



การวิเคราะห์อุปกรณ์เคมีอากาศชนิดท่อปัดฝุ่นจากขอมลพิษประเภทบาง
ในกระบวนการเคมีอากาศ

นายบรรพต หงษ์ประสิทธิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

600 250741

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ



246305

การวิเคราะห์อุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่นจากของเสียประเภท...
ในกระบวนการเติมอากาศ

นายนราพงศ์ หงส์ประสิทธิ์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



5 1 7 0 3 4 5 5 2 1

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

Mr. Narapong Hongprasith

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

การวิเคราะห์อุปกรณ์เติมอากาศชนิดที่อึดหยุ่นจาก
ของเสียประเภทยางในกระบวนการเติมอากาศ

โดย

นายนราพงศ์ หงส์ประสิทธิ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

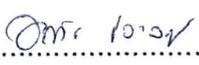
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล

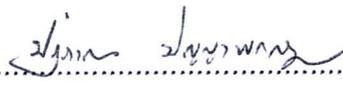
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

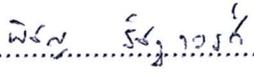

..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศนรินทร์วงศ์)

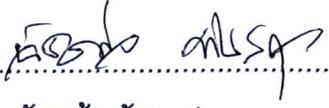
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


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


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


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


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


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ฉัตรแก้ว ตันสกุล)

นายบรรพต หงส์ประสิทธิ์ : การวิเคราะห์อุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่นจากของเสีย
ประเภทยางในกระบวนการเติมอากาศ. (ANALYSIS OF FLEXIBLE AERATION
DIFFUSER TUBE FROM RUBBER WASTE IN AERATION PROCESS) อ.ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล, 185 หน้า **246305**

งานวิจัยนี้ศึกษาแนวทางการประยุกต์ใช้ท่อยืดหยุ่นเป็นอุปกรณ์เติมอากาศแบบท่อ โดยศึกษา
สมบัติทางกายภาพของท่อยืดหยุ่น ได้แก่ ความหนาแน่นท่อ ความทนต่อแรงดึง (Tensile strength)
ความแข็ง (Hardness) และ ความยืด (Elongation) เพื่อเลือกตัวอย่างท่อที่เหมาะสม โดยเปรียบเทียบ
สมรรถภาพด้วยการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ($k_L a$) และประสิทธิภาพเชิงพลังงาน
ในถังเติมอากาศปริมาตรประมาณ 10 ลิตร โดยศึกษากลไกการถ่ายเทออกซิเจนและผลกระทบจาก
สารเจือปนในน้ำ (ดินขาว เกลือ และเซลล์จุลชีพ) ต่อการถ่ายเทออกซิเจนโดยวิเคราะห์ตัวแปรด้านการ
ถ่ายเทมวลสารและอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ รวมถึงวิเคราะห์การอุดตันและวิธีทำความสะอาดที่
เหมาะสม จากนั้นศึกษารูปแบบการจัดเรียงท่อที่เหมาะสมในถังเติมอากาศขนาด 2,500 ลิตร รูปแบบ
การกระจายของเรซิเดนซ์ไทม์ (RTD) และประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายค่า
สัมประสิทธิ์ $k_L a$ เพื่อให้ผลการวิจัยเป็นข้อมูลเบื้องต้นประกอบการออกแบบและประยุกต์ใช้งาน
อุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่นในกระบวนการเติมอากาศได้อย่างเหมาะสม

จากผลการทดลอง พบว่า ท่อยืดหยุ่นตัวอย่างที่ 6.3 มีความเหมาะสมในการประยุกต์เป็น
อุปกรณ์เติมอากาศแบบท่อ เนื่องจากมีสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมทั้งในด้านการถ่ายเทออกซิเจน
และในด้านการใช้พลังงาน การเติมอากาศในน้ำเกลือทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กและมีพื้นที่สัมผัส
จำเพาะมาก ส่วนน้ำที่มีเซลล์จุลชีพส่งผลรบกวนการซึมของออกซิเจนผ่านชั้นกลางของเหลวทำให้
สัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว (k_L) ลดลงอย่างมาก ซึ่งสามารถอธิบายได้โดย
การวิเคราะห์ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการถ่ายเทมวลสาร จากการวิเคราะห์การ
อุดตันของอุปกรณ์พบว่าไม่ควรหยุดเติมอากาศนานเกิน 3 วัน และควรทำความสะอาดด้วยวิธีการเป่า
ลมด้วยความดัน 3 บาร์ นาน 30 นาที สำหรับผลกระทบจากรูปแบบการจัดเรียงท่อเติมอากาศพบว่าให้
ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนประมาณร้อยละ 15.08 และให้รูปแบบการกระจายของเรซิเดนซ์ไทม์
ใกล้เคียงกัน โดยควรออกแบบโดยใช้ท่อยาว 7.5 ม. ต่อพื้นที่กั้นถังเติมอากาศ 1.33 ตร.ม. นอกจากนี้
จากการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์ $k_L a$ พบว่ามีความ
คลาดเคลื่อนน้อยกว่าร้อยละ 20

ภาควิชา วิศวกรรมศาสตร์สิ่งแวดล้อมลายมือชื่อนิสิต นายบรรพต หงส์ประสิทธิ์

สาขาวิชา วิศวกรรมศาสตร์สิ่งแวดล้อมลายมือชื่อ 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.

246305

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 P. S. P.

Academic Year: 2010

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ผู้ให้คำปรึกษา คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆของการวิจัยมาโดยตลอด

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัฎาวงศ์ และดร.ฉัตรแก้ว ต้นสกุล ที่กรุณาสละเวลาตรวจสอบเล่มวิทยานิพนธ์และร่วมเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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	ตัวอย่างยีสต์หมุ่น	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	การศึกษามลกระทบจากสภาวะการทำงานต่างๆต่อประสิทธิภาพ 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	การศึกษามลกระทบจากสภาวะการทำงานต่างๆต่อประสิทธิภาพ 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	ฟังก์ชันการกระจายเรติเทนชันไทม์ (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

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	ตารางแสดงสมบัติของท่อยึดหยุนในเบื้องต้นจากผู้ผลิต..... 48
ตารางที่ 3.2	ตารางแสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย และภาพประกอบ..... 50
ตารางที่ 3.3	ตารางแสดงสมบัติที่สนใจศึกษา และวิธีวิเคราะห์..... 51
ตารางที่ 3.4	ตารางแสดงลักษณะของน้ำที่สนใจศึกษา..... 52
ตารางที่ 4.1	สมบัติทางกายภาพของท่อยึดหยุน..... 64
ตารางที่ 4.2	ประสิทธิภาพและตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศของท่อยึดหยุน ตัวอย่างต่างๆ..... 75
ตารางที่ 4.3	สมบัติของน้ำที่ต้องการเติมอากาศ..... 76
ตารางที่ 4.4	ประสิทธิภาพและตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศของท่อยึดหยุน ในสภาวะการเติมอากาศต่างๆ..... 110
ตารางที่ 4.5	ตัวคูณปรับแก้ของการดูดตันของท่อยึดหยุนจากการศึกษาวิธีทำความสะอาด ที่เหมาะสม..... 110
ตารางที่ 4.6	ความดันขณะเติมอากาศของท่อยึดหยุนจากการศึกษาวิธีทำความสะอาด 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

สารบัญภาพ

	หน้า	
รูปที่ 1.1	แผนผังแสดงกระบวนการรีไซเคิลของเสียประเภทยาง และผลิตเป็นอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่น.....	2
รูปที่ 1.2	ภาพแสดงผลผลิตภัณฑ์อุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่นจากการรีไซเคิล 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	ภาพแสดงสมดุลของความดันขณะเกิดฟองอากาศบนอุปกรณ์เติมอากาศ 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	ภาพแสดงอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดพีทซ์ออริฟิส.....	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 (กักกันชัยพัฒนา).....	38
รูปที่ 2.21	ภาพแสดงอุปกรณ์เติมอากาศทางกลใต้น้ำในแนวนอน.....	39
รูปที่ 2.22	ภาพแสดงเครื่องเป่าอากาศชนิดเซนตริฟูกอล.....	40

	หน้า
รูปที่ 2.23	ภาพแสดงเครื่องเป่าอากาศชนิดโรตารีไลบ..... 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 เป็นระยะเวลาานาน..... 46
รูปที่ 3.1	ภาพแสดงท่อยึดหยุ่นที่ใช้เป็นอุปกรณ์เดิมอากาศ..... 49
รูปที่ 3.2	ภาพแสดงชุดอุปกรณ์วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ในห้องปฏิบัติการ..... 49
รูปที่ 3.3	ภาพจำลองแสดงรูปแบบการจัดเรียงท่ออย่างยึดหยุ่นในถังเดิมอากาศ..... 52
รูปที่ 3.4	ภาพแสดงการติดตั้งท่อยึดหยุ่นกับชุดอุปกรณ์วิเคราะห์ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน..... 53
รูปที่ 3.5	แผนผังแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำประปา..... 54
รูปที่ 3.6	แผนผังแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ การถ่ายเทออกซิเจนในสภาวะต่างๆ..... 55
รูปที่ 3.7	แผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษาการอุดตันจากการหยุดเดิมอากาศ..... 56
รูปที่ 3.8	ภาพแสดงตัวอย่างรูปแบบการจัดเรียงอุปกรณ์เดิมอากาศชนิดท่อยึดหยุ่น..... 57
รูปที่ 3.9	ภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์วิเคราะห์ฟังก์ชันการกระจายเรซิเดนซ์ใหม่..... 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	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันขณะเต็มอากาศและอัตราการไหลของอากาศ ของตัวอย่างท่อยึดหยุ่นที่วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ.....	66
รูปที่ 4.6	ภาพแสดงพื้นผิวผนังท่อและรูเต็มอากาศของท่อยึดหยุ่น.....	67
รูปที่ 4.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศ.....	69
รูปที่ 4.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันขณะเต็มอากาศและอัตราการไหลของอากาศ.....	70
รูปที่ 4.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลอยตัวของฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศ.....	71
รูปที่ 4.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศและน้ำและอัตราการไหลของอากาศ.....	72
รูปที่ 4.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศ.....	72
รูปที่ 4.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวและอัตราการไหลของอากาศ.....	73
รูปที่ 4.13	ภาพถ่ายฟองอากาศขณะเต็มอากาศด้วยตัวอย่างท่อยึดหยุ่นที่ 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	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยของแข็งแขวนลอยในรูปเซลล์จุลชีพ	84
รูปที่ 4.22	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยของแข็งแขวนลอยในรูปเซลล์จุลชีพ	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	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศและน้ำ และอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพ.....	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	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและอัตรา การไหล ของอากาศของการจัดเรียงท่อยึดหยุ่นรูปแบบต่างๆ.....	113
รูปที่ 4.54	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการ ไหลของอากาศของการจัดเรียงท่อยึดหยุ่นรูปแบบต่างๆ.....	113
รูปที่ 4.55	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันขณะเต็มอากาศและอัตราการไหล ของอากาศของการจัดเรียงท่อยึดหยุ่นรูปแบบต่างๆ.....	114
รูปที่ 4.56	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของ อากาศของการจัดเรียงท่อยึดหยุ่นรูปแบบต่างๆ.....	114
รูปที่ 4.57	กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ฟังก์ชันการกระจายเวลากักน้ำ.....	116
รูปที่ 4.58	กราฟแสดงผลการทำนายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ.....	117
รูปที่ 4.59	กราฟแสดงความแม่นยำของผลทำนายขนาดฟองอากาศ.....	119
รูปที่ 4.60	กราฟแสดงผลการทำนายความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ.....	120
รูปที่ 4.61	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลอยตัวของฟองอากาศกับขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ โดย Grace และ Wairegi (1986).....	122
รูปที่ 4.62	กราฟแสดงความแม่นยำของผลทำนายความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ.....	123
รูปที่ 4.63	กราฟแสดงผลการทำนายพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำ.....	123
รูปที่ 4.64	กราฟแสดงความแม่นยำของผลทำนายพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่าง ฟองอากาศกับน้ำ.....	125
รูปที่ 4.65	กราฟแสดงผลการทำนายสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว.....	126
รูปที่ 4.66	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลาง ของเหลวกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ.....	128
รูปที่ 4.67	กราฟแสดงความแม่นยำของผลทำนายค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวล ผ่านชั้นกลางของเหลว.....	129
รูปที่ 4.68	กราฟแสดงผลการทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน.....	130
รูปที่ 4.69	กราฟแสดงความแม่นยำของผลทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน.....	132