

การวิเคราะห์ระบบเติมอากาศแบบกระจายอากาศที่ใช้อุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว



นายตะวัน เจริญพิทยา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

ปีการศึกษา 2556

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตที่ส่งมาขึ้นทะเบียนที่สำนักงานบัณฑิตวิทยาลัย

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

ANALYSIS OF DIFFUSED AERATION SYSTEM USING LIQUID-FILM-FORMING
APPARATUS (LFFA)

Mr. Tawan Charoenpittaya

The logo of Chulalongkorn University, featuring a central emblem with a sunburst and a tiered structure, set against a light background.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

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 2013
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์ระบบเติมอากาศแบบกระจายอากาศที่ใช้
อุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว

โดย

นายตะวัน เจริญพิทยา

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล)

.....กรรมการ

(ดร.อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.มรุพัชร จำนงค์วงศ์)

ดาวัน เจริญพิทยา : การวิเคราะห์ระบบเติมอากาศแบบกระจายอากาศที่ใช้อุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว. (ANALYSIS OF DIFFUSED AERATION SYSTEM USING LIQUID-FILM-FORMING APPARATUS (LFFA)) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. พิสุทธิ์ เพียรมนกุล , 94 หน้า.

ระบบเติมอากาศแบบกระจายอากาศเป็นระบบการเติมอากาศที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เช่น การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ การบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น ดังนั้นการพัฒนาอุปกรณ์ในระบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเติมอากาศจึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจ อุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว (Liquid Film Forming Apparatus, LFFA) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ติดตั้งในระบบการเติมอากาศแบบกระจายอากาศ เป็นอุปกรณ์เรียบง่ายไม่ซับซ้อนแต่สามารถเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (Volumetric mass transfer coefficient, k_La) ในระบบเติมอากาศให้ดีขึ้น ทำการศึกษาการทำงานของอุปกรณ์ในระดับห้องปฏิบัติการในถังขนาด 190 ลิตรและ 330 ลิตร และทำการศึกษาในบ่อจริงในบ่อขนาด 90,000 ลิตร พบว่าอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวทำหน้าที่เพิ่มพื้นที่สัมผัสจำเพาะ (Specific interfacial area, a) ให้กับระบบ เนื่องจากฟองอากาศที่เข้าสู่อุปกรณ์จะเกิดความปั่นป่วนและทำให้ฟองอากาศอยู่ในระบบนานขึ้น ทั้งนี้ควรติดตั้งอุปกรณ์ในระบบที่มีหัวกระจายอากาศที่ให้ฟองอากาศขนาดเล็กจะช่วยเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารให้กับระบบได้ดีกว่าหัวกระจายอากาศที่ให้ฟองอากาศขนาดใหญ่ ความเร็วผิวของแก๊ส (Superficial gas velocity) ที่เหมาะสมในการใช้งานคือที่ 2.2 เซนติเมตรต่อวินาทีขึ้นไปสำหรับหน้าตัดของหัวอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว จะทำให้เพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนเพิ่มขึ้นประมาณ 11 - 37% ขึ้นอยู่กับขนาดของฟองอากาศ สำหรับผลการทดลองในบ่อจริงพบว่าการจัดเรียงอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวแบบ 4-D* เป็นรูปแบบการจัดวางอุปกรณ์ที่เหมาะสมในการใช้งาน โดยให้ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน (Standard Aeration Efficiency, SAE) ที่ 1.20 กิโลกรัม/ชั่วโมง-กิโลวัตต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา 2556

5470207921 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: LIQUID FILM FORMING APPARATUS (LFFA) / DIFFUSED AERATION SYSTEM / VOLUMETRIC MASS TRANSFER COEFFICIENT / SPECIFIC INTERFACIAL AREA / SUPERFICIAL GAS VELOCITY / STANDARD AERATION EFFICIENCY (SAE)

TAWAN CHAROENPITTAYA: ANALYSIS OF DIFFUSED AERATION SYSTEM USING LIQUID-FILM-FORMING APPARATUS (LFFA). ADVISOR: ASSOC. PROF. PISUT PAINMANAKUL, Ph.D., 94 pp.

Diffused aeration system is extensively use in current application, such as aquaculture and wastewater treatment, so improvement of instrument for increasing performance of the system is a striking topic. Liquid Film Forming Apparatus (LFFA) is a simple equipment installed in diffused aeration system. The volumetric mass transfer coefficient ($k_L a$) of the system can be significantly increased. Laboratory scale experiment were performed in 190 and 330 litre aeration tank, and pilot scale in 90,000 litre pond. Main mechanisms of LFFA are the development of turbulence of liquid and retention time of bubble: the interfacial area can be thus enhanced when compares with that obtained with the normal diffused air aeration. The $k_L a$ coefficients and oxygen transfer efficiencies obtained with fine bubble diffuser were higher than those obtained with coarse bubble diffuser. The proper superficial gas velocity for this system is more than 2.2 cm/s for cross section area of LFFA head; can be increased 11 - 37% of $k_L a$ depending on bubble size. From the results of actual pond, the 4-D* with partitions was proposed as the suitable pattern for the LFFA installation. The advantage could be obtained from highly energy performance with 1.20 kg/kW-h of Standard Aeration Efficiency (SAE).

Department: Environmental
Engineering

Student's Signature

Advisor's Signature

Field of Study: Environmental
Engineering

Academic Year: 2013

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถทำจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เพราะการช่วยเหลือและสนับสนุนจากหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อบุคคลเหล่านั้นดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ ให้แนวทางการปฏิบัติ จนข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ได้สำเร็จ

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ์ รัชฎาวงศ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพกุล ดร.อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ และดร.มรุพัชร จานงค์วงศ์ ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งให้คำชี้แนะในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์จนสำเร็จ

ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.ซีโยชิ อิมามิ ดร.มะลิวัลย์ คุดะโคที่คอยดูแลและให้การสนับสนุนการวิจัยนอกสถานที่

ขอขอบพระคุณนายนราพงศ์ หงส์ประสิทธิ์ที่คอยดูแลและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งนายไคกิ ฟุสะมาเอะ นายจิน ทานากะ และนายยูตะ อิชิจิ เพื่อนร่วมโครงการวิจัย ที่ให้ความช่วยเหลือในการวิจัยจนสำเร็จ

ขอขอบพระคุณรุ่นพี่รุ่นน้องและเพื่อนร่วมห้องปฏิบัติการทุกคนที่คอยช่วยเหลือ เป็นกำลังใจในระหว่างการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คณะเทคโนโลยีทางทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี และคณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุนอุดหนุนจากภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุนส่งเสริมการวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์ประจำปี 2554 และโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและการพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ ของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และทุกคนในครอบครัว ที่ได้ให้โอกาสทางการศึกษา คอยดูแล และให้กำลังใจจนสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	3
2.2 การเติมอากาศ (Aeration)	4
2.2.1 กฎของเฮนรี (Henry's Law).....	4
2.2.2 การถ่ายเทมวลสาร.....	5
2.2.3 การถ่ายเทมวลสารจากแก๊สไปยังของเหลว	6
2.3 การทดสอบสมรรถภาพของเครื่องเติมอากาศ	9
2.4 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทออกซิเจนและค่าปรับแก้.....	10
2.4.1 ความอิมิตัวของออกซิเจน.....	10
2.4.1.1 อุณหภูมิ.....	10
2.4.1.2 ค่าปรับแก้ น้ำเสีย.....	10
2.4.1.3 ความดันบารอมิเตอร์	11
2.4.1.4 ระยะเวลาจมตัว.....	11
2.4.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน.....	12
2.4.2.1 อุณหภูมิ.....	12
2.4.2.2 ค่าปรับแก้ น้ำเสีย.....	13

2.4.2.3 ค่าปรับแก้เนื่องจากสภาพเครื่องเติมอากาศ.....	13
2.5 สมการในการออกแบบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องเติมอากาศ.....	13
2.5.1 อัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (Standard Oxygen Transfer Rate, SOTR) ..	14
2.5.2 ความจุออกซิเจนจำเพาะ (Specific Oxygenation Capacity, OC).....	14
2.5.3 ประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน (Standard Aeration Efficiency, SAE)	14
2.5.4 ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (Standard Oxygen Transfer Efficiency, SOTE)	15
2.6 ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ (Bubble Hydrodynamic parameter).....	15
2.6.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (Bubble diameter, d_b)	15
2.6.2 ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (Bubble rising velocity, U_b).....	16
2.6.3 ระยะเวลาการเกิดฟองอากาศ (Bubble formation time, T_b) และความถี่ของการเกิดฟองอากาศ (Bubble formation frequency, f_b)	17
2.6.4 พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างก๊าซและของเหลว (Specific interfacial area, a)	18
2.7 การทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ	19
2.8 ระบบเติมอากาศแบบสร้างฟิล์มของเหลว	23
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย	28
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	28
3.1.1 วัสดุอุปกรณ์	28
3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	31
3.2 ตัวแปรที่สนใจศึกษา.....	31
3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	32
3.3.1 ศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารโดยหวักระจายอากาศแบบต่าง ๆ ในน้ำประปา	32
3.3.2 การวิเคราะห์หาตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์จากภาพถ่าย.....	34
3.3.3 การวิเคราะห์แยกส่วนระหว่างการถ่ายเทออกซิเจนของฟองอากาศและที่ผิวน้ำ	34
3.3.4 การศึกษากลไกการทำงานของอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว.....	35
3.3.5 การศึกษาลักษณะการเรียงชุดอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว.....	36

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	37
4.1 การศึกษาระบบการเติมอากาศแบบปกติ	37
4.1.1 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร	37
4.1.2 การศึกษาในรูปของตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ	41
4.2 การศึกษาเปรียบเทียบระหว่างระบบปกติกับระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว	45
4.3 การศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการถ่ายเทออกซิเจนของฟองอากาศและผิวน้ำ	53
4.3.1 การศึกษาการเติมอากาศแบบแยกส่วนด้วยแผ่นโฟม	54
4.3.2 การศึกษาแบบแยกส่วนด้วยการใช้ในโตรเจน	55
4.4 การศึกษากลไกการเติมอากาศในระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว	62
4.4.1 ลักษณะการกระจายตัวของฟองอากาศภายในอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว	62
4.4.2 การกระจายตัวของโฟมฟองอากาศที่ผิวน้ำ	68
4.4.3 ผลกระทบของตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและสภาวะที่เหมาะสมในการใช้งาน	70
4.4.4 การทดสอบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในระบบที่มีสารลดแรงตึงผิว	71
4.5 การศึกษารูปแบบการติดตั้งชุดอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว	74
4.5.1 การศึกษาระดับห้องปฏิบัติการ	74
4.5.2 การทดลองในบ่อขนาดใหญ่	77
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	81
5.1 สรุปผลการวิจัย	81
5.2 ข้อเสนอแนะ	82
รายการอ้างอิง	83
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	94

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ ฟองอากาศ (d_B)	20
ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่าความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (U_B)	21
ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่าพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่าง ของเหลวและก๊าซ (a).....	21
ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวล ผ่านชั้นกลางของเหลว (K_L).....	22
ตารางที่ 2.5 ตารางแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (K_{La}).....	22
ตารางที่ 2.6 ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและแนวทางการพัฒนา.....	27
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงลักษณะหัวกระจายอากาศที่นำมาทดลอง.....	37
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน โดยทำการ เปรียบเทียบกับระบบที่ใช้และไม่ใช้อุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว.....	49
ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงลักษณะของฟองอากาศภายในอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวในระบบที่ใช้หัว กระจายอากาศแบบแข็ง.....	63
ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงลักษณะของฟองอากาศภายในอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวในระบบที่ใช้หัว กระจายอากาศแบบท่ออย่าง.....	64
ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงลักษณะของฟองอากาศภายในอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวในระบบที่ใช้หัว กระจายอากาศแบบเมมเบรน.....	65

สารบัญภาพ

รูปที่ 2.1 ผลของปริมาณออกซิเจนละลายน้ำต่อสัตว์น้ำ (โชคชัย เหลืองธวัชพรานีต 2011).....	4
รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงทฤษฎีฟิล์มสองชั้น (Metcalf & Eddy, Tchobanoglous et al. 2003)...	7
รูปที่ 2.3 อุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว	23
รูปที่ 2.4 ภาพแสดงการทำงานของอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว.....	23
รูปที่ 3.1 ภาพแสดงลักษณะหัวกระจายอากาศแบบแข็ง (A).....	28
รูปที่ 3.2 ภาพแสดงลักษณะของอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวแบบทึบและแบบใส.....	29
รูปที่ 3.3 ชุดอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวแบบขาตั้งและแบบหมุนลอย	29
รูปที่ 3.4 ภาพบีมลมนขนาด 60 วัตต์และ 100 วัตต์.....	30
รูปที่ 3.5 ตัวอย่างการบันทึกค่าออกซิเจนละลาย	31
รูปที่ 3.6 ภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์โดยไม่มีอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว.....	33
รูปที่ 3.7 ภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ที่มีอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว	33
รูปที่ 3.8 แผนภาพแสดงวิธีการทดลองประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารของหัวกระจายอากาศแบบต่าง ๆ ในน้ำสะอาด.....	34
รูปที่ 3.9 ภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ที่มีการปิดแผ่นโพลีไวนิลที่ผิวหน้า.....	35
รูปที่ 3.10 ภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อศึกษาลักษณะของฟองอากาศ ภายในอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว	35
รูปที่ 3.11 ภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการและในบ่อขนาดใหญ่.....	36
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนกับอัตราการไหลของอากาศ.....	38
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐานกับอัตราการไหลของอากาศ.....	38
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับอัตราการไหลของอากาศ	39
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐานกับอัตราการไหลของอากาศ	40
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟองอากาศกับอัตราการไหลของอากาศ.....	41
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลอยตัวฟองอากาศกับอัตราการไหลของอากาศ.....	42
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่สัมผัสจำเพาะกับอัตราการไหลของอากาศ	42

รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลสารผ่านชั้นกลางของเหลวและอัตราการไหลของอากาศ..... 43

รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารผ่านชั้นกลางของเหลวกับเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ..... 44

รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของออกซิเจนละลายกับเวลา ในระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบเมมเบรนที่อัตราการไหลของอากาศ 30 ลิตรต่อนาที 45

รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนกับอัตราการไหลของอากาศในระบบที่มีการใช้หัวกระจายอากาศแบบแข็ง 46

รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนกับอัตราการไหลของอากาศ ในระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบท่ออย่าง 47

รูปที่ 4. 13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนกับอัตราการไหลของอากาศ ในระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบเมมเบรน..... 47

รูปที่ 4.14 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนกับอัตราการไหลของอากาศ โดยทำการเปรียบเทียบหัวกระจายอากาศแบบต่าง ๆ..... 48

รูปที่ 4.15 แผนภูมิแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐานกับอัตราการไหลของอากาศ โดยทำการเปรียบเทียบกับหัวกระจายอากาศชนิดต่าง ๆ..... 50

รูปที่ 4.16 แผนภูมิแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐานกับอัตราการไหลของอากาศ โดยทำการเปรียบเทียบกับหัวกระจายอากาศชนิดต่าง ๆ..... 52

รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนกับอัตราการไหลของอากาศ โดยเปรียบเทียบกับระบบปกติ ระบบที่ใช้อุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว และระบบที่ใช้โฟมปิดที่ผิวหน้า โดยเทียบกับหัวกระจายอากาศสองชนิด 55

รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของออกซิเจนละลายกับเวลาที่อัตราการไหลของอากาศต่าง ๆ ในระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบแข็งและไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว 57

รูปที่ 4.19 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนเมื่อแยกผลกระทบระหว่างฟองอากาศและที่ผิวหน้า เปรียบเทียบระหว่างระบบติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวและไม่ได้ติดตั้ง ของระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบแข็ง..... 58

รูปที่ 4.20 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนเมื่อแยกผลกระทบระหว่างฟองอากาศและที่ผิวหน้า เปรียบเทียบระหว่างระบบติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวและไม่ได้ติดตั้งของระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบเมมเบรน 59

รูปที่ 4.21 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนกับอัตราการไหลของอากาศ โดยแยกส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของฟองอากาศและที่ผิวหน้า ในระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบแข็ง 60

รูปที่ 4.22 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนกับอัตราการไหลของอากาศ โดยแยกส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของฟองอากาศและที่ผิวหน้า ในระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบเมมเบรน.....	61
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการสะสมของฟองอากาศภายในอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวกับอัตราการไหลของอากาศ.....	66
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับอัตราการไหลของอากาศ.....	67
รูปที่ 4.25 ภาพแสดงลักษณะการกระจายตัวของฟองอากาศบริเวณผิวน้ำโดยเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์ (ซ้าย) และระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว (ขวา).....	68
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของโพลีฟองอากาศกับอัตราการไหลของอากาศ.....	68
รูปที่ 4.27 แสดงลักษณะการถ่ายเทออกซิเจนของระบบสร้างฟิล์มของเหลว.....	69
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่สัมผัสจำเพาะเพิ่มเติม (a_+) กับอัตราการไหลของอากาศ.....	70
รูปที่ 4.29 แสดงสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในของเหลวที่เติมสารลดแรงตึงผิว 0.01 CMC ในระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบเมมเบรน.....	72
รูปที่ 4.30 แสดงสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในของเหลวที่เติมสารลดแรงตึงผิวความเข้มข้น 0.1 CMC และใช้หัวกระจายอากาศแบบเมมเบรน.....	73
รูปที่ 4.31 แสดงลักษณะการจัดเรียงชุดอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวในถังระดับห้องปฏิบัติการ.....	75
รูปที่ 4.32 แผนภูมิแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของการจัดวางอุปกรณ์แบบต่าง ๆ.....	76
รูปที่ 4.33 แผนภูมิแสดงประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน ของการจัดวางอุปกรณ์แบบต่าง ๆ.....	76
รูปที่ 4.34 ภาพแสดงการจัดเรียงชุดอุปกรณ์ในบ่อขนาดใหญ่.....	78
รูปที่ 4.35 แผนภูมิแสดงสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของการจัดเรียงอุปกรณ์แบบต่าง ๆ ในแต่ละระดับความลึก.....	78
รูปที่ 4.36 แผนภูมิแสดงประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐานของการจัดเรียงอุปกรณ์แบบต่าง ๆ ในแต่ละระดับความลึก.....	79
รูปที่ 4.37 แผนภูมิแสดงประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐานของการจัดเรียงอุปกรณ์แบบต่าง ๆ ในแต่ละระดับความลึก.....	79
รูปที่ 4.38 แนวทางการติดตั้งชุดอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว.....	80
รูปที่ 4.39 แนวทางการติดตั้งชุดอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวในบ่อขนาดใหญ่.....	80

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

จากการเพิ่มขึ้นของปริมาณประชากรโลกในปัจจุบัน ทำให้ความต้องการอาหารสูงขึ้นตามไปด้วย สัตว์น้ำถือว่าเป็นแหล่งอาหารหนึ่งที่สำคัญของมนุษย์ การจับสัตว์น้ำตามธรรมชาติเพื่อนำมาบริโภคนั้นไม่สามารถตอบสนองความต้องการอาหารของมนุษย์ได้ทั้งหมด จึงมีการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (Aquaculture) เพื่อเพิ่มผลผลิตให้เพียงพอต่อการบริโภค ในประเทศไทยมีการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในหลายพื้นที่ มีทั้งทำเพื่อบริโภคภายในชุมชน รวมถึงเพื่อผลิตส่งตลาดภายในประเทศและต่างประเทศ ในการผลิตเพื่อส่งขายตลาดภายนอกนั้นต้องการการเลี้ยงในปริมาณที่สูง ความหนาแน่นของสัตว์น้ำมีมากกว่าการเพาะเลี้ยงตามธรรมชาติ จึงต้องมีการเติมอากาศเพื่อตอบสนองต่อความต้องการออกซิเจนของสัตว์น้ำที่ทำการเพาะเลี้ยง

กระบวนการเติมอากาศ (Aeration process) คือ กระบวนการถ่ายเทออกซิเจน (Oxygen transfer) จากสถานะก๊าซไปสู่สถานะของเหลวเพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจนที่ละลายในของเหลวให้สูงขึ้น โดยอุปกรณ์ที่นิยมใช้ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีอยู่สองประเภทใหญ่ ๆ คือ ระบบอุปกรณ์กระจายอากาศ และระบบอุปกรณ์เติมอากาศทางกล โดยอุปกรณ์เติมอากาศทางกลนั้นนิยมใช้ในบ่อเพาะเลี้ยงขนาดใหญ่และต้องการการไหลเวียนของน้ำสูง เช่น ในบ่อเลี้ยงกุ้ง เป็นต้น ส่วนระบบอุปกรณ์กระจายอากาศนั้นเหมาะสำหรับในการอนุบาลสัตว์น้ำขนาดเล็กหรือระบบที่ต้องการการไหลเวียนของน้ำน้อย ด้วยข้อแตกต่างของอุปกรณ์สองชนิดนี้การพัฒนาอุปกรณ์ให้มีประสิทธิภาพสูงและเหมาะสมแก่การใช้งานจริงจึงเป็นเรื่องสำคัญ

ระบบการเติมอากาศแบบกระจายอากาศสามารถแบ่งกลไกในการถ่ายเทออกซิเจนเป็นสองส่วนคือ การถ่ายเทออกซิเจนจากฟองอากาศ และการถ่ายเทออกซิเจนบริเวณผิวน้ำ โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนบริเวณผิวน้ำจะมีค่า 11-37% ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนทั้งหมด ขึ้นอยู่กับลักษณะการเติมอากาศและชนิดของหัวกระจายอากาศ (McWhirter and Hutter 1989) นอกจากนี้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนบริเวณผิวน้ำยังมีค่า 59-85% เมื่อเทียบกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทของฟองอากาศ (DeMoyer, Schierholz et al. 2003) ทำให้มีการศึกษาเพื่อพัฒนาการเติมอากาศแบบกระจายอากาศด้วยอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว (Liquid-Film-Forming Apparatus, LFFA) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเติมอากาศบริเวณผิวน้ำ อุปกรณ์ที่ใช้เป็นอุปกรณ์ที่ไม่ต้องการพลังงานเพิ่มเติม โดยหลังจากติดตั้งอุปกรณ์นี้สามารถเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนได้ประมาณ 37% (Imai and Zhu 2011) อย่างไรก็ตาม การศึกษาเพิ่มเติมนับว่ามีความจำเป็น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเกี่ยวกับการประยุกต์ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เพื่อเข้าใจถึงกลไกการถ่ายเทมวลสารที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจนทั้งในด้านการเลือกใช้และติดตั้งอุปกรณ์ รวมไปถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการปนเปื้อนของสารหรือองค์ประกอบประเภทต่างๆ ภายในเฟสของเหลว

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจไปที่การศึกษากลไกการเติมอากาศของระบบกระจายอากาศที่มีการติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว ในการศึกษาจะทำการเปรียบเทียบระหว่างระบบทั่วไปกับระบบติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว เปรียบเทียบผลกระทบระหว่างหัวกระจายอากาศแบบหยาบและละเอียด กลไกการทำงานของระบบเมื่อติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว การถ่ายเทออกซิเจนในบ่อจริงและรูปแบบการจัดวางอุปกรณ์ที่เหมาะสมกับการใช้งาน ทั้งนี้เพื่อที่จะได้ทราบถึงแนวทางการออกแบบระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบระบบเติมอากาศแบบกระจายอากาศที่มีการติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวกับระบบกระจายอากาศทั่วไป
- 2) เพื่อศึกษากลไกการทำงานของอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว
- 3) เพื่อศึกษารูปแบบการจัดวางชุดอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวในการใช้งานในบ่อขนาดใหญ่ เพื่อเสนอแนวทางการติดตั้งชุดอุปกรณ์ในการใช้งานจริง

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1) ศึกษาการถ่ายเทมวลสารของอุปกรณ์เติมอากาศแบบกระจายอากาศในระดับห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานระหว่างอุปกรณ์เติมอากาศแบบกระจายอากาศแบบทั่วไปกับแบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว
- 2) ศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนแยกส่วนกันระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของฟองอากาศและที่ผิวหน้าโดยการใช้แผ่นโฟมปิดที่ผิวหน้าและการใช้ในโตรเจนเติมแทนอากาศ
- 3) ทดสอบประสิทธิภาพการเติมอากาศของอุปกรณ์เติมอากาศที่มีอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวในบ่อทดลองจริงที่คณะเทคโนโลยีทางทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา เพื่อหารูปแบบการจัดเรียงชุดอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวที่เหมาะสม
- 4) ใช้ผลการทดลองที่ได้ในการนำเสนอแนวทางการใช้งานอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถอธิบายและเปรียบเทียบกลไกการเติมอากาศแบบกระจายอากาศแบบทั่วไปกับแบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวได้
- 2) สามารถทราบถึงแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบและประยุกต์ใช้อุปกรณ์เติมอากาศในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

บทที่ 2

เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

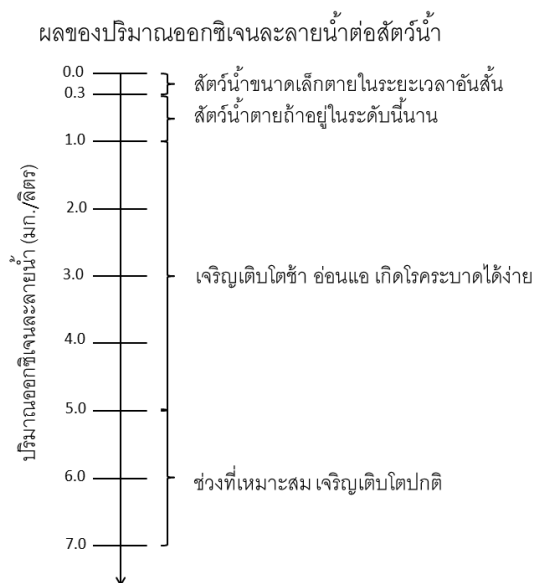
2.1 การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมาจากรากศัพท์ภาษาอังกฤษ 2 คำ คือ แอควา (aqua) และคัลเชอร์ (culture) แอควาแปลว่าน้ำ คัลเชอร์แปลว่าการเพาะหรือการเลี้ยง ดังนั้นการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจึงหมายรวมถึงสองกิจกรรม คือ การเพาะและการเลี้ยงสัตว์น้ำนั่นเอง การเพาะสัตว์น้ำ หมายถึง การขยายพันธุ์สัตว์น้ำ การทำให้พ่อแม่พันธุ์สามารถสืบพันธุ์ วางไข่และมีลูกพันธุ์จำนวนมากขึ้น ส่วนการเลี้ยงสัตว์น้ำหมายถึง การทำให้สัตว์น้ำเจริญเติบโตมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นจากวัยอ่อนสู่ตัวเต็มวัย (โชคชัย เหลืองธูวปราณีต 2011)

การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำนั้นมีความสำคัญต่อโลกนี้เป็นอย่างมาก เนื่องจากจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้นในแต่ละปี ทำให้ความต้องการอาหารของมนุษย์ในโลกนี้มีเพิ่มมากขึ้น แหล่งอาหารจากธรรมชาติเพียงอย่างเดียวจึงไม่เพียงพอต่อความต้องการของมนุษย์ สัตว์น้ำเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ใช้เป็นแหล่งอาหารของมนุษย์ การจับสัตว์น้ำตามธรรมชาตินั้นค่อนข้างมีจำกัดและอาศัยช่วงฤดูกาลที่เหมาะสม ไม่สามารถเร่งรัดหรือเพิ่มปริมาณตามความต้องการได้ จึงต้องมีการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเกิดขึ้น เพื่อให้สามารถควบคุมและเพิ่มปริมาณสัตว์น้ำได้ตามที่ต้องการ

การเติมอากาศก็เป็นปัจจัยสำคัญของการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เนื่องจากสัตว์น้ำที่เพาะเลี้ยงกันนั้นส่วนใหญ่ต้องการออกซิเจนในกระบวนการสร้างพลังงานดังนั้นการควบคุมปริมาณออกซิเจนในแหล่งน้ำจึงมีความสำคัญมาก เพราะการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในเชิงการค้านั้นค่อนข้างจะมีการเลี้ยงอย่างหนาแน่นมากกว่าธรรมชาติมาก ทำให้ความต้องการออกซิเจนในแหล่งน้ำจึงเพิ่มขึ้นด้วย การใช้อุปกรณ์เติมอากาศเพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายในแหล่งน้ำจึงมีความจำเป็นอย่างมาก ทั้งนี้การเติมอากาศก็เป็นต้นทุนที่สำคัญของการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ การพัฒนาอุปกรณ์เติมอากาศให้มีประสิทธิภาพสูง และประหยัดพลังงานจึงเป็นหนึ่งในหัวข้อที่น่าสนใจ

จากรูปที่ 3.1 แสดงถึงความต้องการออกซิเจนละลายของสัตว์น้ำ สัตว์น้ำโดยทั่วไปจะต้องการออกซิเจนละลายตั้งแต่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตรขึ้นไป หากมีออกซิเจนละลายต่ำกว่านั้นจะส่งผลทำให้สัตว์น้ำเติบโตช้าและมีโอกาสติดโรคได้ง่าย ในกรณีที่ออกซิเจนละลายมีค่าต่ำมาก ตั้งแต่ 1 มิลลิกรัมต่อลิตรลงไปสัตว์น้ำอาจจะตายได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของสัตว์น้ำและความแข็งแรงของสัตว์น้ำด้วย นอกจากนี้ปริมาณออกซิเจนละลายยังมีผลต่อการรักษาคุณภาพน้ำ เช่น การการเติมอากาศเพื่อรักษาระดับออกซิเจนละลายภายในน้ำให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสมจึงเป็นเรื่องที่สำคัญ



รูปที่ 2.1 ผลของปริมาณออกซิเจนละลายน้ำต่อสัตว์น้ำ (โชคชัย เหลืองธวัชพราณี 2011)

2.2 การเติมอากาศ (Aeration)

การเติมอากาศคือกระบวนการที่ช่วยทำให้อากาศเข้าไปสัมผัสกับน้ำได้มากขึ้น มีจุดประสงค์ในการเติมแก๊สที่มีมากในอากาศให้ละลายอยู่ในรูปของสารละลายหรือทำการไล่แก๊สที่มีอยู่น้อยในอากาศให้ออกมาจากเนื้อของเหลว ในการศึกษานี้จะมุ่งเน้นไปที่การเติมออกซิเจนในอากาศให้ลงไปสู่น้ำในรูปของออกซิเจนละลาย (Dissolved Oxygen, DO) ซึ่งกลไกในการเติมอากาศนั้นมีการศึกษามาอย่างยาวนาน ปริมาณออกซิเจนละลายสูงสุดที่เป็นไปได้นั้นจะเป็นไปตามกฎของเฮนรี (Henry's law)

2.2.1 กฎของเฮนรี (Henry's Law)

กฎของเฮนรีได้อธิบายถึงความเข้มข้นของแก๊สที่ละลายในน้ำในสภาวะสมดุล โดยค่าความเข้มข้นนั้นมีความสัมพันธ์กับชนิดและความดันย่อยของแก๊สที่สัมผัสกับผิวของของเหลว ความสัมพันธ์ระหว่างเศษส่วนโมลของแก๊สในอากาศกับเศษส่วนโมลของแก๊สที่ละลายในของเหลวสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ (Metcalf & Eddy, Tchobanoglous et al. 2003)

$$P_g = \frac{H}{P_T} \cdot x_g \quad (2.1)$$

เมื่อ P_g คือ เศษส่วนโมลของแก๊สในอากาศ หน่วยคือ โมลแก๊ส/โมลอากาศ

H คือ ค่าคงที่ของเฮนรี หน่วยคือ $\frac{\text{บรรยากาศ (โมลแก๊ส/โมลอากาศ)}}{(\text{โมลแก๊ส/โมลน้ำ})}$

P_T คือ ความดันทั้งหมด หน่วยคือบรรยากาศ (ปกติแล้วจะมีค่าประมาณ 1

บรรยากาศ)

x_g คือเศษส่วนโมลของแก๊สในน้ำ หน่วยคือ โมลแก๊ส/โมลน้ำ

ซึ่งเศษส่วนโมลของแก๊สในอากาศนั้นขึ้นอยู่กับความดันย่อยของแก๊สนั้น ๆ ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังนี้

$$P_g = Hx_g \quad (2.2)$$

เมื่อ P_g คือความดันย่อยของแก๊ส หน่วย บรรยากาศ

ถึงอย่างไรก็ดี กฎของเฮนรีนั้นได้อธิบายถึงความเข้มข้นของแก๊สที่ละลายในของเหลวในสถานะสมดุลเท่านั้น ไม่ได้อธิบายถึงความเข้มข้นที่เปลี่ยนไปเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

2.2.2 การถ่ายเทมวลสาร

การถ่ายเทมวลสารคือการเคลื่อนที่ของโมเลกุลหรือก้อนมวลจากที่หนึ่งไปสู่อีกที่หนึ่งโดยแรงขับเคลื่อน โดยเฉพาะการเติมอากาศนั้นจะกล่าวถึงการถ่ายเทมวลสารระหว่างสองสถานะนั้นคือการถ่ายเทโมเลกุลจากสถานะแก๊สไปสู่สถานะของเหลว เราสามารถสรุปขั้นตอนการถ่ายเทได้อย่างง่าย 3 ขั้นตอน คือ (1) โมเลกุลของออกซิเจนในแก๊สไปสู่ (2) พื้นผิวสัมผัสระหว่างแก๊สและของเหลว และสุดท้ายถึงเคลื่อนจากผิวสัมผัสไปสู่ (3) เนื้อของของเหลวนั่นเอง

กฎข้อที่หนึ่งของการแพร่ของฟิค (Fick's first law of diffusion) นั้นเป็นการอธิบายพลักซ์ของการแพร่ โดยสมมติว่าการแพร่นั้นอยู่ภายใต้สภาวะคงที่ และสันนิษฐานว่าสารจะแพร่จากความบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่บริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำซึ่งเราสามารถอธิบายการถ่ายเทมวลสารด้วยสมการดังนี้

$$r = -D_m \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.3)$$

เมื่อ r คือ อัตราการถ่ายเทมวลสารต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา

D_m คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุลในทิศทาง x

C คือ ความเข้มข้นของสารที่ถูกถ่ายเท

X คือ ระยะทาง

สัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุลจะมีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของอนุภาค ตามกฎการแพร่ของสไตรก สำหรับอนุภาคทรงกลมสัมประสิทธิ์การแพร่สามารถอธิบายได้ดังนี้ (Shaw 1992)

$$D = \frac{kT}{6\pi\eta r_p} = \frac{RT}{6\pi\eta r_p N} \quad (2.4)$$

เมื่อ	D	คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ หน่วยตารางเมตร/วินาที
	k	คือ ค่าคงที่ของโบลซ์มาน มีค่า 1.3805×10^{-23} จูล/เคลวิน
	T	คือ อุณหภูมิ หน่วยเคลวิน
	R	คือ ค่าคงตัวของแก๊ส มีค่า 8.3145 จูล/โมล-เคลวิน
	η	คือ ความหนืดพลวัต หน่วยนิวตัน-วินาที/ตารางเมตร
	r_p	คือ รัศมีของอนุภาค หน่วยเมตร
	N	คือ เลขอวกาโตร มีค่า 6.02×10^{23} โมเลกุล/กรัม-โมล

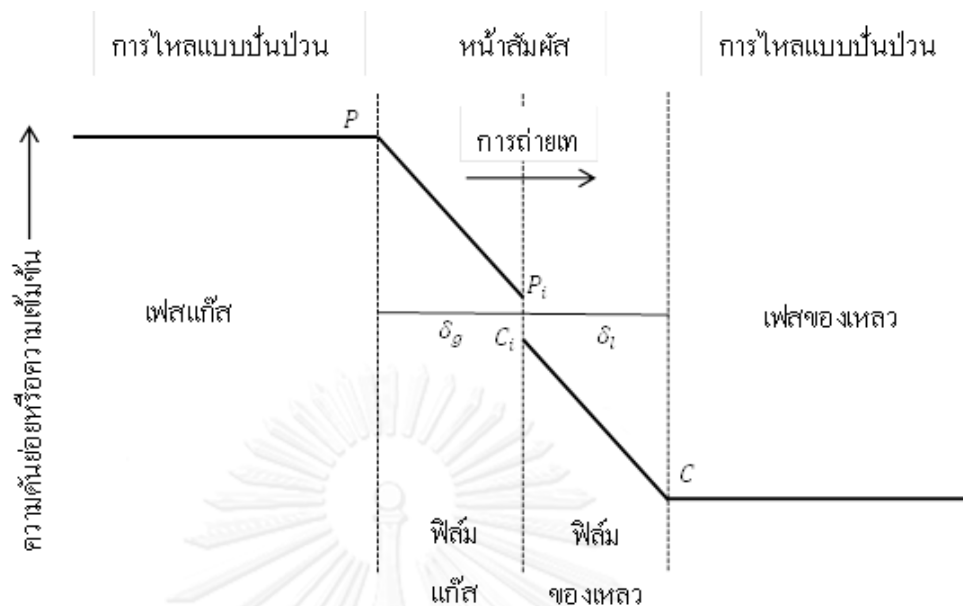
ซึ่งจากสมการข้างต้นนี้พบว่าอนุภาคยิ่งเล็กสัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุลก็จะยิ่งเพิ่มสูงขึ้น โดยค่าที่ได้นั้นจะขึ้นกับสภาพการไหลของของเหลวว่ามีการปั่นป่วนมากน้อยเพียงใด

2.2.3 การถ่ายเทมวลสารจากแก๊สไปยังของเหลว

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันมีการเสนอทฤษฎีเพื่ออธิบายกลไกของการถ่ายเทมวลสารระหว่างแก๊สกับของเหลว ซึ่งทฤษฎีที่เรียบง่ายและใช้กันทั่วไปก็คือทฤษฎีฟิล์มสองชั้น (two film theory) ที่เสนอโดยลิวอิสและวิทแมน (Lewis and Whitman 1924) ถึงแม้ว่าจะมีการเสนอแบบจำลองชนิดอื่นที่ซับซ้อนและสามารถอธิบายในเชิงสมการได้ดีกว่า แต่ทฤษฎีฟิล์มสองชั้นก็ยังคงได้รับความนิยมเนื่องจากปรากฏการณ์ส่วนใหญ่สามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีนี้และง่ายต่อการอธิบายนั่นเอง

ทฤษฎีฟิล์มสองชั้นนี้เป็นทฤษฎีที่กล่าวถึงแบบจำลองที่มีชั้นฟิล์มสองชั้นบริเวณชั้นรอยต่อระหว่างของเหลวกับแก๊ส ซึ่งโดยทั่วไปจะอธิบายถึงสองกรณีคือ การดูดซับ (absorption) และการคาย (desorption) แต่สำหรับกระบวนการเติมอากาศนั้นจะใช้ทฤษฎีนี้ในการอธิบายถึงกลไกการดูดซับออกซิเจนของของเหลว

กลไกการเติมอากาศนั้นเริ่มจากโมเลกุลของออกซิเจนเดินทางในชั้นแก๊สมายังรอยต่อระหว่างแก๊สกับของเหลว ซึ่งบริเวณนี้จะมีฟิล์มบาง ๆ อยู่สองชั้นคือเป็นฟิล์มชั้นแก๊สและฟิล์มชั้นของเหลว โดยฟิล์มที่บริเวณนี้มีความต้านทานทำให้แก๊สแพร่มายังชั้นของเหลวได้น้อยลง เมื่อโมเลกุลออกซิเจนที่ผ่านชั้นฟิล์มสองชั้นข้างต้นแล้วก็จะเข้ามาสู่ในชั้นของเหลวในรูปของออกซิเจนละลาย จากนั้นจึงแพร่ไปยังเนื้อของเหลวบริเวณอื่นต่อไป



รูปที่ 2. 2 แผนภาพแสดงทฤษฎีฟิล์มสองชั้น (Metcalf & Eddy, Tchobanoglous et al. 2003)

ในสภาวะคงที่ (steady state) ของอัตราการถ่ายเทมวลสารของแก๊สผ่านชั้นฟิล์มแก๊สจะเท่ากับอัตราการถ่ายเทผ่านชั้นฟิล์มของเหลวเมื่อใช้สมการของฟิคจะสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$r = k_G(P_G - P_i) = k_L(C_i - C_L) \quad (2.5)$$

เมื่อ r คือ อัตราการถ่ายเทมวลสารต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา

k_G คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของฟิล์มแก๊ส

P_G คือ ความดันย่อยของสารที่เราสนใจในแก๊ส

P_i คือ ความดันย่อยของสารที่เราสนใจบริเวณหน้าสัมผัสในภาวะสมดุลของความ

เข้มข้น C_i ของสารที่เราสนใจในของเหลว

k_L คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของฟิล์มของเหลว

C_i คือ ความเข้มข้นของสารที่เราสนใจบริเวณหน้าสัมผัสในภาวะสมดุลกับความดัน

ย่อย P_i ของสารที่เราสนใจในแก๊ส

C_L คือ ความเข้มข้นของสารที่เราสนใจในของเหลว

สังเกตได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของฟิล์มแก๊สและฟิล์มของเหลวนั้นขึ้นอยู่กับสถานะของหน้าผิวสัมผัส พจน์ $(P_G - P_i)$ และ $(C_i - C_L)$ แทนแรงขับเคลื่อนเนื่องจากการถ่ายเทมวลสารในเฟสแก๊สและเฟสของเหลว เมื่อนำค่าความหนาของชั้นฟิล์มของฟิล์มแก๊สและฟิล์มของเหลว

(δ_g และ δ_l) ไปหารก็จะได้ค่าแรงขับในรูปของหน่วยความหนา ดังนั้นหากลดค่าความหนาลงก็จะทำให้อัตราการถ่ายเทมวลสารเพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ดี เนื่องจากการวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทฟิล์มแก๊สและฟิล์มของเหลวที่หน้าสัมผัสนั้นทำได้ยาก โดยทั่วไปเราจึงใช้เป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทของแก๊สและของเหลวโดยรวมแทน ขึ้นอยู่กับสถานะการถ่ายเท ซึ่งในที่นี้เราจะพิจารณาการถ่ายเทจากแก๊สไปสู่ของเหลวจะได้

$$r = K_L(C_s - C_L) \quad (2.6)$$

เมื่อ r คือ อัตราการถ่ายเทมวลสารต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา
 K_L คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของของเหลวโดยรวม
 C_s คือ ความเข้มข้นของสารที่เราสนใจในสถานะอิ่มตัว
 C_L คือ ความเข้มข้นของสารที่เราสนใจในเนื้อของเหลว

เมื่อนำสมการนี้ไปรวมกับสมการของเฮนรีจะได้

$$r = K_L(C_s - C_t) \quad (2.7)$$

เมื่อ r คือ อัตราการถ่ายเทมวลสารต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา
 K_L คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของของเหลวโดยรวม
 C_s คือ ความเข้มข้นของสารที่เราสนใจในสถานะอิ่มตัวตามกฎของเฮนรี
 C_t คือ ความเข้มข้นของสารที่เราสนใจในเนื้อของเหลวที่เวลา t

เปลี่ยนอัตราการถ่ายเทเป็นอัตราการถ่ายเทต่อหน่วยปริมาตรต่อหน่วยเวลาด้วยการคูณพื้นที่และหารด้วยปริมาตรจะได้

$$r_v = K_L \frac{A}{V} (C_s - C_L) = K_L a (C_s - C_L) \quad (2.8)$$

เมื่อ r_v คือ อัตราการถ่ายเทต่อหน่วยปริมาตรต่อหน่วยเวลา
 $K_L a$ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเชิงปริมาตร
 A คือ พื้นที่ที่มีการถ่ายเทมวลสาร
 V คือ ปริมาตรของของเหลวที่สารที่เราสนใจถ่ายเทลงไป
 a คือ พื้นที่หน้าสัมผัสของการถ่ายเทมวลสารต่อหน่วยปริมาตร

นอกจากนี้เราสามารถเขียนเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นต่อเวลาจะได้

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C_s - C_t) \quad (2.9)$$

นำไปหาปริพันธ์ระหว่างช่วงความเข้มข้นที่เวลาเริ่มต้นจนถึงระยะเวลา t จะได้

$$\int_{C_0}^{C_t} \frac{dC}{C_s - C_t} = K_L a \int_0^t dt \quad (2.10)$$

$$\frac{C_s - C_t}{C_s - C_0} = e^{-(K_L a)t} \quad (2.11)$$

สมการข้างต้นนี้จะเป็นสมการพื้นฐานที่เราจะพบเห็นในการทดสอบเครื่องเติมอากาศซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

2.3 การทดสอบสมรรถภาพของเครื่องเติมอากาศ

เนื่องจากเครื่องเติมอากาศนั้นมีการใช้งานกันหลากหลาย สภาวะการใช้งานก็แตกต่างกัน ทำให้ผลการใช้งานไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันโดยตรงได้ จึงทำให้เกิดการทดสอบสมรรถภาพเครื่องเติมอากาศด้วยการทดสอบเครื่องเติมอากาศที่สภาวะมาตรฐานขึ้น

องค์กรวิศวกรรมโยธาแห่งสหรัฐอเมริกาได้กำหนดมาตรฐานการวิเคราะห์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำสะอาด (ASCE 1993) ซึ่งวิธีวิเคราะห์จะครอบคลุมถึงการหาอัตราการถ่ายเทออกซิเจนในหน่วยของมวลออกซิเจนที่ละลายน้ำต่อหน่วยเวลาในปริมาตรน้ำที่นำมาทดสอบ



ในการทดสอบจะใช้โซเดียมซัลไฟต์เป็นตัวทำปฏิกิริยากับออกซิเจนละลายเพื่อให้ออกซิเจนในน้ำเป็นศูนย์ โดยใช้โคบอลต์คลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

$$\text{ปริมาณโซเดียมซัลไฟต์ที่ต้องใช้} = 8 \text{ mg Na}_2\text{SO}_3/\text{mg DO} * 1.25 \quad (2.13)$$

หลังจากนั้นเริ่มเดินเครื่องเติมอากาศและตรวจสอบจนกว่าออกซิเจนในน้ำจะมากกว่าศูนย์จึงเริ่มจับเวลา บันทึกค่าออกซิเจนละลายตามความเหมาะสมและหยุดการทดสอบเมื่อออกซิเจนในน้ำ

มีค่าเกือบอิมิตัว (ประมาณ 98% ของออกซิเจนอิมิตัว) รวมทั้งบันทึกข้อมูลที่จำเป็น เช่น สภาพอากาศ อุณหภูมิ ค่าความเค็ม ค่าของแข็งละลายในน้ำ เป็นต้น

นำค่าออกซิเจนละลายที่บันทึกได้มาวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนโดยรวม ($K_L a$) ในกรณีที่ต้องการวิเคราะห์เป็นสมการเส้นตรงจะต้องใส่ลอการิทึมในสมการ 2.11 ก่อนจะได้

$$\ln(C_s - C_t) = \ln(C_s - C_0) - K_L a \cdot t \quad (2.14)$$

จากนั้นจึงสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(C_s - C_t)$ กับเวลา แล้วจึงคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนจากสมการ 2.14

2.4 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทออกซิเจนและค่าปรับแก้

ในการถ่ายเทออกซิเจนนั้นจะมีปัจจัยรบกวนค่อนข้างหลากหลาย ทำให้ปริมาณออกซิเจนในแหล่งน้ำแต่ละที่มีความแตกต่างกัน ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงปัจจัยรบกวนต่าง ๆ ทั้งนี้เพื่อให้ง่ายต่อการอธิบายเราจะพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อตัวแปรที่เกี่ยวข้องในสมการที่ 2.9 (Mueller, Boyle et al. 2002)

2.4.1 ความอิมิตัวของออกซิเจน

ความอิมิตัวของออกซิเจนเป็นตัวแปรหนึ่งที่ยอมรับว่าปริมาณออกซิเจนละลายสูงสุดในแหล่งน้ำนั้น ๆ จะมีได้มากที่สุดเท่าไร โดยตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่าความอิมิตัวของออกซิเจนมีดังนี้

2.4.1.1 อุณหภูมิ

ผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่าความอิมิตัวของออกซิเจนจะเป็นไปตามสมการด้านล่าง (คิดที่ความดัน 1 บรรยากาศ)

$$\tau = \frac{C_s}{C_{s20}} \quad (2.15)$$

โดย τ คือ ค่าปรับแก้อุณหภูมิ

C_s คือ ค่าออกซิเจนอิมิตัวที่อุณหภูมิใด ๆ หน่วย มก./ลิตร

C_{s20} คือ ค่าออกซิเจนอิมิตัวที่ 20 องศาเซลเซียสโดยมีค่าเท่ากับ 9.09 มก./ลิตร

2.4.1.2 ค่าปรับแก้ น้ำเสีย

เป็นค่าปรับแก้เนื่องจากลักษณะน้ำเสีย โดยเทียบระหว่างค่าออกซิเจนอิมิตัวในน้ำเสียกับออกซิเจนอิมิตัวในน้ำสะอาด

$$\beta = \frac{C_{sw}}{C_{s20}} \quad (2.16)$$

โดย β คือ ค่าปรับแก้ค่าเสีย
 C_{sw} คือ ค่าออกซิเจนอิ่มตัวในน้ำเสีย หน่วย มก./ลิตร

ทั้งนี้องค์การวิศวกรรมโยธาแห่งสหรัฐอเมริกาได้ศึกษาและกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างค่าปรับแก้ค่าเสียกับปริมาณของแข็งละลายไว้ดังนี้

$$\beta = 1 - 5.7 \times 10^{-6} \times TDS \quad (2.17)$$

โดย TDS คือ ปริมาณของแข็งละลายในน้ำ หน่วย มก./ลิตร

2.4.1.3 ความดันบารอมิเตอร์

ความดันบารอมิเตอร์นั้นเป็นค่าความดันจริงในบรรยากาศ โดยทั่วไปแล้วค่าความดันนี้จะค่อย ๆ ลดลงเมื่อพื้นที่ที่ทำการทดลองในพื้นที่สูงขึ้น โดยค่าปรับแก้ที่เกิดจากความดันบารอมิเตอร์เป็นดังนี้

$$\Omega = \frac{C_{\infty} P_b}{C_{\infty} P_s} = \frac{P_b + p_{de} - p_v}{P_s + p_{de} - p_v} \approx \frac{P_b}{P_s} \quad (2.18)$$

โดย Ω คือ ค่าปรับแก้บารอมิเตอร์

$C_{\infty} P_b$ คือ ความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนที่ความดันบารอมิเตอร์ หน่วย มก./ลิตร

$C_{\infty} P_s$ คือ ความเข้มข้นอิ่มตัวที่ความดันบารอมิเตอร์มาตรฐาน หน่วย มก./ลิตร

p_{de} คือ ความดันประสิทธิภาพ หน่วย กิโลปาสคาล

p_v คือ ความดันไอ หน่วย กิโลปาสคาล

P_b คือ ความดันบารอมิเตอร์ หน่วย กิโลปาสคาล

P_s คือ ความดันบารอมิเตอร์มาตรฐาน หน่วย กิโลปาสคาล

2.4.1.4 ระยะจมตัว

ที่สภาวะมาตรฐานอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสและความดันหนึ่งบรรยากาศ ผลของระยะจมตัวของหัวกระจายอากาศต่อความอิ่มตัวของออกซิเจน

$$\delta = \frac{C_{\infty 20}}{C_{s20}} = \frac{P_s + p_{d_e} - p_v}{P_s - p_v} \quad (2.19)$$

โดย δ คือ ตัวคูณปรับแก้ระยะลึกของออกซิเจนอิ่มตัว
 $C_{\infty 20}$ คือ ความเข้มข้นออกซิเจนอิ่มตัวที่ระยะลึกของหัวกระจายอากาศ
 หน่วย มก./ลิตร

ความดันประสิทธิภาพสามารถนิยามได้ดังนี้

$$p_{d_e} = (\delta - 1)(P_s - p_v) = \gamma_w d_e \quad (2.20)$$

โดย d_e คือ ความลึกประสิทธิภาพ หน่วย ม.
 γ_w คือ น้ำหนักจำเพาะของน้ำ หน่วย นิวตัน/ลบ.ม.

ซึ่งความลึกประสิทธิภาพนั้นจะมีค่าขึ้นกับระยะจมตัวของหัวกระจายอากาศและมีค่าเปลี่ยนไปตามลักษณะของหัวกระจายอากาศที่ใช้

2.4.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน

ชนิดของอุปกรณ์เติมอากาศ ระดับความปั่นป่วนในระบบมีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์ของฟิล์มของเหลวและพื้นที่ผิวสัมผัสที่มีการถ่ายเท โดยข้อมูลการทดสอบอุปกรณ์เติมอากาศเหล่านั้นมักดำเนินการโดยใช้น้ำประปาและแสดงค่าที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ดังนั้นข้อมูลต้องปรับแก้ให้ตรงกับที่ใช้งานจริงก่อน

2.4.2.1 อุณหภูมิ

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมีการเปลี่ยนแปลงไป โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$K_L a_t = K_L a_{20} \theta^{t-20} \quad (2.21)$$

โดย $K_L a_t$ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่อุณหภูมิที่ทดลองหน่วย 1/วินาที
 $K_L a_{20}$ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสหน่วย 1/วินาที

θ คือ ตัวคูณปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน

สำหรับค่าของตัวคูณปรับแก้ที่ขึ้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องเติมอากาศ ซึ่งองค์กรวิศวกรรมโยธาแห่งสหรัฐอเมริกา มักจะใช้ค่านี้เป็น 1.024

2.4.2.2 ค่าปรับแก้ น้ำเสีย

ปริมาณสารอินทรีย์ที่ละลายในน้ำเสียมีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมาก ในการทดลองได้ให้ค่า α แสดงถึงผลกระทบของน้ำเสียต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนดังนี้

$$\alpha = \frac{K_{La_w}}{K_{La}} \quad (2.22)$$

โดย α คือ ตัวคูณปรับแก้สัมประสิทธิ์เนื่องจากน้ำเสีย

K_{La_w} คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำเสีย หน่วย 1/วินาที

K_{La} คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำประปา หน่วย 1/วินาที

2.4.2.3 ค่าปรับแก้เนื่องจากสภาพเครื่องเติมอากาศ

เมื่อเดินระบบเติมอากาศไปได้ระยะหนึ่ง ในระบบการทำงานจริงค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนจะไม่ได้เกิดจากผลของสารละลายในน้ำเพียงอย่างเดียว แต่จะขึ้นกับการเสื่อมสภาพของเครื่องเติมอากาศด้วย ซึ่งผลกระทบนี้มักพบในหัวกระจายอากาศแบบละเอียดที่เกิดการอุดตันหรือว่ามีการแตกหัก จึงมีค่าปรับแก้สำหรับหัวกระจายอากาศอีกด้วย

$$F = \frac{K_{La_{f_{service}}}}{K_{La_{f_{new}}}} \quad (2.23)$$

โดย F คือ ค่าปรับแก้สัมประสิทธิ์เนื่องจากสภาพการใช้งาน

$K_{La_{f_{service}}}$ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์สภาวะทำงาน หน่วย 1/วินาที

$K_{La_{f_{new}}}$ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์สภาพใหม่ หน่วย 1/วินาที

2.5 สมการในการออกแบบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องเติมอากาศ

ในการทดสอบเครื่องเติมอากาศนั้นสามารถแสดงผลได้หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับผู้ทดสอบว่าต้องการเปรียบเทียบหรือรายงานในรูปแบบใด (Mueller, Boyle et al. 2002)

2.5.1 อัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (Standard Oxygen Transfer Rate, SOTR)

อัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐานคือมวลของออกซิเจนที่ถ่ายเทต่อหนึ่งหน่วยเวลาใน ปริมาณน้ำที่กำหนดและแสดงในรูปของสภาวะมาตรฐาน ซึ่งอัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน นั้นเป็นมาตรฐานของอเมริกา จากสมการที่ 2.9 เมื่อคูณด้วยปริมาตรของถังเติมอากาศและปรับแก้ ที่สภาวะมาตรฐานจะได้

$$SOTR = K_L a_{20} C_{s20} V \quad (2.24)$$

โดย **SOTR** คือ อัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน หน่วย กก./วินาที

$K_L a_{20}$ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่ 20 องศาเซลเซียส หน่วย 1/วินาที

C_{s20} คือ ความเข้มข้นของออกซิเจนอิ่มตัวที่ 20 องศาเซลเซียส หน่วย มก./ลิตร

V คือ ปริมาตรของถังเติมอากาศ หน่วย ลบ.ม.

2.5.2 ความจุออกซิเจนจำเพาะ (Specific Oxygenation Capacity, OC)

ค่านี้มักใช้ในยุโรปเพื่ออธิบายถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของออกซิเจนในถังเติมอากาศ จาก สมการที่ 2.9 ที่สภาวะมาตรฐานจะได้

$$oc = K_L a_{20} C_{s20} \quad (2.25)$$

โดย **OC** คือ ค่าความจุออกซิเจนจำเพาะ หน่วย มก./ลิตร-วินาที

สังเกตได้ว่าค่าความจุออกซิเจนจำเพาะนั้นจะมีความคล้ายคลึงกับค่าอัตราการถ่ายเท ออกซิเจนมาตรฐาน ต่างกันที่ไม่มี การนำปริมาตรของถังเติมอากาศเข้ามาคูณนั่นเอง

2.5.3 ประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน (Standard Aeration Efficiency, SAE)

ประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐานอัตราการถ่ายเทออกซิเจนต่อหนึ่งหน่วยกำลังที่ใส่เข้า ไป

$$SAE = \frac{SOTR}{WP} \quad (2.26)$$

โดย **SAE** คือ ประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน หน่วย กก./ชั่วโมง - กิโลวัตต์

WP คือ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเติมอากาศ หน่วย กิโลวัตต์

2.5.4 ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (Standard Oxygen Transfer Efficiency, SOTE)

ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐานคือสัดส่วนของออกซิเจนที่ใส่เข้าไปในถังเติมอากาศ ที่สามารถถ่ายเทเข้าไปสู่เฟสของเหลวได้ที่สภาวะมาตรฐาน เป็นค่าหลักที่ใช้พิจารณาในการออกแบบระบบเติมอากาศแบบกระจายอากาศมีสมการดังนี้

$$SOTE = \frac{SOTR}{0.3G_S} \quad (2.27)$$

โดย $SOTE$ คือ ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน

G_S คือ อัตราการไหลของอากาศที่สภาวะมาตรฐาน หน่วย กิโลกรัมต่อวินาที

2.5.5 การประยุกต์ใช้ในการทำงานจริง

ค่ามาตรฐานต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้นนั้นเป็นค่าที่มาจากการทดลอง เป็นค่ามาตรฐานที่ใช้สำหรับการเปรียบเทียบระหว่างเครื่องเติมอากาศแบบต่าง ๆ แต่ในการใช้งานจริงนั้นต้องปรับแก้จากค่ามาตรฐานให้เป็นค่าสำหรับใช้งานจริงก่อน เพื่อปริมาณออกซิเจนที่เราต้องการลงไประบบจะได้ใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบไว้มากที่สุด

$$AOTR = \frac{\alpha\theta^{t-20}(\tau\beta\Omega C_{S20} - C_L)}{C_{S20}} SOTR \quad (2.28)$$

โดย $AOTR$ คือ อัตราการถ่ายเทออกซิเจนในสภาพงานจริง หน่วย กก./วินาที

C_L คือ ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในของเหลวในสภาพงานจริง หน่วย มก./

ลิตร

2.6 ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ (Bubble Hydrodynamic parameter)

ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ คือ การศึกษาลักษณะการเกิดและการเคลื่อนที่ของฟองอากาศเพื่อให้สามารถอธิบายกลไกการถ่ายเทออกซิเจนได้อย่างชัดเจน โดยใช้กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง (ประมาณ 100 ภาพ/วินาที หรือมากกว่า) ถ่ายภาพการเกิดและการเคลื่อนที่ของฟองอากาศขณะเติมอากาศ เพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆดังนี้ (นราพงศ์ หงส์ประสิทธิ์ 2011)

2.6.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (Bubble diameter, d_B)

ขนาดฟองอากาศมีความสัมพันธ์กับพื้นที่สัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำ และประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน ฟองอากาศขนาดเล็กทำให้มีพื้นที่สัมผัสมากกว่า และมีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูงกว่าฟองอากาศขนาดใหญ่เมื่อเติมอากาศให้กับระบบในปริมาณเท่ากัน นอกจากนั้น

ขนาดฟองอากาศยังมีความสัมพันธ์กับตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศตัวอื่นๆ เช่น ฟองอากาศแต่ละขนาดมีความเร็วลอยตัวที่ต่างกัน ฟองอากาศขนาดเล็กอาจแสดงถึงการใช้ระยะเวลาการเกิดฟองอากาศน้อยกว่า หรือมีความถี่ของการเกิดฟองอากาศสูงกว่าฟองอากาศขนาดใหญ่เมื่อเติมอากาศในปริมาณเท่ากัน เป็นต้น ดังนั้นการศึกษขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์เติมอากาศจึงสามารถอธิบายถึงตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศตัวอื่นๆ และประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์ชนิดนั้นในเบื้องต้นได้

2.6.2 ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (Bubble rising velocity, U_B)

ในกรณีการเติมอากาศโดยวิธีปล่อยอากาศใต้น้ำ ฟองอากาศที่ถูกปล่อยใต้น้ำจะมีรูปร่างเป็นทรงกลม และลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำด้วยความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ ซึ่งสอดคล้องกับกฎของสโตกส์ (Stoke's law) ที่อธิบายถึงการเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกลมผ่านของไหลที่มีความหนืด โดยมีความสัมพันธ์ตามสมการดังนี้

$$V_T = \frac{g(\rho_L - \rho_a)d^2}{18\mu} \quad (2.29)$$

โดย V_T คือ ความเร็วปลาย (Terminal velocity) หน่วย ม./วินาที
 g คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก หน่วย ม./วินาที²
 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 2.29 ในกรณีของการเติมอากาศความเร็วปลายคือความเร็วลอยตัวของฟองอากาศซึ่งมีความสัมพันธ์แปรผันตามขนาดฟองอากาศ คือฟองอากาศขนาดใหญ่มีความเร็วลอยตัวมาก ฟองอากาศขนาดเล็กมีความเร็วลอยตัวน้อยกว่าแต่มีช่วงระยะเวลาสัมผัสกับน้ำนานกว่า ช่วงระยะเวลาที่ฟองอากาศใช้ลอยตัวขึ้นจนถึงผิวน้ำคือช่วงเวลาที่ฟองอากาศสัมผัสกับน้ำ และเกิดการถ่ายเทออกซิเจน ในทางปฏิบัติสามารถวัดค่าความเร็วลอยตัวของฟองอากาศได้โดยใช้กล้องถ่ายภาพความเร็วสูงถ่ายภาพการเคลื่อนที่ของฟองอากาศขณะเติมอากาศ แล้วนำภาพมาวิเคราะห์ความเร็วลอยตัวตามสมการดังนี้

$$U_B = \frac{\Delta D}{T_F} \quad (2.30)$$

เมื่อ U_B คือ ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ หน่วย ม./วินาที
 ΔD คือ ระยะทางการเคลื่อนที่ของฟองอากาศ หน่วย ม.

T_F คือ ช่วงเวลาของการถ่ายภาพ หน่วย วินาที

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการถ่ายภาพด้วยกล้องความเร็วสูงวิเคราะห์ค่าความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ เนื่องจากสามารถวิเคราะห์ความเร็วลอยตัวได้โดยตรง และลดความคลาดเคลื่อนจากการใช้สมการคำนวณ นอกจากนี้ สามารถใช้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟองอากาศ และความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ เพื่อสามารถอธิบายประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนเบื้องต้นได้จากการวิเคราะห์ขนาดฟองอากาศ

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

เนื่องจากระยะเวลาการเกิดฟองอากาศ และความถี่ของการเกิดฟองอากาศมีความสัมพันธ์กับจำนวนฟองอากาศที่เกิดขึ้น และพื้นที่สัมผัสระหว่างฟองอากาศกับน้ำที่ทำให้เกิดการถ่ายเทออกซิเจน จึงมีความสำคัญที่ต้องศึกษาตัวแปรดังกล่าวประกอบการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศแต่ละชนิด โดยใช้กล้องถ่ายภาพความเร็วสูงถ่ายภาพและจับเวลาการเกิดฟองอากาศ ระยะเวลาการเกิดฟองอากาศประกอบด้วยช่วงเวลาที่เริ่มเกิดฟองอากาศ ฟองอากาศขยายขนาด จนกระทั่งฟองอากาศหลุดออกจากอุปกรณ์เติมอากาศและเริ่มเกิดฟองใหม่ โดยมีรายละเอียดดังนี้

$$T_B = T_G + T_O \quad (2.31)$$

$$f_B = \frac{1}{T_B} \quad (2.32)$$

เมื่อ T_B คือ ระยะเวลาการเกิดฟองอากาศ หน่วย วินาที

T_G คือ ระยะเวลาที่เริ่มเกิดฟองอากาศ และขยายขนาด หน่วย วินาที

T_O คือ ระยะเวลาที่ฟองอากาศหลุดออกจากอุปกรณ์เติมอากาศ หน่วย วินาที

f_B คือ ความถี่ของการเกิดฟองอากาศ หน่วย 1/วินาที

เวลาการเกิดฟองอากาศเริ่มจากระยะที่เริ่มเกิดฟองอากาศและขยายขนาด รวมกับระยะเวลาที่ฟองอากาศหลุดออกจากอุปกรณ์เติมอากาศและเริ่มเกิดฟองอากาศฟองใหม่มาแทนที่ตามสมการที่ 2.31 และมีความสัมพันธ์กับความถี่ของการเกิดฟองอากาศตามสมการที่ 2.30 นอกจากนี้ ความถี่ของการเกิดฟองอากาศสามารถคำนวณได้โดยความสัมพันธ์ดังนี้

$$f_B = \frac{Q_g}{V_B} \quad (2.33)$$

$$V_B = \frac{1}{6} \pi \cdot d_B^3 \quad (2.34)$$

เมื่อ Q_g คือ อัตราการไหลของก๊าซที่เติมให้กับระบบ หน่วย ลบ.ม./วินาที

V_B คือ ปริมาตรฟองอากาศ (ปริมาตรทรงกลม) หน่วย ลบ.ม.

d_B คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ หน่วย ม.

จากสมการที่ 2.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของการเกิดฟองอากาศกับอัตราการไหลของก๊าซที่เติมให้กับระบบ และปริมาตรของฟองอากาศ เมื่อฟองอากาศมีรูปร่างเป็นทรงกลม หรือมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า (Equivalent diameter, d_e) สามารถคำนวณปริมาตรของฟองอากาศได้ตามสมการที่ 2.34 และความถี่ของการเกิดฟองอากาศมีความสัมพันธ์กับจำนวนฟองอากาศที่เกิดขึ้นขณะเติมอากาศตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$N_B = \frac{f_B \cdot H_L}{U_B} \quad (2.35)$$

เมื่อ N_B คือ จำนวนฟองอากาศ หน่วย ฟอง

H_L คือ ความสูงของผิวน้ำเหนือจุดเติมอากาศ หน่วย ม.

จากสมการที่ 2.35 จำนวนฟองอากาศที่เกิดขึ้นขณะเติมอากาศมีความสัมพันธ์กับความถี่ของการเกิดฟองอากาศ ความสูงของผิวน้ำเหนือจุดเติมอากาศและความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ ซึ่งส่งผลต่อพื้นที่สัมผัสระหว่างฟองอากาศกับน้ำและประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน ความถี่ของการเกิดฟองอากาศที่มากทำให้เกิดฟองอากาศจำนวนมาก มีพื้นที่สัมผัสมากและประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูงในกรณีที่ไม่เกิดการรวมตัวของฟองอากาศ และจากสมการที่ 2.27 ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศมีความสัมพันธ์กับขนาดฟองอากาศ จึงอาจมีความเป็นไปได้ในการประเมินค่าความถี่ของการเกิดฟองอากาศ และจำนวนฟองอากาศเบื้องต้นได้เมื่อทราบค่าขนาดฟองอากาศ ซึ่งอาจเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยอำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศได้

2.6.4 พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างก๊าซและของเหลว (Specific interfacial area, a)

พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างก๊าซและของเหลว คือ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่สัมผัสของฟองอากาศทั้งหมดกับปริมาตรของน้ำที่เติมอากาศ แสดงถึงพื้นที่ทั้งหมดที่เกิดการถ่ายเทออกซิเจนได้ขณะเติมอากาศ โดยมีความสัมพันธ์ตามสมการดังนี้

$$a = \frac{N_B \cdot S_B}{V_{Total}} = \frac{N_B \cdot \pi \cdot d_B^2}{A \cdot H_L + N_B \cdot V_B} \quad (2.36)$$

- 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 พื้นที่หน้าตัดขวางของน้ำในถังเติมอากาศ หน่วย ตร.ม.
 H_L คือ ความสูงของน้ำในถังเติมอากาศ หน่วย ม.

เนื่องจากพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างก๊าซและของเหลวมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวของฟองอากาศทั้งหมดหรือผลคูณระหว่างจำนวนฟองอากาศที่เกิดขึ้นกับพื้นที่ผิวของฟองอากาศหนึ่งฟอง และปริมาตรโดยรวมระหว่างปริมาตรน้ำกับปริมาตรฟองอากาศทั้งหมดหรือผลคูณระหว่างจำนวนฟองอากาศกับปริมาตรฟองอากาศตามสมการที่ 2.36 (Painmanakul, Loubiere et al. 2004) เมื่อสมมติให้ฟองอากาศมีรูปร่างเป็นทรงกลม ปริมาตรฟองอากาศจึงสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.34 จากความสัมพันธ์ข้างต้นจะพบว่าพื้นที่สัมผัสมีความสัมพันธ์กับขนาดฟองอากาศ ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้ในการประเมินค่าพื้นที่สัมผัสจำเพาะในเบื้องต้นเมื่อทราบค่าขนาดฟองอากาศ ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยอำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศได้

2.7 การทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ

เนื่องจากกระบวนการเติมอากาศสามารถควบคุมได้โดยอัตราการไหลของก๊าซที่เติมให้กับระบบ อัตราการไหลของอากาศแต่ละค่าทำให้เกิดการถ่ายเทออกซิเจนที่แตกต่างกัน เช่น การเติมอากาศด้วยอัตราการไหลต่ำอาจทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กและมีความเร็วลอยตัวค่าหนึ่ง แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลอาจทำให้ฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีความเร็วลอยตัวลดลง เป็นต้น แสดงว่าอัตราการไหลของอากาศมีความสัมพันธ์กับตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ นอกจากนั้นยังมีความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟองอากาศกับตัวแปรอื่นๆ เช่น ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ และพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำ เป็นต้น จึงมีความน่าสนใจในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซกับขนาดฟองอากาศเพื่อใช้เป็นตัวแปรหลักในการทำนายค่าตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างก๊าซและของเหลว และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน การประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนทำให้ทราบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ซึ่งเป็นตัวแปรที่เกิดจากผลคูณระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวกับพื้นที่สัมผัสจำเพาะตามความสัมพันธ์ดังนี้ (นราพงศ์ หงส์ประสิทธิ์ 2011)

$$K_L a = K_L \cdot a \quad (2.37)$$

$$K_L = \frac{K_L a}{a} \quad (2.38)$$

จากสมการที่ 2.38 แสดงให้เห็นว่า เมื่อทราบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และพื้นที่สัมผัสจำเพาะทำให้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวได้ และสามารถอธิบายถึงการถ่ายเทออกซิเจนได้อย่างชัดเจน ในปัจจุบันจึงได้มีการศึกษาการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ ดังนี้ (Painmanakul, Wachirasak et al. 2009)

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (d_B)

ลำดับ	ความสัมพันธ์	ข้อกำหนด	อ้างอิง
1	$d_B = \left(\frac{6 \cdot d_{OR} \cdot \sigma \cdot g_c}{g \cdot \Delta \rho} \right)^{\frac{1}{3}}$	$Q_{g0} < \left(\frac{20(\sigma \cdot d_0 \cdot g_c)^5}{(g \cdot \Delta \rho)^2 \cdot \rho_L^3} \right)^{\frac{1}{6}}$	Krevelen and Jackson (1959)
2	$d_B = 0.0287 d_{OR}^{\frac{1}{2}} \cdot Re^{\frac{1}{3}}$	$Re < 2100$	Leibson, Holcomb et al. (1956)
3	$d_B = \left(\frac{72 \rho_L}{\pi^2 \cdot g \cdot \Delta \rho} \right)^{\frac{1}{5}} \cdot Q_{g0}^{0.4}$		Krevelen and Jackson (1959)
4	$d_B = 1.56 Re^{0.058} \left(\frac{d_{OR}^2 \cdot \sigma}{\Delta \rho g} \right)^{\frac{1}{4}}$ $d_B = 0.32 Re^{0.425} \left(\frac{d_{OR}^2 \cdot \sigma}{\Delta \rho g} \right)^{\frac{1}{4}}$	$1 < Re < 10$ $1 < Re < 21000$	Kumar, Degaleesan et al. (1976)
5	$\frac{g \cdot \rho_L \cdot d_B^2}{\sigma}$ $= 8.8 \left(\frac{u_G \cdot \mu_L}{\sigma} \right)^{-0.04} \left(\frac{\sigma^3 \cdot \rho_L}{g \cdot \mu_L} \right)^{-0.12} \left(\frac{\rho_L}{\rho_G} \right)^{0.22}$		Wilkinson, Haringa et al. (1994)
6	$d_B = 7.1 \times 10^{-4} \cdot \Delta P^{0.328}$		Hebrard (1995)
7	$d_B = 15.73 \times 10^{-3} \cdot D_C^{0.32} \left(\frac{Q_g}{D_{OR}} \right)^{0.16}$		Hebrard (1995)

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่าความเร็วลอยตัวของ ฟองอากาศ (U_B)

ลำดับ	ความสัมพันธ์	ข้อกำหนด	อ้างอิง
1	$U_B = \frac{g \cdot \Delta\rho \cdot d_B^2}{12 \cdot \mu}$	$Re < 250, \frac{\mu_G}{\mu_L} = 0$	Hadamard (1911)
2	$U_B = \frac{g \cdot \Delta\rho \cdot d_B^2}{18 \cdot \mu}$	$Re < 250, \frac{\mu_G}{\mu_L} = \infty$	Frumkin and Levich (1947)
3	$U_B = \left(\frac{2\sigma}{d_B \cdot \sigma} + 0.5d_B \cdot g\right)^{0.5}$	$0.2 \leq d_B \leq 8 \text{ cm.}$	Mendelson (1967)
4	$U_B = \frac{\mu_L}{\rho_L \cdot d_B} (J - 0.875) M_0^{-0.149}$ $J = 0.94H^{0.757}; 2 < H \leq 59.3$ $J = 0.32H^{0.441}; H > 59.3$ $H = \frac{4}{3} E_0 \cdot M_0^{-0.149} \left(\frac{\mu_L}{0.0009}\right)^{-0.14}$	$250 < Re < 6000$	Grace, Wairegi et al. (1976)
5	กราฟแสดงความเร็วลอยตัวของ ฟองอากาศที่ได้จากการทดลอง		Grace and Wairegi (1986)

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่าพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่าง ของเหลวและก๊าซ (a)

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

ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้าย
มวลผ่านชั้นกลางของเหลว (K_L)

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

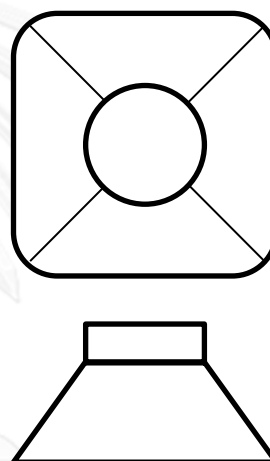
ตารางที่ 2.5 ตารางแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเท
ออกซิเจน ($K_L a$)

ลำดับ	ความสัมพันธ์	อ้างอิง
1	$K_L a = d_c^{0.17} \cdot U_G^{0.7}$	Akita and Yoshida (1973)
2	$K_L a = 0.0269 U_G^{0.82}$	Deckwer, Burckhart et al. (1974)
3	$\frac{K_L a}{U_G} \cdot \left(\frac{V_L^2}{g} \right)^{0.33} = 3.9 \times 10^{-5} \cdot \left(\frac{\mu_G}{(v_L \cdot g)^{0.33}} \right)^{-0.1}$	Zlakarnik (1981)
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)
5	$K_L a = K_L \times a$	Painmanakul, Loubiere et al. (2004)

จากตารางที่ 2.1 ถึง 2.5 แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศที่ถูกนำเสนอในปัจจุบันซึ่งมาจากการศึกษาความสัมพันธ์ในระดับห้องปฏิบัติการ หรือศึกษาความสัมพันธ์จากข้อมูลทุติยภูมิโดยอ้างอิงจากทฤษฎี โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซกับขนาดฟองอากาศเป็นตัวแปรหลักในการทำนายค่าต่างๆ เพื่อช่วยอำนวยความสะดวกและบรรเทาความยุ่งยากจากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน เช่น ระยะเวลาและความยุ่งยากในการวิเคราะห์ การเตรียมอุปกรณ์ที่จำเป็น และทักษะของผู้วิเคราะห์ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม แบบจำลองดังกล่าวยังมีข้อจำกัดในการใช้งานเนื่องจากจุดประสงค์การใช้งานที่แตกต่างกัน และปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทออกซิเจนทำให้มีความคลาดเคลื่อนจากการทำนายค่อนข้างมาก ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่ต้องศึกษาการประยุกต์ใช้แบบจำลองเพิ่มเติมเพื่อสามารถใช้ในการทำนายได้อย่างแม่นยำ และมีความคลาดเคลื่อนลดลงจนอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ เพื่อสามารถประยุกต์ใช้ผลจากการทำนายในการวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศ และประเมินความเหมาะสมของอุปกรณ์เติมอากาศในขั้นต้นได้ (Painmanakul and Jamnongwong 2007)

2.8 ระบบเติมอากาศแบบสร้างฟิล์มของเหลว

ระบบเติมอากาศแบบสร้างฟิล์มของเหลว (Liquid-Film Aeration System, LFAS) เป็นระบบเติมอากาศที่ใช้หัวกระจายอากาศ โดยมีการติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว (Liquid-Film-Forming Apparatus, LFFA) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเติมอากาศ อุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวนั้นมีลักษณะคล้ายกรวยตัดยอดหัวคว่ำ ติดตั้งไว้ที่บริเวณผิวน้ำ เหนือตำแหน่งที่ทำการเติมอากาศ เมื่อเริ่มทำการเติมอากาศ ฟองอากาศจะออกจากหัวกระจายอากาศลอยขึ้นมาเหนือน้ำ เมื่อฟองอากาศที่ลอยขึ้นมาถึงบริเวณอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว ฟองอากาศจะรวมกันและผลัดดันให้น้ำบริเวณผิวน้ำพุ่งออกไปบริเวณปลายกรวยไปพร้อมกับฟองอากาศ ทำให้เกิดฟิล์มของเหลวบริเวณผิวน้ำ ซึ่งจะช่วยให้ช่วยเพิ่มความสามารถในการเติมอากาศบริเวณผิวน้ำให้มากขึ้น



รูปที่ 2.3 อุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว



รูปที่ 2.4 ภาพแสดงการทำงานของอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1) DeMoyer, Schierholz et al. (2003) ได้ทำการศึกษาเรื่องผลกระทบการถ่ายเทออกซิเจนของฟองอากาศและผิวสัมผัสของน้ำในระบบเติมอากาศแบบกระจายอากาศ โดยได้อ้างอิงสมการจากการทดลองของ McWhirter and Hutter (1989) ทำการทดลองโดยการใช้ถังทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.6 เมตร สูง 9.6 เมตร น้ำลึก 9.25 เมตร ใช้หัวกระจายอากาศแบบหยาบ (แปรผันขนาดของรูที่เจาะ) มีการใช้โฟมปิดที่ผิวน้ำเพื่อให้มีการถ่ายเทอากาศที่ผิวน้ำเฉพาะบริเวณที่ฟองอากาศขึ้นมา หลังจากนั้นจึงใช้การวัดออกซิเจนตามมาตรฐานขององค์การวิศวกรรมโยธาแห่งสหรัฐอเมริกา ทำการเติมอากาศด้วยอัตราการไหล 51 และ 78 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง หลังจากนั้นจึงวัดค่าออกซิเจนละลายแล้วนำข้อมูลมาวิเคราะห์ โดยอากาศที่ใช้เติมนั้นมีอากาศปกติและไนโตรเจน เพื่อนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกัน

จากผลการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่ผิวน้ำที่อัตราการไหลของอากาศ 51 และ 76 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง มีค่าเป็น 59 – 85% ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของฟองอากาศ นอกจากนี้ยังทราบว่าเกรเดียนต์ของความเข้มข้นของฟองอากาศกับน้ำนั้นมีมากกว่าความเข้มข้นของอากาศกับน้ำ สำหรับการถ่ายเทออกซิเจนบริเวณผิวน้ำพบว่าตำแหน่งที่เกิดการหลุดของฟองอากาศนั้นจะมีการถ่ายเทออกซิเจนที่มากและมีการแปรผันตามปริมาณอากาศที่ปล่อย ส่วนบริเวณอื่นนั้นจะไม่แปรผันตามปริมาณอากาศที่ปล่อย

2) Imai and Zhu (2011) ได้พัฒนาระบบเติมอากาศที่มีการสร้างฟิล์มของเหลวขึ้น ซึ่งทำโดยใช้อุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวติดตั้งที่บริเวณผิวน้ำที่มีการลอยตัวของฟองอากาศ เพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทออกซิเจนบริเวณผิวน้ำโดยอุปกรณ์เป็นลักษณะเหมือนกรวยตัดยอด ทำการทดลองในถังขนาด 40 ลิตร ลึก 44 เซนติเมตร พื้นที่หน้าตัดด้านบน 910 ตารางเซนติเมตร การทดลองใช้วิธีการทดสอบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนแบบปกติ แบบติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว และเติมไนโตรเจน (เพื่อทดสอบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่ผิวน้ำ) รวมทั้งทำการแปรผันลักษณะทางโครงสร้างต่าง ๆ ได้แก่ ขนาดหน้าตัดของอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว ขนาดท่อ ความสูงเหนือน้ำของอุปกรณ์ ขนาดและจำนวนท่อที่ติดตั้ง ปริมาณการเติมอากาศ

จากการทดลองพบว่าอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนจากการเติมอากาศแบบปกติได้ 37 % อีกทั้งยังช่วยเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนบริเวณผิวน้ำมากกว่าแบบทั่วไป 5.3 เท่า และหลังจากปรับปรุงอุปกรณ์ให้อยู่ในสถานะที่เหมาะสมยังสามารถเพิ่มเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนอิ่มตัวได้ถึง 92%

3) นราพงศ์ หงส์ประสิทธิ์ (2011) ได้ทำการศึกษาอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่นจากของเสียประเภทยาง โดยทำการศึกษาถึงคุณสมบัติทางกายภาพของท่อยืดหยุ่น ได้แก่ ความหนาของผนังท่อ ความทนต่อแรงดึง ความแข็ง และความยืด นอกจากนี้ยังได้นำตัวอย่างท่อยืดหยุ่นไปวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและประสิทธิภาพเชิงพลังงานในระดับการทดลอง โดยใช้ถังขนาดเล็ก

ปริมาตร 10 ลิตรในการทดสอบ ทำการศึกษากลไกการถ่ายเทออกซิเจน ผลกระทบของสารเจือปนในน้ำต่อการถ่ายเทออกซิเจน ศึกษาถึงระยะเวลาที่ทำให้เกิดการอุดตันในการเติมอากาศและวิธีการทำความสะอาดที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังทำการศึกษาในถังเติมอากาศขนาด 2,500 ลิตร เพื่อศึกษาการกระจายเวลากัก และสัมประสิทธิ์และอัตราการถ่ายเทออกซิเจน

จากการทดลองทำให้พบท่อยึดหยุ่นที่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นอุปกรณ์เติมอากาศ เนื่องจากมีสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสม ให้การถ่ายเทออกซิเจนและประสิทธิภาพเชิงพลังงานที่ดี พบว่าระยะเวลาหยุดเติมอากาศไม่ควรเกิน 3 วัน การทำความสะอาดควรจะใช้การเป่าด้วยความดัน 3 บาร์ นาน 30 นาที ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนอยู่ที่ร้อยละ 15.08 ในช่วงอัตราการไหล 60 ถึง 100 ลิตรต่อนาที

4) Painmanakul and Jamnongwong (2007) ศึกษาการทำนายค่าพารามิเตอร์ต่างๆในการถ่ายเทออกซิเจนหรือตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ ในงานวิจัยนี้ได้สนใจทำนายค่าขนาดฟองอากาศ ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ และพื้นที่สัมผัสจำเพาะโดยวิเคราะห์ค่าตัวแปรต่างๆในระดับห้องปฏิบัติการ ทำการเติมอากาศในคอลัมน์รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.05 ม. และสูง 0.4 ม. ใช้เมมเบรนเป็นอุปกรณ์กระจายอากาศ ควบคู่กับการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกนำเสนอในปัจจุบันดังแสดงในตารางที่ 3.1 ถึง 3.5 ซึ่งมาจากการศึกษาความสัมพันธ์ในระดับห้องปฏิบัติการหรือศึกษาความสัมพันธ์จากข้อมูลทุติยภูมิโดยอ้างอิงจากทฤษฎี เพื่อช่วยอำนวยความสะดวกในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน อธิบายกลไกการถ่ายเทออกซิเจนได้อย่างชัดเจน ทำให้สามารถประเมินประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศ และความเหมาะสมของอุปกรณ์ในขั้นต้นได้ จากการศึกษาพบว่า อัตราการไหลของอากาศที่เติมให้กับระบบมีความสัมพันธ์กับตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศซึ่งมีขนาดฟองอากาศเป็นตัวแปรหลักที่ใช้ทำนายค่าตัวแปรอื่นๆ ขนาดฟองอากาศ ความเร็วลอยตัว และพื้นที่สัมผัสจำเพาะสามารถทำนายได้โดยใช้สมการของ Leibson, Holcomb et al. (1956) Mendelson (1967) และ Moustiri (2000) ตามลำดับ แต่ยังคงมีความคลาดเคลื่อนระหว่างการวิเคราะห์กับการทำนายประมาณร้อยละ 15 เนื่องจากข้อจำกัดของการใช้แบบจำลอง และปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทออกซิเจน จึงควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อการทำนายที่แม่นยำมากขึ้น

5) Jamnongwong, Loubiere et al. (2010) ได้ศึกษาผลกระทบของสารปนเปื้อนต่าง ๆ ที่พบได้ในระบบบำบัดทางชีวภาพต่อสัมประสิทธิ์การแพร่และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทของออกซิเจน โดยสารปนเปื้อนที่ใช้ทดสอบนั้นประกอบด้วย เกลือ น้ำตาล และสารลดแรงตึงผิว ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของออกซิเจนตามปริมาณความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่ใส่ลงไปโดยเทียบค่าที่ได้กับน้ำสะอาด จากนั้นจึงศึกษาผลกระทบของสารปนเปื้อนนั่นต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของของเหลว (k_L) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์นี้จะลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารปนเปื้อน

โดยในสารละลายเกลือพบว่าถึงแม้การเพิ่มความเข้มข้นของเกลือจะไม่กระทบต่อสมบัติทางกายภาพของน้ำ แต่ว่าจะส่งผลกระทบต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทของของเหลว สำหรับสารละลายน้ำตาลนั้นพบว่า k_c จะมีค่าลดลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความหนืดของน้ำ สำหรับสารละลายสารลดแรงตึงผิวที่ค่าทางอุทกพลศาสตร์จะคงที่แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของออกซิเจนแทน

6) Kumar, Moulick et al. (2010) ได้ทำการศึกษาการเติมอากาศด้วยเครื่องเติมอากาศชนิดโพรเพลเลอร์แอสไปเรเตอร์ปั๊ม (Propeller-aspirator pump aerator) โดยใช้บ่ออิฐก่อขนาด $5.25 \times 2.87 \times 1.57$ เมตร ใช้เครื่องเติมอากาศโพรเพลเลอร์แอสไปเรเตอร์ปั๊มขนาดสองแรงม้า เริ่มทดสอบการถ่ายเทออกซิเจนในบ่อคอนกรีต โดยใช้น้ำประปา เติมสารโคบอลต์คลอไรด์ และโซเดียมซัลไฟด์เพื่อให้ออกซิเจนละลายน้ำมีค่าเป็นศูนย์ หลังจากนั้นจึงเริ่มเปิดเครื่องเติมอากาศ วัดค่าออกซิเจนละลายน้ำด้วยเครื่องวัด จุ่มหัววัดที่ความลึกจากผิวน้ำ 0.20 เมตรแล้วนำค่าที่ได้ไปวาดกราฟ โดยให้แกน Y เป็นลอการิทึมธรรมชาติของปริมาณออกซิเจนที่หายไป (ออกซิเจนอิ่มตัว-ออกซิเจนที่มีอยู่) ส่วนแกน X เป็นเวลาที่ใช้เติมอากาศเพื่อหาค่าคงที่ของการถ่ายเทออกซิเจนที่อุณหภูมิ ทดสอบ (20 องศาเซลเซียส)

หลังจากนั้นจึงหาลงค่าที่เหมาะสมของแกนใบพัดในการถ่ายเทออกซิเจน ทำโดยเติมอากาศแล้วปรับองศาของแกนใบพัดที่ 30, 45, 60, 75 และ 90 องศาโดยให้สภาพทางพลศาสตร์คงที่ (ความเร็วรอบในการหมุนและระยะการจมตัวของใบพัด) โดยตั้งให้ความเร็วรอบในการหมุน อยู่ที่ 2130 รอบต่อนาทีและระยะการจมตัวของใบพัดอยู่ที่ 300 มิลลิเมตร

สุดท้ายจึงหาลงค่าของสภาพทางพลศาสตร์ (ฟรูดนัมเบอร์ และเรย์โนลด์นัมเบอร์) ในการถ่ายเทออกซิเจนและพลังงานที่ใช้ โดยตั้งค่าองศาแกนใบพัดไว้ที่ค่าที่เหมาะสม (ใช้ค่าที่ได้จากการทดลองข้อที่หนึ่ง) จากนั้นจึงแปรผันค่าความเร็วรอบในการหมุนและระยะการจมตัวของใบพัด โดยความเร็วการหมุนของใบพัดเริ่มจาก 1420 ถึง 2840 รอบต่อนาที (โดยปรับให้ห่างช่วงละ 355 รอบต่อนาที) ส่วนระยะการจมตัวของใบพัดเริ่มจาก 140 ถึง 460 มิลลิเมตร (โดยปรับให้ห่างช่วงละ 80 มิลลิเมตร) จะได้ 25 ชุดการทดลอง

เมื่อทำการทดสอบการเติมอากาศโดยปรับเปลี่ยนองศาของแกนใบพัด พบว่ามีความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการพหุนามลำดับที่สอง โดยองศาที่ให้ค่าประสิทธิภาพสูงที่สุดคือ 75 องศา ส่วนผลของสภาพทางพลศาสตร์ (ฟรูดนัมเบอร์และเรย์โนลด์นัมเบอร์) ต่ออัตราการเติมออกซิเจนและการใช้พลังงานพบว่ากราฟฟรูดนัมเบอร์กับประสิทธิภาพแสดงความสัมพันธ์ที่ชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากผลของแรงตึงผิวมีมากกว่าความหนืดและผลของเรย์โนลด์นัมเบอร์และฟรูดนัมเบอร์ต่อเลขพลังงาน (Power number) พบว่าเรย์โนลด์นัมเบอร์มีความสัมพันธ์กับเลขพลังงานที่ชัดเจนกว่าฟรูดนัมเบอร์

สุดท้ายนำสมการความสัมพันธ์มาประเมินหาค่าความเร็วรอบในการหมุนของใบพัดและระยะจมตัวของแกนใบพัด พบว่าจะมีประสิทธิภาพสูงที่สุดเมื่อความเร็วรอบในการหมุนอยู่ที่ 2840 รอบต่อ

นาที่และระยะจมน้ำที่ 0.14 เมตรโดยได้ประสิทธิภาพการเติมอากาศ 0.42 กิโลกรัมออกซิเจน/กิโลวัตต์-ชั่วโมงอัตราการเติมออกซิเจน 0.15 กิโลกรัมออกซิเจน/ชั่วโมง

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมดที่กล่าวมาสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ โดยสรุปได้ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและแนวทางการพัฒนา

งานวิจัย	ศึกษา	หัวข้อที่เกี่ยวข้องและแนวทางการพัฒนา
1)	ผลกระทบของการถ่ายเทออกซิเจนของฟองอากาศและผิวน้ำ	ศึกษาแนวทางการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของฟองอากาศเทียบกับผิวน้ำ หาทางพัฒนาประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนบริเวณผิวน้ำ
2)	การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนด้วยอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว	ศึกษาแนวทางการใช้อุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว พัฒนาการศึกษาโดยเพิ่มเติมการกระจายเวลากัก เปรียบเทียบผลกระทบของหัวเติมอากาศ เสนอแบบจำลองการทำงานายสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และการทดสอบอุปกรณ์ในบ่อจริง
3)	การวิเคราะห์อุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่น	ศึกษาแนวทางการทดลอง และผลกระทบของสารปนเปื้อนต่อการถ่ายเทออกซิเจน พัฒนาประสิทธิภาพด้วยอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว
4)	การทำนายตัวแปรการถ่ายเทมวลสารในคอลัมน์ฟองอากาศ	ศึกษาสมการและแนวทางการวิเคราะห์หาตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์และการถ่ายเทมวลสาร
5)	ศึกษาสัมประสิทธิ์การแพร่ของออกซิเจนในน้ำที่มีสารปนเปื้อนต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของของเหลว	ศึกษาสมการที่เกี่ยวข้องและผลกระทบของสารปนเปื้อนต่าง ๆ ต่อการถ่ายเทออกซิเจนในระบบ
6)	การประเมินเครื่องเติมอากาศชนิดโพรเพลเลอร์แอสไปเรเตอร์ปัม	ศึกษาแนวทางการวิเคราะห์เชิงมิติ (Dimensionless analysis) เพื่อนำมาพัฒนาแบบจำลองทำนายตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย

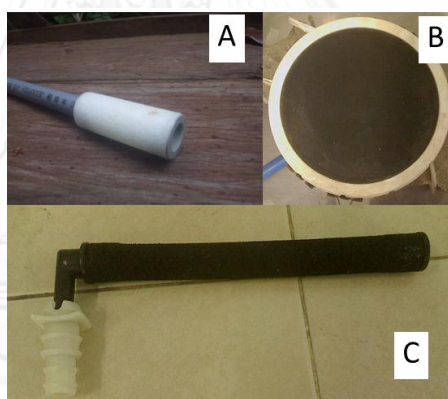
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 วัสดุอุปกรณ์

1) หัวกระจายอากาศ

หัวกระจายอากาศที่ใช้ในการทดลองนี้จะมีอยู่สามชนิด ได้แก่

- หัวกระจายอากาศแบบหยาบหรือแบบแข็ง (Rigid diffuser)
- หัวกระจายอากาศแบบท่อยาง (Rubber diffuser)
- หัวกระจายอากาศแบบแบบยืดหยุ่นหรือแบบเมมเบรน (Membrane diffuser)



รูปที่ 3.1 ภาพแสดงลักษณะหัวกระจายอากาศแบบแข็ง (A)

แบบเมมเบรน (B) และแบบท่อยาง (C)

2) อุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว

อุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวที่ใช้เป็นพลาสติกมีขนาดความกว้าง 30 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร สูง 25 เซนติเมตร โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางของยอดกรวย 5 เซนติเมตร โดยมีสองแบบ คือ แบบที่บีบสีดำและแบบใส



รูปที่ 3.2 ภาพแสดงลักษณะของอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวแบบทึบและแบบใส

3) ถังเติมอากาศ

ถังเติมอากาศที่ใช้มีสองชนิด คือ ถังเติมอากาศขนาดเล็กสำหรับการทดลองหนึ่งหน่วย อุปกรณ์ และถังเติมอากาศขนาดใหญ่สำหรับทดลองอุปกรณ์หลายหน่วยโดยถังเติมอากาศขนาดเล็กเป็นถังน้ำทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดกว้าง 0.6 เมตร ยาว 0.6 เมตร สูง 0.6 เมตร ความจุน้ำที่ใช้ 190 ลิตร ส่วนถังเติมอากาศขนาดใหญ่เป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 0.96 เมตร ยาว 1.24 เมตร ลึก 0.4 เมตร ความจุน้ำที่ใช้ 330 ลิตร

4) โครงสร้างสำหรับติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว

เป็นโครงสร้างที่ทำเป็นฐานสำหรับติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว เพื่อให้อุปกรณ์สามารถติดตั้งไว้เหนือน้ำได้ โดยแบ่งเป็นสองชุด ชุดสำหรับถังเติมอากาศขนาดเล็กจะใช้เป็นแบบขาตั้ง ตั้งไว้ที่ด้านล่างของถัง สำหรับถังเติมอากาศขนาดใหญ่จะใช้เป็นแบบท่อนลอย โดยใช้ขวดพลาสติกเป็นท่อนลอย



รูปที่ 3.3 ชุดอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวแบบขาตั้งและแบบท่อนลอย

5) ปั๊มลม

ปั๊มลมที่ใช้มีสองขนาด คือ ขนาด 60 วัตต์ และ 100 วัตต์โดยปั๊มลมขนาด 60 วัตต์ เป็นปั๊มลมยี่ห้อ Atman รุ่น HP-12000 และปั๊มลมขนาด 100 วัตต์ เป็นปั๊มลมยี่ห้อ Resun รุ่น LP-100



รูปที่ 3.4 ภาพปั๊มลมขนาด 60 วัตต์และ 100 วัตต์

- 7) อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซ ยี่ห้อ NEW-FLOW รุ่น FBC-V-S-A-30-LM ช่วงการวัด 3 – 30 ลิตรต่อนาที
- 8) อุปกรณ์วัดความดันลด ยี่ห้อ ENFM ช่วงการวัด 0 – 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
- 9) อุปกรณ์วัดความเข้มข้นของออกซิเจนละลายแบบกัลป์วานิก ยี่ห้อ EUTECH INSTRUMENTS รุ่น DO 110 สำหรับใช้ในระดับห้องปฏิบัติการ และยี่ห้อ HORIBA รุ่น OM-51 สำหรับใช้ภาคสนาม
- 10) กล้องถ่ายภาพความเร็วสูงยี่ห้อ Basler รุ่น acA2000 – 340km อัตราการถ่ายภาพสูงสุดที่ 350 ภาพต่อวินาที
- 11) นาฬิกาจับเวลา
- 12) ถังแก๊สไนโตรเจนขนาด 7 ลูกบาศก์เมตร ยี่ห้อ linde
- 13) วาล์วรับแรงดัน ยี่ห้อ linde รับแรงดันสูงสุดได้ 3,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
- 14) อุปกรณ์เชื่อมต่อระบบแก๊ส เช่น ท่อลม ข้อต่อ เป็นต้น
- 15) แผ่นโฟม
- 16) ไม้บรรทัด
- 17) คอมพิวเตอร์

18) ซอฟต์แวร์วิเคราะห์ภาพมีสองโปรแกรม คือ ImageJ และ Image Frame Work

19) ถังกวนผสมสารเคมี

18) แผ่นโพลี

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1) โซเดียมซัลไฟต์ (Na_2SO_3) โดยที่ใช้มีสองเกรด คือ เกรดห้องปฏิบัติการสำหรับใช้ใน ห้องปฏิบัติการ และเกรดอุตสาหกรรมสำหรับใช้ในบ่อทดลองขนาดใหญ่

2) โคบอลต์คลอไรด์ (CoCl_2)

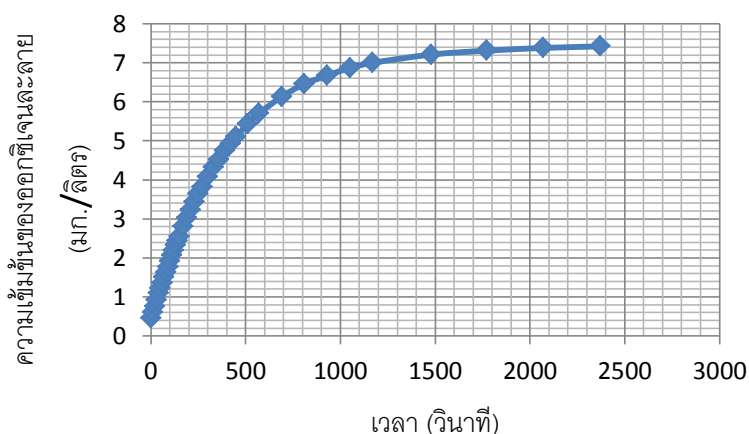
3) 2-เอทิลเฮกซิลโซเดียมซัลเฟต (2 – ethyl – hexyl sodium sulphate)

4) แก๊สไนโตรเจน

3.2 ตัวแปรที่สนใจศึกษา

1) ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำที่ทำการทดลอง ที่ระยะเวลาต่าง ๆ เริ่มการบันทึกตั้งแต่เวลา เริ่มเติมอากาศจนออกซิเจนละลายในน้ำที่ทำการทดลองอิ่มตัว ดังแสดงในรูปที่ 3.5

2) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนศึกษาโดยใช้วิธีมาตรฐานในการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทออกซิเจน (ตามหัวข้อที่ 2.3)



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างการบันทึกค่าออกซิเจนละลาย

3) ผลของอัตราการไหลของอากาศต่อลักษณะการถ่ายเทออกซิเจน ทำการทดลองโดยใช้อัตรา ไหลที่ 3 5 10 15 20 25 และ 30 ลิตรต่อนาที เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลต่อลักษณะใน การถ่ายเทออกซิเจน

4) ผลกระทบของความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในของเหลวที่เติมอากาศเปรียบเทียบกับ การเติมอากาศในน้ำประปาสำหรับถังเติมอากาศขนาด 190 ลิตร

5) ขนาดฟองอากาศ ใช้ประกอบการประเมินการถ่ายเทออกซิเจนในสภาวะต่าง ๆ ที่สนใจ ศึกษาในงานวิจัย โดยการถ่ายภาพด้วยกล้องความเร็วสูง และวิเคราะห์ขนาดโดยซอฟต์แวร์วิเคราะห์ ภาพ เพื่อการอธิบายการถ่ายเทออกซิเจนอย่างชัดเจนโดยทำการศึกษาฟองอากาศในน้ำ

7) ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ ใช้ประกอบการประเมินการถ่ายเทออกซิเจนในสภาวะ ต่างๆที่สนใจศึกษาในงานวิจัย โดยการถ่ายภาพด้วยกล้องความเร็วสูง และวิเคราะห์ความเร็วโดย ซอฟต์แวร์วิเคราะห์ภาพ เพื่อการอธิบายการถ่ายเทออกซิเจนอย่างชัดเจน

8) ความดันลด ใช้ประเมินค่าความดันวิกฤต และพลังงานที่จำเป็น โดยอุปกรณ์วัดความดัน ขณะเติมอากาศ เพื่อการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน

9) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของฟองอากาศและที่ผิวน้ำ เพื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบ ที่ติดตั้งอุปกรณ์และไม่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว

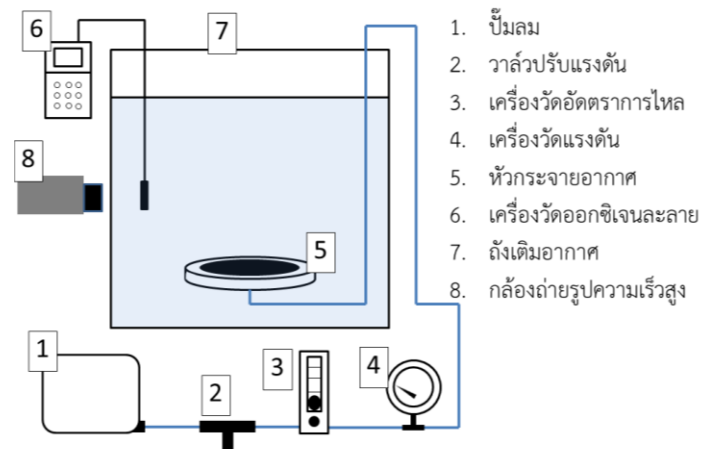
10) ระยะจมตัวของฟองอากาศและความเข้มแสง ใช้ในการประเมินลักษณะการสะสมตัวของ ฟองอากาศภายในอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว

11) รูปแบบการวางชุดอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวที่เหมาะสมในการใช้งานจริง

3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.3.1 ศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารโดยหวักระจายอากาศแบบต่าง ๆ ในน้ำประปา

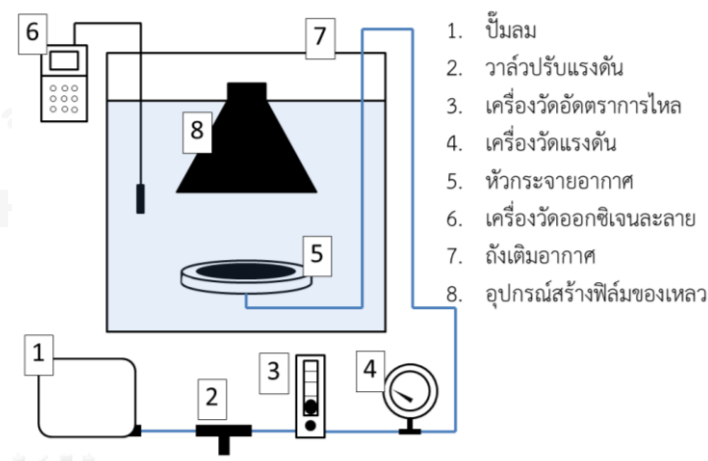
1) ศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนด้วยหวักระจายอากาศในน้ำสะอาด (น้ำประปา) โดยใช้หวักระจายอากาศสามชนิด (แบบแข็ง แบบท่อยาง และแบบเมมเบรน) แปรผันอัตราการไหล ของอากาศที่ 3 ถึง 30 ลิตรต่อนาที ทำการทดสอบในถังขนาด 190 ลิตร (วิธีติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.6) กำจัดออกซิเจนละลายด้วยโซเดียมซัลไฟด์ หลังจากนั้นจึงทำการทดสอบโดยการวัดค่า ออกซิเจนละลายตั้งแต่เริ่มเดินเครื่องเติมอากาศจนออกซิเจนละลายในน้ำอิ่มตัว บันทึกค่าตามเวลา นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน



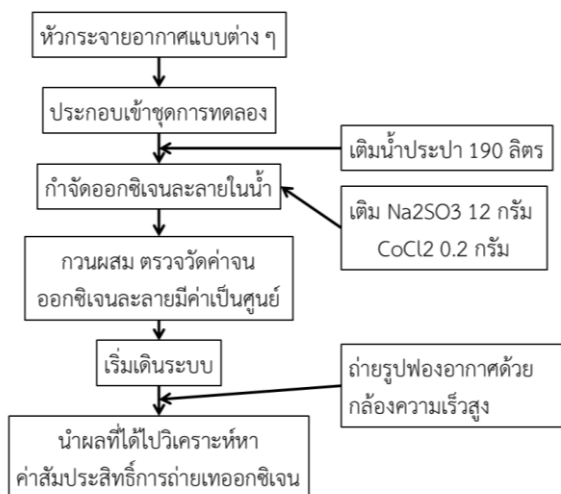
รูปที่ 3.6 ภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์โดยไม่มีอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว

2) ศึกษาตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศขณะเติมอากาศตามหัวข้อข้างต้น เติมอากาศที่ 3 5 10 15 20 25 และ 30 ลิตร/นาที ในถังเติมอากาศขนาด 190 ลิตร ใช้น้ำที่มีลักษณะตามหัวข้อที่ 1) ระหว่างการเติมอากาศถ่ายภาพฟองอากาศโดยกล้องความเร็วสูงและตรวจวัดค่าความดันลด เพื่อศึกษาตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ และประสิทธิภาพเชิงพลังงาน

3) ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว ทำการทดลองเหมือนหัวข้อที่ 1) บันทึกผล (วิธีการติดตั้งระบบแสดงไว้ในรูปที่ 3.7)



รูปที่ 3.7 ภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ที่มีอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว



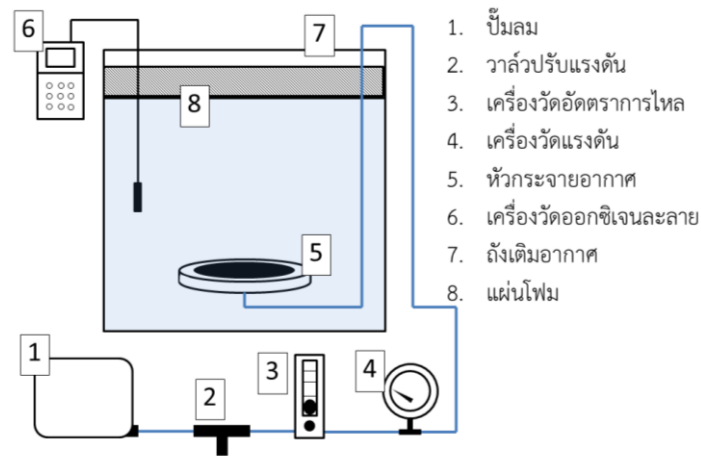
รูปที่ 3.8 แผนภาพแสดงวิธีการทดลองประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารของหัวกระจายอากาศแบบต่าง ๆ ในน้ำสะอาด

3.3.2 การวิเคราะห์หาตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์จากภาพถ่าย

- 1) ตัวแปรหลักที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพถ่าย คือ ขนาดของฟองอากาศและความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ นำภาพที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่แล้วมาวิเคราะห์
- 2) วัดขนาดฟองอากาศจำนวน 50 ฟอง ในโปรแกรม ImageJ เพื่อหาค่าเฉลี่ยของฟองอากาศแบบซอเทอร์ (Sauter mean diameter) (Sauter 1926) และวัดความเร็วลอยตัวของฟองอากาศด้วยโปรแกรม ImageJ
- 3) วิเคราะห์หาตัวแปรอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศตัวอื่นด้วยการคำนวณ ได้แก่ พื้นที่สัมผัสจำเพาะและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารผ่านชั้นกลางของเหลว

3.3.3 การวิเคราะห์แยกส่วนระหว่างการถ่ายเทออกซิเจนของฟองอากาศและที่ผิวน้ำ

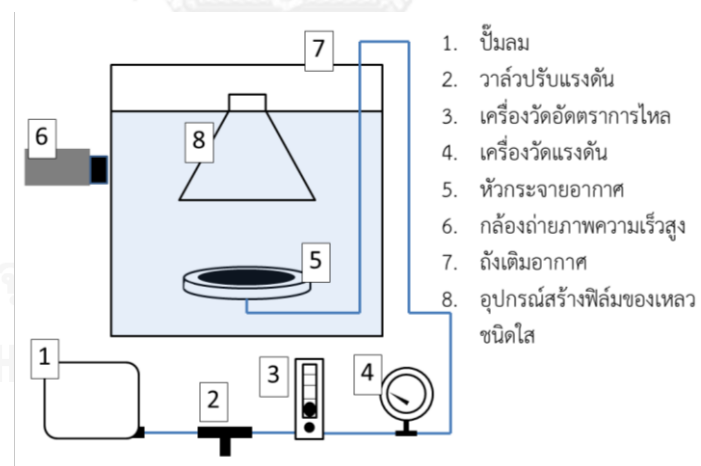
- 1) ทำการทดลองด้วยแผ่นโฟม โดยวิธีการทำเหมือนกับหัวข้อ 3.3.1 ข้อ 1) เพียงแต่ใช้โฟมขนาดเท่ากับหน้าตัดของถังปิดไว้บริเวณผิวน้ำดังแสดงในรูปที่ 3.9 และหัวกระจายอากาศที่ใช้มีเพียงสองชนิด คือ หัวกระจายอากาศแบบแข็งและแบบเมมเบรน
- 2) ทำการทดลองด้วยไนโตรเจน โดยวิธีการทำเหมือนกับหัวข้อ 3.3.1 ข้อ 1) แต่เปลี่ยนปั๊มลมเป็นแก๊สไนโตรเจนแทน



รูปที่ 3.9 ภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ที่มีการปิดแผ่นโฟมไว้ที่ผิวน้ำ

3.3.4 การศึกษากลไกการทำงานของอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว

1) ติดตั้งระบบด้วยอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวชนิดใส เติมอากาศด้วยปั๊มลม ที่อัตราการไหล 3 5 10 15 20 25 และ 30 ลิตรต่อนาที ถ่ายภาพลักษณะของฟองอากาศภายในอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง แสดงการติดตั้งดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อศึกษาลักษณะของฟองอากาศภายในอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว

2) วิเคราะห์ภาพถ่ายที่ได้ด้วยการวัดระยะการสะสมของฟองอากาศ และความเข้มแสงของภาพด้วยโปรแกรม Image Frame Work

3) วัดระยะการกระจายตัวของโฟมฟองอากาศที่ผิวน้ำด้วยไม้บรรทัดขณะทำการเติมอากาศ

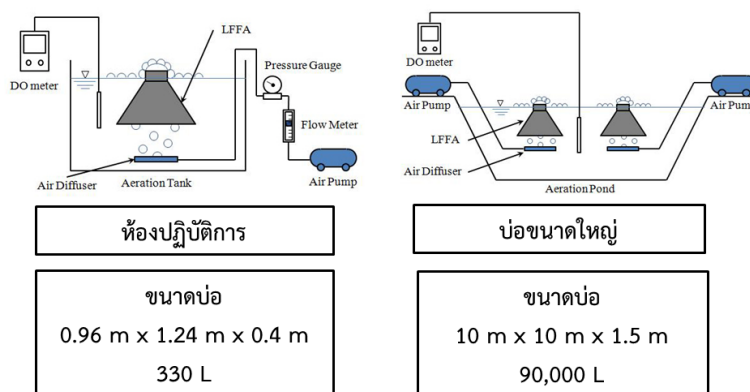
4) ศึกษาเพิ่มเติมด้วยการเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ 2-เอทิลเฮกซิลโซเดียมซัลเฟต ลงไปในระบบความเข้มข้น 0.01 CMC (28.79 มก./ลิตร) และความเข้มข้น 0.1 CMC (287.9 มก./ลิตร) ทำการทดลองเฉพาะหัวกระจายอากาศแบบเมมเบรน ทำการทดลองเหมือนหัวข้อ 3.3.1 ข้อ

1) หาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน

3.3.5 การศึกษาลักษณะการเรียงชุดอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว

1) ทดลองระดับห้องปฏิบัติการ ดังที่ใช้ขนาด 330 ลิตร ทำการทดสอบเพื่อหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของระบบ วิธีการทดลองจะคล้ายกับหัวข้อ 3.3.1 แต่จะมีการจัดเรียงอุปกรณ์ซับซ้อนขึ้น หัวกระจายอากาศที่ใช้เป็นแบบแข็ง อัตราการไหลของอากาศอยู่ที่ 24 ลิตรต่อนาที ระยะจมน้ำของหัวกระจายอากาศอยู่ที่ 40 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ส่วนตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์นั้นทั้งนี้เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ จึงนำภาพไปไว้ในส่วนผลของทดลอง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.31 ระดับที่วัดออกซิเจนละลายอยู่บริเวณกึ่งกลางของความลึก

2) การทดลองในบ่อใหญ่ขนาด 90,000 ลิตร กว้าง 10 เมตร ยาว 10 เมตร ลึก 1.5 เมตร อัตราการไหลของอากาศที่ใช้ คือ 25 ลิตรต่อนาทีสำหรับหัวกระจายอากาศหนึ่งหัว (100 ลิตรต่อนาทีสำหรับหนึ่งชุดอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว) ระยะที่ทำการวัดออกซิเจนละลายอยู่ที่ 10 เซนติเมตร 75 เซนติเมตร และ 150 เซนติเมตร วัดจากผิวน้ำลงไป สำหรับตำแหน่งการวางอุปกรณ์และจุดที่วัดออกซิเจนละลายนั้นแสดงไว้ในรูปที่ 4.34



รูปที่ 3. 11 ภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการและในบ่อขนาดใหญ่

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 การศึกษาระบบการเติมอากาศแบบปกติ

ในหัวข้อนี้จะประกอบด้วยการเปรียบเทียบตัวแปรการถ่ายเทออกซิเจนและอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศของหัวกระจายอากาศชนิดต่าง ๆ เพื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะและประสิทธิภาพของหัวกระจายอากาศทั้งสามชนิด ได้แก่ หัวกระจายอากาศแบบแข็ง หัวกระจายอากาศแบบท่ออย่าง และหัวกระจายอากาศแบบเมมเบรน ซึ่งข้อมูลเบื้องต้นของหัวกระจายอากาศแสดงดังตารางด้านล่าง (สามารถดูภาพหัวกระจายอากาศทั้งสามชนิดได้ในรูปที่ 3.1)

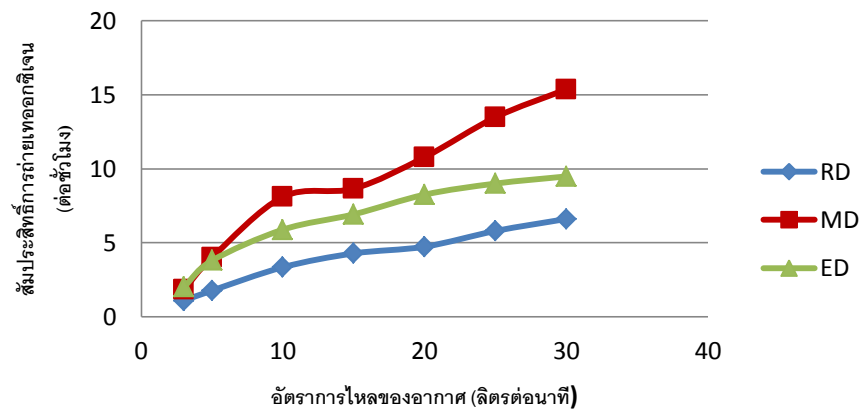
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงลักษณะหัวกระจายอากาศที่นำมาทดลอง

หัวกระจายอากาศ	ชื่อย่อ	ลักษณะ
1. แบบแข็ง	RD	หัวกระจายอากาศพลาสติกทรงกระบอก
2. แบบท่ออย่าง	ED	หัวกระจายอากาศท่ออย่าง โดยทำจากยางรีไซเคิล
3. แบบเมมเบรน	MD	หัวกระจายอากาศแผ่นงานเมมเบรน

4.1.1 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร

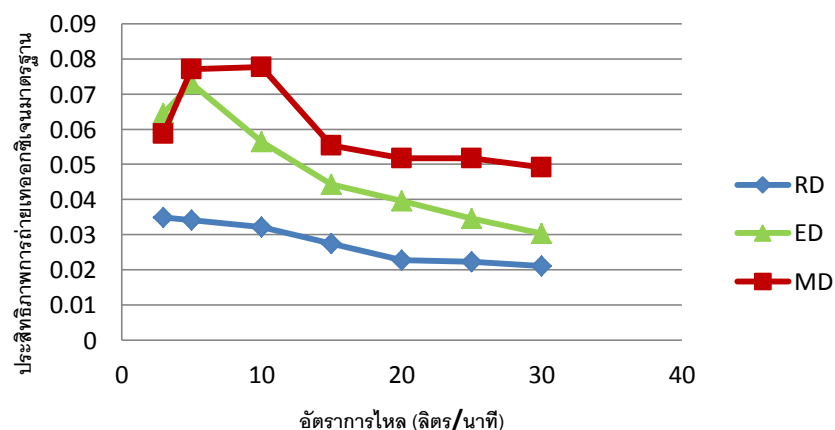
ทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหัวกระจายอากาศทั้งสามชนิด โดยอัตราการไหลของอากาศที่ใช้มีทั้งหมดเจ็ดค่า ได้แก่ 3 5 10 15 20 25 และ 30 ลิตรต่อนาที ผลการวิเคราะห์พบว่าได้ดังกราฟรูปที่ 4.1

CHULALONGKORN UNIVERSITY



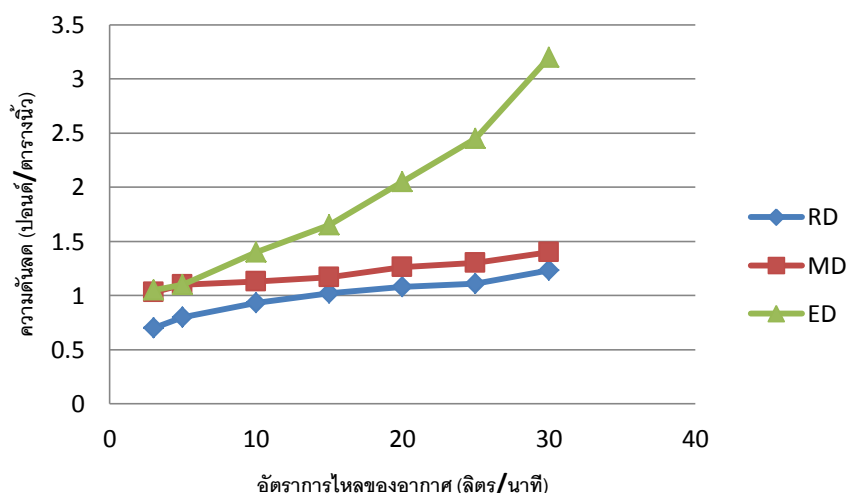
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนกับอัตราการไหลของอากาศ

จากกราฟพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของอากาศ โดยหัวกระจายอากาศแบบเมมเบรนจะให้ค่าสัมประสิทธิ์ที่สูงที่สุด ส่วนหัวกระจายอากาศแบบท่ออย่างและแบบแข็งจะให้ค่าที่ลดหลั่นลงมาตามลำดับ โดยหัวกระจายอากาศแบบเมมเบรนนั้นจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในช่วงระหว่าง 1.8 – 15.4 ต่อชั่วโมง หัวกระจายอากาศแบบท่ออย่างจะให้ค่าระหว่าง 2.0 – 9.5 ต่อชั่วโมง และหัวกระจายอากาศแบบแข็งจะให้ค่าระหว่าง 1.1 – 6.6 ต่อชั่วโมง อย่างไรก็ตามการเปรียบเทียบนี้เป็นการเปรียบเทียบในเชิงอัตราการเพิ่มขึ้นของออกซิเจน จึงคำนวณในรูปของประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน เพื่อให้ทราบถึงอัตราส่วนของมวลออกซิเจนที่เข้าสู่ของเหลวต่อมวลของออกซิเจนที่เติมเข้าไปในระบบ



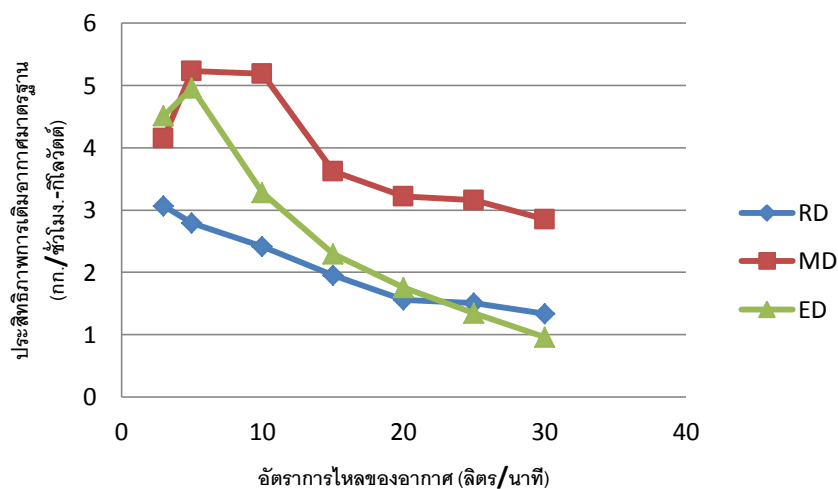
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐานกับอัตราการไหลของอากาศ

จากรูปที่ 4.2 พบว่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐานมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศมากขึ้น โดยประสิทธิภาพของหัวกระจายอากาศทั้งสามชนิดเรียงจากมากไปหาน้อยได้แก่ แบบเมมเบรน แบบท่ออย่าง และแบบแข็งตามลำดับ ซึ่งอันดับของประสิทธิภาพนั้นเหมือนกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน โดยค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐานนั้น หัวกระจายอากาศแบบเมมเบรนมีค่าระหว่าง 0.049 – 0.077 หัวกระจายอากาศแบบท่ออย่างมีค่าระหว่าง 0.030 – 0.073 และหัวกระจายอากาศแบบแข็งมีค่าระหว่าง 0.021 – 0.035 เมื่อกล่าวถึงประสิทธิภาพเชิงมวลออกซิเจนแล้วควรจะเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงพลังงานเพิ่มเติมด้วย โดยพลังงานที่ใช้ในระบบมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความดันลดที่เกิดในระบบ แสดงในกราฟรูปถัดไป



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับอัตราการไหลของอากาศ

จากรูปพบว่าความดันลดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ โดยหัวกระจายอากาศแบบท่ออย่างนั้นมีความดันลดมากที่สุด ส่วนหัวกระจายอากาศแบบแข็งและแบบเมมเบรนนั้นมีค่าความดันลดที่ใกล้เคียงกัน แต่หัวกระจายอากาศแบบเมมเบรนนั้นจะมีค่าความดันลดมากกว่าเล็กน้อย ค่าความดันลดของหัวกระจายอากาศแบบท่ออย่างมีค่าระหว่าง 1.05 – 3.20 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว หัวกระจายอากาศแบบเมมเบรนมีค่าระหว่าง 1.03 – 1.4 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และหัวกระจายอากาศแบบแข็งมีค่าระหว่าง 0.7 – 1.23 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ค่าความดันลดที่ได้สามารถนำมาคำนวณหาเป็นค่ากำลังที่ใช้ในการเติมอากาศ เมื่อนำค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐานมาหารด้วยกำลังที่ใช้ในการเติมอากาศ จะสามารถหาประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐานได้ ซึ่งเป็นค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานดังแสดงในรูปถัดไป



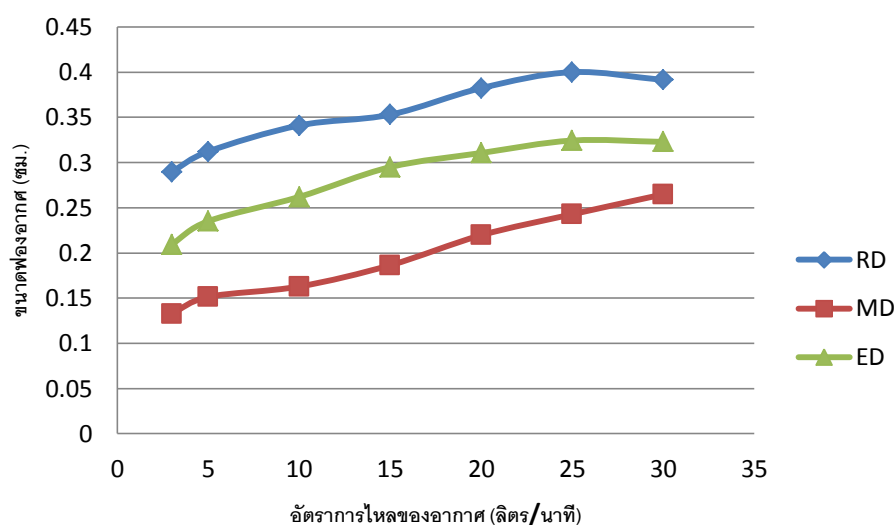
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐานกับอัตราการไหลของอากาศ

จากรูปพบว่าประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐานมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ โดยประสิทธิภาพเชิงพลังงานนั้นหัวกระจายอากาศแบบเมมเบรนมีค่าสูงที่สุด ส่วนหัวกระจายอากาศแบบแข็งและแบบท่ออย่างน้อยก็มีค่าประสิทธิภาพที่คาบเกี่ยวกัน กล่าวคือหัวกระจายอากาศแบบท่ออย่างน้อยจะให้ค่าประสิทธิภาพสูงกว่าในอัตราการไหลของอากาศที่น้อย แต่จะอัตราส่วนลดลงอย่างมากเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศมากขึ้น แต่หัวกระจายอากาศแบบแข็งนั้นจะมีอัตราการลดลงที่น้อยกว่า ทำให้ประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐานของหัวกระจายอากาศแบบแข็งมีค่าที่สูงกว่าแบบท่ออย่างน้อยเมื่ออัตราการไหลที่สูงนั่นเอง (25 – 30 ลิตรต่อนาที) โดยหัวกระจายอากาศแบบเมมเบรนนั้นมีค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐานในช่วง 2.85-5.23 กก./ชั่วโมง-กิโลวัตต์ หัวกระจายอากาศแบบท่ออย่างน้อยมีค่าระหว่าง 0.96-4.95 กก./ชั่วโมง – กิโลวัตต์ และหัวกระจายอากาศแบบแข็งมีค่าระหว่าง 1.34 – 3.07 กก./ชั่วโมง-กิโลวัตต์

การทดลองในส่วนนี้สามารถแสดงให้เห็นว่าหัวกระจายอากาศแบบเมมเบรนนั้นมีประสิทธิภาพในการใช้งานที่สูงที่สุด เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่สูง และใช้พลังงานค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับหัวกระจายอากาศทั้งสามประเภท ในส่วนถัดไปจึงจะทำการศึกษาในรูปของตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศเพื่ออธิบายถึงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในส่วนแรก

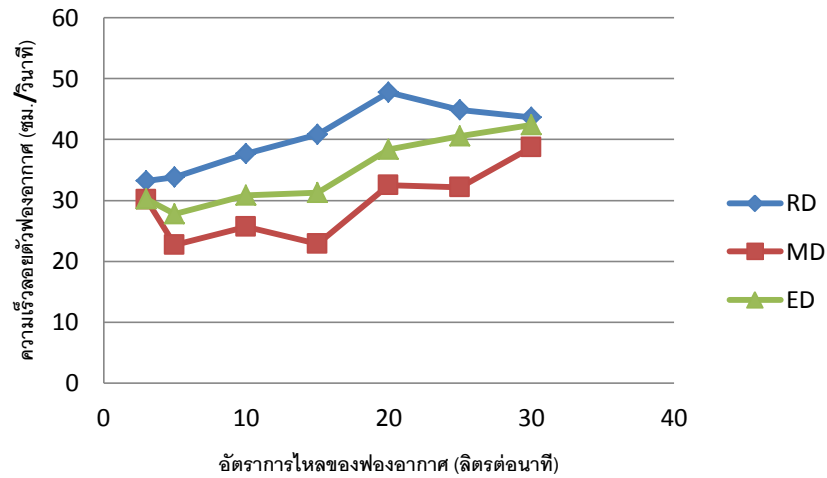
4.1.2 การศึกษาในรูปของตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ

ในส่วนนี้จะทำการวิเคราะห์ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศที่เกิดจากหัวกระจายอากาศทั้งสามชนิดโดยการถ่ายภาพฟองอากาศด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงเพื่อหาขนาดฟองและความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ เพื่อนำไปคำนวณหาค่าของตัวแปรอื่นต่อไป ในเบื้องต้นจะทำการพิจารณาถึงขนาดฟองอากาศก่อน



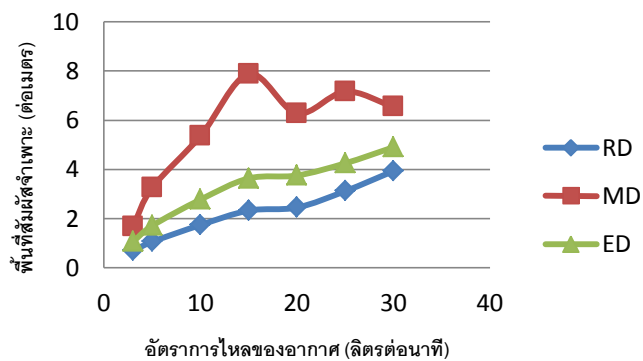
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟองอากาศกับอัตราการไหลของอากาศ

จากรูปพบว่าขนาดฟองอากาศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของฟองอากาศ โดยหัวกระจายอากาศแบบเมมเบรนมีขนาดฟองเฉลี่ยเล็กที่สุด หัวกระจายอากาศแบบท่ออย่างมีขนาดใหญ่กว่าเล็กน้อย และหัวกระจายอากาศแบบแข็งจะให้ขนาดฟองอากาศใหญ่ที่สุด โดยหัวกระจายอากาศแบบแข็งจะมีขนาดฟองอากาศอยู่ในช่วง 0.29 – 0.40 เซนติเมตร หัวกระจายอากาศแบบท่ออย่างให้ขนาดฟองอากาศระหว่าง 0.21 – 0.32 เซนติเมตร และหัวกระจายอากาศแบบเมมเบรนให้ขนาดฟองอากาศระหว่าง 0.13 – 0.26 เซนติเมตร ทั้งนี้ขนาดฟองอากาศที่ได้นั้นขึ้นอยู่กับประเภทของหัวกระจายอากาศและขนาดรูพรุนของหัวกระจายอากาศและปริมาณอัตราการไหลของอากาศ โดยหัวกระจายอากาศแบบยืดหยุ่น (ในที่นี้คือ หัวกระจายอากาศแบบท่ออย่างและแบบเมมเบรน) นั้นจะสามารถขยายตัวได้ ทำให้มีช่วงขนาดของฟองอากาศที่กว้างกว่าแบบแข็ง ส่วนแบบแข็งจะมีช่วงขนาดฟองอากาศที่แคบ และถ้าเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจนเกินค่าที่ออกแบบจะทำให้อากาศบางส่วนออกมาเร็ว ทำให้ขนาดฟองอากาศที่ได้ใหญ่และไม่เป็นรูปทรงกลม ทำให้ไม่สามารถวัดขนาดของฟองอากาศได้ หลังจากวัดขนาดฟองอากาศแล้ว ภาพถ่ายที่ได้สามารถนำไปวิเคราะห์หาความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ ดังแสดงในรูปถัดไป



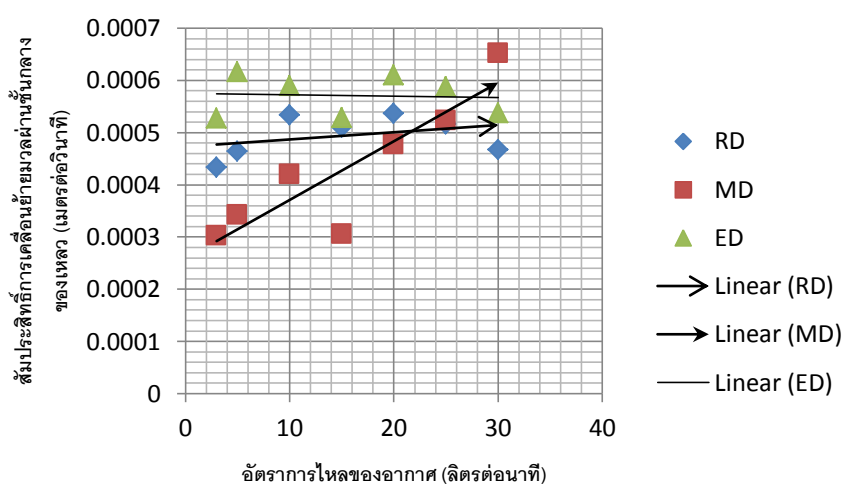
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลอยตัวพองอากาศกับอัตราการไหลของอากาศ

จากรูปที่ 4.6 พบว่าความเร็วลอยตัวของพองอากาศมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ ยกเว้นหัวกระจายอากาศแบบท่ออย่างที่มีความเร็วลอยตัวพองอากาศค่อนข้างคงที่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ โดยหัวกระจายอากาศแบบแข็งมีความเร็วลอยตัวในช่วง 33 – 48 เซนติเมตรต่อวินาที หัวกระจายอากาศแบบท่ออย่างอยู่ในช่วง 28-42 เซนติเมตรต่อวินาที และหัวกระจายอากาศแบบเมมเบรนอยู่ในช่วง 23 – 39 เซนติเมตรต่อวินาที โดยค่าของขนาดพองอากาศและความเร็วลอยตัวของพองอากาศเราสามารถนำไปคำนวณหาค่าพื้นที่สัมผัสจำเพาะได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่สัมผัสจำเพาะกับอัตราการไหลของอากาศ

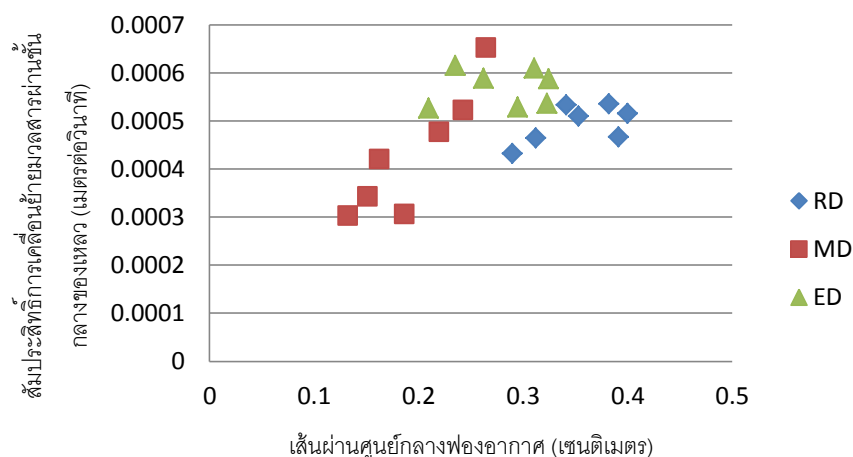
จากรูปพบว่าพื้นที่สัมผัสจำเพาะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ โดยค่าพื้นที่สัมผัสจำเพาะของหัวกระจายอากาศแบบท่ออย่างและแบบแข็งค่อนข้างมีค่าใกล้เคียงกัน แต่หัวกระจายอากาศแบบท่ออย่างจะมีค่าสูงกว่าเล็กน้อยในอัตราการไหลของอากาศที่มากขึ้น โดยพื้นที่สัมผัสจำเพาะของหัวกระจายอากาศแบบแข็งอยู่ในช่วง 0.70 – 3.93 ต่อเมตร หัวกระจายอากาศแบบท่ออย่างอยู่ในช่วง 1.06 – 4.94 ต่อเมตร และหัวกระจายอากาศแบบเมมเบรนอยู่ในช่วง 1.68 – 7.88 ต่อเมตร ค่าพื้นที่สัมผัสจำเพาะเป็นค่าที่บอกถึงปริมาณฟองอากาศ และเวลากักเก็บของฟองอากาศในระบบ โดยหัวกระจายอากาศแบบเมมเบรนมีค่าพื้นที่สัมผัสจำเพาะที่สูงเนื่องจากฟองอากาศที่ได้จากหัวกระจายอากาศชนิดนี้มีขนาดเล็กและลอยตัวช้า ทำให้ฟองอากาศทั้งหมดมีพื้นที่สัมผัสที่สูงและมีระยะเวลาที่กักเก็บที่นาน ซึ่งค่าพื้นที่สัมผัสจำเพาะที่ได้สามารถนำไปคำนวณหาสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลสารผ่านชั้นกลางของเหลวได้ โดยนำค่าพื้นที่สัมผัสจำเพาะไปหารค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่กล่าวถึงข้างต้น



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลสารผ่านชั้นกลางของเหลวและอัตราการไหลของอากาศ

จากรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นถึงสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารผ่านชั้นกลางของเหลว จากรูปจะเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารผ่านชั้นกลางของเหลวของหัวกระจายอากาศแบบแข็งและแบบท่ออย่างมีค่าค่อนข้างคงที่ โดยหัวกระจายอากาศแบบแข็งมีค่าอยู่ในช่วง 0.00043 – 0.00054 เมตรต่อวินาที ส่วนหัวกระจายอากาศแบบท่ออย่างนั้นมีค่าอยู่ในช่วง 0.00052 – 0.00061 เมตรต่อวินาที สำหรับหัวกระจายอากาศแบบเมมเบรนพบว่าค่าที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ โดยค่าที่ได้อยู่ในช่วง 0.00030 – 0.00065 เมตรต่อวินาที ส่วนสาเหตุที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารผ่านชั้นกลางของเหลวของหัวกระจายอากาศแบบเมมเบรนมี

แนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นเพราะว่าขนาดของฟองอากาศ จึงทำการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์กับขนาดฟองอากาศ



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารผ่านชั้นกลางของเหลวกับเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ

จากรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าในช่วงขนาดฟองอากาศขนาดเล็ก (ประมาณ 0.1 - 0.3 เซนติเมตร) ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลสารผ่านชั้นกลางของเหลวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ แต่เมื่อฟองอากาศมีขนาดใหญ่ (ประมาณ 0.3 เซนติเมตรขึ้นไป) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารผ่านชั้นกลางของเหลวจะมีแนวโน้มคงที่ ซึ่งผลที่ได้นี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้ศึกษามา คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารผ่านชั้นกลางของเหลวนั้นจะมีความสัมพันธ์กับขนาดของฟองอากาศในแต่ละช่วง โดยอีกปัจจัยที่จะส่งผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารผ่านชั้นกลางของเหลวในช่วงนี้นั้นจะเป็นความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในน้ำ (Sardeing, Painmanakul et al. 2006)

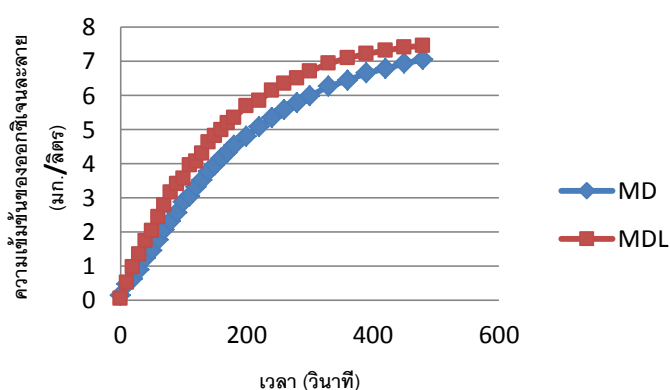
ผลการทดลองในหัวข้อ 4.1 บอกถึงคุณสมบัติทางการใช้งานเบื้องต้นของหัวกระจายอากาศทั้งสามชนิด ทั้งนี้เพื่อศึกษาลักษณะของตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบในเบื้องต้นสามารถสรุปได้คร่าว ๆ ว่า หัวกระจายอากาศที่ให้ฟองอากาศขนาดเล็กจะมีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนที่สูง ทั้งนี้เนื่องจากว่าฟองอากาศขนาดเล็กนั้นมีพื้นที่สัมผัสที่มากกว่าฟองอากาศขนาดใหญ่ รวมทั้งความเร็วลอยตัวจะต่ำกว่าฟองอากาศขนาดใหญ่ ทำให้ฟองอากาศถูกกักเก็บในระบบนานขึ้น จึงส่งผลให้การถ่ายเทออกซิเจนสูงขึ้น

4.2 การศึกษาเปรียบเทียบระหว่างระบบปกติกับระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว

ในหัวข้อนี้จะทำการเปรียบเทียบระหว่างระบบปกติในหัวข้อที่ 4.1 และระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวในรูปของตัวแปรการถ่ายเทมวลสาร ในเบื้องต้นพบว่าอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเติมอากาศได้จริง ดังรายละเอียดที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้

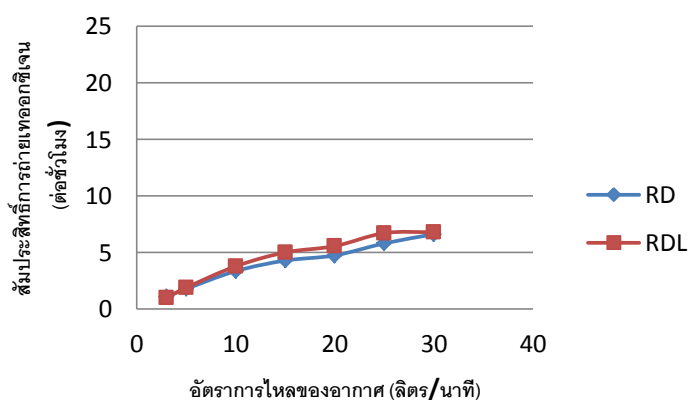
ในหัวข้อแรกที่จะทำการเปรียบเทียบคือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างระบบปกติที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวกับระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว ทำการเปรียบเทียบแยกกันระหว่างหัวกระจายอากาศชนิดต่าง ๆ เพื่อดูแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนเมื่อเปลี่ยนลักษณะหัวกระจายอากาศที่แตกต่างกัน ในหัวข้อนี้จะเพิ่มชื่อย่อในการเรียกระบบต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองโดยการเติมอักษร L เข้าไปในชื่อย่อระบบปกติจะหมายถึงระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว กล่าวคือ RDL คือระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบแข็งพร้อมติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว EDL คือ ระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบท่ออย่างพร้อมติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว และ MDL คือ ระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบเมมเบรนพร้อมติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว

ในการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนนั้นเราจะทำการวัดออกซิเจนละลายที่เพิ่มขึ้นที่ระยะเวลาต่าง ๆ ในเบื้องต้นจะแสดงตัวอย่างของการวัดค่าออกซิเจนละลายในระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวและระบบที่ไม่ได้ติดตั้ง เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นชัดเจนว่าระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวมีอัตราการเพิ่มขึ้นของออกซิเจนละลายอย่างไร ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.10 จากรูปจะเห็นได้ว่าระบบที่ใช้ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวจะช่วยเพิ่มอัตราเร็วในการถ่ายเทออกซิเจน ทำให้ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายเพิ่มได้เร็วกว่าระบบที่ไม่ใช้อุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว



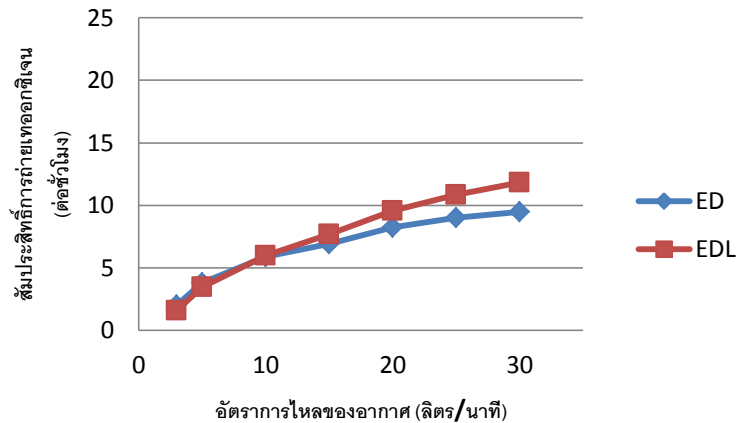
รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของออกซิเจนละลายกับเวลา ในระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบเมมเบรนที่อัตราการไหลของอากาศ 30 ลิตรต่อนาที

หวักระจ่ายอากาศชนิดแรกที่ยกมาเปรียบเทียบคือระบบที่ใช้หวักระจ่ายอากาศแบบแห้ง นำข้อมูลสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนกับอัตราการไหลของอากาศมาเขียนกราฟจะได้ดังรูปที่ 4.11 จากกราฟดังกล่าวพบว่าในระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวจะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่สูงกว่าระบบที่ไม่ติดตั้งเล็กน้อย โดยระบบปกติมีค่าระหว่าง 1.1 – 6.6 ต่อชั่วโมง และระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวนั้นมีค่าระหว่าง 1.0 – 6.8 ต่อชั่วโมง โดยในอัตราการไหลของอากาศระหว่าง 3 – 5 ลิตรต่อนาทีพบว่าทั้งสองระบบนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่ใกล้เคียงกันมากไม่เกิน 0.1 ต่อชั่วโมง (แตกต่างกันไม่เกิน 10%) แต่ในอัตราการไหลตั้งแต่ 10 – 25 ลิตรต่อนาทีนั้น ทั้งสองระบบจะมีความแตกต่างที่ชัดเจนขึ้น โดยระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวจะดีกว่าระบบที่ไม่ติดตั้งประมาณ 0.4 – 0.9 ต่อชั่วโมง (เพิ่มขึ้นประมาณ 13 – 17% เมื่อเทียบกับระบบปกติ) ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของอากาศ แต่ว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศมาที่ 30 ลิตรต่อนาทีนั้นพบว่าทั้งสองระบบจะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่ใกล้เคียงกัน (ต่างกัน 0.18 ต่อชั่วโมง)



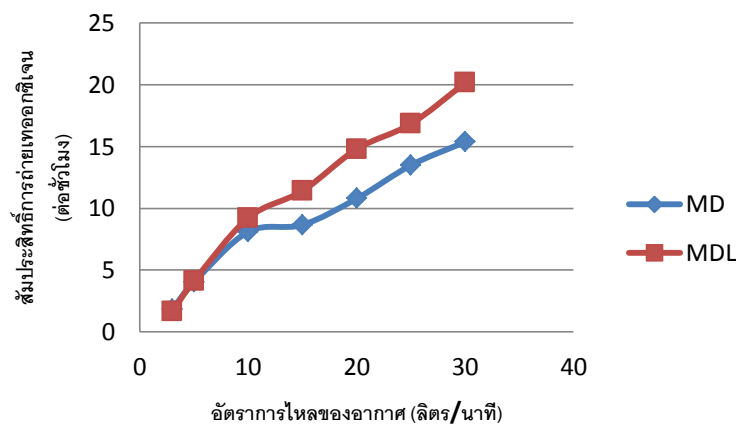
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนกับอัตราการไหลของอากาศในระบบที่มีการใช้หวักระจ่ายอากาศแบบแห้ง

ในระบบที่ใช้หวักระจ่ายอากาศแบบท่อยางก็เช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ในระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่สูงกว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของระบบปกติจะมีค่าอยู่ที่ 2.0 – 9.5 ต่อชั่วโมง และระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวจะมีค่าอยู่ที่ 1.6 – 11.8 ต่อชั่วโมง โดยที่อัตราไหลของอากาศน้อย 3 – 10 ลิตรต่อนาที จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนใกล้เคียงกัน คือ ต่างกันในช่วง 0.1 – 0.4 ต่อชั่วโมง แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศที่ 15 – 30 ลิตรต่อนาทีพบว่ามีความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนชัดเจนขึ้น โดยอยู่ในช่วงระหว่าง 0.8 – 2.3 ต่อชั่วโมง (ประมาณ 11 – 25% เมื่อเทียบกับระบบปกติ)



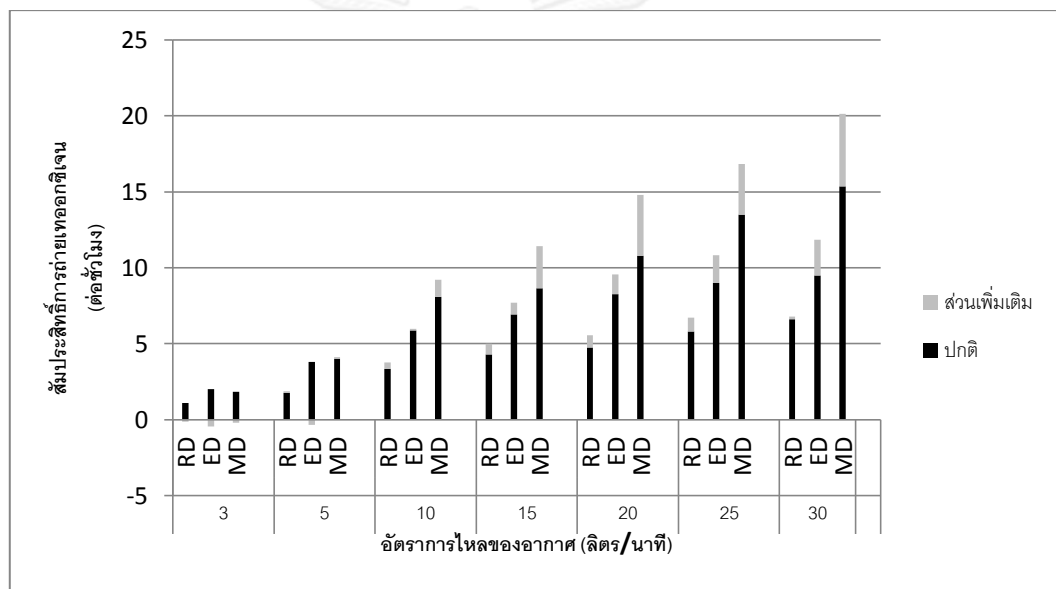
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนกับอัตราความชื้นของอากาศ ในระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบท่ออย่าง

สำหรับระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบเมมเบรน (รูปที่ 4.13) พบว่ามีค่าความแตกต่างของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของระบบที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งอุปกรณ์ชัดเจนกว่าระบบหัวกระจายอากาศสองแบบข้างต้น โดยในระบบปกติมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในช่วง 1.8 – 15.4 ต่อชั่วโมง ส่วนระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์นั้นมีค่าระหว่าง 1.6 - 20.1 ต่อชั่วโมง โดยในอัตราความชื้นในช่วงที่มีค่าต่ำตั้งแต่ 3 – 10 ลิตรต่อนาฬิกา จะมีความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนน้อย ความแตกต่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนระหว่าง 0.2 – 1.1 ต่อชั่วโมง แต่เมื่อเพิ่มอัตราความชื้นของอากาศที่ 15 – 30 ลิตรต่อนาฬิกาพบว่ามีค่าความแตกต่างของสัมประสิทธิ์ที่เพิ่มมากขึ้น โดยมีค่าความแตกต่างระหว่าง 2.8 – 4.8 ต่อชั่วโมง (ประมาณ 25 – 37%)



รูปที่ 4. 13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนกับอัตราความชื้นของอากาศ ในระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบเมมเบรน

ทำการรวมข้อมูลของระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศทั้งสามชนิดในรูปแบบของแผนภูมิแท่งดังแสดงในรูปที่ 4.14 โดยวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างระบบปกติกับระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวจะได้ดังรูปที่ จากรูปจะเห็นได้ว่ากราฟแท่งจะแบ่งเป็นสองส่วนคือส่วนที่เป็นสีดำกับสีเทา ส่วนที่เป็นสีดำคือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในระบบที่ไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว ส่วนระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวนั้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนรวมกันระหว่างส่วนที่เป็นสีดำกับสีเทา ทั้งนี้เขียนส่วนที่เป็นสีเทาเพื่อแสดงให้เห็นชัดเจนว่า ระบบที่ทำการติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวนั้นช่วยเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนขึ้นมาเท่าใด



รูปที่ 4.14 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนกับอัตราการไหลของอากาศ โดยทำการเปรียบเทียบหัวกระจายอากาศแบบต่าง ๆ

สำหรับการเปรียบเทียบตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทออกซิเจนอื่น ได้แก่ อัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (SOTR) ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (SOTE) และประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน (SAE) จะแสดงให้เห็นในรูปของตารางที่ 4.2

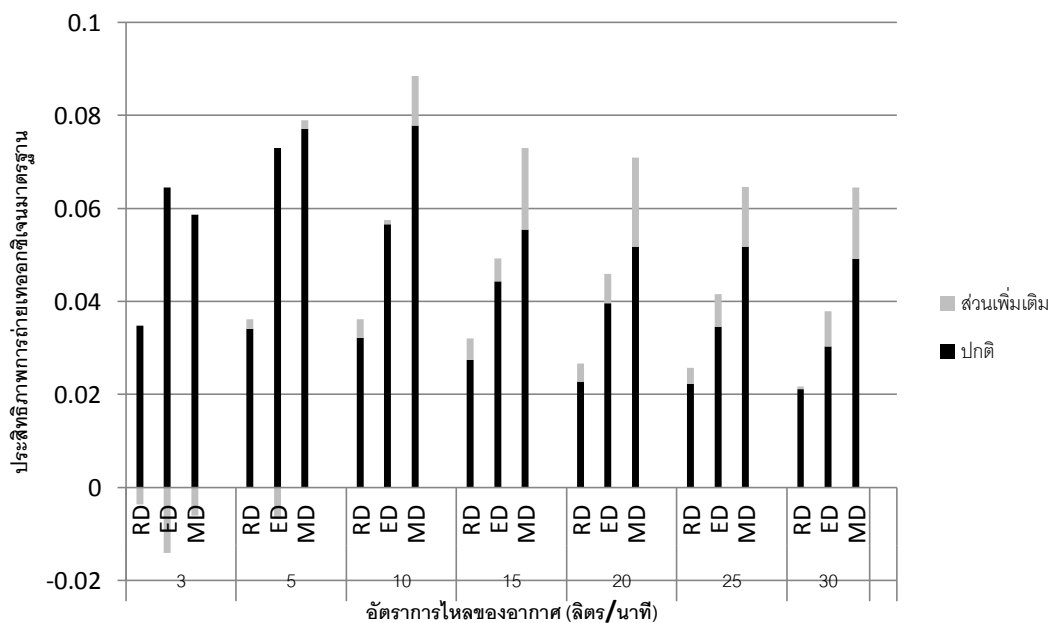
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทออกซิเจน โดยทำการเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้และไม่ใช้อุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว

อัตราไหล อากาศ (ลิตร/ นาที)	SOTR (กก./ชม.)		SOTE		SAE (กก./ชั่วโมง- กิโลวัตต์)	
	RD	RDL	RD	RDL	RD	RDL
3	0.0019	0.0017	0.035	0.031	3.07	2.74
5	0.0031	0.0033	0.034	0.036	2.79	2.96
10	0.0058	0.0065	0.032	0.036	2.42	2.72
15	0.0074	0.0086	0.027	0.032	1.95	2.28
20	0.0082	0.0096	0.023	0.027	1.56	1.83
25	0.0100	0.0116	0.022	0.026	1.50	1.74
30	0.0114	0.0117	0.021	0.022	1.34	1.37
	ED	EDL	ED	EDL	ED	EDL
3	0.0035	0.0027	0.065	0.050	4.51	3.53
5	0.0066	0.0060	0.073	0.066	4.95	4.49
10	0.0102	0.0103	0.057	0.057	3.28	3.34
15	0.0120	0.0133	0.044	0.049	2.30	2.55
20	0.0143	0.0165	0.040	0.046	1.76	2.04
25	0.0155	0.0187	0.035	0.042	1.34	1.62
30	0.0164	0.0204	0.030	0.038	0.96	1.20
	MD	MDL	MD	MDL	MD	MDL
3	0.0032	0.0028	0.059	0.053	4.15	3.72
5	0.0069	0.0071	0.077	0.079	5.23	5.36
10	0.0140	0.0159	0.078	0.088	5.19	5.91
15	0.0150	0.0197	0.055	0.073	3.62	4.77
20	0.0186	0.0255	0.052	0.071	3.22	4.42
25	0.0233	0.0291	0.052	0.065	3.16	3.94
30	0.0265	0.0348	0.049	0.064	2.85	3.74

เมื่อเปรียบเทียบในรูปของประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนพบว่าอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐานได้ ทำการสรุปข้อมูลเป็นแผนภูมิแท่งดังแสดงในรูปที่ 4.15 ทำการวิจารณ์ผลโดยแยกชนิดของหัวกระจายอากาศได้ดังนี้

หัวกระจายอากาศแบบแข็งพบว่าที่อัตราการไหล 3 – 10 ลิตรต่อนาฬิกาจะมีค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐานใกล้เคียงกัน คือ มีค่าอยู่ในช่วง 0.032 – 0.035 สำหรับระบบที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว ส่วนระบบที่ติดตั้งฟิล์มของเหลวจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.031 – 0.036 สำหรับอัตราการไหลของอากาศตั้งแต่ 15 – 30 ลิตรต่อนาฬิกาพบว่าระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวจะให้ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐานสูงกว่าชัดเจนขึ้น โดยในระบบที่ไม่ติดตั้งจะมีค่าระหว่าง 0.021 – 0.027 แต่เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ของเหลวจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.021 – 0.032

หัวกระจายอากาศแบบท่อยางนั้นพบว่าที่อัตราการไหลของอากาศ 3 – 10 ลิตรต่อนาฬิกาจะมีค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนใกล้เคียงกัน แต่ในอัตราไหลที่ต่ำระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวจะให้ค่าประสิทธิภาพที่ต่ำกว่า โดยในระบบที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์จะมีค่าระหว่าง 0.057 – 0.073 เมื่อติดตั้งอุปกรณ์จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.050 – 0.066 ในอัตราการไหลของอากาศ 15 – 30 ลิตรต่อนาฬิกา พบว่าอุปกรณ์ที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวจะให้ค่าประสิทธิภาพที่สูงกว่า โดยระบบที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.030 – 0.044 และระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์จะมีค่าระหว่าง 0.037 – 0.049

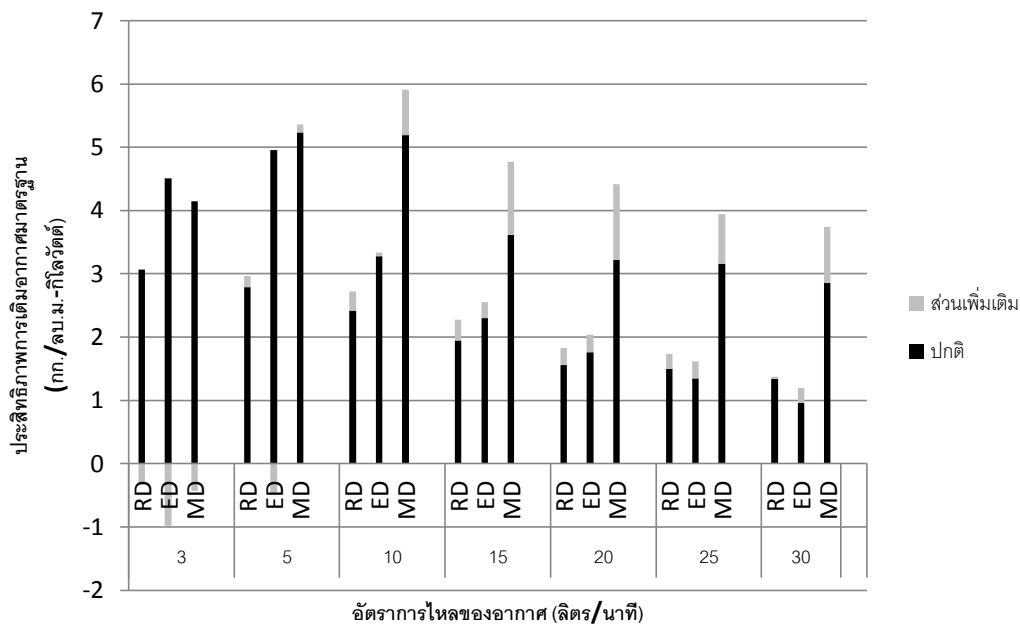


รูปที่ 4.15 แผนภูมิแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐานกับอัตราการไหลของอากาศ โดยทำการเปรียบเทียบกับหัวกระจายอากาศชนิดต่าง ๆ

สำหรับหวักระจ่ายอากาศแบบเมมเบรนนั้น ในอัตราการไหลของอากาศ 3 – 5 ลิตรต่อนาที ในระบบที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวจะมีค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนใกล้เคียงกัน โดยในระบบที่ไม่ติดตั้งจะมีค่าระหว่าง 0.058 – 0.077 ระบบที่ติดตั้งจะมีค่าระหว่าง 0.052 – 0.079 เมื่อเพิ่มอัตราไหลของอากาศให้อยู่ในช่วง 10 – 30 ลิตรต่อนาทีพบว่า ระบบที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.049 – 0.078 เมื่อติดตั้งอุปกรณ์จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.064 – 0.088 โดยระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวจะมีค่าที่สูงกว่าระบบที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์

เมื่อพิจารณาระบบที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้หวักระจ่ายอากาศทั้งสามแบบ พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐานจะลดลง โดยในช่วงอัตราการไหลที่ต่ำ ระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์จะให้ค่าประสิทธิภาพที่น้อยกว่า แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลที่มากขึ้น จะให้ค่าประสิทธิภาพที่สูงกว่า ระบบที่ใช้หวักระจ่ายอากาศแบบแข็งเมื่อติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว จะเพิ่มประสิทธิภาพได้ประมาณ 13 – 17% เมื่อเทียบกับระบบที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์ ในอัตราการไหลของอากาศระหว่าง 10 – 25 ลิตรต่อนาที ระบบที่ใช้หวักระจ่ายอากาศแบบท่ออย่างเมื่อติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวจะเพิ่มประสิทธิภาพประมาณ 11 – 25% ในอัตราการไหลระหว่าง 15 – 30 ลิตรต่อนาที และระบบที่ใช้หวักระจ่ายอากาศแบบเมมเบรนจะเพิ่มประสิทธิภาพประมาณ 14 – 37% ในอัตราการไหลของอากาศระหว่าง 10 – 30 ลิตรต่อนาที

เมื่อทำการเปรียบเทียบในรูปของประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน โดยนำค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐานมาหารเพื่อให้อยู่ในรูปต่อหน่วยพลังงาน แสดงผลที่ได้ในรูปที่ 4.16 ทั้งนี้เมื่อติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวจะไม่มี การสูญเสียพลังงานเพิ่มเติม ทำให้การเปลี่ยนแปลงของค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศนั้นค่อนข้างใกล้เคียงกับประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐานทั้งในหวักระจ่ายอากาศแบบแข็งและแบบเมมเบรน แต่ในหวักระจ่ายอากาศแบบท่ออย่างนั้นจะมีแนวโน้มลดลงต่ำกว่าแบบอื่นชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากหวักระจ่ายอากาศแบบท่ออย่างนั้นมีแรงดันลดที่สูงมากเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ ทำให้ต้องใช้พลังงานในการเติมอากาศสูงกว่าแบบอื่น ประสิทธิภาพการเติมอากาศจึงมีแนวโน้มลดลงมากกว่าหวักระจ่ายอากาศแบบอื่นนั่นเอง ทำการวิจารณ์ผลโดยแยกชนิดของหวักระจ่ายอากาศจะได้ดังนี้



รูปที่ 4.16 แผนภูมิแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐานกับอัตราการไหลของอากาศ โดยทำการเปรียบเทียบกับหัวกระจายอากาศชนิดต่าง ๆ

หัวกระจายอากาศแบบแห้งจะมีประสิทธิภาพการเติมอากาศลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ โดยที่อัตราไหลที่ 3 – 10 ลิตรต่อนาที ประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐานจะมีค่าใกล้เคียงกันทั้งในระบบที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว โดยในระบบที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์จะมีค่าระหว่าง 2.42 – 3.07 กก./ชั่วโมง-กิ.โลวัตต์ ส่วนระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวจะมีค่าระหว่าง 2.72 – 2.96 กก./ชั่วโมง-กิ.โลวัตต์ เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศในช่วง 15 – 30 ลิตรต่อนาที พบว่าค่าของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวจะสูงกว่าระบบที่ไม่ติดตั้ง โดยในระบบที่ติดตั้งจะอยู่ในช่วง 1.33 – 1.95 กก./ชั่วโมง-กิ.โลวัตต์ ส่วนระบบที่ไม่ติดตั้งจะมีค่าอยู่ในช่วง 1.37 – 2.76 กก./ชั่วโมง-กิ.โลวัตต์

สำหรับหัวกระจายอากาศแบบท่อนั้นในอัตราการไหลที่ 3 – 10 ลิตรต่อนาที ระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวกับระบบที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์จะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยในระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์จะมีค่าในช่วง 3.28 – 4.95 กก./ชั่วโมง-กิ.โลวัตต์ ส่วนระบบที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์จะอยู่ในช่วง 3.33 – 4.49 กก./ชั่วโมง-กิ.โลวัตต์ สำหรับที่อัตราไหลของอากาศ 15 – 30 ลิตรต่อนาทีพบว่าระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์จะมีค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐานสูงกว่า โดยในระบบที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์จะมีค่าในช่วง 0.96 – 2.29 กก./ชั่วโมง-กิ.โลวัตต์ ส่วนระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์จะอยู่ในช่วง 1.19 – 2.55 กก./ชั่วโมง-กิ.โลวัตต์

สำหรับหัวกระจายอากาศแบบเมมเบรนนั้นช่วงอัตราการไหลของอากาศ 3 – 5 ลิตรต่อนาที ระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวกับระบบที่ไม่ติดตั้งจะมีค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ

มาตรฐานใกล้เคียงกัน โดยในระบบที่ไม่ติดตั้งจะมีค่าอยู่ในช่วง 4.15 – 5.23 กก./ชั่วโมง-กิโลวัตต์ ส่วนระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์จะมีค่าอยู่ระหว่าง 3.72 – 5.34 กก./ชั่วโมง-กิโลวัตต์ สำหรับอัตราการไหลของอากาศที่ 10 – 30 ลิตรต่อวินาทีนั้น ระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์จะดีกว่าระบบที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์ โดยระบบที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์จะมีค่าอยู่ในช่วง 2.85 – 5.19 กก./ชั่วโมง-กิโลวัตต์ และระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์จะอยู่ในช่วง 3.74 – 5.91 กก./ชั่วโมง-กิโลวัตต์

เมื่อเปรียบเทียบระบบหัวกระจายอากาศทั้งสามแบบพบว่าอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐานได้จริงเมื่อเดินระบบในสภาวะที่เหมาะสม โดยหัวกระจายอากาศแบบแข็งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน 13 – 17% เมื่อเทียบกับระบบที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์ ระหว่างช่วงอัตราการไหลระหว่าง 10 – 25 ลิตรต่อวินาที หัวกระจายอากาศแบบท่ออย่างสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน 11 – 25% ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 15 – 30 ลิตรต่อวินาที สำหรับหัวกระจายอากาศแบบเมมเบรนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน 14 – 37 % ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 10 – 30 ลิตรต่อวินาที

กล่าวได้ว่าเมื่อติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการเติมอากาศแบบกระจายอากาศได้จริงทั้งในแง่ของการถ่ายเทออกซิเจนและประสิทธิภาพเชิงพลังงาน ถึงแม้ว่าอย่างไรก็ดี มีข้อสังเกตว่าในระบบที่ให้พองอากาศขนาดเล็กจะเพิ่มประสิทธิภาพมากกว่าระบบที่มีพองอากาศขนาดใหญ่

ในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบในรูปของตัวแปรการถ่ายเทมวลสารทั้งหมด อย่างไรก็ตาม เพื่อให้ทราบถึงกลไกการทำงานของอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว จึงต้องทำการศึกษารายละเอียดเพิ่มเติม คือ เปรียบเทียบระหว่างการถ่ายเทออกซิเจนของพองอากาศและผิวน้ำดังแสดงในหัวข้อถัดไป

4.3 การศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการถ่ายเทออกซิเจนของพองอากาศและผิวน้ำ

กลไกการเติมอากาศในระบบกระจายอากาศนั้นมีกลไกการถ่ายเทออกซิเจนที่สำคัญสองส่วน คือ การถ่ายเทออกซิเจนจากพองอากาศเข้าสู่ผิวน้ำ และเมื่อพองอากาศนั้นลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำ จะเกิดความปั่นป่วนที่ผิวน้ำทำให้เกิดการถ่ายเทออกซิเจนจากผิวน้ำเข้าสู่ผิวน้ำอีกทางหนึ่ง ในหัวข้อนี้จึงทำการศึกษาแยกส่วนระหว่างการถ่ายเทออกซิเจนบริเวณผิวน้ำและพองอากาศ เพื่อทำความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกการทำงานของอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวให้ดีขึ้น

ในหัวข้อนี้จะทำการเลือกหัวกระจายอากาศจากสองหัวข้อแรกเพื่อมาทำการเปรียบเทียบกัน โดยหัวกระจายอากาศที่ใช้จะเลือกเป็นหัวกระจายอากาศแบบแข็งและแบบเมมเบรน เนื่องจากคุณสมบัติของหัวกระจายอากาศนี้แตกต่างกันชัดเจนทั้งในแง่การถ่ายเทมวลสารและในแง่ของอุทกพลศาสตร์ของพองอากาศ จึงสามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้ง่าย

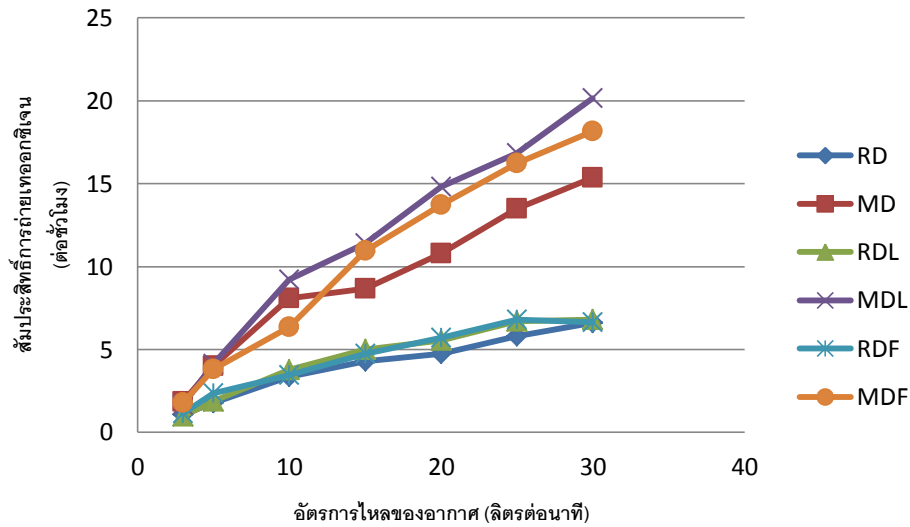
4.3.1 การศึกษาการเติมอากาศแบบแยกส่วนด้วยแผ่นโฟม

สมมติฐานแรกที่ทำการศึกษาทดลอง คือ อุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวสามารถลดการสูญเสียบริเวณผิวน้ำได้ กล่าวคือ ในระบบปกตินั้น จากการทดลองของ DeMoyer, Schierholz et al. (2003) เมื่อทำการเติมอากาศจนถึงระดับหนึ่ง (เข้าใกล้จุดอิ่มตัวของออกซิเจน) อัตราการถ่ายเทออกซิเจนของฟองอากาศจะคงที่ เนื่องจากสมดุลของอัตราการถ่ายเทออกซิเจนของฟองอากาศและที่ผิวน้ำ โดยอัตราการถ่ายเทออกซิเจนของฟองอากาศของฟองอากาศจะเป็นบวก (ออกซิเจนจากฟองอากาศแพร่เข้าสู่ น้ำ) ส่วนอัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่ผิวน้ำจะมีค่าเป็นลบ (ออกซิเจนจากผิวน้ำแพร่ออกสู่อากาศบริเวณผิวน้ำ)

ดังนั้นในการทดลองส่วนนี้จึงทำการปิดถังเติมอากาศด้วยแผ่นโฟม เพื่อลดการถ่ายเทออกซิเจนบริเวณผิวน้ำให้เหลือน้อยที่สุด และสมมติว่าออกซิเจนนั้นเกิดการแลกเปลี่ยนเนื่องจากฟองอากาศเป็นหลัก เมื่อทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน โดยจะเพิ่มชื่อย่อของระบบที่ใช้โฟมปิดที่ผิวน้ำโดยเติมอักษร F ไว้ด้านหลังชื่อย่อหวักระจ่ายอากาศ โดย RDF คือ ระบบที่ใช้หวักระจ่ายอากาศแบบแข็งและใช้โฟมปิด และ MDF คือ ระบบที่ใช้หวักระจ่ายอากาศแบบเมมเบรนและใช้โฟมปิด เขียนเป็นกราฟระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนกับอัตราการไหลของอากาศได้ดังรูปที่ 4.17

จากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของระบบที่ใช้โฟมปิดนั้นจะมีค่าสูงกว่าระบบที่ไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ แต่ค่อนข้างจะมีค่าใกล้เคียงกับระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว โดยระบบที่ใช้โฟมปิดของหวักระจ่ายอากาศแบบแข็งนั้นจะมีค่าอยู่ในช่วง 1.1 – 6.8 ต่อชั่วโมง ส่วนระบบที่ใช้โฟมปิดของหวักระจ่ายอากาศแบบเมมเบรนนั้นจะมีค่าอยู่ในช่วง 1.8 – 18.1 ต่อชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของระบบที่ใช้โฟมปิด กับระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว พบว่าระบบที่ใช้อุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวจะมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยในระบบที่ใช้หวักระจ่ายอากาศแบบแข็งจะมีความแตกต่าง 1 – 8% เมื่อเทียบกับระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว ที่อัตราการไหลของอากาศ 10 – 30 ลิตรต่ออนาที ส่วนระบบที่ใช้หวักระจ่ายอากาศแบบเมมเบรนนั้นจะมีความแตกต่างกัน 4 – 10% ที่อัตราการไหลของอากาศ 15 – 30 ลิตรต่ออนาที

ถึงอย่างไรก็ตามระบบที่ใช้โฟมปิดนั้นถึงแม้ว่าจะมีการถ่ายเทออกซิเจนจากฟองอากาศเป็นหลัก แต่ก็เปรียบเทียบกับสองระบบข้างต้นได้ยาก ทั้งนี้เนื่องจาก ระบบที่ปิดด้วยแผ่นโฟมนั้น ฟองอากาศที่เคลื่อนที่ขึ้นมาที่ผิวน้ำ จะไม่สามารถลอยไปสู่อากาศได้ทันทีเหมือนในสองระบบแรก เนื่องจากแผ่นโฟมที่ปิดอยู่ ฟองอากาศจึงต้องเคลื่อนที่ไปยังพื้นที่ด้านข้างของถังก่อน ทำให้ระยะเวลาของฟองอากาศที่อยู่ในระบบมีระยะเวลานานขึ้น ส่งผลให้พื้นที่สัมผัสจำเพาะของระบบเพิ่มขึ้น เป็นเหตุให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนสูงขึ้นนั่นเอง ความน่าสนใจของการทดลองในหัวข้อนี้คือระบบที่ปิดด้วยโฟมนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจนใกล้เคียงกับระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว จึงตั้งข้อสังเกตได้ว่า ระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวน่าจะมีผลในการเพิ่มผลกระทบบของฟองอากาศของระบบ เช่น การเพิ่มระยะเวลาสัมผัสของฟองอากาศ เป็นต้น



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนกับอัตราการไหลของอากาศ โดยเปรียบเทียบกับระบบปกติ ระบบที่ใช้อุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว และระบบที่ใช้โฟมปิดที่ผิวหน้า โดยเทียบกับหวักระจ่ายอากาศสองชนิด

4.3.2 การศึกษาแบบแยกส่วนด้วยการใช้ในโตรเจน

การศึกษาการถ่ายเทออกซิเจนแยกส่วนระหว่างฟองอากาศและที่ผิวหน้านั้นเป็นแนวคิดของ Wilhelms and Martin (1992) การทดลองนั้นใช้ในโตรเจนเป่าลงไปใต้น้ำแทนอากาศปกติ โดยมีสมมติฐานว่าไม่มีออกซิเจนในฟองแก๊สในโตรเจน ทำให้ค่าออกซิเจนอิ่มตัวเนื่องจากฟองอากาศมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นกลไกหลักในการทดลองนี้จึงมีสองส่วน คือ การไล่ออกซิเจนของฟองแก๊สในโตรเจน และการเติมออกซิเจนเนื่องจากความปั่นป่วนที่ผิวหน้า ทำให้ออกซิเจนสามารถแพร่ลงสู่ได้ มีสมการเริ่มต้นในการถ่ายเทออกซิเจนดังนี้

$$\frac{dC}{dT} = \left[\frac{dC}{dt}\right]_b + \left[\frac{dC}{dt}\right]_s \quad (4.1)$$

จากสมการที่ 4.1 คือ สมการแสดงการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นต่อเวลา โดยแยกพิจารณาเป็นสองส่วนคือส่วนที่เป็นฟองอากาศและที่ผิวหน้า โดย โดย $\frac{dC}{dT} \left[\frac{dC}{dt}\right]_b \left[\frac{dC}{dt}\right]_s$ คือ อัตราการถ่ายเทมวลสารทั้งหมด ของฟองอากาศ และของผิวหน้าตามลำดับ (มก./ลิตร-วินาที) t คือ เวลา (วินาที) ทำการอธิบายในรูปสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารจะได้

$$\left[\frac{dC}{dt}\right]_b = (k_L a_b)(C_s - C) \quad (4.2)$$

$$\left[\frac{dC}{dt}\right]_s = (k_L a_s)(C_s - C) \quad (4.3)$$

โดย $k_L a_b$ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของฟองอากาศ (ต่อวินาที) $k_L a_s$ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของอากาศ (ต่อวินาที) C_s คือ ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายที่สถานะคงที่ (มก./ลิตร) และ C คือ ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายที่เวลาใด ๆ (มก./ลิตร)

การทดลองนี้มีสมมติฐานว่าเมื่อเป่าแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในระบบแล้วจะเกิดกลไกสองอย่าง คือ แก๊สไนโตรเจนจะทำหน้าที่ไล่ออกซิเจนละลายออกจากน้ำ (Desorption) และความปั่นป่วนบนผิวน้ำทำให้ออกซิเจนถ่ายเทเข้าสู่ น้ำ เมื่อพิจารณาแยกสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเป็นสองส่วน คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของผิวน้ำ ($k_L a_s$) และของฟองอากาศ ($k_L a_b$) จึงตั้งสมมติฐานว่า ออกซิเจนละลายอิมตัว (C_i) ของการถ่ายเทออกซิเจนละลายจากน้ำเข้าสู่ฟองอากาศมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อนำไปแทนค่าในสมการ 4.2 จะได้สมการ

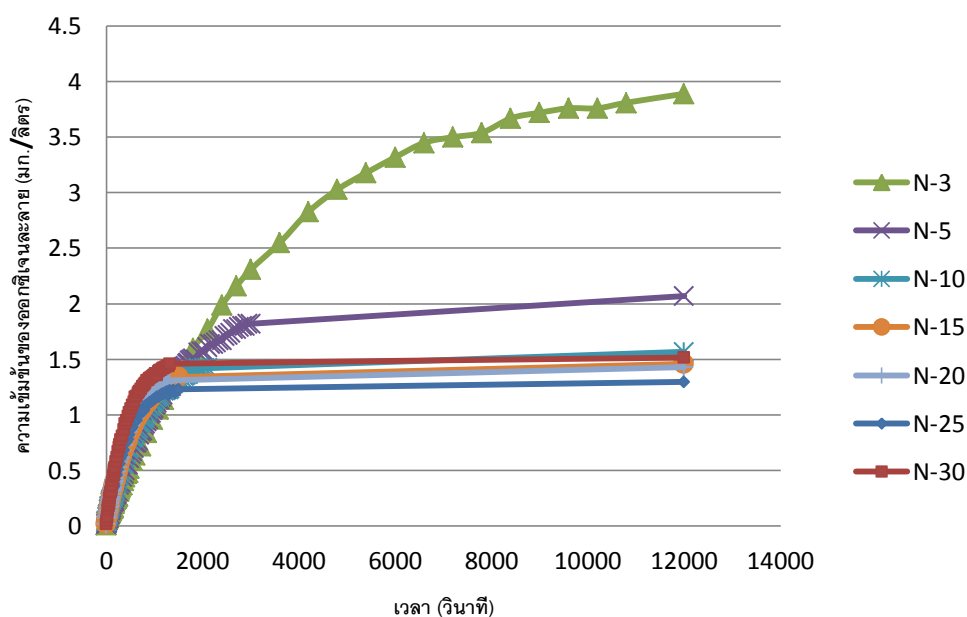
$$\left[\frac{dC}{dt}\right]_b = -(k_L a_b)C \quad (4.4)$$

สำหรับค่าออกซิเจนละลายอิมตัวของ การถ่ายเทมวลสารของผิวน้ำนั้นมีค่าเท่ากับค่าออกซิเจนละลายอิมตัวตามกฎของเฮนรี เมื่อนำสมการที่ 4.3 และสมการที่ 4.4 ไปแทนในสมการที่ 4.1 แล้วหาปริพันธ์ในช่วงความเข้มข้น C_i (ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายเริ่มต้น หน่วยมก./ลิตร) ถึง C_f (ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายสุดท้าย หน่วยมก./ลิตร) จะได้

$$\frac{(k_L a_s)C_s - (k_L a_s + k_L a_b)C_f}{(k_L a_s)C_s - (k_L a_s + k_L a_b)C_i} = e^{-(k_L a_s + k_L a_b)t} \quad (4.5)$$

ทำการทดลองแบบระบบปกติแต่เปลี่ยนเป็นการใช้แก๊สไนโตรเจนในการเติมแทนอากาศ บันทึกค่าที่ได้แล้ววิเคราะห์หาค่า $k_L a_s$ และ $k_L a_b$ ด้วยการวิเคราะห์ถดถอยแบบไม่เป็นเส้นตรง ด้วยสมการที่ 4.5 จะทำให้ทราบถึงสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่ผิวน้ำและของฟองอากาศ

เมื่อทำการเติมแก๊สไนโตรเจนลงไปใต้น้ำที่มีการกำจัดออกซิเจนละลายแล้ว (ค่าออกซิเจนละลายมีค่าเป็นศูนย์มิลลิกรัมต่อลิตร) ออกซิเจนละลายจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น บันทึกค่าออกซิเจนละลาย ณ เวลาต่าง ๆ จะทำให้ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างออกซิเจนละลายกับเวลาดังแสดงไว้ในรูปด้านล่าง โดยตัวเลขที่เขียนกำกับอักษรย่อคืออัตราการไหลของอากาศ เช่น N-3 คือ ระบบที่ใช้ไนโตรเจนที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที ในที่นี้เป็นผลการทดลองของระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบแข็งและไม่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว (ค่าที่ได้เป็นค่าจากการทดลองยกเว้นค่าสุดท้ายที่แสดงในแต่ละอัตราการไหลเป็นค่าที่ทำนาย ณ เวลาที่ 12000 วินาที)



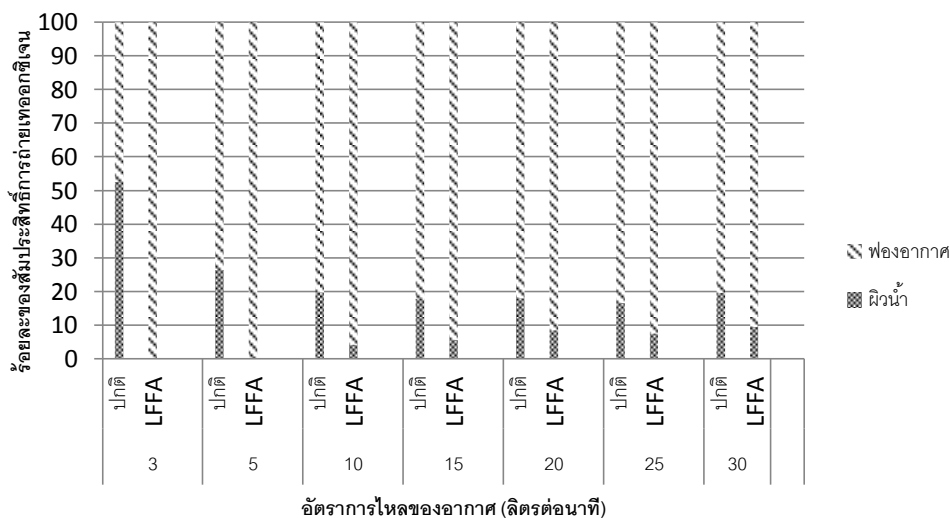
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของออกซิเจนละลายกับเวลาที่อัตราการไหลของอากาศต่าง ๆ ในระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบแข็งและไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว

ถึงอย่างไรก็ดี เนื่องจากการเติมแก๊สไนโตรเจนลงไปในระบบมีทั้งการไล่ออกซิเจนและการเติมอากาศที่มีอัตราการส่วนการไล่ออกซิเจนมากกว่าระบบปกติ ทำให้ค่าออกซิเจนละลายอิมิตัวที่ได้จากระบบนั้นนี้มีค่าที่แตกต่างจากการเติมด้วยอากาศปกติ ค่าออกซิเจนละลายอิมิตัวเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลจะมีค่าต่ำกว่าระบบที่ใช้อากาศเติมลงไปใต้น้ำ อย่างที่เห็นในรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่าค่าออกซิเจนละลายอิมิตัวที่อัตราการไหลของอากาศที่ 3 ลิตรต่ออนาทีนั้นมีค่าออกซิเจนละลายอิมิตัวอยู่ที่ประมาณ 4 มก.ต่อลิตร ส่วนที่อัตราการไหลของอากาศที่ 30 ลิตรต่ออนาทีนั้นมีค่าออกซิเจนละลายอิมิตัวอยู่ที่ประมาณ 1.5 มก.ต่อลิตร ซึ่งในการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่ผิวหน้าและของฟองอากาศนั้น จะขึ้นอยู่กับค่าออกซิเจนละลายอิมิตัวที่ได้ โดยระบบที่มีค่าออกซิเจนละลายอิมิตัวที่ต่ำนั้นหมายความว่าระบบนั้นจะมีผลกระทบของฟองอากาศสูง (เพราะมีการไล่ออกซิเจนเนื่องจากฟองไนโตรเจนมากกว่าการเติมที่ผิวหน้า) ดังนั้นในการนำไปใช้งานจึงต้องทำการเปรียบเทียบเป็นอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของฟองอากาศและที่ผิวหน้าก่อน

สำหรับหัวกระจายอากาศแบบแข็งที่ไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวจะได้ร้อยละของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนดังรูปที่ 4.19 จากแผนภูมิพบว่าในอัตราการไหล 3 ลิตรต่ออนาที อัตราส่วนระหว่างฟองอากาศและผิวหน้ามีค่าใกล้เคียงกัน คือ ฟองอากาศ 48% ผิวหน้า 52% เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศพบว่าสัดส่วนของฟองอากาศจะเพิ่มมากขึ้น โดยที่อัตราการไหล 5 ลิตรต่ออนาทีพบว่า อัตราส่วนจะเป็น ฟองอากาศ 74% ผิวหน้า 26% แต่ในช่วงอัตราไหลของอากาศที่ 10 –

30 ลิตรต่อหน้าที่ สัดส่วนของฟองอากาศและผิวหนังจะเริ่มคงที่ โดยสัดส่วนของฟองอากาศจะอยู่ที่ 80 – 83% ส่วนที่ผิวหนังจะอยู่ในช่วง 17 – 20%

เมื่อติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวพบว่าอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่ผิวหนังลดลงอย่างชัดเจน โดยที่อัตราการไหลของอากาศต่ำจะมีอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของฟองอากาศสูงกว่าที่อัตราการไหลของอากาศสูง ที่อัตราการไหลของอากาศ 3 และ 5 ลิตรต่อหน้าที่จากรูปแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของฟองอากาศมีค่า 100% ทั้งนี้เนื่องจากค่าออกซิเจนละลายที่วัดขณะทำการทดลองนั้นมีค่าที่ต่ำมาก ไม่ถึง 0.2 มก./ลิตร ทำให้ข้อมูลที่ได้มีไม่มากพอที่จะวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน จึงสมมติว่ามีอัตราส่วนของฟองอากาศเป็น 100% เนื่องจากระบบมีผลกระทบจากฟองอากาศเป็นหลัก (ในการเติมแก๊สไนโตรเจนลงไปในระบบจะเป็นการไล่แก๊สออกซิเจนออกจากระบบ เมื่อผลกระทบของฟองอากาศมีมาก และผลกระทบเนื่องจากผิวหนังน้อย ค่าออกซิเจนละลายที่ได้จึงมีค่าต่ำมากนั่นเอง) ส่วนที่อัตราการไหลของอากาศ 10 – 30 ลิตรต่อหน้าที่นั้นพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศอัตราส่วนผลกระทบที่เกิดขึ้นที่ผิวหนังจะมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยร้อยละของฟองอากาศนั้นจะอยู่ในช่วง 91 – 96% ส่วนร้อยละของผิวหนังนั้นจะอยู่ในช่วง 4 – 9 %

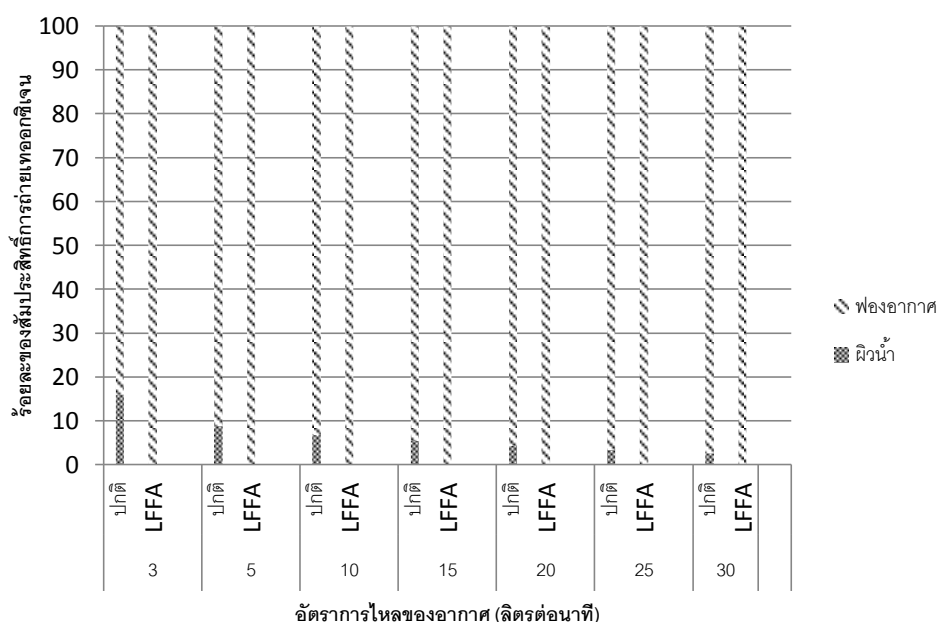


รูปที่ 4.19 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนเมื่อแยกผลกระทบระหว่างฟองอากาศและที่ผิวหนัง เปรียบเทียบระหว่างระบบติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวและไม่ติดตั้ง ของระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบแข็ง

สำหรับหัวกระจายอากาศแบบเมมเบรนในระบบที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวพบว่า มีอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่ผิวหนังต่ำกว่าระบบที่ให้หัวกระจายอากาศแบบแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 4.20 โดยเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ อัตราส่วนของผิวหนังมีแนวโน้ม

ลดลง ส่วนอัตราส่วนของฟองอากาศนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในอัตราการไหลของอากาศในช่วง 3 – 30 ลิตรต่อนาทีนั้น อัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่ผิวน้ำนั้นมีค่าอยู่ในช่วง 3 – 16% โดยที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาทีจะมีค่าสูงที่สุด สำหรับอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของฟองอากาศนั้นมีค่าอยู่ในช่วง 84 – 97% โดยที่อัตราการไหลของอากาศ 30 ลิตรต่อนาทีมีค่าสูงที่สุด

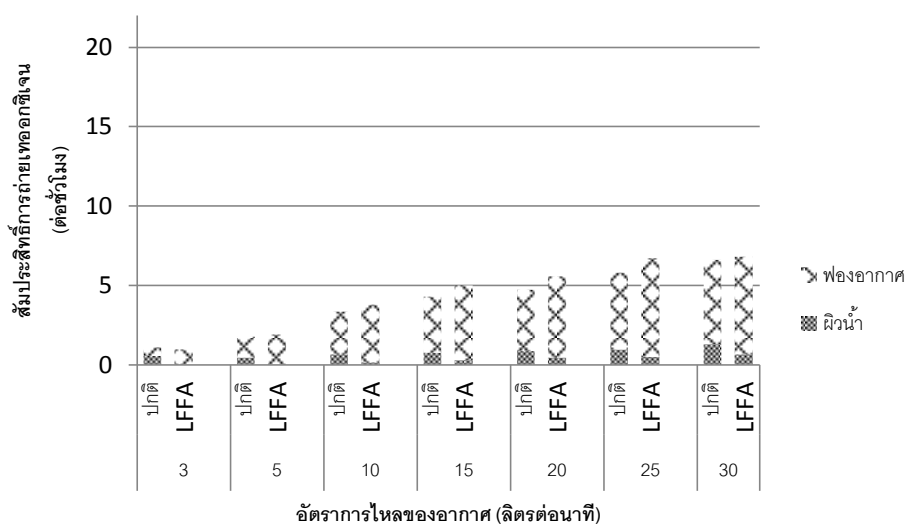
สำหรับหัวกระจายอากาศแบบเมมเบรนในระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวพบว่ามีผลกระทบของฟองอากาศสูงมาก ทำให้ไม่สามารถประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนโดยใช้ไนโตรเจนได้ (ค่าออกซิเจนละลายในสภาวะสมดุลมีค่าขึ้นไม่ถึง 0.2 มก./ลิตร) จึงสมมติให้ว่าระบบนั้นมีผลกระทบจากฟองอากาศ 100% จากผลการทดลองพบว่าเป็นทุกอัตราการไหลของอากาศ



รูปที่ 4.20 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนเมื่อแยกผลกระทบระหว่างฟองอากาศและที่ผิวน้ำ เปรียบเทียบระหว่างระบบติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวและไม่ติดตั้งของระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบเมมเบรน

จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบเมมเบรนนั้นจะมีผลกระทบของฟองอากาศสูงกว่าแบบแข็ง และเมื่อติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวเข้าไปในระบบ จะทำให้ผลกระทบของฟองอากาศมากขึ้น ทั้งนี้ในระบบที่มีฟองอากาศขนาดเล็ก (หัวกระจายอากาศแบบเมมเบรน) จะมีผลกระทบของฟองอากาศมากกว่าหัวกระจายอากาศที่ให้ฟองอากาศขนาดใหญ่ (หัวกระจายอากาศแบบแข็ง) เมื่อนำอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของ

ฟองอากาศและผิวหนังน้ำไปคำนวณเทียบกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่ทดสอบด้วยการเติมอากาศ จะทำให้เรารู้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของฟองอากาศและที่ผิวหนัง ดังแสดงในรูปถัดไป



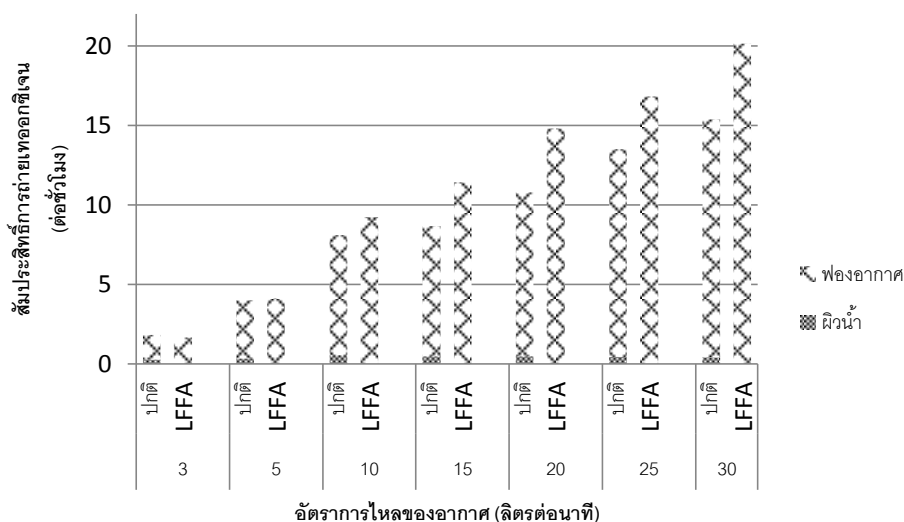
รูปที่ 4.21 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนกับอัตราการไหลของอากาศ โดยแยกส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของฟองอากาศและที่ผิวหนัง ในระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบแข็ง

จากรูปที่ 4.21 แสดงให้เห็นว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของระบบที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวและใช้หัวกระจายอากาศแบบแข็งนั้น มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของฟองอากาศในช่วง 0.52 – 5.31 ต่อชั่วโมง ในอัตราไหลของอากาศระหว่าง 3 – 30 ลิตรต่อนาที โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่ผิวหนังนั้น มีค่าระหว่าง 0.57 – 1.29 ต่อชั่วโมง ในอัตราการไหลของอากาศระหว่าง 3 – 30 ลิตรต่อนาทีที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศเช่นเดียวกัน

สำหรับระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวและใช้หัวกระจายอากาศแบบแข็งนั้น มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของฟองอากาศในช่วง 0.97 – 6.21 ต่อชั่วโมง ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 3 – 30 ลิตรต่อนาที มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ สำหรับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของผิวหนังนั้นมีค่าระหว่าง 0 – 0.64 ต่อชั่วโมง ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 3 – 30 ลิตรต่อนาที มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ

ในระบบที่ไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวและใช้หัวกระจายอากาศแบบเมมเบรนนั้น แสดงค่าดังรูปที่ 4.22 จะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของฟองอากาศในช่วง 1.54 – 15.0 ต่อ

ชั่วโมง ที่อัตราการไหลของอากาศ 3 – 30 ลิตรต่อนาที สำหรับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่ผิวน้ำนั้นจะมีค่า 0.29 – 0.41 ต่อชั่วโมง ที่อัตราการไหลของอากาศ 3 – 30 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.22 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนกับอัตราการไหลของอากาศ โดยแยกส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของฟองอากาศและที่ผิวน้ำ ในระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบเมมเบรน

สำหรับระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวและใช้หัวกระจายอากาศแบบเมมเบรนนั้น เมื่อเทียบอัตราส่วนแล้วจะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของฟองอากาศเพียงอย่างเดียว มีค่าระหว่าง 1.64 – 20.1 ต่อชั่วโมง ที่อัตราการไหลของอากาศ 3 – 30 ลิตรต่อนาที

เมื่อพิจารณาแยกส่วนระหว่างหัวกระจายอากาศแบบแข็งและหัวกระจายแบบเมมเบรนนั้น พบว่า หัวกระจายอากาศแบบแข็งจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่ผิวน้ำสูงกว่าหัวกระจายอากาศแบบเมมเบรน ทั้งนี้เนื่องจากขนาดฟองอากาศของหัวกระจายอากาศแบบแข็งนั้นมีขนาดใหญ่กว่า ทำให้ที่ผิวน้ำมีความปั่นป่วนสูงกว่าระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบเมมเบรน ส่วนสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของฟองอากาศนั้น หัวกระจายอากาศแบบเมมเบรนจะมีค่าสูงกว่าแบบแข็ง ถึงอย่างไรก็ดีในภาพรวมแล้วหัวกระจายอากาศแบบเมมเบรนจะให้ค่าสัมประสิทธิ์ที่สูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากว่าระบบการเติมอากาศที่ใช้หัวกระจายอากาศนั้นมีผลกระทบของฟองอากาศเป็นหลักนั่นเอง

แต่เมื่อติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวในระบบพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่ผิวน้ำลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อติดตั้งอุปกรณ์แล้วเมื่อสังเกตด้วยตาพบว่ามีค่าความปั่นป่วนที่บริเวณผิวน้ำลดลง เมื่อเทียบกับระบบที่ไม่ติดตั้ง ส่วนหนึ่งเนื่องจากขนาดพื้นที่ที่ฟองอากาศสามารถลอยขึ้นมาที่ผิวน้ำได้ลดลง อีกทั้งตัวอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวก็ทำหน้าที่เหมือนตัวหน่วงฟองอากาศทำให้

ฟองอากาศไม่สามารถลอยขึ้นมาที่ผิวน้ำได้อย่างอิสระ (ในระบบปกติฟองอากาศที่ลอยขึ้นมาที่ผิวน้ำ จะกระจายตัวอย่างอิสระไปรอบ ๆ ถัง แต่ไว้ในระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวนั้น ฟองอากาศที่ไหลผ่านน้ำขึ้นมาจะลอยอยู่รอบ ๆ อุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวและกระจายตัวน้อยกว่า) สำหรับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของฟองอากาศพบว่าเมื่อติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว แล้วมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ทั้งนี้คาดว่าน่าจะมีกลไกบางอย่างเกิดขึ้นกับฟองอากาศภายในอุปกรณ์ เช่น มีความปั่นป่วนภายในอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว ฟองอากาศที่ลอยขึ้นมาจากหัวกระจาย อากาศไม่ได้ลอยขึ้นไปที่ผิวน้ำทั้งหมด บางส่วนมีการหมุนวนอยู่ภายในอุปกรณ์ เป็นต้น ทั้งนี้จะทำการพิสูจน์สมมติฐานนี้ในหัวข้อถัดไป

4.4 การศึกษาการเติมอากาศในระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว

จากในหัวข้อที่ผ่านมาพบว่าอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวทำให้ผลกระทบของฟองอากาศในการ ถ่ายเทออกซิเจนเพิ่มสูงขึ้น เป็นผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนเพิ่มสูงขึ้น และเพราะเหตุนี้ นี้เองจึงทำให้ขนาดของฟองอากาศมีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว (ใน ระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศที่ให้ฟองอากาศขนาดเล็กเมื่อติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวจะเพิ่ม ประสิทธิภาพได้ดีกว่าระบบที่ติดตั้งหัวกระจายอากาศที่ให้ฟองอากาศขนาดใหญ่) เนื่องจากสาเหตุนี้ เองจึงตั้งข้อสังเกตว่าภายในอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวน่าจะมีกลไกบางอย่างในการเพิ่มประสิทธิภาพ การถ่ายเทออกซิเจนเนื่องจากฟองอากาศ จึงได้จัดทำอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวชนิดใสมากเพื่อ ทำการศึกษาการเกิดขึ้นภายในอุปกรณ์

4.4.1 ลักษณะการกระจายตัวของฟองอากาศภายในอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว

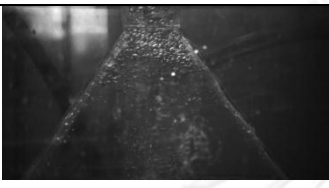


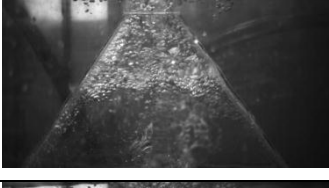
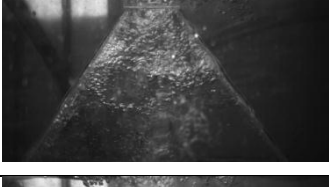
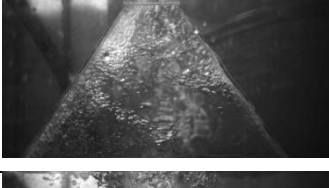
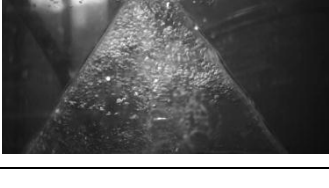
ในเบื้องต้นได้ทำการถ่ายภาพลักษณะของฟองอากาศภายในอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวขณะ เดินระบบที่อัตราการไหลของอากาศต่าง ๆ และลักษณะของหัวกระจายอากาศต่างกัน ทำการ ถ่ายภาพด้วยกล้องความเร็วสูง พบว่ามีสิ่งที่น่าสนใจสองประเด็น คือ ลักษณะการสะสมตัวของ ฟองอากาศภายในอุปกรณ์และความหนาแน่นของฟองอากาศภายในอุปกรณ์

สำหรับลักษณะการสะสมตัวของฟองอากาศภายในอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวนั้นเกิดจาก ฟองอากาศที่ลอยตัวขึ้นไปที่ผิวน้ำ แต่ไม่สามารถขึ้นไปที่ผิวน้ำได้ทันทีเนื่องจากพื้นที่ในการ กระจายตัวแคบลงเมื่อฟองอากาศเคลื่อนเข้าสู่ยอดของอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว ทำให้มี ฟองอากาศบางส่วนสะสมตัวภายในอุปกรณ์ ซึ่งเราจะทำการวัดระยะการสะสมตัวของฟองอากาศ จากบริเวณส่วนยอดของกรวยลงมาถึงจุดที่ฟองอากาศเริ่มหนาแน่น ในเบื้องต้นพบว่าเมื่อเพิ่มอัตรา ไหลของอากาศจะทำให้ระยะสะสมตัวของฟองอากาศมีค่าสูงขึ้น

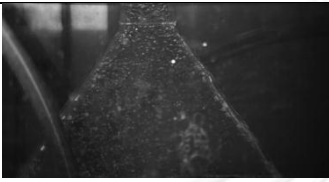
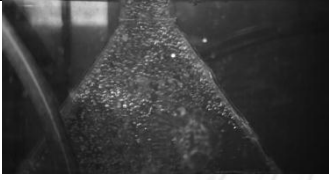


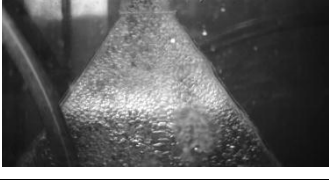
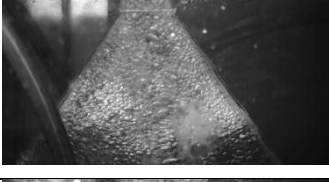
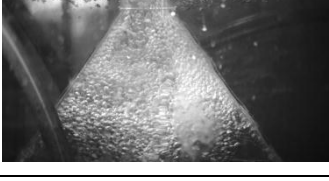
สำหรับลักษณะความหนาแน่นของฟองอากาศนั้นไม่สามารถวัดได้โดยตรง เนื่องจากภาพที่ ถ่ายได้จากกล้องเป็นภาพสองมิติ จึงทำการเทียบเคียงความหนาแน่นของฟองอากาศกับความเข้ม แสงที่ปรากฏในภาพถ่ายโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพถ่าย (Image Frame Work) ในเบื้องต้น พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจะทำให้ค่าความเข้มแสงของภาพสูงขึ้นเนื่องจากเมื่อ ฟองอากาศสะสมตัวมากขึ้นจะทำให้เกิดการสะท้อนแสงสว่างจากหลอดไฟเข้าสู่กล้องมากขึ้น ทำให้

ค่าความเข้มแสงของภาพมีค่าสูงขึ้นนั่นเองบันทึกค่าที่ได้ ลักษณะภาพถ่ายและค่าที่วิเคราะห์ที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 4.4 และ 4.5

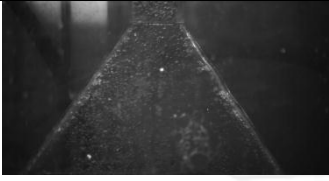
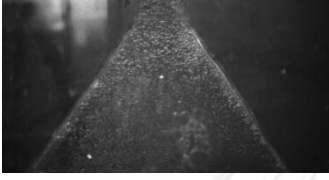


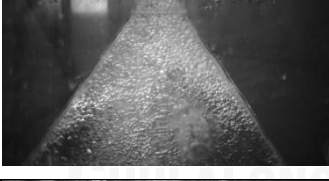
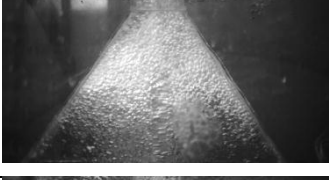
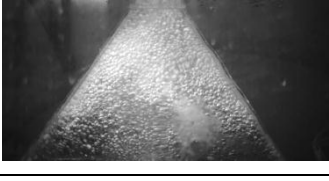
ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงลักษณะของฟองอากาศภายในอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวในระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบแข็ง

รูปแสดงลักษณะฟองอากาศภายในอุปกรณ์	อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที่)	ระยะสะสมตัวฟองอากาศ (ซม.)	ความเข้มแสง
	3	7.3	33.7
	5	7.9	31.1
	10	10.1	37.1
	15	11.9	36.7
	20	11.8	36.5
	25	12.3	38.9
	30	13.1	41.4

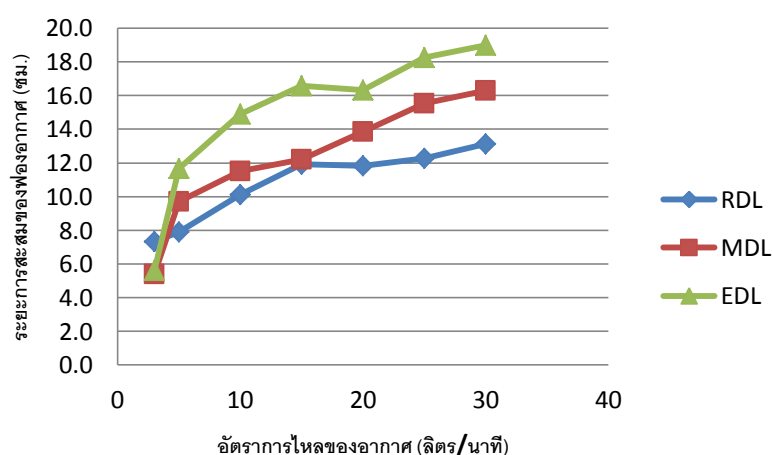
ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงลักษณะของฟองอากาศภายในอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวในระบบ
ที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบท่ออย่าง

รูปแสดงลักษณะฟองอากาศ ภายในอุปกรณ์	อัตราการไหลของ อากาศ (ลิตร/นาที)	ระยะสะสมของ ฟองอากาศ (ซม.)	ความเข้ม แสง
	3	5.6	31.6
	5	11.7	34.7
	10	14.9	43.1
	15	16.6	44.9
	20	16.3	47.3
	25	18.3	50.9
	30	19	53.9

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงลักษณะของฟองอากาศภายในอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวในระบบ
ที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบเมมเบรน

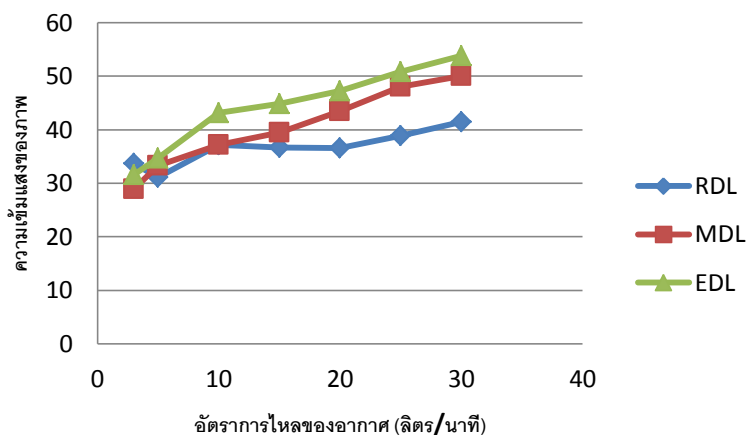
รูปแสดงลักษณะฟองอากาศ ภายในอุปกรณ์	อัตราไหลของ อากาศ (ลิตร/นาที)	ระสะสมของ ฟองอากาศ	ความเข้ม แสง
	3	5.4	28.9
	5	9.7	33.3
	10	11.5	37.1
	15	12.2	39.4
	20	13.9	43.4
	25	15.5	48
	30	16.3	50

เมื่อทำการเปรียบเทียบระยะเวลาการสะสมของฟองอากาศ สมมติว่าเมื่อเริ่มเดินระบบจะมีฟองอากาศสะสมที่ส่วนยอดของอุปกรณ์เต็ม ซึ่งในส่วนนี้มีความสูง 5 เซนติเมตร ทำให้ค่าที่วัดได้เริ่มต้นที่ 5 เซนติเมตร จากข้อมูลดังกล่าวสามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการสะสมของฟองอากาศภายในอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวกับอัตราการไหลของอากาศ

จากรูปที่ 4.23 แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการสะสมตัวของฟองอากาศนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น โดยระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบแข็งพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศถึง 15 ลิตรต่อนาทีขึ้นไป จะมีระยะสะสมตัวของฟองอากาศเริ่มคงที่ที่ประมาณ 12 เซนติเมตร ส่วนระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบยืดหยุ่นและเมมเบรนนั้นมีแนวโน้มที่ระยะสะสมตัวของฟองอากาศสามารถเพิ่มได้มากขึ้นอีกเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ โดยระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบท่ออย่างจะมีระยะเวลาการสะสมตัวของฟองอากาศที่มากกว่าระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบเมมเบรนเล็กน้อย



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับอัตราการไหลของอากาศ

สำหรับความหนาแน่นของฟองอากาศนั้น ทำการสังเกตในรูปของความเข้มแสงในภาพ สามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ได้ในรูปที่ 4.24 จากกราฟพบว่าความเข้มแสงของภาพมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศโดยในระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบแข็งนั้นจะมีความหนาแน่นของฟองอากาศต่ำที่สุด ส่วนหัวกระจายอากาศแบบท่ออย่างและหัวกระจายอากาศแบบเมมเบรนนั้นจะมีค่าใกล้เคียงกัน ถึงอย่างไรก็ดีความเข้มแสงของภาพไม่สามารถบอกถึงความหนาแน่นของฟองอากาศจริงได้ ในหัวข้อนี้จึงสามารถประเมินลักษณะของความหนาแน่นของฟองอากาศเพียงคร่าว ๆ เท่านั้น

จากการสังเกตพบว่าความหนาแน่นของฟองอากาศนั้นจะขึ้นกับขนาดของฟองอากาศที่หัวกระจายอากาศสร้างขึ้น โดยฟองอากาศขนาดเล็กนั้นสามารถสะสมภายในอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวได้ดีกว่าฟองอากาศขนาดใหญ่ นอกจากนี้ฟองอากาศขนาดเล็กยังมีความหนาแน่นในการสะสมตัวที่สูงกว่าฟองอากาศขนาดใหญ่อีกด้วย ทั้งนี้เนื่องจากปริมาตรของฟองอากาศขนาดเล็กนั้นมีปริมาตรน้อยกว่า ทำให้สามารถสะสมตัวได้หนาแน่นกว่า ถึงอย่างไรก็ดี เมื่อสังเกตลักษณะฟองอากาศที่ได้จากท่ออย่างและแบบเมมเบรนนั้น แบบท่ออย่างจะมีขนาดใหญ่กว่าเล็กน้อย ทำให้ระยะสะสมตัวนั้นหนากว่าแบบเมมเบรน แต่แบบเมมเบรนนั้นมีการถ่ายเทออกซิเจนที่ดีกว่าสามารถอธิบายปรากฏการณ์นี้ได้จากการเรียงตัวของทรายกับกรวด ที่ทรายสามารถเรียงตัวได้แน่นกว่า แต่อยู่ในปริมาตรที่เท่ากันกรวดจะมีการเรียงตัวได้หนาแน่นกว่า ถึงอย่างไรก็ดีในหัวกระจายอากาศแบบแข็งนั้นมีฟองอากาศที่ใหญ่เกินไป ฟองอากาศจึงลอยออกจากกระบอกอย่างรวดเร็ว ทำให้ไม่สามารถสะสมตัวภายในอุปกรณ์ได้ดีนัก

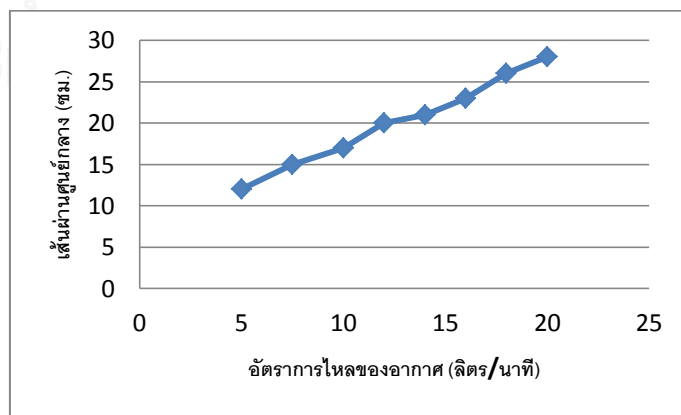
จากการทดลองในส่วนนี้จึงสามารถยืนยันได้ว่าทำไมระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศที่ให้ฟองอากาศขนาดเล็กเมื่อใช้ควบคู่กับอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวถึงเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนได้ดีกว่าระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศที่ให้ฟองอากาศขนาดใหญ่

4.4.2 การกระจายตัวของโพลีเมอร์ฟองอากาศที่ผิวหน้า

เมื่อสังเกตเปรียบเทียบระหว่างระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวและไม่ติดตั้งอุปกรณ์ พบว่าการกระจายตัวของฟองอากาศที่ผิวน้ำนั้นในระบบที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวจะมีการกระจายตัวที่อิสระกว่า มีทิศทางที่ไม่แน่นอน ในอัตราการไหลของอากาศของอากาศน้อย (ประมาณ 3 – 10 ลิตรต่อนาที) พบว่าการกระจายตัวของฟองอากาศที่ผิวน้ำของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวจะกระจายได้น้อยมากเมื่อเทียบกับระบบที่ไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ (ดังแสดงในรูปที่ 4.25) นอกจากนี้ในอัตราการไหลที่ต่ำ การสะสมตัวของฟองอากาศภายในอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวยังมีน้อย จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้การถ่ายเทออกซิเจนในช่วงอัตราการไหลของอากาศต่ำนั้นมีน้อยกว่าระบบที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์ โดยในอัตราการไหลที่สูงขึ้นฟองอากาศที่ขึ้นมาที่ผิวน้ำจะสามารถกระจายตัวไปได้ทั่วผิวน้ำเต็มพื้นที่ถึง สำหรับระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวนั้น การกระจายตัวจะมีทิศทางที่แน่นอนกว่า คือ กระจายตัวออกจากอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวเป็นรูปวงกลม ได้ทำการทดลองด้วยการวัดรัศมีการกระจายตัวของโพลีเมอร์ฟองอากาศบริเวณผิวน้ำในระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว และใช้หัวกระจายอากาศแบบแข็งแสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.26

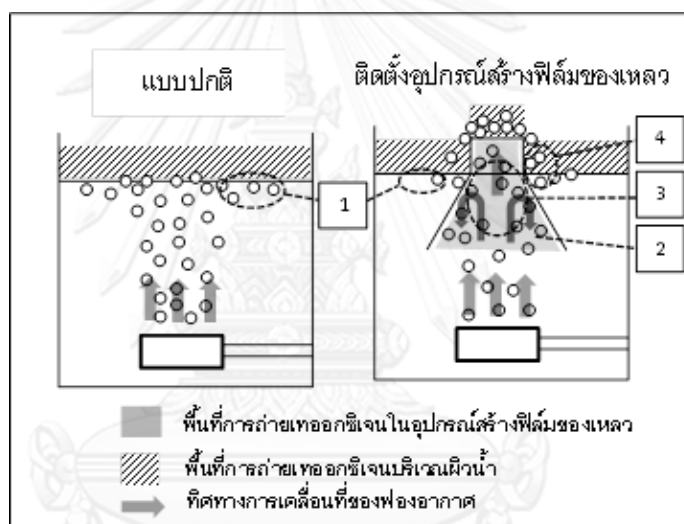


รูปที่ 4.25 ภาพแสดงลักษณะการกระจายตัวของฟองอากาศบริเวณผิวน้ำโดยเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์ (ซ้าย) และระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว (ขวา)



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของโพลีเมอร์ฟองอากาศกับอัตราการไหลของอากาศ

จากการทดลองพบว่าอัตราการไหลเริ่มต้นที่ทำให้ฟองอากาศสามารถดันตัวข้ามอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวอยู่ที่ 5 ลิตรต่อนาที มีเส้นผ่านศูนย์กลางของการกระจายตัวของโฟมอยู่ที่ 12 เซนติเมตร (เส้นผ่านศูนย์กลางรอบนอกของส่วนยอดอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวมีขนาด 9 เซนติเมตร) ดังนั้นหากสังเกตลักษณะฟองอากาศที่ผิวหน้าจะเห็นได้ชัดเจนว่าในระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวจะมีความปั่นป่วนบริเวณผิวน้ำน้อยกว่าระบบที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์ สำหรับหัวกระจายอากาศชนิดอื่นพบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของการกระจายตัวของโฟมฟองอากาศบริเวณผิวน้ำจะมีขนาดใกล้เคียงกัน จากผลการทดลองส่วนนี้จึงสามารถสนับสนุนผลการทดลองในส่วนที่แล้วว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนบริเวณผิวน้ำของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวมีค่าต่ำกว่าระบบที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์ ทั้งนี้เพราะว่าพื้นที่ในการกระจายตัวของโฟมฟองอากาศมีน้อยลง



รูปที่ 4.27 แสดงลักษณะการถ่ายเทออกซิเจนของระบบสร้างฟิล์มของเหลว

จากผลการทดลองเราสามารถสรุปหลักการถ่ายเทออกซิเจนของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวได้ดังนี้ 1) ความปั่นป่วนที่บริเวณผิวน้ำลดลง ฟองอากาศที่ขึ้นมาที่ผิวหน้ามีพื้นที่การกระจายตัวที่ลดลง 2) มีความปั่นป่วนของฟองอากาศภายในอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว 3) ฟองอากาศบางส่วนจะลอยเข้าสู่ผิวน้ำได้ช้าลง (มีระยะเวลาอยู่ในระบบนานขึ้น) เนื่องจากเมื่อภายในอุปกรณ์มีความปั่นป่วน จะมีฟองอากาศบางส่วนหมุนวนกลับลงไปที่ด้านล่าง 4) ฟองอากาศและน้ำบางส่วนที่พุ่งออกมาจากอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวจะตกกลับไปที่นี่อีกครั้ง ซึ่งกลไกทั้งหมดนี้แสดงไว้ในรูปที่ 4.27

4.4.3 ผลกระทบของตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและสภาวะที่เหมาะสมในการใช้งาน

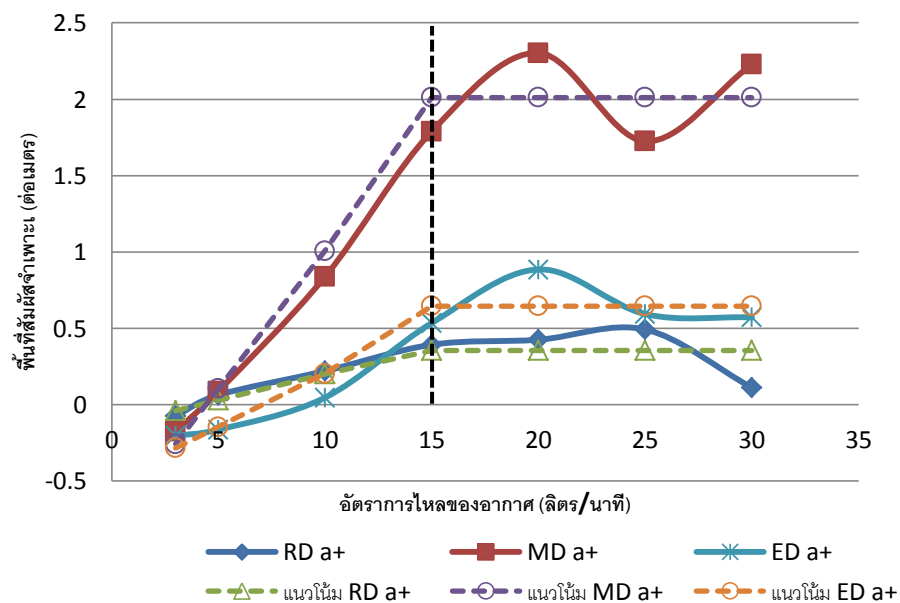
ทำการวิเคราะห์หาตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศในระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวภายใต้สมมติฐานว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารผ่านชั้นกลางของเหลวมีค่าเท่ากันในแต่ละชุดการทดลอง (สมมติให้ที่อัตราการไหลเดียวกันค่า k_L ของระบบปกติกับระบบที่ติดตั้ง LFFA มีค่าเท่ากัน) ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารที่เพิ่มขึ้นมาจะถูกอธิบายในรูปของ $k_L a_+$ ซึ่งคำนวณหาได้ดังนี้

$$k_L a_+ = k_L a_{TL} - k_L a_{TN} \quad (4.6)$$

วิเคราะห์แยกส่วนระหว่างค่า k_L และ a จะได้

$$k_L a_{TL} = k_L a_{TN} + k_L a_+ = k_L (a_{TN} + a_+) \quad (4.7)$$

โดย $k_L a_{TN}$ $k_L a_{TL}$ และ $k_L a_+$ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารระบบปกติ ระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว และส่วนเพิ่มเติมตามลำดับ a_{TN} และ a_+ คือ พื้นที่สัมผัสจำเพาะของระบบปกติและส่วนเพิ่มเติมตามลำดับ



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่สัมผัสจำเพาะเพิ่มเติม (a_+) กับอัตราการไหลของอากาศ

วิเคราะห์หาพื้นที่สัมผัสจำเพาะเพิ่มเติม (a_+) ของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวจะได้ข้อมูลดังรูปที่ 4.28 เมื่อพิจารณาารูปแล้วกล่าวได้ว่าอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวจะช่วยเพิ่มพื้นที่สัมผัสจำเพาะให้กับระบบทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารโดยรวมเพิ่มขึ้นโดยในระบบที่ใช้หัวกระจายแบบแข็งสามารถเพิ่มพื้นที่สัมผัสจำเพาะได้ในช่วงระหว่าง $-0.07 - 0.49$ ต่อเมตร และระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบท่อยางสามารถเพิ่มพื้นที่สัมผัสจำเพาะในช่วง $-0.20 - 0.89$ ต่อเมตร และแบบยืดหยุ่นสามารถเพิ่มพื้นที่สัมผัสจำเพาะในช่วง $-0.17 - 2.30$ ต่อเมตรทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของอากาศ ผลการทดลองนี้ยืนยันได้ว่าขนาดฟองอากาศมีผลต่ออุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวอย่างชัดเจน เนื่องจากค่าพื้นที่สัมผัสจำเพาะของหัวกระจายอากาศที่ให้ฟองอากาศขนาดเล็กจะให้ค่าพื้นที่สัมผัสจำเพาะเพิ่มเติมที่สูงกว่าหัวกระจายอากาศที่ให้ฟองอากาศขนาดใหญ่

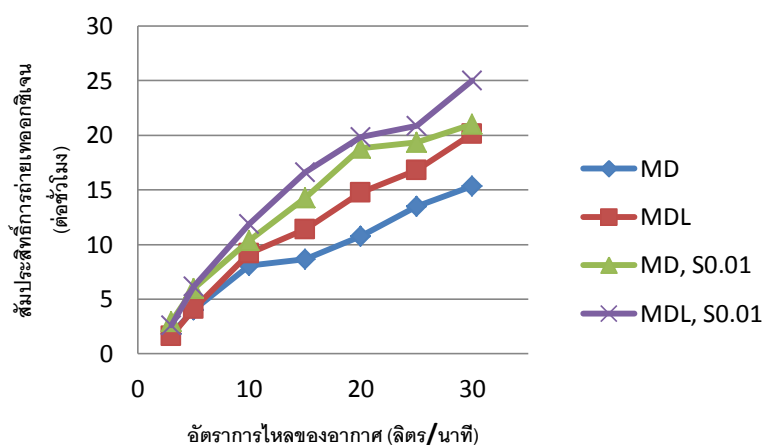
สิ่งที่น่าสนใจในรูปนี้สามารถแบ่งได้สองช่วง คือ ช่วงแรกที่อัตราการไหล $0 - 15$ ลิตรต่ออนาที จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจะทำให้พื้นที่สัมผัสจำเพาะเพิ่มเติมมีค่าเพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง (สังเกตเส้นแนวโน้มที่เป็นเส้นประในรูปที่ 4.28) และในช่วง $15 - 30$ ลิตรต่ออนาทีค่าพื้นที่สัมผัสจำเพาะเพิ่มเติมจะเริ่มคงที่ จากผลการทดลองนี้สามารถบอกถึงอัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมกับอุปกรณ์ชุดนี้ว่า ควรจะใช้ตั้งแต่ช่วงไหนขึ้นไปถึงจะใช้อุปกรณ์ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

ดังนั้นอัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมกับอุปกรณ์ชุดนี้สำหรับหัวกระจายแบบแข็งคือช่วง $15 - 25$ ลิตรต่ออนาที หัวกระจายอากาศแบบท่อยางและแบบเมมเบรนอยู่ในช่วง $15 - 30$ ลิตรต่ออนาที จะสังเกตได้ว่าระหว่างหัวกระจายอากาศทั้งสามแบบนี้จะมีค่าอัตราการไหลที่ 15 ลิตรต่ออนาที เป็นค่าวิกฤต เป็นจุดเปลี่ยนของกราฟเข้าสู่ช่วงคงที่ของค่าพื้นที่สัมผัสจำเพาะ เราจึงนำค่านี้มาพิจารณาการออกแบบระบบ

เมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของแก๊สส่วนด้วยพื้นที่หน้าตัดของถังปฏิกรณ์ (0.36 ตารางเมตร) จะได้ความเร็วผิวของแก๊สที่ 6.9×10^{-4} เมตรต่อวินาที และเมื่อนำอัตราการไหลของแก๊สส่วนด้วยพื้นที่หน้าตัดของส่วนหัวของอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร พื้นที่หน้าตัด 0.011 ตารางเมตร) จะได้ความเร็วผิวของแก๊สที่ 2.2×10^{-2} เมตรต่อวินาที การออกแบบระบบจึงควรออกแบบให้ค่าความเร็วผิวของแก๊สเกินค่าดังกล่าวจะสามารถทำให้อุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวทำงานได้อย่างเต็มที่

4.4.4 การทดสอบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในระบบที่มีสารลดแรงตึงผิว

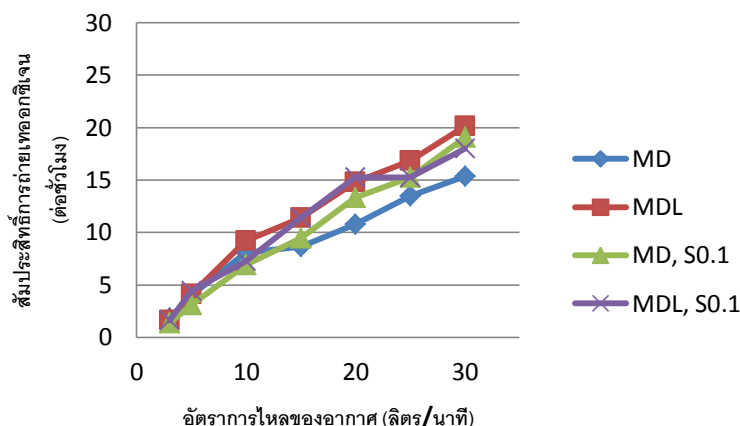
ในส่วนนี้เป็นการศึกษาเพิ่มเติมว่า เมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวลงไปในระบบจะมีผลกระทบต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนอย่างไร ในการทดลองนี้ได้ใช้สารลดแรงตึงผิวประจุลบในการทดลอง (สารที่ใช้ คือ 2-ethyl-hexyl sodium sulphate) โดยความเข้มข้นที่ใช้มีสองค่า คือ 0.01 CMC และ 0.1 CMC ส่วนหัวกระจายอากาศที่ใช้นั้นเลือกใช้แบบเมมเบรนเนื่องจากเป็นหัวกระจายอากาศที่ให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนสูงที่สุด เปรียบเทียบระหว่างระบบที่ใช้อุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวและไม่ใช้



รูปที่ 4. 29 แสดงสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในของเหลวที่เติมสารลดแรงตึงผิว 0.01 CMC .
ในระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบเมมเบรน

อักษรย่อที่ใช้จะมีการเพิ่มความเข้มข้นต่อท้ายชื่อระบบ โดย S0.01 นั้นหมายถึงสารลดแรงตึงผิวความเข้มข้น 0.01 CMC และ S0.1 นั้นหมายถึงสารลดแรงตึงผิวความเข้มข้น 0.1 CMC จากผลการทดลองในรูปที่ 4.29 พบว่าเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวลงไปในระบบนั้นเมื่อใส่ลงไปปริมาณ 0.01 CMC จะเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนออกซิเจนให้สูงขึ้น โดยในระบบปกตินั้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในช่วง 2.95 – 21.0 ต่อชั่วโมง ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 3 – 30 ลิตรต่อนาฬิกา เมื่อเทียบกับระบบที่ใช้น้ำประปาพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนเพิ่มขึ้นประมาณ 28 – 75% ส่วนระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว นั้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน 2.59 – 25.0 ต่อชั่วโมง ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 3 – 30 ลิตรต่อนาฬิกา เมื่อเทียบกับระบบที่ใช้น้ำประปาพบว่าเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนขึ้นประมาณ 24 – 57%

เมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวลงไปในระบบไปปริมาณ 0.1 CMC จะลดสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนออกซิเจนลงจากระบบที่ใช้น้ำประปาแสดงไว้ในรูปที่ 4.30 ในช่วงอัตราการไหล 3 – 10 ลิตรต่อนาฬิกา แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลให้สูงขึ้น (15 – 30 ลิตรต่อนาฬิกา) พบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากระบบที่ใช้น้ำประปา โดยในระบบที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว นั้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในช่วง 1.35 – 19.1 ต่อชั่วโมง ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 3 – 30 ลิตรต่อนาฬิกา เมื่อเทียบกับระบบที่ใช้น้ำประปาพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนแตกต่างกันประมาณ -27 – 24% ส่วนระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว นั้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน 1.63 – 18.0 ต่อชั่วโมง ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 3 – 30 ลิตรต่อนาฬิกา เมื่อเทียบกับระบบที่ใช้น้ำประปาพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนแตกต่างกันประมาณ -11 – 7%



รูปที่ 4. 30 แสดงสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในของเหลวที่เติมสารลดแรงตึงผิวความเข้มข้น 0.1 CMC และใช้หัวกระจายอากาศแบบเมมเบรน

เมื่อเปรียบเทียบระบบที่ใช้สารลดแรงตึงผิวทั้งสองความเข้มข้นพบว่า ในระบบที่ใช้สารลดแรงตึงผิว 0.01 CMC จะเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนได้ดีกว่าระบบที่ใช้สารลดแรงตึงผิว 0.1 CMC ทั้งนี้สาเหตุที่ทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากสารลดแรงตึงผิวจะไปเกาะรอบฟองอากาศ ทำให้ฟองอากาศมีขนาดเล็กลง แต่ว่าเมื่อเพิ่มสารลดแรงตึงผิวให้มากขึ้น สารลดแรงตึงผิวที่เกาะรอบ ๆ ฟองอากาศนั้นจะไปขัดขวางการถ่ายเทออกซิเจน (ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารผ่านชั้นกลางของเหลวมีค่าสูงขึ้น) ทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้น

อย่างไรก็ตามข้อสังเกตที่น่าสนใจในระบบที่ใช้สารลดแรงตึงผิว 0.1 CMC ในอัตราการไหลของอากาศ 25 - 30 ลิตรต่อนาที พบว่าระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวมีแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนลดลงเมื่อเทียบกับระบบที่ไม่ใช้อุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว ในเบื้องต้นได้ตั้งข้อสันนิษฐานว่า เมื่อระบบมีฟองอากาศเล็กมาก เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศที่มากขึ้น ฟองอากาศที่เข้าไปในอุปกรณ์จะมีความหนาแน่นสูง จนเกิดการรวมตัวกันของฟองอากาศ ทำให้ฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับระบบที่ไม่ใช้อุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว ถึงอย่างไรก็ดีในประเด็นนี้เป็นส่วนที่นอกเหนือขอบเขตการศึกษา จึงไม่ได้ทำการทดลองเพื่อยืนยันผลในส่วนนี้

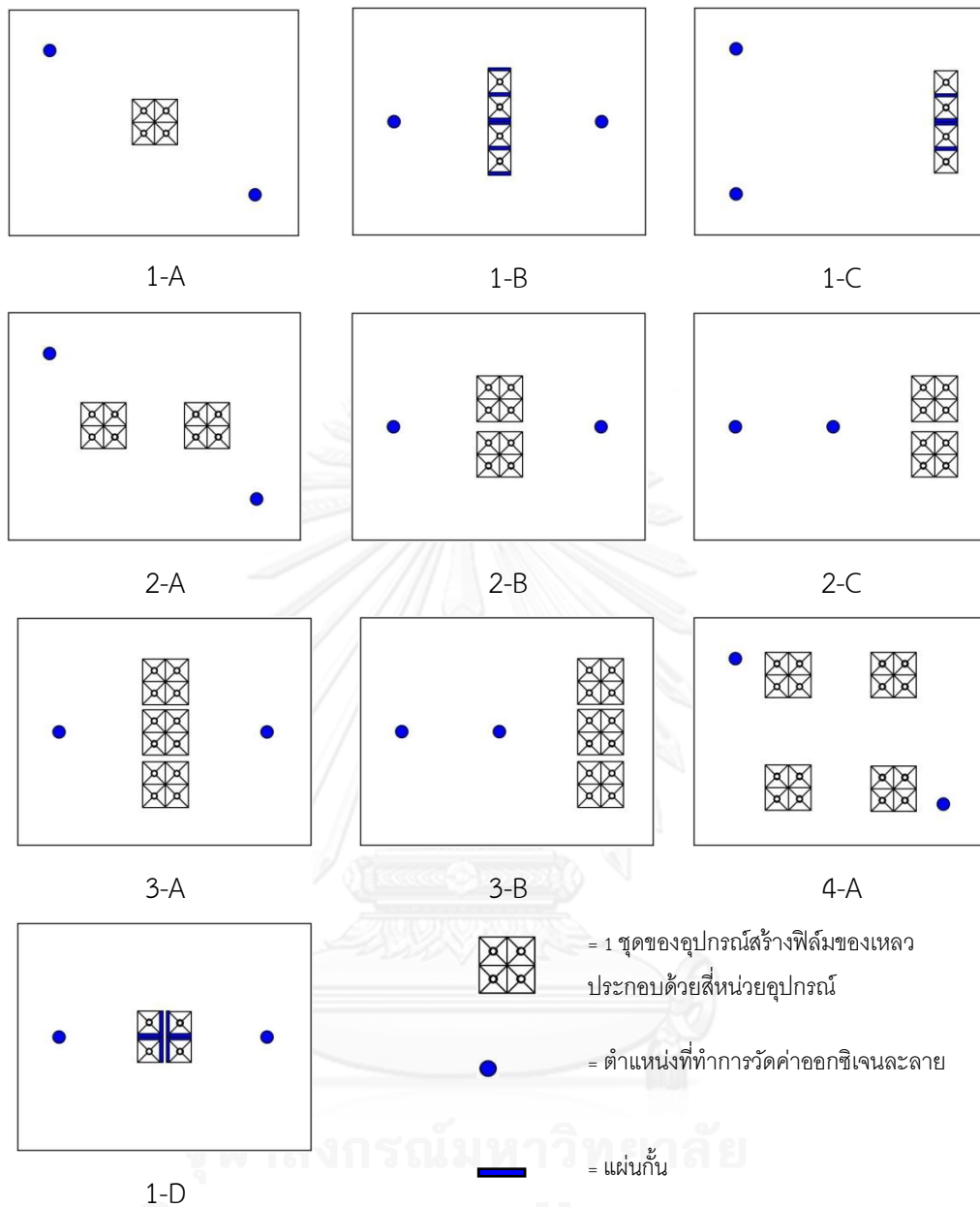
จากผลการทดลองในส่วนนี้ทำให้เราทราบถึงกลไกการทำงานของอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวชัดเจนขึ้น โดยมีประเด็นสำคัญคือการสะสมตัวของฟองอากาศภายในอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว นั้นทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของระบบสูงขึ้น นอกจากนี้การเติมสารลดแรงตึงผิวลงไปในระบบเล็กน้อยจะมีผลให้เพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนได้เช่นกัน ค่าการออกแบบที่ได้ในส่วนนี้จึงนำไปใช้ในการออกแบบการทดลองระบบใหญ่ต่อไป

4.5 การศึกษารูปแบบการติดตั้งชุดอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว

ในสี่หัวข้อที่ผ่านมาเป็นการทำการศึกษาอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวเพียงหน่วยเดียว อย่างไรก็ตาม ใดก็ตามที่ใช้จริงในบ่อขนาดใหญ่หวักระจ่ายอากาศเพียงหัวเดียวส่วนใหญ่ไม่เพียงพอต่อความต้องการของระบบ ในส่วนนี้จึงเป็นการศึกษาการทำงานของระบบกระจายอากาศที่มีการติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวหลายหน่วย เพื่อหารูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์ที่เหมาะสมในการใช้งาน

4.5.1 การศึกษาระดับห้องปฏิบัติการ

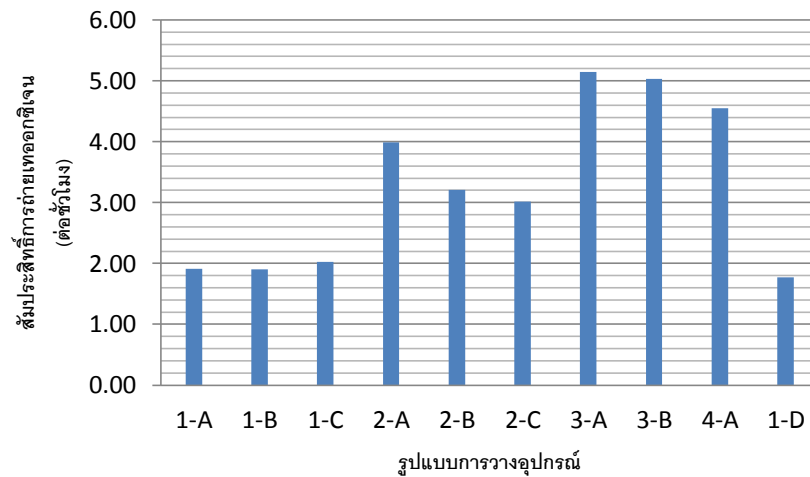
ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาการใช้งานชุดอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวในระดับห้องปฏิบัติการ ในเบื้องต้นได้ทำการออกแบบลักษณะการจัดเรียงชุดอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวได้ดังรูปที่ ในการทดลองนี้ประกอบด้วยชุดการทดลอง 10 แบบ จัดเรียงอุปกรณ์ในรูปแบบที่แตกต่างกัน สังเกตได้ว่าในชุดการทดลองแบบ 1-B 1-C และ 1-D จะมีการติดตั้งแผ่นกันเพิ่มเข้าไปในชุดการทดลองเพื่อคั่นระหว่างอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวแต่ละหน่วย โดยแผ่นกันส่วนล่างจะอยู่ต่ำกว่าหวักระจายอากาศเล็กน้อยและแผ่นกันส่วนบนจะโผล่พ้นผิวน้ำขึ้นมาเล็กน้อย ทั้งนี้การทดลองมีสมมติฐานว่าการติดตั้งแผ่นกันจะทำให้สามารถควบคุมทิศทางการกระจายตัวของน้ำได้ ทำการทดลองจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของการจัดวางอุปกรณ์แต่ละรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 4.31



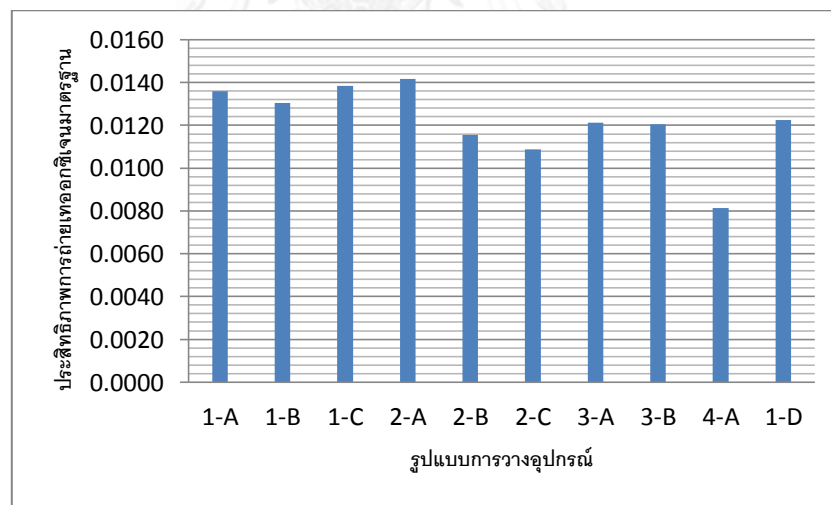
รูปที่ 4. 31 แสดงลักษณะการจัดเรียงชุดอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวในถังระดับห้องปฏิบัติการ

ทำการทดสอบระบบตามการจัดวางต่าง ๆ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนแสดงผลดังรูปที่ 4.32 จะเห็นได้ว่าการจัดเรียงอุปกรณ์แบบ 3-A จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนสูงที่สุด โดยมีค่าอยู่ที่ 5.15 ต่อชั่วโมง ส่วนรูปแบบ 3-B จะได้ค่าที่ใกล้เคียงกันคือ 5.03 ต่อชั่วโมง สำหรับระบบที่มีอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวสี่หน่วย (1 ชุดอุปกรณ์ หรือรูปแบบ 1-A 1-B 1-C และ 1-D) พบว่าแผ่นกั้นที่นำมาติดตั้งนั้นไม่สร้างความแตกต่างของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนชัดเจนนัก นอกจากนี้มีข้อสังเกตที่น่าสนใจคือ ระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว 4 ชุด (รูปแบบ 4-A) พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่ต่ำกว่าระบบที่ใช้ 3 ชุด (รูปแบบ 3-

A และ 3-B) จึงตั้งข้อสังเกตได้ว่าการติดตั้งระบบกระจายอากาศนั้น ถ้าติดตั้งมากเกินไปจะส่งผลต่อการถ่ายเทออกซิเจนได้



รูปที่ 4.32 แผนภูมิแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของการจัดวางอุปกรณ์แบบต่าง ๆ



รูปที่ 4.33 แผนภูมิแสดงประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐานของการจัดวางอุปกรณ์แบบต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐานดังแสดงในรูปที่ 4.33 พบว่าระบบ 2-A จะให้ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูงที่สุด มีค่าอยู่ที่ 0.0142 ส่วนระบบที่มีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐานต่ำที่สุดคือระบบ 4-A มีค่าอยู่ที่ 0.0081 จากการ

ทดลองในส่วนนี้พบว่าการจัดเรียงอุปกรณ์ที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนสูงควรจะอยู่ตรงกลางของถังทำการทดลอง

จากการทดลองในห้องปฏิบัติการนั้นทำให้ทราบถึงแนวทางการวางอุปกรณ์ที่เหมาะสม โดยตัวแปรหลักที่พิจารณาในการเลือกการจัดวางอุปกรณ์นั้น คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (ที่ไม่ได้เลือกประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนเนื่องจากตัวแปรนี้ไม่ได้แสดงถึงอัตราเร็วในการถ่ายเทออกซิเจนในระบบ) ซึ่งสังเกตได้ว่าระบบที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่สูงที่สุดนั้น คือ ระบบ 3-A และ 3-B ซึ่งทั้งสองระบบนี้มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจากการทดลองในระบบนี้ทำให้ทราบถึงแนวทางการจัดวางระบบในเบื้องต้น คือ ควรจะวางเป็นแนวขวางกับถังน้ำ

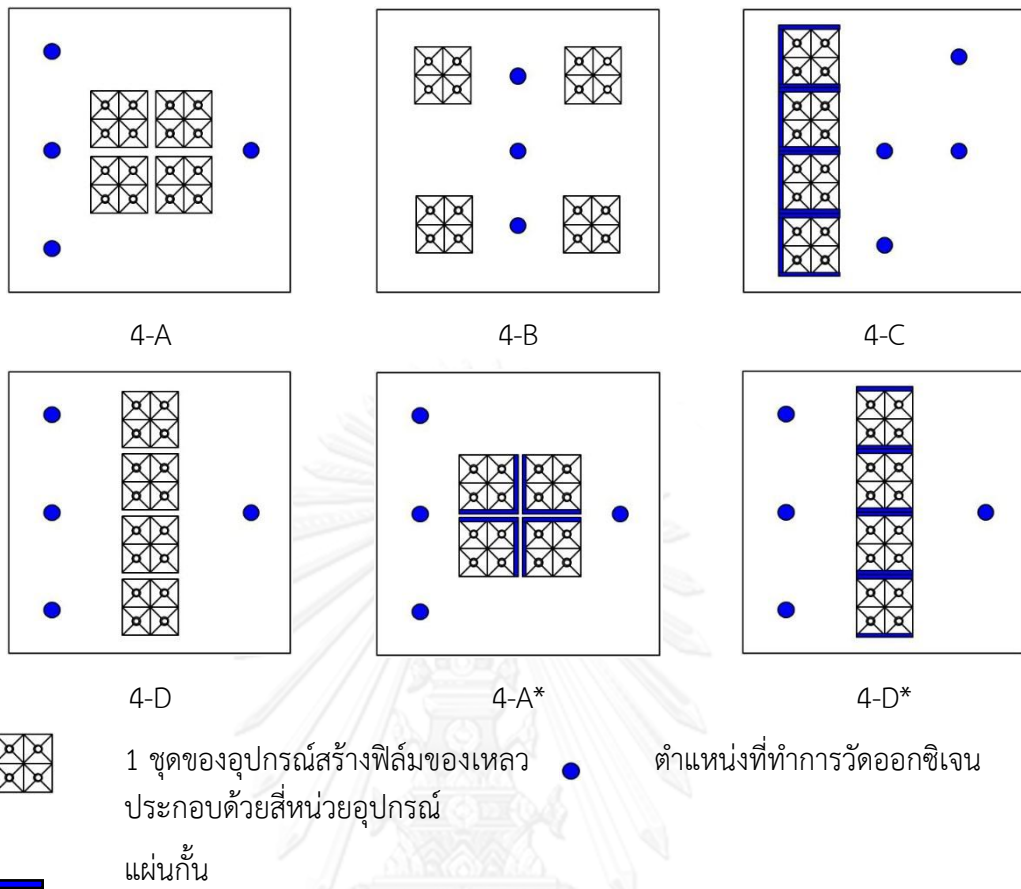
เนื่องจากการทดลองในระดับปฏิบัติการนั้นมีข้อจำกัดในหลาย ๆ ด้าน เช่น ขนาดถังที่เล็ก ทำให้การกระจายตัวของน้ำและออกซิเจนนั้นรวดเร็ว ในการใช้อุปกรณ์เติมอากาศในสถานที่จริง เช่น การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ต้องใช้ในบ่อที่มีขนาดใหญ่ ระบบจะมีความซับซ้อนกว่า เช่น อุณหภูมิของแต่ละระดับความลึกแตกต่างกัน การกระจายตัวของออกซิเจนที่ช้ากว่าทำให้ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในแต่ละจุดแตกต่างกัน เป็นต้น จึงทำการทดลองในบ่อขนาดใหญ่ในหัวข้อถัดไป เพื่อศึกษารูปแบบการจัดเรียงอุปกรณ์ที่เหมาะสมในสภาพใช้งานจริง

4.5.2 การทดลองในบ่อขนาดใหญ่

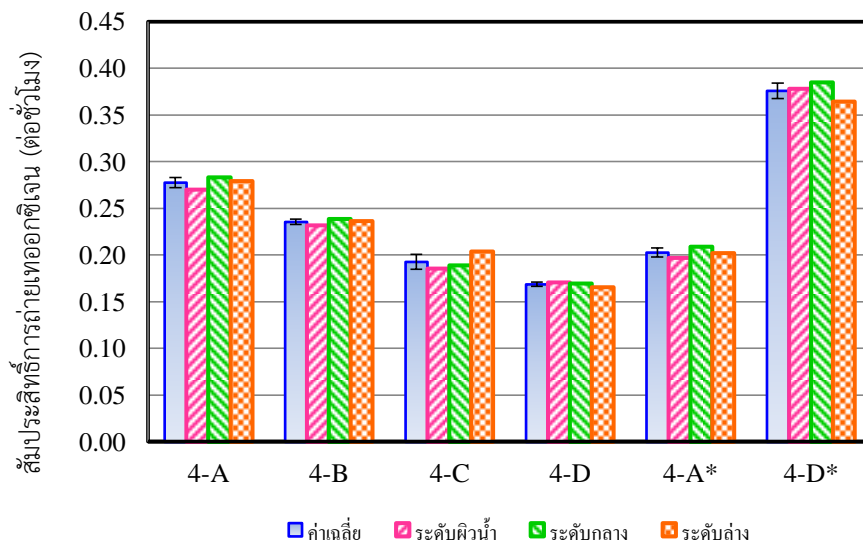
การทดลองในบ่อขนาด 90,000 ลิตรนั้นมีขนาดใหญ่กว่าระดับห้องปฏิบัติการมาก จึงต้องเพิ่มตำแหน่งในการวัดออกซิเจนละลายมากขึ้น โดยทำการเพิ่มตำแหน่งที่วัดค่าออกซิเจนเป็น 4 จุด โดยแต่ละจุดนั้นวัดที่สามระดับความลึก คือ บริเวณผิวน้ำ ระดับกลาง และระดับล่าง สำหรับรูปแบบที่ติดตั้งอุปกรณ์และจุดที่วัดออกซิเจนนั้นแสดงไว้ในรูปที่ 4.34 ทำการวัดค่าออกซิเจนละลายในเวลาต่าง ๆ บันทึกค่า นำค่าที่ได้มาคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน

ผลการทดลองการทดสอบการจัดเรียงอุปกรณ์แบบต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.35 พบว่าการจัดวางอุปกรณ์แบบ 4-D* นั้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนสูงที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.376 ต่อชั่วโมง โดยระบบนี้เทียบเคียงได้กับระบบ 3-A ในระดับห้องปฏิบัติการ แต่จะแตกต่างกันที่มีแผ่นกั้นเสริมขึ้นมา เมื่อเทียบกับระบบที่ไม่มีแผ่นกั้นพบว่า การติดตั้งแผ่นกั้นสามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนได้ประมาณ 0.2 ต่อชั่วโมง แต่ในระบบที่ใช้แผ่นกั้น 4-A* นั้นพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนกลับลดลงประมาณ 0.06 ต่อชั่วโมง

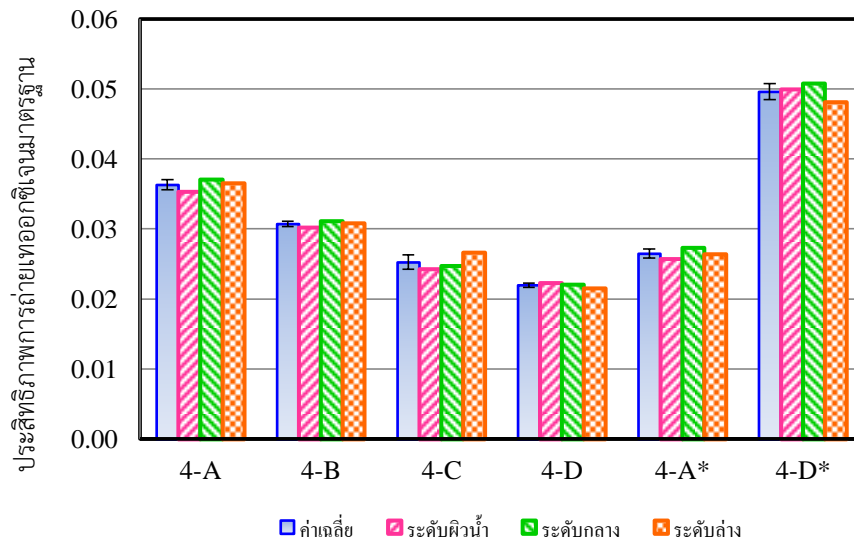
เมื่อพิจารณาตัวแปรอื่น คือ ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐานและประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐานนั้น แสดงไว้ในรูปที่ 4.36 และ 4.37 ตามลำดับ ระบบ 4-D* นั้นมีค่าสูงที่สุดทั้งสองตัวแปร คือ มีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน 0.042 และประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน 1.20 กก./ชั่วโมง-กิโลวัตต์



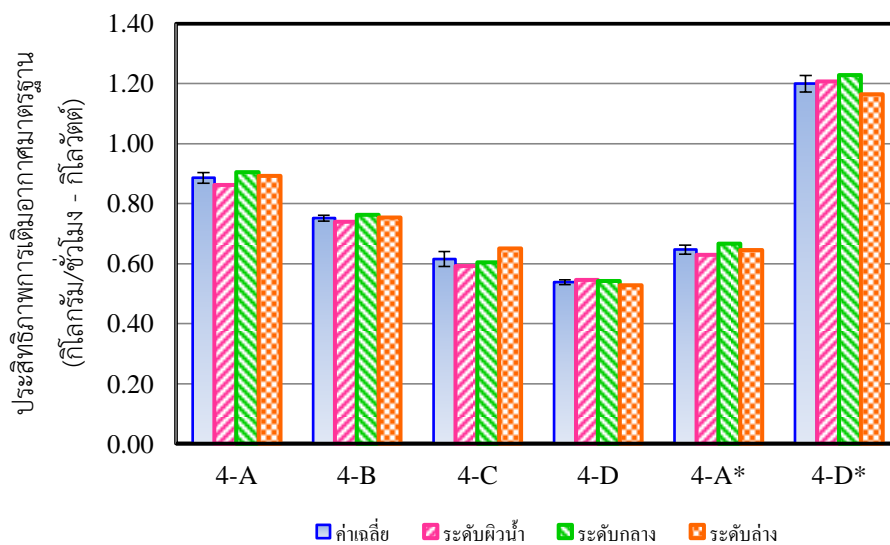
รูปที่ 4.34 ภาพแสดงการจัดเรียงชุดอุปกรณ์ในบ่อขนาดใหญ่



รูปที่ 4.35 แผนภูมิแสดงสัมพันธ์การถ่ายเทออกซิเจนของการจัดเรียงอุปกรณ์แบบต่าง ๆ ในแต่ละระดับความลึก



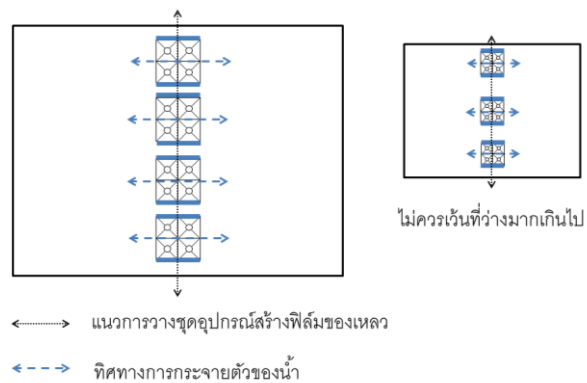
รูปที่ 4.36 แผนภูมิแสดงประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐานของการจัดเรียงอุปกรณ์แบบต่าง ๆ ในแต่ละระดับความยาก



รูปที่ 4.37 แผนภูมิแสดงประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐานของการจัดเรียงอุปกรณ์แบบต่าง ๆ ในแต่ละระดับความยาก

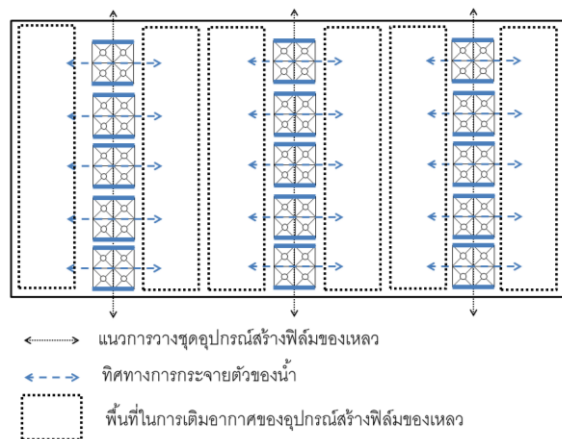
การทดลองในส่วนนี้บอกถึงแนวทางการจัดเรียงอุปกรณ์ที่เหมาะสมในการใช้งาน พบว่าการเรียงอุปกรณ์ไว้ตรงกลางและใช้แผ่นกั้นจะให้ประสิทธิภาพการใช้งานที่สูงจากข้อมูลในส่วนนี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบการติดตั้งระบบกระจายอากาศที่ใช้อุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวได้

แนวทางการจัดเรียงชุดอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวที่แนะนำ คือ ควรวางชุดอุปกรณ์ให้เป็นแนวเดียวกันโดยไว้กลางบ่อ เรียงตัวให้เต็มตามแนวการวาง (ไม่ควรเว้นที่ว่างไว้มากเกินไป) และใช้แผ่นกั้นไปแนวขวางเพื่อควบคุมการไหลของน้ำให้ไปด้านข้างดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.38 โดยภาพซ้ายเป็นตัวอย่างการติดตั้งที่แนะนำ ภาพขวาเป็นตัวอย่างการติดตั้งที่ไม่เหมาะสมเนื่องจากเว้นที่ว่างมากเกินไป



รูปที่ 4.38 แนวทางการติดตั้งชุดอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว

อย่างไรก็ดีในระบบบ่อมีขนาดใหญ่สมควรติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวตามแนวกว้าง วางแบ่งเป็นแถวให้แต่ละชุดอุปกรณ์มีพื้นที่ในการเติมอากาศเท่ากันดังแสดงในรูปที่ 4.39



รูปที่ 4.39 แนวทางการติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวในบ่อขนาดใหญ่

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

1) หัวกระจายอากาศที่นำมาทดลองสามชนิด ได้แก่ หัวกระจายอากาศแบบแข็ง แบบท่ออย่าง และแบบยืดหยุ่น พบว่าหัวกระจายอากาศแบบยืดหยุ่นให้ประสิทธิภาพเชิงการถ่ายเทมวลสารและการใช้พลังงาน ทั้งนี้เนื่องจากหัวกระจายอากาศแบบเมมเบรนจะให้ฟองอากาศขนาดเล็กทำให้มีพื้นที่สัมผัสจำเพาะสูง ส่งผลให้มีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารที่สูง ส่วนในด้านพลังงานพบว่าหัวกระจายอากาศแบบเมมเบรนต้องการแรงดันอากาศต่ำ ทำให้ต้องการพลังงานในการเติมอากาศน้อย ประสิทธิภาพเชิงพลังงานจึงมีค่าสูง

2) เมื่อติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวลงในระบบการเติมอากาศแบบกระจายอากาศพบว่า สามารถเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทออกซิเจนได้ โดยในระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบแข็งสามารถเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนได้ 13 – 17% ในระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบท่ออย่างสามารถเพิ่มได้ 11 – 25% และระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศแบบเมมเบรนสามารถเพิ่มได้ 25 – 37% ทั้งนี้ข้อสังเกตว่าระบบที่หัวกระจายอากาศให้ฟองอากาศขนาดเล็ก จะเพิ่มประสิทธิภาพได้ดีกว่าระบบที่ให้หัวกระจายอากาศขนาดใหญ่

3) ในการเปรียบเทียบแยกส่วนระหว่างการถ่ายเทออกซิเจนบริเวณผิวน้ำและของฟองอากาศพบว่า ระบบที่ให้ฟองอากาศขนาดใหญ่จะมีอัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่ผิวน้ำสูงกว่าระบบที่ให้ฟองอากาศขนาดเล็กเนื่องจากสร้างความปั่นป่วนที่ผิวน้ำได้มากกว่า แต่ระบบที่ให้ฟองอากาศขนาดเล็กจะมีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของฟองอากาศสูงกว่าเนื่องจากมีพื้นที่สัมผัสจำเพาะสูงกว่า เมื่อติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวในระบบพบว่าจะเพิ่มอัตราการถ่ายเทออกซิเจนของฟองอากาศมากขึ้น แต่จะลดอัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่ผิวน้ำลง แต่อัตราการถ่ายเทออกซิเจนเนื่องจากฟองอากาศจะสูงกว่าเดิมมาก ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทออกซิเจนโดยรวมมีค่าสูงขึ้น

4) กลไกการทำงานหลักของอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวคือการเพิ่มระยะเวลาที่เก็บของฟองอากาศในระบบให้นานขึ้น รวมทั้งทำให้เกิดความปั่นป่วนภายในอุปกรณ์ส่งผลให้การถ่ายเทออกซิเจนมีค่าสูงขึ้น โดยระบบที่ใช้หัวกระจายอากาศที่มีฟองขนาดเล็กฟองอากาศจะสามารถเรียงตัวภายในอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวได้หนาแน่นกว่า ทำให้ระบบที่มีฟองอากาศขนาดเล็กมีการถ่ายเทออกซิเจนที่สูงกว่าระบบที่มีฟองอากาศขนาดใหญ่

5) ความเร็วผิวของแก๊สที่เหมาะสมต่อการใช้งานอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวหนึ่งหน่วย คือ 2.2 เซนติเมตรต่อวินาทีขึ้นไป เมื่อเทียบกับพื้นที่หน้าตัดของส่วนยอดของกรวย

6) สารลดแรงตึงผิวในปริมาณที่น้อยสามารถเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนได้ แต่ว่าการใส่สารลดแรงตึงผิวจะลดความสามารถในการเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์สร้าง

ฟิล์มของเหลวลง ทั้งนี้ข้อสังเกตว่าในระบบที่มีฟองอากาศขนาดเล็กมากเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศมีแนวโน้มว่าระบบที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวจะมีการถ่ายเทออกซิเจนที่ดีกว่า

7) การจัดเรียงชุดอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวที่ให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูง คือระบบที่เรียงชุดอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวเป็นแนวยาวตามความกว้างของบ่อและใช้แผ่นกั้นเพื่อให้กระแสน้ำไหลไปด้านข้าง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ในการทดลองมีการใช้อัตราการไหลของอากาศยังไม่กว้างพอที่จะครอบคลุมถึงช่วงที่สัมพันธ์กับการถ่ายเทออกซิเจนที่อาจจะลดลงได้เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศให้สูงกว่านี้ ทั้งนี้เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องเติมอากาศ ถ้ามีการศึกษาต่อการเพิ่มช่วงกว้างของอัตราการไหลของอากาศให้มากกว่านี้ก็เป็นหัวข้อที่น่าสนใจ

2) ในการศึกษาต่อไป ควรเลือกหัวกระจายอากาศที่ให้ฟองอากาศที่มีขนาดเล็กกว่านี้ เพื่อทดสอบว่าเมื่อใช้กับอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนได้ดีหรือไม่ และเพื่อหาช่วงของขนาดฟองอากาศที่เหมาะสมกับอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว

3) ในการทดสอบการถ่ายเทออกซิเจนของฟองอากาศและที่ผิวน้ำ ควรเพิ่มวิธีที่ใช้ทดสอบเพิ่มเติม เพื่อยืนยันผลการทดสอบด้วยไนโตรเจน

4) การทดลองในพื้นที่จริงใช้หัวกระจายอากาศแบบแข็งในการเดินระบบ ถ้าเปลี่ยนหัวกระจายอากาศเป็นแบบแบบเบรอนจะเพิ่มประสิทธิภาพการเติมอากาศให้สูงขึ้นได้

5) แนวทางการติดตั้งชุดอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวที่อธิบายไปนั้นยังไม่ได้ทดสอบในบ่อจริง เป็นเพียงการตั้งสมมติฐานจากผลการทดลองที่ได้มา

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- โชคชัย เหลืองธูปราณีต (2011). หลักการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ. กรุงเทพมหานคร, สำนักพิมพ์โพธิ์เพช.
- นราพงศ์ หงส์ประสิทธิ์ (2011). การวิเคราะห์อุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยึดหยุ่นจากของเสียประเภทยางในกระบวนการเติมอากาศ. ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Akita, K. and F. Yoshida (1973). "Gas Holdup and Volumetric Mass Transfer Coefficient in Bubble Columns. Effects of Liquid Properties." Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development 12(1): 76-80.
- ASCE (1993). Measurement of Oxygen Transfer in Clean Water, American Society of Civil Engineers.
- Deckwer, W. D. (1992). Bubble column reactors, Wiley.
- Deckwer, W. D., R. Burckhart and G. Zoll (1974). "Mixing and mass transfer in tall bubble columns." Chemical Engineering Science 29(11): 2177-2188.
- DeMoyer, C. D., E. L. Schierholz, J. S. Gulliver and S. C. Wilhelms (2003). "Impact of bubble and free surface oxygen transfer on diffused aeration systems." Water Research 37(8): 1890-1904.
- Dierendonck, L. J. V., J. M. Fortuin and D. Venderbos (1968). Proceedings of the 4th European Symposium on Chemical Reaction Engineering, Brussels.
- Frumkin, A. A. and V. G. Levich (1947). "On surfactants and interfacial motion." Zhurnal Fizicheskoi Khimii 21: 1183-1204.
- Gestrich, W. and W. Krauss (1975). "Die spezifische Phasengrenzfläche in Blasensäulen (The specific interfacial area in bubble columns)." Chemie Ingenieur Technik 47(9): 360-367.
- Grace, J. R. and T. Wairegi (1986). Properties and Characteristics of Drops and Bubbles. Encyclopedia of Fluid Mechanics. P. N. Cheremisinoff. Huston, Gulf Publishing.
- Grace, J. R., T. Wairegi and T. H. Nguyen (1976). "Shapes and velocities of single drops and bubbles moving freely through immiscible liquids." Transactions of the Institution of Chemical Engineers 54: 167-173.

- Hadamard, J. (1911). "Mouvement permanent lent d'une sphere liquide et visqueuse dans un liquide visqueux." Comptes Rendus de l'Académie des Sciences 152: 1735-1738.
- Hebrard, G. R. M. (1995). Etude de l'influence du distributeur de gaz sur l'hydrodynamique et le transfert de matière gaz-liquide des colonnes à bulles, [s.n].
- Imai, T. and H. Zhu (2011). Improvement of Oxygen Transfer Efficiency in Diffused Aeration Systems Using Liquid-Film-Forming Apparatus. Mass Transfer - Advanced Aspects. H. Nakajima: 341-370.
- Jamnongwong, M., K. Loubiere, N. Dietrich and G. Hébrard (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(3): 758-768.
- Khudenko, B. M. and E. Shpirt (1986). "Hydrodynamic parameters of diffused air systems." Water Research 20(7): 905-915.
- Krevelen, W. V. and M. J. Jackson (1959). Industrial Engineering Chemical Program.
- Kumar, A., T. E. Degaleesan, G. S. Laddha and H. E. Hoelscher (1976). "Bubble swarm characteristics in bubble columns." The Canadian Journal of Chemical Engineering 54(6): 503-508.
- Kumar, A., S. Moulick and B. C. Mal (2010). "Performance evaluation of propeller-aspirator-pump aerator." Aquacultural Engineering 42(2): 70-74.
- Leibson, I., E. G. Holcomb, A. G. Cacosco and J. J. Jacmic (1956). "Rate of flow and mechanics of bubble formation from single submerged orifices. I. Rate of flow studies." AIChE Journal 2(3): 296-300.
- Lewis, W. K. and W. C. Whitman (1924). "Principles of Gas Adsorption." Journal Industrial and Engineering Chemistry 16: 1215-1220.
- McWhirter, J. R. and J. C. Hutter (1989). "Improved oxygen mass transfer modeling for diffused/subsurface aeration systems." AIChE Journal 35(9): 1527-1534.
- Mendelson, H. D. (1967). "The prediction of bubble terminal velocities from wave theory." AIChE Journal 13: 250-253.
- Metcalf & Eddy, I., G. Tchobanoglous, F. L. Burton and H. D. Stensel (2003). Wastewater Engineering Treatment and Reuse. New York, Mc-Graw-Hill.
- Moustiri, S. (2000). Hydrodynamique des colonnes à bulles fonctionnant à co-courant de gaz et de liquide: Effet hydrodynamique produit par la présence d'un garnissage spécifique Thèse N°601, INSA Toulouse.
- Mueller, J., W. C. Boyle and I. H. J. Popel (2002). Aeration: Principles and Practice, Taylor & Francis.

- Painmanakul, P. and M. Jamnongwong (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).
- Painmanakul, P., K. Loubiere, G. Hebrard and P. Buffiere (2004). "Study of different membrane spargers used in waste water treatment: characterisation and performance." Chemical Engineering and Processing: Process Intensification 43(11): 1347-1359.
- Painmanakul, P., J. Wachirasak, M. Jamnongwong and G. Hébrard (2009). "Theoretical prediction of volumetric mass transfer coefficient ($k_L a$) for designing an aeration tank." Engineering Journal 13(3): 13-28.
- Roustan, M. (2003). Transferts gaz-liquide dans les procédés de traitement des eaux et des effluents gazeux. Paris, Tec & Doc.
- Sardeing, R., P. Painmanakul and G. Hébrard (2006). "Effect of surfactants on liquid-side mass transfer coefficients in gas-liquid systems: A first step to modeling." Chemical Engineering Science 61(19): 6249-6260.
- Sauter, J. (1926). Die Größenbestimmung der im Gemischnebel von Verbrennungskraftmaschinen vorhandenen Brennstoffteilchen, VDI-Verlag.
- Shaw, D. J. (1992). Introduction to Colloid and Surface Chemistry, Butterworth-Heinemann.
- Tomida, T., F. Yusa and T. Okazaki (1978). "Effective interfacial area and liquid-side mass transfer coefficient in the upward two-phase flow of gas-liquid mixtures." The Chemical Engineering Journal 16(2): 81-88.
- Wilhelms, S. C. and S. K. Martin (1992). Gas Transfer in Diffused Bubble Plumes. Proceedings of the Hydraulic Engineering sessions at Water Forum, Baltimore, Maryland, American Society of Civil Engineers.
- Wilkinson, P. M., H. Haringa and L. L. Van Dierendonck (1994). "Mass transfer and bubble size in a bubble column under pressure." Chemical Engineering Science 49(9): 1417-1427.
- Zlakarnik, M. (1981). "Reactive red azo dye degradation in a UASB bioreactor: Mechanism and kinetic." Acta Biotechnologica 1: 311-316.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

ผลการทดลอง

1. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่วัดได้จากการทดลองต้องนำมาปรับแก้เป็นสภาวะมาตรฐานก่อน (ที่ 20 องศาเซลเซียส) ดังนั้นผลที่รายงานจะเป็นผลที่ปรับแก้เป็นค่ามาตรฐานเรียบร้อยแล้ว

ตาราง ก-1 แสดงสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของหัวกระจายอากาศชนิดต่าง ๆ

หัวกระจายอากาศ	อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาท)	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (ต่อชั่วโมง)
RD	3	1.09
	5	1.78
	10	3.35
	15	4.28
	20	4.74
	25	5.80
	30	6.61
RDL	3	0.97
	5	1.88
	10	3.77
	15	5.00
	20	5.56
	25	6.71
	30	6.79
ED	3	2.02
	5	3.80
	10	5.89
	15	6.92

หัวกระจาย อากาศ	อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (ต่อชั่วโมง)
ED	20	8.25
	25	9.00
	30	9.48
EDL	3	1.58
	5	3.45
	10	5.99
	15	7.69
	20	9.58
	25	10.83
	30	11.83
MD	3	1.83
	5	4.02
	10	8.10
	15	8.66
	20	10.79
	25	13.48
	30	15.37
MDL	3	1.64
	5	4.12
	10	9.22
	15	11.41
	20	14.79
	25	16.83
	30	20.15

2. ตัวแปรอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ

ตาราง ก-2 ตารางแสดงตัวแปรอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ

หัว กระจาย อากาศ	อัตราการ ไหลของ อากาศ (ลิตร/ นาที)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ของ ฟองอากาศ (ซม.)	ความเร็ว ลอยตัวของ ฟองอากาศ (ซม./ วินาที)	พื้นที่ สัมผัส จำเพาะ (ต่อเมตร)	สัมประสิทธิ์ การถ่ายเท มวลสาร ผ่านชั้น กลาง ของเหลว (เมตรต่อ วินาที)	แนวโน้ม ของ สัมประสิทธิ์ การถ่ายเท มวลสาร ผ่านชั้น กลาง ของเหลว (เมตรต่อ วินาที)
RD	3	0.29	33.2	0.70	4.33E-04	4.77E-04
	5	0.31	33.8	1.06	4.64E-04	4.80E-04
	10	0.34	37.7	1.74	5.33E-04	4.87E-04
	15	0.35	40.9	2.33	5.10E-04	4.94E-04
	20	0.38	47.8	2.45	5.36E-04	5.00E-04
	25	0.40	44.8	3.12	5.16E-04	5.07E-04
	30	0.39	43.6	3.93	4.67E-04	5.14E-04
ED	3	0.21	30.2	1.06	5.27E-04	6.00E-04
	5	0.24	27.8	1.72	6.16E-04	6.00E-04
	10	0.26	30.8	2.78	5.89E-04	6.00E-04
	15	0.29	31.3	3.64	5.29E-04	5.99E-04
	20	0.31	38.4	3.76	6.10E-04	5.99E-04
	25	0.32	40.6	4.25	5.88E-04	5.99E-04
	30	0.32	42.4	4.90	5.37E-04	5.99E-04
MD	3	0.13	30.1	1.68	3.03E-04	2.92E-04
	5	0.15	22.7	3.26	3.42E-04	3.15E-04
	10	0.16	25.7	5.36	4.20E-04	3.71E-04
	15	0.19	22.9	7.88	3.05E-04	4.27E-04

หัว กระจาย อากาศ	อัตราการ ไหลของ อากาศ (ลิตร/ นาที)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ของ พองอากาศ (ซม.)	ความเร็ว ลอยตัวของ พองอากาศ (ซม./ วินาที)	พื้นที่ สัมผัส จำเพาะ (ต่อเมตร)	สัมประสิทธิ์ การถ่ายเท มวลสาร ผ่านชั้น กลาง ของเหลว (เมตรต่อ วินาที)	แนวโน้ม ของ สัมประสิทธิ์ การถ่ายเท มวลสาร ผ่านชั้น กลาง ของเหลว (เมตรต่อ วินาที)
	20	0.22	32.5	6.28	4.77E-04	4.83E-04
MD	25	0.24	32.2	7.16	5.23E-04	5.39E-04
	30	0.26	38.7	6.55	6.52E-04	5.96E-04

3. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่ใช้แผ่นโพนปิด

ตาราง ก-3 ตารางแสดงสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่ใช้แผ่นโพนปิด

หัวกระจาย อากาศ	อัตราการไหลของ อากาศ(ลิตรต่อนาที)	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (ต่อชั่วโมง)
RDF	3	1.1
	5	2.4
	10	3.5
	15	4.7
	20	5.7
	25	6.8
	30	6.6
MDF	3	1.8
	5	3.8
	10	6.3
	15	11.0

หัวกระจาย อากาศ	อัตราการไหลของ อากาศ(ลิตรต่อนาที)	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (ต่อชั่วโมง)
MDF	20	13.7
	25	16.2
	30	18.1

4. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนแบบแยกส่วนที่ทดสอบด้วยไนโตรเจน

ตาราง ก-4 แสดงสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่ทดสอบด้วยไนโตรเจน

หัว กระจาย อากาศ	อัตราการไหลของอากาศ (ลิตรต่อนาที)	อัตราส่วน (%)		สัมประสิทธิ์การถ่ายเท ออกซิเจน (ต่อชั่วโมง)	
		ฟองอากาศ	ผิวน้ำ	ฟองอากาศ	ผิวน้ำ
RD	3	47.5	52.5	0.5	0.6
	5	73.6	26.4	1.3	0.5
	10	80.3	19.7	2.7	0.7
	15	82.2	17.8	3.5	0.8
	20	81.9	18.1	3.9	0.9
	25	83.4	16.6	4.8	1.0
	30	80.4	19.6	5.3	1.3
MD	3	83.9	16.1	1.5	0.3
	5	91.1	8.9	3.7	0.4
	10	93.2	6.8	7.5	0.6
	15	94.5	5.5	8.2	0.5
	20	95.7	4.3	10.3	0.5
	25	96.6	3.4	13.0	0.5
	30	97.3	2.7	15.0	0.4
RDL	3	100.0	0.0	1.0	0.0
	5	100.0	0.0	1.9	0.0

หัว กระจาย อากาศ	อัตราการไหลของอากาศ (ลิตรต่อนาที)	อัตราส่วน (%)		สัมประสิทธิ์การถ่ายเท ออกซิเจน (ต่อชั่วโมง)	
		ฟองอากาศ	ผิวน้ำ	ฟองอากาศ	ผิวน้ำ
	10	95.7	4.3	3.6	0.2
	15	94.3	5.7	4.7	0.3
	20	91.5	8.5	5.1	0.5
	25	92.5	7.5	6.2	0.5
	30	90.5	9.5	6.2	0.6
MDL	3	100.0	0.0	1.6	0.0
	5	100.0	0.0	4.1	0.0
	10	100.0	0.0	9.2	0.0
	15	100.0	0.0	11.4	0.0
	20	100.0	0.0	14.8	0.0
	25	100.0	0.0	16.8	0.0
	30	100.0	0.0	20.1	0.0

5. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิว

ตาราง ก-5 ตารางแสดงสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิว

หัวกระจาย อากาศ	อัตราการไหลของอากาศ (ลิตรต่อนาที)	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (ต่อชั่วโมง)
MD, S0.01	3	2.9
	5	6.0
	10	10.4
	15	14.3
	20	18.8
	25	19.4
	30	21.0

หัวกระจาย อากาศ	อัตราการไหลของอากาศ (ลิตรต่อนาที)	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (ต่อชั่วโมง)
MDL, S0.01	3	2.6
	5	6.2
	10	11.9
	15	16.6
	20	19.8
	25	20.9
	30	25.0
MD, S0.1	3	1.3
	5	3.1
	10	6.9
	15	9.5
	20	13.3
	25	15.2
	30	19.1
MDL, S0.1	3	1.6
	5	4.4
	10	7.3
	15	11.4
	20	15.2
	25	15.3
	30	18.0

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายตาวัน เจริญพิทยา เกิดวันที่ 16 กันยายน 2532 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2553 และเข้าศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2554



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY