต่างๆดังรูปที่ 3.3 เป็นอุปกรณ์เติมอากาศเพื่อสร้างความปั่นป่วน เติมอากาศด้วยอัตราการไหล 70 ลิตร/นาที ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 โมล/ลิตร เป็นเทอร์เซอร์แบบพัลส์ (Pulse) โดยคำนวณให้โซเดียมไฮดรอกไซด์ถูกเจือจางเป็น 0.01 โมล/ลิตร ในถังเติมอากาศตรวจวัดค่าความนำไฟฟ้า ณ เวลาใดๆที่รางระบายน้ำล้น คำนวนระยะเวลาที่เก็บโดยเฉลี่ยดังสมการ

$$\bar{t} = \sum_i t_i E_i(t) \Delta t \quad (3.1)$$

เมื่อ \bar{t} คือระยะเวลาที่เก็บโดยเฉลี่ย (นาทีก) และ $E(t)$ คือฟังก์ชันการกระจายเรติเดนซ์ไทม์ (1/นาทีก) ระยะเวลาที่เก็บโดยเฉลี่ยทำให้ทราบถึงระยะเวลาที่เก็บของน้ำที่เกิดขึ้นจริงในถังเติมอากาศ ซึ่งความคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่คำนวณได้ทางทฤษฎีแสดงถึงการเกิดจุดอับ (Dead zone) หรือการไหลลัดวงจร (Short circuit) ภายในถังเติมอากาศ หลังจากนั้นคำนวณค่าความแปรปรวนของเรติเดนซ์ไทม์ (Variance, σ^2) ดังสมการ

$$\sigma^2 = \sum_i t_i^2 E_i(t) \Delta t_i - \bar{t}^2 \quad (3.2)$$

เมื่อคำนวณค่าความแปรปรวนของเรติเดนซ์ไทม์ได้แล้วจะสามารถคำนวณเลขเพคเลตต์ (Peclet number, Pe) ตามความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\sigma^2 = \frac{2}{Pe} - \left(\frac{2}{Pe} \right) (1 - e^{-Pe}) \quad (3.3)$$

เมื่อคำนวณเลขเพคเลตต์ทำให้สามารถอธิบายการไหลแบบไม่อุดมคติ (Nonideal flow) ของน้ำในถังเติมอากาศได้ว่าเป็นการไหลที่เข้าใกล้การไหลแบบท่อ (Plug flow) หรือการไหลแบบกวนสมบูรณ์ (Completely mixed flow) โดยที่เลขเพคเลตต์มีค่าเข้าใกล้ศูนย์แสดงถึงการไหลแบบกวนสมบูรณ์ และเมื่อมีค่ามากกว่า 1 แสดงถึงการไหลแบบท่อ (วิโรจน์ บุญอำนาจวิทยา, 2544) หลังจากนั้นจึงสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ตามแนวการไหล (Liquid axial dispersion coefficient, Ez_l) ได้ดังสมการ

$$Ez_l = \frac{U_l \times H_c}{Pe(1 - \epsilon_g)} \quad (3.4)$$

เมื่อ U_l คือ ความเร็วน้ำ (ม./วินาที) H_c คือความสูงของน้ำ (ม.) และ ϵ_g คือ สัดส่วนก๊าซในถังเติมอากาศ (Gas holdup) เพื่ออธิบายถึงลักษณะการแพร่ตามแนวการไหลของน้ำ หากเกิดการแพร่มากอาจส่งเสริมให้เกิดการถ่ายเทออกซิเจนได้อย่างทั่วถึงในถังเติมอากาศ (Mousstiri และคณะ, 2001) จากการวิเคราะห์ฟังก์ชันการกระจายเรติเดนซ์ไทม์สามารถอธิบายถึงระดับความปั่นป่วนของน้ำที่สัมพันธ์กับการถ่ายเทออกซิเจนอย่างทั่วถึงในถังเติมอากาศ เพื่อใช้ประกอบการพิจารณารูปแบบการจัดเรียงท่อที่เหมาะสมในถังเติมอากาศ

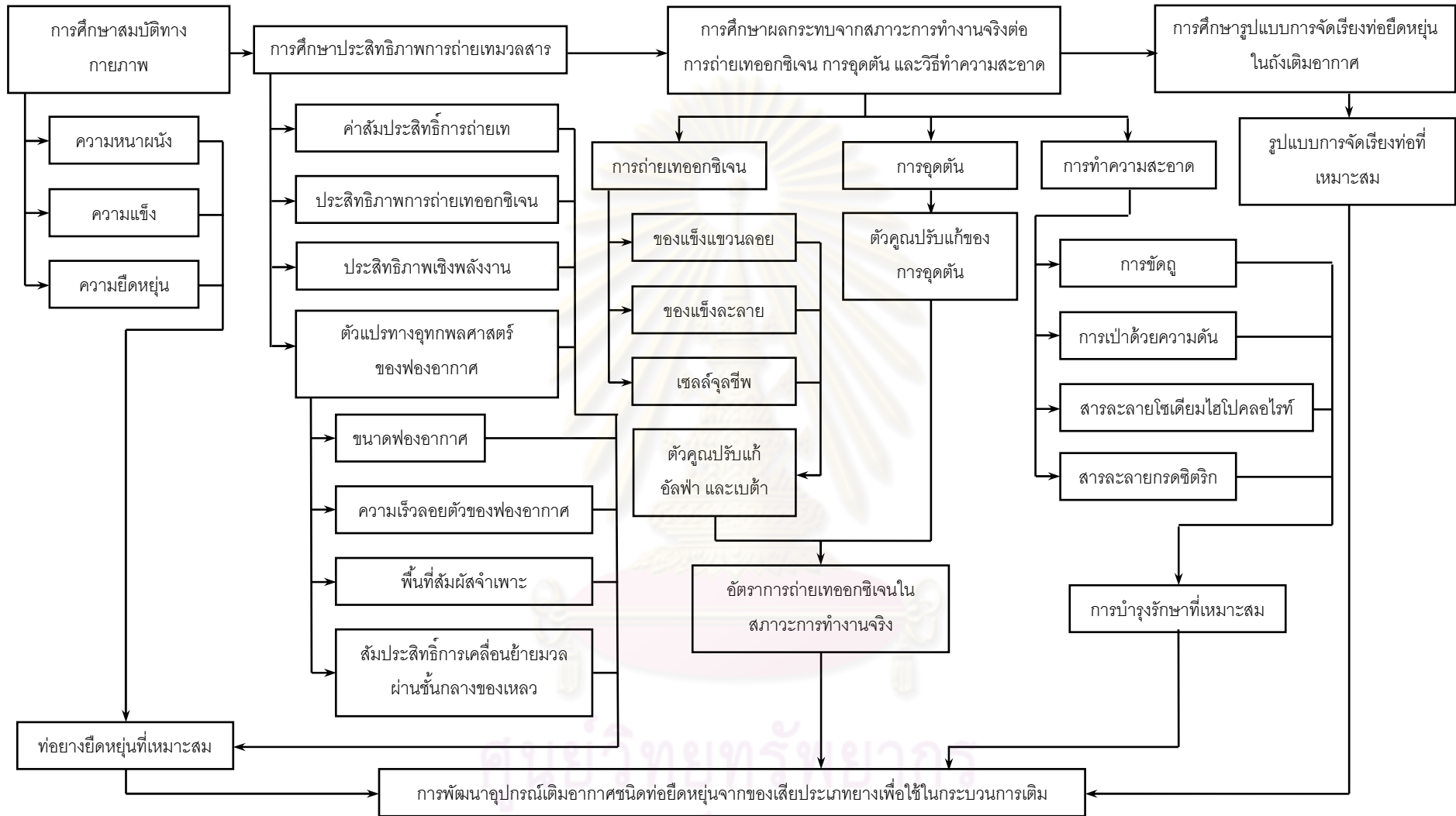
3.3.5 การทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน

ศึกษาการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าตัวแปรด้านการถ่ายเทออกซิเจน และตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ โดยใช้แบบจำลองต่างๆตามตารางที่ 2.3 ถึง 2.7 ในการทำนายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (d_b) จากความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพของท่อ ยึดหยุ่นกับอัตราการไหลของอากาศ หลังจากนั้นจึงใช้เป็นตัวแปรหลักในการทำนายตัวแปรอื่นๆ ได้แก่ ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (U_b) พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำ (a) สัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว (k_L) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ($k_L a$) ตามลำดับ เปรียบเทียบผลทำนายกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ เพื่อเลือกและนำเสนอแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในสภาวะการเติมอากาศต่างๆที่สนใจในงานวิจัยนี้ เมื่อใช้ท่อ ยึดหยุ่นเป็นอุปกรณ์เติมอากาศแบบท่อ

3.4 สรุปขั้นตอน และวิธีดำเนินงานวิจัย

จากการดำเนินงานวิจัยมุ่งหวังให้สามารถพัฒนาอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยึดหยุ่นที่ผลิตจากการรีไซเคิลของเสียประเภทยางให้มีสมบัติเหมาะสมแก่การประยุกต์ใช้ในกระบวนการเติมอากาศทั้งด้านประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน และประสิทธิภาพเชิงพลังงาน สามารถออกแบบกระบวนการเติมอากาศ ออกแบบแนวทางการใช้งาน และวิธีบำรุงรักษาได้อย่างเหมาะสมเพื่อการถ่ายเทออกซิเจนที่ดีในสภาวะการ ใช้งานจริง จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่ช่วยอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ อนุรักษ์พลังงาน และลดต้นทุนจากการใช้ อุปกรณ์ที่ผลิตภายในประเทศโดยไม่สูญเสียประสิทธิภาพการทำงาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.10 แผนผังสรุปขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 4

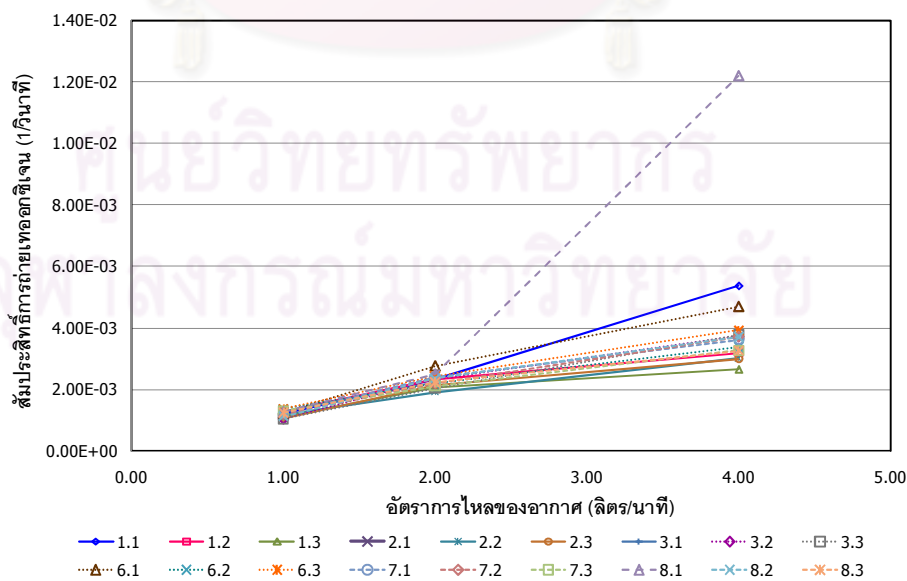
ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 การศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารของอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่น

สำหรับการทดลองในหัวข้อนี้ประกอบไปด้วยการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน การศึกษาตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ และการศึกษาสมบัติทางกายภาพของท่อยืดหยุ่น เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารของท่อยืดหยุ่นทั้งหมด 18 ตัวอย่าง ซึ่งมีสมบัติทางกายภาพแตกต่างกัน และสามารถอธิบายกลไกการถ่ายเทออกซิเจนของท่อยืดหยุ่นซึ่งได้รับผลกระทบจากสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกันได้ แต่ข้อจำกัดในด้านระยะเวลาและค่าใช้จ่ายสำหรับการวิเคราะห์ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ และการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของท่อยืดหยุ่นจึงจำเป็นต้องเลือกท่อยืดหยุ่นบางตัวอย่างซึ่งมีค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารที่น่าสนใจ และมีความแตกต่างไปจากตัวอย่างอื่นๆไปวิเคราะห์ตามหัวข้อดังกล่าวเพื่อผลการเปรียบเทียบที่ชัดเจน ดังนั้นผลการทดลองในหัวข้อนี้จะทำให้สามารถเลือกตัวอย่างท่อยืดหยุ่นเพื่อประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์เติมอากาศได้อย่างเหมาะสมโดยมีรายละเอียดดังนี้

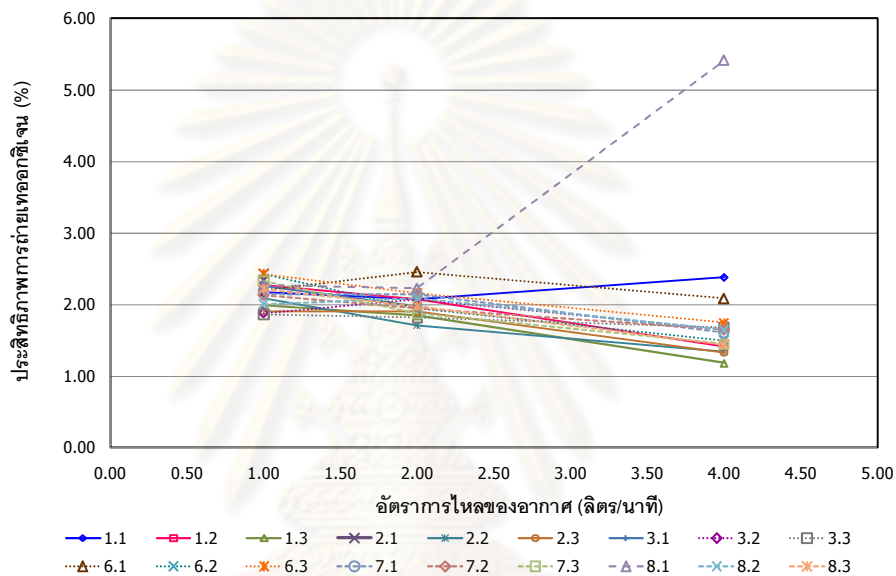
4.1.1 การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน

จากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของตัวอย่างท่อยืดหยุ่นทั้งหมด เติมอากาศด้วยอัตราการไหล 1 2 และ 4 ลิตร/นาที ในน้ำประปา พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมีแนวโน้มสูงขึ้นตามการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และอัตราการไหลของอากาศ

จากรูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศของตัวอย่างท่อยึดหยุ่นทั้งหมด พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของท่อยึดหยุ่นเกือบทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 1.2×10^{-3} ถึง 4.0×10^{-3} 1/วินาที ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 1 ถึง 4 ลิตร/นาที่ ยกเว้นตัวอย่างที่ 8.1 มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนสูงถึง 1.2×10^{-2} 1/วินาที ด้วยอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 4 ลิตร/นาที่ แต่ต้องใช้ค่าความดันสูงถึง 31 ปอนด์/ตร.นิ้ว เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน พบว่า ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.2

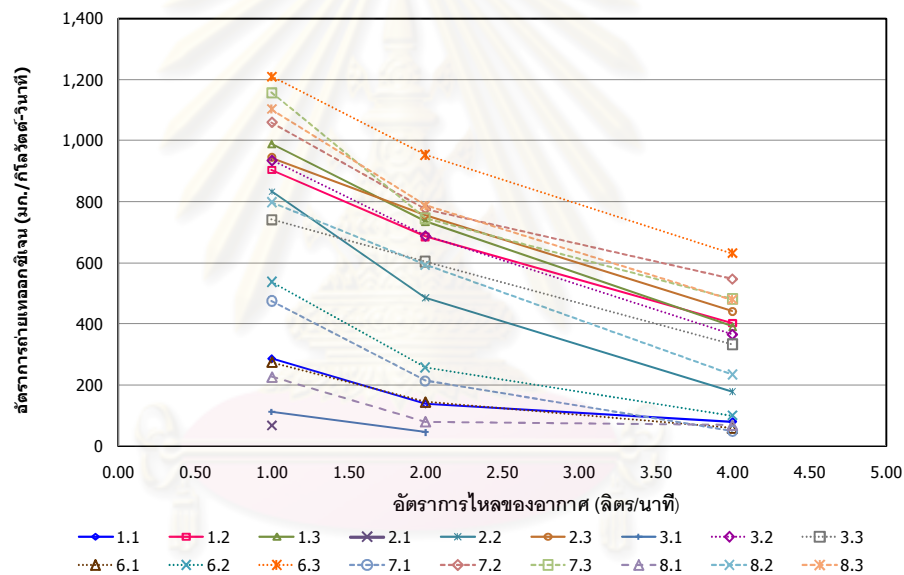


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศ

จากรูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศ พบว่า ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศและมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงร้อยละ 2.3 ลดลงเป็น 1.5 ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 1 ถึง 4 ลิตร/นาที่ ยกเว้นตัวอย่างที่ 8.1 มีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูงถึงร้อยละ 5.4 แต่ต้องใช้ค่าความดันสูงเช่นกัน การลดลงของประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนตามการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศเป็นผลมาจากการเพิ่มจำนวนฟองอากาศทำให้เกิดความปั่นป่วนในน้ำซึ่งรบกวนผิวสัมผัสระหว่างชั้นกลางของน้ำและฟองอากาศ ออกซิเจนจึงซึมผ่านชั้นกลางได้น้อยลงหรือค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวมีค่าลดลงอย่างมาก (กชกร ก้องกังวาลย์ และคณะ, 2552) เมื่อพิจารณาถึงค่าความดันที่จำเป็นเพื่อทำให้เกิดฟองอากาศ ตัวอย่างที่ 8.1 ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเท

ออกซิเจนและประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูงกว่าตัวอย่างอื่นๆ แต่ต้องใช้ความดันสูงถึง 31 ปอนด์/ตร.นิ้ว ในขณะที่ตัวอย่างอื่นๆโดยส่วนใหญ่ใช้ความดันเพียง 1.4 ปอนด์/ตร.นิ้ว

ดังนั้นการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนเพียงอย่างเดียวอาจไม่เหมาะสมกับการเลือกตัวอย่างท่อยืดหยุ่นเพื่อประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่น จึงควรคำนึงถึงค่าความดันที่ต้องใช้ซึ่งมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพเชิงพลังงานควบคู่ไปด้วย เมื่อพิจารณาถึงค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่มีความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน กำลังที่จำเป็นในกระบวนการเติมอากาศ และค่าความดัน ตามสมการที่ 3.10 และสมการที่ 3.32 ซึ่งค่าดังกล่าวแสดงถึงอัตราส่วนระหว่างปริมาณออกซิเจนที่ถ่ายเทลงสู่น้ำต่อค่ากำลังที่ใช้ของเครื่องเป่าอากาศ พบว่าตัวอย่างที่ 6.3 มีอัตราการถ่ายเทออกซิเจนสูงที่สุดคือ 1,210 มก./กิโลวัตต์-วินาที ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศ

จากรูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศ พบว่า อัตราการถ่ายเทออกซิเจนมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศเนื่องจากค่าความดันสูงขึ้นตามอัตราการไหลของอากาศที่เพิ่มขึ้น สำหรับตัวอย่างที่ 8.1 ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูงที่สุดกลับมีค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนน้อยที่สุดเพราะใช้ความดันสูงเพื่อทำให้เกิดฟองอากาศซึ่งแสดงว่ามีประสิทธิภาพเชิงพลังงานต่ำไปด้วย ในขณะที่ ตัวอย่างที่ 6.3 ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนใกล้เคียงกับตัวอย่างอื่นๆแต่ใช้ความดันน้อยกว่า จึงมีค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนสูงที่สุดซึ่งแสดงว่ามีประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูง และมีแนวโน้มที่จะช่วยประหยัดพลังงานได้มากตามไปด้วย

จากผลการทดลองในหัวข้อนี้ จึงเลือกตัวอย่างท่อยึดหยุ่นที่ 6.3 เป็นตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยึดหยุ่น เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูงอยู่ในอันดับต้นๆเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่นๆ และมีค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนมากที่สุด ซึ่งแสดงถึงการมีประสิทธิภาพเชิงพลังงานและความสามารถในการประหยัดพลังงานได้มากอีกด้วย เพื่อให้สามารถอธิบายถึงกลไกการถ่ายเทออกซิเจนได้อย่างชัดเจนจึงมีการศึกษาสมบัติทางกายภาพของท่อยึดหยุ่นและตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศขณะเติมอากาศเพิ่มเติม โดยมีรายละเอียดดังแสดงในหัวข้อถัดไป

4.1.2 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของท่อยึดหยุ่น

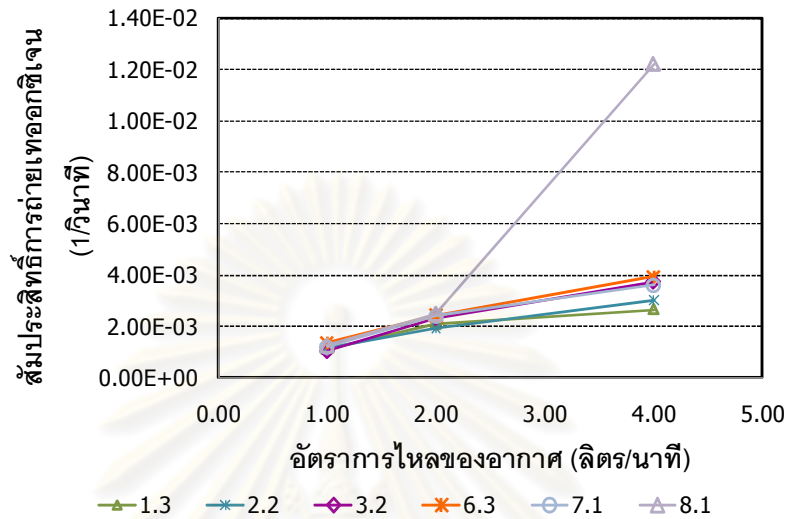
สมบัติทางกายภาพของท่อยึดหยุ่นที่สนใจศึกษาประกอบไปด้วย ความหนาผนังท่อ ความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) ความแข็ง (Hardness) ความยืด (Elongation) และความทนทานต่อสภาพกรดและเบส โดยเลือกตัวอย่างที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่โดดเด่นและน่าสนใจ คือ ตัวอย่างที่ 1.3 2.2 3.2 6.3 7.1 และ 8.1 ทั้งหมด 6 ตัวอย่าง เพื่อศึกษาความสัมพันธ์หรือผลกระทบต่อการถ่ายเทออกซิเจน โดยรายละเอียดของผลวิเคราะห์เป็นดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพของท่อยึดหยุ่น

ตัวอย่างที่	ความหนาผนังท่อ	ความทนต่อแรงดึง	ความแข็ง	ความยืด
	มม.	กิโลนิวตัน/ตร.ม.	-	%
1.3	2.85	1,100	50	22
2.2	2.60	2,900	67	93
3.2	2.55	2,200	57	65
6.3	3.15	1,000	63	19
7.1	2.80	3,000	69	80
8.1	3.40	3,100	72	75

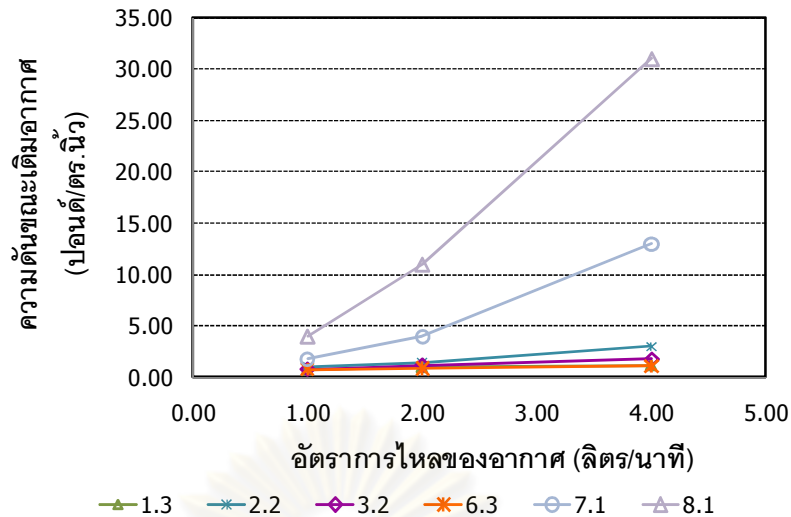
จากตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติทางกายภาพของท่อยึดหยุ่นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5/8 นิ้ว (1.59 ซม.) พบว่า การพิจารณาสมบัติทางกายภาพแยกจากกันไม่สามารถอธิบายผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและค่าความดันขณะเติมอากาศได้อย่างชัดเจน จึงต้องพิจารณาสมบัติต่างๆร่วมกัน เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบจากความหนาผนังท่อและความแข็งต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและค่าความดันขณะเติมอากาศ พบว่ายังไม่สามารถสรุปความสัมพันธ์ได้อย่างชัดเจน เนื่องจากตัวอย่างที่ 8.1 มีความหนาผนังท่อและความแข็งมากที่สุดซึ่งทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและความดันขณะเติมอากาศมากที่สุดตามไปด้วย แต่เมื่อ

เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ 6.3 และ 7.1 ที่มีความหนาแน่นท่อและความแข็งแรงของลงมากลับมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนใกล้เคียงกัน สำหรับค่าความดันขณะเติมอากาศของตัวอย่างที่ 7.1 มีค่ารองลงมาจากตัวอย่างที่ 8.1 ในขณะที่ตัวอย่างที่ 6.3 มีค่าน้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศ ของตัวอย่างท่อยึดหยุ่นที่วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ

จากรูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศ ของตัวอย่างท่อที่วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ เมื่อเรียงลำดับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนจากมากไปน้อย ตัวอย่างที่มีค่ามากที่สุดคือ 8.1 รองลงมาคือตัวอย่างที่ 6.3 3.2 7.1 2.2 และ 1.3 ตามลำดับ ซึ่งผลการเปรียบเทียบไม่สอดคล้องกับลำดับค่าวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพอย่างชัดเจนนัก เนื่องจากข้อจำกัดของการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่ใช้ถังเติมอากาศขนาดเล็ก (ปริมาตรน้ำประมาณ 10 ลิตร) และใช้ความยาวท่อยึดหยุ่นสั้น (ท่อยาว 10 ซม.) ทำให้เห็นความสัมพันธ์ได้ไม่ชัดเจน แต่อาจสังเกตในเบื้องต้นได้ว่าตัวอย่างที่มีความหนาแน่นท่อมากโดยส่วนใหญ่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมากตามไปด้วย เนื่องจากรูปทรงของช่องว่างที่ไม่แน่นอนภายในผนังท่อซึ่งถูกใช้เป็นรูเติมอากาศอาจส่งผลต่อการกระจายตัวของฟองอากาศได้ดีขึ้นเมื่อมีความหนาแน่นท่อเพิ่มขึ้น เพื่อให้อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพของท่อยึดหยุ่นต่อการถ่ายเทออกซิเจนได้ดียิ่งขึ้นจึงต้องพิจารณาถึงค่าความดันขณะเติมอากาศซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพเชิงพลังงานควบคู่ไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.5



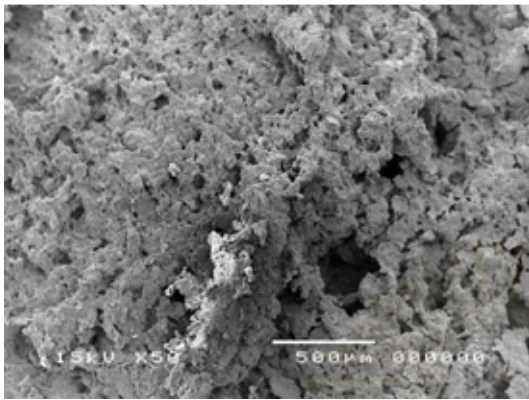
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันขณะเติมอากาศและอัตราการไหลของอากาศของตัวอย่างท่อยึดหยุ่นที่วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ

จากรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันขณะเติมอากาศและอัตราการไหลของอากาศ ของตัวอย่างท่อยึดหยุ่นที่วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ พบว่า ตัวอย่างที่ 8.1 ใช้ความดันขณะเติมอากาศมากที่สุด รองลงมาคือตัวอย่างที่ 7.1 2.2 3.2 1.3 และ 6.3 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับลำดับค่าความทนต่อแรงดึงและร้อยละของความยืดหยุ่นที่ชัดเจน แสดงถึงความเหนียวของท่อยึดหยุ่นส่งผลกระทบต่อค่าความดันที่ต้องใช้ขณะเติมอากาศ เนื่องจากความดันจากความยืดหยุ่นของท่อต้านทานการขยายขนาดรูเติมอากาศและขีดขวางการไหลผ่านของอากาศ ดังแสดงในสมการที่ 2.27

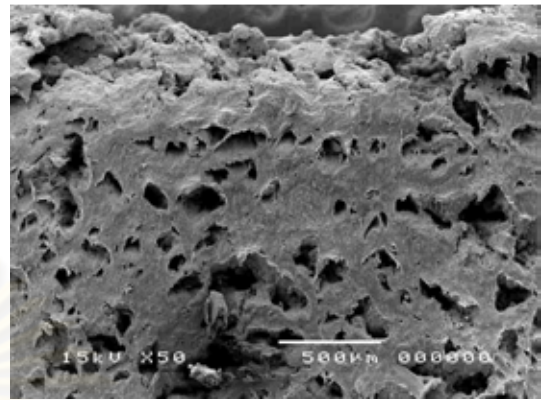
สำหรับตัวอย่างที่ 8.1 ที่มีความหนาแน่นท่อ ความทนต่อแรงดึง ความแข็งแรงที่สุด และมีค่าร้อยละของความยืดหยุ่นที่สูงเป็นอันดับต้นๆ ส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่นๆ แต่มีข้อเสียทำให้ต้องใช้ค่าความดันขณะเติมอากาศมากที่สุดและมีประสิทธิภาพเชิงพลังงานน้อยที่สุดตามไปด้วย เนื่องจากสมบัติความทนต่อแรงดึงและความยืดหยุ่นซึ่งแสดงถึงความเหนียวของผนังท่อที่ขีดขวางการไหลผ่านของอากาศ ในขั้นตอนของการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศเป็น 4 ลิตร/นาที ซึ่งต้องใช้ค่าความดันสูงถึง 32 ปอนด์/ตร.นิ้ว ค่าความดันดังกล่าวอาจทำให้อากาศสามารถทะลุผ่านรูเติมอากาศขนาดเล็กซึ่งเคยอุดตันมาก่อนได้ ทำให้ขนาดฟองอากาศมีแนวโน้มเล็กลงและประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมีแนวโน้มสูงขึ้น

สำหรับตัวอย่างที่ 6.3 ถึงแม้จะมีความหนาแน่นท่อมากเป็นอันดับที่สอง แต่มีความทนต่อแรงดึงและความยืดหยุ่นน้อย ซึ่งแสดงถึงความเหนียวของผนังท่อที่ขีดขวางการไหลผ่านของอากาศต่ำจึงทำให้ค่าความดันที่ต้องใช้ขณะเติมอากาศต่ำไปด้วย สำหรับค่าความแข็งแรงเท่ากับ 63 ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในอันดับ

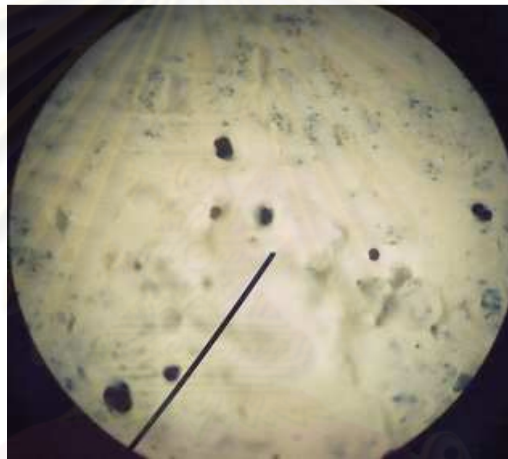
กลางๆเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่นๆ พบว่า ค่าความแข็งในระดับดังกล่าวทำให้ขนาดรูเติมอากาศไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มอัตราการใช้ของอากาศในช่วง 1 ถึง 4 ลิตร/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.6



1.) ผนังด้านนอกท่อ



2.) ภาพตัดขวางผนังท่อ



3.) ขนาดรูเติมอากาศ

รูปที่ 4.6 ภาพแสดงพื้นผิวผนังท่อและรูเติมอากาศของท่อยึดใหญ่

จากรูปที่ 4.6 ภาพแสดงพื้นผิวผนังท่อและรูเติมอากาศของท่อยึดใหญ่ของตัวอย่างที่ 6.3 พบว่าที่ผนังท่อที่มีรูพรุนจำนวนมากดังแสดงในรูปที่ 1.) และมีรูปทรงของช่องว่างภายในผนังท่อที่ไม่แน่นอนดังแสดงในรูปที่ 2.) ซึ่งถ่ายภาพโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนที่กำลังขยาย 50 เท่า แต่เมื่อวัดขนาดรูเติมอากาศโดยการทาสีขณะเติมอากาศพบว่าอากาศสามารถไหลผ่านได้บางรูที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่เท่านั้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเติมอากาศโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.19 มม. ดังแสดงในรูปที่ 3.) ซึ่งถ่ายภาพโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยายเท่ากับ 4 เท่า และไม่สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของขนาดรูเติมอากาศได้เมื่อเพิ่มอัตราการใช้ของอากาศจาก 1 เป็น 4 ลิตร/นาที ค่าความดันขณะเติมอากาศเท่ากับ 1.1 ปอนด์/ตร.นิ้ว จึงอาจกล่าวได้ว่าค่าความแข็งส่งผลต่อความคงตัวของขนาดรูเติมอากาศ โดยที่ค่าความแข็งเท่ากับ 63 ของตัวอย่างท่อที่ 6.3 ทำให้ขนาดรูเติมอากาศไม่เปลี่ยนแปลงในสภาวะการเติมอากาศของงานวิจัยนี้

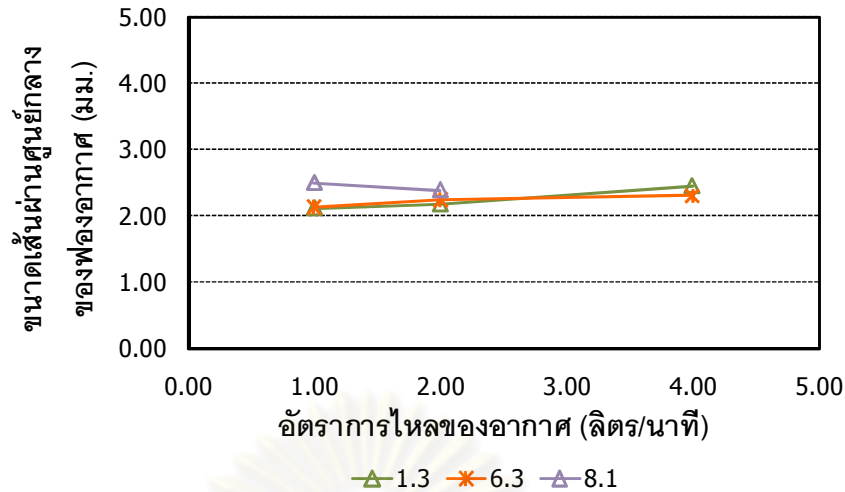
จากผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายของท่อยืดหยุ่น พบว่า ความทนต่อแรงดึงและความยืด เป็นปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อค่าความดันขณะเติมอากาศซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพเชิงพลังงานของ ท่อยืดหยุ่นอย่างชัดเจน เมื่อท่อยืดหยุ่นมีค่าความทนต่อแรงดึงและความยืดสูงจะส่งผลให้ท่อยืดหยุ่น มีความเหนียวซึ่งต้านทานการไหลผ่านของอากาศทำให้ต้องใช้ความดันสูงขณะเติมอากาศจึงมีประสิทธิภาพ เชิงพลังงานต่ำ ด้วยสมบัติทางกายภาพต่างๆประกอบกันทำให้ตัวอย่างท่อที่ 6.3 มีค่าสัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทออกซิเจนค่อนข้างสูง มีประสิทธิภาพเชิงพลังงานมากที่สุดและมีความเหมาะสมที่สุดในการ ประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่น

4.1.3 การศึกษาตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ

สำหรับตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศที่สนใจศึกษาในหัวข้อนี้ประกอบด้วย ขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ และพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะระหว่าง ฟองอากาศและน้ำ โดยการถ่ายภาพด้วยกล้องความเร็วสูง 2,000 ภาพวินาที ทำให้สามารถวัดขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางและความเร็วลอยตัวของฟองอากาศได้อย่างชัดเจน หลังจากนั้นจึงนำค่าทั้งสองมา คำนวณเป็นพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศและน้ำตามสมการที่ 2.26 เมื่อทราบค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนจากการทดลองหัวข้อที่ 4.1.1 และพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะแล้ว ทำให้ สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวได้ตามสมการที่ 2.34 จากผล การทดลองในหัวข้อนี้จะทำให้สามารถอธิบายกลไกการถ่ายเทออกซิเจนได้ แต่เนื่องจากข้อจำกัดใน ด้านระยะเวลาและค่าใช้จ่ายสำหรับการวิเคราะห์ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ จึง จำเป็นต้องเลือกตัวอย่างท่อยืดหยุ่นที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่โดดเด่นและน่าสนใจมาทำ การวิเคราะห์ สำหรับการทดลองนี้ได้เลือกตัวอย่างที่ 1.3 6.3 และ 8.1 เป็นตัวแทนของตัวอย่างท่อที่ค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนน้อยที่สุด เหมาะสมที่สุด และมากที่สุดตามลำดับ ทำการวิเคราะห์ ขณะเติมอากาศด้วยอัตราการไหล 1 2 และ 4 ลิตร/นาที ในน้ำประปาโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

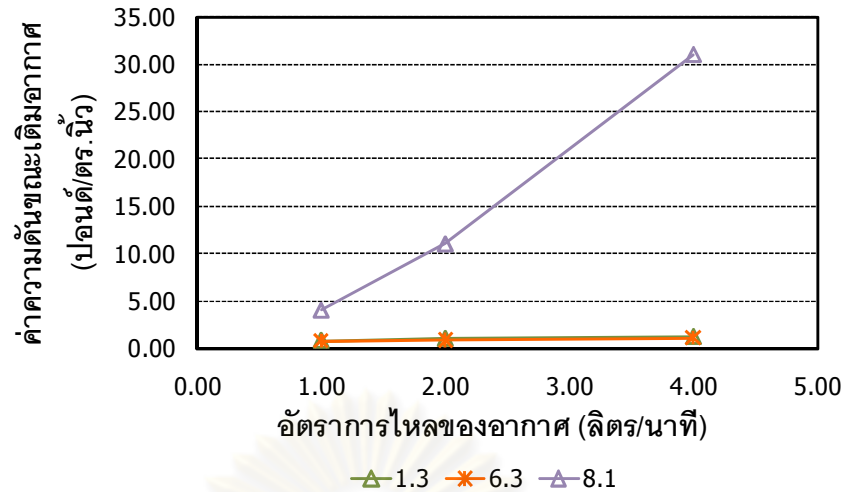
1.) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศสามารถวิเคราะห์ได้จากภาพถ่ายด้วยกล้องความเร็ว สูง โดยสุ่มเลือกตัวอย่างฟองอากาศจำนวน 20 ตัวอย่าง จากภาพถ่ายที่ความลึกประมาณ 0.1 ม.จาก ผิวหน้า วัดขนาดและเฉลี่ยค่าแบบซอเทอร์ (Sauter mean diameter, d_{32}) เนื่องจากเป็นการเฉลี่ยโดย ให้ความสำคัญกับอัตราส่วนระหว่างปริมาตรทรงกลมกับพื้นที่ผิวของทรงกลมซึ่งนิยมใช้ในการ วิเคราะห์ฟองอากาศเพราะพื้นที่ผิวของฟองอากาศเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งต่อการถ่ายเทออกซิเจน (Hasanen และคณะ, 2006) รายละเอียดของผลวิเคราะห์ขนาดฟองอากาศเป็นดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศ

จากรูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศที่วิเคราะห์ได้จากภาพถ่ายด้วยกล้องความเร็วสูง พบว่า ขนาดฟองอากาศมีแนวโน้มใหญ่ขึ้นเล็กน้อยประมาณร้อยละ 8 จากขนาด 2.12 เป็น 2.30 มม. (สำหรับตัวอย่างที่ 6.3) เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 1 เป็น 4 ลิตร/นาที ผลดังกล่าวสัมพันธ์กับความแข็งของวัสดุซึ่งควบคุมการเปิดและปิดของรูเดิมอากาศที่มีการเปลี่ยนแปลงต่ำ จึงส่งผลต่อขนาดของฟองอากาศที่ได้ค่อนข้างคงที่ไม่ขึ้นกับอัตราการไหลของอากาศ ปฏิกิริยาดังกล่าวแตกต่างจากในกรณีของอุปกรณ์เดิมอากาศชนิดอื่นๆ ที่มีความยืดหยุ่นสูง ทำให้ขนาดของฟองอากาศเปลี่ยนแปลงตามอัตราการไหลของอากาศ (Pianmanakul และคณะ, 2004) ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสของฟองอากาศหนึ่งฟองลดลงจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมีแนวโน้มมากขึ้นเพราะการเพิ่มจำนวนฟองอากาศจึงทำให้พื้นที่สัมผัสโดยรวมของฟองอากาศทั้งหมดเพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบขนาดฟองอากาศที่เกิดจากท่อยืดหยุ่นทั้งสามตัวอย่าง พบว่า ตัวอย่างที่ 1.3 และ 6.3 สร้างฟองอากาศได้ขนาดใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของตัวอย่างทั้งสองจึงใกล้เคียงกัน และประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมีแนวโน้มลดลงเหมือนกัน แต่สำหรับตัวอย่างที่ 8.1 ขนาดฟองอากาศใหญ่กว่าฟองอากาศจากตัวอย่างอื่นๆ และมีแนวโน้มลดลง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนจึงมีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่างอื่นๆ ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 1 ถึง 2 ลิตร/นาที แต่กลับสูงขึ้นมากเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศเป็น 4 ลิตร/นาที จากค่าความดันที่จำเป็นในการสร้างฟองอากาศดังแสดงในรูปที่ 4.8

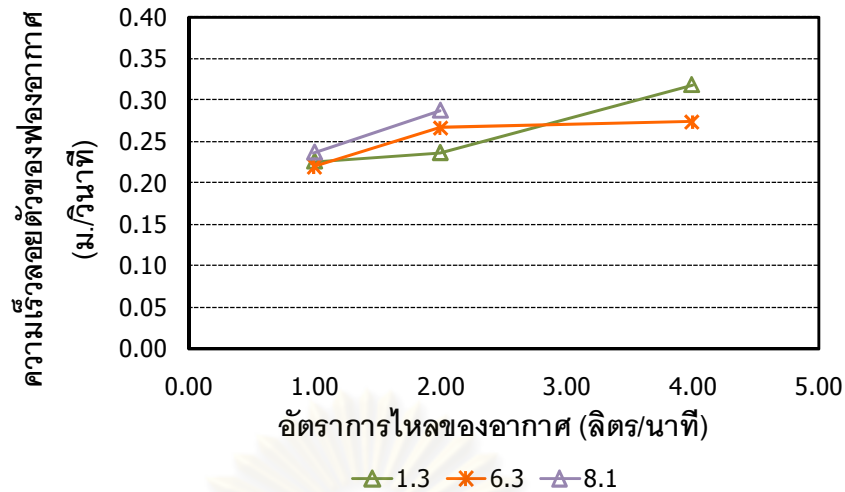


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันขณะเต็มอากาศและอัตราการไหลของอากาศ

จากรูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันขณะเต็มอากาศที่ทำให้เกิดฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศ พบว่า ตัวอย่างที่ 8.1 ต้องใช้ความดันสูงถึง 31 ปอนด์/ตร.นิ้ว ในการสร้างฟองอากาศทำให้อากาศสามารถทะลุผ่านรูเต็มอากาศขนาดเล็กขนาดฟองอากาศจึงมีแนวโน้มเล็กกลง ในขณะที่ตัวอย่างอื่นๆโดยส่วนใหญ่ใช้ความดันเพียง 1.4 ปอนด์/ตร.นิ้ว เท่านั้น ค่าความดันที่สูงนี้เป็นอุปสรรคทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ขนาดฟองอากาศและความเร็วลอยตัวของฟองอากาศที่เกิดจากตัวอย่างที่ 8.1 ได้ จึงอาจสรุปในขั้นต้นได้ว่าตัวอย่างที่ 8.1 ไม่เหมาะกับการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์เต็มอากาศเพราะต้องใช้ความดันของเครื่องเป่าอากาศสูงเกินไป

2.) ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ

การวิเคราะห์ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ วิเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนระหว่างระยะทางที่ฟองอากาศลอยขึ้นตามแนวตั้งกับจำนวนภาพที่ถ่ายได้ด้วยความเร็ว 2,000 ภาพ/วินาที ซึ่งคำนวณเป็นระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ดังสมการที่ 2.20 สุ่มเลือกตัวอย่างฟองอากาศจำนวน 20 ตัวอย่างจากภาพถ่ายที่ความลึกประมาณ 0.1 ม.จากผิวน้ำเพื่อนำมาวิเคราะห์และเฉลี่ยโดยจำนวนของฟองอากาศ ผลที่ได้เป็นดังแสดงในรูปที่ 4.9



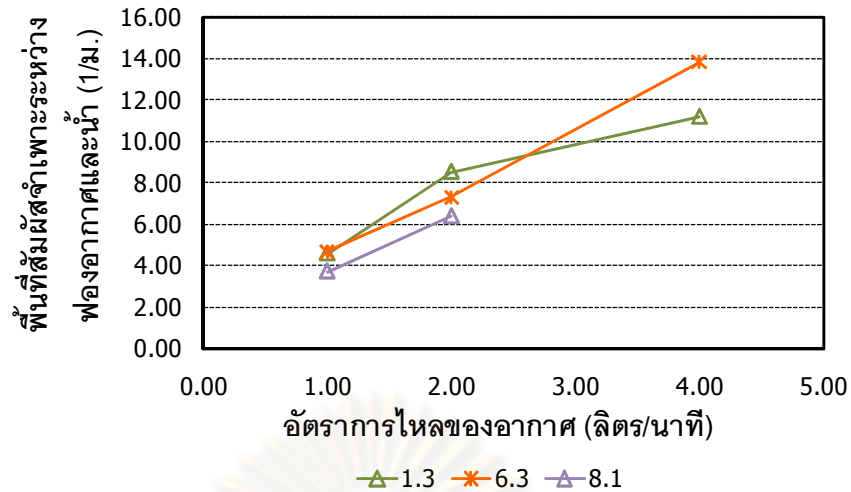
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ และอัตราการไหลของอากาศ

จากรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลอยตัวของฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศของตัวอย่างที่ 1.3 6.3 และ 8.1 พบว่า ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศของตัวอย่างทั้งสามมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขนาดฟองอากาศจาก 0.22 เป็น 0.27 ม./วินาที (สำหรับตัวอย่างที่ 6.3) เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 1 เป็น 4 ลิตร/วินาที เนื่องจากการเพิ่มขนาดฟองอากาศทำให้ความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างฟองอากาศกับน้ำเพิ่มมากขึ้น ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศจึงสูงขึ้นด้วยซึ่งเป็นไปตามกฎของสโตกส์ดังแสดงในสมการที่ 2.19

3.) พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศและน้ำ

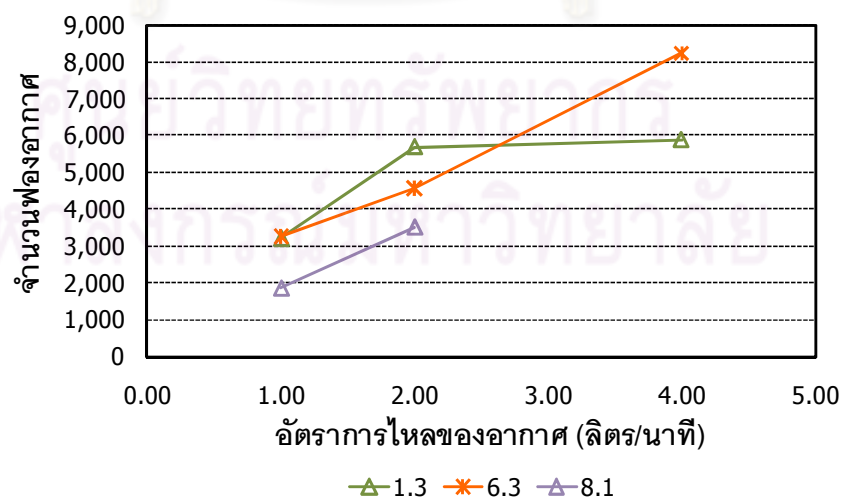
สำหรับพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศและน้ำ สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความเร็วลอยตัวของฟองอากาศตามสมการที่ 2.26 พบว่าพื้นที่สัมผัสจำเพาะของตัวอย่างทั้งสามมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศและน้ำและอัตราการไหลของอากาศ

จากรูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศและน้ำและอัตราการไหลของอากาศที่เกิดจากท่อปัดหมุนทั้งสามตัวอย่าง พบว่า พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะเพิ่มขึ้นประมาณ 3 เท่าคือ 4.68 เป็น 13.82 1/ม. (สำหรับตัวอย่างที่ 6.3) เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 1 เป็น 4 ลิตร/นาท เนื่องจากการเพิ่มจำนวนฟองอากาศอย่างมากดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.25 พบว่า ในกรณีของตัวอย่างที่ 6.3 จำนวนฟองอากาศเพิ่มขึ้นจาก 3,200 เป็น 8,200 ฟอง เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 1 เป็น 4 ลิตร/นาท ทำให้พื้นที่สัมผัสจำเพาะและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ

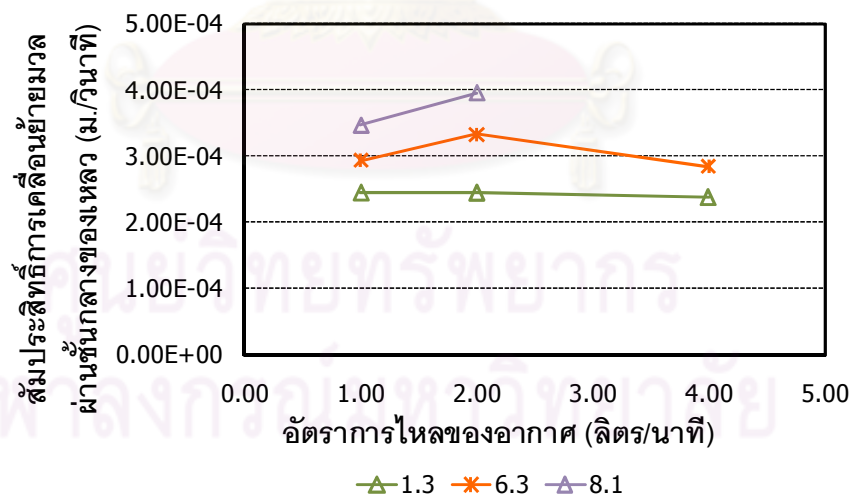


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศ

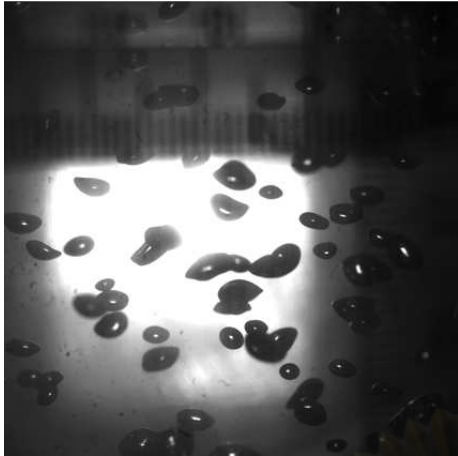
อย่างไรก็ตาม การเพิ่มจำนวนฟองอากาศเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศที่ทำให้เกิดพื้นที่สัมผัสจำเพาะและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนเพิ่มขึ้น กลับทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนลดลง เนื่องจากขนาดฟองอากาศมีแนวโน้มใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนในฟองอากาศสัมผัสกับน้ำและถ่ายเทไปสู่ น้ำได้น้อยลงประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนจึงมีแนวโน้มลดลงตามไปด้วย ประกอบกับค่าความดันที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจึงทำให้มีประสิทธิภาพเชิงพลังงานลดลงตามไปด้วย

4.) สัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว

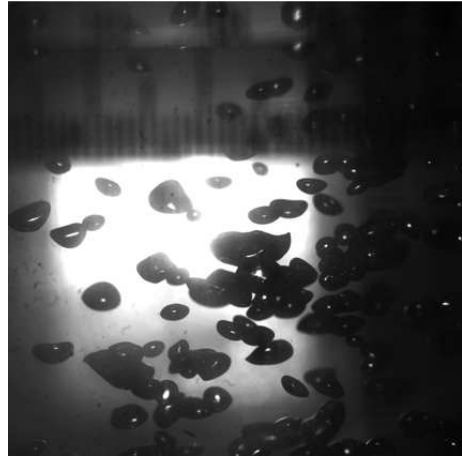
ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวในการทดลองนี้สามารถคำนวณได้จากการหารค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนด้วยพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศและน้ำ ตามสมการที่ 2.34 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวของตัวอย่างที่ 6.3 และ 8.1 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 13.61 คือ 2.93×10^{-4} เป็น 3.33×10^{-4} ม./วินาที เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 1 เป็น 2 ลิตร/นาที และลดลงร้อยละ 14.61 หรือลดลงเป็น 2.84×10^{-4} ม./วินาที (สำหรับตัวอย่างที่ 6.3) เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศเป็น 4 ลิตร/นาที สำหรับตัวอย่างที่ 1.3 ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวมีแนวโน้มลดลงร้อยละ 2.68 หรือลดลงจาก 2.45×10^{-4} เป็น 2.38×10^{-4} ม./วินาที เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 1 เป็น 4 ลิตร/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.12



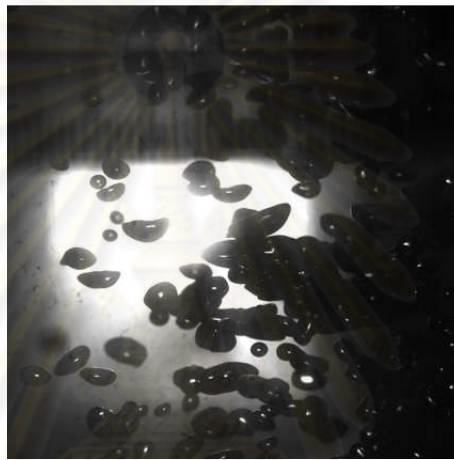
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวและอัตราการไหลของอากาศ



1.) อัตราการไหลของอากาศ 1 ลิตร/นาที่



2.) อัตราการไหลของอากาศ 2 ลิตร/นาที่



3.) อัตราการไหลของอากาศ 4 ลิตร/นาที่

รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายฟองอากาศขณะเติมอากาศด้วยตัวอย่างท่อยึดหยุนที่ 6.3

จากรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ เนื่องจากความปั่นป่วนในน้ำเพิ่มมากขึ้นและรบกวนการถ่ายเทออกซิเจนผ่านผิวสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับน้ำ จากรูปที่ 4.13 แสดงภาพถ่ายฟองอากาศขณะเติมอากาศโดยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง โดยใช้ตัวอย่างท่อยึดหยุนที่ 6.3 เป็นอุปกรณ์เติมอากาศ พบว่า จำนวนฟองอากาศเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 1 เป็น 4 ลิตร/นาที่ การเพิ่มอัตราการไหลของอากาศทำให้เกิดฟองอากาศจำนวนมากที่มีรูปทรงแบนคล้ายใบไม้ผิยไปจากทรงกลม ฟองอากาศบางฟองมีผิวขรุขระและเคลื่อนไหลตลอดระยะเวลาของการลอยตัวขึ้น และฟองอากาศรูปทรงดังกล่าวโดยส่วนใหญ่มีทิศทางของการลอยตัวไม่เป็นเส้นตรงตามแนวตั้ง นอกจากนั้น ความปั่นป่วนดังกล่าวทำให้ฟองอากาศมีโอกาสชนกันและรวมตัวกัน ทำให้ขนาดฟองอากาศมีแนวโน้มใหญ่ขึ้นพื้นที่ผิวสัมผัสของฟองอากาศหนึ่งฟองจึงลดลงซึ่งสาเหตุให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนลดลง จึงอาจกล่าวได้ว่าการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศส่งผลให้เกิดความปั่นป่วนในน้ำและรบกวนผิวของฟองอากาศ ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่เพิ่ม

มากขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศเป็นผลมาจากการเพิ่มพื้นที่สัมผัสจำเพาะเนื่องจากการเพิ่มจำนวนฟองอากาศเป็นส่วนใหญ่ จึงทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ กชกร ก้องกังวาลย์ และคณะ (2552)

จากผลการทดลองในหัวข้อนี้สามารถสรุปได้ว่า สมบัติทางกายภาพของท่อยืดหยุ่นมีความสัมพันธ์กับกลไกการถ่ายเทออกซิเจนโดยสามารถวิเคราะห์เป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน และตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ โดยที่ค่าความทนต่อแรงดึงและความยืดหยุ่นเป็นปัจจัยหลักต่อค่าความดันที่ต้องใช้ขณะเติมอากาศ ถ้าสมบัติทั้งสองมีค่ามากจะทำให้ต้องใช้ความดันมากขณะเติมอากาศซึ่งส่งผลทำให้ประสิทธิภาพเชิงพลังงานต่ำลง ส่วนความแข็งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดรูเติมอากาศ สำหรับตัวอย่างที่ 6.3 ที่มีค่าความแข็งเท่ากับ 63 ทำให้รูเติมอากาศมีขนาดคงที่ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 1 ถึง 4 ลิตร/นาที ที่ความดันขณะเติมอากาศไม่เกิน 1.1 ปอนด์/ตร.นิ้ว จากการศึกษาตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 1 เป็น 4 ลิตร/นาที โดยส่วนใหญ่ขนาดฟองอากาศมีแนวโน้มใหญ่ขึ้นทำให้ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศเพิ่มขึ้นตามไปด้วย การเพิ่มอัตราการไหลของอากาศทำให้เกิดฟองอากาศจำนวนมากจึงส่งผลให้พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำเพิ่มขึ้นอย่างมากซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ขนาดฟองอากาศที่ใหญ่ขึ้นทำให้ออกซิเจนในฟองอากาศสัมผัสกับน้ำได้น้อยลง ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนจึงมีแนวโน้มลดลง

ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพและตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศของท่อยืดหยุ่นตัวอย่างต่างๆ

ตัวอย่างที่	$k_L a$	P	d_b	U_b	a	k_L	OTR
	$\times 10^{-3}$ 1/วินาที	ปอนด์/ตร.นิ้ว	มม.	ม./วินาที	1/ม.	$\times 10^{-4}$ ม./วินาที	มก./กิโลวัตต์-วินาที
1.3	1.12 - 2.66	0.80 - 1.20	2.11 - 2.45	0.22 - 0.32	4.58 - 11.17	2.38 - 2.45	391 - 989
2.2	1.18 - 3.03	1.00 - 3.00	-	-	-	-	178 - 833
3.2	1.06 - 3.37	0.80 - 1.80	-	-	-	-	366 - 936
6.3	1.37 - 3.93	0.80 - 1.10	2.12 - 2.30	0.22 - 0.27	4.68 - 13.82	2.84 - 2.93	631 - 1,210
7.1	1.21 - 3.62	1.80 - 13.00	-	-	-	-	49 - 475
8.1	1.22 - 1.28	4.00 - 31.00	2.38 - 2.49	0.24 - 0.29	3.70 - 6.36	3.46 - 3.94	69 - 226

จากการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและประสิทธิภาพเชิงพลังงานทำให้สามารถเลือกท่อยึดหยุ่นตัวอย่างที่ 6.3 เพื่อประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยึดหยุ่นและใช้ศึกษาแนวทางการใช้งานในหัวข้อถัดไป

4.2 การศึกษาผลกระทบจากสภาวะการทำงานต่างๆต่อประสิทธิภาพการเติมอากาศ การอุดตัน และวิธีทำความสะอาดที่เหมาะสม

การทดลองในหัวข้อนี้ประกอบไปด้วยการศึกษาผลกระทบจากสารเจือปนในน้ำต่อการถ่ายเทออกซิเจน ศึกษาระยะเวลาที่อาจก่อให้เกิดการอุดตันจากการหยุดเติมอากาศ ตลอดจนวิธีทำความสะอาดที่เหมาะสมเพื่อศึกษาแนวทางการประยุกต์ใช้ท่อยึดหยุ่นเป็นอุปกรณ์เติมอากาศ เมื่อเลือกตัวอย่างท่อที่ 6.3 เป็นอุปกรณ์เติมอากาศ และจำแนกลักษณะของน้ำที่ต้องการเติมอากาศออกเป็น 3 ประเภทหลักๆคือ น้ำที่ถูกเจือปนด้วยของแข็งแขวนลอยโดยใช้ดินขาวเป็นสารเจือปน น้ำที่ถูกเจือปนด้วยของแข็งละลายโดยใช้เกลือเป็นสารเจือปน และน้ำที่ถูกเจือปนด้วยของแข็งแขวนลอยในรูปเซลล์จุลชีพโดยใช้จุลชีพจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน เพื่อจำลองลักษณะน้ำที่ต้องการเติมอากาศในสภาวะการทำงานจริงเป็นน้ำจากแม่น้ำลำคลองซึ่งมีตะกอนและความขุ่น น้ำทะเลซึ่งมีเกลือและของแข็งละลายอื่นๆเจือปน และน้ำเสียชุมชนในถังเติมอากาศซึ่งมีเซลล์จุลชีพเจือปน ตามลำดับโดยมีลักษณะของน้ำที่สนใจศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สมบัติของน้ำที่ต้องการเติมอากาศ

ลักษณะน้ำ	ความเข้มข้น	ความหนาแน่น	แรงตึงผิว	ความหนืด	ความเป็นด่าง
	มก./ลิตร	กก./ลบ.ม.	กก./วินาที ²	กก./ม.-วินาที	มก./ลิตร CaCO ₃
น้ำประปา	-	997.00	0.072	0.001	88
ของแข็งแขวนลอย (ดินขาว)	50	980.80	0.072	0.001	100
	100	985.00	0.072	0.001	96
	200	989.20	0.072	0.001	96
ของแข็งละลาย (เกลือ)	7,500	990.90	0.072	0.001	100
	20,000	1001.00	0.073	0.001	100
	30,000	1009.40	0.074	0.001	100
น้ำทะเล	-	1006.20	0.073	0.001	120
ของแข็งแขวนลอย ในรูปเซลล์จุลชีพ (MLSS)	1,000	984.40	0.063	0.001	96
	2,000	986.90	0.048	0.001	96
	3,000	989.00	0.044	0.001	96

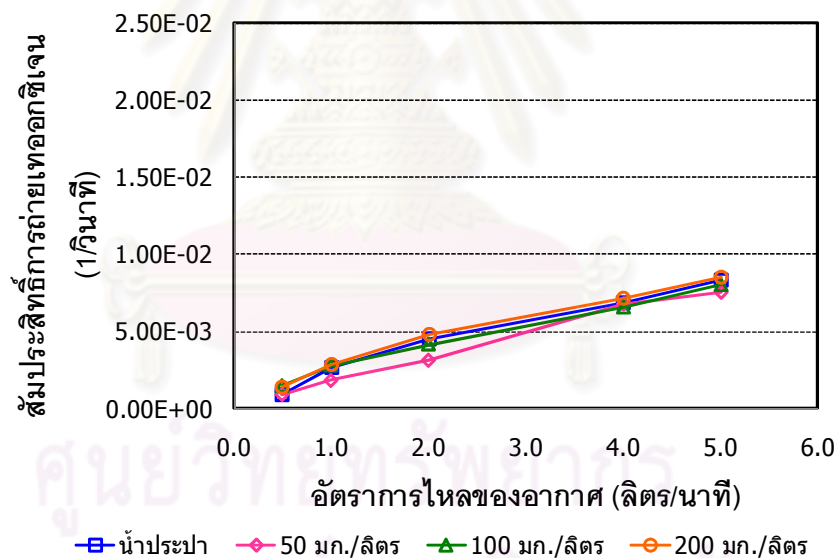
จากตารางที่ 4.3 แสดงสมบัติของน้ำที่ต้องการศึกษาผลกระทบต่อการถ่ายเทออกซิเจนโดยกำหนดความเข้มข้นของสารเจือปนจากลักษณะของน้ำที่พบได้ทั่วไป เช่น ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยที่พบได้จากแหล่งน้ำผิวดิน ความเข้มข้นของของแข็งละลายที่พบได้จากน้ำกร่อยและน้ำทะเล และปริมาณความเข้มข้นของเซลล์จุลชีพในถังเติมอากาศในระบบบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น สำหรับรายละเอียดของผลกระทบต่อการถ่ายเทออกซิเจนซึ่งวิเคราะห์โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและการศึกษาตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ เป็นดังนี้

4.2.1 การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของท่อยืดหยุ่นในสภาวะการทำงานต่างๆ

จากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนโดยใช้ตัวอย่างท่อยืดหยุ่นที่ 6.3 เป็นอุปกรณ์เติมอากาศ ทำการเติมอากาศในช่วงอัตราการไหล 0.5 ถึง 5 ลิตร/นาที ในน้ำที่ถูกเจือปนด้วยสารตามที่กำหนดซึ่งมีปริมาตรประมาณ 10 ลิตร มีผลการวิเคราะห์เป็นดังนี้

1.) สภาวะที่น้ำถูกเจือปนด้วยของแข็งแขวนลอย

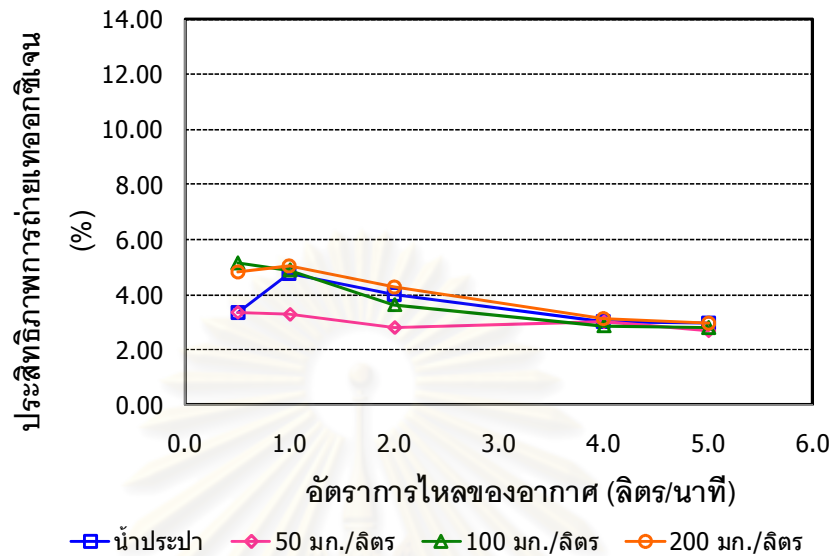
จากผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำซึ่งถูกเจือปนด้วยดินขาว โดยมีความเข้มข้นเท่ากับ 50 100 และ 200 มก./ลิตร ผลที่ได้เป็นดังในแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาว

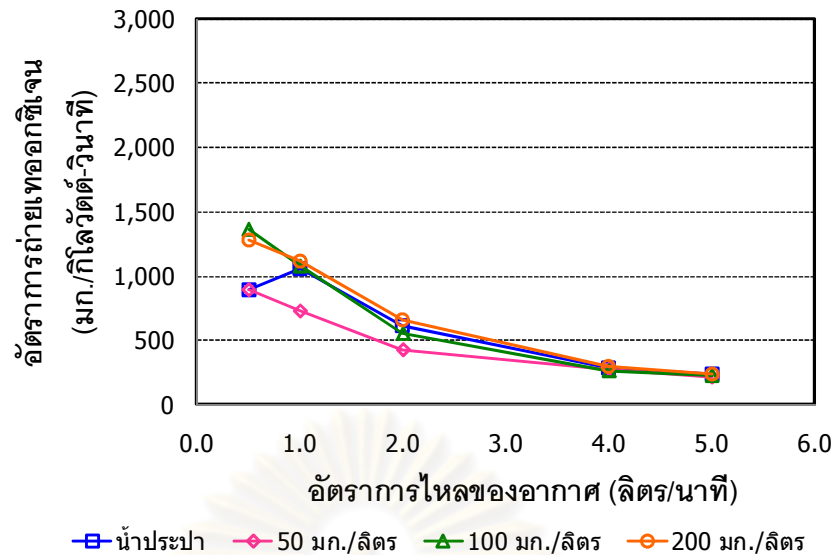
จากรูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวเปรียบเทียบกับในน้ำประปา พบว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในสภาวะที่น้ำถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวทั้งสามความเข้มข้นมีค่าใกล้เคียงกับในน้ำประปา โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นประมาณ 6 เท่าจาก 1.37×10^{-3} เป็น 8.50×10^{-3} 1/วินาที เมื่อเพิ่ม

อัตราการไหลของอากาศจาก 0.5 เป็น 5.0 ลิตร/นาทีก (สำหรับความเข้มข้น 200 มก./ลิตร) สำหรับประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนเป็นดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาว

จากรูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวเปรียบเทียบกับในน้ำประปา พบว่า ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีแนวโน้มลดลงจากร้อยละ 4.84 เป็น 3.00 เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 0.5 เป็น 5.0 ลิตร/นาทีก (สำหรับความเข้มข้น 200 มก./ลิตร) สาเหตุที่ผลการเปรียบเทียบการเติมอากาศในน้ำประปากับน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวไม่แตกต่างกัน เพราะความเข้มข้นของดินขาวอยู่ในระดับที่ต่ำสมบัติของน้ำจึงไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนจึงมีค่าใกล้เคียงกับการเติมอากาศในน้ำประปา สำหรับประสิทธิภาพเชิงพลังงานเป็นดังแสดงในรูปที่ 4.16



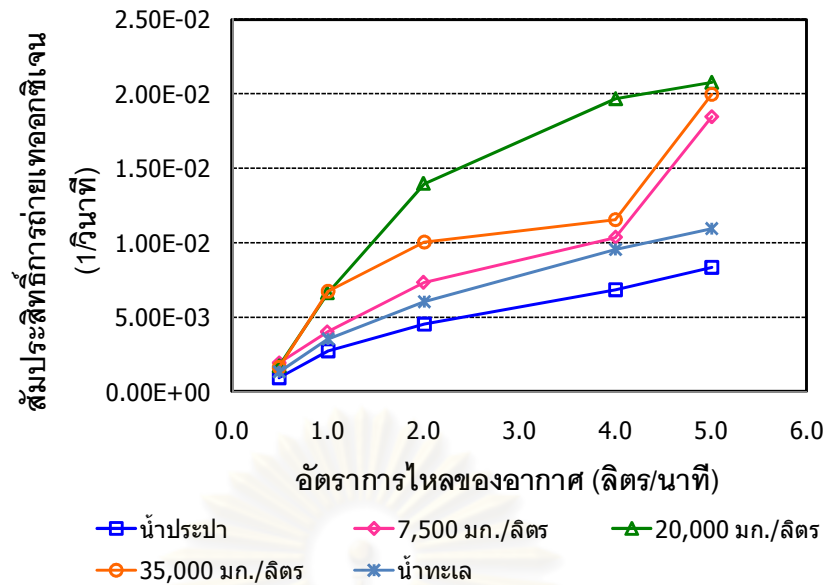
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาว

จากรูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวเปรียบเทียบ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับในน้ำประปาเนื่องจากใช้ท่อยืดหยุ่นตัวอย่างที่ 6.3 เป็นอุปกรณ์เติมอากาศเหมือนกัน ค่าความดันขณะเติมอากาศจึงเท่ากับความดันที่ใช้เติมอากาศในน้ำประปา ประกอบกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่ใกล้เคียงกันจึงทำให้อัตราการถ่ายเทออกซิเจนมีค่าใกล้เคียงกันตามไปด้วย

2.) สภาวะที่น้ำถูกเจือปนด้วยของแข็งละลาย

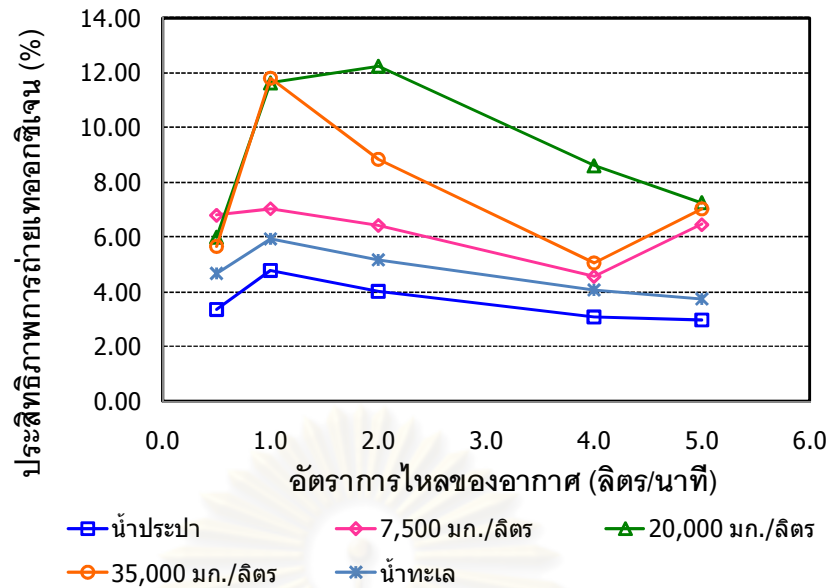
การทดลองในหัวข้อนี้ได้วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำที่ถูกเจือปนด้วยเกลือเพื่อใช้เป็นตัวแทนของของแข็งละลายในน้ำกร่อยและน้ำทะเล โดยมีความเข้มข้น 7,500 20,000 และ 35,000 มก./ลิตร เปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำประปาและน้ำทะเล เพื่อศึกษาผลกระทบจากการปนเปื้อนด้วยของแข็งละลายต่อการถ่ายเทออกซิเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.17

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



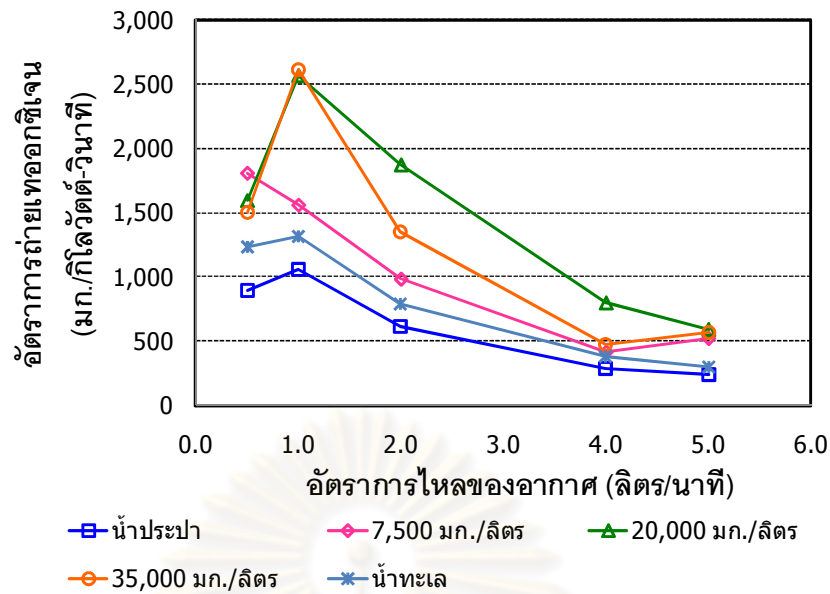
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกลบเปื้อนด้วยเกลือ

จากรูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำเกลือและน้ำทะเลเปรียบเทียบกับในน้ำประปา พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ โดยค่าสัมประสิทธิ์ในน้ำเกลือมีค่ามากกว่าในน้ำประปาประมาณ 2.55 เท่า คือเพิ่มจาก 1.72×10^{-3} เป็น 2.08×10^{-2} 1/วินาที เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 0.5 เป็น 5.0 ลิตร/นาที่ (สำหรับน้ำเกลือความเข้มข้น 20,000 มก./ลิตร) และพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ในน้ำเกลือที่มากกว่าในน้ำประปา 1.78 เท่าเพิ่มขึ้นเป็น 2.55 เท่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเกลือจาก 7,500 เป็น 20,000 มก./ลิตร แต่กลับลดลงเป็น 2.10 เท่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 35,000 มก./ลิตร สำหรับในน้ำทะเลมีค่าสัมประสิทธิ์มากกว่าในน้ำประปา 1.36 เท่า คือเพิ่มจาก 1.37×10^{-3} เป็น 1.10×10^{-2} 1/วินาที เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 0.5 เป็น 5.0 ลิตร/นาที่ สำหรับประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนพบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 0.5 เป็น 1.0 ลิตร/นาที่ หลังจากนั้นแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศเป็น 5.0 ลิตร/นาที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเกลือ

จากรูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเกลือ พบว่าในน้ำเกลือความเข้มข้น 20,000 มก./ลิตร มีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมากกว่าในน้ำประปาประมาณ 2.51 เท่า โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 6.01 เป็น 11.61 เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 0.5 เป็น 1.0 ลิตร/นาทื หลังจากนั้นเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยเป็นร้อยละ 12.22 ที่อัตราการไหล 2.0 ลิตร/นาทื และมีแนวโน้มลดลงเป็นร้อยละ 7.26 เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเป็น 5.0 ลิตร/นาทื ในขณะที่น้ำทะเลมีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมากกว่าในน้ำประปาประมาณ 1.30 เท่า โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 4.65 เป็น 5.95 เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 0.5 เป็น 1.0 ลิตร/นาทื และหลังจากนั้นมีแนวโน้มลดลงเป็นร้อยละ 3.73 เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเป็น 5.0 ลิตร/นาทื สำหรับอัตราการถ่ายเทออกซิเจน เนื่องจากความดันขณะเติมอากาศมีค่าใกล้เคียงกันค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลงคล้ายกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเกลือ

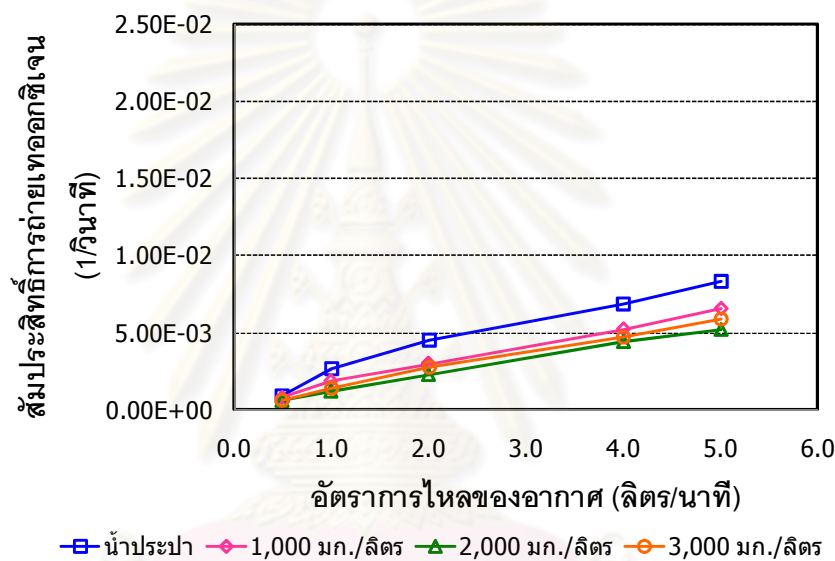
จากรูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเกลือ พบว่าในน้ำเกลือความเข้มข้น 20,000 มก./ลิตร มีค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนมากกว่าในน้ำประปาประมาณ 2.51 เท่า โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1,594 เป็น 2,568 มก./กิโลวัตต์-วินาที เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 0.5 เป็น 1.0 ลิตร/นาที่ หลังจากนั้นมามีค่าลดลงเป็น 590 มก./กิโลวัตต์-วินาที เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเป็น 5.0 ลิตร/นาที่ ในน้ำทะเลมีค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนมากกว่าในน้ำประปาประมาณ 1.30 เท่า โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1,234 เป็น 1,317 มก./กิโลวัตต์-วินาที เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 0.5 เป็น 1.0 ลิตร/นาที่ หลังจากนั้นมามีค่าลดลงเป็น 303 มก./กิโลวัตต์-วินาที

สาเหตุที่ในน้ำเกลือมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมากกว่าในน้ำประปา เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของเกลือทำให้เกิดปริมาณไอออนในน้ำมากขึ้นจากการแตกตัวของเกลือเป็นโซเดียมไอออน (Na^+) และคลอไรด์ไอออน (Cl^-) ซึ่งไอออนดังกล่าวทำให้แรงตึงผิวของน้ำเพิ่มขึ้นและขัดขวางการรวมตัวของฟองอากาศทำให้ฟองอากาศมีขนาดเล็กลง พื้นที่สัมผัสจำเพาะจึงมีค่ามากขึ้นส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน และอัตราการถ่ายเทออกซิเจนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเกลือมากขึ้นไปอีกปริมาณไอออนดังกล่าวจะรบกวนการซึมของออกซิเจนผ่านผิวสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับน้ำส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวลดลง ค่าของประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารทั้งสามจึงลดลงตามไปด้วย (Jamnongwong และคณะ, 2010) สำหรับน้ำทะเลที่มีปริมาณของแข็งแขวนลอย 244 มก./ลิตร และของแข็งละลายเท่ากับ 40,511 มก./ลิตร ซึ่งมีการปนเปื้อนจากไอออนชนิดอื่นนอกจากโซเดียมไอออน

และคลอไรด์ไอออน และมีแรงตึงผิวเท่ากับ 0.073 กก./วินาที² ซึ่งน้อยกว่าในน้ำเกลือ จึงมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนต่ำกว่าน้ำเกลือความเข้มข้น 35,000 มก./ลิตร

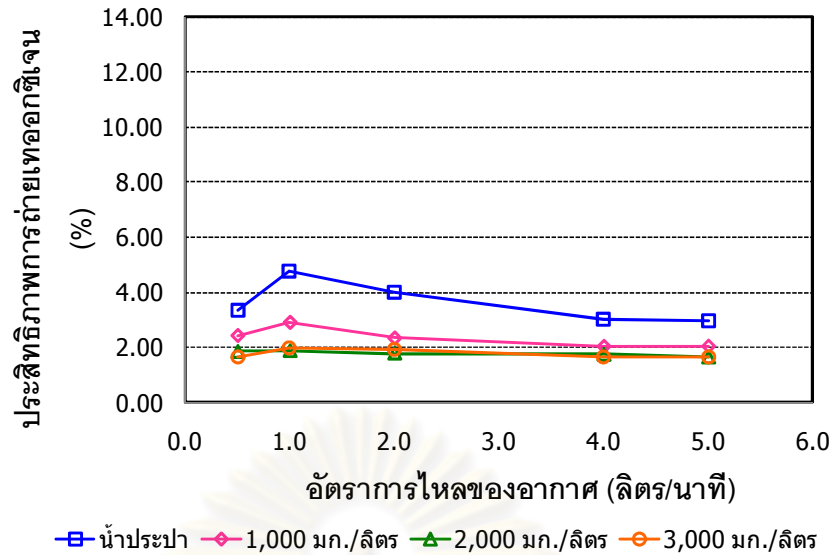
3.) สภาวะที่น้ำถูกเจือปนด้วยของแข็งแขวนลอยในรูปเซลล์จุลชีพ

การทดลองในหัวข้อนี้ได้วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำที่ถูกเจือปนด้วยของแข็งแขวนลอยในรูปเซลล์จุลชีพเพื่อจำลองสภาวะการเติมอากาศในถังเติมอากาศของระบบบำบัดน้ำเสีย โดยมีความเข้มข้น 1,000 2,000 และ 3,000 มก./ลิตร ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่พบได้ทั่วไปในระบบบำบัดน้ำเสีย เปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำประปา พบว่า ในน้ำที่ถูกเจือปนด้วยเซลล์จุลชีพมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนน้อยกว่าในน้ำประปา ดังแสดงในรูปที่ 4.20

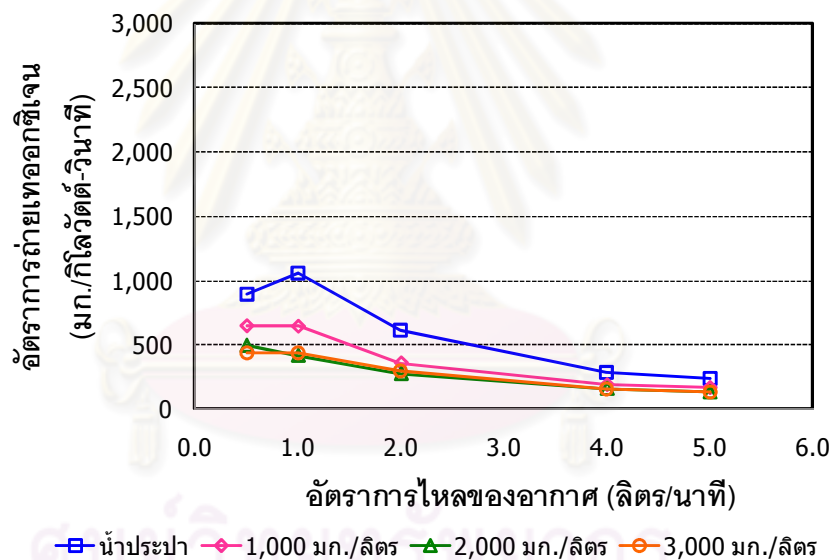


รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยของแข็งแขวนลอยในรูปเซลล์จุลชีพ

จากรูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพ พบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมีค่าน้อยกว่าในน้ำประปาประมาณ 0.65 เท่า คือมีค่าเท่ากับ 7.80×10^{-4} เพิ่มขึ้นเป็น 6.57×10^{-3} 1/วินาที เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 0.5 เป็น 5.0 ลิตร/นาที (สำหรับความเข้มข้น 1,000 มก./ลิตร) และค่าสัมประสิทธิ์มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเซลล์จุลชีพ สำหรับค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพพบว่ามีค่าต่ำกว่าในน้ำประปาประมาณ 0.55 เท่า โดยที่มีค่าเป็นร้อยละ 2.45 เพิ่มขึ้นเป็น 2.92 ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 0.5 ถึง 1.0 ลิตร/นาที หลังจากนั้นลดลงเป็นร้อยละ 2.07 เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเป็น 5.0 ลิตร/นาที (สำหรับความเข้มข้น 1,000 มก./ลิตร) ดังแสดงในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยของแข็งแขวนลอยในรูปแบบเซลล์จุลชีพ



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยของแข็งแขวนลอยในรูปแบบเซลล์จุลชีพ

จากรูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพ พบว่า อัตราการถ่ายเทออกซิเจนในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพมีค่าน้อยกว่าในน้ำประปาประมาณ 0.55 เท่า โดยที่มีค่าเท่ากับ 651 ลดลงเป็น 168 มก./กิโลวัตต์-วินาที เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 0.5 เป็น 5.0 ลิตร/นาฬิกา (สำหรับความเข้มข้น 1,000 มก./ลิตร) สาเหตุที่ทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพมีค่าน้อยกว่าในน้ำประปา เนื่องจากการนำเซลล์จุลชีพจากระบบบำบัดน้ำเสีย

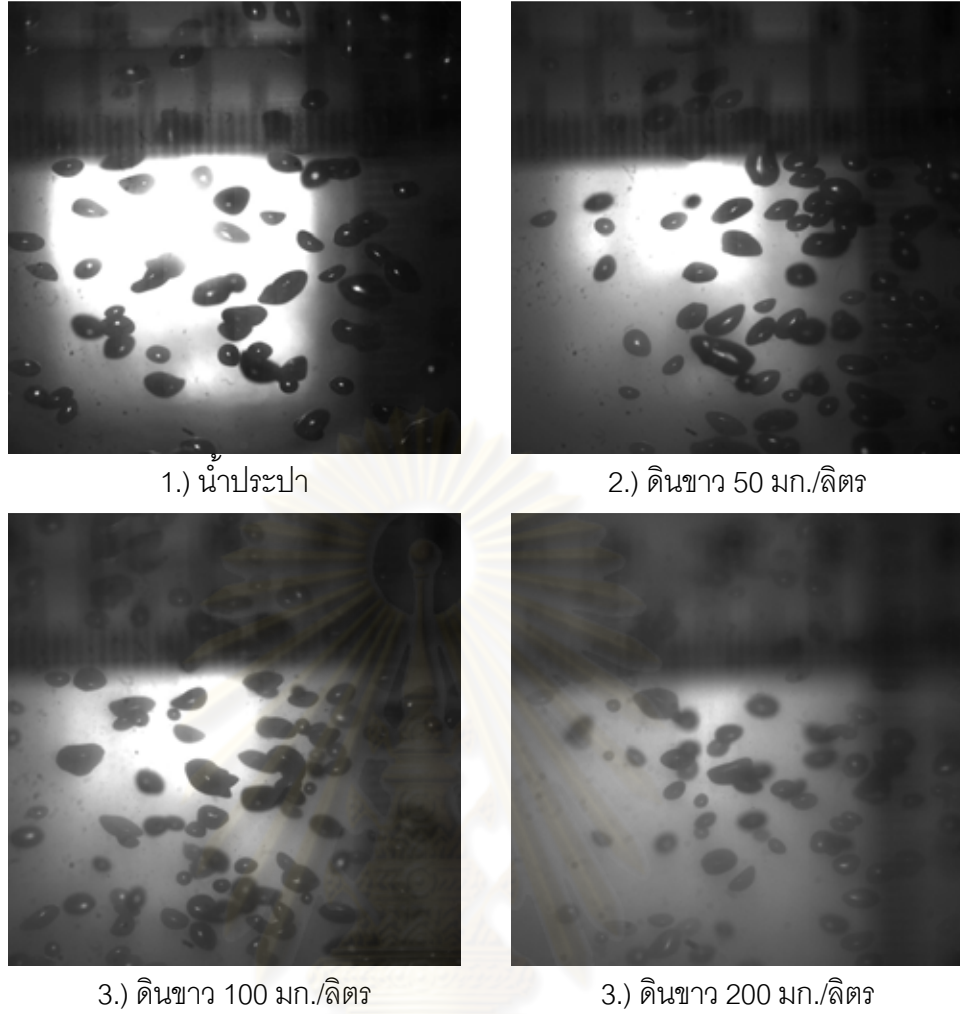
มาเจือจางในน้ำประปาตามความเข้มข้นที่กำหนด ปริมาณไอออนที่มีอยู่ในน้ำเสียเดิมหรือที่เกิดจากการสังเคราะห์โดยจุลชีพจึงเจือปนอยู่ในน้ำที่ต้องการเติมอากาศซึ่งไอออนดังกล่าวอาจเป็นสารประเภทสารลดแรงตึงผิวเนื่องจากค่าแรงตึงผิวของน้ำลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเซลล์จุลชีพ (ดังแสดงในตารางที่ 4.3) ปริมาณไอออนดังกล่าวจะล้อมรอบฟองอากาศทำให้ฟองอากาศมีขนาดเล็กถึงแต่รอบวนการซึมของออกซิเจนผ่านผิวสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับน้ำส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวลดลงอย่างมาก (Hebrard และคณะ, 2000) ประกอบกับความสามารถในการละลายของออกซิเจนลดลงซึ่งสังเกตได้จากความเข้มข้น ณ จุดอิ่มตัวของออกซิเจนละลายลดลงจาก 8.24 มก./ลิตร (ในน้ำประปา) ลดลงเป็น 6.50 มก./ลิตร (สำหรับเซลล์จุลชีพความเข้มข้น 3,000 มก./ลิตร) จึงส่งผลให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน และอัตราการถ่ายเทออกซิเจนมีค่าน้อยกว่าในน้ำประปาเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเซลล์จุลชีพ

4.2.2 การศึกษาตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศขณะเติมอากาศในสภาวะการทำงานต่างๆ

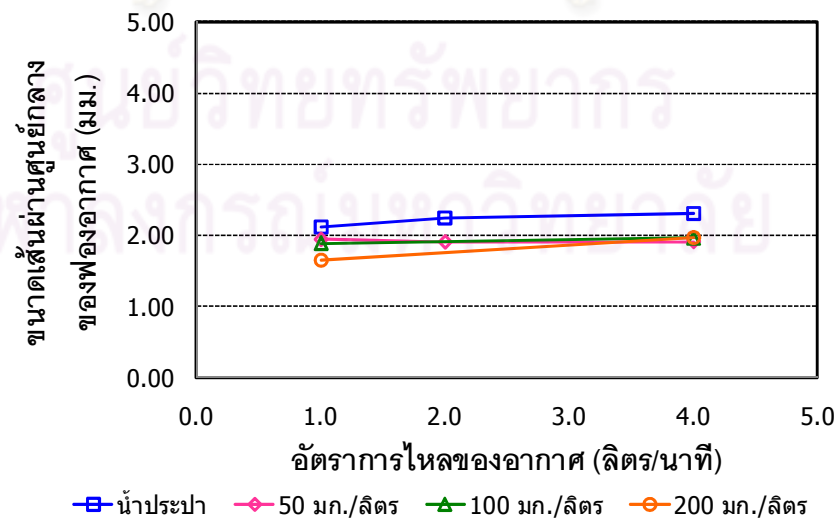
การวิเคราะห์ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศในหัวข้อนี้ได้วิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ และความเร็วลอยตัวของฟองอากาศจากภาพถ่ายโดยกล้องความเร็วสูงขณะเติมอากาศด้วยอัตราการไหล 1.0 และ 4.0 ลิตร/นาที ใช้ท่อยึดหุ่นตัวอย่างที่ 6.3 เป็นอุปกรณ์เติมอากาศแบบท่อในน้ำที่ถูกเจือปนด้วยสารตามที่กำหนด (ดินขาว เกลือ และจุลชีพจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน) หลังจากนั้นจึงคำนวณค่าพื้นที่สัมผัสจำเพาะและค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว เพื่อเปรียบเทียบตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศขณะเติมอากาศในน้ำประปา โดยมีผลการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1.) สภาวะที่น้ำถูกเจือปนด้วยของแข็งแขวนลอย

จากการวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความเร็วลอยตัวของฟองอากาศโดยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง ในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวซึ่งใช้เป็นตัวแทนของแข็งแขวนลอยความเข้มข้น 50 100 และ 200 มก./ลิตร พบว่า ขนาดฟองอากาศและความเร็วลอยของฟองอากาศขณะเติมอากาศในสภาวะดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับการเติมอากาศในน้ำประปา ดังแสดงในรูปที่ 4.23 ซึ่งเป็นภาพถ่ายฟองอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวทั้งสามความเข้มข้นเปรียบเทียบกับการเติมอากาศในน้ำประปาด้วยอัตราการไหลของอากาศ 1.0 ลิตร/นาที

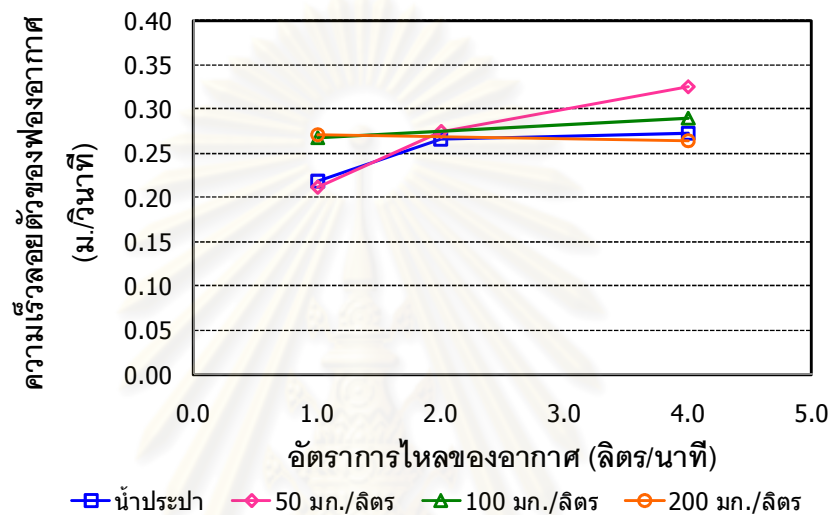


รูปที่ 4.23 ภาพถ่ายฟองอากาศขณะเติมอากาศในน้ำที่ถูกเจือปนด้วยดินขาว
เปรียบเทียบกับในน้ำประปา



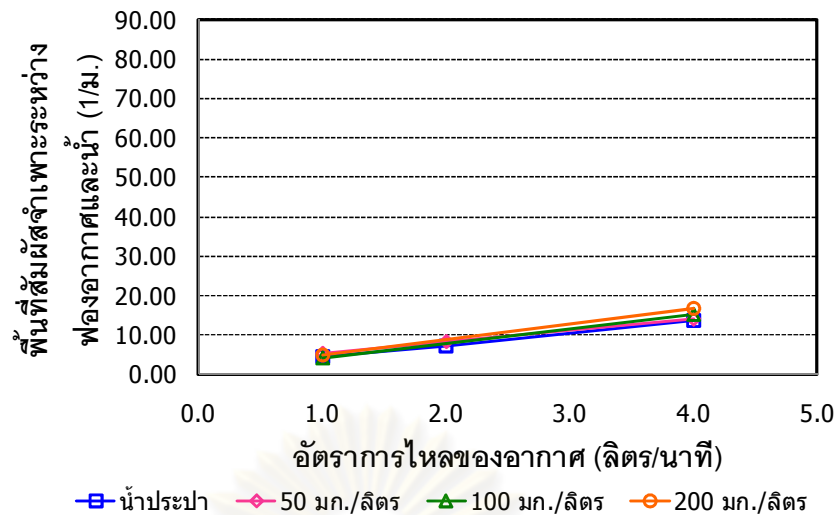
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาว

จากรูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวเปรียบเทียบกับในน้ำประปา พบว่า ขนาดฟองอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวมีขนาดเล็กกว่าในน้ำประปาเล็กน้อย คือมีขนาดเท่ากับ 1.65 เพิ่มขึ้นเป็น 1.97 มม. เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 1.0 เป็น 4.0 ลิตร/นาทิต (สำหรับความเข้มข้นเท่ากับ 200 มก./ลิตร) สำหรับความเร็วลอยตัวของฟองอากาศมีค่าใกล้เคียงกับในน้ำประปา ดังแสดงในรูปที่ 4.25



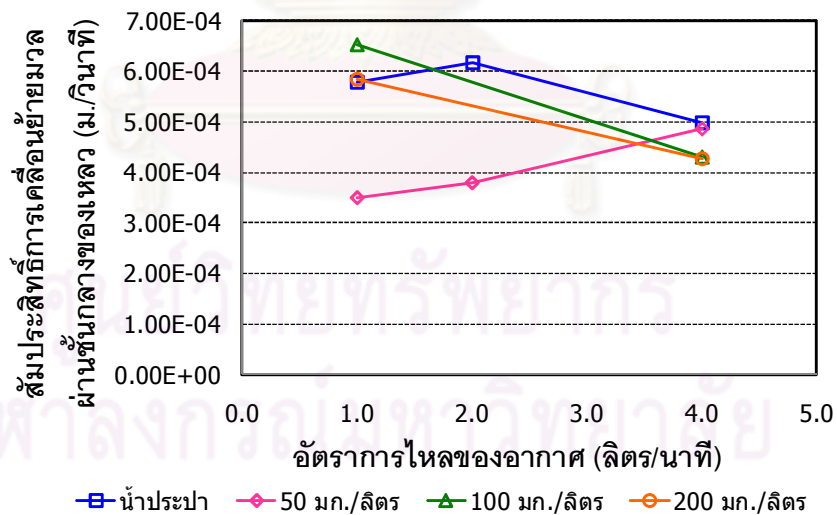
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลอยตัวของฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาว

จากรูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลอยตัวของฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวเปรียบเทียบกับในน้ำประปา พบว่า มีค่าใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มคงที่คือ 0.27 เป็น 0.26 ม./วินาที เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 1.0 เป็น 4.0 ลิตร/นาทิต (สำหรับความเข้มข้นเท่ากับ 200 มก./ลิตร) ขนาดฟองอากาศและความเร็วลอยตัวของฟองอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวที่มีค่าใกล้เคียงกับในน้ำประปา เมื่อนำค่าตัวแปรทั้งสองไปคำนวณค่าพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำจึงทำให้มีค่าใกล้เคียงกับในน้ำประปาตามไปด้วย โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 4.89 เป็น 16.73 1/ม. เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 1.0 เป็น 4.0 ลิตร/นาทิต (สำหรับความเข้มข้นเท่ากับ 200 มก./ลิตร) ดังแสดงในรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศและน้ำ และอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาว

เมื่อคำนวณค่าพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศและน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาว ดังแสดงในรูปที่ 4.26 หลังจากนั้นจึงสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวได้ พบว่า สัมประสิทธิ์ดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับน้ำประปาและมีแนวโน้มลดลงในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 1.0 ถึง 4.0 ลิตร/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว และอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาว

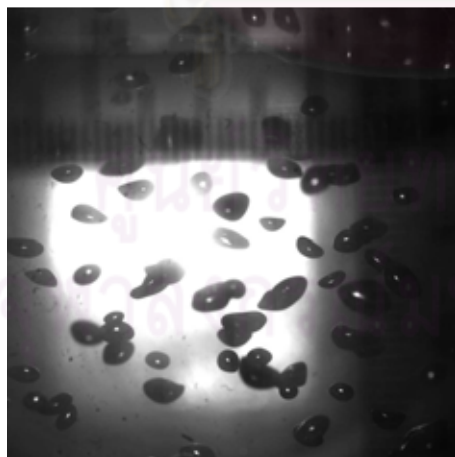
จากรูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวเปรียบเทียบกับในน้ำประปา

พบว่า ในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวมีค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวใกล้เคียงกับในน้ำประปาโดยมีแนวโน้มลดลงจาก 5.85×10^{-4} เป็น 4.28×10^{-4} ม./วินาที เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 1.0 เป็น 4.0 ลิตร/นาที (สำหรับความเข้มข้น 200 มก./ลิตร)

จากผลการทดลองในหัวข้อนี้อาจสรุปในเบื้องต้นได้ว่า น้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวซึ่งใช้เป็นตัวแทนของของแข็งแขวนลอยที่มีความเข้มข้น 50 100 และ 200 มก./ลิตร ไม่ส่งผลกระทบต่อหรือส่งผลกระทบต่อเพียงเล็กน้อยซึ่งไม่สามารถสังเกตได้ชัดเจนต่อกลไกการถ่ายเทออกซิเจนขณะเติมอากาศ สำหรับงานวิจัยนี้ เนื่องจากมีสมบัติของน้ำไม่แตกต่างไปจากน้ำประปามากนัก จึงทำให้ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศขณะเติมอากาศ ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ และความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ มีค่าใกล้เคียงกับการเติมอากาศในน้ำประปา เมื่อคำนวณเป็นตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสาร ได้แก่ พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำ และสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว จึงมีค่าใกล้เคียงกันตามไปด้วย ดังนั้น สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน และประสิทธิภาพเชิงพลังงานในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวจึงมีค่าใกล้เคียงกับในน้ำประปา

2.) สภาวะที่น้ำถูกเจือปนด้วยของแข็งละลาย

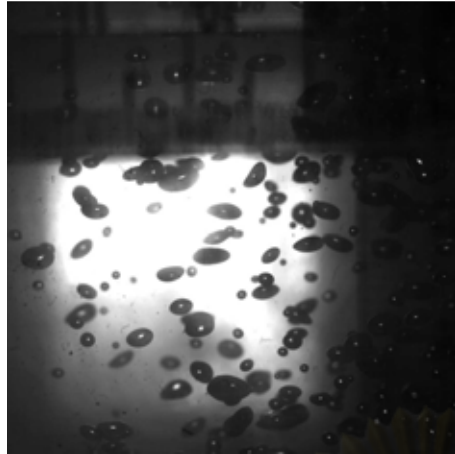
จากการวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ และความเร็วลอยตัวของฟองอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเกลือความเข้มข้น 7,500 20,000 และ 35,000 มก./ลิตร พบว่า ฟองอากาศที่เกิดขึ้นขณะเติมอากาศในน้ำเกลือมีขนาดเล็กกว่าในน้ำประปา และมีขนาดเล็กลงอีกเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเกลือจาก 7,500 เป็น 35,000 มก./ลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.28



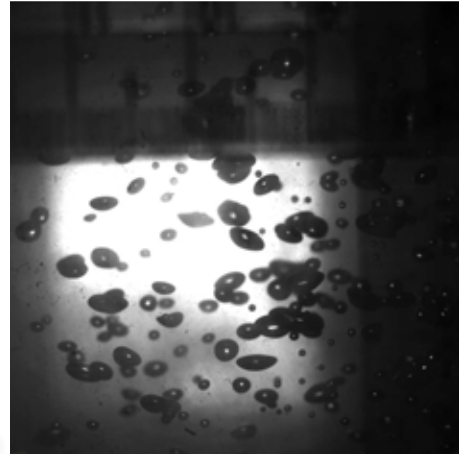
1.) น้ำประปา



2.) เกลือ 7,500 มก./ลิตร

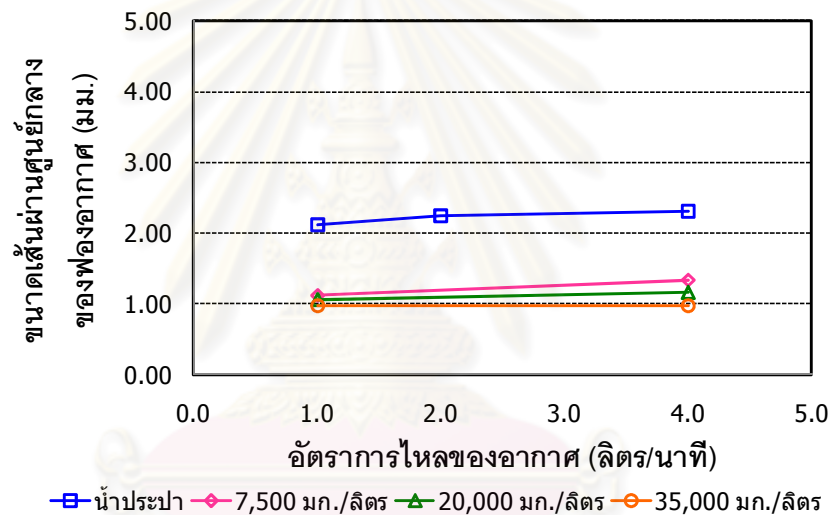


3.) เกลือ 20,000 มก./ลิตร



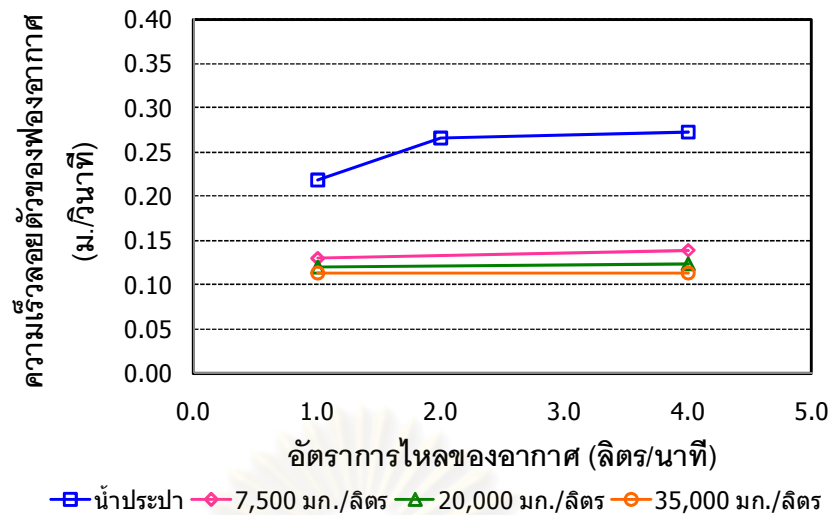
4.) เกลือ 35,000 มก./ลิตร

รูปที่ 4.28 ภาพถ่ายฟองอากาศขณะเติมอากาศในน้ำที่ถูกเจือปนด้วยเกลือเปรียบเทียบกับในน้ำประปา



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเกลือ

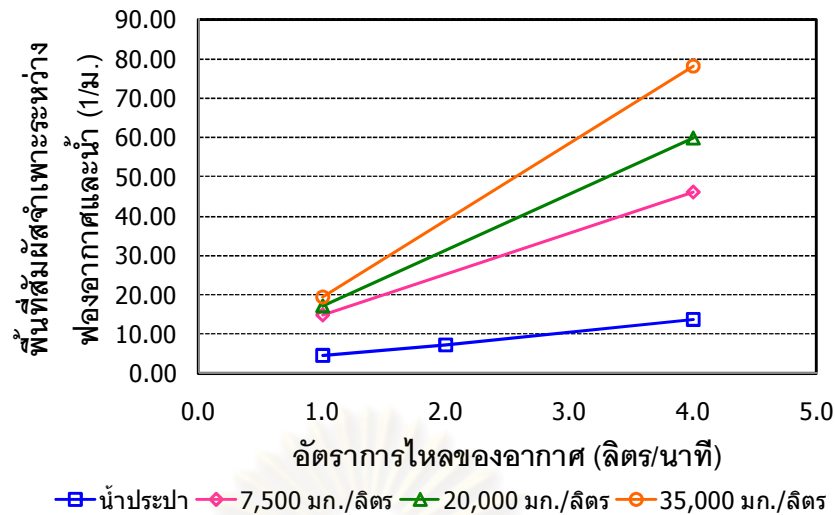
จากรูปที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเกลือ พบว่า ฟองอากาศในน้ำเกลือมีขนาดเล็กกว่าในน้ำประปาประมาณร้อยละ 50 และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเกลือจาก 7,500 เป็น 35,000 มก./ลิตร ฟองอากาศมีขนาดเล็กลงจากเดิมประมาณร้อยละ 20 แสดงถึงการรวมตัวของฟองอากาศน้อยลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเกลือ นอกจากนั้นขนาดฟองอากาศมีแนวโน้มคงที่ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 1.0 ถึง 4.0 ลิตร/นาที จากแนวโน้มของขนาดฟองอากาศในน้ำเกลือที่คงที่และมีขนาดเล็กกว่าในน้ำประปา จึงทำให้ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศมีแนวโน้มคงที่ และมีค่าน้อยกว่าในน้ำประปาประมาณร้อยละ 50 ตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลอยตัวของฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเกลือ

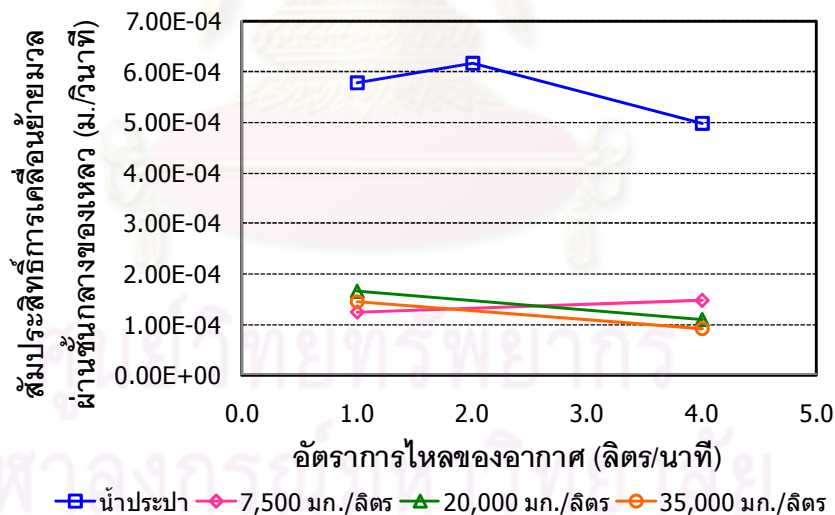
จากรูปที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลอยตัวของฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเกลือ พบว่า ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศในน้ำเกลือมีค่าน้อยกว่าในน้ำประปา และมีค่าลดลงจากเดิมอีกประมาณร้อยละ 16 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเกลือจาก 7,500 เป็น 35,000 มก./ลิตร ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดฟองอากาศที่เล็กลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเกลือ นอกจากนี้ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศในน้ำเกลือมีแนวโน้มคงที่คือ 0.11 ม./วินาที ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 1.0 ถึง 4.0 ลิตร/นาที (สำหรับความเข้มข้น 35,000 มก./ลิตร) จากฟองอากาศที่มีขนาดเล็กและความเร็วลอยตัวของฟองอากาศที่มีค่าน้อยในน้ำเกลือ

เมื่อนำขนาดฟองอากาศและความเร็วลอยตัวของฟองอากาศในน้ำเกลือมาคำนวณเป็นพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำทำให้มีค่ามากกว่าในน้ำประปาประมาณ 3.27 เท่าสำหรับความเข้มข้น 7,500 มก./ลิตร และเพิ่มขึ้นเป็น 4.93 เท่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเกลือเป็น 35,000 มก./ลิตร ค่าพื้นที่สัมผัสจำเพาะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 3.53 เท่า คือ 19.60 เพิ่มขึ้นเป็น 78.25 1/ม. (สำหรับความเข้มข้น 35,000 มก./ลิตร) เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 1.0 เป็น 4.0 ลิตร/นาที เนื่องจากการเพิ่มจำนวนฟองอากาศที่เกิดขึ้นขณะเติมอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศและน้ำ และอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเกลือ

จากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว พบว่า สัมประสิทธิ์ดังกล่าวในน้ำเกลือมีค่าน้อยกว่าในน้ำประปาประมาณ 0.24 เท่า และมีแนวโน้มลดลงจากเดิมประมาณร้อยละ 10.13 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นจาก 7,500 เป็น 35,000 มก./ลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเกลือ

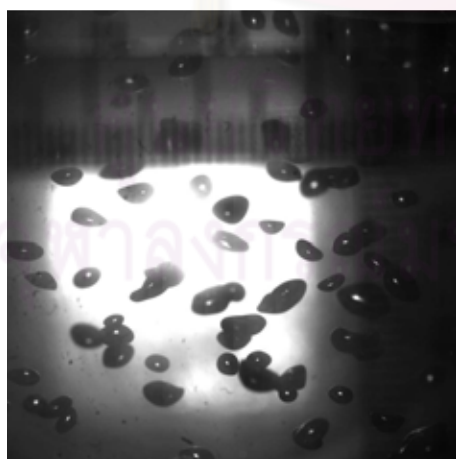
จากรูปที่ 4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเกลือ พบว่า สัมประสิทธิ์ดังกล่าวมี

แนวโน้มลดลงประมาณร้อยละ 17.46 คือ 1.46×10^{-4} ลดลงเป็น 9.16×10^{-5} ม./วินาที เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 1.0 เป็น 4.0 ลิตร/นาที (สำหรับความเข้มข้น 35,000 มก./ลิตร)

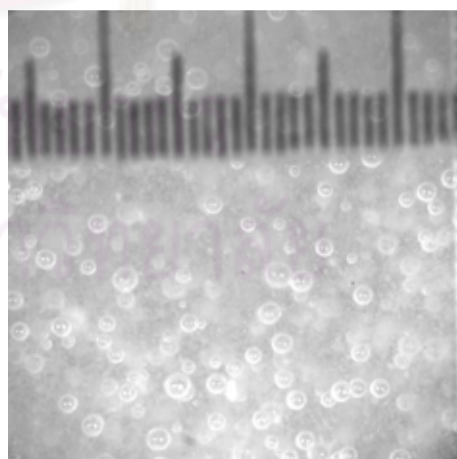
จากผลการทดลองในหัวข้อนี้อาจสรุปในเบื้องต้นได้ว่า น้ำเกลือความเข้มข้น 7,500 20,000 และ 35,000 มก./ลิตร ซึ่งใช้เป็นตัวแทนของปริมาณของแข็งละลายในน้ำที่พบได้ทั่วไปในน้ำกร่อยหรือน้ำทะเลส่งผลกระทบต่อกลไกการถ่ายเทออกซิเจนขณะเติมอากาศอย่างชัดเจน เนื่องจากปริมาณไอออนที่เกิดขึ้นจากการเพิ่มความเข้มข้นของเกลือได้ล้อมรอบฟองอากาศซึ่งขัดขวางการรวมตัวของฟองอากาศทำให้ฟองอากาศมีขนาดเล็กกว่าในน้ำประปา ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศในน้ำเกลือจึงมีค่าน้อยกว่าในน้ำประปาตามไปด้วย เมื่อนำค่าตัวแปรทั้งสองมาคำนวณเป็นพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำจึงมีค่ามากกว่าในน้ำประปา เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสของฟองอากาศขนาดเล็กและจำนวนฟองอากาศที่มากกว่าในน้ำประปา ซึ่งส่งผลต่อการถ่ายเทออกซิเจนมากกว่าการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวเนื่องจากปริมาณไอออนในน้ำเกลือ ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน และประสิทธิภาพเชิงพลังงานจึงมีค่ามากกว่าการเติมอากาศในน้ำประปา

3.) สภาวะที่น้ำถูกเจือปนด้วยของแข็งแขวนลอยในรูปเซลล์จุลชีพ

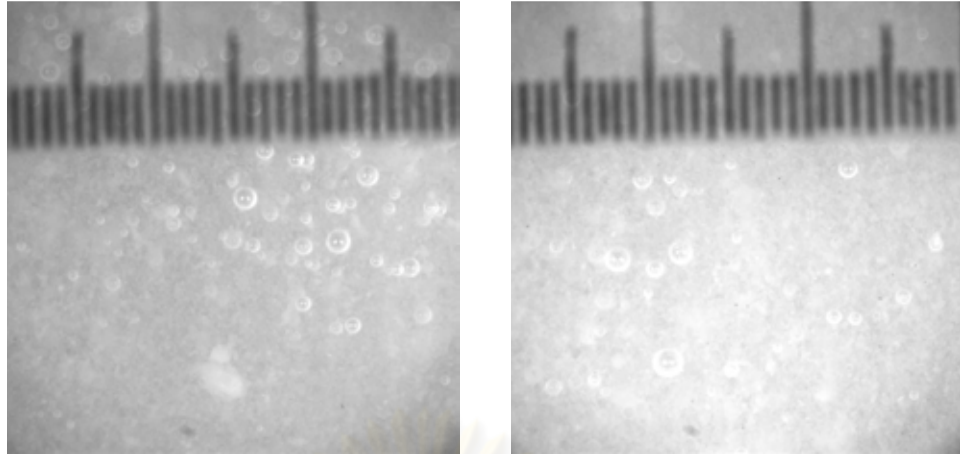
จากการวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ และความเร็วลอยตัวของฟองอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยของแข็งแขวนลอยในรูปเซลล์จุลชีพความเข้มข้น 1,000 2,000 และ 3,000 มก./ลิตร พบว่า ขนาดฟองอากาศมีขนาดเล็กกว่าในน้ำประปา ฟองอากาศเป็นรูปทรงกลม มีขนาดใกล้เคียงกันอย่างสม่ำเสมอ และไม่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของขนาดฟองอากาศได้ชัดเจนเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเซลล์จุลชีพ ดังแสดงในรูปที่ 4.33



1.) น้ำประปา



2.) เซลล์จุลชีพ 1,000 มก./ลิตร

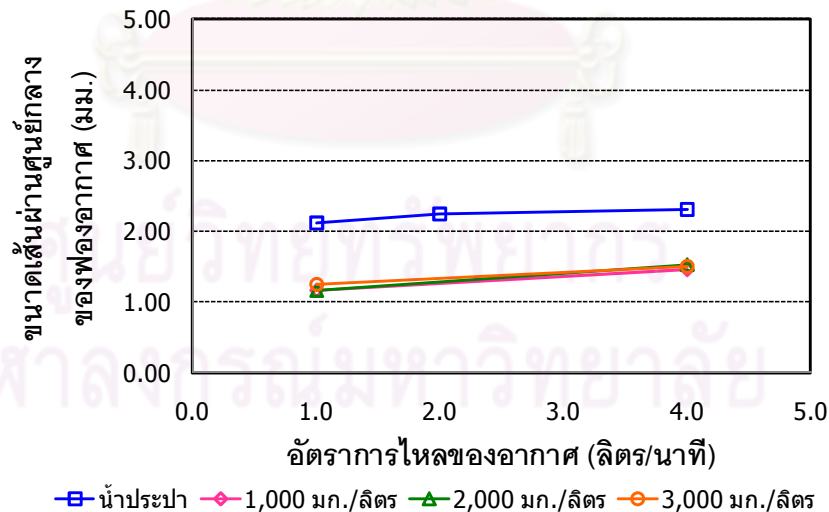


3.) เซลล์จุลชีพ 2,000 มก./ลิตร

4.) เซลล์จุลชีพ 3,000 มก./ลิตร

รูปที่ 4.33 ภาพถ่ายฟองอากาศขณะเติมอากาศในน้ำที่ถูกเจือปนด้วยเซลล์จุลชีพ
เปรียบเทียบกับในน้ำประปา

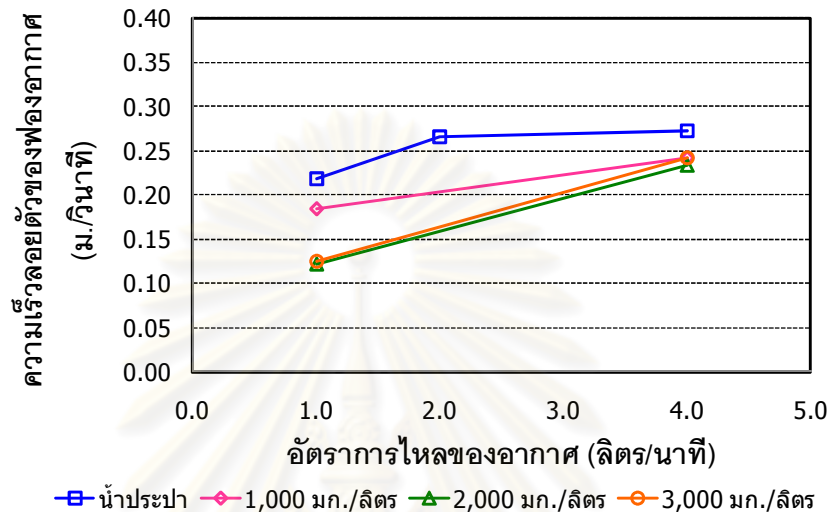
จากรูปที่ 4.33 เมื่อวิเคราะห์ขนาดฟองอากาศจากภาพ พบว่า ฟองอากาศที่เกิดขึ้นขณะเติมอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพมีขนาดเล็กกว่าในน้ำประปาประมาณ 0.61 เท่า และมีแนวโน้มคงที่ในช่วงความเข้มข้น 1,000 ถึง 3,000 มก./ลิตร เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 1.0 เป็น 4.0 ลิตร/นาท พบว่าฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้นจากเดิมประมาณร้อยละ 26 คือ 1.25 เพิ่มขึ้นเป็น 1.51 มม. (สำหรับความเข้มข้น 3,000 มก./ลิตร) ดังแสดงในรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพ

จากรูปที่ 4.34 ฟองอากาศที่เกิดขึ้นขณะเติมอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพมีขนาดเล็กกว่าในน้ำประปาจึงทำให้ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศมีค่าน้อยกว่าในน้ำประปาทามไปด้วย โดย

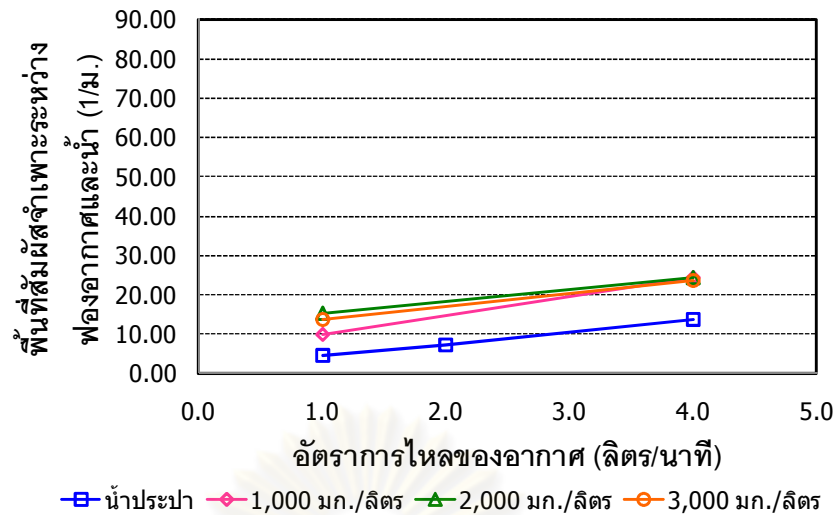
มีแนวโน้มคงที่ในช่วงความเข้มข้น 1,000 ถึง 3,000 มก./ลิตร สำหรับความเข้มข้น 1,000 มก./ลิตร ขณะเดิมอากาศด้วยอัตราการไหล 1.0 ลิตร/นาที่ พบว่าความเร็วลอยตัวของฟองอากาศมีค่ามากกว่าความเข้มข้นอื่นๆ เนื่องจากความเข้มข้นดังกล่าวทำให้สมบัติของน้ำเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมน้อยที่สุดจึงอาจส่งผลต่อค่าความเร็วลอยตัวของฟองอากาศที่ใกล้เคียงกับในน้ำประปามากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.35



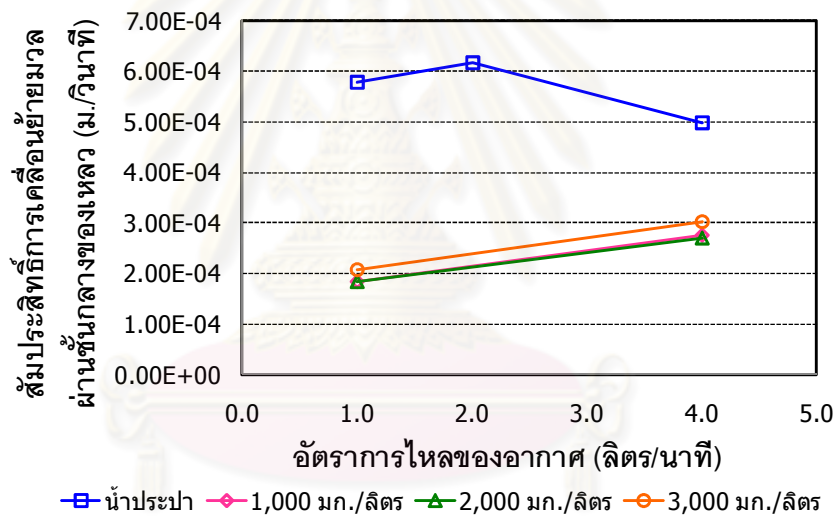
รูปที่ 4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลอยตัวของฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพ

จากรูปที่ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลอยตัวของฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพ พบว่า ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพมีค่าน้อยกว่าในน้ำประปาประมาณ 0.77 เท่า และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นคือ 0.13 เพิ่มขึ้นเป็น 0.24 ม./วินาที เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 1.0 เป็น 4.0 ลิตร/นาที่ (สำหรับความเข้มข้น 3,000 มก./ลิตร)

จากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศและความเร็วลอยตัวของฟองอากาศขณะเดิมอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพที่มีค่าน้อยกว่าในน้ำประปา เมื่อคำนวณเป็นพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำพบว่ามีความมากกว่าในน้ำประปาประมาณ 2.28 เท่า โดยมีแนวโน้มคงที่ในช่วงความเข้มข้น 1,000 ถึง 3,000 มก./ลิตร เนื่องจากขนาดฟองอากาศและความเร็วลอยตัวของฟองอากาศมีแนวโน้มคงที่ในช่วงความเข้มข้นดังกล่าว นอกจากนั้น พื้นที่สัมผัสจำเพาะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 1.91 เท่า คือเพิ่มขึ้นจาก 13.86 เป็น 23.77 1/ม. เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 1.0 เป็น 4.0 ลิตร/นาที่ (สำหรับความเข้มข้น 3,000 มก./ลิตร) ดังแสดงในรูปที่ 4.36



รูปที่ 4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศและน้ำ และอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพ



รูปที่ 4.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว และอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพ

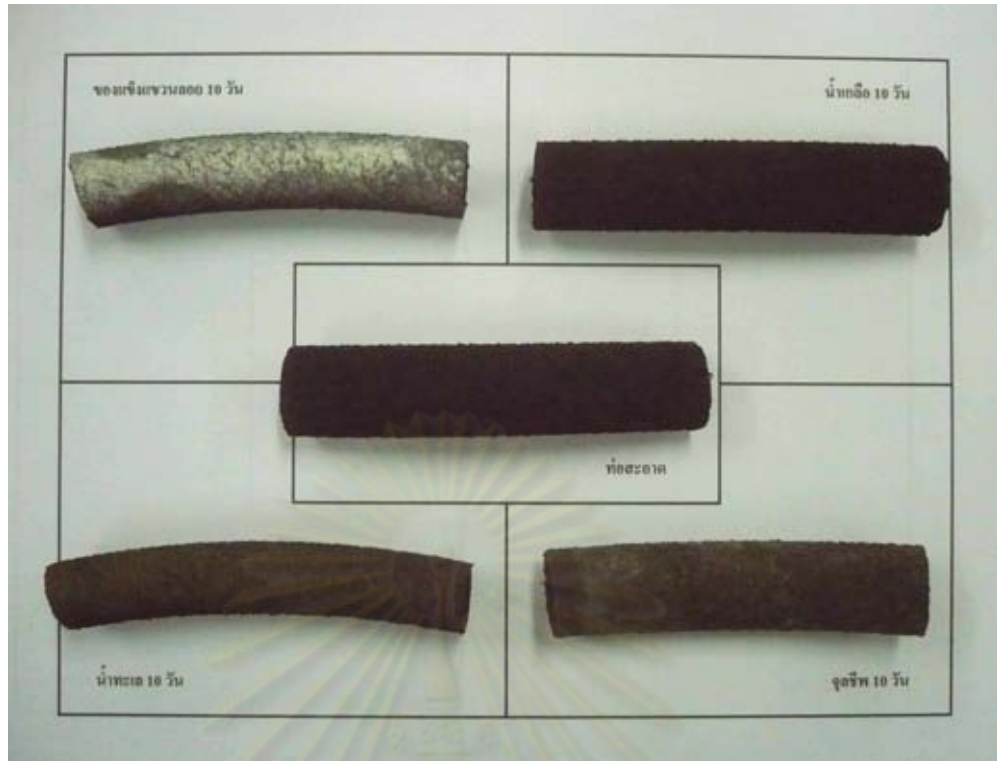
จากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว พบว่า สัมประสิทธิ์ดังกล่าวในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพมีค่าน้อยกว่าในน้ำประปาประมาณ 0.45 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.37 โดยสัมประสิทธิ์ดังกล่าวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นประมาณ 1.48 เท่า คือ 2.06×10^{-4} เพิ่มขึ้นเป็น 3.02×10^{-4} ม.วินาที เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 1.0 เป็น 4.0 ลิตร/นาที (สำหรับความเข้มข้น 3,000 มก./ลิตร)

จากผลการทดลองในหัวข้อนี้อาจสรุปในเบื้องต้นได้ว่า น้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลินทรีย์ที่มีความเข้มข้น 1,000 2,000 และ 3,000 มก./ลิตร ซึ่งใช้เป็นตัวแทนของปริมาณเซลล์จุลินทรีย์ในถังเดิมอากาศของระบบบำบัดน้ำเสียส่งผลกระทบต่อกลไกการถ่ายเทออกซิเจนขณะเดิมอากาศอย่างชัดเจน เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของเซลล์จุลินทรีย์ทำให้ค่าแรงดึงผิวในน้ำลดลงจากสารที่เกิดจากกระบวนการทางชีวภาพ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเป็นสารประเภทสารลดแรงดึงผิว โดยโมเลกุลของสารดังกล่าวสามารถเกาะติดและล้อมรอบฟองอากาศและขัดขวางการรวมตัวของฟองอากาศทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวลดลงอย่างมาก (Jamnongwong และคณะ, 2010) ถึงแม้ว่า ฟองอากาศที่เกิดขึ้นขณะเดิมอากาศมีลักษณะเป็นทรงกลมและมีขนาดเล็กกว่าในน้ำประปา ซึ่งทำให้ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศมีค่าน้อยกว่าในน้ำประปาตามไปด้วย เมื่อนำค่าตัวแปรทั้งสองมาคำนวณเป็นพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำจึงมีค่ามากกว่าในน้ำประปา แต่การลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวส่งผลต่อการถ่ายเทออกซิเจนมากกว่าการเพิ่มพื้นที่สัมผัสจำเพาะ ดังนั้นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน และประสิทธิภาพเชิงพลังงานจึงมีค่าน้อยกว่าการเดิมอากาศในน้ำประปา

4.2.3 การศึกษาระยะเวลาที่อาจก่อให้เกิดการอุดตันจากการหยุดเดิมอากาศ

การทดลองในหัวข้อนี้ได้ทำการศึกษาระยะเวลาที่อาจก่อให้เกิดการอุดตันจากการหยุดเดิมอากาศ โดยใช้ท่อยืดหยุ่นตัวอย่างที่ 6.3 แต่ในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาว เกลือ และเซลล์จุลินทรีย์ที่มีความเข้มข้นสูงที่สุดคือ 200 35,000 และ 3,000 มก./ลิตร ตามลำดับ เพื่อให้สามารถพิจารณาการอุดตันได้อย่างชัดเจน แต่ท่อเป็นระยะเวลาไม่เกิน 10 วัน เนื่องจากข้อจำกัดของระยะเวลาในการทำงาน วิจัย พิจารณาการอุดตันโดยการวิเคราะห์ที่ตัวคูณปรับแก้ของการอุดตันซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของท่อที่อุดตันกับท่อสะอาด ดังแสดงในสมการที่ 2.15 การวิเคราะห์ค่าความดันขณะเดิมอากาศ และภาพถ่ายลักษณะการอุดตันโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน

จากการแช่ท่อยืดหยุ่นในน้ำที่มีสารเจือปนต่างๆ พบว่า การแช่ท่อในน้ำที่ถูกเจือปนด้วยดินขาวและน้ำทะเลเป็นระยะเวลา 10 วัน สามารถสังเกตเห็นตะกอนสะสมอยู่ที่ผิวด้านบนของท่อได้อย่างชัดเจน โดยเห็นตะกอนสีขาวที่ผิวท่อสำหรับการแช่ในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาว และเห็นตะกอนสีน้ำตาลซึ่งเกิดจากของแข็งแขวนลอยในน้ำทะเลสะสมอยู่ที่ผิวท่อ การแช่ท่อในน้ำเกลือยังไม่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างกับท่อสะอาดได้ และสำหรับการแช่ท่อในน้ำที่ถูกเจือปนด้วยเซลล์จุลินทรีย์สามารถเห็นตะกอนสีน้ำตาลของเซลล์จุลินทรีย์สะสมตัวที่ผิวของท่อโดยรอบอย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากการตกตะกอนและการสร้างไบโอฟิล์ม (Biofilm) ของเซลล์จุลินทรีย์เคลือบที่ผิวทุกด้านของท่อ ดังแสดงในรูปที่ 4.38

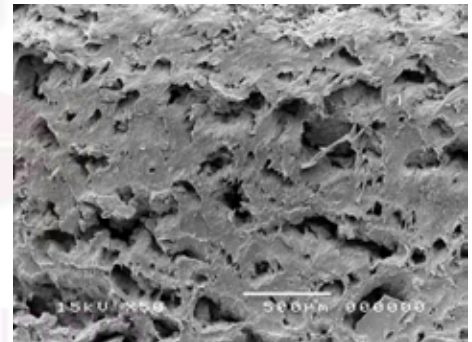
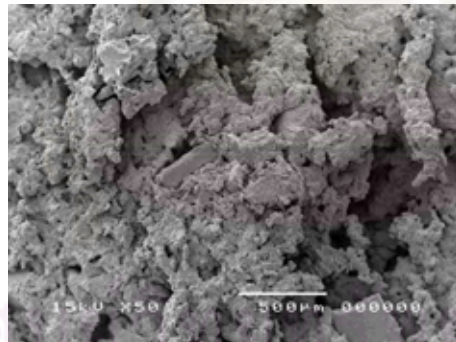


รูปที่ 4.38 ภาพถ่ายท่อยึดหุ่นที่ถูกแช่ในสภาวะต่างๆ

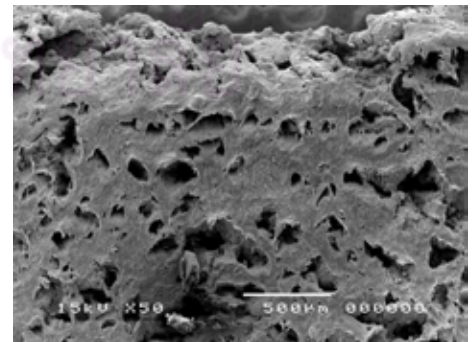
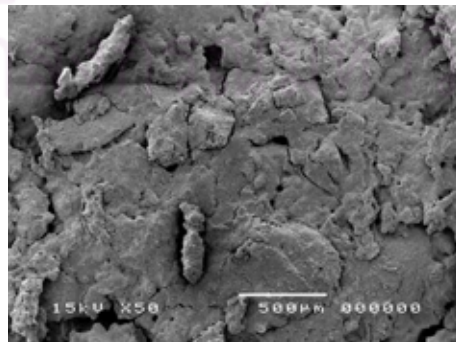
ภาพพื้นผิวด้านบน

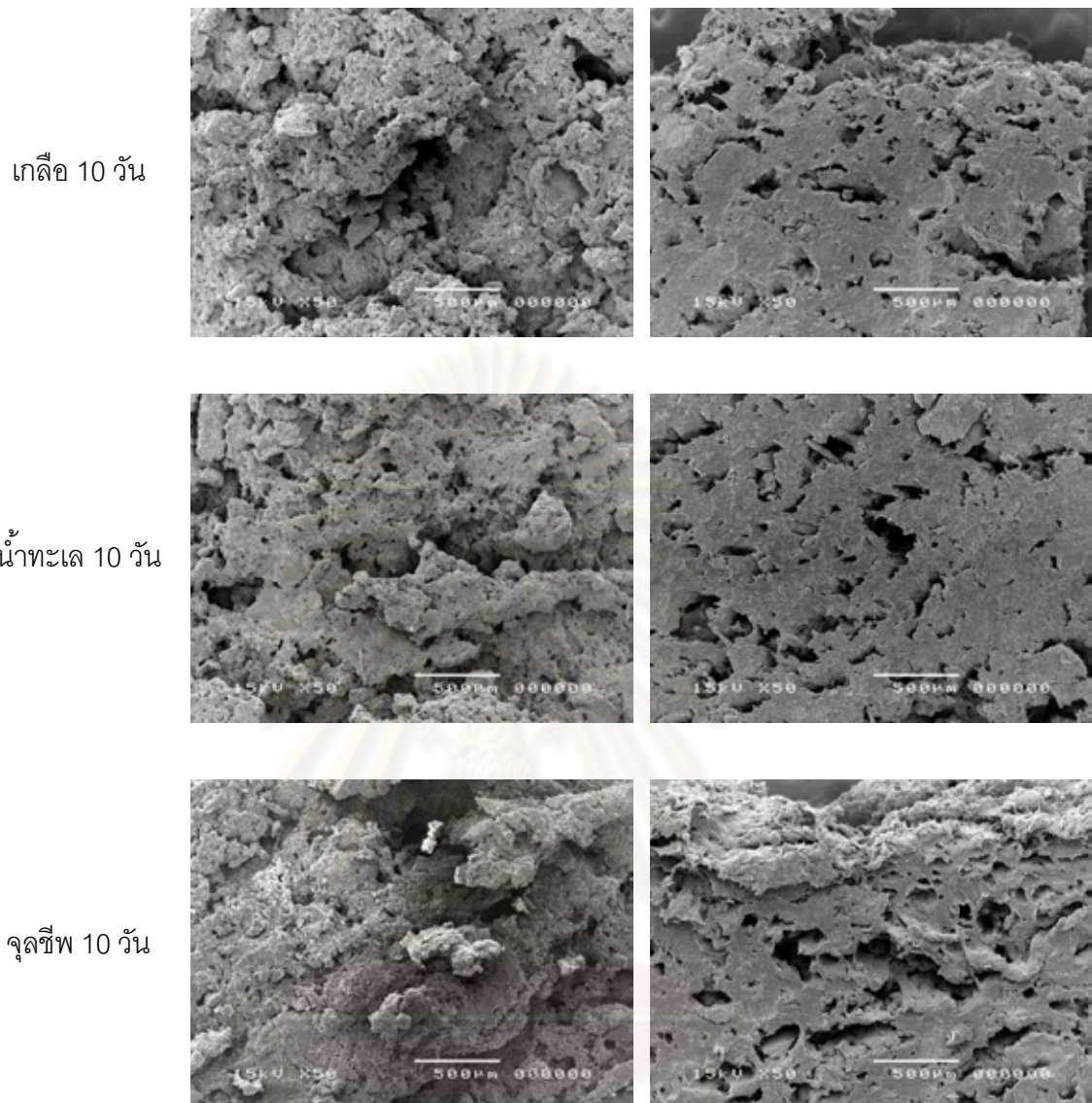
ภาพตัดขวาง

ท่อสะอาด



ดินขาว 10 วัน



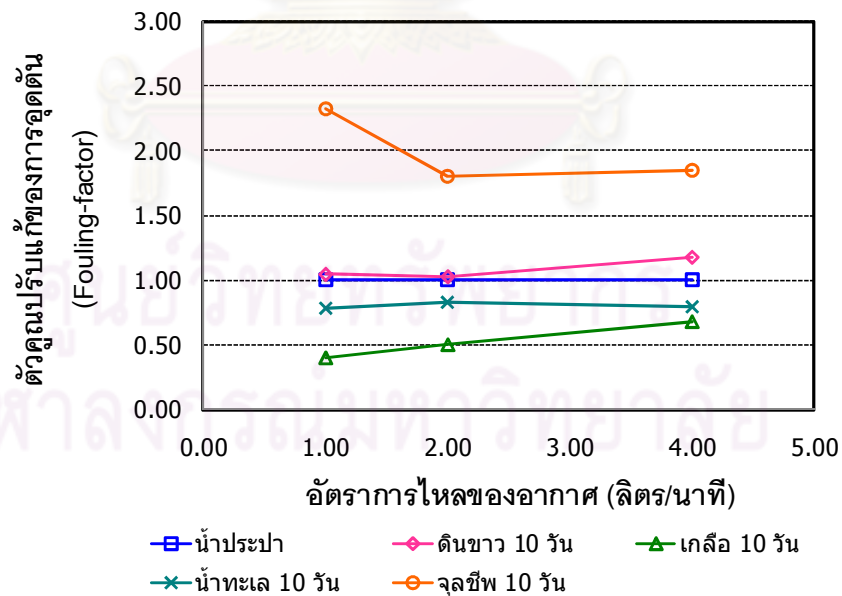


รูปที่ 4.39 ภาพถ่ายท่อยึดหยุ่นที่ถูกแช่ในสภาวะต่างๆโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน

จากรูปที่ 4.39 แสดงภาพถ่ายท่อยึดหยุ่นที่ถูกแช่ในสภาวะต่างๆโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนด้วยกำลังขยาย 50 เท่า พบว่า ที่พื้นผิวของท่อมีรูพรุนจำนวนมากและมีขนาดที่หลากหลาย แต่จากการสังเกตการเกิดฟองอากาศขณะเติมอากาศพบว่าที่ความดันต่ำฟองอากาศส่วนใหญ่เกิดจากรูเติมอากาศขนาดใหญ่ (ขนาดรูเติมอากาศโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.19 มม.) แต่ที่ความดันสูงในกรณีการเติมอากาศโดยใช้ท่อยึดหยุ่นตัวอย่างที่ 8.1 พบว่าฟองอากาศสามารถทะลุผ่านรูเติมอากาศขนาดเล็กได้ด้วย ลักษณะพื้นผิวของท่อที่ถูกแช่ในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวและในน้ำทะเลมีความขรุขระน้อยกว่าพื้นผิวของท่อสะอาดเนื่องจากมีตะกอนมาสะสมอย่างเห็นได้ชัดดังแสดงในรูปที่ 4.38 และจากภาพตัดขวางของผนังท่อสามารถสังเกตเห็นตะกอนบางส่วนหลุดลอดเข้ามาอุดตันใน

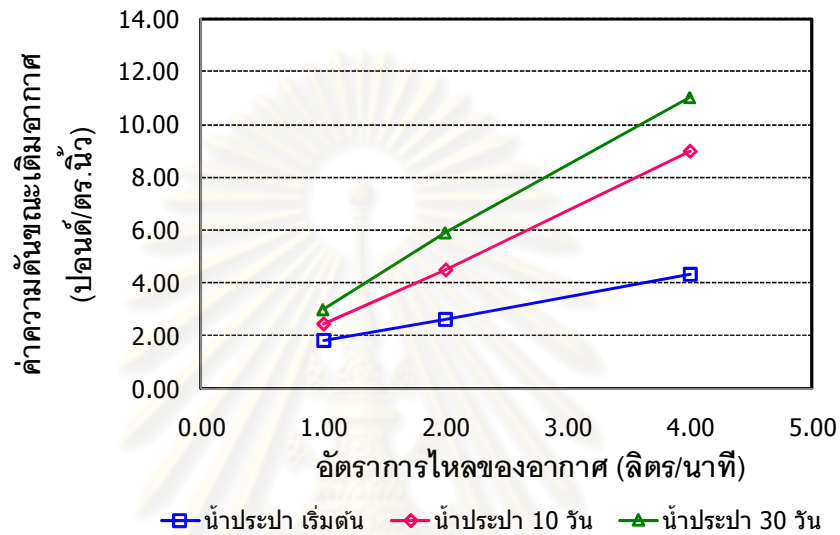
ผนังท่อซึ่งแสดงถึงการอุดตันของของแข็งแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่ารูเติมอากาศ สำหรับท่อที่ถูกแช่ในน้ำเกลือยังไม่สามารถสังเกตเห็นการอุดตันได้ ส่วนท่อที่ถูกแช่ในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพพบว่าจุดที่มีไบโอฟิล์มเคลือบที่ผิวท่อจะเป็นจุดที่มีสีขาวและเรืองแสงในภาพ เนื่องจากจุดที่มีไบโอฟิล์มเคลือบที่ผิวทำให้ความนำไฟฟ้าของตัวอย่างที่ลดลง ซึ่งรบกวนการถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนที่อาศัยความนำไฟฟ้าของตัวอย่าง ความชัดเจนของภาพถ่ายจึงลดลง ณ จุดนั้น นอกจากนั้น ไม่สามารถสังเกตเห็นการอุดตันภายในผนังท่อจากการแช่ท่อในสภาวะดังกล่าว

จากการวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนและคำนวณเป็นตัวคูณปรับแก้ของการอุดตัน เปรียบเทียบการอุดตันจากการแช่ท่อในน้ำในแต่ละสภาวะเป็นระยะเวลา 10 วัน พบว่า ตัวคูณปรับแก้ของการอุดตันในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาว และเซลล์จุลชีพเป็นระยะเวลา 10 วัน มีค่ามากกว่าในน้ำประปา โดยในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวมีค่าเท่ากับ 1.05 เพิ่มขึ้นเป็น 1.18 และในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพมีค่าเท่ากับ 2.32 ลดลงเป็น 1.85 เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 1.0 เป็น 4.0 ลิตร/นาที่ แสดงว่าเกิดการอุดตันที่ทำให้รูเติมอากาศมีขนาดเล็กลง ทำให้ฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มลดลง จึงส่งผลทำให้พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่า ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากปกติ แต่การเพิ่มขึ้นของค่าความดันขณะเติมอากาศอย่างมากอาจเป็นผลเสียต่อการทำงานของเครื่องเป่าอากาศ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Rosso และคณะ (2008) ดังแสดงในรูปที่ 4.40



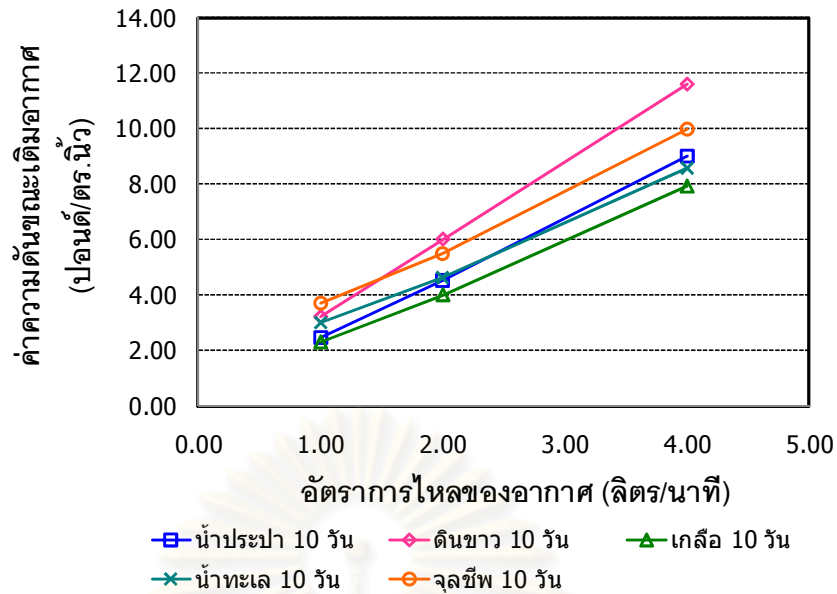
รูปที่ 4.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวคูณการปรับแก้ของการอุดตันและอัตราการไหลของอากาศของท่อที่ยืดหยุ่นที่ถูกแช่ในสภาวะต่างๆ

จากรูปที่ 4.40 แสดงถึงการเกิดการอุดตันจากการแช่ท่อยึดหยุ่นในน้ำถูกปนเปื้อนด้วยดินขาว และเซลล์จุลชีพเป็นระยะเวลา 10 วัน เมื่อพิจารณาถึงค่าความดันขณะเติมอากาศของท่อที่ถูกแช่ในสภาวะต่างๆเปรียบเทียบกับค่าความดันเริ่มต้นของท่อสะอาด จากการทดลองเมื่อนำท่อยึดหยุ่นแช่ในน้ำประปาซึ่งใช้เป็นตัวแทนของน้ำสะอาด พบว่า ค่าความดันขณะเติมอากาศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อแช่ท่อในน้ำประปาเป็นระยะเวลานาน ดังแสดงในรูปที่ 4.41



รูปที่ 4.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันขณะเติมอากาศและอัตราการไหลของอากาศของท่อยึดหยุ่นที่ถูกแช่ในน้ำประปา

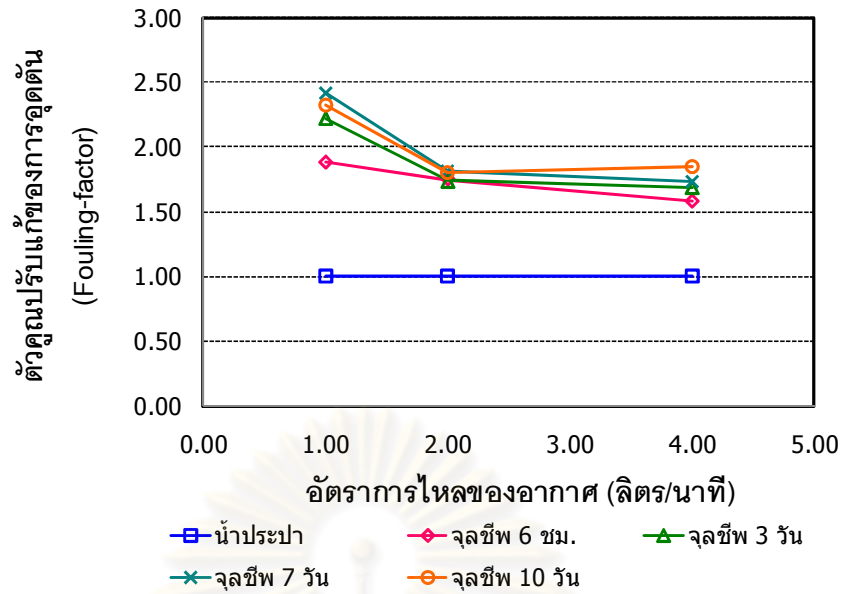
จากรูปที่ 4.41 แสดงค่าความดันขณะเติมอากาศของท่อยึดหยุ่นที่ถูกแช่ในน้ำประปาเป็นระยะเวลา 10 และ 30 วัน พบว่าเมื่อแช่ท่อในน้ำประปาเป็นระยะเวลา 10 วัน ทำให้มีค่าความดันเท่ากับ 2.45 เพิ่มขึ้นเป็น 9.00 ปอนด์/ตร.นิ้ว ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 1.0 ถึง 4.0 ลิตร/นาท อาจเป็นเพราะการแช่น้ำเป็นระยะเวลานานทำให้ท่อยึดหยุ่นเกิดการบวมน้ำและลดขนาดของรูเติมอากาศให้เล็กลง จึงทำให้ค่าความดันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อแช่ท่อเป็นระยะเวลานาน จากการเพิ่มค่าความดันขณะเติมอากาศของท่อยึดหยุ่นจึงเลือกใช้ค่าความดันของท่อที่ถูกแช่ในน้ำประปานาน 10 วัน เป็นตัวแทนของค่าความดันเริ่มต้นของท่อสะอาดเพื่อใช้เปรียบเทียบกับท่อที่อุดตันจากการแช่ในน้ำที่มีสารปนเปื้อนอื่นๆ



รูปที่ 4.42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นเดิมอากาศและอัตราการไหลของอากาศของท่อยึดหยุ่นที่ถูกแช่ในสภาวะต่างๆ

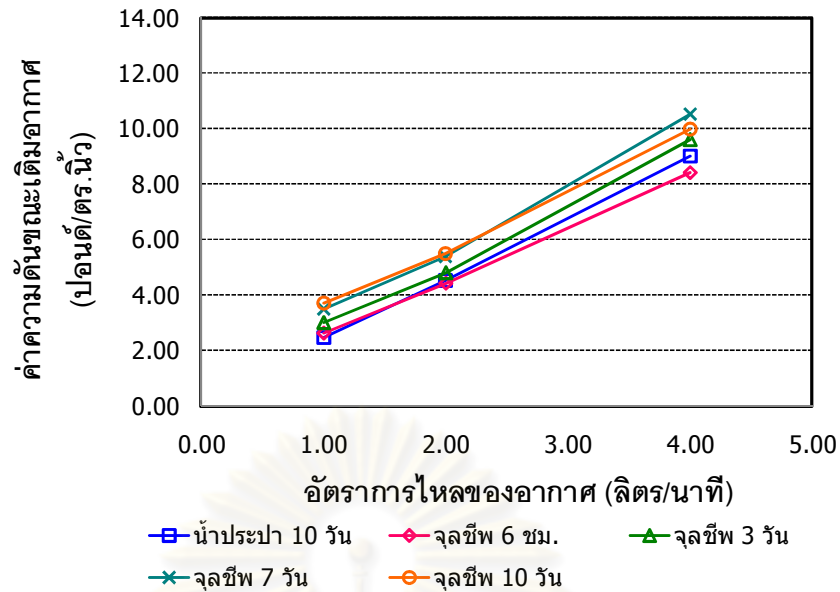
จากรูปที่ 4.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นเดิมอากาศและอัตราการไหลของอากาศของท่อยึดหยุ่นที่ถูกแช่ในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาว เกลือ และเซลล์จุลชีพเปรียบเทียบกับท่อที่ถูกแช่ในน้ำประปาและน้ำทะเล พบว่าท่อที่ถูกแช่ในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวและเซลล์จุลชีพมีค่าความดันมากกว่าในน้ำประปา ในขณะที่ท่อที่ถูกแช่ในน้ำทะเลและในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเกลือมีค่าความดันน้อยกว่าหรือเท่ากับในน้ำประปา จึงอาจสรุปในเบื้องต้นได้ว่าของแข็งแขวนลอยและเซลล์จุลชีพเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการอุดตันในท่อยึดหยุ่นสำหรับงานวิจัยนี้

จากการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยของดินขาว พบว่า ดินขาวมีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยเท่ากับ 9.85 มค.ม. (9.85×10^{-3} มม.) ซึ่งเป็นขนาดที่เล็กกว่าขนาดรูเดิมอากาศประมาณ 20 เท่า (0.19 มม.) ดินขาวจึงสามารถตกตะกอนมาอุดตันรูเดิมอากาศได้ ประกอบกับรูเดิมอากาศมีขนาดคงที่และดินขาวมีความเร็วในการตกตะกอนประมาณ 0.023 ม./วินาที ซึ่งใช้เวลาในการตกตะกอนประมาณ 9.45 วินาที สำหรับระดับน้ำสูง 0.215 ม. หรือกล่าวได้ว่าดินขาวสามารถตกตะกอนได้ทันทีหลังจากหยุดเดิมอากาศ ดังนั้น ดินขาวที่เลือกใช้เป็นตัวแทนของของแข็งแขวนลอยในน้ำซึ่งมีขนาดอนุภาคและค่าความเร็วในการตกตะกอนดังกล่าวจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ท่อยึดหยุ่นอุดตันได้ทันทีหลังหยุดเดิมอากาศ สำหรับการศึกษาระยะเวลาที่อาจก่อให้เกิดการอุดตันจึงสนใจศึกษาระยะเวลาการแช่ท่อยึดหยุ่นในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพ ดังแสดงในรูปที่ 4.43



รูปที่ 4.43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวคูณการปรับแก้ของการอุดตันและอัตราการไหลของอากาศของท่อยัดหยุ่นที่ถูกแช่ในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพ

จากรูปที่ 4.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวคูณการปรับแก้ของการอุดตันและอัตราการไหลของอากาศของท่อยัดหยุ่นที่ถูกแช่ในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพ พบว่า ค่าตัวคูณปรับแก้ของการอุดตันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการแช่ท่อที่นานขึ้นซึ่งแสดงว่าเกิดการอุดตันมากขึ้นตามระยะเวลาของการแช่ท่อ เนื่องจากเซลล์จุลชีพตกตะกอนทับถมบนผิวท่อและสร้างไบโอฟิล์มเคลือบที่ผิวท่อทำให้เกิดการอุดตันที่รูเติมอากาศทำให้อากาศมีขนาดเล็กลงจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนเพิ่มขึ้นจนมีค่ามากกว่าท่อสะอาด แต่การอุดตันดังกล่าวทำให้ความดันขณะเติมอากาศมีค่าสูงขึ้นไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.44 โดยพบว่า เมื่อแช่ท่อานาน 6 ชม. ความดันขณะเติมอากาศยังมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าความดันของท่อสะอาด แต่เมื่อแช่ท่อานาน 3 วัน พบว่าความดันเริ่มมีค่ามากกว่าในท่อสะอาดและมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆเมื่อแช่ท่อานานขึ้นจนครบ 10 วัน จึงมีค่าความดันมากที่สุดซึ่งแสดงถึงเกิดการอุดตันมากที่สุด จากค่าความดันของท่อยัดหยุ่นที่แช่ในน้ำที่ถูกเจือปนด้วยเซลล์จุลชีพเป็นระยะเวลา 3 วัน อาจสรุปในเบื้องต้นได้ว่า การเติมอากาศในสภาวะที่มีเซลล์จุลชีพความเข้มข้น 3,000 มก./ลิตร ไม่ควรหยุดเติมอากาศนานเกิน 3 วัน เพราะจะทำให้เกิดการอุดตันต่ออุปกรณ์เติมอากาศได้



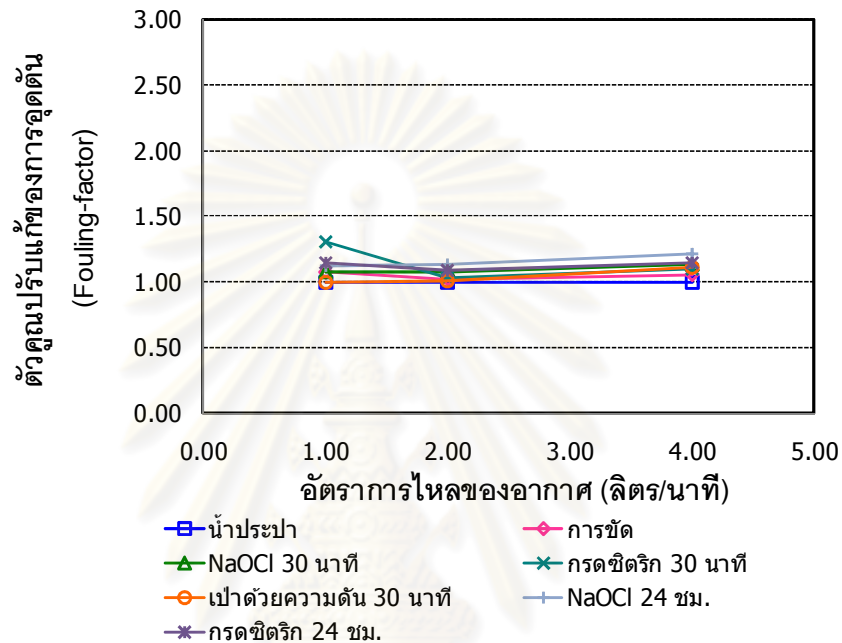
รูปที่ 4.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันขณะเติมอากาศและอัตราการไหลของอากาศของท่อยึดหยุ่นที่ถูกแช่ในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพ

จากผลการทดลองในหัวข้อนี้สามารถสรุปได้ว่า ของแข็งแขวนลอยและเซลล์จุลชีพเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการอุดตัน โดยที่ดินขาวซึ่งใช้เป็นตัวแทนของของแข็งแขวนลอยในน้ำสามารถทำให้เกิดการอุดตันได้ทันทีเนื่องจากมีขนาดอนุภาคเล็กกว่ารูเติมอากาศประมาณ 20 เท่า และใช้ระยะเวลาสั้นในการตกตะกอนจึงสามารถก่อให้เกิดการอุดตันได้ทันทีหลังหยุดเติมอากาศ สำหรับเซลล์จุลชีพซึ่งใช้เป็นตัวแทนของสภาวะการเติมอากาศในระบบบำบัดน้ำเสียสามารถทำให้เกิดการอุดตันได้จากการตกตะกอนทับถมและสร้างไบโอฟิล์มเคลือบที่ผิวท่อภายในระยะเวลา 3 วัน ดังนั้น ในกระบวนการเติมอากาศจึงไม่ควรหยุดเติมอากาศนานเกิน 3 วัน หลังจากนั้นจึงควรทำความสะอาดอุปกรณ์เติมอากาศด้วยวิธีที่เหมาะสม

4.2.4 การศึกษาวิธีทำความสะอาดที่เหมาะสม

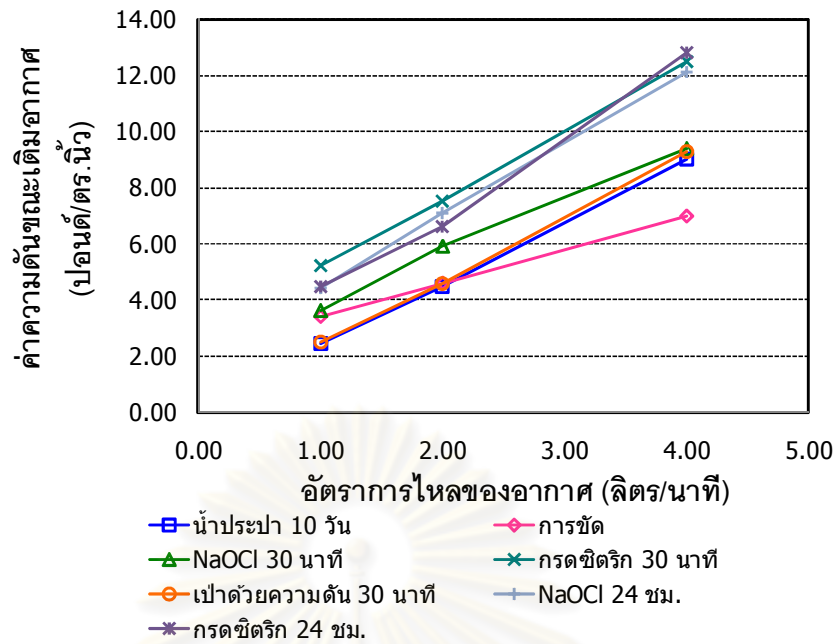
การทดลองในหัวข้อนี้ได้ศึกษาวิธีทำความสะอาดที่เหมาะสมประกอบไปด้วย การขัดที่ผิวด้วยแปรงขนอ่อน (แปรงสีฟัน) การแช่ในสารละลายไฮโปคลอไรท์ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยมวลต่อปริมาตร เป็นระยะเวลา 30 นาที และ 24 ชม. การแช่ในสารละลายกรดซิตริกความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยมวลต่อปริมาตร เป็นระยะเวลา 30 นาที และ 24 ชม. และการเป่าด้วยความดัน 3 บาร์ (300 กิโลปาสกาล) นาน 30 นาที โดยใช้ท่อยึดหยุ่นตัวอย่างที่ 6.3 แช่ในน้ำสภาวะเดียวกับผลการทดลองหัวข้อที่ 4.2.3 ระยะเวลา 10 วัน สำหรับการแช่ในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพได้แช่ท่อนาน 3 และ 10 วัน เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำความสะอาดโดยวิเคราะห์ค่าตัวคูณปรับแก้ของการอุดตันและความดันขณะเติมอากาศ

ในกรณีการทำความสะอาดท่อที่ถูกแช่ในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวความเข้มข้น 200 มก./ลิตร เป็นระยะเวลา 10 วัน พบว่า หลังทำความสะอาดด้วยวิธีต่างๆยังไม่สามารถสังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงของค่าตัวคูณปรับแก้ของการอุดตันได้ชัดเจนนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.43 เนื่องจาก ค่าเดิมของท่อที่อุดตันมีค่าใกล้เคียงกับท่อสะอาด ดังแสดงในรูปที่ 4.39 จึงจำเป็นต้องพิจารณาค่าความดันขณะเติมอากาศควบคู่ไปด้วย



รูปที่ 4.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวคูณการปรับแก้ของการอุดตันหลังทำความสะอาดและอัตราการไหลของอากาศของท่อที่ยัดหุ่นที่อุดตันด้วยดินขาว

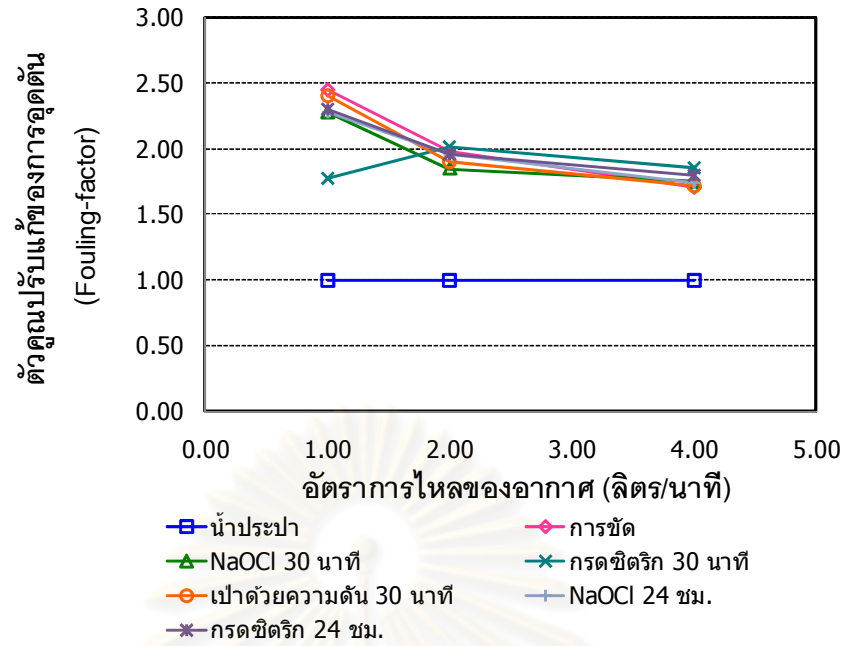
จากการพิจารณาค่าความดันขณะเติมอากาศของท่อที่อุดตันด้วยดินขาว พบว่า การทำความสะอาดโดยวิธีการขัดสามารถกำจัดดินขาวที่อุดตันได้บางส่วน เนื่องจากค่าความดันลดลงจากท่ออุดตันอย่างเห็นได้ชัด คือ ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 1.0 ถึง 4.0 ลิตร/นาที่ ค่าความดันเดิมอยู่ในช่วง 3.20 ถึง 11.60 ปอนด์/ตร.นิ้ว ลดลงเป็น 3.40 ถึง 7.00 ปอนด์/ตร.นิ้ว ในขณะที่การทำมาสะอาดโดยสารเคมี (สารละลายไฮโปคลอไรท์และกรดซิทริก) ไม่สามารถทำความสะอาดดินขาวได้เนื่องจากค่าความดันมีแนวโน้มคงเดิมจากท่ออุดตัน ถึงแม้ว่าจะเพิ่มระยะเวลาการทำมาสะอาดจาก 30 นาที เป็น 24 ชม. ก็ตาม สำหรับการเป่าด้วยความดันพบว่าสามารถกำจัดดินขาวที่อุดตันได้เป็นอย่างดี เนื่องจากค่าความดันลดลงจนมีค่าเท่ากับท่อสะอาด ดังแสดงในรูปที่ 4.46



รูปที่ 4.46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นเดิมอากาศหลังทำความสะอาดและอัตราการไหลของอากาศของท่อยืดหยุ่นที่อุดตันด้วยดินขาว

จากรูปที่ 4.45 และ 4.46 อาจสรุปในเบื้องต้นได้ว่าการกำจัดสิ่งอุดตันที่เกิดจากการตกตะกอนของแข็งแขวนลอยในน้ำควรจะทำความสะดวกด้วยวิธีทางกายภาพ ได้แก่ การขัดที่ผิวท่อด้วยแปรงขนอ่อน และการเป่าด้วยความดัน เป็นต้น มากกว่าวิธีทางเคมี จากผลการทดลองในงานวิจัยนี้พบว่าการเป่าด้วยความดันมีประสิทธิภาพสูงกว่า และมีความสะดวกมากกว่าการขัด

ในกรณีการทำความสะดวกท่อที่ถูกแช่ในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพความเข้มข้น 3,000 มก./ลิตร เป็นระยะเวลา 10 วัน พบว่า หลังทำความสะอาดด้วยวิธีต่างๆ ยังไม่สามารถสังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงของค่าตัวคูณปรับแก้ของการอุดตันได้ชัดเจนนัก เนื่องจากมีค่าใกล้เคียงกับค่าของท่ออุดตันคือ 2.32 ลดลงเป็น 1.85 ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 1.0 ถึง 4.0 ลิตร/นาที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.47 อาจเป็นเพราะการแช่ท่อเป็นระยะเวลาดังกล่าวทำให้เกิดการอุดตันที่ฝังแน่น เนื่องจากผิวท่อถูกเคลือบด้วยไบโอฟิล์มชั้นหนาซึ่งสามารถสังเกตเห็นเป็นจุดสีน้ำตาลได้ชัดเจนกว่าระยะเวลาอื่นที่สั้นกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.48 จึงทำให้ทำความสะอาดได้ยาก



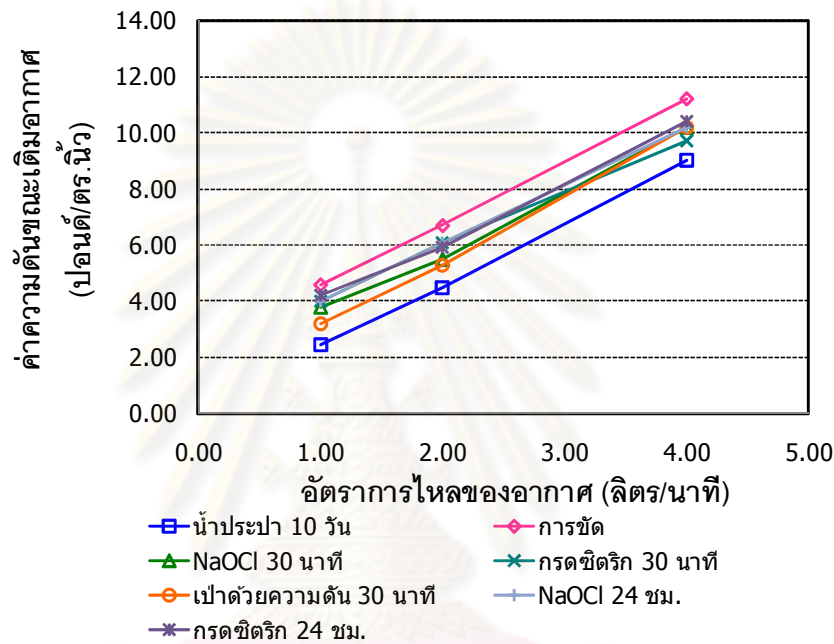
รูปที่ 4.47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวคูณการปรับแก้ของการอุดตันหลังทำความสะอาดและอัตราการไหลของอากาศของท่อยึดหยุนที่อุดตันด้วยเซลล์จุลชีพ



รูปที่ 4.48 ภาพถ่ายท่อยึดหยุนที่อุดตันด้วยเซลล์จุลชีพ

เมื่อพิจารณาค่าความดันขณะเต็มอากาศของท่อยึดหยุนที่ถูกแช่ในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพเป็นระยะเวลา 10 วัน พบว่า การขัดไม่สามารถทำความสะอาดเซลล์จุลชีพที่อุดตันได้เนื่องจาก

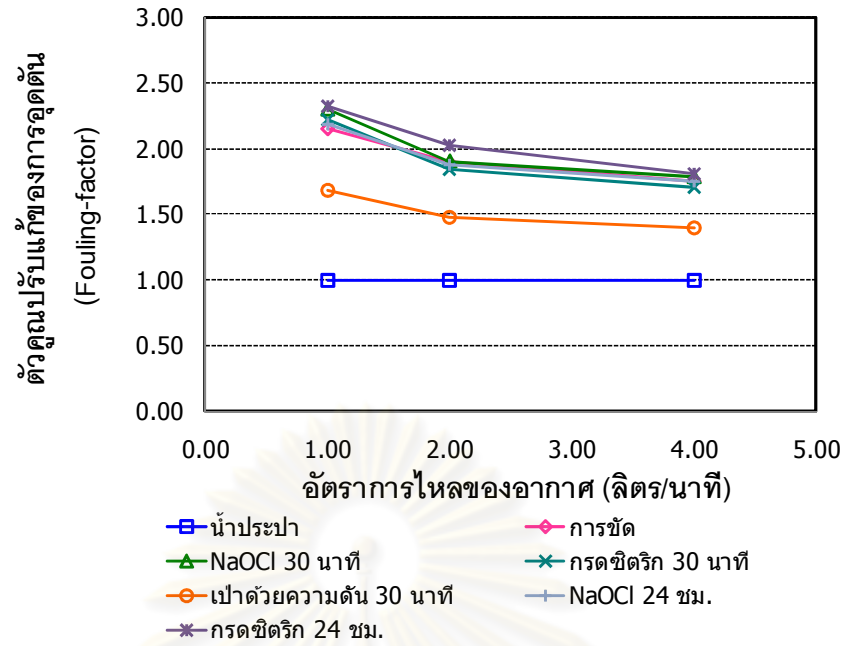
ความดันยังคงมีค่าเท่ากับท่อที่อุดตันคือ 4.60 ถึง 11.20 ปอนด์/ตร.นิ้ว ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 1.0 ถึง 4.0 ลิตร/นาที แต่สำหรับการทำความสะอาดด้วยสารเคมีสามารถกำจัดเซลล์จุลชีพที่อุดตันได้บางส่วน โดยลดค่าความดันลงอยู่ในช่วง 3.80 ถึง 10.20 ปอนด์/ตร.นิ้ว แต่การเพิ่มระยะเวลาทำความสะอาดจาก 30 นาที เป็น 24 ชม. ยังไม่สามารถสังเกตเห็นการเพิ่มประสิทธิภาพการทำความสะอาดได้ชัดเจนนัก นอกจากนี้ การเป่าด้วยความดันสามารถกำจัดเซลล์จุลชีพที่อุดตันได้ค่อนข้างมากที่สุดโดยมีค่าความดันอยู่ในช่วง 3.20 ถึง 10.20 ปอนด์/ตร.นิ้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.49



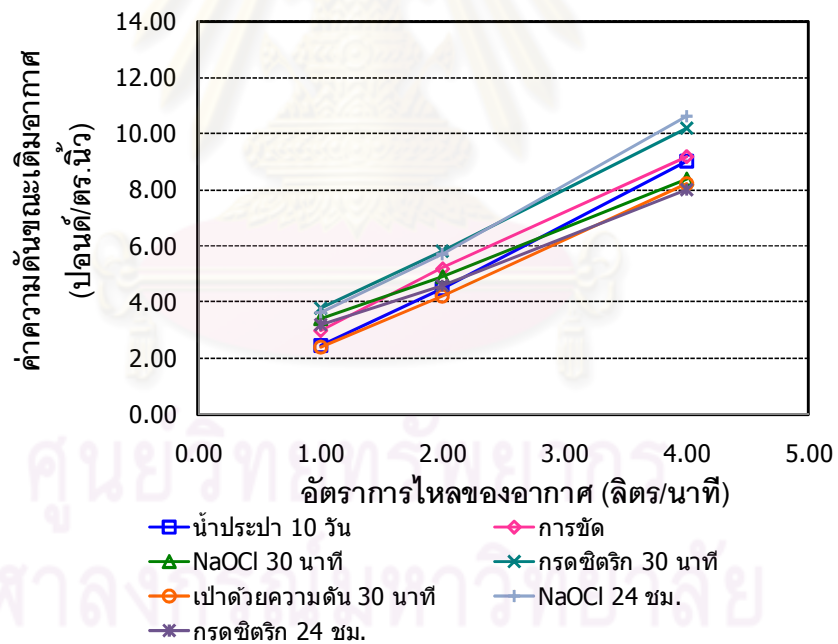
รูปที่ 4.49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันขณะเติมอากาศหลังทำความสะอาดและอัตราการไหลของอากาศของท่อยึดหยุนที่อุดตันด้วยเซลล์จุลชีพ

จากรูปที่ 4.47 และ 4.49 ยังไม่พบความแตกต่างของค่าตัวคูณปรับแก้ของการอุดตันและความดันขณะเติมอากาศที่ชัดเจน จึงไม่สามารถเลือกวิธีที่เหมาะสมสำหรับการทำความสะอาดเซลล์จุลชีพที่อุดตันเพราะหยุดเติมอากาศนาน 10 วันได้ เนื่องจากเป็นระยะเวลาหยุดเติมอากาศที่นานเกินไปจนทำให้เกิดการอุดตันที่ทำความสะอาดได้ยาก ดังนั้น จึงพิจารณาวิธีทำความสะอาดในกรณีหยุดเติมอากาศนาน 3 วัน ซึ่งเป็นระยะเวลาที่เริ่มเกิดการอุดตันและน่าจะสามารถทำความสะอาดได้ง่ายกว่าควมคู่ไปด้วย

ในกรณีของการอุดตันโดยเซลล์จุลชีพจากการหยุดเติมอากาศเป็นระยะเวลา 3 วัน พบว่าค่าตัวคูณปรับแก้ของการอุดตันหลังทำความสะอาดด้วยวิธีต่างๆ ส่วนใหญ่มีแนวโน้มเท่ากับท่อที่อุดตัน ยกเว้นการเป่าด้วยความดันสามารถลดค่าตัวคูณปรับแก้ของการอุดตันเท่ากับ 1.68 ลดลงเป็น 1.40 ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 1.0 ถึง 4.0 ลิตร/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.50



รูปที่ 4.50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวคูณการปรับแก้ของการอุดตันหลังทำความสะอาดและอัตราการไหลของอากาศของท่อยืดหยุ่นที่อุดตันด้วยเซลล์จุลชีพในช่วง 3 วัน



รูปที่ 4.51 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันขณะเติมอากาศหลังทำความสะอาดและอัตราการไหลของอากาศของท่อยืดหยุ่นที่อุดตันด้วยเซลล์จุลชีพในช่วง 3 วัน

เมื่อพิจารณาค่าความดันขณะเติมอากาศ พบว่า การขัดสามารถทำความสะอาดเซลล์จุลชีพที่อุดตันท่อได้บางส่วน เนื่องจากเป็นวิธีที่กำจัดสิ่งอุดตันบริเวณผิวด้านนอกได้ แต่ไม่สามารถกำจัดสิ่งอุดตันภายในผนังท่อได้ค่าความดันจึงลดลงจากท่อที่อุดตันเพียงเล็กน้อย สำหรับการทำความสะอาด

ด้วยสารเคมี พบว่าสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์สามารถทำความสะอาดเซลล์ที่อุดตันได้โดยการแช่ท่อนาน 30 นาที ค่าความดันลดลงอยู่ในช่วง 3.40 ถึง 8.40 ปอนด์/ตร.นิ้ว สำหรับสารละลายกรดซิตริกต้องแช่ท่อนาน 24 ชม. จึงสามารถทำความสะอาดได้ซึ่งมีค่าความดันอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่การเป่าด้วยความดันนาน 30 นาที สามารถทำความสะอาดได้เป็นอย่างดีโดยลดค่าความดันจนเท่ากับค่าของท่อสะอาดคือ 2.40 ถึง 8.20 ปอนด์/ตร.นิ้ว ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 1.0 ถึง 4.0 ลิตร/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.51

ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพและตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศของท่อยืดหยุ่นในสภาวะการเติมอากาศต่างๆ

ลักษณะน้ำ	k_a	P	d_B	U_B	a	k_L
	$\times 10^{-3}$ 1/วินาที	ปอนด์/ตร.นิ้ว	มม.	ม./วินาที	1/ม.	$\times 10^{-4}$ ม./วินาที
น้ำประปา	0.95 - 8.36	1.50 - 4.90	2.12 - 2.30	0.22 - 0.27	4.68 - 13.82	4.98 - 5.78
ดินขาว	0.95 - 8.50	1.50 - 4.90	1.65 - 1.97	0.21 - 0.32	4.31 - 16.73	3.51 - 6.52
เกลือ	1.95 - 20.80	1.50 - 4.90	0.98 - 1.34	0.11 - 0.14	14.97 - 78.25	2.25 - 3.90
น้ำทะเล	1.37 - 11.00	1.50 - 4.90	-	-	-	-
เซลล์จุลชีพ	0.59 - 6.57	1.50 - 4.90	1.16 - 1.53	0.12 - 0.24	10.05 - 24.57	1.02 - 2.13

ตารางที่ 4.5 ตัวคูณปรับแก้ของการอุดตันของท่อยืดหยุ่นจากการศึกษาวิธีทำความสะอาดที่เหมาะสม

ลักษณะท่อ	ตัวคูณปรับแก้ของการอุดตัน				
	น้ำประปา	ดินขาว	เกลือ	น้ำทะเล	เซลล์จุลชีพ
ท่อสะอาด	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
ท่ออุดตัน	-	1.05 - 1.18	0.40 - 0.68	0.78 - 0.80	1.58 - 2.42
การขัด	-	1.02 - 1.07	0.40 - 0.68	0.77 - 0.83	1.71 - 2.44
NaOCl	-	1.07 - 1.13	0.33 - 0.64	0.88 - 1.01	1.62 - 2.30
กรดซิตริก	-	1.03 - 1.30	0.48 - 0.71	0.90 - 1.02	1.65 - 2.27
เป่าด้วยความดัน	-	0.99 - 1.11	0.29 - 0.61	0.86 - 0.90	1.40 - 2.40

ตารางที่ 4.6 ความดันขณะเติมอากาศของท่อยึดหยุ่นจากการศึกษาวิธีทำความสะอาดที่เหมาะสม

ลักษณะท่อ	ความดัน (ปอนด์/ตร.นิ้ว)				
	น้ำประปา	ดินขาว	เกลือ	น้ำทะเล	เซลล์จุลชีพ
ท่อสะอาด	1.50 - 4.90	1.50 - 4.90	1.50 - 4.90	1.50 - 4.90	1.50 - 4.90
ท่ออุดตัน	2.45 - 9.00	3.20 - 11.60	2.30 - 7.90	3.00 - 8.60	2.60 - 10.50
การขัด	-	3.40 - 7.00	3.00 - 8.00	3.60 - 8.80	3.00 - 11.20
NaOCl	-	3.60 - 9.40	3.30 - 8.00	3.40 - 7.90	3.10 - 10.20
กรดซัลฟิวริก	-	5.20 - 12.50	3.20 - 7.40	3.60 - 9.40	3.00 - 10.20
เป่าด้วยความดัน	-	2.50 - 9.30	2.40 - 9.00	2.40 - 8.20	2.40 - 10.20

จากตารางที่ 4.4 แสดงช่วงของประสิทธิภาพการเติมอากาศของท่อยึดหยุ่นและตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศขณะเติมอากาศในสภาวะต่างๆที่สนใจศึกษาในหัวข้อนี้ ส่วนตารางที่ 4.5 และ 4.6 แสดงช่วงของค่าตัวคูณปรับแก้ของการอุดตันและความดันขณะเติมอากาศของท่อยึดหยุ่นจากการทดลองศึกษาวิธีทำความสะอาดที่เหมาะสม จากผลการทดลองในหัวข้อนี้สามารถสรุปได้ว่าวิธีทำความสะอาดท่อยึดหยุ่นที่เหมาะสมคือ การเป่าด้วยความดัน โดยในงานวิจัยนี้ได้เป่าอากาศด้วยความดัน 3 บาร์ เป็นระยะเวลา 30 นาที พบว่าสามารถกำจัดสิ่งอุดตันได้ดีทั้งในรูปแบบของแข็งแขวนลอยและเซลล์จุลชีพ เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถกำจัดสิ่งอุดตันได้ทั้งบริเวณผิวด้านนอกของท่อและภายในผนังท่อซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Van Halem และคณะ (2009) ที่ศึกษาวิธีทำความสะอาดเมมเบรนเพื่อกรองน้ำดื่ม

4.3 การศึกษารูปแบบการจัดเรียงท่อยึดหยุ่นในถังเติมอากาศ

จากการศึกษาตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสารและอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศในหัวข้อการทดลองข้างต้นซึ่งเป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการโดยเติมอากาศในถังขนาดเล็ก การทดลองในหัวข้อนี้จึงได้ศึกษาตัวแปรดังกล่าวในถังเติมอากาศขนาดใหญ่ (ปริมาตรน้ำ 2,000 ลิตร) เพื่อศึกษาแนวทางการประยุกต์ใช้ท่อยึดหยุ่นเป็นอุปกรณ์เติมอากาศแบบท่อในด้านรูปแบบการจัดเรียงท่อที่เหมาะสมในถังเติมอากาศ โดยกำหนดเป็น 4 รูปแบบที่สนใจศึกษาโดยแต่ละรูปแบบใช้ท่อยึดหยุ่นยาว 7.5 ม. ดังแสดงในรูปที่ 4.52



รูปแบบที่ 1



รูปแบบที่ 2



รูปแบบที่ 3



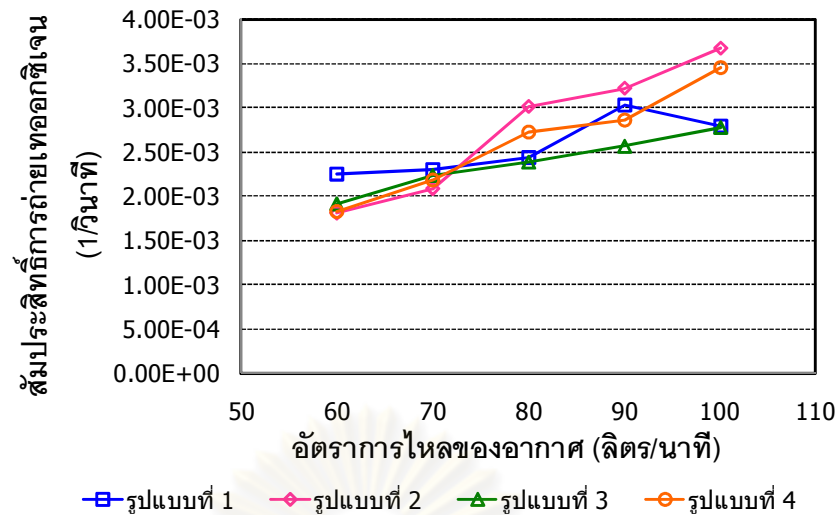
รูปแบบที่ 4

รูปที่ 4.52 รูปแบบการจัดเรียงท่อยึดหยุ่น

การทดลองในหัวข้อนี้ประกอบไปด้วยการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และการวิเคราะห์ฟังก์ชันการกระจายระยะเวลาที่เก็บ (Residence Time Distribution, RTD) เพื่อพิจารณารูปแบบการจัดเรียงท่อที่เหมาะสมทั้งด้านประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนและประสิทธิภาพเชิงพลังงาน โดยมีรายละเอียดดังนี้

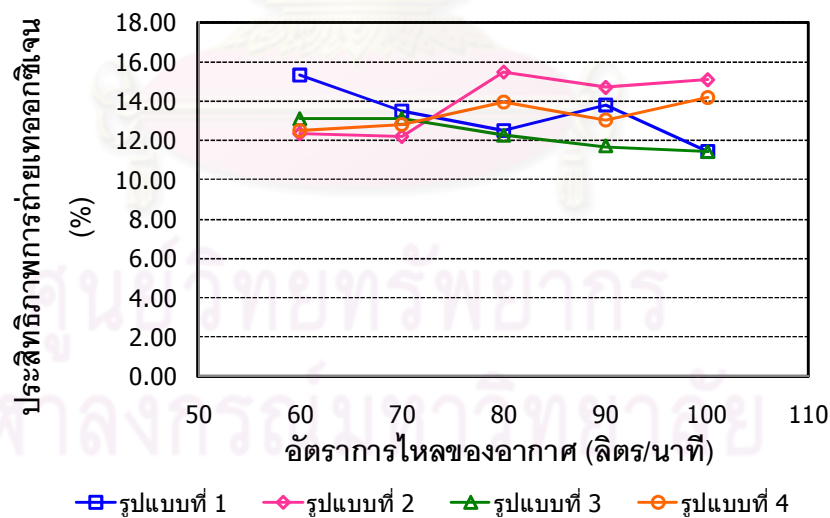
4.3.1 การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน

การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในหัวข้อนี้ได้ทำการเติมอากาศในถังขนาด 2,500 ลิตร (ปริมาตรน้ำ 2,000 ลิตร) โดยใช้ท่อยึดหยุ่นตัวอย่างที่ 6.3 เป็นอุปกรณ์เติมอากาศจัดเรียงเป็นรูปแบบตามที่กำหนด เติมอากาศด้วยอัตราการไหลในช่วง 60 ถึง 100 ลิตร/นาที เปรียบเทียบรูปแบบที่เหมาะสมโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน และอัตราการถ่ายเทออกซิเจน

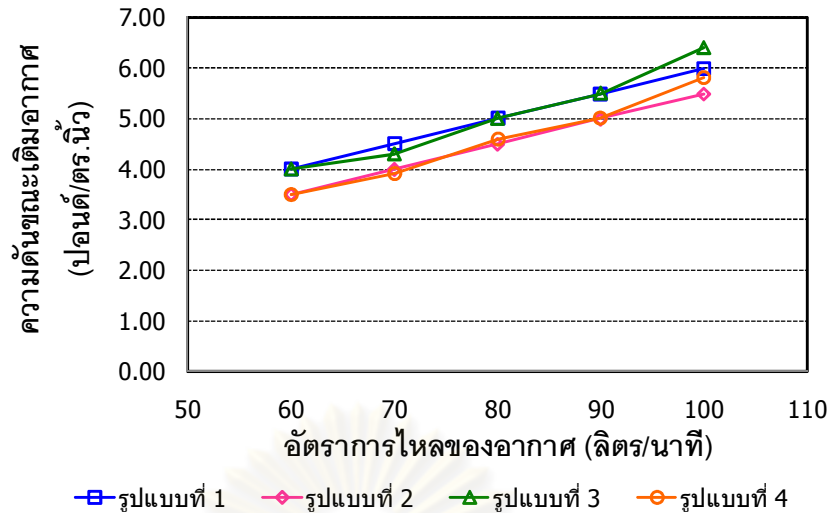


รูปที่ 4.53 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศของการจัดเรียงท่อยัดหยุ่นรูปแบบต่างๆ

จากรูปที่ 4.53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศของการจัดเรียงท่อยัดหยุ่นรูปแบบต่างๆ พบว่า รูปแบบที่ 2 มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมากที่สุดโดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 1.81×10^{-3} เป็น 3.68×10^{-3} 1/วินาที และเมื่อคำนวณเป็นประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนจึงมีค่ามากที่สุดตามไปด้วย คือร้อยละ 12.36 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 15.08 ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 60 ถึง 100 ลิตร/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.54

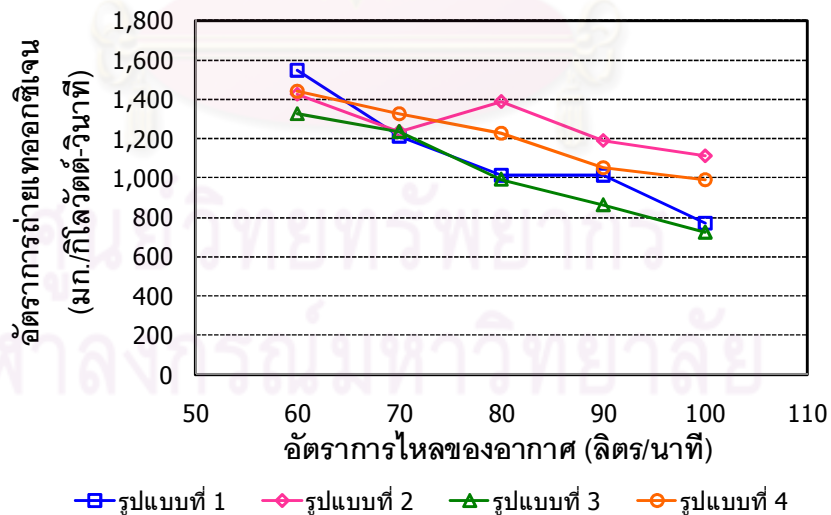


รูปที่ 4.54 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศของการจัดเรียงท่อยัดหยุ่นรูปแบบต่างๆ



รูปที่ 4.55 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันขณะเติมอากาศและอัตราการไหลของอากาศของการจัดเรียงท่อยึดหุ่นรูปแบบต่างๆ

จากรูปที่ 4.55 เมื่อพิจารณาค่าความดันขณะเติมอากาศ พบว่า รูปแบบที่ 2 และ 4 มีค่าความดันน้อยกว่ารูปแบบอื่นๆ คือ 3.50 เพิ่มขึ้นเป็น 5.50 ปอนด์/ตร.นิ้ว ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 60 ถึง 100 ลิตร/นาทึ่ เนื่องจากช่วงความยาวของท่อยึดหุ่นในแต่ละสาขาสั้นกว่ารูปแบบอื่นๆ คือ 0.47 ม. (สำหรับรูปแบบที่ 2) และ 0.62 ม. (สำหรับรูปแบบที่ 4) ในขณะที่รูปแบบที่ 1 และ 3 เกิดจากการจัดเรียงท่อที่ยาว 7.5 ม. จึงมีค่าความดันมากกว่า



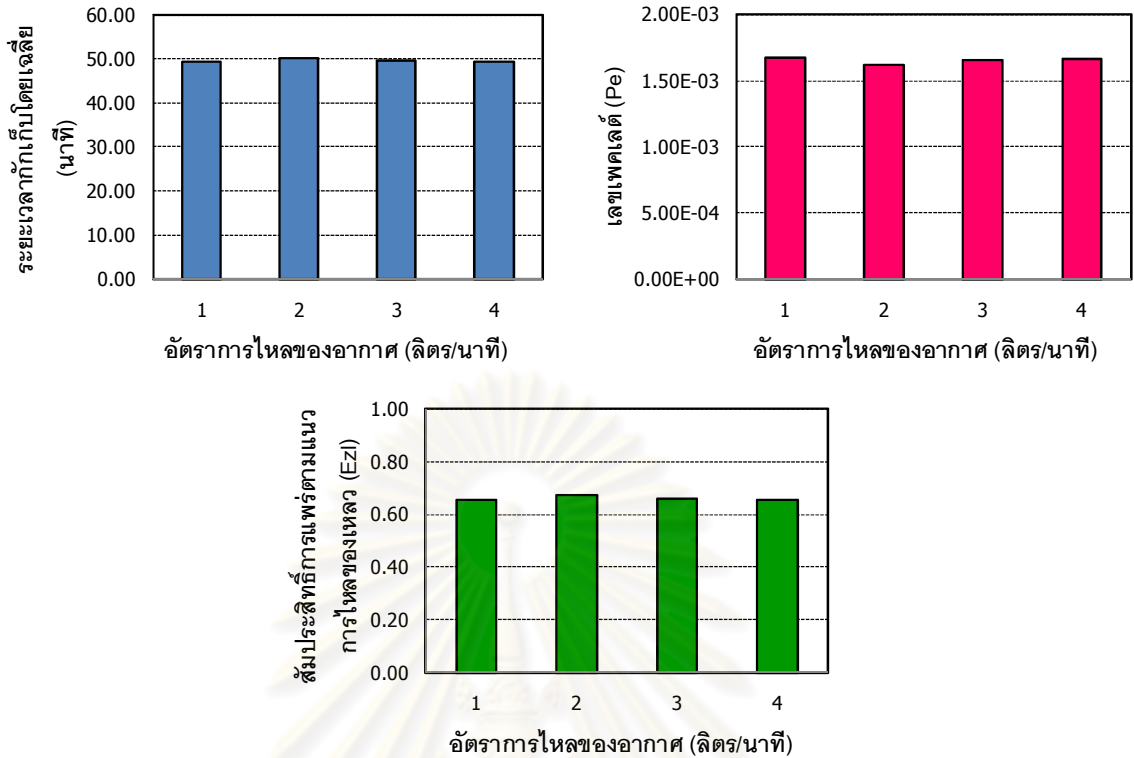
รูปที่ 4.56 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศของการจัดเรียงท่อยึดหุ่นรูปแบบต่างๆ

จากรูปที่ 4.56 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศของการจัดเรียงท่อยึดหุ่นรูปแบบต่างๆ พบว่า รูปแบบที่ 2 มีค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนมากที่สุดคือ 1,430 มีแนวโน้มลดลงเป็น 1,110 มก./กิโลวัตต์-วินาที ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 60 ถึง 100 ลิตร/นาที่ เนื่องจากเป็นรูปแบบที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมากที่สุด ประกอบกับใช้ค่าความดันขณะเต็มอากาศน้อยที่สุด จึงมีประสิทธิภาพเชิงพลังงานมากที่สุด

จากการทดลองในหัวข้อนี้สรุปได้ว่า การจัดเรียงท่อยึดหุ่นรูปแบบที่ 2 ในถังเต็มอากาศมีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากเป็นรูปแบบที่มีความสมมาตรสามารถกระจายฟองอากาศได้สม่ำเสมอ จึงมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูงซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอุปกรณ์ชนิดท่อพลาสติก เพอร์ฟอเรทเมมเบรน เจ็ท หรือชนิดไม่มีรูพรุน (ดังแสดงในภาคผนวก ข-6) โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองที่ความลึกของน้ำเท่ากับ 1.3 ม. อย่างไรก็ตาม ถ้าเพิ่มความลึกของน้ำเป็น 4.5 ม. ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเช่นกันจนมีค่าเทียบเท่ากับอุปกรณ์ชนิดอื่นที่มีประสิทธิภาพสูงได้ ประกอบกับท่อในแต่ละสาขามีความยาวเท่ากันและสั้นกว่ารูปแบบอื่นๆ ทำให้ใช้ความดันขณะเต็มอากาศน้อยกว่ารูปแบบอื่นๆตามไปด้วย จึงมีอัตราการถ่ายเทออกซิเจนสูงซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพเชิงพลังงานที่สูงเช่นกัน โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้ท่อยึดหุ่นยาว 7.5 ม. ต่อพื้นที่ก้นถังเต็มอากาศ 1.33 ตร.ม.

4.3.2 ฟังก์ชันการกระจายเรติเนชันไทม์ (Retention Time Distribution, RTD)

การวิเคราะห์ฟังก์ชันการกระจายเวลากักน้ำในหัวข้อนี้ได้ศึกษาโดยการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นเทรเซอร์ (Tracer) แบบพัลส์ (Pulse) ที่ผิวน้ำในถังเต็มอากาศขนาด 2,500 ลิตร (ปริมาตรน้ำประมาณ 2,000 ลิตร) มีน้ำประปาไหลเข้าที่ก้นถังด้วยอัตราการไหล 45 ลิตร/นาที่ และมีท่อรับน้ำล้นที่ผิวน้ำด้านบนฝั่งตรงข้ามกับจุดเติมสาร ใช้ท่อยึดหุ่นที่ถูกจัดเรียงเป็นรูปแบบต่างๆ ดังรูปที่ 4.52 เติมอากาศด้วยอัตราการไหล 70 ลิตร/นาที่ จับเวลาพร้อมกับวิเคราะห์ค่าความนำไฟฟ้า ณ จุดน้ำล้นโดยเครื่องวัดความนำไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์รูปแบบการไหล (Flow pattern) และการกวนผสม (Mixing) ที่เกิดจากอุปกรณ์เติมอากาศรูปแบบต่างๆ โดยการคำนวณระยะเวลาที่กักเก็บโดยเฉลี่ย (Average residence time, \bar{t}) เลขเพคเลต (Peclet number, Pe) และสัมประสิทธิ์การแพร่ตามแนวการไหล (Liquid axial dispersion coefficient, Ezi) ตามสมการที่ 3.1 ถึง 3.4 เพื่ออธิบายถึงระดับความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นจากการเติมอากาศโดยท่อยึดหุ่นที่ถูกจัดเรียงเป็นรูปแบบตามที่กำหนด ผลการวิเคราะห์มีรายละเอียดดังนี้



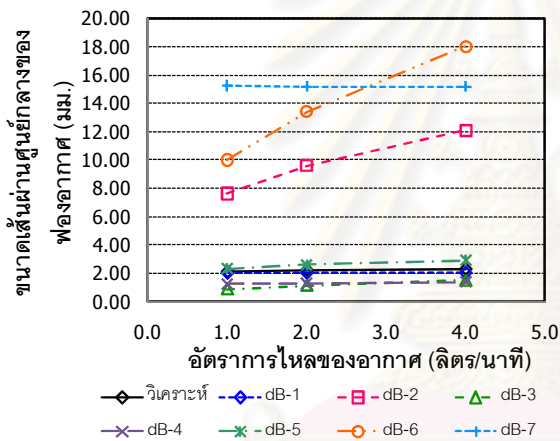
รูปที่ 4.57 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ฟังก์ชันการกระจายเวลากักน้ำ

จากรูปที่ 4.57 แสดงผลการเปรียบเทียบระยะเวลาที่เก็บโดยเฉลี่ย พบว่า มีค่าใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วง 49.35 ถึง 50.47 นาที แสดงถึงการจัดเรียงท่อแบบต่างๆทำให้เกิดความปั่นป่วนได้ใกล้เคียงกัน แต่ระยะเวลาที่เก็บโดยเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎีคือ 56.29 นาที แสดงว่าเกิดการไหลลัดวงจร (Short circuit) เนื่องจากการเติมสารที่ผิวน้ำซึ่งใกล้กับจุดน้ำต้น อย่างไรก็ตาม เมื่อคำนวณเลขเพคเลตต์และสัมประสิทธิ์การแพร่ตามแนวการไหลของเหลว พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน เช่นเดียวกัน ซึ่งเลขเพคเลตต์ที่มีค่าเข้าใกล้ศูนย์แสดงว่ารูปแบบการไหลภายในถังเป็นแบบกวนผสมสมบูรณ์ (Completely mixed flow) ดังนั้น การจัดเรียงท่อที่ยืดหยุ่นตามแบบที่กำหนดสามารถทำให้เกิดการปั่นป่วนระดับเดียวกันในถังเติมอากาศ คือ ทำให้รูปแบบการไหลของน้ำเป็นแบบกวนผสมสมบูรณ์ การพิจารณาเลือกรูปแบบการจัดเรียงที่เหมาะสมจึงพิจารณาจากประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนและประสิทธิภาพเชิงพลังงานคือรูปแบบที่ 2 ตามผลการทดลองหัวข้อที่ 4.3.1 อย่างไรก็ตาม แนวทางการวิเคราะห์ฟังก์ชันการกระจายเรซินใหม่ น่าจะเป็นประโยชน์สำหรับการพิจารณารูปแบบการไหลของน้ำในถังเติมอากาศของระบบที่แตกต่างกัน ในกรณีที่ถังเติมอากาศมีขนาดใหญ่รูปแบบการวางอุปกรณ์เติมอากาศที่หลากหลาย รวมถึงการเดินระบบด้วยอัตราการไหลของน้ำและอากาศที่แตกต่างกันออกไปซึ่งอาจทำให้เกิดความแตกต่างของฟังก์ชันการกระจาย และทำให้สามารถอธิบายกลไกที่เกิดขึ้นได้ รวมถึงออกแบบและประยุกต์ใช้ระบบกับกระบวนการเติมอากาศได้อย่างเหมาะสม

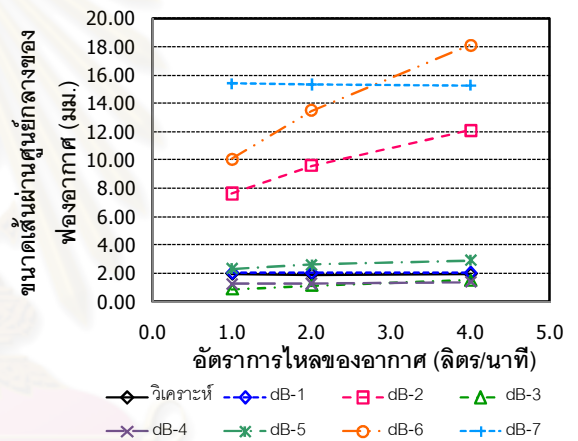
4.4 การทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน

การทดลองในหัวข้อนี้ประกอบไปด้วยการทำนายค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (d_B) ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (U_B) พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำ (a) สัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว (k_L) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ($k_L a$) โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ถึง 2.7 เพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ และนำเสนอแบบจำลองที่เหมาะสมในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน สำหรับท่อยืดหยุ่นและสภาวะการเติมอากาศที่กำหนดในงานวิจัยนี้ โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศ ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสมบัติทางกายภาพของท่อยืดหยุ่นและสมบัติของน้ำ ทำนายขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้น หลังจากนั้นจึงใช้เป็นตัวแปรหลักในการทำนายค่าตัวแปรอื่นๆ จนกระทั่งสามารถทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนได้ โดยมีรายละเอียดดังนี้

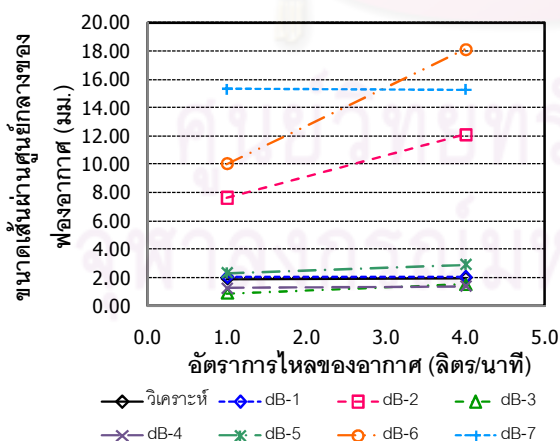
4.4.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (d_B)



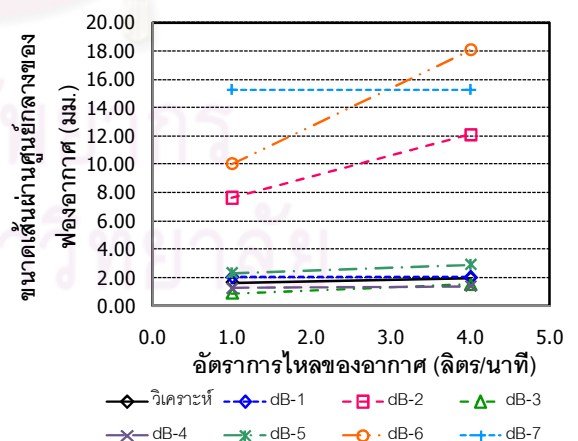
1.) น้ำประปา



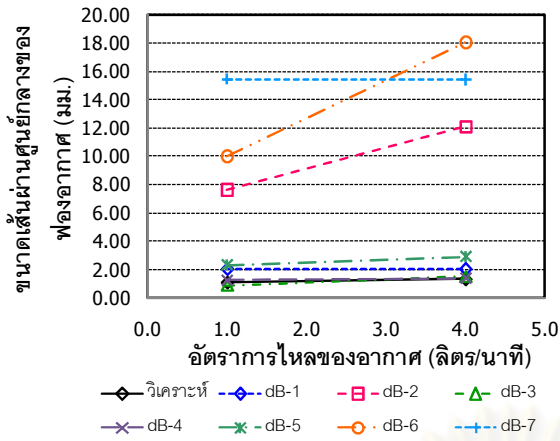
2.) ดินขาว 50 มก./ลิตร



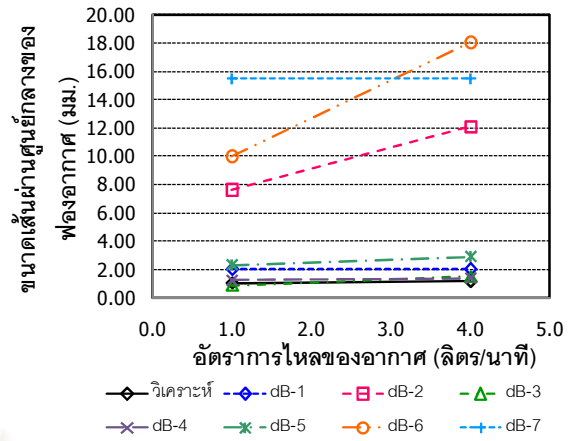
3.) ดินขาว 100 มก./ลิตร



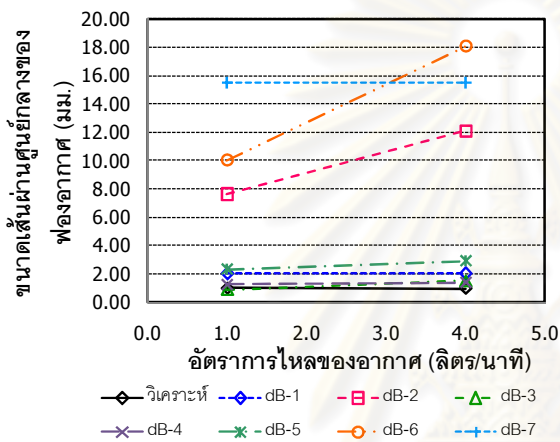
4.) ดินขาว 200 มก./ลิตร



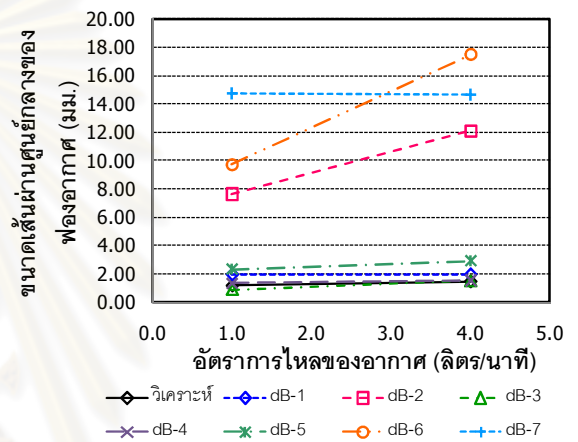
5.) เกลือ 7,500 มก./ลิตร



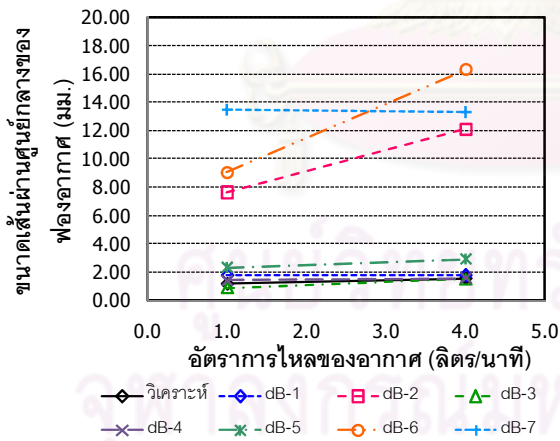
6.) เกลือ 20,000 มก./ลิตร



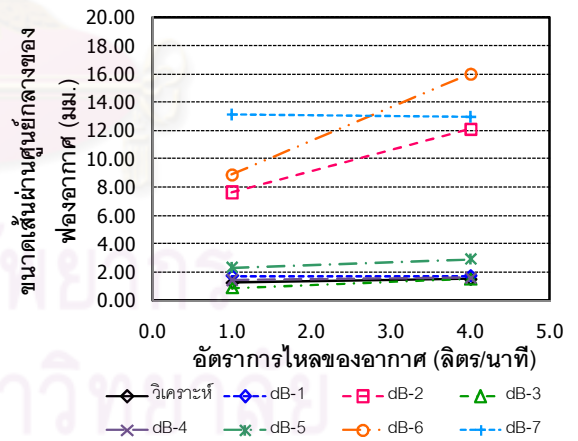
7.) เกลือ 35,000 มก./ลิตร



8.) เซลล์จุลชีพ 1,000 มก./ลิตร



9.) เซลล์จุลชีพ 2,000 มก./ลิตร



10.) เซลล์จุลชีพ 3,000 มก./ลิตร

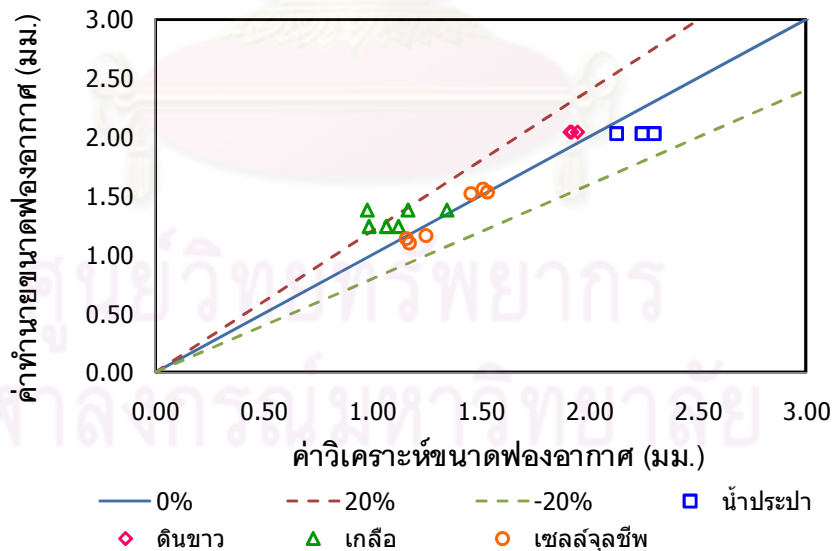
รูปที่ 4.58 กราฟแสดงผลการทำนายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ

จากรูปที่ 4.58 แสดงผลการทำนายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ พบว่า สารเจือปนแต่ละชนิดส่งผลต่อกลไกการถ่ายเทออกซิเจนที่แตกต่างกัน (ดังแสดงในผลการทดลองที่ 4.2.1 และ 4.2.2) จึงทำให้การเลือกใช้สมการที่เหมาะสมในการทำนายแตกต่างกัน

กันด้วย โดยพิจารณาเลือกสมการที่ให้ผลทำนายมีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลวิเคราะห์มากที่สุด พบว่าน้ำที่ถูกเจือปนด้วยดินขาวมีสมบัติของน้ำไม่แตกต่างไปจากน้ำประปามากนัก (ดังตารางที่ 4.3) จึงใช้สมการเดียวกันในการทำนายขนาดฟองอากาศ คือ สมการ d_B-1 สำหรับในน้ำเกลือเลือกสมการ d_B-4 แต่สำหรับน้ำที่ถูกเจือปนด้วยเซลล์จุลชีพพบว่าไม่สามารถเลือกใช้สมการใดสมการหนึ่งในการทำนายได้ เมื่อพิจารณาแนวโน้มของค่าวิเคราะห์พบว่าอยู่ในช่วงระหว่างสมการ d_B-3 และ d_B-4 ซึ่งมีความสัมพันธ์กันสมบัติของน้ำและความดันขณะเติมอากาศ (เกี่ยวข้องกับสมบัติทางกายภาพของอุปกรณ์เติมอากาศ) จึงเลือกใช้ค่าเฉลี่ยจากสมการทั้งในการทำนายขนาดฟองอากาศ ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับทำนายขนาดฟองอากาศ

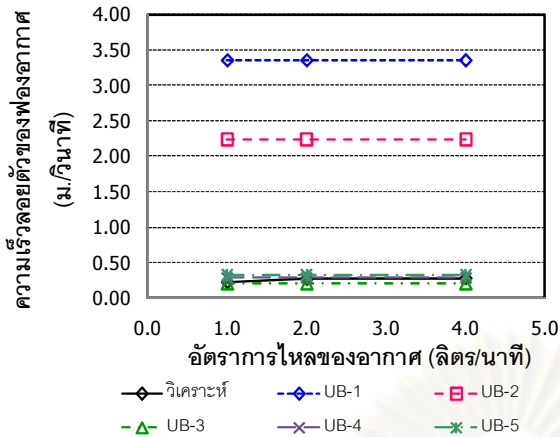
ลักษณะน้ำ	สมการ		อ้างอิง
น้ำประปา	d_B-1	$d_B = \left[\frac{6 \times d_{OR} \times \sigma \times g_c}{g \times \Delta\rho} \right]^{1/3}$	Krevelen และคณะ (1959)
ดินขาว			
เกลือ	d_B-4	$d_B = 7.1 \times 10^{-4} \times \Delta P^{0.328}$	Hebrard (1995)
เซลล์จุลชีพ	$\frac{(d_B - 3) + (d_B - 4)}{2}$	$d_B - 3 = \left[\frac{72 \times \rho_L}{\pi^2 \times g \times \Delta\rho} \right]^{1/5} \times Q_{go}^{0.4}$	Krevelen และคณะ (1959)
		$d_B - 4 = 7.1 \times 10^{-4} \times \Delta P^{0.328}$	Hebrard (1995)



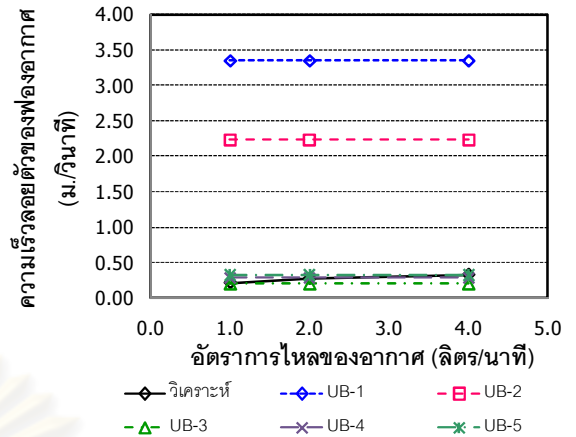
รูปที่ 4.59 กราฟแสดงความแม่นยำของผลทำนายขนาดฟองอากาศ

จากรูปที่ 4.59 เมื่อทำนายขนาดฟองอากาศโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงในตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบกับค่าที่วิเคราะห์ได้ พบว่ามีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 20 เป็นส่วนใหญ่จึงใช้ค่าขนาดฟองอากาศที่ทำนายได้เป็นตัวแปรหลักในการทำนายค่าตัวแปรอื่น ๆ ต่อไป

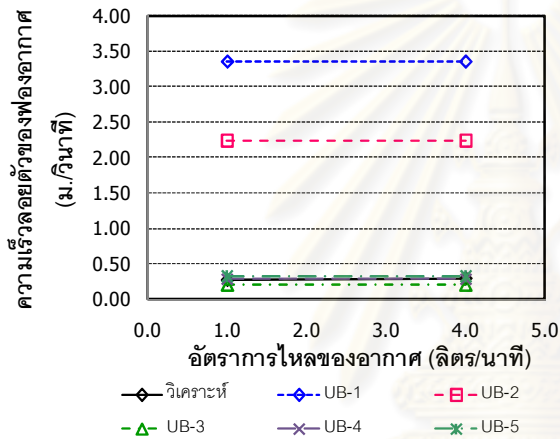
4.4.2 ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (U_B)



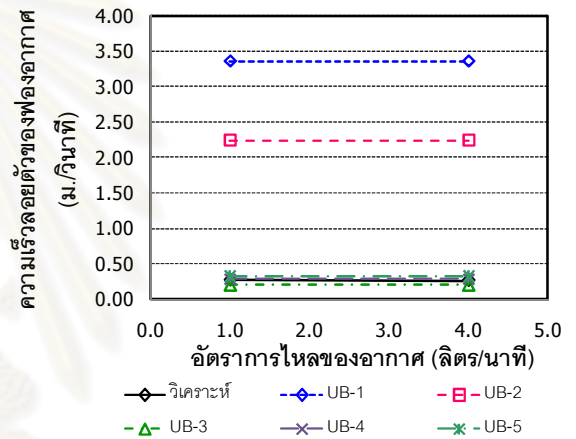
1.) น้ำประปา



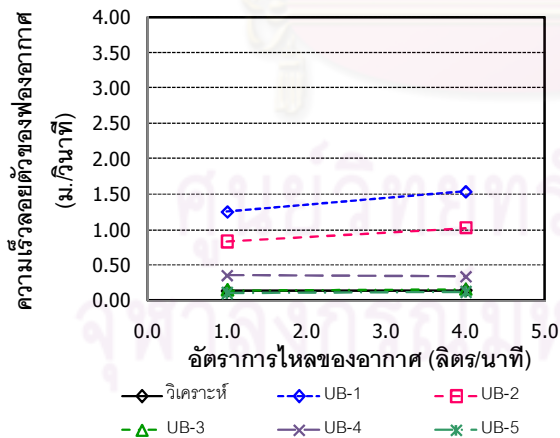
2.) ดินขาว 50 มก./ลิตร



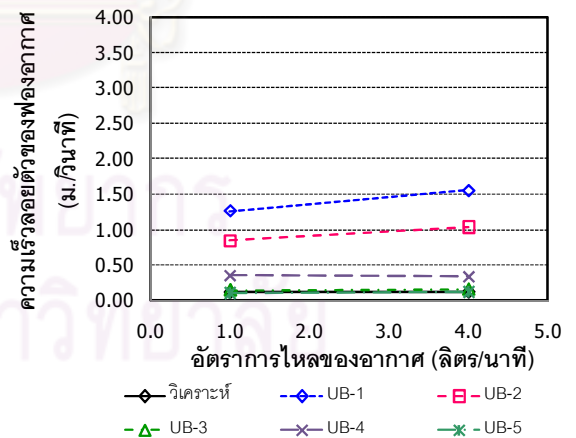
3.) ดินขาว 100 มก./ลิตร



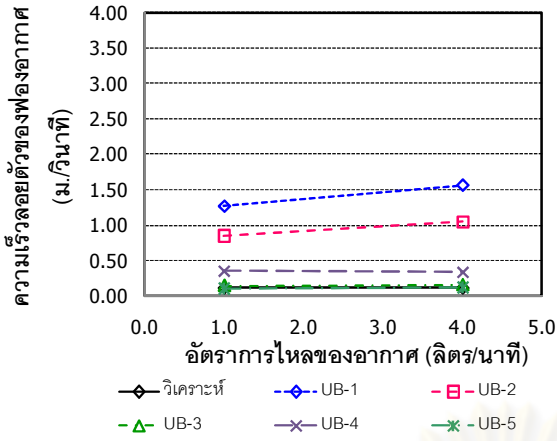
4.) ดินขาว 200 มก./ลิตร



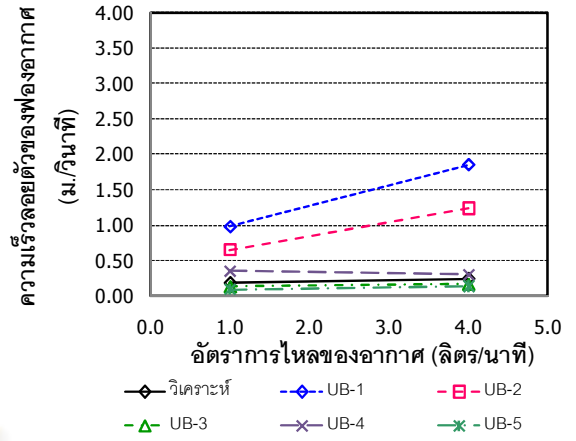
5.) เกือบ 7,500 มก./ลิตร



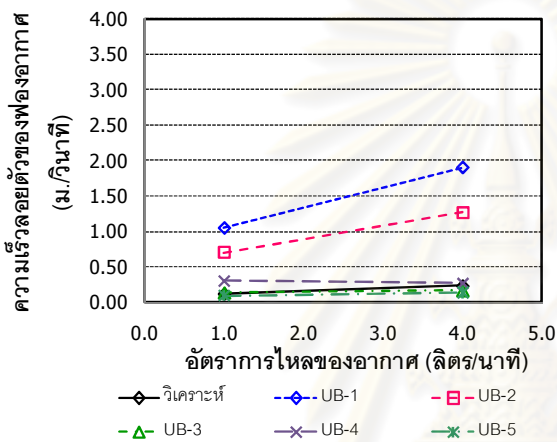
6.) เกือบ 20,000 มก./ลิตร



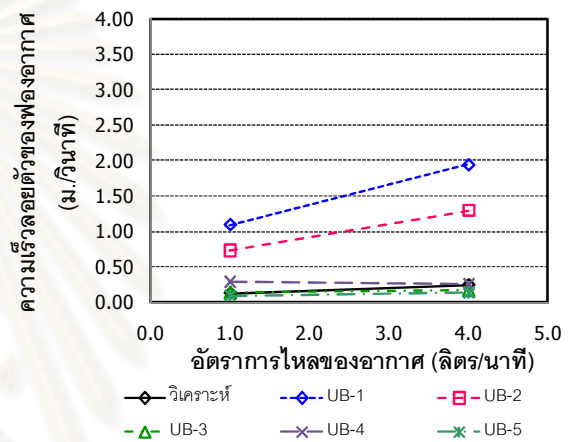
7.) เกลือ 35,000 มก./ลิตร



8.) เซลล์จุลชีพ 1,000 มก./ลิตร



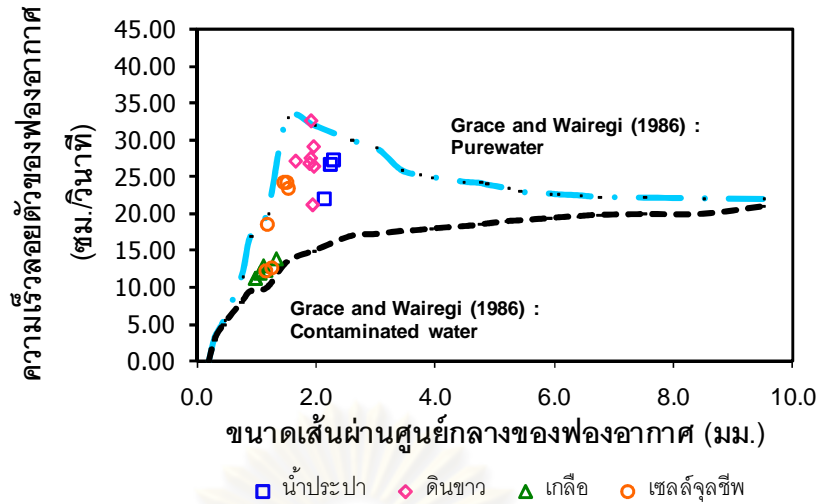
9.) เซลล์จุลชีพ 2,000 มก./ลิตร



10.) เซลล์จุลชีพ 3,000 มก./ลิตร

รูปที่ 4.60 กราฟแสดงผลการทำนายความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ

จากรูปที่ 4.60 แสดงผลการทำนายความเร็วลอยตัวของฟองอากาศเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ พบว่า ในน้ำประปาและน้ำที่ถูกเจือปนด้วยดินขาวสามารถใช้สมการ U_{B-4} ทำนายค่าได้ ในขณะที่ในน้ำเกลือสามารถอ่านค่าได้จากกราฟของ Grace และ Wairegi (1986) (สมการที่ U_{B-5}) โดยอ่านค่าจากสภาวะน้ำที่ถูกปนเปื้อน (Contaminated water) ดังแสดงในรูปที่ 4.61



รูปที่ 4.61 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลอยตัวของฟองอากาศกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ โดย Grace และ Wairegi (1986)

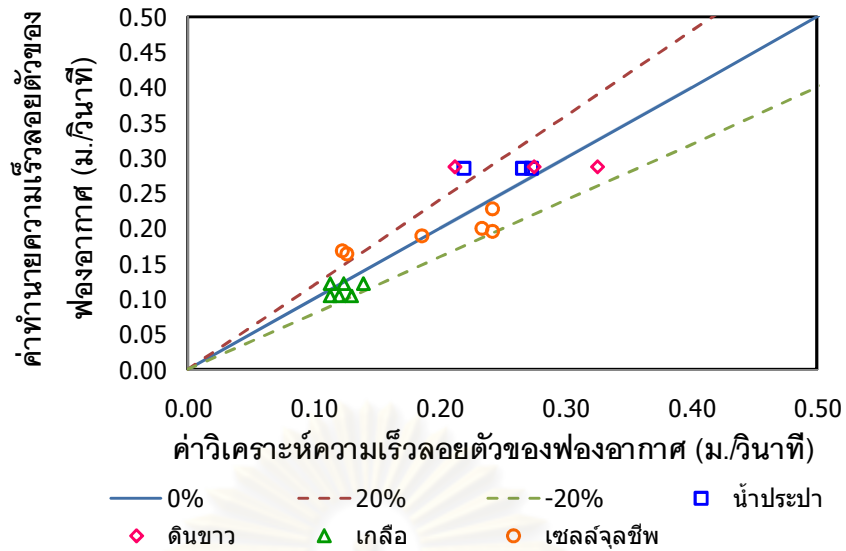
แต่สำหรับน้ำที่ถูกเจือปนด้วยเซลล์จุลชีพพบว่าไม่สามารถใช้สมการใดสมการหนึ่งทำนายค่าได้ จึงใช้วิธีนำผลการทำนายจากสมการ U_B-4 ปรับแก้ค่าโดยอัตราส่วนระหว่างขนาดฟองอากาศในน้ำที่ถูกเจือปนด้วยเซลล์จุลชีพกับในน้ำประปา ดังแสดงในสมการ

$$U_B = \frac{d_{B-Actual}}{d_{B-Water}} \times (U_B - 4) \tag{4.1}$$

เมื่อ $d_{B-Actual}$ และ $d_{B-Water}$ คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศในน้ำที่ถูกเจือปนด้วยเซลล์จุลชีพและในน้ำประปา ตามลำดับ

ตารางที่ 4.8 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับทำนายความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ

ลักษณะน้ำ	สมการ	อ้างอิง
น้ำประปา	$U_B = \left[\frac{2\sigma}{d_B \times \rho} + 0.5d_B \times g \right]^{0.5}$	Mendelson (1967)
ดินขาว		
เกลือ	U_B-5	-
เซลล์จุลชีพ	$U_B - 4 = \left[\frac{2\sigma}{d_B \times \rho} + 0.5d_B \times g \right]^{0.5}$	Mendelson (1967)

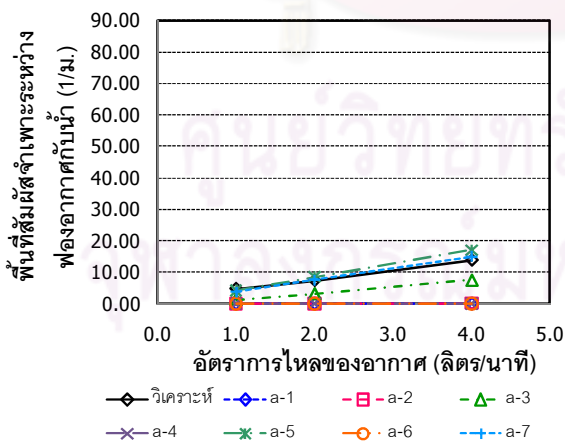


รูปที่ 4.62 กราฟแสดงความแม่นยำของผลทำนายความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ

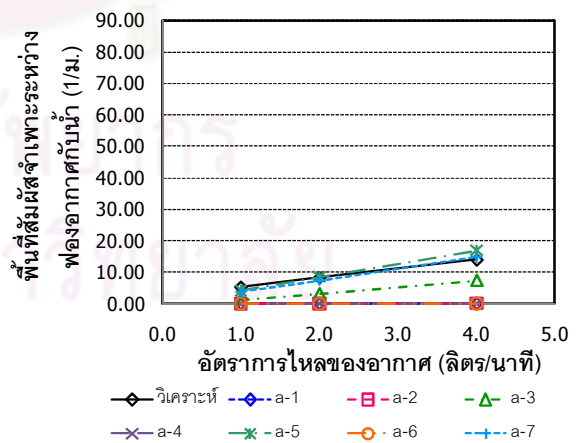
จากรูปที่ 4.62 เมื่อทำนายความเร็วลอยตัวของฟองอากาศโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงในตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบกับค่าที่วิเคราะห์ได้ พบว่ามีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 20 จึงใช้ค่าความเร็วลอยตัวของฟองอากาศที่ทำนายได้ประกอบการทำนายตัวแปรอื่นๆต่อไป

4.4.3 พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำ (a)

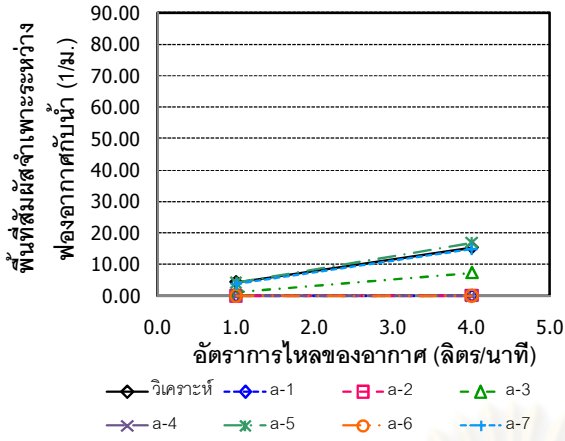
เนื่องจากการคำนวณพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำได้ใช้สมการที่ 2.26 ซึ่งเป็นสมการเดียวกับสมการ a-7 (Painmanakul และคณะ, 2004) เมื่อเปรียบเทียบกับการทำนายโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อื่นๆจึงมีความแม่นยำมากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.63



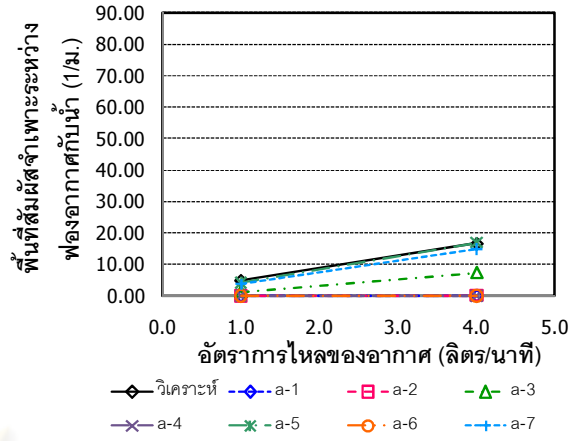
1.) น้ำประปา



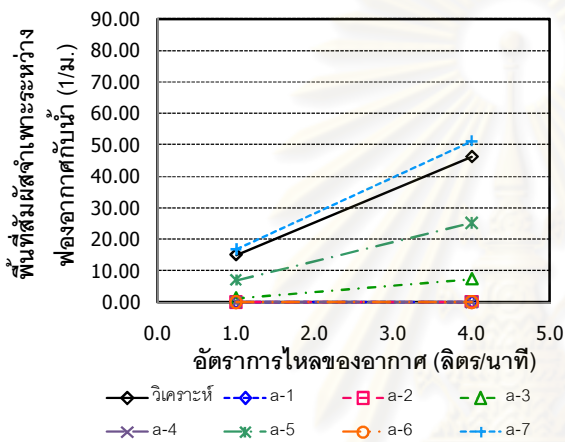
2.) ดินขาว 50 มก./ลิตร



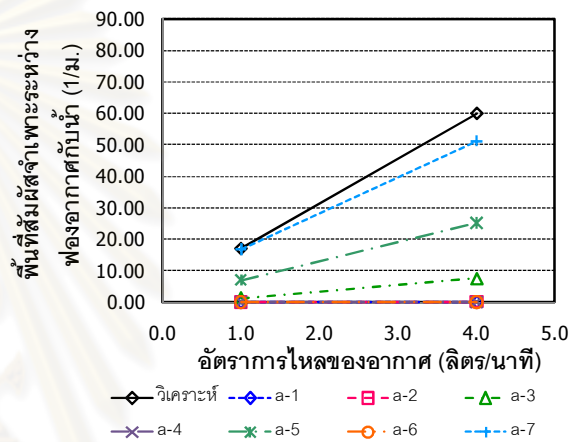
3.) ดินขาว 100 มก./ลิตร



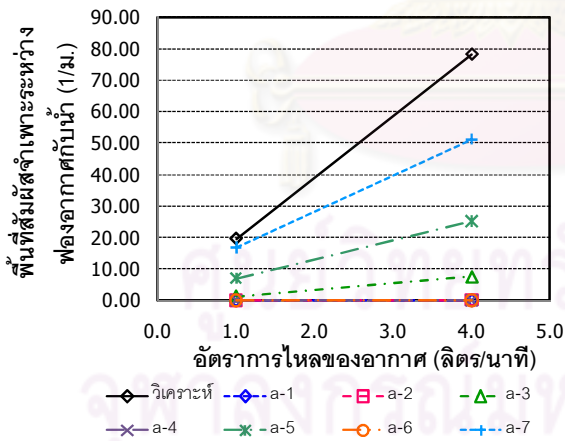
4.) ดินขาว 200 มก./ลิตร



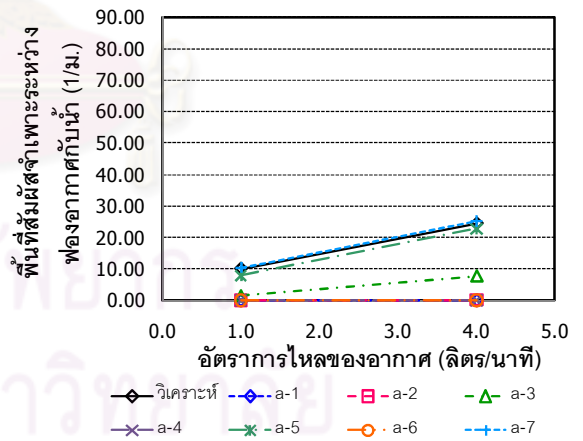
5.) เกือบ 7,500 มก./ลิตร



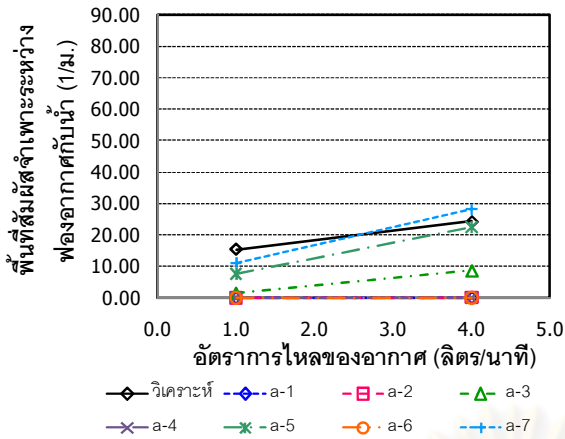
6.) เกือบ 20,000 มก./ลิตร



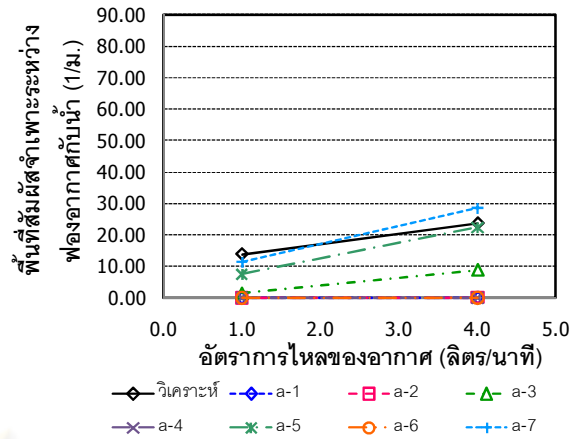
7.) เกือบ 35,000 มก./ลิตร



8.) เซลล์จุลชีพ 1,000 มก./ลิตร

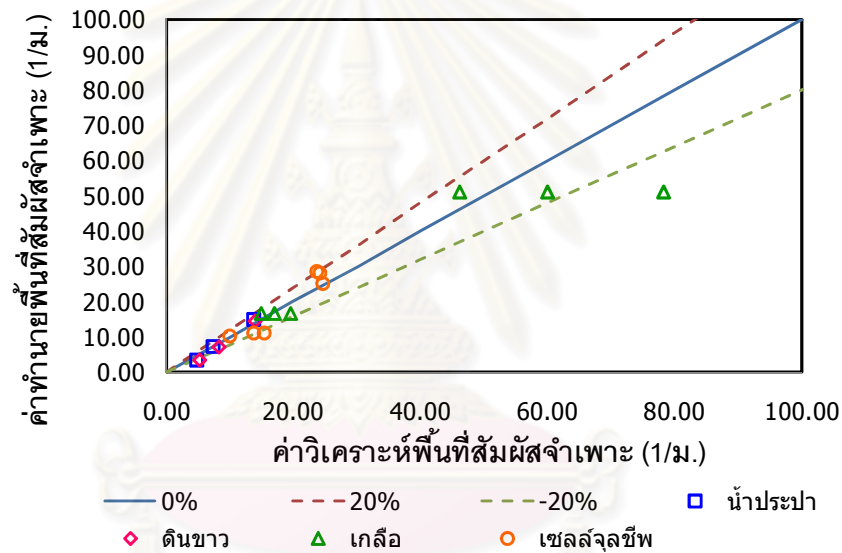


9.) เซลล์จุลชีพ 2,000 มก./ลิตร



10.) เซลล์จุลชีพ 3,000 มก./ลิตร

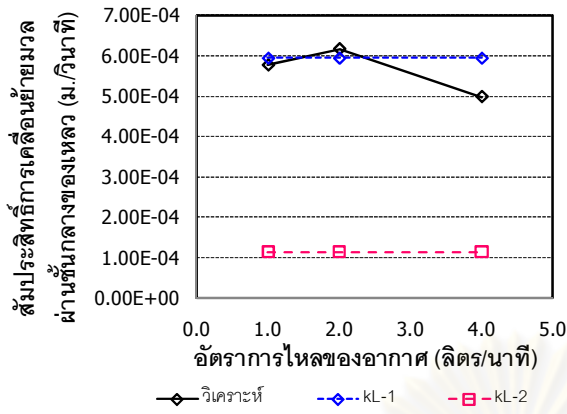
รูปที่ 4.63 กราฟแสดงผลการทำนายพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำ



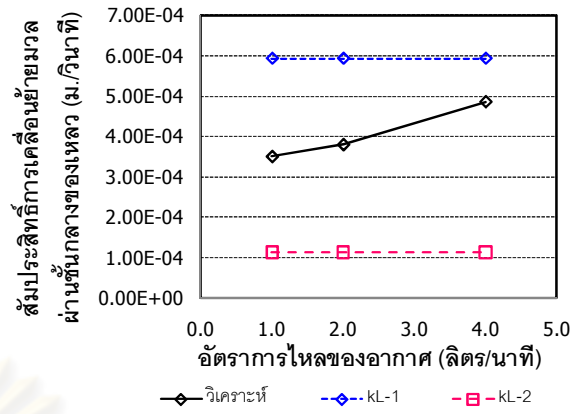
รูปที่ 4.64 กราฟแสดงความแม่นยำของผลทำนายพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำ

จากรูปที่ 4.64 เมื่อทำนายพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำโดยสมการ a-7 เปรียบเทียบกับค่าที่วิเคราะห์ได้ พบว่ามีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 20 จึงใช้ค่าดังกล่าวที่ทำนายได้ประกอบการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนต่อไป

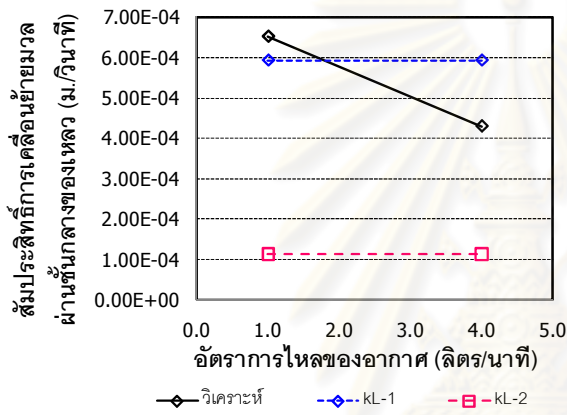
4.4.4 สัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว (k_L)



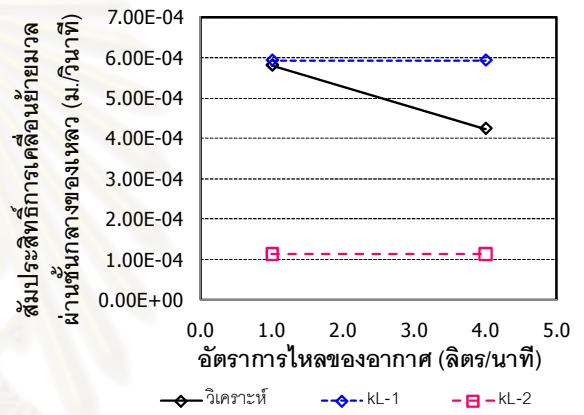
1.) น้ำประปา



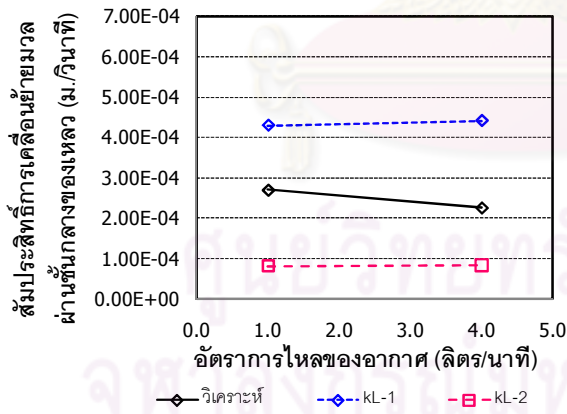
2.) ดินขาว 50 มก./ลิตร



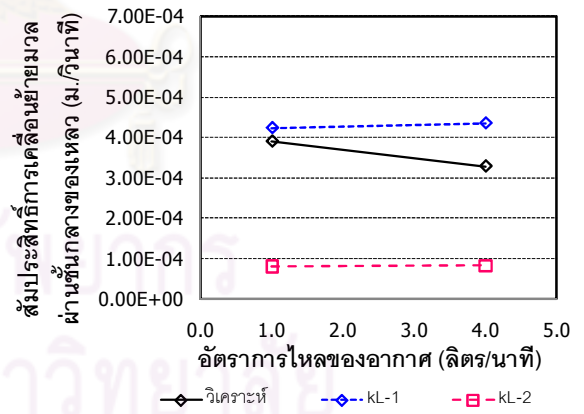
3.) ดินขาว 100 มก./ลิตร



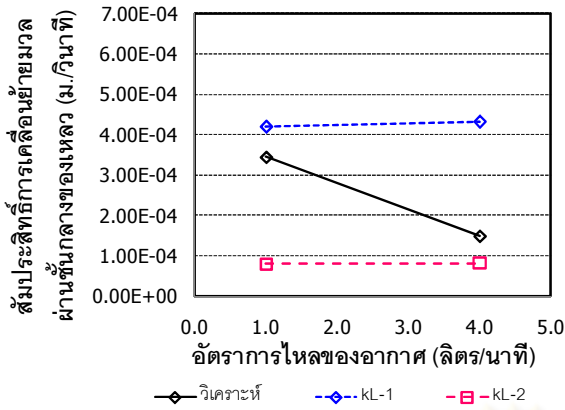
4.) ดินขาว 200 มก./ลิตร



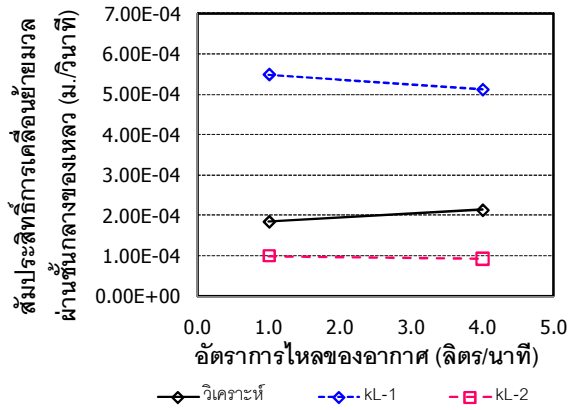
5.) เกือบ 7,500 มก./ลิตร



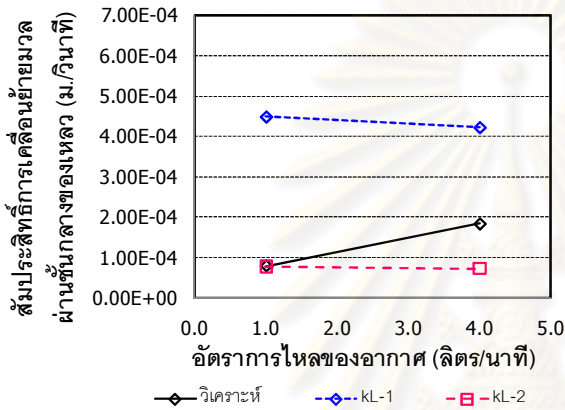
6.) เกือบ 20,000 มก./ลิตร



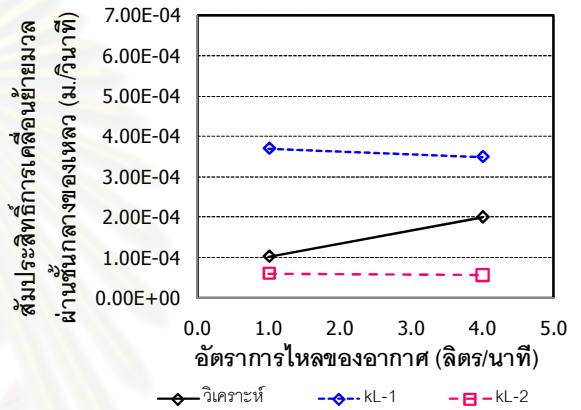
7.) เกลือ 35,000 มก./ลิตร



8.) เซลล์จุลชีพ 1,000 มก./ลิตร



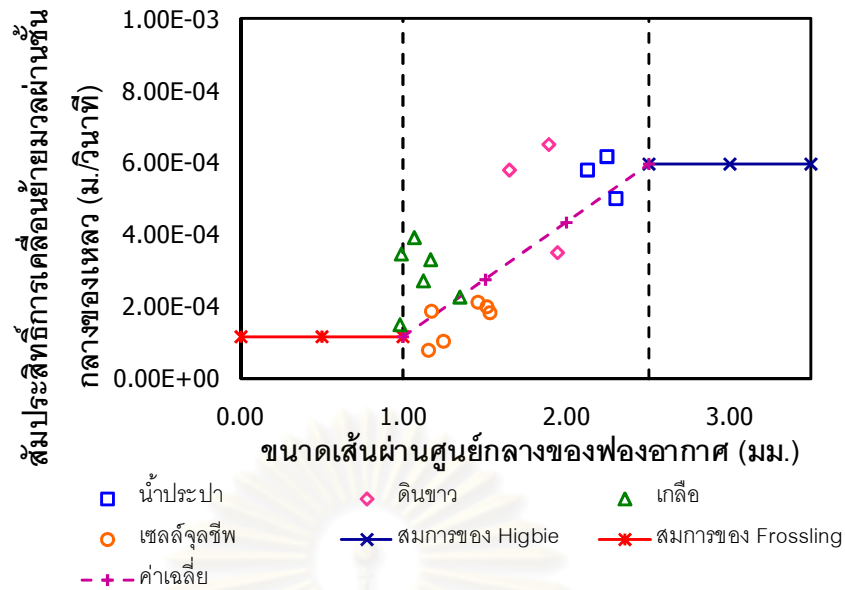
9.) เซลล์จุลชีพ 2,000 มก./ลิตร



10.) เซลล์จุลชีพ 3,000 มก./ลิตร

รูปที่ 4.65 กราฟแสดงผลการทำนายสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว

จากรูปที่ 4.65 แสดงผลการทำนายสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวเปรียบเทียบกับค่าที่วิเคราะห์ พบว่า แนวโน้มของค่าวิเคราะห์อยู่ในช่วงกึ่งกลางระหว่างผลทำนายโดยสมการทั้งสองทำให้ไม่สามารถใช้สมการใดสมการหนึ่งในการทำนายค่าได้ จึงมีความจำเป็นต้องมีการปรับแก้ค่า โดยงานวิจัยของ Painmanakul และคณะ (2004) พบว่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวมีความสัมพันธ์กับขนาดฟองอากาศ โดยที่สมการของ Frossling (Roustan, 2003) สามารถทำนายค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวในช่วงต่ำและมีความแม่นยำเมื่อฟองอากาศมีขนาดเล็กกว่า 1.0 มม. ในขณะที่สมการของ Higbie (Roustan, 2003) สามารถทำนายค่าได้ในช่วงสูงและมีความแม่นยำเมื่อฟองอากาศมีขนาดใหญ่กว่า 2.5 มม. แต่ฟองอากาศในงานวิจัยนี้มีขนาดอยู่ในช่วง 1.0 ถึง 2.5 มม. เป็นส่วนใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 4.66



รูปที่ 4.66 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ

จากรูปที่ 4.66 แสดงให้เห็นว่าขนาดฟองอากาศในงานวิจัยนี้อยู่ในช่วง 1.0 ถึง 2.5 มม. ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยที่คำนวณได้จากสมการของ Frossling และ Higbie ดังนั้นการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวจึงใช้วิธีเฉลี่ยและปรับแก้ค่าโดยอัตราส่วนของขนาดฟองอากาศ ดังแสดงในสมการ

$$k_L = \frac{(k_L - 1) - (k_L - 2)}{d_{B-\text{Max}} - d_{B-\text{min}}} \times (d_B - d_{B-\text{Min}}) + (k_L - 2) \quad (4.2)$$

$$k_L = \frac{(k_L - 1) + (k_L - 2)}{2} \quad (4.3)$$

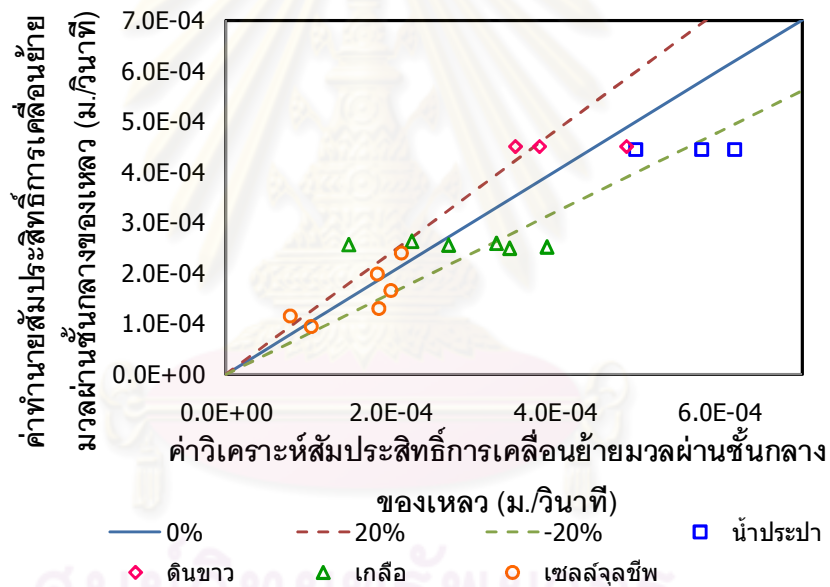
เมื่อ $d_{B-\text{Max}}$ และ $d_{B-\text{Min}}$ มีค่าเท่ากับ 2.5 และ 1.0 มม. ตามลำดับ d_B คือขนาดฟองอากาศในสภาวะการเติมอากาศนั้นๆ โดยสมการที่ 4.2 ใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวในน้ำประปาและน้ำที่ถูกเจือปนด้วยดินขาว ส่วนสมการที่ 4.3 ใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวในน้ำที่ถูกเจือปนด้วยเซลล์จุลชีพ

ตารางที่ 4.9 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับทำนายค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว

ลักษณะน้ำ	สมการ	
น้ำประปา	$k_L = \frac{(k_L - 1) - (k_L - 2)}{d_{B-Max} - d_{B-min}} \times (d_B - d_{B-Min}) + (k_L - 2)$	$k_L - 1 = 2 \left[\frac{D \times U_B}{\pi \times h} \right]^{0.5}$ $k_L - 2 = \frac{D}{d_B} \left(2 + 0.6 Re^{1/2} \times Sc^{1/3} \right)$
ดินขาว		
เกลือ	$k_L = \frac{(k_L - 1) + (k_L - 2)}{2}$	
เซลล์จุลชีพ	$k_L = \frac{(k_L - 1) - (k_L - 2)}{d_{B-Max} - d_{B-min}} \times (d_B - d_{B-Min}) + (k_L - 2)$	

หมายเหตุ สมการ k_L-1 คือ สมการของ Higbie (Roustan, 2003)

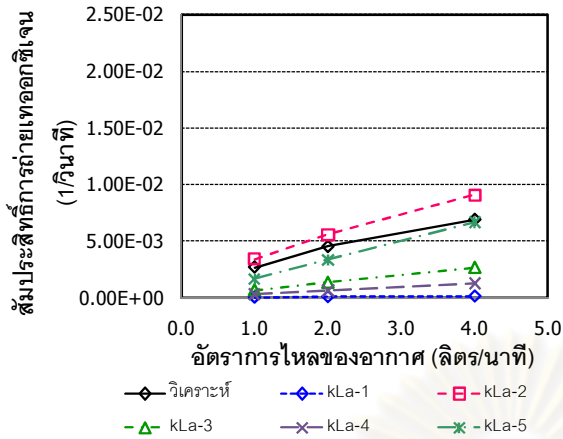
สมการ k_L-2 คือ สมการของ Frossling (Roustan, 2003)



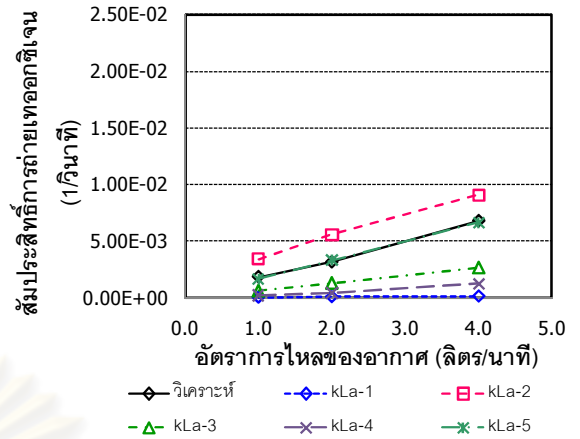
รูปที่ 4.67 กราฟแสดงความแม่นยำของผลทำนายค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว

จากรูปที่ 4.67 เมื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงในตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบกับค่าที่วิเคราะห์ได้ พบว่าโดยส่วนใหญ่มีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 20 ส่วนที่เหลือจะมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 30 จึงใช้ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวที่ทำนายได้ประกอบการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนต่อไป

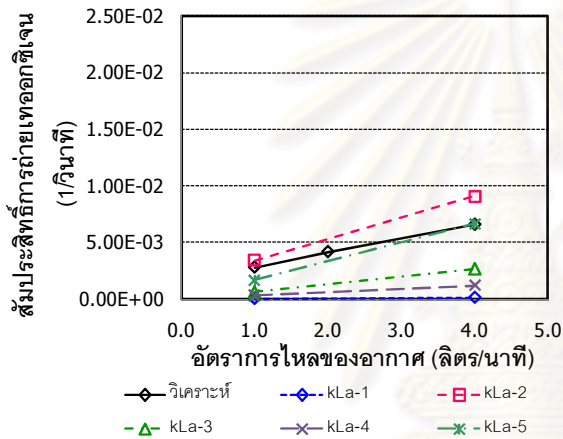
4.4.5 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ($k_L a$)



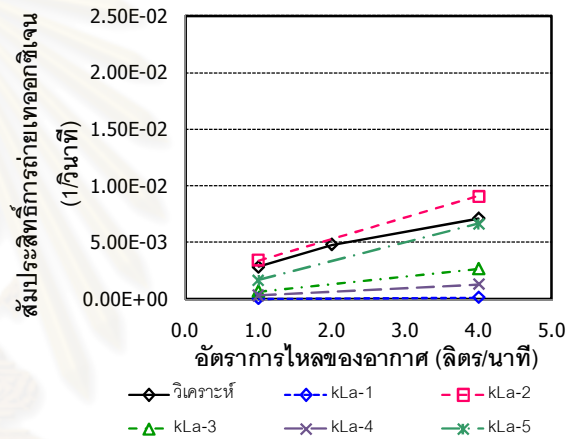
1.) น้ำประปา



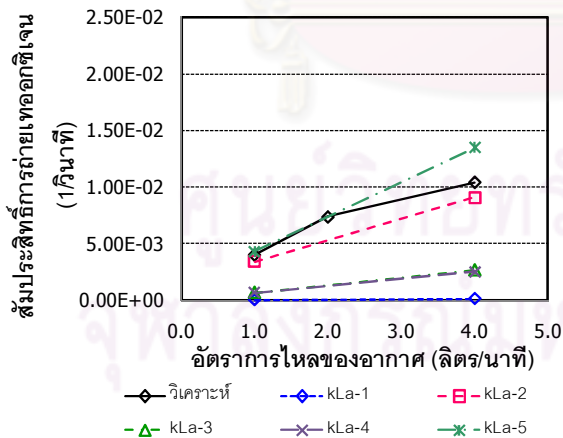
2.) ดินขาว 50 มก./ลิตร



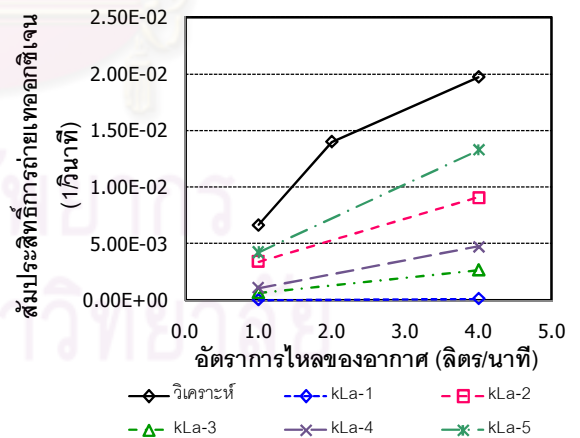
3.) ดินขาว 100 มก./ลิตร



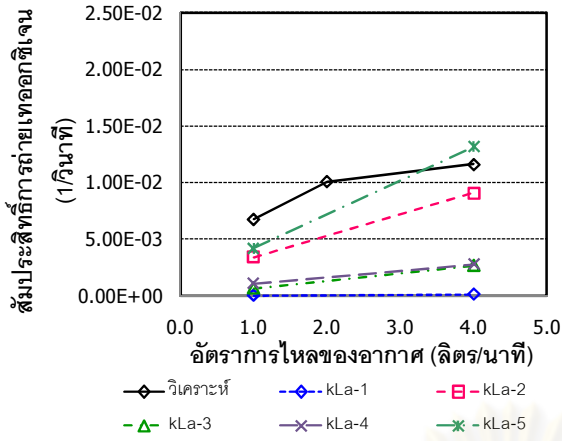
4.) ดินขาว 200 มก./ลิตร



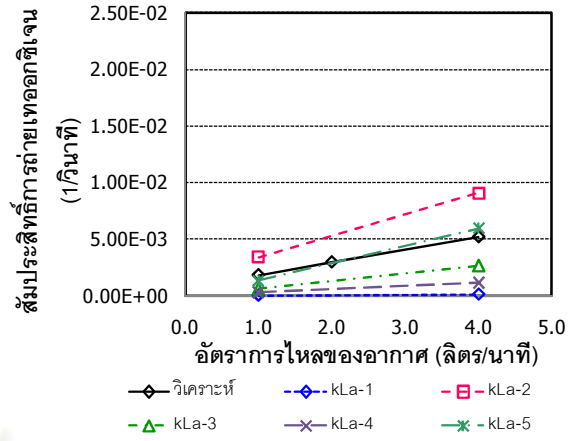
5.) เกือบ 7,500 มก./ลิตร



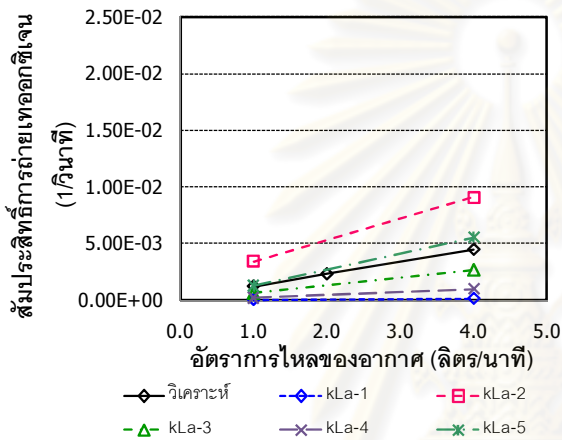
6.) เกือบ 20,000 มก./ลิตร



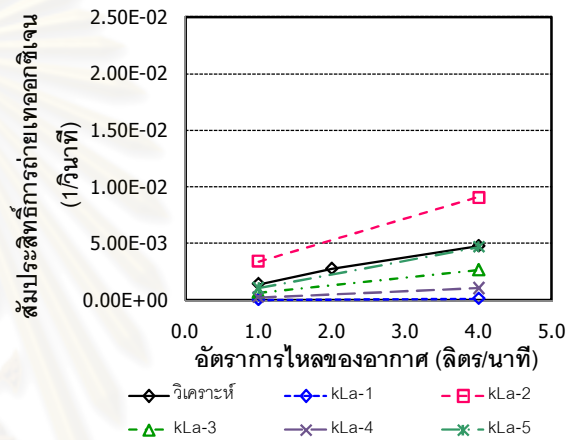
7.) กลูโคส 35,000 มก./ลิตร



8.) เซลล์จุลินทรีย์ 1,000 มก./ลิตร



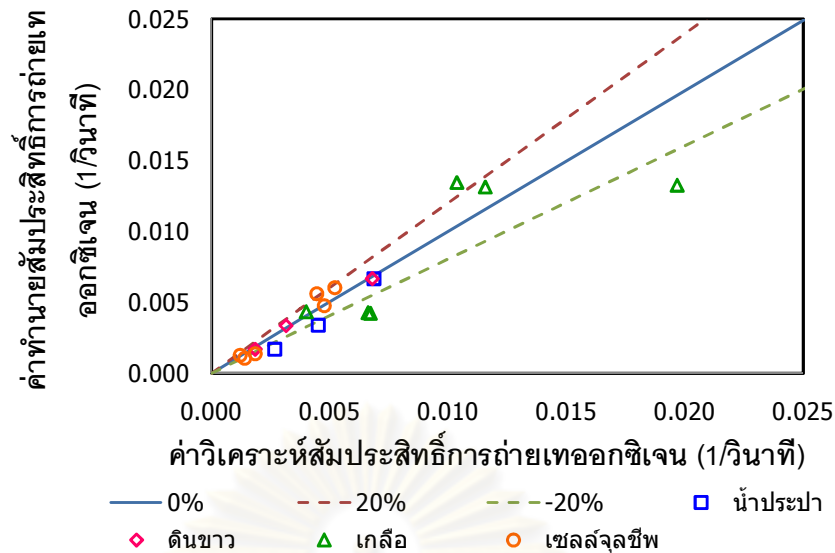
9.) เซลล์จุลินทรีย์ 2,000 มก./ลิตร



10.) เซลล์จุลินทรีย์ 3,000 มก./ลิตร

รูปที่ 4.68 กราฟแสดงผลการทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน

จากรูปที่ 4.68 แสดงผลการทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนเปรียบเทียบกับค่าที่วิเคราะห์ พบว่า การทำนายโดยใช้ผลคูณระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวกับพื้นที่สัมผัสจำเพาะตามสมการที่ 2.33 ให้ผลการทำนายที่แม่นยำมากกว่าการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อื่นๆ โดยมีความแม่นยำดังแสดงในรูปที่ 4.69



รูปที่ 4.69 กราฟแสดงความแม่นยำของผลทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน

จากรูปที่ 4.69 เมื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนโดยใช้ผลคูณระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวกับพื้นที่สัมผัสจำเพาะเปรียบเทียบกับค่าที่วิเคราะห์ได้ พบว่าโดยส่วนใหญ่มีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 20 ส่วนที่เหลือจะมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 25 ซึ่งเป็นสภาวะการเติมอากาศในน้ำเกลือ จากการสังเกตขณะทำการทดลองพบว่าฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กกว่าในน้ำประปาทำให้มีความเร็วลอยตัวต่ำและถูกพัดไปตามกระแสน้ำได้ง่าย ทิศทางการลอยตัวของฟองอากาศจึงเบี่ยงเบนไปจากแนวตั้งทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ได้ง่าย ซึ่งอาจต้องใช้อุปกรณ์ที่มีความละเอียดสูงหรือทำการทดลองซ้ำหลายๆรอบเพื่อลดความคลาดเคลื่อนดังกล่าว อย่างไรก็ตาม ผลการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนโดยรวมทุกสภาวะของการทดลองมีความแม่นยำอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้วิธีทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่ได้นำเสนอไปข้างต้น ประกอบการออกแบบกระบวนการเติมอากาศได้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการประยุกต์ใช้ท่อยืดหยุ่นเป็นอุปกรณ์เติมอากาศแบบท่อ โดยศึกษาตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสารและอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ เพื่อศึกษากลไกการถ่ายเทออกซิเจนโดยพิจารณาสมบัติทางกายภาพของท่อยืดหยุ่น ผลกระทบจากสิ่งเจือปนในน้ำต่อการถ่ายเทออกซิเจนในสภาวะการทำงานจริง แนวทางการใช้งาน และการบำรุงรักษา โดยที่การศึกษาและเปรียบเทียบในหัวข้อต่างๆ ได้พิจารณาทั้งในด้านประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนและประสิทธิภาพเชิงพลังงาน โดยมีรายละเอียดดังนี้

- 5.1.1 การศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารของอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่น
 - 1.) ตัวอย่างท่อยืดหยุ่นที่ 6.3 เป็นตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่น เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูง และมีค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนมากที่สุด ซึ่งแสดงถึงการมีประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงตามไปด้วย
 - 2.) สมบัติทางกายภาพของท่อยืดหยุ่นมีความสัมพันธ์กับกลไกการถ่ายเทออกซิเจน โดยความทนต่อแรงดึงและความยืดหยุ่นของท่อยืดหยุ่นเป็นปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อค่าความดันขณะเติมอากาศซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพเชิงพลังงาน เมื่อท่อยืดหยุ่นมีค่าความทนต่อแรงดึงและความยืดหยุ่นสูงจะส่งผลให้ท่อมีความเหนียวซึ่งต้านทานการไหลผ่านของอากาศทำให้ต้องใช้ความดันสูงขณะเติมอากาศทำให้มีประสิทธิภาพเชิงพลังงานต่ำ
 - 3.) ขนาดฟองอากาศมีแนวโน้มใหญ่ขึ้นทำให้ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศเพิ่มขึ้นตามไปด้วย การเพิ่มอัตราการไหลของอากาศทำให้เกิดฟองอากาศจำนวนมากจึงส่งผลให้พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำเพิ่มขึ้นอย่างมากซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ขนาดฟองอากาศที่ใหญ่ขึ้นทำให้ออกซิเจนในฟองอากาศสัมผัสกับน้ำได้น้อยลง ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนจึงมีแนวโน้มลดลง

- 5.1.2 การศึกษาผลกระทบจากสภาวะการทำงานต่างๆต่อประสิทธิภาพการเติมอากาศ การดูดตัน และวิธีทำความสะอาดที่เหมาะสม
- 1.) น้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวซึ่งใช้เป็นตัวแทนของของแข็งแขวนลอยที่มีความเข้มข้น 50 100 และ 200 มก./ลิตร ไม่ส่งผลกระทบต่อกลไกการถ่ายเทออกซิเจน เนื่องจากมีสมบัติของน้ำไม่แตกต่างไปจากน้ำประปาจึงทำให้ตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสารและอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศจึงมีค่าใกล้เคียงกับในน้ำประปา
 - 2.) น้ำเกลือความเข้มข้น 7,500 20,000 และ 35,000 มก./ลิตร ส่งผลกระทบต่อกลไกการถ่ายเทออกซิเจนขณะเติมอากาศอย่างชัดเจน เนื่องจากปริมาณไอออนที่เกิดขึ้นได้ล้อมรอบฟองอากาศซึ่งขัดขวางการรวมตัวของฟองอากาศทำให้ฟองอากาศมีขนาดเล็กกว่าในน้ำประปา ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศในน้ำเกลือจึงมีค่าน้อย พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำจึงมีค่ามากกว่าในน้ำประปาซึ่งส่งผลต่อการถ่ายเทออกซิเจนมากกว่าการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวเนื่องจากปริมาณไอออนในน้ำเกลือ ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน และประสิทธิภาพเชิงพลังงานจึงมีค่ามากกว่าการเติมอากาศในน้ำประปา
 - 3.) น้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพความเข้มข้น 1,000 2,000 และ 3,000 มก./ลิตร ส่งผลกระทบต่อกลไกการถ่ายเทออกซิเจนขณะเติมอากาศอย่างชัดเจน เนื่องจากปริมาณไอออนในน้ำที่เกิดขึ้นจากการเพิ่มความเข้มข้นของเซลล์จุลชีพทำให้ค่าแรงตึงผิวในน้ำลดลงซึ่งส่งผลต่อรูปร่างของฟองอากาศและขัดขวางการรวมตัวของฟองอากาศทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวลดลงอย่างมาก ถึงแม้ว่าฟองอากาศที่เกิดขึ้นขณะเติมอากาศมีลักษณะเป็นทรงกลมและมีขนาดเล็กกว่าในน้ำประปา ซึ่งทำให้พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำมีค่ามากกว่าในน้ำประปา แต่การลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวส่งผลต่อการถ่ายเทออกซิเจนมากกว่า ดังนั้นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน และประสิทธิภาพเชิงพลังงานจึงมีค่าน้อยกว่าการเติมอากาศในน้ำประปา
 - 4.) ของแข็งแขวนลอยและเซลล์จุลชีพเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการดูดตัน โดยที่ดินขาวซึ่งสามารถทำให้เกิดการดูดตันได้ทันทีเนื่องจากมีขนาดอนุภาคเล็กกว่ารูเติมอากาศ และใช้ระยะเวลาสั้นในการตกตะกอน สำหรับเซลล์จุลชีพสามารถทำให้เกิดการดูดตันได้จากการตกตะกอนทับถมและสร้างไบโอฟิล์มเคลือบที่ผิวท่อภายในระยะเวลา 3 วัน ดังนั้น จึง

ไม่ควรหยุดเติมอากาศนานเกิน 3 วัน หลังจากนั้นจึงควรทำความสะอาดอุปกรณ์เติมอากาศด้วยวิธีที่เหมาะสม

- 5.) การเป่าด้วยความดันเป็นวิธีทำความสะอาดท่อยืดหยุ่นที่เหมาะสม โดยในงานวิจัยนี้ได้เป่าอากาศด้วยความดัน 3 บาร์ เป็นระยะเวลา 30 นาที พบว่าสามารถกำจัดสิ่งอุดตันได้ดีทั้งในรูปของแข็งแขวนลอยและเซลล์จุลชีพ เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถกำจัดสิ่งอุดตันได้ทั้งบริเวณผิวด้านนอกของท่อและภายในผนังท่อ และสามารถทำได้สะดวก
- 5.1.3 การศึกษารูปแบบการจัดเรียงท่อยืดหยุ่นในถังเติมอากาศ พบว่า การจัดเรียงท่อยืดหยุ่นรูปแบบที่ 2 (ดังแสดงในรูปที่ 4.50) เป็นรูปแบบที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากเป็นรูปแบบที่มีความสมมาตรสามารถกระจายฟองอากาศได้สม่ำเสมอ สามารถสร้างความปั่นป่วนภายในถังเติมอากาศจนมีเกิดการไหลแบบทวนสมบูรณ ทำให้การถ่ายเทออกซิเจนกระจายตัวอย่างทั่วถึง มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน 1.81×10^{-3} ถึง 3.68×10^{-3} 1/วินาที และประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนร้อยละ 12.36 ถึง 15.08 (ความลึกของน้ำ 1.3 ม.) ซึ่งอยู่ในช่วงของอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อพลาสติก เพอร์ฟอเรทเมมเบรน เจ็ท หรือชนิดไม่มีรูพุน (ดังแสดงในภาคผนวก ข-6) ประกอบกับการมีอัตราการถ่ายเทออกซิเจนสูงประมาณ 1,430 มก./กิโลวัตต์-วินาที ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 60 ถึง 100 ลิตร/นาที ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพเชิงพลังงานที่สูง โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้ท่อยืดหยุ่นยาว 7.5 ม. ต่อพื้นที่ก้นถังเติมอากาศ 1.33 ตร.ม.
- 5.1.4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (d_b) สามารถสามารถใช้เป็นตัวแปรหลักในการทำนายค่าตัวแปรด้านการถ่ายเทออกซิเจนและตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศอื่นๆได้ โดยทำนายค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว (k_L) และพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำ (a) หลังจากนั้นจึงนำค่าตัวแปรทั้งสองมาคูณกันเป็นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ($k_L a$) โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 20 สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิธีการปรับแก้ค่าที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังตาราง

ตารางที่ 5.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน

ลักษณะน้ำ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ ฟองอากาศ (d_B)	ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (U_B)	พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่าง ฟองอากาศกับน้ำ (a)
น้ำประปา	$d_B = \left[\frac{6 \times d_{OR} \times \sigma \times g_C}{g \times \Delta \rho} \right]^{1/3}$	$U_B = \left[\frac{2\sigma}{d_B \times \rho} + 0.5d_B \times g \right]^{0.5}$	$a = \frac{N_B \times S_B}{V_{Total}} = \frac{N_B \times \pi \times d_B^2}{A \times H_L + N_B \times V_B}$
ดินขาว			
เกลือ	$d_B = 7.1 \times 10^{-4} \times \Delta P^{0.328}$	กราฟของ Grace และ Wairegi สภาวะของน้ำที่มีสารเจือปน	
เซลล์จุลชีพ	$d_B = \frac{(d_B - 3) + (d_B - 4)}{2}$ $d_B - 3 = \left[\frac{72 \times \rho_L}{\pi^2 \times g \times \Delta \rho} \right]^{1/5} \times Q_{go}^{0.4}$ $d_B - 4 = 7.1 \times 10^{-4} \times \Delta P^{0.328}$	$U_B = \frac{d_B - Actual}{d_B - Water} \times (U_B - 4)$ $U_B - 4 = \left[\frac{2\sigma}{d_B \times \rho} + 0.5d_B \times g \right]^{0.5}$	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (ต่อ)

ลักษณะน้ำ	สัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว (k_L)		สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ($k_L a$)
น้ำประปา	$k_L = \frac{(k_L - 1) - (k_L - 2)}{d_{B-Max} - d_{B-min}} \times (d_B - d_{B-Min}) + (k_L - 2)$	$k_L - 1 = 2 \left[\frac{D \times U_B}{\pi \times h} \right]^{0.5}$	$k_L a = k_L \times a$
ดินขาว			
เกลือ	$k_L = \frac{(k_L - 1) + (k_L - 2)}{2}$	$k_L - 2 = \frac{D}{d_B} (2 + 0.6 Re^{1/2} \times Sc^{1/3})$	
เซลล์จุลชีพ	$k_L = \frac{(k_L - 1) - (k_L - 2)}{d_{B-Max} - d_{B-min}} \times (d_B - d_{B-Min}) + (k_L - 2)$		

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสารและอุทกพลศาสตร์ของ ฟองอากาศกับอุปกรณ์เติมอากาศชนิดอื่น เพื่อศึกษาการเลือกใช้อุปกรณ์เติมอากาศที่ เหมาะสมกับสภาวะการเติมอากาศต่างๆ
- 5.2.2 ควรศึกษาผลกระทบจากลักษณะน้ำที่ถูกปั่นเปื้อนด้วยสารหลายชนิดในเวลาเดียวกัน เพื่อให้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบกระบวนการเติมอากาศสำหรับการใช้งานด้าน อื่น เช่น ด้านการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เป็นต้น
- 5.2.3 ควรดำเนินการศึกษาและยืนยันผลการทดลองในช่วงสภาวะการทำงานที่กว้างขึ้น เช่น ขยายช่วงอัตราการไหลของอากาศให้กว้างขึ้น ทำงานทดลองในถังเติมอากาศขนาดใหญ่ และศึกษาผลกระทบจากการทำความสะอาดด้วยสารเคมีต่อสมบัติของอุปกรณ์เติม อากาศ เป็นต้น เพื่อให้สามารถนำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลายด้าน


 ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กชกร ก้องกังวาลย์ จิตาภา วชิรศักดิ์ และพิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล. 2552. การศึกษาอุปกรณ์เติมอากาศ ยืดหยุ่นแบบท่อในด้านการถ่ายเทออกซิเจน และอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14.
- มันสิน ตันฑูลเวศม์. 2537. วิศวกรรมการประปา. เล่มที่ 1. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มูลนิธิชัยพัฒนา. 2531. กังหันชัยพัฒนา. ผลงาน และ งานวิจัย [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://online.benchama.ac.th/webcontest/pi boon/images/2/0000311.jpg> [2553, มกราคม 4]
- วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา. 2544. จลนพลศาสตร์และการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมี. จำนวนพิมพ์ 2,000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ ส.ส.ท.

ภาษาอังกฤษ

- ALAB, LLC. 1996. Alab Fine Bubble Diffusers. QuickPure™ TECHNOLOGIES [Online]. Available from: <http://www.alabdiffusers.com/DiffuserDiscovery.htm> [2010, January 4]
- Arkhangelsky, E., Kuzmenko, D., and Gitis, V. 2007. Impact of chemical cleaning on properties and functioning of polyethersulfone membranes. Journal of Membrane Science 36 : 176-184.
- Bayramoglu, M., Cakici, A., and Tekin, T. 2000. Modeling of oxygen transfer rate in diffused-air aeration tanks. Trans IChemE 78 : 209-212.
- Benjamin, M.M. 2002. WATER CHEMISTRY. International Edition. Water resources and environmental engineering. Singapore : McGraw-Hill.
- CSH INC. 2006. A082 Centrifugal Blower. Centrifugal Blowers [Online]. Available from: <http://www.cshincorporated.com/images/A082.jpg> [2010, January 4]
- Devatine, A., and Mietton-Peuchot, M. 2009. A mathematical approach for oxygenation using micro bubbles application to the micro-oxygenation of wine. Chemical Engineering Science 64 : 1909-1917

- DIRECT INDUSTRY. 2005. Roots type lobe blower. Products [Online]. Available from: http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/roots-type-lobe-blower-53126.jpg [2010, January 4]
- ENVIRONMENTAL DYNAMICS INC. 2005. PermaCap. Aeration products [Online]. Available from: <http://www.wastewater.com/aeration-products/permacap.htm> [2010, January 4]
- ERE CORPORATE. 2009. Aeration. Water treatment [Online]. Available from: <http://ereinc.com/images/Filtration/Aeration/CoarseBubbleDiffuser.jpg> [2010, January 4]
- FAO CORPORATE DOCUMENT REPOSITORY. 2000. Aeration. BIOLOGICAL TREATMENT [Online]. Available from: <http://www.fao.org/docrep/003/v9922e/V9922E29.jpg> [2010, January 4]
- F.L.I. BRIGHTWATER. 2007. Diffuser Aeration Systems. WATER AND WASTEWATER TREATMENT [Online]. Available from: http://www.brightwaterfli.com/diffused_aeration_systems.htm [2010, January 4]
- Gillot, S., Capela-Marsal, S., Roustan, M., and Héduit, A. 2005. Predicting oxygen transfer of fine bubble diffused aeration systems-model issued from dimensional analysis. Water Research 39 : 1379-1387.
- GRG ENVIRO SOUND SOLUTIONS (P) LTD. 2009. Flyma Jet Aerator. Aerator [Online]. Available from: <http://product-image.tradeindia.com/00227006/b/0/Flyma-Jet-Aerator.jpg> [2010, January 4]
- Grupa Powen-Wafapomp SA. 2006. PUMPS OSW. PRODUCT CATALOGUE [Online]. Available from: <http://www.powen.pl/temp/uploads/file/osw-200-widok-kompresja%281%29.jpg> [2010, January 4]
- Hasanen, A., Orivuori, P., and Aittamaa, J. 2006. Measurements of local bubble size distributions from various flexible membrane diffusers. Chemical Engineering and Processing 45 : 291–302.
- Hebrard, G., Destrac, P., Roustan, M., Huyard, A., and Audic, J.M. 2000. Determination of the water quality correction factor α using a tracer gas method. Water Research 34 : 684-689.
- HYDRO-LOGIC ENVIRONMENTAL. 2001. Advanced Membrane Technology. Oxygen Transfer Technology [Online]. Available from: <http://www.hydrologic.ca/companies/ott/ott.html> [2010, January 4]

- Jamnongwong, M., Loubiere, K., Dietrich, N., and Hébrard G. 2010. Experimental study of oxygen diffusion coefficients in clean water containing salt, glucose or surfactant: Consequences on the liquid-side mass transfer coefficients. Chemical Engineering Journal 165: 758-768.
- Japanese Advanced Environment Equipment (JSIM). 2001. Deep Shaft Process. Pulp and Paper Wastewater Treatment [Online]. Available from: http://www.gec.jp/JSIM_DATA/WATER/WATER_1/img/fig_220-1.jpg [2010, January 4]
- Kaliman, A., Rosso, D., Leu, S.Y., and Stenstrom, M.K. 2008. Fine-pore aeration diffusers: Accelerated membrane ageing studies. WATER RESEARCH 42 : 467-475.
- Metcalf & Eddy, Inc. 2004. Wastewater Engineering Treatment and Reuse. Fourth Edition. International Edition. Singapore : McGraw-Hill.
- Moustiri, S., Hebrard, G., Thakre, S.S., and Roustan, M. 2001. A unified correlation for predicting liquid axial dispersion coefficient in bubble columns. Chemical Engineering Science 56. : 1041-1047.
- Mueller, J.A., Boyle, W.C., and Johannes Pöpel, H. 2002. AERATION: Principles and Practice. VOLUME 11. United States of America : CRC PRESS.
- Nanjing DeTech Pumps Co., Ltd. 2007. DSA Submersible Aerator. Environment products [Online]. Available from: <http://image.made-in-china.com/2f0j00tvmQgeiBCDkq/Dsa-Submersible-Aerator-DSA-.jpg> [2010, January 4]
- Nedelchev, S., Jordan, U., and Schumpe, A. 2006. A new correction factor for theoretical prediction of mass transfer coefficients in bubble columns. Journal of Chemical Engineering of Japan 39 : 1237-1242.
- Painmanakul, P., and Jamnongwong, M. 2007. Theoretical prediction of mass transfer parameters in small bubble column. Asian-Pacific Regional conference on Practical Environmental Technology Proceedings of Asian-Pacific Regional Conference on Practical Environmental Technologies (APRC 2007 International Conference), August 2007.
- Painmanakul, P., Loubiere, K., Hebrard, G., and Buffiere, P. 2004. Study of different membrane spargers used in wastewater treatment: characterization and performance. Chemical Engineering and Processing 43 : 1347-1359.

- Phoenix Engineering. 2001. Submersible aerator. KJI Electric Submersible Pumps [Online]. Available from: http://www.phoenixeng.com.my/images/Pumps/KJI_KRO.jpg [2010, January 4]
- Rosso, D., Libra, J.A., Wiehe, W., and Stenstrom, M.K. 2008. Membrane properties change in fine-pore aeration diffusers: Full-scale variations of transfer efficiency and headloss. WATER RESEARCH 42 : 2640-2648.
- SIEMENS. 2010. SnapCap™ Coarse Bubble Diffuser. Aerobic Processes - Diffused Air Systems [Online]. Available from: http://www.water.siemens.com/en/products/aeration/diffused_air_systems/Pages/envirex_products_snapcap.aspx [2010, January 4]
- Spartan Environmental Technologies. 2004. Fine Bubble Diffuser Contactors for Ozone Water Treatment. Air and Water Treatment [Online]. Available from: <http://www.spartanwatertreatment.com/ozone-fine-bubble-diffusers.html> [2010, January 4]
- Triumph Machinery Corporation. 1971. Ritz Submersible aerator. Products-Ritz [Online]. Available from: <http://www.trimcor.net/ritz/Submersible%20aerator.jpg> [2010, January 4]
- Triveni : ENGINEERING AND INDUSTRIES LTD. 2003. Air diffuser. Types of products [Online]. Available from: <http://www.trivenigroup.com/water/air-diffuser.html> [2010, January 4]
- Van Halem, D., Van der Laan, H., Heijman, S.G.J., Van Dijk, J.C., and Amy G.L. 2009. Assessing the sustainability of the silver-impregnated ceramic pot filter for low-cost household drinking water treatment. Physics and Chemistry of the Earth 34 : 36-42.
- VENTUSE. 2001. PRODUCTS-STATIC TUBE AERATORS. AERATION SYSTEMS [Online]. Available from: <http://www.ventuse.net/detailPic.cfm?pic=staticTube.jpg> [2010, January 4]



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ก-1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารของอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่น

ภาคผนวก ก-1.1.1 ผลการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ($k_L a$) และค่าความดันขณะเติมอากาศ ของท่อยืดหยุ่นตัวอย่างต่างๆ

ตัวอย่างที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (1/วินาที)			ความดัน (ปอนด์/ตร.นิ้ว)		
	อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)			อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)		
	1.00	2.00	4.00	1.00	2.00	4.00
1.1	1.22E-03	2.33E-03	5.37E-03	3.00	6.00	12.00
1.2	1.28E-03	2.33E-03	3.19E-03	1.00	1.20	1.40
1.3	1.12E-03	2.08E-03	2.66E-03	0.80	1.00	1.20
2.1	1.32E-03	-	-	14.00	-	-
2.2	1.18E-03	1.92E-03	3.03E-03	1.00	1.40	3.00
2.3	1.07E-03	2.14E-03	3.00E-03	0.80	1.00	1.20
3.1	1.27E-03	2.23E-03	-	8.00	17.50	-
3.2	1.06E-03	2.34E-03	3.73E-03	0.80	1.20	1.80
3.3	1.05E-03	2.05E-03	3.78E-03	1.00	1.20	2.00
6.1	1.24E-03	2.77E-03	4.70E-03	3.20	6.80	14.00
6.2	1.37E-03	2.19E-03	3.38E-03	1.80	3.00	6.00
6.3	1.37E-03	2.43E-03	3.93E-03	0.80	0.90	1.10
7.1	1.21E-03	2.41E-03	3.62E-03	1.80	4.00	13.00
7.2	1.20E-03	2.20E-03	3.72E-03	0.80	1.00	1.20
7.3	1.31E-03	2.11E-03	3.27E-03	0.80	1.00	1.20
8.1	1.28E-03	2.51E-03	1.22E-02	4.00	11.00	31.00
8.2	1.13E-03	2.35E-03	3.71E-03	1.00	1.40	2.80
8.3	1.25E-03	2.23E-03	3.26E-03	0.80	1.00	1.20

ภาคผนวก ก-1.1.2 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน (OTE) และอัตราการถ่ายเทออกซิเจน (OTR) ของท่อยัดหยุ่นตัวอย่างต่างๆ

ตัวอย่างที่	ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน (%)			อัตราการถ่ายเทออกซิเจน (มก./กิโลวัตต์-วินาที)		
	อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)			อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)		
	1.00	2.00	4.00	1.00	2.00	4.00
1.1	2.16	2.07	2.38	287	137	79
1.2	2.27	2.07	1.41	904	686	402
1.3	1.99	1.84	1.18	989	735	391
2.1	2.34	-	-	67	-	-
2.2	2.09	1.70	1.34	833	484	178
2.3	1.90	1.90	1.33	945	756	441
3.1	2.25	1.98	-	112	45	-
3.2	1.88	2.08	1.65	936	689	366
3.3	1.86	1.82	1.68	742	603	334
6.1	2.20	2.46	2.08	274	144	59
6.2	2.43	1.94	1.50	538	258	99
6.3	2.43	2.16	1.74	1,210	954	631
7.1	2.15	2.14	1.61	475	213	49
7.2	2.13	1.95	1.65	1,059	777	547
7.3	2.32	1.87	1.45	1,157	745	481
8.1	2.27	2.23	5.41	226	81	69
8.2	2.00	2.08	1.65	798	593	234
8.3	2.22	1.98	1.45	1,104	788	480

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก-1.2.1 ผลวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (d_B) และความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (U_B)

ตัวอย่างที่	ขนาดฟองอากาศ (มม.)			ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (ม./วินาที)		
	อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)			อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)		
	1.00	2.00	4.00	1.00	2.00	4.00
1.3	2.11	2.17	2.45	0.225	0.236	0.318
6.3	2.12	2.24	2.30	0.219	0.266	0.273
8.1	2.49	2.38	-	0.236	0.287	-

วิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศจากภาพถ่ายโดยกล้องความเร็วสูงที่จุดกึ่งกลางความสูงของระดับน้ำ (สูงประมาณ 10 ซม. จากก้นถัง) และคำนวณขนาดฟองอากาศได้ดังสมการ

$$d_B = (l^2 \times h)^{1/3}$$

เมื่อ l คือความยาวของฟองอากาศ (มม.) h คือความสูงของฟองอากาศ (มม.) หลังจากนั้นเฉลี่ยขนาดฟองอากาศแบบซอเทอร์ (Sauter mean diameter, d_{32}) ได้ดังสมการ

$$d_{32} = \frac{\sum d^3}{\sum d^2}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก-1.2.2 ผลการวิเคราะห์พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำ (a) และสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว (k_L)

ตัวอย่างที่	พื้นที่สัมผัสจำเพาะ (1/ม.)			สัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว (ม./วินาที)		
	อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)			อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)		
	1.00	2.00	4.00	1.00	2.00	4.00
1.3	4.58	8.51	11.17	4.58	8.51	11.17
6.3	4.68	7.30	13.82	4.68	7.30	13.82
8.1	3.70	6.36	-	3.70	6.36	-

พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$a = \frac{N_B \times \pi \times d_B^2}{A \times H_L + N_B \times V_B}$$

เมื่อ N_B คือจำนวนฟองอากาศ A คือพื้นที่หน้าตัดของถังเติมอากาศ (ตร.ม.) H_L คือระดับความสูงของน้ำ (ม.) และ V_B คือปริมาตรของฟองอากาศ (ลบ.ม.) และคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวได้ดังสมการ

$$k_L = \frac{k_L a}{a}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก-2 ผลการศึกษาผลกระทบจากสภาวะการทำงานต่างๆต่อประสิทธิภาพการเติมอากาศ การดูดซับ และวิธีการทำความสะอาดที่เหมาะสม

ภาคผนวก ก-2.1.1 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและค่าความดันขณะเติมอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาว

อัตราการไหล ของอากาศ ลิตร/นาที	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (1/วินาที)				ความดัน (ปอนด์/ตร.นิ้ว)			
	น้ำประปา	ดินขาว (มก./ลิตร)			น้ำประปา	ดินขาว (มก./ลิตร)		
		50	100	200		50	100	200
0.5	9.48E-04	9.51E-04	1.48E-03	1.37E-03	1.50	1.50	1.50	1.50
1.0	2.70E-03	1.86E-03	2.81E-03	2.86E-03	1.80	1.80	1.80	1.80
2.0	4.51E-03	3.16E-03	4.17E-03	4.86E-03	2.60	2.60	2.60	2.60
4.0	6.89E-03	6.79E-03	6.57E-03	7.17E-03	4.30	4.30	4.30	4.30
5.0	8.36E-03	7.54E-03	8.02E-03	8.50E-03	4.90	4.90	4.90	4.90

ภาคผนวก ก-2.1.2 ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการถ่ายเทออกซิเจนในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาว

อัตราการไหล ของอากาศ ลิตร/นาที	ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน (%)				อัตราการถ่ายเทออกซิเจน (มก./กิโลวัตต์-วินาที)			
	น้ำประปา	ดินขาว (มก./ลิตร)			น้ำประปา	ดินขาว (มก./ลิตร)		
		50	100	200		50	100	200
0.5	3.36	3.37	5.15	4.84	893	896	1,367	1,284
1.0	4.79	3.30	4.89	5.05	1,059	730	1,081	1,117
2.0	4.00	2.80	3.63	4.29	613	429	555	657
4.0	3.06	3.01	2.86	3.16	283	279	265	293
5.0	2.97	2.68	2.79	3.00	241	217	227	244

ภาคผนวก ก-2.1.3 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและค่าความดันขณะเต็ม อากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเกลือ

อัตราการไหล ของอากาศ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (1/วินาที)					ความดัน (ปอนด์/ตร.นิ้ว)				
	น้ำประปา	เกลือ (มก./ลิตร)			น้ำทะเล	น้ำประปา	TDS (NaCl, mg/L.)			น้ำทะเล
		7,500	20,000	35,000			7,500	20,000	35,000	
0.5	9.48E-04	1.95E-03	1.72E-03	1.62E-03	1.37E-03	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50
1.0	2.70E-03	4.04E-03	6.65E-03	6.75E-03	3.51E-03	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80
2.0	4.51E-03	7.37E-03	1.40E-02	1.01E-02	6.07E-03	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60
4.0	6.89E-03	1.04E-02	1.97E-02	1.16E-02	9.55E-03	4.30	4.30	4.30	4.30	4.30
5.0	8.36E-03	1.85E-02	2.08E-02	2.00E-02	1.10E-02	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90

ภาคผนวก ก-2.1.4 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและค่าความดันขณะเต็ม อากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเกลือ

อัตราการไหล ของอากาศ	ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน (%)					อัตราการถ่ายเทออกซิเจน (มก./กิโลวัตต์-วินาที)				
	น้ำประปา	เกลือ (มก./ลิตร)			น้ำทะเล	น้ำประปา	TDS (NaCl, mg/L.)			น้ำทะเล
		7,500	20,000	35,000			7,500	20,000	35,000	
0.5	3.36E+00	6.81E+00	6.01E+00	5.67E+00	4.65E+00	892.77	1807.42	1594.24	1505.26	1233.82
1.0	4.79E+00	7.05E+00	1.16E+01	1.18E+01	5.95E+00	1059.46	1560.25	2568.24	2613.29	1317.12
2.0	4.00E+00	6.43E+00	1.22E+01	8.84E+00	5.15E+00	612.58	985.26	1871.59	1353.55	788.46
4.0	3.06E+00	4.54E+00	8.60E+00	5.08E+00	4.05E+00	282.93	420.33	796.20	469.99	375.03
5.0	2.97E+00	6.46E+00	7.26E+00	7.00E+00	3.73E+00	241.01	524.92	590.18	568.88	303.26

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก-2.1.5 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและค่าความดันขณะเต็มอากาศในน้ำที่ถูกลบเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพ

อัตราการไหล ของอากาศ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (1/วินาที)				ความดัน (ปอนด์/ตร.นิ้ว)			
	น้ำประปา	เซลล์จุลชีพ (มก./ลิตร)			น้ำประปา	เซลล์จุลชีพ (มก./ลิตร)		
		1,000	2,000	3,000		1,000	2,000	3,000
0.5	9.48E-04	7.80E-04	5.91E-04	5.86E-04	1.50	1.50	1.50	1.50
1.0	2.70E-03	1.86E-03	1.20E-03	1.42E-03	1.80	1.80	1.80	1.80
2.0	4.51E-03	3.00E-03	2.29E-03	2.76E-03	2.60	2.60	2.60	2.60
4.0	6.89E-03	5.24E-03	4.46E-03	4.76E-03	4.30	4.30	4.30	4.30
5.0	8.36E-03	6.57E-03	5.26E-03	5.94E-03	4.90	4.90	4.90	4.90

ภาคผนวก ก-2.1.6 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและค่าความดันขณะเต็มอากาศในน้ำที่ถูกลบเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพ

อัตราการไหล ของอากาศ	ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน (%)				อัตราการถ่ายเทออกซิเจน (มก./กิโลวัตต์-วินาที)			
	น้ำประปา	เซลล์จุลชีพ (มก./ลิตร)			น้ำประปา	เซลล์จุลชีพ (มก./ลิตร)		
		1,000	2,000	3,000		1,000	2,000	3,000
0.5	3.36E+00	2.45E+00	1.86E+00	1.64E+00	892.77	650.76	493.08	435.33
1.0	4.79E+00	2.92E+00	1.89E+00	1.99E+00	1059.46	646.59	417.15	439.54
2.0	4.00E+00	2.36E+00	1.80E+00	1.93E+00	612.58	361.00	275.56	295.72
4.0	3.06E+00	2.06E+00	1.75E+00	1.67E+00	282.93	190.63	162.25	154.19
5.0	2.97E+00	2.07E+00	1.65E+00	1.66E+00	241.01	167.80	134.34	135.08

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก-2.2.1 ผลวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ และความเร็วลอยตัวของฟองอากาศในสภาวะการเติมอากาศต่างๆ

ลักษณะน้ำ	ความเข้มข้น (มก./ลิตร)	ขนาดฟองอากาศ (มม.)			ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (ม./วินาที)		
		อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที่)			อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที่)		
		1.00	2.00	4.00	1.00	2.00	4.00
น้ำประปา	-	2.12	2.24	2.30	0.219	0.266	0.273
ดินขาว	50	1.94	1.91	1.92	0.212	0.275	0.325
	100	1.89	-	1.96	0.268	-	0.290
	200	1.65	-	1.97	0.271	-	0.264
เกลือ	7,500	1.12	-	1.34	0.130	-	0.139
	20,000	1.06	-	1.16	0.120	-	0.124
	35,000	0.98	-	0.98	0.113	-	0.113
เซลล์จุลชีพ	1,000	1.17	-	1.46	0.185	-	0.242
	2,000	1.16	-	1.53	0.122	-	0.233
	3,000	1.25	-	1.51	0.126	-	0.242

ภาคผนวก ก-2.2.2 ผลวิเคราะห์พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำ และสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวในสภาวะการเติมอากาศต่างๆ

ลักษณะน้ำ	ความเข้มข้น (มก./ลิตร)	พื้นที่สัมผัสจำเพาะ (1/ม.)			สัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว (ม./วินาที)		
		อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที่)			อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที่)		
		1.00	2.00	4.00	1.00	2.00	4.00
น้ำประปา	-	4.675	7.299	13.824	5.78E-04	6.18E-04	4.98E-04
ดินขาว	50	5.294	8.300	13.949	3.51E-04	3.81E-04	4.87E-04
	100	4.308	-	15.269	6.52E-04	-	4.30E-04
	200	4.887	-	16.734	5.81E-04	-	4.24E-04
เกลือ	7,500	14.966	-	46.184	2.70E-04	-	2.25E-04
	20,000	17.053	-	59.996	3.90E-04	-	3.28E-04
	35,000	19.598	-	78.253	3.44E-04	-	1.48E-04
เซลล์จุลชีพ	1,000	10.052	-	24.569	1.85E-04	-	2.13E-04
	2,000	15.363	-	24.248	7.81E-05	-	1.84E-04
	3,000	13.862	-	23.767	1.02E-04	-	2.00E-04

ภาคผนวก ก-2.3.1 ผลวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของท่อยึดหยุ่นจากการศึกษาระยะเวลาที่อาจก่อให้เกิดการอุดตันจากการหยุดเติมอากาศ

สภาวะของท่อ	ระยะเวลา	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (1/วินาที)			ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน (%)		
		อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)			อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)		
	วัน	1.00	2.00	4.00	1.00	2.00	4.00
ท่อสะอาด	-	2.70E-03	4.51E-03	6.89E-03	4.79	4.00	3.06
ดินขาว	10	3.00E-03	5.01E-03	8.46E-03	5.30	4.42	3.73
เกลือ	10	2.69E-03	5.07E-03	7.93E-03	4.71	4.44	3.47
น้ำทะเล	10	2.74E-03	5.03E-03	7.60E-03	4.65	4.27	3.22
เซลล์จุลชีพ	0.25	2.67E-03	4.83E-03	7.52E-03	3.74	3.38	2.63
	3	3.16E-03	4.80E-03	8.05E-03	4.42	3.36	2.82
	7	3.44E-03	5.02E-03	8.27E-03	4.81	3.51	2.89
	10	3.30E-03	4.99E-03	8.80E-03	4.62	3.49	3.08

ภาคผนวก ก-2.3.2 ผลวิเคราะห์ค่าตัวคูณปรับแก้ของการอุดตัน และค่าความดันขณะเติมอากาศของท่อยึดหยุ่นจากการศึกษาระยะเวลาที่อาจก่อให้เกิดการอุดตันจากการหยุดเติมอากาศ

สภาวะของท่อ	ระยะเวลา	ตัวคูณปรับแก้ของการอุดตัน			ความดัน (ปอนด์/ตร.นิ้ว)		
		อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)			อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)		
	วัน	1.00	2.00	4.00	1.00	2.00	4.00
ท่อสะอาด	-	1.00	1.00	1.00	1.80	2.60	4.30
น้ำประปา	10	-	-	-	2.45	4.50	9.00
ดินขาว	10	1.05	1.03	1.18	3.20	6.00	11.60
เกลือ	10	0.40	0.50	0.68	2.30	4.00	7.90
น้ำทะเล	10	0.78	0.83	0.80	3.00	4.60	8.60
เซลล์จุลชีพ	0.25	1.88	1.75	1.58	2.60	4.40	8.40
	3	2.23	1.74	1.69	3.00	4.80	9.60
	7	2.42	1.82	1.74	3.50	5.40	10.50
	10	2.32	1.81	1.85	3.70	5.50	10.00

ภาคผนวก ก-2.4.1 ผลวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของท่อยึดหยุ่นจากการศึกษาวิธีทำความสะอาดโดยการขัด

สภาวะของท่อ	ระยะเวลา	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (1/วินาที)			ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน (%)		
		อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)			อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)		
	วัน	1.00	2.00	4.00	1.00	2.00	4.00
ท่อสะอาด	-	2.70E-03	4.51E-03	6.89E-03	4.79	4.00	3.06
ดินขาว	10	3.07E-03	4.97E-03	7.58E-03	5.42	4.39	3.35
เกลือ	10	2.70E-03	4.68E-03	7.94E-03	4.73	4.10	3.47
น้ำทะเล	10	2.90E-03	4.65E-03	7.47E-03	4.92	3.94	3.17
เซลล์จูลซีพ	0.25	3.11E-03	5.44E-03	8.33E-03	4.35	3.81	2.91
	3	3.06E-03	5.23E-03	8.36E-03	4.28	3.66	2.92
	7	3.19E-03	5.31E-03	8.28E-03	4.46	3.72	2.90
	10	3.47E-03	5.45E-03	8.14E-03	4.86	3.81	2.85

ภาคผนวก ก-2.4.2 ผลวิเคราะห์ค่าตัวคูณปรับแก้ของการอุดตัน และค่าความดันขณะเต็มอากาศของท่อยึดหยุ่นจากการศึกษาวิธีทำความสะอาดโดยการขัด

สภาวะของท่อ	ระยะเวลา	ตัวคูณปรับแก้ของการอุดตัน			ความดัน (ปอนด์/ตร.นิ้ว)		
		อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)			อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)		
	วัน	1.00	2.00	4.00	1.00	2.00	4.00
ท่อสะอาด	-	1.00	1.00	1.00	1.80	2.60	4.30
น้ำประปา	10	-	-	-	2.45	4.50	9.00
ดินขาว	10	1.07	1.02	1.06	3.40	4.60	7.00
เกลือ	10	0.40	0.46	0.68	3.00	4.70	8.00
น้ำทะเล	10	0.83	0.77	0.78	3.60	5.40	8.80
เซลล์จูลซีพ	0.25	2.19	1.97	1.75	3.60	4.80	7.80
	3	2.15	1.89	1.76	3.00	5.20	9.20
	7	2.25	1.92	1.74	3.20	5.30	9.40
	10	2.44	1.97	1.71	4.60	6.70	11.20

ภาคผนวก ก-2.4.3 ผลวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของท่อยัดหยุ่นจากการศึกษาวิธีทำความสะอาดโดยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์นาน 30 นาที

สภาวะของท่อ	ระยะเวลา	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (1/วินาที)			ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน (%)		
		อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)			อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)		
	วัน	1.00	2.00	4.00	1.00	2.00	4.00
ท่อสะอาด	-	2.70E-03	4.51E-03	6.89E-03	4.79	4.00	3.06
ดินขาว	10	3.07E-03	5.26E-03	8.11E-03	5.42	4.64	3.58
เกลือ	10	2.23E-03	4.32E-03	7.47E-03	3.90	3.78	3.27
น้ำทะเล	10	3.55E-03	5.38E-03	8.39E-03	6.02	4.56	3.56
เซลล์จุลชีพ	0.25	2.85E-03	4.83E-03	7.71E-03	3.99	3.38	2.70
	3	3.26E-03	5.25E-03	8.48E-03	4.56	3.67	2.97
	7	3.10E-03	5.13E-03	8.50E-03	4.34	3.59	2.97
	10	3.24E-03	5.10E-03	8.31E-03	4.53	3.57	2.91

ภาคผนวก ก-2.4.4 ผลวิเคราะห์ค่าตัวคูณปรับแก้ของการอุดตัน และค่าความดันขณะเต็มอากาศของท่อยัดหยุ่นจากการศึกษาวิธีทำความสะอาดโดยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์นาน 30 นาที

สภาวะของท่อ	ระยะเวลา	ตัวคูณปรับแก้ของการอุดตัน			ความดัน (ปอนด์/ตร.นิ้ว)		
		อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)			อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)		
	วัน	1.00	2.00	4.00	1.00	2.00	4.00
ท่อสะอาด	-	1.00	1.00	1.00	1.80	2.60	4.30
น้ำประปา	10	-	-	-	2.45	4.50	9.00
ดินขาว	10	1.07	1.08	1.13	3.60	5.90	9.40
เกลือ	10	0.33	0.43	0.64	3.30	5.10	8.00
น้ำทะเล	10	1.01	0.89	0.88	3.40	4.70	7.90
เซลล์จุลชีพ	0.25	2.01	1.75	1.62	3.10	4.90	8.60
	3	2.30	1.90	1.78	3.40	4.90	8.40
	7	2.18	1.86	1.79	3.10	4.80	8.40
	10	2.28	1.85	1.75	3.80	5.50	10.20

ภาคผนวก ก-2.4.5 ผลวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของท่อยึดหยุ่นจากการศึกษาวิธีทำความสะอาดโดยสารละลายกรดซัลฟิวริกนาน 30 นาที

สภาวะของท่อ	ระยะเวลา	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (1/วินาที)			ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน (%)		
		อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)			อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)		
	วัน	1.00	2.00	4.00	1.00	2.00	4.00
ท่อสะอาด	-	2.70E-03	4.51E-03	6.89E-03	4.79	4.00	3.06
ดินขาว	10	3.72E-03	4.99E-03	7.90E-03	6.57	4.40	3.49
เกลือ	10	3.22E-03	5.16E-03	8.22E-03	5.64	4.52	3.60
น้ำทะเล	10	3.59E-03	5.48E-03	8.99E-03	6.09	4.65	3.81
เซลล์จุลชีพ	0.25	3.22E-03	5.26E-03	8.46E-03	4.51	3.68	2.96
	3	3.15E-03	5.09E-03	8.10E-03	4.41	3.56	2.83
	7	3.15E-03	4.56E-03	8.29E-03	4.41	3.19	2.90
	10	2.52E-03	5.57E-03	8.83E-03	3.53	3.90	3.09

ภาคผนวก ก-2.4.6 ผลวิเคราะห์ค่าตัวคูณปรับแก้ของการดูดซับ และค่าความดันขณะเต็มอากาศของท่อยึดหยุ่นจากการศึกษาวิธีทำความสะอาดโดยสารละลายกรดซัลฟิวริกนาน 30 นาที

สภาวะของท่อ	ระยะเวลา	ตัวคูณปรับแก้ของการดูดซับ			ความดัน (ปอนด์/ตร.นิ้ว)		
		อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)			อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)		
	วัน	1.00	2.00	4.00	1.00	2.00	4.00
ท่อสะอาด	-	1.00	1.00	1.00	1.80	2.60	4.30
น้ำประปา	10	-	-	-	2.45	4.50	9.00
ดินขาว	10	1.30	1.03	1.10	5.20	7.50	12.50
เกลือ	10	0.48	0.51	0.71	3.20	4.30	7.40
น้ำทะเล	10	1.02	0.90	0.94	3.60	5.20	9.40
เซลล์จุลชีพ	0.25	2.27	1.91	1.78	3.00	4.30	7.40
	3	2.22	1.84	1.70	3.80	5.80	10.20
	7	2.22	1.65	1.74	3.70	5.20	8.60
	10	1.77	2.02	1.86	4.00	6.10	9.70

ภาคผนวก ก-2.4.7 ผลวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของท่อยึดหยุ่นจากการศึกษาวิธีทำความสะอาดโดยเป่าด้วยความดันนาน 30 นาที

สภาวะของท่อ	ระยะเวลา	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (1/วินาที)			ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน (%)		
		อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)			อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)		
	วัน	1.00	2.00	4.00	1.00	2.00	4.00
ท่อสะอาด	-	2.70E-03	4.51E-03	6.89E-03	4.79	4.00	3.06
ดินขาว	10	2.84E-03	4.90E-03	7.97E-03	5.01	4.33	3.52
เกลือ	10	1.93E-03	3.48E-03	7.03E-03	3.38	3.05	3.08
น้ำทะเล	10	3.15E-03	5.25E-03	8.32E-03	5.34	4.45	3.53
เซลล์จุลชีพ	0.25	3.15E-03	5.15E-03	8.34E-03	4.41	3.60	2.92
	3	2.39E-03	4.08E-03	6.67E-03	3.34	2.85	2.33
	7	3.29E-03	5.23E-03	8.10E-03	4.60	3.66	2.83
	10	3.41E-03	5.25E-03	8.15E-03	4.77	3.67	2.85

ภาคผนวก ก-2.4.8 ผลวิเคราะห์ค่าตัวคูณปรับแก้ของการอุดตัน และค่าความดันขณะเต็มอากาศของท่อยึดหยุ่นจากการศึกษาวิธีทำความสะอาดโดยเป่าด้วยความดันนาน 30 นาที

สภาวะของท่อ	ระยะเวลา	ตัวคูณปรับแก้ของการอุดตัน			ความดัน (ปอนด์/ตร.นิ้ว)		
		อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)			อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)		
	วัน	1.00	2.00	4.00	1.00	2.00	4.00
ท่อสะอาด	-	1.00	1.00	1.00	1.80	2.60	4.30
น้ำประปา	10	-	-	-	2.45	4.50	9.00
ดินขาว	10	0.99	1.01	1.11	2.50	4.60	9.30
เกลือ	10	0.29	0.34	0.61	2.40	4.50	9.00
น้ำทะเล	10	0.90	0.86	0.87	2.40	4.20	8.20
เซลล์จุลชีพ	0.25	2.22	1.87	1.75	2.50	4.10	7.60
	3	1.68	1.48	1.40	2.40	4.20	8.20
	7	2.32	1.89	1.70	2.60	4.40	8.70
	10	2.40	1.90	1.71	3.20	5.30	10.20

ภาคผนวก ก-2.4.9 ผลวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของท่อยึดหุ่นจากการศึกษาวิธีทำความสะอาดโดยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์นาน 24 ชม.

สภาวะของท่อ	ระยะเวลา	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (1/วินาที)			ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน (%)		
		อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)			อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)		
	วัน	1.00	2.00	4.00	1.00	2.00	4.00
ท่อสะอาด	-	2.70E-03	4.51E-03	6.89E-03	4.79	4.00	3.06
ดินขาว	10	3.22E-03	5.51E-03	8.69E-03	5.68	4.86	3.84
เกลือ	10	3.06E-03	5.10E-03	8.43E-03	5.36	4.46	3.69
น้ำทะเล	10	3.42E-03	5.39E-03	8.54E-03	5.80	4.57	3.62
เซลล์จุลชีพ	0.25	2.97E-03	5.28E-03	8.01E-03	4.16	3.69	2.80
	3	3.11E-03	5.17E-03	8.36E-03	4.35	3.62	2.92
	7	3.28E-03	5.44E-03	8.28E-03	4.59	3.81	2.90
	10	3.24E-03	5.41E-03	8.29E-03	4.53	3.79	2.90

ภาคผนวก ก-2.4.10 ผลวิเคราะห์ค่าตัวคูณปรับแก้ของการดูดตัน และค่าความดันขณะเติมอากาศของท่อยึดหุ่นจากการศึกษาวิธีทำความสะอาดโดยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์นาน 24 ชม.

สภาวะของท่อ	ระยะเวลา	ตัวคูณปรับแก้ของการดูดตัน			ความดัน (ปอนด์/ตร.นิ้ว)		
		อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)			อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)		
	วัน	1.00	2.00	4.00	1.00	2.00	4.00
ท่อสะอาด	-	1.00	1.00	1.00	1.80	2.60	4.30
น้ำประปา	10	-	-	-	2.45	4.50	9.00
ดินขาว	10	1.13	1.13	1.21	4.40	7.10	12.10
เกลือ	10	0.45	0.50	0.73	3.40	4.80	7.80
น้ำทะเล	10	0.97	0.89	0.89	4.20	5.20	9.20
เซลล์จุลชีพ	0.25	2.09	1.91	1.68	3.60	4.00	8.20
	3	2.19	1.87	1.76	3.60	5.70	10.60
	7	2.31	1.97	1.74	3.70	4.10	9.00
	10	2.28	1.96	1.74	4.00	6.10	10.20

ภาคผนวก ก-2.4.11 ผลวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของท่อยึดหยุ่นจากการศึกษาวิธีทำความสะอาดโดยสารละลายกรดซัลฟิวริกนาน 24 ชม.

สภาวะของท่อ	ระยะเวลา	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (1/วินาที)			ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน (%)		
		อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)			อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)		
	วัน	1.00	2.00	4.00	1.00	2.00	4.00
ท่อสะอาด	-	2.70E-03	4.51E-03	6.89E-03	4.79	4.00	3.06
ดินขาว	10	3.27E-03	5.31E-03	8.20E-03	5.77	4.69	3.62
เกลือ	10	2.96E-03	4.99E-03	7.76E-03	5.18	4.37	3.40
น้ำทะเล	10	3.28E-03	5.44E-03	8.78E-03	5.56	4.61	3.72
เซลล์จูลซีฟ	0.25	3.09E-03	5.10E-03	8.41E-03	4.32	3.57	2.94
	3	3.30E-03	5.60E-03	8.61E-03	4.62	3.92	3.01
	7	3.45E-03	5.61E-03	8.87E-03	4.83	3.93	3.10
	10	3.27E-03	5.40E-03	8.55E-03	4.58	3.78	2.99

ภาคผนวก ก-2.4.12 ผลวิเคราะห์ค่าตัวคูณปรับแก้ของการอุดตัน และค่าความดันขณะเต็มอากาศของท่อยึดหยุ่นจากการศึกษาวิธีทำความสะอาดโดยสารละลายกรดซัลฟิวริกนาน 24 ชม.

สภาวะของท่อ	ระยะเวลา	ตัวคูณปรับแก้ของการอุดตัน			ความดัน (ปอนด์/ตร.นิ้ว)		
		อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)			อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)		
	วัน	1.00	2.00	4.00	1.00	2.00	4.00
ท่อสะอาด	-	1.00	1.00	1.00	1.80	2.60	4.30
น้ำประปา	10	-	-	-	2.45	4.50	9.00
ดินขาว	10	1.14	1.09	1.14	4.50	6.60	12.80
เกลือ	10	0.44	0.49	0.67	2.50	4.30	8.70
น้ำทะเล	10	0.93	0.90	0.92	3.50	5.00	8.80
เซลล์จูลซีฟ	0.25	2.18	1.85	1.77	3.10	4.50	9.10
	3	2.32	2.03	1.81	3.20	4.60	8.00
	7	2.43	2.03	1.86	3.60	5.50	10.20
	10	2.30	1.96	1.80	4.20	5.90	10.40

ภาคผนวก ก-3 ผลการศึกษารูปแบบการจัดเรียงท่อยึดหยุ่นในถังเติมอากาศ

ภาคผนวก ก-3.1.1 ผลวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนจากการศึกษารูปแบบการจัดเรียงท่อยึดหยุ่นในถังเติมอากาศ



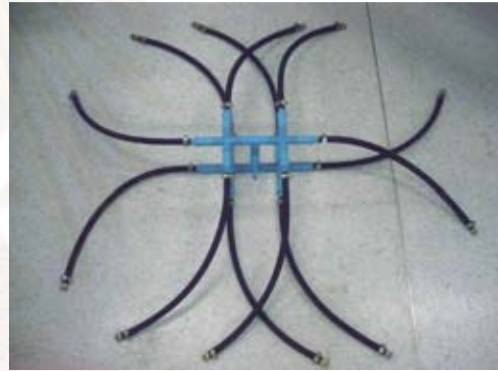
รูปแบบที่ 1



รูปแบบที่ 2



รูปแบบที่ 3



รูปแบบที่ 4

รูปแบบที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (1/วินาที)				
	ณ อุณหภูมิการทดลอง				
	อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)				
	60	70	80	90	100
1	2.99E-03	3.10E-03	3.25E-03	4.09E-03	3.72E-03
2	2.35E-03	2.71E-03	4.02E-03	4.29E-03	4.89E-03
3	2.55E-03	2.98E-03	3.18E-03	3.50E-03	3.79E-03
4	2.43E-03	2.91E-03	3.63E-03	3.81E-03	4.60E-03

หมายเหตุ อุณหภูมิขณะทำการทดลองอยู่ในช่วง 31.0 ถึง 32.5 องศาเซลเซียส

รูปแบบที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (1/วินาที)				
	อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส				
	อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)				
	60	70	80	90	100
1	2.25E-03	2.30E-03	2.44E-03	3.04E-03	2.79E-03
2	1.81E-03	2.09E-03	3.02E-03	3.23E-03	3.68E-03
3	1.92E-03	2.24E-03	2.39E-03	2.57E-03	2.78E-03
4	1.83E-03	2.19E-03	2.73E-03	2.86E-03	3.46E-03

ภาคผนวก ก-3.1.2 ผลวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน ค่าความดันขณะเต็มอากาศ และอัตราการถ่ายเทออกซิเจนจากการศึกษาารูปแบบการจัดเรียงท่อยึดหุ่ในถังเต็มอากาศ

รูปแบบที่	ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน (%)					ความดัน (ปอนด์/ตร.นิ้ว)				
	อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส					อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส				
	อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)					อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)				
	60	70	80	90	100	60	70	80	90	100
1	15.33	13.48	12.50	13.83	11.45	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00
2	12.36	12.22	15.47	14.69	15.08	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50
3	13.10	13.12	12.25	11.70	11.41	4.00	4.30	5.00	5.50	6.40
4	12.48	12.79	13.97	13.03	14.18	3.50	3.90	4.60	5.00	5.80

รูปแบบที่	อัตราการถ่ายเทออกซิเจน (มก./กิโลวัตต์-วินาที)				
	อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส				
	อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)				
	60	70	80	90	100
1	1,552	1,212	1,012	1,018	772
2	1,430	1,236	1,391	1,189	1,110
3	1,325	1,235	992	861	721
4	1,444	1,327	1,229	1,055	989

ภาคผนวก ก-3.2.1 ผลวิเคราะห์ค่าความนำไฟฟ้าจากการศึกษาฟังก์ชันการกระจายเรซินเดนซีไท์ม์ของ
 ท่อยึดหยุ่นที่ถูกจัดเรียงเป็นรูปแบบที่ต่างๆในถังเติมอากาศ

รูปแบบที่ 1

เวลา	ความนำไฟฟ้า	เวลา	ความนำไฟฟ้า
นาที	ไมโครซีเมนต์	นาที	ไมโครซีเมนต์
0	264	60	1,026
5	2,070	70	905
10	1,801	80	713
15	1,684	90	640
20	1,586	100	568
25	1,455	110	509
30	1,377	120	456
40	1,305	130	411
50	1,160	-	-

รูปแบบที่ 2

เวลา	ความนำไฟฟ้า	เวลา	ความนำไฟฟ้า
นาที	ไมโครซีเมนต์	นาที	ไมโครซีเมนต์
0	262	60	1,005
5	2,000	70	890
10	1,880	80	789
15	1,725	90	698
20	1,626	100	627
25	1,534	110	560
30	1,433	120	503
40	1,273	130	456
50	1,135	-	-

รูปแบบที่ 3

เวลา	ความนำไฟฟ้า	เวลา	ความนำไฟฟ้า
นาที	ไมโครซีเมนต์	นาที	ไมโครซีเมนต์
0	258	60	998
5	2,010	70	882
10	1,851	80	784
15	1,741	90	696
20	1,637	100	620
25	1,538	110	553
30	1,442	120	451
40	1,272	130	412
50	1,127	-	-

รูปแบบที่ 4

เวลา	ความนำไฟฟ้า	เวลา	ความนำไฟฟ้า
นาที	ไมโครซีเมนต์	นาที	ไมโครซีเมนต์
0	272	40	1,263
3	1,926	50	1,122
6	1,927	60	995
9	1,836	70	887
12	1,781	80	788
15	1,726	100	700
20	1,609	110	622
30	1,426	120	559
-	-	-	-

ภาคผนวก ก-3.2.2 ผลวิเคราะห์ฟังก์ชันการกระจายเรซินเดนซิทึมจากการศึกษาแบบการจัดเรียงท่อ
ยึดหยุ่นในถังเติมอากาศ

รูปแบบที่	ระยะเวลาที่เก็บโดยเฉลี่ย (\bar{t})	เลขเพคเลต (Pe)	สัมประสิทธิ์การแพร่ตามแนวการไหล (EzI)
	นาที	-	ม ² /วินาที
1	49.35	1.673E-03	0.652
2	50.30	1.620E-03	0.674
3	49.78	1.652E-03	0.661
4	49.48	1.664E-03	0.656



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ภาคผนวก ข-1 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับลักษณะของท่อยึดหุ่นตัวอย่างที่ 6.3

ปริมาตรโดยรวมของรูพรุน	0.0038	มล./ก.
น้ำหนักท่อยึดหุ่นยาว 0.1 ม.	12.9822	ก.
ความหนาผนังท่อ	2.70	มม.
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	15.875	มม.
ขนาดรูเติมอากาศ	0.19	มม.
จำนวนรูเติมอากาศ	644	

จำนวนรูเติมอากาศ (Orifice number, N_{OR}) สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$N_{OR} = \frac{\sum_{i=1}^n V_{OR}}{H_{OR} \times A_{OR}} = \frac{\phi_D \times W_D}{H_{OR} \times \left(\frac{\pi}{4} \times d_{OR}^2 \right)}$$

เมื่อ V_{OR} คือปริมาตรของรูเติมอากาศ (ลบ.ม.) H_{OR} คือ ความสูงของรูเติมอากาศหรือความหนาผนังท่อยึดหุ่น (ม.) A_{OR} คือพื้นที่หน้าตัดของรูเติมอากาศ W_D คือน้ำหนักของท่อยึดหุ่น (กก.) และ ϕ_D คืออัตราส่วนระหว่างปริมาตรรูเติมอากาศกับน้ำหนักท่อยึดหุ่น (ลบ.ม./กก.) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้โดยเครื่องวิเคราะห์พื้นผิวและปริมาตรรูพรุนของสาร (Surface area analyzer) รุ่น Quantachrome Sorptomatic (1990)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข-2 ความเข้มข้นของออกซิเจนละลาย ณ จุดอิ่มตัว (Saturated Dissolved Oxygen, C_s)

ลักษณะน้ำ	ความเข้มข้น	ความเข้มข้นของออกซิเจนละลาย ณ จุดอิ่มตัว (C_s)
	มก./ลิตร	มก./ลิตร
น้ำประปา	-	8.24
ดินขาว	50	8.24
	100	8.08
	200	8.20
เกลือ	7,500	8.11
	20,000	8.11
	35,000	8.13
น้ำทะเล	-	7.88
เซลล์จุลชีพ	1,000	7.30
	2,000	7.30
	3,000	6.50

ภาคผนวก ข-3 สมบัติของน้ำในสภาวะการเติมอากาศต่างๆ

ลักษณะน้ำ	ความเข้มข้น	ความหนาแน่น	ความตึงผิว	ความหนืด	ความหนืดเชิงจลน์
	มก./ลิตร	กก./ลบ.ม.	กก./วินาที ²	กก./ม.-วินาที	ม ² /วินาที
น้ำประปา	-	997	0.072	1.00E-03	1.01E-06
ดินขาว	50	981	0.072	1.00E-03	1.02E-06
	100	985	0.072	1.00E-03	1.02E-06
	200	989	0.072	1.00E-03	1.01E-06
เกลือ	7,500	991	0.072	1.00E-03	1.01E-06
	20,000	1,001	0.073	1.00E-03	1.00E-06
	35,000	1,009	0.074	1.00E-03	9.93E-07
น้ำทะเล	-	1,006.2	0.073	1.00E-03	2.53E-11
เซลล์จุลชีพ	1,000	1,000	0.063	1.00E-03	1.02E-06
	2,000	2,000	0.048	1.00E-03	1.02E-06
	3,000	3,000	0.044	1.00E-03	1.01E-06

ภาคผนวก ข-4 สมบัติของอากาศในสภาวะการเติมอากาศ

อุณหภูมิ	25	องศาเซลเซียส
ปริมาณออกซิเจน	23.18	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง	9.81	ม./วินาที ²
ความหนาแน่น	1.184	กก./ลบ.ม.
ความหนืด	1.85E-05	กก./ม.-วินาที

ภาคผนวก ข-5 รูปทรงถังเติมอากาศ

กว้าง	0.138	ม.
ยาว	0.277	ม.
สูง	0.345	ม.
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า	1.43	ม.
พื้นที่หน้าตัด	1.6143	ตร.ม.
ความสูงระดับน้ำ	0.215	ม.
ปริมาตรน้ำ	9.85E-03	ลบ.ม.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข-6 ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศชนิดต่างๆ

ชนิดอุปกรณ์เติมอากาศ	อัตราการไหลของอากาศ	ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน (SOTE) ที่ความลึก 4.5 ม.
	ลิตร/นาที	%
ท่อยึดหยุ่นตัวอย่างที่ 6.3 จัดเรียงรูปแบบที่ 2	60 - 100	12.36 - 15.08 (ความลึก 1.3 ม.)
เซรามิกชนิดจาน (Ceramic disks-grid)	10 - 100	25 - 35
เซรามิกชนิดโดม (Ceramic domes-grid)	15 - 70	27 - 37
เซรามิกชนิดแผ่น (Ceramic plates-grid)	0.6 - 1.5 (ม ³ /ม ²)	26 - 33
ท่อพลาสติกแข็งชนิดมีรูพรุน (Rigid porous plastic tubes)		
ติดตั้งแบบตาราง	70 - 110	28 - 32
ติดตั้งแบบแถวคู่	80 - 300	17 - 28
ติดตั้งแบบแถวเดี่ยว	-	13 - 25
ท่อพลาสติกอ่อนชนิดมีรูพรุน (Nonrigid porous plastic tubes)		
ติดตั้งแบบตาราง	30 - 200	26 - 36
ติดตั้งแบบแถวเดี่ยว	60 - 200	19 - 37
เพอร์ฟอเรทเมมเบรนชนิดท่อ (Perforated membrane tubes)		
ติดตั้งแบบตาราง	30 - 110	22 - 29
ติดตั้งแบบสี่จุดที่มุมถัง	600 - 1,700	19 - 24
ติดตั้งแบบแถวเดี่ยว	600 - 1,700	15 - 19
เพอร์ฟอเรทเมมเบรนชนิดแผง (Perforated membrane panels)	-	38 - 43
อุปกรณ์เติมอากาศชนิดเจ็ต (Jet aerator)	1,500 - 8,500	15 - 24
อุปกรณ์เติมอากาศชนิดไม่มีรูพรุน (Nonporous diffusers)		
ติดตั้งแบบแถวคู่	100 - 280	12 - 13
ติดตั้ง ณ จุดกึ่งกลาง	120 - 1,250	10 - 13
ติดตั้งแบบแถวเดี่ยว	280 - 1000	9 - 12

ที่มา : Metcalf และ Eddy, 2004

ภาคผนวก ข-7 ผลวิเคราะห์ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ

ภาคผนวก ข-7.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (d_B)

อัตราการไหล ของอากาศ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (มม.)									
	น้ำประปา	ดินขาว (มก./ลิตร)			เกลือ (มก./ลิตร)			เซลล์จุลชีพ (มก./ลิตร)		
ลิตร/นาที	-	50	100	200	7,500	20,000	35,000	1,000	2,000	3,000
1.0	2.124	1.944	1.891	1.647	1.119	1.063	0.984	1.171	1.157	1.249
2.0	2.242	1.909	-	-	-	-	-	-	-	-
4.0	2.300	1.916	1.960	1.967	1.341	1.163	0.976	1.458	1.533	1.511

ภาคผนวก ข-7.2 ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (U_B)

อัตราการไหล ของอากาศ	ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (ม./วินาที)									
	น้ำประปา	ดินขาว (มก./ลิตร)			เกลือ (มก./ลิตร)			เซลล์จุลชีพ (มก./ลิตร)		
ลิตร/นาที	-	50	100	200	7,500	20,000	35,000	1,000	2,000	3,000
1.0	0.219	0.212	0.268	0.271	0.130	0.120	0.113	0.185	0.122	0.126
2.0	0.266	0.275	-	-	-	-	-	-	-	-
4.0	0.273	0.325	0.290	0.264	0.139	0.124	0.113	0.242	0.233	0.242

ภาคผนวก ข-7.3 พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำ (a)

อัตราการไหล ของอากาศ	พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำ (1/ม.)									
	น้ำประปา	ดินขาว (มก./ลิตร)			เกลือ (มก./ลิตร)			เซลล์จุลชีพ (มก./ลิตร)		
ลิตร/นาที	-	50	100	200	7,500	20,000	35,000	1,000	2,000	3,000
1.0	4.675	5.294	4.308	4.887	14.966	17.053	19.598	10.052	15.363	13.862
2.0	7.299	8.300	-	-	-	-	-	-	-	-
4.0	13.824	13.949	15.269	16.734	46.184	59.996	78.253	24.569	24.248	23.767

ภาคผนวก ข-7.4 สัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว (k_L)

อัตราการไหล ของอากาศ	สัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว (ม./วินาที)									
	น้ำประปา	ดินขาว (มก./ลิตร)			เกลือ (มก./ลิตร)			เซลล์จุลชีพ (มก./ลิตร)		
ลิตร/นาที	-	50	100	200	7,500	20,000	35,000	1,000	2,000	3,000
1.0	5.78E-04	3.51E-04	6.52E-04	5.81E-04	2.70E-04	3.90E-04	3.44E-04	1.85E-04	7.81E-05	1.02E-04
2.0	6.18E-04	3.81E-04	-	-	-	-	-	-	-	-
4.0	4.98E-04	4.87E-04	4.30E-04	4.24E-04	2.25E-04	3.28E-04	1.48E-04	2.13E-04	1.84E-04	2.00E-04

ภาคผนวก ข-7.5 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (k_a)

อัตราการไหล ของอากาศ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (1/วินาที)									
	น้ำประปา	ดินขาว (มก./ลิตร)			เกลือ (มก./ลิตร)			เซลล์จุลชีพ (มก./ลิตร)		
ลิตร/นาที	-	50	100	200	7,500	20,000	35,000	1,000	2,000	3,000
0.5	9.48E-04	9.51E-04	1.48E-03	1.36E-03	1.95E-03	1.72E-03	1.62E-03	7.80E-04	5.91E-04	5.86E-04
1.0	2.70E-03	1.86E-03	2.81E-03	2.84E-03	4.04E-03	6.65E-03	6.75E-03	1.86E-03	1.20E-03	1.42E-03
2.0	4.51E-03	3.16E-03	4.17E-03	4.82E-03	7.37E-03	1.40E-02	1.01E-02	3.00E-03	2.29E-03	2.76E-03
4.0	6.89E-03	6.79E-03	6.57E-03	7.10E-03	1.04E-02	1.97E-02	1.16E-02	5.24E-03	4.46E-03	4.76E-03
5.0	8.36E-03	7.54E-03	8.02E-03	8.42E-03	1.85E-02	2.08E-02	2.00E-02	6.57E-03	5.26E-03	5.94E-03

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข-8 ผลทำนายตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ

ภาคผนวก ข-8.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (d_B)

อัตราการไหล ของอากาศ	สมการ d_B-1 (มม.)									
	น้ำประปา	ดินขาว (มก./ลิตร)			เกลือ (มก./ลิตร)			เซลล์จุลชีพ (มก./ลิตร)		
ลิตร/นาที	-	50	100	200	7,500	20,000	35,000	1,000	2,000	3,000
1.00	2.033	2.048	2.045	2.042	2.037	2.040	2.043	1.956	1.778	1.736
2.00	2.033	2.048	-	-	-	-	-	-	-	-
4.00	2.033	2.048	2.045	2.042	2.037	2.040	2.043	1.956	1.778	1.736

อัตราการไหล ของอากาศ	สมการ d_B-2 (มม.)									
	น้ำประปา	ดินขาว (มก./ลิตร)			เกลือ (มก./ลิตร)			เซลล์จุลชีพ (มก./ลิตร)		
ลิตร/นาที	-	50	100	200	7,500	20,000	35,000	1,000	2,000	3,000
1.00	7.621	7.621	7.621	7.621	7.621	7.621	7.621	7.621	7.621	7.621
2.00	9.601	9.601	-	-	-	-	-	-	-	-
4.00	12.097	12.097	12.097	12.097	12.097	12.097	12.097	12.097	12.097	12.097

อัตราการใช้ ของอากาศ	สมการ d_B-3 (มม.)									
	น้ำประปา	ดินขาว (มก./ลิตร)			เกลือ (มก./ลิตร)			เซลล์จุลินทรีย์ (มก./ลิตร)		
ลิตร/นาที	-	50	100	200	7,500	20,000	35,000	1,000	2,000	3,000
1.00	0.870	0.870	0.870	0.870	0.870	0.870	0.870	0.870	0.870	0.870
2.00	1.148	1.148	-	-	-	-	-	-	-	-
4.00	1.515	1.515	1.515	1.515	1.515	1.515	1.515	1.515	1.515	1.515

อัตราการใช้ ของอากาศ	สมการ d_B-4 (มม.)									
	น้ำประปา	ดินขาว (มก./ลิตร)			เกลือ (มก./ลิตร)			เซลล์จุลินทรีย์ (มก./ลิตร)		
ลิตร/นาที	-	50	100	200	7,500	20,000	35,000	1,000	2,000	3,000
1.00	1.243	1.243	1.243	1.243	1.243	1.243	1.243	1.337	1.420	1.458
2.00	1.292	1.292	-	-	-	-	-	-	-	-
4.00	1.380	1.380	1.380	1.380	1.380	1.380	1.380	1.528	1.560	1.592

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อัตราการไหล ของอากาศ	สมการ d_B-5 (มม.)									
	น้ำประปา	ดินขาว (มก./ลิตร)			เกลือ (มก./ลิตร)			เซลล์จุลชีพ (มก./ลิตร)		
ลิตร/นาที	-	50	100	200	7,500	20,000	35,000	1,000	2,000	3,000
1.00	2.334	2.334	2.334	2.334	2.334	2.334	2.334	2.334	2.334	2.334
2.00	2.608	2.608	-	-	-	-	-	-	-	-
4.00	2.914	2.914	2.914	2.914	2.914	2.914	2.914	2.914	2.914	2.914

อัตราการไหล ของอากาศ	สมการ d_B-6 (มม.)									
	น้ำประปา	ดินขาว (มก./ลิตร)			เกลือ (มก./ลิตร)			เซลล์จุลชีพ (มก./ลิตร)		
ลิตร/นาที	-	50	100	200	7,500	20,000	35,000	1,000	2,000	3,000
1.00	9.987	10.043	10.032	10.022	10.002	10.011	10.024	9.702	9.031	8.870
2.00	13.408	13.484	-	-	-	-	-	-	-	-
4.00	18.001	18.103	18.083	18.064	18.029	18.045	18.069	17.488	16.278	15.988

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อัตราการไหล ของอากาศ	สมการ d_p-7 (มม.)									
	น้ำประปา	ดินขาว (มก./ลิตร)			เกลือ (มก./ลิตร)			เซลล์จุลชีพ (มก./ลิตร)		
ลิตร/นาที	-	50	100	200	7,500	20,000	35,000	1,000	2,000	3,000
1.00	15.246	15.401	15.300	15.267	15.448	15.475	15.507	14.728	13.467	13.131
2.00	15.187	15.321	-	-	-	-	-	-	-	-
4.00	15.179	15.270	15.275	15.275	15.426	15.465	15.507	14.649	13.295	12.961

ภาคผนวก ข-8.2 ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (U_B)

อัตราการไหล ของอากาศ	สมการ U_B-1 (ม./วินาที)									
	น้ำประปา	ดินขาว (มก./ลิตร)			เกลือ (มก./ลิตร)			เซลล์จุลชีพ (มก./ลิตร)		
ลิตร/นาที	-	50	100	200	7,500	20,000	35,000	1,000	2,000	3,000
1.00	3.354	3.350	3.355	3.359	1.248	1.261	1.271	0.976	1.053	1.090
2.00	3.354	3.350	-	-	-	-	-	-	-	-
4.00	3.354	3.350	3.355	3.359	1.538	1.553	1.566	1.854	1.899	1.942

อัตราการใช้ ของอากาศ	สมการ U _B -2 (ม./วินาที)									
	น้ำประปา	ดินขาว (มก./ลิตร)			เกลือ (มก./ลิตร)			เซลล์จุลชีพ (มก./ลิตร)		
ลิตร/นาที	-	50	100	200	7,500	20,000	35,000	1,000	2,000	3,000
1.00	2.236	2.233	2.236	2.240	0.832	0.840	0.847	0.651	0.702	0.727
2.00	2.236	2.233	-	-	-	-	-	-	-	-
4.00	2.236	2.233	2.236	2.240	1.025	1.036	1.044	1.236	1.266	1.295

อัตราการใช้ ของอากาศ	สมการ U _B -3 (ม./วินาที)									
	น้ำประปา	ดินขาว (มก./ลิตร)			เกลือ (มก./ลิตร)			เซลล์จุลชีพ (มก./ลิตร)		
ลิตร/นาที	-	50	100	200	7,500	20,000	35,000	1,000	2,000	3,000
1.00	0.200	0.201	0.201	0.201	0.141	0.141	0.142	0.129	0.135	0.137
2.00	0.200	0.201	-	-	-	-	-	-	-	-
4.00	0.200	0.201	0.201	0.201	0.153	0.153	0.154	0.165	0.167	0.169

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อัตราการใช้ ของอากาศ	สมการ U_B-4 (ม./วินาที)									
	น้ำประปา	ดินขาว (มก./ลิตร)			เกลือ (มก./ลิตร)			เซลล์จุลชีพ (มก./ลิตร)		
ลิตร/นาที	-	50	100	200	7,500	20,000	35,000	1,000	2,000	3,000
1.00	0.285	0.287	0.286	0.286	0.351	0.351	0.352	0.349	0.300	0.288
2.00	0.285	0.287	-	-	-	-	-	-	-	-
4.00	0.285	0.287	0.286	0.286	0.335	0.335	0.336	0.303	0.265	0.256

อัตราการใช้ ของอากาศ	สมการ U_B-5 (ม./วินาที)									
	น้ำประปา	ดินขาว (มก./ลิตร)			เกลือ (มก./ลิตร)			เซลล์จุลชีพ (มก./ลิตร)		
ลิตร/นาที	-	50	100	200	7,500	20,000	35,000	1,000	2,000	3,000
1.00	0.325	0.325	0.325	0.325	0.104	0.104	0.104	0.090	0.090	0.090
2.00	0.325	0.325	-	-	-	-	-	-	-	-
4.00	0.325	0.325	0.325	0.325	0.122	0.122	0.122	0.135	0.135	0.135

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข-8.3 พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำ (a)

อัตราการไหล ของอากาศ	สมการ a-1 (1/ม.)									
	น้ำประปา	ดินขาว (มก./ลิตร)			เกลือ (มก./ลิตร)			เซลล์จุลชีพ (มก./ลิตร)		
ลิตร/นาที	-	50	100	200	7,500	20,000	35,000	1,000	2,000	3,000
1.00	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
2.00	0.017	0.017	-	-	-	-	-	-	-	-
4.00	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040

อัตราการไหล ของอากาศ	สมการ a-2 (1/ม.)									
	น้ำประปา	ดินขาว (มก./ลิตร)			เกลือ (มก./ลิตร)			เซลล์จุลชีพ (มก./ลิตร)		
ลิตร/นาที	-	50	100	200	7,500	20,000	35,000	1,000	2,000	3,000
1.00	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
2.00	0.070	0.070	-	-	-	-	-	-	-	-
4.00	0.140	0.140	0.140	0.140	0.140	0.140	0.140	0.140	0.141	0.141

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อัตราการใช้ ของอากาศ	สมการ a-3 (1/ม.)									
	น้ำประปา	ดินขาว (มก./ลิตร)			เกลือ (มก./ลิตร)			เซลล์จุลินทรีย์ (มก./ลิตร)		
ลิตร/นาที	-	50	100	200	7,500	20,000	35,000	1,000	2,000	3,000
1.00	1.335	1.318	1.322	1.325	1.330	1.332	1.332	1.390	1.548	1.592
2.00	3.166	3.126	-	-	-	-	-	-	-	-
4.00	7.486	7.393	7.412	7.432	7.459	7.468	7.469	7.793	8.683	8.926

อัตราการใช้ ของอากาศ	สมการ a-4 (1/ม.)									
	น้ำประปา	ดินขาว (มก./ลิตร)			เกลือ (มก./ลิตร)			เซลล์จุลินทรีย์ (มก./ลิตร)		
ลิตร/นาที	-	50	100	200	7,500	20,000	35,000	1,000	2,000	3,000
1.00	3.04E-12	3.04E-12	3.04E-12	3.04E-12	3.04E-12	3.04E-12	3.04E-12	3.04E-12	3.04E-12	3.04E-12
2.00	4.33E-12	4.33E-12	-	-	-	-	-	-	-	-
4.00	6.17E-12	6.17E-12	6.17E-12	6.17E-12	6.17E-12	6.17E-12	6.17E-12	6.17E-12	6.17E-12	6.17E-12

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อัตราการใช้ ของอากาศ	สมการ a-5 (1/ม.)									
	น้ำประปา	ดินขาว (มก./ลิตร)			เกลือ (มก./ลิตร)			เซลล์จุลินทรีย์ (มก./ลิตร)		
ลิตร/นาที่	-	50	100	200	7,500	20,000	35,000	1,000	2,000	3,000
1.00	4.283	4.251	4.257	4.263	7.005	7.005	7.005	7.889	7.605	7.482
2.00	8.554	8.490	-	-	-	-	-	-	-	-
4.00	17.058	16.931	16.955	16.979	25.130	25.130	25.130	22.798	22.556	22.328

อัตราการใช้ ของอากาศ	สมการ a-6 (1/ม.)									
	น้ำประปา	ดินขาว (มก./ลิตร)			เกลือ (มก./ลิตร)			เซลล์จุลินทรีย์ (มก./ลิตร)		
ลิตร/นาที่	-	50	100	200	7,500	20,000	35,000	1,000	2,000	3,000
1.00	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
2.00	0.011	0.011	-	-	-	-	-	-	-	-
4.00	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อัตราการใช้ ของอากาศ	สมการ a-7 (1/ม.)									
	น้ำประปา	ดินขาว (มก./ลิตร)			เกลือ (มก./ลิตร)			เซลล์จุลชีพ (มก./ลิตร)		
ลิตร/นาที	-	50	100	200	7,500	20,000	35,000	1,000	2,000	3,000
1.00	3.767	3.713	3.723	3.734	16.825	16.825	16.825	10.411	11.262	11.352
2.00	7.525	7.417	-	-	-	-	-	-	-	-
4.00	15.012	14.796	14.837	14.877	51.249	51.249	51.249	25.125	28.104	28.543

ภาคผนวก ข-8.4 สัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว (k_L)

อัตราการใช้ ของอากาศ	สมการ k_L-1 (ม./วินาที)									
	น้ำประปา	ดินขาว (มก./ลิตร)			เกลือ (มก./ลิตร)			เซลล์จุลชีพ (มก./ลิตร)		
ลิตร/นาที	-	50	100	200	7,500	20,000	35,000	1,000	2,000	3,000
1.0	5.94E-04	5.94E-04	5.94E-04	5.94E-04	4.30E-04	4.24E-04	4.20E-04	5.49E-04	4.48E-04	3.70E-04
2.0	5.94E-04	5.94E-04	-	-	-	-	-	-	-	-
4.0	5.94E-04	5.94E-04	5.94E-04	5.94E-04	4.42E-04	4.36E-04	4.32E-04	5.12E-04	4.22E-04	3.49E-04

อัตราการใช้ ของอากาศ	สมการ k_c-2 (ม./วินาที)									
	น้ำประปา	ดินขาว (มก./ลิตร)			เกลือ (มก./ลิตร)			เซลล์จุลินทรีย์ (มก./ลิตร)		
ลิตร/นาที	-	50	100	200	7,500	20,000	35,000	1,000	2,000	3,000
1.0	1.14E-04	1.13E-04	1.14E-04	1.14E-04	8.19E-05	8.05E-05	7.96E-05	9.97E-05	7.79E-05	6.06E-05
2.0	1.14E-04	1.13E-04	-	-	-	-	-	-	-	-
4.0	1.14E-04	1.13E-04	1.14E-04	1.14E-04	8.38E-05	8.24E-05	8.15E-05	9.24E-05	7.29E-05	5.69E-05

ภาคผนวก ข-8.5 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (k_a)

อัตราการใช้ ของอากาศ	สมการ k_a-1 (1/วินาที)									
	น้ำประปา	ดินขาว (มก./ลิตร)			เกลือ (มก./ลิตร)			เซลล์จุลินทรีย์ (มก./ลิตร)		
ลิตร/นาที	-	50	100	200	7,500	20,000	35,000	1,000	2,000	3,000
1.00	4.72E-05	4.72E-05	4.72E-05	4.72E-05	4.72E-05	4.72E-05	4.72E-05	4.72E-05	4.72E-05	4.72E-05
2.00	8.34E-05	8.34E-05	-	-	-	-	-	-	-	-
4.00	1.47E-04	1.47E-04	1.47E-04	1.47E-04	1.47E-04	1.47E-04	1.47E-04	1.47E-04	1.47E-04	1.47E-04

อัตราการใช้ ของอากาศ	สมการ k_a-2 (1/วินาที)									
	น้ำประปา	ดินขาว (มก./ลิตร)			เกลือ (มก./ลิตร)			เซลล์จุลินทรีย์ (มก./ลิตร)		
ลิตร/นาที	-	50	100	200	7,500	20,000	35,000	1,000	2,000	3,000
1.00	3.44E-03	3.44E-03	3.44E-03	3.44E-03	3.44E-03	3.44E-03	3.44E-03	3.44E-03	3.44E-03	3.44E-03
2.00	5.58E-03	5.58E-03	-	-	-	-	-	-	-	-
4.00	9.07E-03	9.07E-03	9.07E-03	9.07E-03	9.07E-03	9.07E-03	9.07E-03	9.07E-03	9.07E-03	9.07E-03

อัตราการใช้ ของอากาศ	สมการ k_a-3 (1/วินาที)									
	น้ำประปา	ดินขาว (มก./ลิตร)			เกลือ (มก./ลิตร)			เซลล์จุลินทรีย์ (มก./ลิตร)		
ลิตร/นาที	-	50	100	200	7,500	20,000	35,000	1,000	2,000	3,000
1.00	6.67E-04	6.60E-04	6.62E-04	6.64E-04	6.65E-04	6.69E-04	6.73E-04	6.62E-04	6.63E-04	6.64E-04
2.00	1.33E-03	1.32E-03	-	-	-	-	-	-	-	-
4.00	2.67E-03	2.64E-03	2.65E-03	2.66E-03	2.66E-03	2.68E-03	2.69E-03	2.65E-03	2.65E-03	2.65E-03

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อัตราการใช้ ของอากาศ	สมการ k_{La-4} (1/วินาที)									
	น้ำประปา	ดินขาว (มก./ลิตร)			เกลือ (มก./ลิตร)			เซลล์จุลินทรีย์ (มก./ลิตร)		
ลิตร/นาที	-	50	100	200	7,500	20,000	35,000	1,000	2,000	3,000
1.00	3.19E-04	2.19E-04	3.31E-04	3.35E-04	6.64E-04	1.09E-03	1.11E-03	3.31E-04	2.08E-04	2.44E-04
2.00	6.39E-04	4.45E-04	-	-	-	-	-	-	-	-
4.00	1.28E-03	1.25E-03	1.21E-03	1.31E-03	2.50E-03	4.73E-03	2.79E-03	1.18E-03	9.97E-04	1.06E-03

อัตราการใช้ ของอากาศ	สมการ k_{La-5} (1/วินาที)									
	น้ำประปา	ดินขาว (มก./ลิตร)			เกลือ (มก./ลิตร)			เซลล์จุลินทรีย์ (มก./ลิตร)		
ลิตร/นาที	-	50	100	200	7,500	20,000	35,000	1,000	2,000	3,000
1.00	1.67E-03	1.67E-03	1.67E-03	1.67E-03	4.31E-03	4.24E-03	4.20E-03	1.36E-03	1.28E-03	1.07E-03
2.00	3.35E-03	3.33E-03	-	-	-	-	-	-	-	-
4.00	6.67E-03	6.65E-03	6.65E-03	6.66E-03	1.35E-02	1.33E-02	1.32E-02	5.98E-03	5.56E-03	4.70E-03

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายนราพงศ์ หงส์ประสิทธิ์ เกิดวันที่ 27 สิงหาคม พ.ศ. 2526 สำเร็จการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษาที่ 2548 มีประสบการณ์ทำงานตำแหน่งวิศวกรสิ่งแวดล้อม ในบริษัทเอกชนนาน 2 ปี ก่อนเข้ารับการศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย