

ประสิทธิภาพและเกณฑ์การออกแบบอุปกรณ์เติมอากาศแบบเวนจูรี
และการใช้งานร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว



นายรัชกาล พันธวิศิษฐ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFICIENCY AND DESIGN CRITERIA OF VENTURI AIR INJECTOR COUPLE WITH LIQUID-
FILM-FORMING APPARATUS (LFFA)

Mr. Rachagam Pantavisit



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 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ประสิทธิภาพและเกณฑ์การออกแบบอุปกรณ์เติมอากาศแบบเวนจูรีและการทำงานร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว
โดย	นายรัชกาล พันธวิศิษฐ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร. มรุพัชร จำนงค์วงศ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เพชรพร เขาวงกตเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร. มรุพัชร จำนงค์วงศ์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัมย์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. พิเชฐ ชัยวิวัฒน์วรกุล)

รัชกาล พันธวิศิษฐ์ : ประสิทธิภาพและเกณฑ์การออกแบบอุปกรณ์เติมอากาศแบบเวนจูรี และการใช้งานร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว (EFFICIENCY AND DESIGN CRITERIA OF VENTURI AIR INJECTOR COUPLE WITH LIQUID-FILM-FORMING APPARATUS (LFFA)) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. พิสุทธิ์ เพียรมนกุล, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร. มรุพัชร จานงค์วงศ์ , 150 หน้า.

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาอุปกรณ์เติมอากาศเวนจูรี (Venturi Air Injector) ในด้านประสิทธิภาพการเติมอากาศ ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเติมอากาศ การพัฒนาประสิทธิภาพการเติมอากาศด้วยการติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว (Liquid Film Forming Apparatus) และการสร้างสมการทำนายประสิทธิภาพการเติมอากาศของอุปกรณ์เวนจูรี โดยงานวิจัยเริ่มจากการทดสอบอุปกรณ์เวนจูรีขนาด 2 นิ้ว ได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (K_{La20}) เท่ากับ 30.57 cm^{-1} ค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (SOTR) เท่ากับ 236.62 กรัม-ออกซิเจน/ชม. ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน (SAE) เท่ากับ 0.22 กก.ออกซิเจน/กิโลวัตต์-ชม. และค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (SOTE) เท่ากับ 3.98% ตามลำดับ ที่อัตราการไหลน้ำ 240 ลิตร/นาที แรงดัน 1.15 บาร์ ความลึกน้ำ 70 เซนติเมตร โดยปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเวนจูรี ได้แก่ 1) เครื่องสูบน้ำ 2) การออกแบบอุปกรณ์เวนจูรี และ 3) การติดตั้งอุปกรณ์เวนจูรี ปัจจัยแรกควรเลือกเครื่องสูบน้ำให้เหมาะสมกับสภาวะการเดินระบบ (Operating Point) ของเวนจูรีแต่ละขนาดซึ่งควรตกอยู่ในช่วงกึ่งกลาง Pump Curve ของเครื่องสูบน้ำที่เลือกใช้งาน ปัจจัยที่สองการออกแบบอุปกรณ์เวนจูรีพบว่าอัตราส่วนหน้าตัดบริเวณคอคอดต่อน้ำเข้า (D_1/D) เท่ากับ 0.5 มีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ด้านขาเข้าที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 63,000 – 188,000 ปัจจัยที่สามการติดตั้งเวนจูรีโดยเลือกอัตราไหลน้ำและระดับความลึกน้ำที่เหมาะสม จากการทดลองพบว่าความเร็วน้ำที่บริเวณคอคอดของเวนจูรีที่ให้ประสิทธิภาพในการดูดอากาศสูงอยู่ในช่วง 12 – 15 เมตร/วินาที และระดับความลึกน้ำที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลประสิทธิภาพการเติมอากาศดีขึ้น แต่อัตราการไหลอากาศจากเวนจูรีที่เหมาะสมจะสูงขึ้นตาม ด้านตัวแปรอุทกศาสตร์ฟองอากาศจากอุปกรณ์เวนจูรีพบว่า การเคลื่อนที่ของฟองอากาศมีลักษณะเป็นเส้นโค้งขึ้นสู่ผิวน้ำ โดยระยะทางที่ฟองอากาศพุ่งไปด้านหน้าจะแปรผันตรงกับอัตราการไหลน้ำ และตัวแปรขนาดฟองอากาศ (D_b) ของเวนจูรีขนาด 2 นิ้ว ที่อัตราไหลอากาศ 2 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง พบว่ามีค่าเฉลี่ยขนาดฟองอากาศเท่ากับ 3.26 มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าฟองอากาศจากหัวทราย แต่มีขนาดใกล้เคียงกับฟองอากาศจากท่ออย่างยืดหยุ่น การพัฒนาประสิทธิภาพอุปกรณ์เวนจูรีโดยการติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวสามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (K_{La}) ได้ประมาณ 5.10 – 9.43 % และจากผลการทดลอง ประสิทธิภาพของเวนจูรีขนาด 2 นิ้ว สามารถนำมาสร้างสมการทำนายค่าอัตราส่วนการไหลของอากาศต่อน้ำ (Q_g/Q_w) และสร้างสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (K_{La20}) โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด 12.03% และ 14.50% ตามลำดับ

ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
ปีการศึกษา	2559	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5770455421 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: VENTURI / AERATION / OXYGEN TRANSFER COEFFICIENT / LIQUID FILM FORMING APPARATUS (LFFA)

RACHAGARN PANTAVISIT: EFFICIENCY AND DESIGN CRITERIA OF VENTURI AIR INJECTOR COUPLE WITH LIQUID-FILM-FORMING APPARATUS (LFFA). ADVISOR: ASSOC. PROF. PISUT PAINMANAKUL, Ph.D., CO-ADVISOR: MARUPATCH JAMNONGWONG, Ph.D. , 150 pp.

This article focuses on studying Venturi air injector in several term instead of the aeration efficiency, the variables that affect the performance of aeration, the improvement of aeration efficiency by installed the Liquid Film Forming Apparatus (LFFA) and create the efficiency prediction models of Venturi. The results of 2-inch Venturi aeration test showed that the value of standard oxygen transfer coefficient ($K_L a_{20}$) is 30.57 hr^{-1} , the standard oxygen transfer rate (SOTR) is $236.62 \text{ gO}_2/\text{hr}$, the standard aeration efficiency (SAE) is $0.22 \text{ kgO}_2/\text{kWh}$ and the standard oxygen transfer efficiency (SOTE) is 3.98% respectively at water flow rate 240 liters/min pressure 1.15 bar . The results of the experiment showed that there are three main factors that affect the performance of Venturi. The first factor is water pump, the pump should be selected to suit the operating point of each Venturi size, which should operate at the middle of the pump performance curve. The second factor is the design of Venturi, the ratio of throat diameter to inlet diameter (D_t/D) 0.5 is suitable for inlet Reynolds number $63,000 - 188,000$. The third factor is the installation of the Venturi by selecting the appropriate water flow rate and water depth. The experiments showed that the water velocity at throat in range $12 - 15 \text{ m/s}$ gave high air suction rate. Higher water levels improve aerating performance but the appropriate air flow rate of Venturi will increase accordingly. The study of bubbles hydrodynamics of Venturi found that the bubbles from outlet of Venturi move in straight line for a short distance and bend up to the water surface, by the dispersion distance of bubbles to the front of Venturi is varies with the water flow rate. The bubbles size of 2-inch Venturi at air flow rate $2 \text{ m}^3/\text{hr}$ have the average bubble size 3.26 mm . which was smaller than the bubbles from stone ball diffuser but close to the bubbles size of elastic hoses diffuser. The improvement of Venturi aeration efficiency by installing LFFA. It is possible to increase the oxygen transfer coefficient ($K_L a$) by about $5.10 - 9.43\%$. Based on the results of the 2-inch Venturi experiment, we can construct the equations for the rato of air -water flow rate (Q_g/Q_w) and standard oxygen transfer coefficient ($K_L a_{20}$) prediction with a maximum error of 12.03% and 14.50% , respectively.

Department: Environmental Engineering Student's Signature

Field of Study: Environmental Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2016 Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ เพราะการช่วยเหลือและสนับสนุนจากบุคคลหลายท่าน ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณอย่างยิ่งต่อบุคคลดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร.มรุตพร จ้างวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้สละเวลาให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางปฏิบัติ จนสามารถทำวิจัยได้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ลักษณะ พึ่งรัศมี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ และ ดร.พิเชษฐ ชัยวิวัฒน์วรกุล ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบ

วิทยานิพนธ์ รวมทั้งให้คำชี้แนะในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์จนมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณนายนาพรพงศ์ หงส์ประสิทธิ์ และนายกริชชาติ ว่องไวลิขิต ที่ช่วยให้คำปรึกษาด้านทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง จนสามารถทำวิทยานิพนธ์ได้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณรุ่นพี่รุ่นน้องและเพื่อนร่วมห้องปฏิบัติการทุกคนที่คอยช่วยเหลือ เป็นกำลังใจตลอดระยะเวลาสามปีในระหว่างการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์เอื้อเฟื้อสถานที่ และอุปกรณ์ที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัย

ขอขอบพระคุณ บริษัท กสิพันธ์รัตน์ จำกัด ผู้สนับสนุนอุปกรณ์ในการทดลอง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก โครงการทุนอุดหนุนโครงการเพิ่มศักยภาพส่วนงานในด้านการศึกษาวิจัย และหน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีการบำบัดปิโตรเลียมและน้ำมัน ข้าพเจ้าขอขอบคุณเป็นอย่างยิ่งมา ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และทุกคนในครอบครัว ที่ได้ให้โอกาสทางการศึกษา คอยสนับสนุนดูแล และให้กำลังใจตลอดเวลา จนสามารถจำทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	11
สารบัญรูป.....	13
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 กระบวนการเติมอากาศ (Aeration Process).....	5
2.1.1 กฎของเฮนรี (Henry's Law).....	5
2.1.2 ทฤษฎีฟิล์มสองชั้น (Two Film Theory).....	8
2.1.3 การถ่ายเทออกซิเจน (Oxygen Transfer).....	10
2.2 การทดสอบสมรรถภาพอุปกรณ์เติมอากาศ.....	12
2.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพอุปกรณ์เติมอากาศ.....	14
2.3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (Oxygen Transfer Coefficient).....	14
2.3.2 อัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (Standard Oxygen Transfer Rate, SOTR)..	14
2.3.3 ประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน (Standard Aeration Efficiency, SAE).....	15
2.3.4 ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (Standard Oxygen Transfer Efficiency, SOTE).....	16

2.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการเติมอากาศ	17
2.4.1 อุปกรณ์กระจายอากาศ (Diffused Aeration).....	17
2.4.2 อุปกรณ์เติมอากาศทางกล (Mechanical Aeration).....	20
2.4.2.1 อุปกรณ์เติมอากาศทางกล บนผิวน้ำ (Surface Mechanical Aerator)	20
2.4.2.2 อุปกรณ์เติมอากาศทางกล ใต้อผิวน้ำ (Submerged mechanical aerator) .	22
2.4.3 ระบบเติมอากาศแบบประยุกต์อุปกรณ์กระจายอากาศ ร่วมกับอุปกรณ์เติมอากาศ ทางกล (Combined Compressed Air and Mechanical Aerators).....	23
2.4.4 อุปกรณ์เติมอากาศแบบปั๊มของเหลว (Pumped liquid aerators).....	24
2.5 อุปกรณ์เติมอากาศเวนจูรี (Venturi Air Injector)	26
2.6 ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ (Bubble hydrodynamic parameters).....	27
2.6.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (Bubble diameter, d_b).....	27
2.6.2 ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (Bubble rising velocity, U_b).....	27
2.6.3 ระยะเวลาการเกิดฟองอากาศ (Bubble formation time, T_b) และความถี่ของ การเกิดฟองอากาศ (Bubble formation frequency, f_b)	28
2.6.4 พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างก๊าซและของเหลว (Interfacial area, a)	31
2.7 ระบบเติมอากาศแบบสร้างฟิล์มของเหลว (Liquid-Film Forming Apparatus, LFFA)	32
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
บทที่ 3 ขั้นตอน และวิธีดำเนินงานวิจัย	43
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย	43
3.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	45
3.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	51
3.4 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	52
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล.....	66
4.1 การศึกษาประสิทธิภาพการเติมอากาศ และแรงดันสูญเสียของอุปกรณ์เวนจูรี.....	66

4.1.1 ทดสอบประสิทธิภาพการเติมอากาศของอุปกรณ์เวนจูรี	68
4.1.2 ปัจจัยของเครื่องสูบน้ำ ต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์เวนจูรี	69
4.1.3 ปัจจัยของการออกแบบสัดส่วนภายใน และแรงดันสูญเสียของอุปกรณ์เวนจูรี	74
4.2 ศึกษาปัจจัยการติดตั้ง ต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์เวนจูรี.....	82
4.2.1 อัตราการไหลของน้ำต่อประสิทธิภาพอุปกรณ์เวนจูรี.....	82
4.2.2 ระดับความลึกการติดตั้งอุปกรณ์เวนจูรี ต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์.....	85
4.3 ศึกษาตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศจากอุปกรณ์เวนจูรี.....	89
4.3.1 ทิศทางการเคลื่อนที่ของฟองอากาศออกจากเวนจูรี.....	89
4.3.2 ขนาดฟองอากาศ (D_b)	91
4.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์เติมอากาศเวนจูรี กับอุปกรณ์กระจายอากาศ ใน เทอมของประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน และพลังงานที่ใช้ในการเติมอากาศ	95
4.3.1 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเติมอากาศ ที่ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเติม อากาศและระดับความลึกการเติมอากาศคงที่	95
4.3.2 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเติมอากาศ ที่ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเติม อากาศคงที่แต่เปลี่ยนแปลงระดับความลึกการเติมอากาศ.....	97
4.3.3 ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงทั้งค่าพลังงานไฟฟ้า และระดับความลึกการเติม อากาศ.....	101
4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์เติมอากาศเวนจูรี กับอุปกรณ์กระจายอากาศ ใน เทอมของประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน ต่อระยะห่างจากจุดเติมอากาศ	107
4.6 การประยุกต์ใช้อุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว (LFFA) ร่วมกับอุปกรณ์เวนจูรี	111
4.7 สมการทำนายประสิทธิภาพการเติมอากาศของอุปกรณ์เวนจูรี	113
4.7.1 สมการทำนายประสิทธิภาพการดูดอากาศเข้าสู่ระบบของอุปกรณ์เวนจูรี.....	113
4.7.2 สมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ($K_L a$) ของอุปกรณ์เวนจูรี	117

4.7.3 ตัวอย่างการคำนวณระบบเติมอากาศเวนจูรี โดยใช้ผลการสมการทำนาย ประสิทธิภาพ.....	123
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	125
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	125
5.2 ข้อเสนอแนะ	127
5.3 การประยุกต์ใช้อุปกรณ์เวนจูรีในทางวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....	129
รายการอ้างอิง	132
ภาคผนวก.....	135
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	150



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2-1 ค่าออกซิเจนละลายที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิ และความดันบรรยากาศต่างๆ	6
ตารางที่ 2-2 ค่าคงที่ของเฮนรีของแก๊สต่างๆ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	7
ตารางที่ 2-3 ค่าออกซิเจนละลายที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิ และค่าความเค็มต่างๆ	7
ตารางที่ 2-4 ประสิทธิภาพของอุปกรณ์กระจายอากาศ (Diffused aeration) ชนิดต่างๆ.....	19
ตารางที่ 2-5 ประสิทธิภาพของอุปกรณ์เติมอากาศทางกลบนผิวน้ำในแนวตั้งชนิดต่างๆ	20
ตารางที่ 2-6 ประสิทธิภาพอุปกรณ์เติมอากาศทางกลบนผิวน้ำในแนวนอนชนิดต่างๆ.....	21
ตารางที่ 2-7 ประสิทธิภาพของอุปกรณ์เติมอากาศทางกลใต้ผิวน้ำชนิดต่างๆ.....	23
ตารางที่ 2-8 ประสิทธิภาพของระบบเติมอากาศแบบประยุกต์อุปกรณ์กระจายอากาศ ร่วมกับ อุปกรณ์เติมอากาศทางกล	24
ตารางที่ 2-9 ประสิทธิภาพอุปกรณ์เติมอากาศแบบปั๊มของเหลว	25
ตารางที่ 2-10 ประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน (SAE) ที่ระดับความลึกจุดเติมอากาศต่างๆ...	36
ตารางที่ 2-11 ประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน (SAE) ที่ระดับองค์การติดตั้งเวนจูลีต่างๆ	37
ตารางที่ 2-12 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ($K_L a$) ของเวนจูลีขนาดต่างๆที่ระดับความลึก 0.5 เมตร และ 1.0 เมตร.....	33
ตารางที่ 2-13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์เติมอากาศแบบเวนจูลี	42
ตารางที่ 3-1 ขนาดหน้าตัด และองศาภายในอุปกรณ์เวนจูลี	45
ตารางที่ 3-2 อุปกรณ์อื่นๆที่ใช้ในการทดลอง 1/2.....	49
ตารางที่ 3-3 อุปกรณ์อื่นๆที่ใช้ในการทดลอง 2/2.....	50
ตารางที่ 3-4 สรุปตัวแปรที่สนใจศึกษาในการทดลองที่ 1	54
ตารางที่ 3-5 สรุปตัวแปรที่สนใจศึกษาในการทดลองที่ 2	55
ตารางที่ 3-6 สรุปตัวแปรที่สนใจศึกษาในการทดลองที่ 3	57
ตารางที่ 3-7 สรุปตัวแปรที่สนใจศึกษาในการทดลองที่ 4	59

ตารางที่ 3-8 สรุปตัวแปรที่สนใจศึกษาในการทดลองที่ 5	61
ตารางที่ 3-9 สรุปตัวแปรที่สนใจศึกษาในการทดลองที่ 6	63
ตารางที่ 3-10 สรุปตัวแปรที่สนใจศึกษาในการทดลองที่ 7	65
ตารางที่ 4-1 ค่าตัวแปรควบคุม และตัวแปรตามในการทดสอบประสิทธิภาพอุปกรณ์เวนจูรี.....	68
ตารางที่ 4-2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพอุปกรณ์เวนจูรี	68
ตารางที่ 4-3 สภาวะการเดินระบบเวนจูรีขนาด 2 นิ้ว จากเครื่องสูบน้ำ WCM1105s และ VC150	71
ตารางที่ 4-4 สัดส่วนภายในอุปกรณ์เวนจูรี และสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสม.....	76
ตารางที่ 4-5 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความดัน (Minor loss coefficients).....	78
ตารางที่ 4-6 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความดัน (Minor loss coefficients).....	78
ตารางที่ 4-7 สมการทำนายแรงดันน้ำขาเข้าของเวนจูรีขนาด 0.5, 1, 1.5 และ 2 นิ้ว.....	81
ตารางที่ 4-8 ความเร็วและอัตราไหลน้ำขาเข้าที่เหมาะสมของเวนจูรีขนาด 0.5, 1, 1.5 และ 2 นิ้ว..	84
ตารางที่ 4-9 ประสิทธิภาพการเติมอากาศของอุปกรณ์เวนจูรีขนาด 2 นิ้ว อุปกรณ์กระจายอากาศ ชนิดท่อที่ยืดหยุ่นและหัวทราย ที่ค่าพลังงานไฟฟ้า 280 วัตต์ ความลึกน้ำ 50 เซนติเมตร..	96
ตารางที่ 4-10 ผลการทดสอบประสิทธิภาพอุปกรณ์เวนจูรี	107
ตารางที่ 4-11 ผลการทดสอบประสิทธิภาพอุปกรณ์กระจายอากาศแบบท่ออย่าง (Elastic Diffuser) ติดตั้งร่วมกับอุปกรณ์ Airlift	108
ตารางที่ 4-12 ผลการพัฒนาประสิทธิภาพการเติมอากาศ ด้วยอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว	111
ตารางที่ 4-13 ผลการทำนายค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนลงสู่กันได้จริง (AOTR) ของอุปกรณ์เวนจูรีขนาด 2 นิ้ว ที่ระดับความลึกการเติมอากาศ 50 เซนติเมตร	120
ตารางที่ 4-14 ผลการทำนายค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนลงสู่กันได้จริง (AOTR) ของอุปกรณ์เวนจูรีขนาด 2 นิ้ว ที่ระดับความลึกการเติมอากาศ 100 เซนติเมตร	121
ตารางที่ 4-15 ผลการทำนายค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนลงสู่กันได้จริง (AOTR) ของอุปกรณ์เวนจูรีขนาด 2 นิ้ว ที่ระดับความลึกการเติมอากาศ 150 เซนติเมตร	121
ตารางที่ 5-1 อัตราการใช้ออกซิเจนจากการหายใจของกุ้งขาว (มก.ออกซิเจน/ตัว/ชั่วโมง)	130

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2-1 การถ่ายเทออกซิเจนระหว่างของเหลวและอากาศ.....	9
รูปที่ 2-2 ตัวอย่างการบันทึกค่าออกซิเจนละลาย.....	12
รูปที่ 2-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln Y$ หรือ $\ln(C_s - C_0)(C_s - C_t)$ กับเวลา (t) โดยมี Slope เท่ากับค่า $K_L a$	13
รูปที่ 2-4 อุปกรณ์กระจายอากาศชนิดพองอากาศขนาดเล็ก.....	17
รูปที่ 2-5 อุปกรณ์กระจายอากาศชนิดพองอากาศขนาดใหญ่.....	18
รูปที่ 2-6 อุปกรณ์เติมอากาศทางกลบนผิวน้ำในแนวตั้ง.....	20
รูปที่ 2-7 อุปกรณ์เติมอากาศทางกลบนผิวน้ำในแนวนอน.....	21
รูปที่ 2-8 อุปกรณ์เติมอากาศทางกลใต้น้ำในแนวตั้ง.....	22
รูปที่ 2-9 อุปกรณ์เติมอากาศทางกลใต้น้ำในแนวนอน.....	22
รูปที่ 2-10 การประยุกต์อุปกรณ์กระจายอากาศ ร่วมกับอุปกรณ์เติมอากาศทางกล.....	23
รูปที่ 2-11 อุปกรณ์เติมอากาศแบบปัมของเหลว.....	24
รูปที่ 2-12 หน้าตัดอุปกรณ์เวนจูรี.....	26
รูปที่ 2-13 ภาพจำลองแสดงระยะเวลาการเกิดพองอากาศ.....	29
รูปที่ 2-14 อุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว.....	32
รูปที่ 2-15 แสดงลักษณะการถ่ายเทออกซิเจนของระบบสร้างฟิล์มของเหลว.....	32
รูปที่ 2-16 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์เวนจูรีในการทดลอง.....	37
รูปที่ 2-17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Re กับ Q_v/Q_w เวนจูรีขนาด 36 มม.....	38
รูปที่ 2-18 กราฟความสัมพันธ์ V_w กับ Q_v/Q_w และกราฟแสดงค่า Q_v/Q_w ที่ความยาว L ต่างๆ.....	35
รูปที่ 2-19 กราฟแสดงประสิทธิภาพของเวนจูรี ที่องค์หน้าตัดลดทางน้ำเข้าและทางน้ำออก ต่างๆ.....	34
รูปที่ 2-20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง V_w และอัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (SOTR).....	33

รูปที่ 2-21 ขนาดหน้าตัด และความยาวอุปกรณ์เวนจูรี ที่ใช้ในการสร้างฟองอากาศขนาด ไมโครเมตร.....	40
รูปที่ 2-22 ขนาดฟองอากาศจากอุปกรณ์สร้างฟองอากาศทั้งสามชนิด	41
รูปที่ 2-23 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง Venturi Scrubber.....	39
รูปที่ 2-24 ขนาดอุปกรณ์เวนจูรีที่ใช้ในการทดลอง และประสิทธิภาพการดักจับฝุ่น	40
รูปที่ 3-1 อุปกรณ์เติมอากาศเวนจูรี.....	45
รูปที่ 3-2 ภาพแสดงหน้าตัดอุปกรณ์เวนจูรี.....	45
รูปที่ 3-3 หัวกระจายอากาศแบบหยาบหรือแบบแข็ง (Rigid diffuser)	46
รูปที่ 3-4 หัวกระจายอากาศแบบท่อยาง (Rubber diffuser).....	46
รูปที่ 3-5 ถังเติมอากาศทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดความยาว 2.44 เมตร	47
รูปที่ 3-6 ถังเติมอากาศทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส กว้าง 2 เมตร ยาว 2 เมตร ลึก 2 เมตร และโครงเหล็ก..	48
รูปที่ 3-7 การติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวในถังเติมอากาศ.....	48
รูปที่ 3-8 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองที่ 1.1	52
รูปที่ 3-9 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองที่ 1.1.....	53
รูปที่ 3-10 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองที่ 1.2	53
รูปที่ 3-11 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองที่ 3	56
รูปที่ 3-12 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองที่ 3.....	56
รูปที่ 3-13 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองที่ 4.....	58
รูปที่ 3-14 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองที่ 5	60
รูปที่ 3-15 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองที่ 5.....	60
รูปที่ 3-16 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองที่ 6	62
รูปที่ 3-17 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองที่ 6.....	62
รูปที่ 3-18 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองที่ 7.....	64

รูปที่ 4-1 แผนภาพแสดงภาพรวมงานวิจัย.....	67
รูปที่ 4-2 กราฟแสดงอัตราไหลและแรงดันน้ำของการเดินระบบเวนจูรีขนาดต่างๆและ Pump Curve	70
รูปที่ 4-3 กราฟ System Curve ของการเดินระบบด้วยอุปกรณ์เวนจูรีขนาด 2 นิ้ว.....	71
รูปที่ 4-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง System Curve และ Pump Curve ของการเดินระบบอุปกรณ์เวนจูรีขนาด 2 นิ้ว ด้วยเครื่องสูบน้ำ WCM 1105s และ VC150	72
รูปที่ 4-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง System Curve และ Pump Curve ของการเดินระบบอุปกรณ์เวนจูรีขนาด 2 นิ้ว ด้วยขนาดของเครื่องสูบน้ำที่แตกต่างกัน	73
รูปที่ 4-6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำ (Q_w) ขาเข้าอุปกรณ์เวนจูรี และอัตราส่วนการดูดอากาศต่ออัตราไหลน้ำผ่านเวนจูรี (Q_g/Q_w) ของเวนจูรีขนาด 1, 1.5 และ 2 นิ้ว.....	74
รูปที่ 4-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำ (Q_w) ขาเข้าอุปกรณ์เวนจูรี และแรงดันน้ำขาเข้าเวนจูรี ของเวนจูรีขนาด 1, 1.5 และ 2 นิ้ว	75
รูปที่ 4-8 ลักษณะอุปกรณ์เวนจูรีที่ใช้ตรวจวัดอัตราการไหลในเส้นท่อ	77
รูปที่ 4-9 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความดันการลดพื้นที่หน้าตัดท่อลงทีละน้อย	79
รูปที่ 4-10 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความดันการขยายพื้นที่หน้าตัดท่อขึ้นทีละน้อย.....	79
รูปที่ 4-11 การติดตั้งอุปกรณ์เติมอากาศเวนจูรีแบบติดตั้งใต้น้ำ และติดตั้งภายนอกถังเติมอากาศ... 80	
รูปที่ 4-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำ (Q_w) ขาเข้าอุปกรณ์เวนจูรีและแรงดันน้ำขาเข้าเวนจูรี (P_{inlet}) ของเวนจูรีขนาด 0.5 และ 1.0 นิ้ว ที่ระดับความลึกน้ำ 50 เซนติเมตร	80
รูปที่ 4-13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำ (Q_w) ขาเข้าอุปกรณ์เวนจูรีและแรงดันน้ำขาเข้าเวนจูรี (P_{inlet}) ของเวนจูรีขนาด 1.5 และ 2.0 นิ้ว ระดับความลึกน้ำ 50 เซนติเมตร	81
รูปที่ 4-14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำ (Q_w) ขาเข้าอุปกรณ์เวนจูรีและอัตราไหลอากาศเข้าเวนจูรี (Q_g) ของเวนจูรีขนาด 0.5, 1, 1.5 และ 2 นิ้ว.....	82

รูปที่ 4-15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วน้ำที่คอคอด (V_w) ขาเข้าอุปกรณ์เวนจูลี และอัตราส่วนการดูดอากาศต่ออัตราไหลน้ำที่ผ่านเวนจูลี (Q_g/Q_w) ของเวนจูลี 0.5, 1, 1.5 และ 2 นิ้ว.....	83
รูปที่ 4-16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำ (Q_w) ขาเข้าอุปกรณ์เวนจูลี และอัตราไหลอากาศเข้าเวนจูลี (Q_g) ของเวนจูลีขนาด 2” ที่ความลึก 50, 100 และ 150 ซม.	85
รูปที่ 4-17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับความลึกน้ำการเติมอากาศ (ซม.) และค่า K_{La20} , SOTR, SAE และ SOTE ของเวนจูลีขนาด 2 นิ้ว ที่อัตราไหลอากาศเข้า 200 และ 300 ลิตรนาที	86
รูปที่ 4-18 ภาพแสดงการกระจายตัวของกลุ่มฟองอากาศที่พุ่งออกจากเวนจูลี.....	89
รูปที่ 4-19 ระยะเคลื่อนที่ในแนวราบของฟองอากาศจากเวนจูลีขนาด 2” ที่อัตราไหลน้ำต่างๆ	90
รูปที่ 4-20 กลุ่มฟองอากาศพุ่งออกจากอุปกรณ์เวนจูลี.....	91
รูปที่ 4-21 กราฟ Histogram แสดงความถี่ขนาดฟองอากาศที่ออกจากเวนจูลีขนาด 2 นิ้ว	92
รูปที่ 4-22 กราฟ Histogram แสดงความถี่ขนาดฟองอากาศที่ออกจากหัวทราย	92
รูปที่ 4-23 กราฟ Histogram เปรียบเทียบขนาดฟองอากาศเวนจูลีขนาด 2 นิ้ว กับหัวทราย	93
รูปที่ 4-24 กราฟ Histogram แสดงความถี่ขนาดฟองอากาศจากหัวกระจายอากาศ ชนิดท่ออย่าง ...	93
รูปที่ 4-25 กราฟ Histogram เปรียบเทียบขนาดฟองอากาศที่ออกเวนจูลีขนาด 2 นิ้ว กับท่ออย่าง ...	94
รูปที่ 4-26 การเพิ่มขึ้นของระดับออกซิเจนละลายต่อเวลา ของอุปกรณ์เวนจูลีขนาด 2 นิ้ว ท่ออย่าง ยืดหยุ่น และหัวทราย ที่ค่าพลังงานไฟฟ้า 280 วัตต์ ความลึกน้ำ 50 เซนติเมตร.....	95
รูปที่ 4-27 อัตราการไหลอากาศ (Q_g) ของอุปกรณ์เวนจูลีขนาด 2 นิ้ว ท่ออย่างยืดหยุ่น และหัว ทราย ที่ค่าพลังงานไฟฟ้า 280 วัตต์ ระดับความลึกน้ำ 50 ถึง 150 เซนติเมตร	97
รูปที่ 4-28 ค่า K_{La} และ SOTR ของอุปกรณ์เวนจูลีขนาด 2 นิ้ว อุปกรณ์กระจายอากาศชนิดท่อ ายงยืดหยุ่นและหัวทราย ที่ค่าพลังงานไฟฟ้า 280 วัตต์ ระดับความลึกน้ำ 50 ถึง 150 เซนติเมตร	99
รูปที่ 4-29 ค่า SAE และ SOTE ของอุปกรณ์เวนจูลีขนาด 2 นิ้ว อุปกรณ์กระจายอากาศชนิดท่อ ายงยืดหยุ่นและหัวทราย ที่ค่าพลังงานไฟฟ้า 280 วัตต์ ระดับความลึกน้ำ 50 ถึง 150 เซนติเมตร	99

รูปที่ 4-30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าพลังงานที่ใช้เติมอากาศ อัตราการไหลอากาศ (Q_g) และค่า SOTE ของอุปกรณ์เวนจูรีขนาด 2 นิ้ว ระดับความลึกน้ำ 50 ถึง 150 เซนติเมตร ...	101
รูปที่ 4-31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าพลังงานที่ใช้เติมอากาศ อัตราการไหลอากาศ (Q_g) และค่า SAE ของอุปกรณ์เวนจูรีขนาด 2 นิ้ว ระดับความลึกน้ำ 50 ถึง 150 เซนติเมตร	103
รูปที่ 4-32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าพลังงานที่ใช้เติมอากาศ อัตราการไหลอากาศ (Q_g) และค่า SOTE ของอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดท่ออย่างยืดหยุ่น ระดับความลึกน้ำ 50 ถึง 150 ซม.	105
รูปที่ 4-33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าพลังงานที่ใช้เติมอากาศ อัตราการไหลอากาศ (Q_g) และค่า SAE ของอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดท่ออย่างยืดหยุ่น ระดับความลึกน้ำ 50 ถึง 150 ซม.	105
รูปที่ 4-34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าพลังงานที่ใช้เติมอากาศ อัตราการไหลอากาศ (Q_g) และค่า SOTE ของอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดหัวทราย ระดับความลึกน้ำ 50 ถึง 150 ซม.	106
รูปที่ 4-35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าพลังงานที่ใช้เติมอากาศ อัตราการไหลอากาศ (Q_g) และค่า SAE ของอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดหัวทราย ระดับความลึกน้ำ 50 ถึง 150 ซม. ..	106
รูปที่ 4-36 ตำแหน่งเครื่องวัดออกซิเจนละลายในถังเติมอากาศ	107
รูปที่ 4-37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_La และระยะห่างจากจุดเติมอากาศ.....	108
รูปที่ 4-38 ผลการทดสอบเวนจูรีขนาด 2 นิ้ว และอุปกรณ์กระจายอากาศแบบท่ออย่างติดตั้ง ร่วมกับ Airlift.....	109
รูปที่ 4-39 แสดงลักษณะการถ่ายเทออกซิเจนของระบบสร้างฟิล์มของเหลว	112
รูปที่ 4-40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า V_w และอัตราส่วน Q_g/Q_w ที่ความลึกน้ำ 50 เซนติเมตร.....	114
รูปที่ 4-41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า V_w และอัตราส่วน Q_g/Q_w ที่ความลึกจากผิวน้ำระดับต่างๆ ...	114
รูปที่ 4-42 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_1 และ C_2 กับระดับความลึกของจุดเติมอากาศ.....	115
รูปที่ 4-43 กราฟเปรียบเทียบค่า Q_g/Q_w ที่ได้จากการทดลอง และสมการทำนายประสิทธิภาพ	116
รูปที่ 4-44 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_La และอัตราไหลอากาศ (Q_g) ที่ความลึกน้ำระดับต่างๆ	118
รูปที่ 4-45 กราฟเปรียบเทียบค่า K_La ที่ได้จากการทดลอง และสมการทำนายประสิทธิภาพ	118

รูปที่ 4-46 ขั้นตอนการใช้สมการคำนวณค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนลงสู่น้ำได้จริง (AOTR).....	119
รูปที่ 4-47 กราฟแสดงการสูญเสียแรงดันในเส้นท่อ จากการเดินระบบด้วยเวนจูรีขนาด 2 นิ้ว	124
รูปที่ 5-1 การติดตั้งเวนจูรีภายในถังเติมอากาศโดยใช้เครื่องสูบน้ำชนิด Submersible Pump	127
รูปที่ 5-2 การติดตั้งเวนจูรีแบบมุมเฉียง 45 องศา.....	127
รูปที่ 5-3 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียน (Oxidation Ditch).....	128



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการเติมอากาศ (Aeration process) คือ กระบวนการถ่ายเทออกซิเจน (Oxygen transfer) จากสถานะก๊าซไปสู่สถานะของเหลว เพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจนที่ละลายในของเหลวให้สูงขึ้น โดยปัจจุบันระบบเติมอากาศแบบกระจายอากาศ (Diffused Aeration) ได้รับความนิยมในการใช้เพื่อเติมออกซิเจนให้กับน้ำมากกว่าวิธีอื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้ในระบบบำบัดน้ำเสีย หรือการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ แต่ทว่าก็มีข้อเสียคือสิ้นเปลืองพลังงานมาก อีกทั้งยังมีปัญหาการอุดตันของเมมเบรนหรือหัวกระจายลม ทั้งนี้ผู้วิจัยต้องการศึกษาอุปกรณ์เติมอากาศแบบเวนจูรี (Venturi Air Injector) ในด้านของประสิทธิภาพการเติมอากาศ เปรียบเทียบกับอุปกรณ์เติมอากาศแบบกระจายอากาศ เพื่อใช้เป็นทางเลือกในการเติมออกซิเจนให้กับน้ำ เนื่องจากอุปกรณ์เติมอากาศแบบเวนจูรีมีข้อดีคือ เป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งและบำรุงรักษาง่าย ใช้เงินลงทุนในการก่อสร้างต่ำ อาศัยเครื่องสูบน้ำเพื่อดันน้ำผ่านอุปกรณ์เวนจูรีซึ่งมีลักษณะเป็นคอขวด ทำให้เกิดการดูดอากาศจากภายนอกลงสู่ระบบ อีกทั้งอุปกรณ์อุดตันได้ยาก หากเลือกใช้เวนจูรีที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ ทำให้สามารถประยุกต์ใช้งานในสภาวะการทำงานจริงอย่างมีประสิทธิภาพ รวมทั้งกลุ่มฟองที่ออกจากอุปกรณ์เวนจูรีในแนวทแยงสามารถให้พื้นที่การเติมอากาศได้กว้างกว่าหัวกระจายอากาศทั่วไป

การติดตั้งอุปกรณ์เวนจูรีให้ได้ประสิทธิภาพการเติมอากาศที่สูงนั้น จำเป็นจะต้องคำนึงตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของเวนจูรี ($K_L a$) ไม่ว่าจะเป็นตัวแปรอุณหพลศาสตร์ของฟองอากาศ หรืออัตราการไหลอากาศเข้าที่เวนจูรีดูดเข้าสู่ระบบ (Q_g) ซึ่งแปรผันตามค่าความเร็วน้ำด้านขาเข้าเวนจูรี (V_w) และระดับความลึกการเติมอากาศ (Aeration Depth) ที่เปลี่ยนแปลงไป รวมทั้งโปรไฟล์การเพิ่มขึ้นของออกซิเจนละลาย (DO) ต่อระยะห่าง (Length) จากจุดติดตั้งเวนจูรี ก็มีความสำคัญในการพิจารณาออกแบบถังเติมอากาศด้วยเช่นกัน ดังนั้นการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ เพื่อหาหลักเกณฑ์การออกแบบติดตั้งที่สามารถถึงศักยภาพของอุปกรณ์เวนจูรีที่ดีที่สุดออกมาจึงเป็นสิ่งสำคัญ นอกจากนั้นแล้วการศึกษาพัฒนาประสิทธิภาพอุปกรณ์เวนจูรีก็มีความสำคัญ ด้วยการประยุกต์ใช้อุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว (Liquid Film Forming Apparatus) ซึ่งเป็นอุปกรณ์รูปทรงกรวย สามารถกักฟองอากาศให้อยู่ในถังเติมอากาศได้นานขึ้น และเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนได้ถึง 30% (Imai T. et al., 2011) โดยไม่ต้องใช้พลังงานเพิ่มเติม เป็นแนวทางที่น่าสนใจหากนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับอุปกรณ์เวนจูรี

งานวิจัยชิ้นนี้ผู้วิจัยจะมุ่งเน้นไปที่การทดลองเพื่อศึกษากลไกการทำงานของอุปกรณ์เติมอากาศแบบเวนจูรี ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ หลักเกณฑ์ในการออกแบบติดตั้ง การปรับปรุงและพัฒนาาระบบ รวมถึงระบุข้อดี-ข้อด้อยของอุปกรณ์เติมอากาศแบบเวนจูรี หากจะนำไปปรับใช้แทนอุปกรณ์เติมอากาศชนิดอื่นๆ ในระบบบำบัดน้ำเสีย ระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ หรือกระบวนการเติมอากาศอื่นๆในงานเชิงวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมในปัจจุบัน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาอุปกรณ์เติมอากาศแบบเวนจูรี ในด้านของประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน

1.2.2 เพื่อศึกษาตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เวนจูรี

1.2.3 เพื่อศึกษาการออกแบบและติดตั้งเวนจูรีที่เหมาะสม สามารถระบุเกณฑ์กำหนดในการออกแบบ และข้อควรพิจารณาอื่นๆในการติดตั้งอุปกรณ์เวนจูรีได้

1.2.4 เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้ระบบเติมอากาศแบบเวนจูรี ร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวในด้านของประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 การวิจัยประสิทธิภาพการเติมอากาศ (Aeration Performance Parameters) ของอุปกรณ์เติมอากาศแบบเวนจูรีในระดับห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนกับอุปกรณ์กระจายอากาศ ตัวแปรที่สนใจศึกษา ได้แก่

- 1) ค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทออกซิเจน ($K_L a$)
- 2) ค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน ($K_L a_{20}$)
- 3) อัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (Standard Oxygen Transfer Rate, SOTR)
- 4) ประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน (Standard Aeration Efficiency, SAE)
- 5) ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (Standard Oxygen Transfer Efficiency, SOTE)

1.3.2 การวิจัยใช้อุปกรณ์เวนจูรี 4 ขนาดคือ ขนาด 0.5 นิ้ว, 1 นิ้ว, 1.5 นิ้ว และ 2 นิ้ว

1.3.3 การวิจัยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนกับอุปกรณ์กระจายอากาศ 2 ชนิด คือ หัวกระจายอากาศแบบแข็ง (Rigid Diffuser) และแบบท่อยางยืดหยุ่น (Elastic Diffuser)

1.3.4 การวิจัยประสิทธิภาพของอุปกรณ์เติมอากาศเวนจูรี ทดลองประสิทธิภาพเฉพาะในน้ำสะอาด (น้ำประปา) ที่อุณหภูมิห้อง

1.3.5 การวิจัยประสิทธิภาพของอุปกรณ์เวนจูรี ทดลองในถังปฏิกริยาแบบกะ (Batch Reactor)

1.3.6 การวิจัยประสิทธิภาพของอุปกรณ์เวนจูรี ทดลองด้วยอัตราไหลของน้ำขาเข้าอุปกรณ์เวนจูรีไม่เกิน 260 ลิตร/นาที ที่ความดันไม่เกิน 2.0 บาร์ และความลึกจุดเติมอากาศไม่เกิน 2.0 เมตร

1.3.7 การวิจัยประสิทธิภาพของอุปกรณ์เวนจูรี ในด้านโปรไฟล์ค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทออกซิเจน ($K_L a$) ต่อระยะห่างจากจุดเติมอากาศ จะเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับอุปกรณ์หัวกระจายอากาศแบบท่อที่ยืดหยุ่น (Elastic Diffuser) ที่ติดตั้งอุปกรณ์ Airlift เพื่อเพิ่มการผลักดันฟองอากาศให้เคลื่อนที่ไปด้านหน้าอุปกรณ์ เท่านั้น

1.3.8 การวิจัยอุปกรณ์เวนจูรี ในด้านตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ จะศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (Bubble diameter, d_b) ที่ออกจากอุปกรณ์เวนจูรี และเกิดการรวมตัวกันของฟองอากาศในขนาดระดับมิลลิเมตรเท่านั้น

1.3.9 การวิจัยประยุกต์ใช้อุปกรณ์เวนจูรีร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว ขนาดความกว้าง 30 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร สูง 25 เซนติเมตร โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางของยอดกรวย 5 เซนติเมตร

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพ รวมทั้งข้อดีและข้อด้อยของอุปกรณ์เติมอากาศแบบเวนจูรีกับอุปกรณ์เติมอากาศชนิดอื่นๆ

1.4.2 สามารถอธิบายถึงตัวแปรและปัจจัย ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เวนจูรีได้

1.4.3 สามารถระบุเกณฑ์กำหนดการออกแบบ และข้อควรพิจารณาอื่นๆ เพื่อใช้ในการก่อสร้างระบบเติมอากาศแบบเวนจูรีได้

1.4.4 สามารถออกแบบและติดตั้งระบบการเติมอากาศแบบเวนจูรี ร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนให้ดีขึ้น และสามารถนำไปใช้งานได้จริง



บทที่ 2

เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการเติมอากาศ (Aeration Process)

กระบวนการเติมอากาศ คือ กระบวนการถ่ายเทออกซิเจนจากสถานะก๊าซไปสู่สถานะของเหลวเพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายในของเหลวหรือน้ำให้สูงขึ้น เพื่อใช้ในการหายใจของสัตว์น้ำหรือใช้ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลชีพในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งในการศึกษานี้จะมุ่งเน้นไปที่การเติมออกซิเจนจากอากาศลงสู่น้ำ ในรูปของออกซิเจนละลาย (Dissolved Oxygen, DO) โดยปริมาณออกซิเจนละลายสูงสุดที่สามารถละลายลงสู่น้ำได้นั้นจะเป็นไปตามกฎของเฮนรี (Henry's law)

2.1.1 กฎของเฮนรี (Henry's Law)

กฎของเฮนรี ช่วยทำให้สามารถคำนวณความสามารถในการละลายน้ำของก๊าซต่างๆ ซึ่งไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ กฎนี้กล่าวว่า สำหรับก๊าซที่ละลายน้ำได้น้อยหรือปานกลาง ความสามารถในการละลายน้ำ ขึ้นอยู่กับปริมาณของก๊าซ (Partial Pressure) ในบรรยากาศเหนือผิวน้ำ ค่าคำนวณได้ตั้งสมการที่ 3.1 (Metcalf และ Eddy, 2004)

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

โดยที่	p_g	=	เศษส่วนโมลของแก๊สในอากาศ	(โมลแก๊ส/โมลอากาศ)
	H	=	ค่าคงที่ของเฮนรี	$\frac{\text{บรรยากาศ} \left(\frac{\text{โมลแก๊ส}}{\text{โมลอากาศ}} \right)}{\left(\frac{\text{โมลแก๊ส}}{\text{โมลน้ำ}} \right)}$
	P_T	=	ค่าความดันรวม	(มีค่าประมาณ 1 บรรยากาศ)
	x_g	=	เศษส่วนโมลของแก๊สในน้ำ	(โมลแก๊ส/โมลน้ำ)
		=	$\frac{\text{โมลแก๊ส } (n_g)}{\text{โมลแก๊ส } (n_g) + \text{โมลน้ำ } (n_w)}$	

จากสมการที่ 2.1 หากพิจารณาที่อุณหภูมิคงที่หรือไอโซเทอม จะสามารถใช้อัตราส่วนของแก๊สในอากาศโดยปริมาตร แทนค่าเท่ากับอัตราส่วนโมลแก๊สต่อโมลอากาศได้ ดังสมการที่ 2.2

$$\frac{V_g}{V_T} = \frac{P_g}{P_T} = \frac{n_g}{n_T} \quad (2.2)$$

โดยที่ V_g = ปริมาตรย่อยของแก๊สนั้นๆ ในอากาศ

V_T = ปริมาตรรวมของอากาศ

P_g = ความดันย่อยของแก๊สนั้นๆ ในอากาศ

P_T = ความดันรวมของอากาศ

n_g = โมลของแก๊สนั้นๆ ในอากาศ

n_T = โมลของอากาศ

ดังนั้นที่ความดัน 1 บรรยากาศ มีปริมาณออกซิเจนอยู่ 21% โดยปริมาตร จึงสามารถแทนค่าเศษส่วนโมลของออกซิเจนในอากาศ $\frac{n_g}{n_T}$ หรือ $p_g = 0.21$ (โมลแก๊ส/โมลอากาศ) ได้ในสมการที่ 2.1 และเมื่อความดันบรรยากาศเปลี่ยนแปลงไป จะส่งผลให้ค่าเศษส่วนโมลของออกซิเจนในอากาศเปลี่ยนแปลงตาม ทำให้ค่าออกซิเจนละลายที่สภาวะสมดุลเปลี่ยนแปลงไป ดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 ค่าออกซิเจนละลายที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิ และความดันบรรยากาศต่างๆ

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

ที่มา : Metcalf และ Eddy, 2004

จากตารางที่ 2-1 พบว่าค่าออกซิเจนละลายที่สภาวะสมดุลเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าคงที่ของเฮนรี จากสมการที่ 2.1 นั้นเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ค่าคงที่ของเฮนรีของแก๊สต่างๆ เป็นดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 ค่าคงที่ของเฮนรีของแก๊สต่างๆ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

แก๊ส	ค่าคงที่ของเฮนรี (บรรยากาศ)
คาร์บอนไดออกไซด์	1,420
ออกซิเจน	41,100
ไนโตรเจน	80,400
มีเทน	37,600

ที่มา : Metcalf และ Eddy, 2004

นอกจากนั้นแล้วค่าความเค็มของน้ำ (Salinity) ซึ่งบ่งบอกถึงอิออนของเกลือที่ละลายอยู่ในน้ำไม่ว่าจะเป็น โซเดียม คลอไรด์ แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก สังกะสี ทองแดง และธาตุอื่น ๆ เมื่อธาตุเหล่านี้ละลายอยู่ในน้ำมากขึ้น ส่งผลให้แก๊สต่างๆในอากาศรวมถึงแก๊สออกซิเจน ละลายน้ำได้น้อยลง ดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 ค่าออกซิเจนละลายที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิ และค่าความเค็มต่างๆ

อุณหภูมิ	ค่าออกซิเจนละลายที่สภาวะสมดุล (มก./ลิตร)					
	ค่าความเค็ม (ส่วนในพันส่วน)					
°C	0	5	10	15	20	25
0	14.6	14.11	13.64	13.18	12.74	12.31
5	12.76	12.34	11.94	11.56	11.18	10.82
10	11.28	10.92	10.58	10.25	9.93	9.62
15	10.07	9.77	9.47	9.19	8.91	8.64
25	8.24	8.01	7.79	7.57	7.36	7.15
30	7.54	7.33	7.14	6.94	6.75	6.57
35	6.93	6.75	6.58	6.4	6.24	6.07
40	6.41	6.25	6.09	5.94	5.79	5.64

ที่มา : Metcalf และ Eddy, 2004

2.1.2 ทฤษฎีฟิล์มสองชั้น (Two Film Theory)

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันมีการเสนอทฤษฎีเพื่ออธิบายกลไกของการถ่ายเทมวลสารระหว่างแก๊สกับของเหลว ซึ่งทฤษฎีที่เรียบง่ายและใช้กันทั่วไปก็คือทฤษฎีฟิล์มสองชั้น (two film theory) ที่เสนอโดยลิวอิสและวิทแมน (Lewis และ Whitman, 1924) ถึงแม้ว่าจะมีการเสนอแบบจำลองชนิดอื่นที่ซับซ้อนและสามารถอธิบายในเชิงสมการได้ดีกว่า แต่ทฤษฎีฟิล์มสองชั้นก็ยังได้รับความนิยมเนื่องจากปรากฏการณ์ส่วนใหญ่สามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีนี้และง่ายต่อการอธิบายนั่นเอง

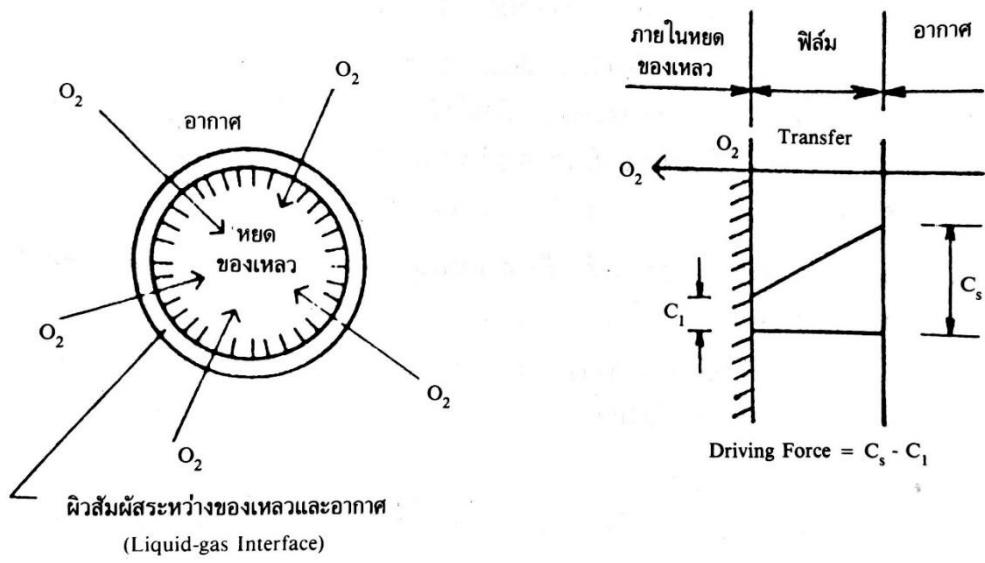
ทฤษฎีฟิล์มสองชั้นนี้เป็นทฤษฎีที่กล่าวถึงแบบจำลองที่มีชั้นฟิล์มสองชั้นบริเวณชั้นรอยต่อระหว่างของเหลวกับแก๊ส ซึ่งโดยทั่วไปจะอธิบายถึงสองกรณีคือ การดูดซับ (absorption) และการคาย (desorption) แต่สำหรับกระบวนการเติมอากาศนั้นจะใช้ทฤษฎีนี้ในการอธิบายถึงกลไกการดูดซับออกซิเจนของของเหลว

การถ่ายเทออกซิเจนจากสถานะก๊าซไปสู่สถานะของเหลวหรือการเติมอากาศ เป็นไปตามขั้นตอนดังนี้ (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

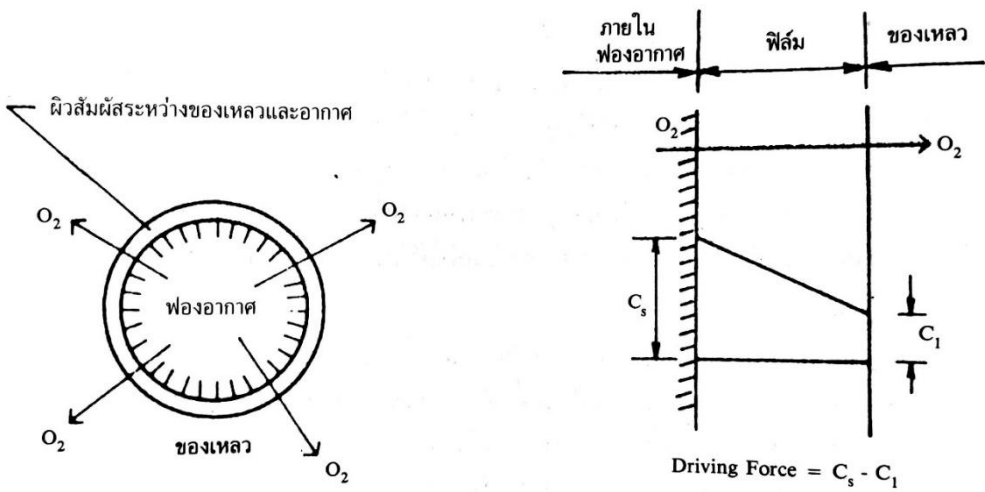
1. การทำให้เกิดการสัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำ ในทางปฏิบัติสามารถทำได้โดยการใช้เครื่องจักรสร้างความปั่นป่วนบริเวณผิวน้ำทำให้เกิดละอองน้ำกระจายในอากาศ หรือเป่าฟองอากาศลงไปใต้น้ำ ดังรูปที่ 2-1

2. โมเลกุลของก๊าซในอากาศ เคลื่อนย้ายผ่านฟิล์มบางๆบนผิวน้ำเข้าไปใต้น้ำ แรงขับเคลื่อนที่ทำให้มีการเคลื่อนย้ายของโมเลกุลก๊าซ คือความแตกต่างระหว่างก๊าซที่มีความเข้มข้นสูงในอากาศ และก๊าซที่มีความเข้มข้นต่ำ (หรือไม่มีเลย) ในน้ำ ฟิล์มบางๆบนผิวน้ำเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนย้ายของก๊าซจากอากาศไปสู่ใต้น้ำ อย่างไรก็ตาม น้ำที่อยู่ใต้ฟิล์มจะมีความเข้มข้นของก๊าซถึงจุดอิ่มตัวอย่างรวดเร็ว

3. ออกซิเจนที่ละลายในน้ำบริเวณพื้นที่สัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำจะมีความเข้มข้นมากกว่าบริเวณอื่นๆในน้ำ จึงเกิดการแพร่จากบริเวณพื้นที่สัมผัสไปสู่บริเวณอื่นๆของน้ำ จนกระทั่งมีความเข้มข้นของออกซิเจนละลายสม่ำเสมอทุกบริเวณในน้ำและมีความเข้มข้นถึงจุดอิ่มตัว



กรณีที่ 1 หยดของเหลวที่กระเด็นขึ้นบนอากาศ



C_s = ปริมาณออกซิเจนอิ่มตัวในของเหลว
 C_1 = ปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ในของเหลว

กรณีที่ 2 ฟองอากาศอยู่ในของเหลว

รูปที่ 2-1 การถ่ายเทออกซิเจนระหว่างของเหลวและอากาศ

ที่มา : มั่นสิน ตันกุลเวศม์, 2542

2.1.3 การถ่ายเทออกซิเจน (Oxygen Transfer)

การถ่ายเทออกซิเจน คือ กระบวนการถ่ายเทออกซิเจนจากสถานะก๊าซไปสู่สถานะของเหลว ซึ่งกล่าวถึงอัตราเร็วของการเพิ่มความเข้มข้นของออกซิเจนในสถานะของเหลวเข้าใกล้สภาวะสมดุล อนุกรม และความดันบรรยากาศขณะนั้น โดยสามารถประเมินอัตราการถ่ายเทออกซิเจนได้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (Volumetric mass transfer coefficient, $K_L a$) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.3 (มันลีน ตันซูลเวศม์, 2542)

$$\frac{dC}{dt} = K_L a * (C_s - C_t) \quad (2.3)$$

โดยที่	$\frac{dC}{dt}$	=	อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของออกซิเจน (มิลลิกรัม/ลิตร-วินาที)
	K_L	=	ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว (มิลลิกรัม/วินาที)
	a	=	ค่าพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างก๊าซและของเหลว (ตร.ม./ลบ.ม.)
	C_s	=	ค่าความเข้มข้นของออกซิเจน ณ สภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)
	C_t	=	ค่าความเข้มข้นของออกซิเจนที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัม/ลิตร)

2.1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการเติมอากาศ (นราพงศ์ หงส์ประสิทธิ์, 2554)

1. ความเข้มข้นของออกซิเจนในก๊าซ และในของเหลว ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของออกซิเจนในอากาศกับน้ำส่งผลให้เกิดแรงขับเคลื่อนทำให้ออกซิเจนละลายในน้ำได้ ในทางปฏิบัติสามารถเลือกใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ในกระบวนการเติมอากาศ เพื่อเพิ่มความแตกต่างของความเข้มข้นและขับเคลื่อนทำให้ออกซิเจนละลายในน้ำได้ดีขึ้น

2. ความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิ ความดันบรรยากาศโดยทั่วไปสามารถทำให้เกิดแรงขับเคลื่อนต่อออกซิเจนและปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ ตามกฎของเฮนรีการเพิ่มความดันทำให้ออกซิเจนละลายน้ำมากขึ้นได้ ส่วนอุณหภูมิมิผลต่อความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนละลายในน้ำ และอัตราการถ่ายเทออกซิเจน อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนละลายในน้ำต่ำลง แต่มีอัตราการถ่ายเทออกซิเจนสูงขึ้น ในทางปฏิบัติจึงควรควบคุมอุณหภูมิของน้ำให้เหมาะสม และสามารถเพิ่มความดันเพื่อให้ออกซิเจนละลายน้ำมากขึ้นได้

3. ขนาดฟองอากาศ กรณีการเติมอากาศโดยปล่อยอากาศใต้น้ำ ขนาดฟองอากาศมีผลต่อพื้นที่สัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำ ฟองอากาศขนาดเล็กมีพื้นที่สัมผัสมากทำให้เกิดการถ่ายเทออกซิเจนที่ดี ในทางปฏิบัติจึงควรเลือกอุปกรณ์เติมอากาศที่ทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็ก และควบคุมปริมาณ

การเติมอากาศให้เหมาะสม เพื่อป้องกันการรวมตัวของฟองอากาศขณะลอยขึ้นสู่ผิวน้ำซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการเติมอากาศลดลง

4. ความถี่ของการเกิดฟองอากาศ ส่งผลต่อจำนวนฟองอากาศและพื้นที่สัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำ ความถี่ของการเกิดฟองอากาศมากทำให้มีพื้นที่สัมผัสมากและเกิดการถ่ายเทออกซิเจนที่ดี ในกระบวนการเติมอากาศจึงควรควบคุมความถี่การเกิดฟองอากาศให้เหมาะสม ความถี่ที่มากเกินไปอาจทำให้เกิดความปั่นป่วนในน้ำมาก จนทำให้เกิดการรวมตัวของฟองอากาศ และควรเลือกใช้อุปกรณ์เติมอากาศที่ทำให้เกิดฟองอากาศกระจายอย่างสม่ำเสมอ

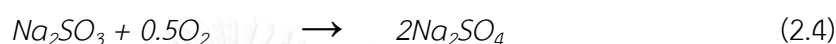
5. ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ และระยะเวลาสัมผัสระหว่างก๊าซกับของเหลว กรณีการเติมอากาศโดยปล่อยอากาศใต้น้ำ ฟองอากาศที่ถูกปล่อยใต้น้ำจะลอยขึ้นสู่ผิวน้ำด้วยความเร็วลอยตัวค่าหนึ่งซึ่งสัมพันธ์กับขนาดฟองอากาศ ฟองอากาศขนาดเล็กจะมีความเร็วลอยตัวน้อยกว่าฟองอากาศขนาดใหญ่ตามกฎของสโตกส์ (Stoke's law) ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศที่น้อยทำให้เกิดระยะเวลาสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับน้ำที่นาน ในกระบวนการเติมอากาศจึงควรเลือกอุปกรณ์เติมอากาศที่ทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็ก และออกแบบถังเติมอากาศให้มีความลึกที่เหมาะสมเพื่อให้ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ และระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมแก่การเติมอากาศ การสร้างความปั่นป่วนให้กับน้ำในระดับที่เหมาะสมโดยการกวนน้ำเป็นวิธีหนึ่งที่ช่วยยืดระยะเวลาสัมผัสได้

6. ความปั่นป่วนของน้ำ ตามทฤษฎี “Two film theory” ออกซิเจนในอากาศจะเคลื่อนผ่านชั้นกลางของอากาศ และชั้นกลางของน้ำ ซึ่งชั้นกลางของน้ำเป็นอุปสรรคหลักที่ออกซิเจนต้องใช้เวลานานในการเคลื่อนผ่าน การสร้างความปั่นป่วนให้กับน้ำในระดับที่เหมาะสมทำให้เกิดแรงเฉือนที่ชั้นกลางของน้ำ ส่งผลให้ชั้นกลางของน้ำบางลงออกซิเจนจึงสามารถเคลื่อนผ่านได้ง่ายขึ้น ดังนั้นการกวนน้ำขณะเติมอากาศเพื่อให้เกิดการปั่นป่วนในระดับที่เหมาะสมจะช่วยให้มีอัตราการถ่ายเทออกซิเจนสูงขึ้น

2.2 การทดสอบสมรรถภาพอุปกรณ์เติมอากาศ

เนื่องจากเครื่องเติมอากาศนั้นมีการใช้งานกันหลากหลาย สภาวะการใช้งานก็แตกต่างกัน ทำให้ผลการใช้งานไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันโดยตรงได้ จึงทำให้เกิดการทดสอบสมรรถภาพอุปกรณ์อากาศด้วยการทดสอบเครื่องเติมอากาศที่สภาวะมาตรฐานขึ้น

องค์กรวิศวกรรมโยธาแห่งสหรัฐอเมริกาได้กำหนดมาตรฐานการวิเคราะห์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำสะอาด (American Society of Civil Engineers, 1992) ซึ่งวิธีวิเคราะห์จะครอบคลุมถึงการหาอัตราการถ่ายเทออกซิเจนในหน่วยของมวลออกซิเจนที่ละลายน้ำต่อหน่วยเวลาในปริมาตรน้ำที่นำมาทดสอบ

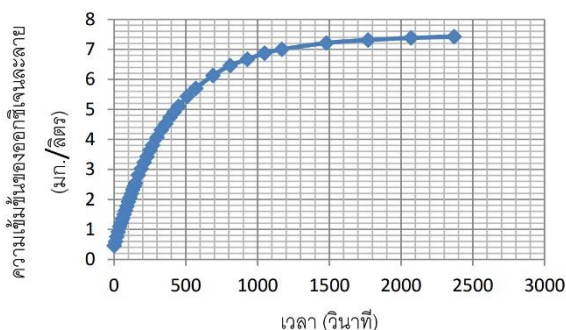


ในการทดสอบจะใช้โซเดียมซัลไฟต์เป็นตัวทำปฏิกิริยากับออกซิเจนละลายเพื่อให้ออกซิเจนในน้ำเป็นศูนย์ โดยใช้โคบอลต์คลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

$$\text{ปริมาณโซเดียมซัลไฟต์ที่ต้องใช้} = \frac{8 \text{ mg } Na_2SO_3}{1 \text{ mg } O_2} * 1.15 \quad (2.5)$$

$$\text{ปริมาณโคบอลต์คลอไรด์ที่ต้องใช้} = \frac{0.5 \text{ mg } CoCl_2}{1 \text{ Liter of Water}} \quad (2.6)$$

หลังจากนั้นเริ่มเดินเครื่องเติมอากาศและตรวจสอบจนกว่าออกซิเจนในน้ำจะมากกว่าศูนย์จึงเริ่มจับเวลา บันทึกค่าออกซิเจนละลายตามความเหมาะสมและหยุดการทดสอบเมื่อออกซิเจนในน้ำมีค่าเกือบอิ่มตัว ดังรูปที่ 2-2 รวมทั้งบันทึกข้อมูล ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total dissolved solid, TDS) ซึ่งต้องควบคุมให้ไม่เกิน 2,000 มก./ลิตร (He และคณะ, 2003) หากเกินค่าที่กำหนดจะต้องเปลี่ยนน้ำสะอาดที่ใช้ในการทดลองใหม่



รูปที่ 2-2 ตัวอย่างการบันทึกค่าออกซิเจนละลาย

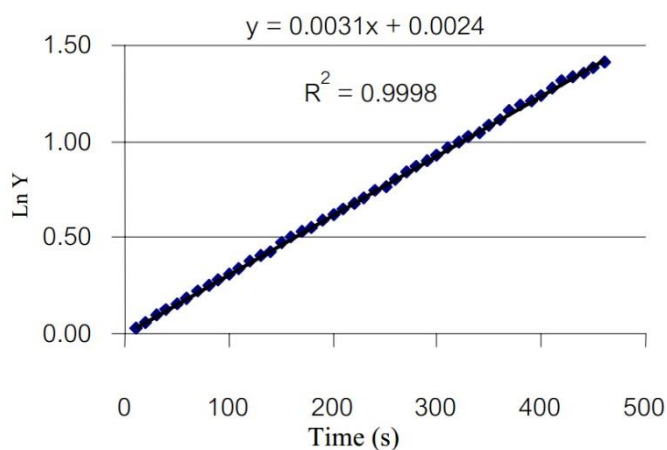
ที่มา : ตาวัน เจริญพิทยา, 2556

นำค่าออกซิเจนละลายที่บันทึกได้มาวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ($K_L a$) จากสมการที่ 2.3 โดยนำไปหาปริพันธ์ระหว่างช่วงความเข้มข้นที่เวลาเริ่มต้น จนถึงระยะเวลา t จะได้ดังสมการที่ 2.7 และ 2.8

$$\int_{C_0}^{C_t} \frac{1}{(C_s - C)} dc = K_L a * \int_0^t dt \quad (2.7)$$

$$\ln \frac{(C_s - C_0)}{(C_s - C_t)} = K_L a * t \quad (2.8)$$

จากนั้นใช้ข้อมูลค่าออกซิเจนละลายเริ่มต้นที่ $0.1C_s$ จุดสิ้นสุดไม่เกิน $0.8C_s$ (He และคณะ, 2003) และมีข้อมูลอย่างน้อยไม่ต่ำกว่า 30 ค่าบันทึกข้อมูลออกซิเจนละลาย นำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \frac{(C_s - C_0)}{(C_s - C_t)}$ กับ เวลา (t) จะได้กราฟเส้นตรงที่มีค่า Slope เป็นบวก ซึ่งเท่ากับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ($K_L a$) ดังรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln Y$ หรือ $\ln \frac{(C_s - C_0)}{(C_s - C_t)}$ กับเวลา (t) โดยมี Slope เท่ากับค่า $K_L a$
ที่มา : He และคณะ, 2003

2.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพอุปกรณ์เติมอากาศ

ในการทดสอบเครื่องเติมอากาศนั้นสามารถแสดงผลได้หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับผู้ทดสอบว่าต้องการเปรียบเทียบหรือรายงานในรูปแบบใด (Mueller และคณะ, 2002)

2.3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (Oxygen Transfer Coefficient)

ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ($K_L a_t$) ที่ได้จากการการทดสอบสมรรถภาพอุปกรณ์เติมอากาศที่ ณ อุณหภูมิใดๆนั้นจะต้องปรับแก้ เพื่อแสดงเป็นค่าที่สภาวะมาตรฐาน (Standard Condition) ที่ 20 องศาเซลเซียส ดังสมการที่ 2.9 จึงจะสามารถนำค่าไปใช้เปรียบเทียบกับอุปกรณ์เติมอากาศชนิดอื่นๆได้

$$K_L a_{20} = \frac{K_L a_t}{Y^{t-20}} \quad (2.9)$$

โดยที่ $K_L a_t$ = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่อุณหภูมิที่ทดลอง (1/ชม.)

$K_L a_{20}$ = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่อุณหภูมิ 20 °C (1/ชม.)

t = อุณหภูมิที่ทดลอง (องศาเซลเซียส)

Y = ตัวคูณปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน

สำหรับค่าของตัวคูณปรับแก้จะขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องเติมอากาศ ซึ่งองค์การวิศวกรรมโยธาแห่งสหรัฐอเมริกา มักจะใช้ค่านี้เป็น 1.024

2.3.2 อัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (Standard Oxygen Transfer Rate, SOTR)

อัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน คือมวลของออกซิเจนที่ถ่ายเทต่อหนึ่งหน่วยเวลา ในปริมาตรน้ำที่กำหนดและแสดงในรูปของสภาวะมาตรฐาน ซึ่งอัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐานนั้นเป็นมาตรฐานของอเมริกา จากสมการที่ 2.9 เมื่อคูณด้วยปริมาตรของถังเติมอากาศและความเข้มข้นของออกซิเจนอิ่มตัวที่ 20 องศาเซลเซียส จะได้

$$SOTR = K_L a_{20} C_{s20} V \quad (2.10)$$

โดยที่ SOTR = อัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (กก.ออกซิเจน/ชม.)

$K_L a_{20}$ = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่ 20 องศาเซลเซียส (1/ชม.)

C_{s20} = ความเข้มข้นของออกซิเจนอิ่มตัวที่ 20 องศาเซลเซียส (มก./ลิตร)

V = ปริมาตรของถังเติมอากาศ (ลบ.ม.)

2.3.3 ประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน (Standard Aeration Efficiency, SAE)

ประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน คืออัตราส่วนความสามารถในการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศต่อกำลังงานที่ใช้ในการเติมอากาศ ดังสมการที่ 2.11

$$SAE = \frac{SOTR}{P_w} \quad (2.11)$$

โดยที่ SAE = ประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน (กก.ออกซิเจน/กิโลวัตต์-ชม.)

P_w = กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเติมอากาศ (กิโลวัตต์)

สำหรับระบบเติมอากาศแบบกระจายอากาศ (Diffused Aeration) จะต้องใช้ปั๊มลมเป็นแหล่งจ่ายอากาศไปยังหัวกระจายอากาศ ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเติมอากาศสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.12

$$P_w = \frac{w \cdot R \cdot T_1}{29.7 \cdot n \cdot e} \left\{ \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{0.283} - 1 \right\} \quad (2.12)$$

โดยที่ P_w = กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเติมอากาศ (กิโลวัตต์)

w = น้ำหนักอากาศที่เติมให้กับระบบ (กก./วินาที)

R = ค่าคงที่ทางวิศวกรรมของอากาศเท่ากับ 8.314 กิโลจูล/กิโลโมล-เคลวิน

T_1 = อุณหภูมิของอากาศขาเข้า (เคลวิน)

n = ค่าคงที่ของอากาศเท่ากับ 0.283

e = ประสิทธิภาพของปั๊มลม ประมาณร้อยละ 70 ถึง 90

P_1 = ความดันของอากาศขาเข้า (บาร์)

P_2 = ความดันของอากาศขาออก (บาร์)

สำหรับอุปกรณ์เติมอากาศแบบเวนจูรี (Venturi Air Injector) จะต้องใช้ปั๊มน้ำเป็นแหล่งจ่ายน้ำเข้าอุปกรณ์เวนจูรี เพื่อดูดอากาศจากภายนอกเข้าสู่ระบบ ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเติมอากาศสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.13 (วิธีที่ อังภากรณ์, 2541)

$$P_w = \frac{Q \cdot H}{102 \cdot \eta} \quad (2.13)$$

โดยที่ P_w = กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์เครื่องสูบน้ำ (กิโลวัตต์)

Q = อัตราไหลของน้ำผ่านเวนจูรี (ลิตร/วินาที)

H = แรงแดันน้ำขาเข้าเวนจูลี (เมตร)

η = ประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ ประมาณร้อยละ 70

2.3.4 ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (Standard Oxygen Transfer Efficiency, SOTE)

ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน คืออัตราส่วนร้อยละของปริมาณออกซิเจนที่ถ่ายเทลงสู่น้ำต่อปริมาณออกซิเจนที่เติมให้กับระบบที่สภาวะมาตรฐาน โดยมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.14

$$SOTE = \frac{Oxygen_{Transfer\ 20^{\circ}c}}{Oxygen_{Added\ 20^{\circ}c}} = \frac{SOTR}{\rho_{g20^{\circ}c} * Q_{G20^{\circ}c}} \quad (2.14)$$

โดยที่ $SOTE$ = ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (ร้อยละ, %)

$SOTR$ = อัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (กก.ออกซิเจน/ชม.)

$Oxygen_{Transfer\ 20^{\circ}c}$ = ปริมาณออกซิเจนที่ถ่ายเทลงสู่น้ำ (กก.ออกซิเจน/ชม.)

$Oxygen_{Added\ 20^{\circ}c}$ = ปริมาณออกซิเจนที่เติมเข้าสู่ระบบ (กก.ออกซิเจน/ชม.)

$\rho_{g\ 20^{\circ}c}$ = ความหนาแน่นของอากาศที่สภาวะมาตรฐาน (กก./ลิตร)

$Q_{G\ 20^{\circ}c}$ = อัตราการไหลของอากาศที่สภาวะมาตรฐาน (ลิตร/ชม.)

อัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ระบบที่วัดได้นั้น สามารถแปลงเป็นค่าอัตราการไหลของอากาศสภาวะมาตรฐาน ($20^{\circ}c$) ได้ดังสมการที่ 2.15

$$Q_{G20^{\circ}c} = \frac{Q_{Gt} * (273 + 20)}{(273 + t)} \quad (2.15)$$

โดยที่ $Q_{G\ 20^{\circ}c}$ = อัตราการไหลของอากาศที่สภาวะมาตรฐาน (ลิตร/ชม.)

$Q_{G\ t}$ = อัตราการไหลของอากาศที่อุณหภูมิใดๆ (ลิตร/ชม.)

t = อุณหภูมิอากาศที่ทดลอง (เคลวิน)

2.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบการเติมอากาศ

ในระบบการเติมอากาศส่วนใหญ่ประกอบด้วย เครื่องเป่าอากาศ อุปกรณ์เติมอากาศหรือ อุปกรณ์กระจายอากาศ และท่ออากาศ เป็นต้น อุปกรณ์เติมอากาศที่นิยมใช้ทั่วไปมีหลายประเภทโดยขึ้นกับลักษณะการใช้งาน รูปทรงของถังเติมอากาศ ราคาติดตั้งและค่าเดินระบบ เป็นต้น

2.4.1 อุปกรณ์กระจายอากาศ (Diffused Aeration)

ระบบการเติมอากาศที่ใช้อุปกรณ์กระจายอากาศอาศัยความดันจากเครื่องเป่าอากาศอัดอากาศลงใต้น้ำ เมื่ออากาศผ่านอุปกรณ์กระจายอากาศทำให้เกิดเป็นฟองอากาศและเกิดการถ่ายเทออกซิเจน สามารถแบ่งได้ตามขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้น

1. ฟองอากาศขนาดเล็ก (Fine Bubble)

อุปกรณ์กระจายอากาศประเภทนี้จะมีรูพรุนขนาดเล็กมาก อาจมีลักษณะเป็นแผ่น ท่อ หรือ โดม (Dome) ซึ่งมักผลิตจากซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide, SiO_2) หรืออะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum oxide, Al_2O_3) โดยมีวัสดุยึดประสานประเภทเซรามิก (Ceramic) เป็นตัวช่วยยึดประสานให้มีรูปร่างตามที่ต้องการ อุปกรณ์กระจายอากาศประเภทนี้มีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนประมาณร้อยละ 10 ถึง 30 มีอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ณ สภาวะมาตรฐานประมาณ 1.2 ถึง 2.0 กก./ชม.-กิโลวัตต์ และขนาดฟองอากาศประมาณ 2.0 ถึง 2.5 มม. โดยทั่วไปถูกออกแบบให้สามารถจ่ายอากาศได้ในอัตรา 0.1 ถึง 0.4 ลบ.ม./นาที-หัว ข้อดีของอุปกรณ์กระจายอากาศประเภทนี้คือ มีความสามารถในการกวนผสมน้ำได้อย่างทั่วถึง สามารถปรับอัตราการไหลของอากาศที่เติมให้กับระบบได้ในช่วงกว้าง และมีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูง แต่มีข้อเสีย คือ มีราคาแพงทั้งค่าวัสดุและค่าบำรุงรักษา และเกิดการอุดตันได้ง่ายเนื่องจากมีรูพรุนขนาดเล็ก จึงควรติดตั้งเครื่องกรองอากาศก่อนเป่าอากาศเข้าอุปกรณ์กระจายอากาศ



รูปที่ 2-4 อุปกรณ์กระจายอากาศชนิดฟองอากาศขนาดเล็ก

ที่มา : Courtesy of Environmental Dynamics Inc., 2010

2. ฟองอากาศขนาดกลาง (Medium Bubble)

อุปกรณ์กระจายอากาศประเภทนี้มีรูพรุนขนาดกลาง โดยทั่วไปมีลักษณะเป็นท่อซึ่งผลิตมาจากเหล็กไร้สนิม (Stainless steel) เจาะเป็นรูและหุ้มด้วยถุงผ้ามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 7.5 ซม. และมีความยาวประมาณ 61 ซม. อุปกรณ์กระจายอากาศประเภทนี้มีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนประมาณร้อยละ 6 ถึง 15 มีอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ณ สภาวะมาตรฐานประมาณ 1.0 ถึง 1.6 กก./ชม.-กิโลวัตต์ และมีขนาดฟองอากาศใหญ่กว่า 2.5 มม. เล็กน้อย ข้อดีของอุปกรณ์กระจายอากาศประเภทนี้ คือ มีความสามารถในการกวนผสมน้ำได้อย่างทั่วถึง ค่าบำรุงรักษาถูก เนื่องจากการเปลี่ยนถุงหุ้มเท่านั้น แต่มีข้อเสีย คือ ราคาค่าวัสดุแพง และควรมีการติดตั้งเครื่องกรองอากาศก่อนเป่าอากาศเข้าอุปกรณ์กระจายอากาศเพื่อป้องกันการอุดตันภายในอุปกรณ์

3. ฟองอากาศขนาดใหญ่ (Coarse Bubble)

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



รูปที่ 2-5 อุปกรณ์กระจายอากาศชนิดฟองอากาศขนาดใหญ่

ที่มา : Cole-Parmer Instrument Company, 2016

ตารางที่ 2-4 ประสิทธิภาพของอุปกรณ์กระจายอากาศ (Diffused aeration) ชนิดต่างๆ

No.	Type of aeration	Liquid in test	Submergence depth, m.	Aeration efficiency, kgO ₂ /kWh	Specific power, W/m ³	
1	Sparger	Water	-	1.5 – 1.8	-	
2	Sparger	Water	1.04	1.18	4.2	
3	Sparger	Water + 5 mg/l anionic detergent	4.0	1.0	-	
4	Perforated pipe (1.5 mm holes at 25 mm spacing)		3.66	0.84	2.9	
5			3.66	0.94	9.0	
6	Plate diffuser		3.66	2.33	3.0	
7			3.66	2.40	8.9	
8			3.66	4.23	3.0	
9			3.66	3.38	9.2	
10			3.66	1.91	2.9	
11			3.66	2.23	8.8	
12			7" dome diffusers	3.66	2.23	3.0
13	3.66			2.06	9.8	
14	4" dome diffusers		3.66	1.92	3.2	
15			3.66	1.42	11.5	
16	Danjes		-	-	3.0 – 5.0	-
17	Inka		Water + 5 mg/l anionic detergent	-	1.8 -1.9	-
18	Perforated pipe in a draft tube (4.7 mm holes at 100mm spacing)	Water + 5 mg/l anionic detergent	0.5	2.91	93.0	
19		Water	0.5	3.99	93.0	
20	Porous diffusers	Water + 5 mg/l anionic detergent	4.0	1.8 – 2.2	-	
21			1.0	1.8 – 2.8	17.9 – 40.1	
22			2.2	1.5 – 2.8	17.9 – 90.0	
23			4.7	1.6 - 2.9	17.8 – 89.1	
24			5.9	1.6 – 2.7	18.2 – 90.7	
25		8.0	1.7 – 2.9	18.3 – 70.0		
26		Water	2.2	5.1	17.0	
27			5.9	4.0 – 4.6	27.8 – 56.5	
28			7.1	5.0 - 5.9	34.5 – 66.0	
29			8.0	5.3	37.7	
30			3.5	1.5 – 4.0	17.9 – 39.0	
31		Activated sludge mixed liquor (solids: 2.5 - 3.0 g/l)	5.9	1.5 – 4.7	18.2 – 35.9	
32			8.0	1.9 – 4.8	17.6 – 33.2	
33		Diffusers	Water + 5 mg/l anionic detergent	0.91	3.96	4.3
34				0.91	3.61	4.6
35	0.91			2.82	5.3	
36	0.91			4.02	13.0	
37	0.91			3.21	15.5	
38	0.91			1.51	26.9	

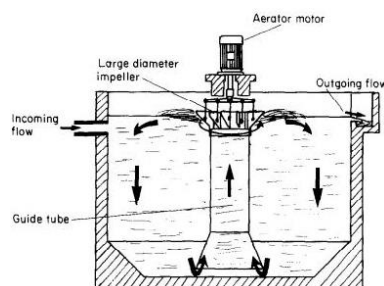
ที่มา : Cumby, 1987

2.4.2 อุปกรณ์เติมอากาศทางกล (Mechanical Aeration)

2.4.2.1 อุปกรณ์เติมอากาศทางกล บนผิวน้ำ (Surface Mechanical Aerator)

1. อุปกรณ์เติมอากาศทางกลบนผิวน้ำในแนวตั้ง (Vertical Shaft Surface Aerators)

อุปกรณ์เติมอากาศทางกลที่ลอยอยู่บนผิวน้ำมีใบพัดหรือกังหันติดตั้งกับแกนหมุนในแนวตั้ง อุปกรณ์อาจถูกยึดกับโครงสร้างถาวรหรือสามารถลอยน้ำได้ด้วยตัวเอง เติมอากาศโดยใช้ใบพัดหมุนตีน้ำบริเวณผิวน้ำให้เกิดความปั่นป่วน และเกิดการพลิกกลับของชั้นน้ำอย่างรวดเร็ว เพื่อให้เกิดการสัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำอย่างทั่วถึงและเกิดการถ่ายเทออกซิเจน (Cumby, 1987)



รูปที่ 2-6 อุปกรณ์เติมอากาศทางกลบนผิวน้ำในแนวตั้ง

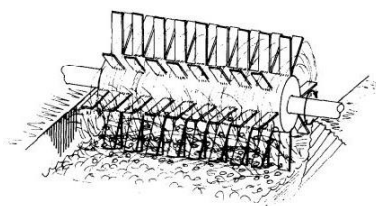
ตารางที่ 2-5 ประสิทธิภาพของอุปกรณ์เติมอากาศทางกลบนผิวน้ำในแนวตั้งชนิดต่างๆ

No.	Type of aerator	Liquid in test	Aeration efficiency, kgO ₂ /kWh	Oxygenation capacity, kgO ₂ /hr	Specific power, W/m ³
1	Surface turbine	Water	1.34	0.34	1.9
2			1.41	2.12	11.2
3			1.34	3.00	16.7
4			1.10	4.36	19.8
5			3.30	3.64	20.4
6			0.95 – 0.97	2.18	32.0 – 60.0
7			1.90	2.69	68.6
8			0.90	1.50	83.7
9			2.20	4.60	100.5
10			1.50	3.59	127.5
11			1.00	3.35	162.6
12			1.40	5.62	195.1
13			1.30	5.10	196.1
14			1.40	5.46	241.8
15			1.40	8.00	273.2
16		Slurry	1.9 – 2.6	-	1.2 – 2.3
17		Pig slurry	1.5 – 1.8	-	2.0 – 3.5
18		Pig slurry	1.86	23.0	27.5 – 45.8
19		(1% dry matter)	1.60	24.0	35.7
20	2 Simplex cones	AS. (4,000 mg/l solids)	1.32	37.4	45.0
21	Simplex cones	AS. (6,000 mg/l solids)	1.57 – 1.72	16.2	63.7
22	Surface turbine	Pig slurry (1% dry matter)	1.50	-	-
23		Slurry	1.8	-	-
24		Dairy effluent	-	0.004	-
25		(1% solids)	0.78	2.00	8.3

ที่มา : Cumby, 1987

2. อุปกรณ์เติมอากาศทางกลบนผิวน้ำในแนวนอน (Horizontal Shaft Surface Aerators)

อุปกรณ์เติมอากาศทางกลที่ลอยอยู่บนผิวน้ำ มีใบพัดหรือกังหันติดตั้งกับแกนหมุนในแนวนอน ใบพัดอาจผลิตจากเหล็กกันสนิมขนาดเล็กรอบแกนหมุนจำนวนหลายแผ่น บางส่วนของใบพัดจมอยู่ใต้น้ำเมื่อใบพัดหมุนจึงตีน้ำให้เกิดการปั่นป่วน น้ำบางส่วนกระจายเป็นหยดน้ำในอากาศขณะเดียวกันอากาศบางส่วนถูกพัดลงสู่ใต้น้ำ ทั้งสองเหตุการณ์ทำให้เกิดการสัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำและเกิดการถ่ายเทออกซิเจนอย่างทั่วถึง โดยทั่วไปนิยมใช้ในถังเติมอากาศแบบคลองวนเวียน (Oxidation ditch)



รูปที่ 2-7 อุปกรณ์เติมอากาศทางกลบนผิวน้ำในแนวนอน

ที่มา : Cumby, 1987

ตารางที่ 2-6 ประสิทธิภาพอุปกรณ์เติมอากาศทางกลบนผิวน้ำในแนวนอนชนิดต่างๆ

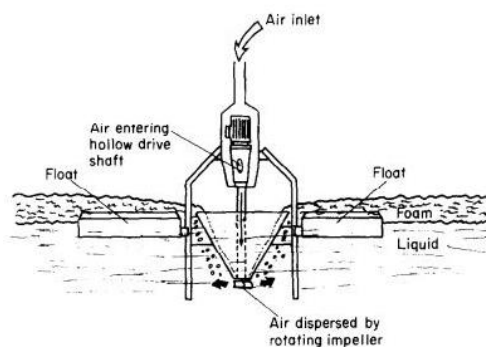
No.	Type of aerator	Liquid in test	Aeration efficiency, kgO ₂ /kWh	Oxygenation capacity, kgO ₂ /hr	Specific power, W/m ³
1	Cage rotor	Water	1.55	3.4	9.7
2			1.38	14.5	19.0
3			1.33 - 1.69	5.95 - 7.6	19.8
4			1.23	0.69	23.6
5			1.53	9.55	27.5
6			0.77 - 1.20	0.6 - 1.9	120 - 205
7	Bladed rotor		0.84 - 0.99	1.84 - 2.35	141 - 411
8	Cage rotor		6.50	-	580
9			1.00	-	-
10			0.60	0.35 - 0.85	-
11			0.95 - 1.00	-	-
12			0.85	1.84	-
13			-	1.79 - 2.23	-
14			Bladed rotor	2.17 - 3.74	-
15	Cage rotor	Water + 5 mg/l anionic d.	1.6	7.17	19.8
16		Water + 2 mg/l antifoam	1.42	6.37	19.8
17		AS. (1,500 mg/l solids)	1.18	2.6	7.0
18		1.27 - 1.30	2.9	7.15	
19		AS. (1.5% dry matter)	0.99 - 1.05	11.2 - 11.9	20.0
20		AS. (4,000 mg/l solids)	1.21	19.2	26.4
21		Pig slurry	1.5	-	-
22		Pig slurry	1.5	-	-
23		(1% dry matter)	0.56 - 0.67	-	-
24	Brush rotor	Water	0.7 - 2.4	5.0 - 90.0 gO ₂ /hr/m ³	5 - 60
25			1.70 - 1.87	1.0 - 1.2	-
26		AS. (3,000 mg/l solids)	1.51 - 1.56	3.4 - 3.5	101
27		AS. (3,500 mg/l solids)	1.55	3.8	110

ที่มา : Cumby, 1987

2.4.2.2 อุปกรณ์เติมอากาศทางกล ใต้ผิวน้ำ (Submerged mechanical aerator)

1. อุปกรณ์เติมอากาศทางกลใต้น้ำในแนวตั้ง (Vertical Shaft Submerged Aerators)

อุปกรณ์เติมอากาศทางกลที่ถูกจุ่มลงใต้น้ำ โดยมีใบพัดหรือกังหันติดตั้งกับแกนหมุนในแนวตั้ง หลักการทำงานคือการหมุนของใบพัดใต้น้ำ ทำให้เกิดแรงดูดอากาศจากผิวน้ำด้านบนผ่านแกนหมุนของใบพัดที่มีลักษณะกลวง โดยอากาศจะแพร่กระจายในน้ำในลักษณะของฟองขนาดเล็กเนื่องจากความปั่นป่วน และแรงเฉือนของใบพัดที่อยู่ใต้น้ำ

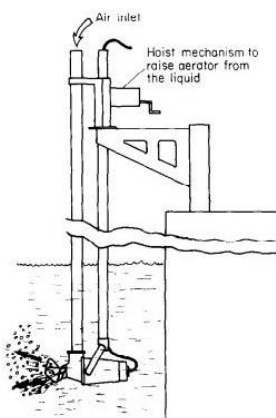


รูปที่ 2-8 อุปกรณ์เติมอากาศทางกลใต้น้ำในแนวตั้ง

ที่มา : Cumby, 1987

2. อุปกรณ์เติมอากาศทางกลใต้น้ำในแนวนอน (Horizontal Shaft Submerged Aerators)

อุปกรณ์เติมอากาศทางกลที่ถูกจุ่มลงใต้น้ำมีใบพัดหรือกังหันติดตั้งกับแกนหมุนในแนวนอน เช่นเดียวกับอุปกรณ์เติมอากาศทางกลบนผิวน้ำในแนวนอน แต่ทำงานอยู่ใต้น้ำและมีลักษณะของใบพัดแตกต่างกันเล็กน้อย มีหลักการเติมอากาศคล้ายกับแต่การหมุนแกนใช้มอเตอร์และแกนเพลลาที่ ต้องมีกำลังมากกว่า



รูปที่ 2-9 อุปกรณ์เติมอากาศทางกลใต้น้ำในแนวนอน

ที่มา : Cumby, 1987

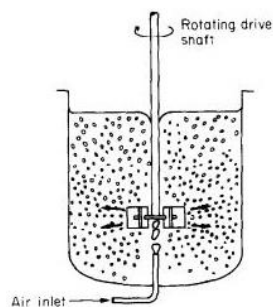
ตารางที่ 2-7 ประสิทธิภาพของอุปกรณ์เติมอากาศทางกลใต้ผิวน้ำชนิดต่างๆ

No.	Type of aerator	Liquid in test	Aeration efficiency, kgO ₂ /kWh	Oxygenation capacity, kgO ₂ /hr	Specific power, W/m ³
1	Impeller with hollow drive tube	Water	1.73	0.66	2.8
2			1.74	2.61	11.2
3			1.91	4.28	16.7
4	Aerob-a-Jet		0.13 – 0.65	0.34 – 1.25	86 – 205
5	Centrirotor (small)		0.60	1.41	112.7
6	Submerged turbine		0.55 – 0.60	4.00 – 4.35	115 – 280
7	Aldo		0.60	1.37	122.5
8	Aldo		0.70	1.94	142.2
9	Aldo		0.50	1.63	156.9
10	Centrirotor (large)		0.70	3.66	270.9
11	Aerob-a-Jet		0.30	-	-
12	Aerob-a-Jet		0.13 – 0.64	0.34 – 1.24	-
13	Impeller and draft tube		1.10	-	-
14	Impeller and draft tube		0.58	0.71	-
15	Fuchs aerator		0.60	-	-
16	Impeller and draft tube	Pig slurry 5% d.m.	3.00	-	-
17	Fuchs aerator	Pig slurry 6-8% d.m.	1.00 – 3.50	-	-
18	Fuchs aerator	Pig slurry 7% d.m.	3.00	-	-
19	Aerob-a-Jet	Cattle slurry 1% d.m.	0.60	-	-
20	Fuchs aerator	AS. 0.4% dm.	0.80	-	-
21	Fuchs aerator	-	15.00	-	-
22	Aerob-a-Jet	-	0.45	-	-

ที่มา : Cumby, 1987

2.4.3 ระบบเติมอากาศแบบประยุกต์อุปกรณ์กระจายอากาศ ร่วมกับอุปกรณ์เติมอากาศทางกล (Combined Compressed Air and Mechanical Aerators)

หลักการของการประยุกต์ใช้อุปกรณ์กระจายอากาศ ร่วมกับอุปกรณ์เติมอากาศทางกล คือ การใช้เครื่องเติมอากาศทางกลแบบใบพัดจุ่มลงใต้น้ำ โดยใบพัดจะติดตั้งกับแกนหมุนในแนวตั้งเหนืออุปกรณ์กระจายอากาศ เมื่อหมุนใบพัดด้วยความเร็วทำให้เกิดความปั่นป่วนและแรงเฉือนต่อฟองอากาศที่ถูกสร้างจากอุปกรณ์กระจายอากาศ ทำให้ฟองอากาศมีขนาดเล็กกลงและฟุ้งกระจายทั่วถังเติมอากาศ จึงเป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัสและระยะเวลาสัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำ



รูปที่ 2-10 การประยุกต์อุปกรณ์กระจายอากาศ ร่วมกับอุปกรณ์เติมอากาศทางกล

ที่มา : Cumby, 1987

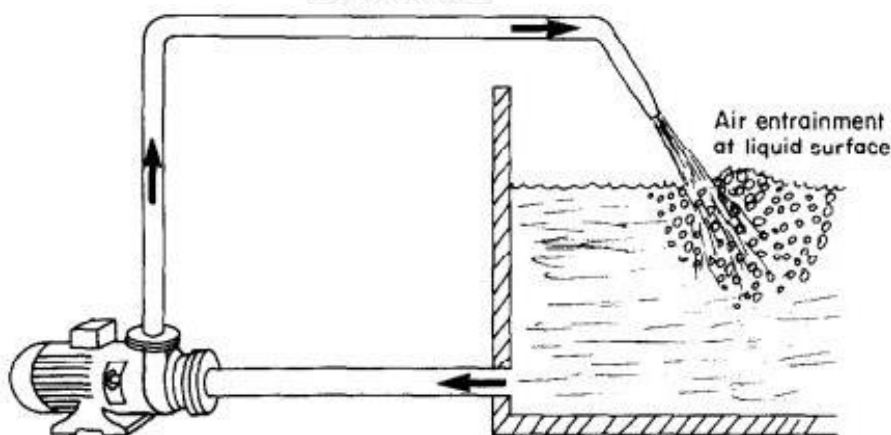
ตารางที่ 2-8 ประสิทธิภาพของระบบเติมอากาศแบบประยุกต์อุปกรณ์กระจายอากาศ ร่วมกับอุปกรณ์เติมอากาศทางกล

No.	Type of aerator	Liquid in test	Aeration efficiency, kgO ₂ /kWh	Oxygenation capacity, kgO ₂ /hr	Specific power, W/m ³
1	Medium bubbles with submerged turbine	Water	0.7 – 1.2	-	-
2	Fine bubbles with submerged turbine	Water	1.8 – 3.3	-	-
3	Sparger with submerged impeller	Water + 5 mg/l anionic detergent	2.37 – 2.85	-	-
4	Diffuser and turbine in 3.6 m ³ tank with baffles	Poultry wastes (1-6% dry matter)	2.0 – 2.3	(20 – 400) X 10 ⁻³	20 - 200

ที่มา : Cumby, 1987

2.4.4 อุปกรณ์เติมอากาศแบบปั๊มของเหลว (Pumped liquid aerators)

อุปกรณ์เติมอากาศแบบปั๊มของเหลวมีการออกแบบอุปกรณ์ในหลากหลายรูปแบบ หลักการทำงานคือการใช้เครื่องสูบน้ำปั๊มน้ำผ่านเส้นท่อออกไปยังหัว Nozzle เพื่อเพิ่มความเร็วน้ำที่ขาออกฉีดไปยังผิวน้ำเพื่อให้เกิดความปั่นป่วนดึงอากาศลงสู่ผิวน้ำ หรือใช้การเครื่องสูบน้ำปั๊มน้ำผ่านหัวเวนจูรีเพื่อให้เกิดการดึงอากาศลงสู่เส้นท่อ เป็นต้น



รูปที่ 2-11 อุปกรณ์เติมอากาศแบบปั๊มของเหลว

ที่มา : Cumby, 1987

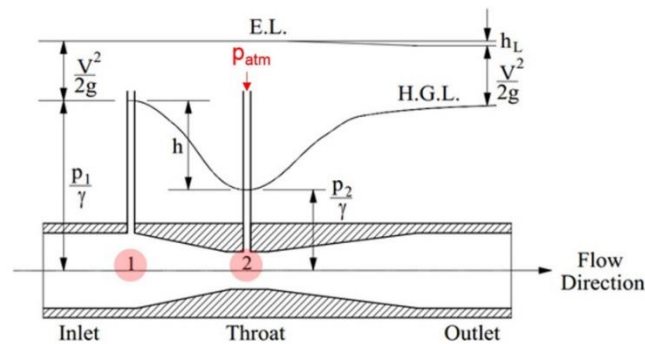
ตารางที่ 2-9 ประสิทธิภาพอุปกรณ์เติมอากาศแบบปั๊มของเหลว

No.	Type of aerator	Liquid in test	Aeration efficiency, kgO ₂ /kWh	Oxygenation capacity, kgO ₂ /hr	Specific power, W/m ³
1	Single plunging Jet	Water	1.8 – 8.7	0.36 – 1.4	3.0 – 75.0
2			0.8 – 1.15	-	-
3			1.58 – 2.5	-	-
4			4.0	-	-
5	Jet Aero-Mix (multiple plunging jets)		0.77 – 0.98	0.74 – 0.98	85 - 130
6	Single plunging Jet	Pig slurry (1.0 - 8.3 kg/m ³ SS.)	0.5 - 10.0	-	-
7	Single plunging Jet	Pig slurry (22 - 50 kg/m ³ d.m.)	1.0 – 4.0	-	-
8	Jet Aero-Mix	Mink slurry	0.98	-	-
9	(multiple plunging jets)	-	0.77 – 0.97	0.74 – 0.95	88 - 130
10	Venturi aerator	Water	0.28	0.52	57.0
11	Venturi aerator		0.45	1.18	80.2
12	Venturi aerator		0.29	1.24	472
13	Jet pump		0.21 – 0.31	0.22 – 0.74	-
14	Ejector (naturally aspirated)		0.4 – 0.9	-	-
15	Ejector (with compressed air)		0.8 – 2.3	-	-
16	Submerged venturi	Water + detergent	1.10 – 1.32	65 - 101	72 - 92
17	Submerged venturi	Sewage sludge (40 - 50°C)	1.39 – 1.85	105 - 297	72 - 92
18	Submerged venturi	Settled domestic sewage (85 kg/m ³ SS.)	0.13	0.46	389
19	Semi-venturi aerator		0.19	0.67	389
20	Semi-venturi aerator	Sewage sludge	0.85	3.6	472
21	Submerged ejector	-	0.4	-	-
22	Fixed head (annular venturi)	Sewage works final effluent	1.0 – 2.5	2.0 – 3.0	1 - 10
23	Vitox system	Sewage sludge	1.56	-	-

ที่มา : Cumby, 1987

2.5 อุปกรณ์เติมอากาศเวนจูรี (Venturi Air Injector)

อุปกรณ์เติมอากาศแบบเวนจูรี เป็นอุปกรณ์ที่สามารถประยุกต์ใช้ในการเติมอากาศได้ทั้งระบบบำบัดน้ำเสียในอาคารและโรงงานอุตสาหกรรม หรือนำไปประยุกต์ใช้สำหรับเติมออกซิเจนลงในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เช่น บ่อเลี้ยงกุ้ง เป็นต้น โดยเวนจูรีสามารถติดตั้งได้หลายลักษณะ เช่น การติดตั้งใต้น้ำ การติดตั้งภายนอกถังเติมอากาศ และการติดตั้งแบบพ่นลอย เป็นต้น อุปกรณ์เวนจูรีทำงานโดยอาศัยเครื่องสูบน้ำฉีดน้ำผ่านหัวเวนจูรี (Venturi Nozzle) ที่มีรูปร่างเป็นคอขวดเพื่อเพิ่มความเร็วของน้ำ จนกระทั่งเกิดแรงดูดอากาศภายนอกลงมาผสมกับน้ำ ทำให้เกิดกระบวนการถ่ายเทออกซิเจนลงไปในน้ำ สามารถพิจารณาหลักการทำงานและส่วนประกอบได้ดังรูปที่ 3-12



รูปที่ 2-12 หน้าตัดอุปกรณ์เวนจูรี

ที่มา : Baylar, 2009

หลักการทำงานของเวนจูรี สามารถอธิบายได้ด้วยสมการพลังงาน ที่สภาวะอุดมคติไม่พิจารณาการสูญเสียพลังงาน ดังสมการที่ 2.16 โดยพิจารณาที่จุด (1) และจุด (2) ภายในอุปกรณ์เวนจูรีตามรูปที่ 2-12

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \quad (2.16)$$

น้ำที่ไหลผ่านภายในอุปกรณ์เวนจูรี จากจุดที่ (1) ไปยังจุดที่ (2) จะมีความเร็วสูงขึ้น ($V_2 > V_1$) เนื่องจากขนาดหน้าตัดภายในเส้นท่อลดลง ($A_2 < A_1$) และส่งผลให้ความดัน ณ จุดที่ (2) ลดลง ($P_2 < P_1$) ดังสมการที่ 2.17 โดยสมมติให้ระดับของจุดที่ (1) และ จุดที่ (2) เท่ากัน ($Z_1=Z_2$)

$$\frac{p_2}{\gamma} = \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g} \quad (2.17)$$

เมื่อความเร็ว V_2 ณ จุดคอขวดของเวนจูรีสูงขึ้น จนทำให้ความดัน ณ จุดที่ (2) มีค่าต่ำกว่าความดันบรรยากาศภายนอก ($P_2 < P_{atm}$) อากาศภายนอกจะถูกผลักให้ไหลเข้ามาในอุปกรณ์เวนจูรีผ่านช่องอากาศบริเวณคอขวด ทำให้เกิดการผสมระหว่างน้ำและอากาศ เกิดการถ่ายเทออกซิเจนที่บริเวณด้านขาออกของอุปกรณ์เวนจูรี

2.6 ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ (Bubble hydrodynamic parameters)

ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ คือ การศึกษาลักษณะการเกิดฟองอากาศเพื่อให้สามารถอธิบายกลไกการถ่ายเทออกซิเจนได้อย่างชัดเจน โดยใช้กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง ที่ความเร็วชัตเตอร์ 1/8000 วินาที ถ่ายภาพการเคลื่อนที่ของฟองอากาศขณะเติมอากาศ เพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆ ดังนี้ (นราพงศ์ หงส์ประสิทธิ์, 2554)

2.6.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (Bubble diameter, d_b)

ขนาดฟองอากาศมีความสัมพันธ์กับพื้นที่สัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำ และประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน ฟองอากาศขนาดเล็กทำให้มีพื้นที่สัมผัสมากกว่า และมีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูงกว่าฟองอากาศขนาดใหญ่เมื่อเติมอากาศให้กับระบบในปริมาณเท่ากัน นอกจากนี้ขนาดฟองอากาศยังมีความสัมพันธ์กับตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศตัวอื่นๆ เช่น ฟองอากาศแต่ละขนาดมีความเร็วลอยตัวที่แตกต่างกัน ฟองอากาศขนาดเล็กอาจแสดงถึงการใช้ระยะเวลาการเกิดฟองอากาศน้อยกว่า หรือมีความถี่ของการเกิดฟองอากาศสูงกว่าฟองอากาศขนาดใหญ่เมื่อเติมอากาศในปริมาณเท่ากัน เป็นต้น ดังนั้น การศึกษาขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์เติมอากาศจึงสามารถอธิบายถึงตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศตัวอื่นๆ และประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์ชนิดนั้นในเบื้องต้นได้

2.6.2 ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (Bubble rising velocity, U_b)

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

$$V_T = \frac{g (\rho_L - \rho_a) d^2}{18\mu} \quad (2.18)$$

โดยที่	V_T	=	ความเร็วปลาย (Terminal velocity)	(เมตร/วินาที)
	ρ_L	=	ความหนาแน่นของน้ำ	(กก. /ลบ.ม.)
	ρ_a	=	ความหนาแน่นของอากาศ หรือฟองอากาศ	(กก. /ลบ.ม.)
	d	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค หรือฟองอากาศ	(เมตร)

$$\mu = \text{ความหนืดของน้ำ} \quad (\text{กก. /เมตร-วินาที})$$

จากสมการที่ 2.18 ในกรณีของการเติมอากาศความเร็วปลาย (V_T) คือความเร็วลอยตัวของฟองอากาศซึ่งมีความสัมพันธ์แปรผันตามขนาดฟองอากาศ คือฟองอากาศขนาดใหญ่มีความเร็วลอยตัวมาก ฟองอากาศขนาดเล็กมีความเร็วลอยตัวน้อยกว่าแต่มีช่วงระยะเวลาสัมผัสกับน้ำนานกว่า ช่วงระยะเวลาที่ฟองอากาศใช้ลอยตัวขึ้นจนถึงผิวน้ำคือช่วงเวลาฟองอากาศสัมผัสกับน้ำ และเกิดการถ่ายเทออกซิเจน ในทางปฏิบัติสามารถวัดค่าความเร็วลอยตัวของฟองอากาศได้โดยใช้กล้องถ่ายภาพความเร็วสูงถ่ายภาพการเคลื่อนที่ของฟองอากาศขณะเติมอากาศ แล้วนำภาพมาวิเคราะห์ความเร็วลอยตัวดังสมการ

$$U_B = \frac{\Delta D}{T_{\text{Frames}}} \quad (2.19)$$

โดยที่ U_B = ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (เมตร/วินาที)

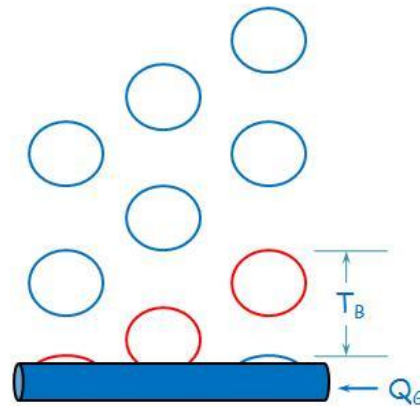
ΔD = ระยะทางการเคลื่อนที่ของฟองอากาศ (เมตร)

T_{Frames} = ช่วงเวลาของการถ่ายภาพ (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



รูปที่ 2-13 ภาพจำลองแสดงระยะเวลาการเกิดฟองอากาศ

ที่มา : นราพงศ์ หงส์ประสิทธิ์, 2554

$$T_B = T_{\text{Growing}} + T_{\text{Out}} \quad (2.20)$$

$$f_B = \frac{1}{T_B} \quad (2.21)$$

โดยที่	T_B	=	ระยะเวลาการเกิดฟองอากาศ	(วินาที)
	T_{Growing}	=	ระยะเวลาที่เริ่มเกิดฟองอากาศ และขยายขนาด	(วินาที)
	T_{out}	=	ระยะเวลาที่ฟองอากาศหลุดออกจากอุปกรณ์เต็มอากาศ	(วินาที)
	f_B	=	ความถี่ของการเกิดฟองอากาศ	(1/วินาที)

จากรูปที่ 2-13 แสดงระยะเวลาการเกิดฟองอากาศซึ่งประกอบด้วย ระยะเวลาที่เริ่มเกิดฟองอากาศและขยายขนาด รวมทั้งระยะเวลาที่ฟองอากาศหลุดออกจากอุปกรณ์เต็มอากาศและเริ่มเกิดฟองอากาศฟองใหม่มาแทนที่ตามสมการที่ 2.20 และมีความสัมพันธ์กับความถี่ของการเกิดฟองอากาศตามสมการที่ 2.21 นอกจากนั้น ความถี่ของการเกิดฟองอากาศสามารถคำนวณได้โดยความสัมพันธ์ดังนี้

$$f_B = \frac{Q_G}{V_B} \quad (2.22)$$

$$V_B = \frac{1}{6} \pi \cdot d_B^3 \quad (2.23)$$

โดยที่	Q_G	=	อัตราการไหลของก๊าซที่เติมให้กับระบบ	(ลบ.ม./วินาที)
	V_B	=	ปริมาตรฟองอากาศ (ปริมาตรทรงกลม)	(ลบ.ม.)
	d_B	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ	(เมตร)

จากสมการที่ 2.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของการเกิดฟองอากาศกับอัตราการไหลของก๊าซที่เติมให้กับระบบ และปริมาตรของฟองอากาศ เมื่อฟองอากาศมีรูปร่างเป็นทรงกลมหรือมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า (Equivalent diameter, d_e) สามารถคำนวณปริมาตรของฟองอากาศได้ตามสมการที่ 2.23 และความถี่ของการเกิดฟองอากาศมีความสัมพันธ์กับจำนวนฟองอากาศที่เกิดขึ้นขณะเติมอากาศตามความสัมพันธ์ดังสมการ

$$N_B = \frac{f_B \cdot H_L}{U_B} \quad (2.24)$$

โดยที่	N_B	=	จำนวนฟองอากาศ หน่วย ฟอง	
	H_L	=	ความสูงของผิวน้ำเหนือจุดเติมอากาศ	(เมตร)

จากสมการที่ 2.24 จำนวนฟองอากาศที่เกิดขึ้นขณะเติมอากาศมีความสัมพันธ์กับความถี่ของการเกิดฟองอากาศ ความสูงของผิวน้ำเหนือจุดเติมอากาศและความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ ซึ่งส่งผลต่อพื้นที่สัมผัสระหว่างฟองอากาศกับน้ำและประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน ความถี่ของการเกิดฟองอากาศที่มากทำให้เกิดฟองอากาศจำนวนมาก มีพื้นที่สัมผัสมากและประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูงในกรณีที่ไม่เกิดการรวมตัวของฟองอากาศ และจากสมการที่ 2.18 ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศมีความสัมพันธ์กับขนาดฟองอากาศ จึงอาจมีความเป็นไปได้ในการประเมินค่าความถี่ของการเกิดฟองอากาศ และจำนวนฟองอากาศเบื้องต้นได้เมื่อทราบค่าขนาดฟองอากาศ ซึ่งอาจเป็นแนวทางหนึ่งที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศได้

2.6.4 พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างก๊าซและของเหลว (Interfacial area, a)

พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างก๊าซและของเหลว คือ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่สัมผัสของฟองอากาศทั้งหมดกับปริมาตรของน้ำที่เติมอากาศ แสดงถึงพื้นที่ทั้งหมดที่เกิดการถ่ายเทออกซิเจนได้ขณะเติมอากาศ โดยมีความสัมพันธ์ตามสมการดังนี้

$$a = \frac{N_B \times S_B}{V_{\text{total}}} = \frac{N_B \times \pi \times d_B^2}{(A \times H_L) + (N_B \times V_B)} \quad (2.25)$$

โดยที่	a	=	พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างก๊าซและของเหลว	(ตร.ม./ลบ.ม.)
	S_B	=	พื้นที่ผิวของฟองอากาศ (พื้นที่ผิวทรงกลม)	(ตร.ม.)
	V_{Total}	=	ปริมาตรโดยรวมระหว่างปริมาตรของน้ำ และฟองอากาศ	(ลบ.ม.)
	A	=	พื้นที่หน้าตัดขวางของน้ำในถังเติมอากาศ	(ตร.ม.)
	H_L	=	ความสูงของน้ำในถังเติมอากาศ	(เมตร)

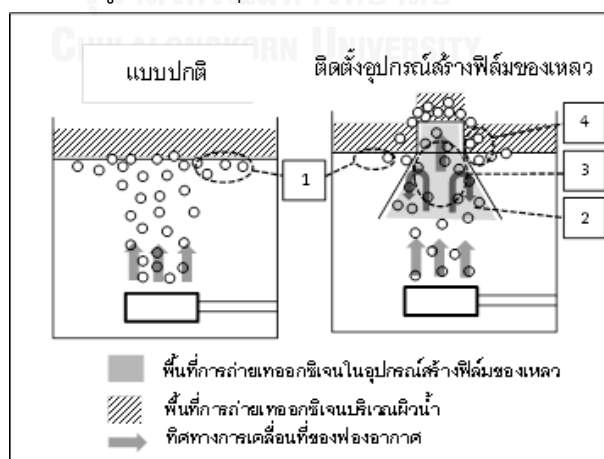
เนื่องจากพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างก๊าซและของเหลวมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวของฟองอากาศทั้งหมด หรือผลคูณระหว่างจำนวนฟองอากาศทั้งหมดกับพื้นที่ผิวของฟองอากาศหนึ่งฟอง และปริมาตรโดยรวมระหว่างปริมาตรน้ำกับปริมาตรฟองอากาศทั้งหมด หรือผลคูณระหว่างจำนวนฟองอากาศกับปริมาตรฟองอากาศตามสมการที่ 2.25 (Painmanakul และคณะ, 2004) เมื่อสมมติให้ฟองอากาศมีรูปร่างเป็นทรงกลม ปริมาตรฟองอากาศจึงสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.23 จากความสัมพันธ์ข้างต้นจะพบว่าพื้นที่สัมผัสมีความสัมพันธ์กับขนาดฟองอากาศ ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้ในการประเมินค่าพื้นที่สัมผัสจำเพาะในเบื้องต้นเมื่อทราบค่าขนาดฟองอากาศ ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยอำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศได้

2.7 ระบบเติมอากาศแบบสร้างฟิล์มของเหลว (Liquid-Film Forming Apparatus, LFFA)

ระบบเติมอากาศแบบสร้างฟิล์มของเหลวเป็นระบบเติมอากาศที่ใช้หัวกระจายอากาศ โดยมีการติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว (Liquid-Film-Forming Apparatus, LFFA) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเติมอากาศ อุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวนั้นมีลักษณะคล้ายกรวยตัวยอดหัวคว่ำ ติดตั้งไว้ที่บริเวณผิวน้ำเหนือตำแหน่งที่ทำการเติมอากาศ เมื่อเริ่มทำการเติมอากาศ ฟองอากาศจะออกจากหัวกระจายอากาศลอยขึ้นมาเหนือน้ำ เมื่อฟองอากาศที่ลอยขึ้นมาถึงบริเวณอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว ฟองอากาศจะรวมกันและผลัดดันให้น้ำบริเวณผิวน้ำพุ่งออกไปบริเวณปลายกรวยไปพร้อมกับฟองอากาศ ทำให้เกิดฟิล์มของเหลวบริเวณผิวน้ำ ซึ่งจะช่วยให้ช่วยเพิ่มความสามารถในการเติมอากาศบริเวณผิวน้ำให้มากขึ้น (ดาวัน เจริญพิทยา, 2556)



รูปที่ 2-14 อุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว



รูปที่ 2-15 แสดงลักษณะการถ่ายเทออกซิเจนของระบบสร้างฟิล์มของเหลว

ที่มา : ดาวัน เจริญพิทยา, 2556

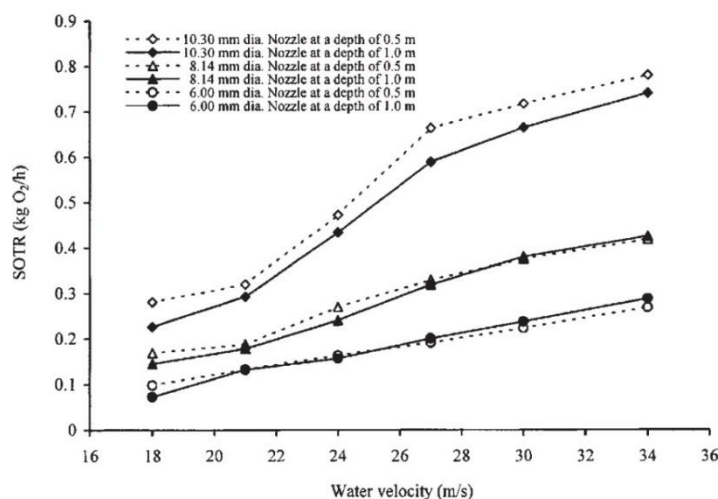
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Laksitanonta และ Singh (2004) ศึกษาผลกระทบของความเร็วน้ำขาเข้าเวนจูลี และระดับความลึกจุดเติมอากาศ (Aeration Depth) ต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของเวนจูลี

ทดลองโดยใช้เวนจูลีขนาด 6 มม. 8.14 มม. และ 10.30 มม. ที่ระดับความลึกจุดเติมอากาศเท่ากับ 0.5 ม. และ 1.0 ม. โดยใช้ความเร็วน้ำสูงสุดไม่เกิน 34 ม./วินาที

ผลการทดลองพบว่า

1. ยิ่งความเร็วน้ำขาเข้าเวนจูลีสูง อัตราการถ่ายเทออกซิเจนของเวนจูลีก็จะยิ่งสูงขึ้นตามไปด้วย ดังรูปที่ 2-16 (Laksitanonta และ Singh, 2004)



รูปที่ 2-16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง V_w และอัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (SOTR)

2. ที่ระดับความลึกจุดเติมอากาศ 0.5 ม. และ 1.0 ม. ประสิทธิภาพการเติมอากาศไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังตารางที่ 2-10

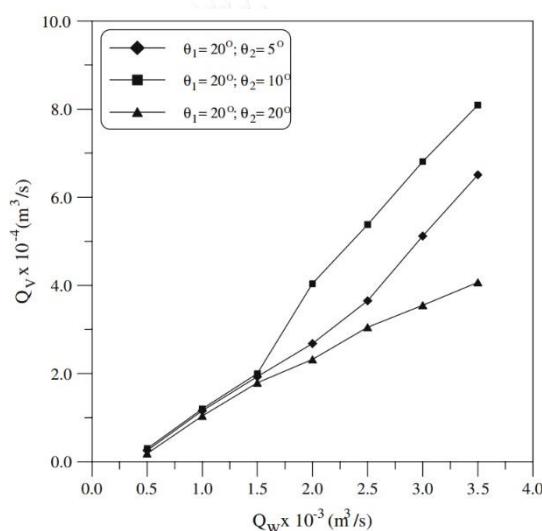
ตารางที่ 2-10 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ($K_L a$) ของเวนจูลีขนาดต่างๆที่ระดับความลึก 0.5 เมตร และ 1.0 เมตร

Nozzle diameter (mm)	Water depth (m)	$(K_L a)_{20}^*$					
		Water velocity (m/s)					
		18	21	24	27	30	34
6.00	0.5	0.45(a)	0.61(a)	0.75(a)	0.88(a)	1.03(a)	1.24(a)
	1.0	0.34(a)	0.61(a)	0.72(a)	0.92(a)	1.09(a)	1.33(a)
8.14	0.5	0.78(b)	0.86(b)	1.24(b)	1.53(b)	1.73(b)	1.93(b)
	1.0	0.66(b)	0.82(b)	1.10(b)	1.47(b)	1.75(b)	1.96(b)
10.30	0.5	1.29(c)	1.47(c)	2.17(c)	3.05(c)	3.30(c)	3.59(c)
	1.0	1.04(c)	1.34(c)	2.00(c)	2.71(c)	3.06(c)	3.41(c)

Baylar และ Ozkan (2006) ศึกษาผลกระทบขององศาหน้าตัดลดทางน้ำเข้าและทางน้ำออกของ ต่อประสิทธิภาพการดูดอากาศของเวนจูลี ทดลองโดยใช้องศาหน้าตัดลดทางน้ำเข้า (Y_1) เท่ากับ 20° และองศาของหน้าตัดลดทางน้ำออก (Y_2) เท่ากับ 5° 10° และ 20°

ผลการทดลองพบว่า

1. ที่องศาหน้าตัดลดทางน้ำเข้าและทางน้ำออก เท่ากับ 20° และ 10° ให้ประสิทธิภาพการดูดอากาศที่ดีที่สุด เมื่ออัตราการไหลของน้ำมีค่าสูง ดังรูปที่ 3-19 (Baylar และ Ozkan, 2006)
2. ที่องศาหน้าตัดลดทางน้ำเข้าและทางน้ำออกเท่ากัน คือ 20° และ 20° ให้ประสิทธิภาพการดูดอากาศที่ต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับเวนจูลีที่มีองศาของหน้าตัดลดทางน้ำออก เท่ากับ 5° 10°



รูปที่ 2-17 กราฟแสดงประสิทธิภาพของเวนจูลี ที่องศาหน้าตัดลดทางน้ำเข้าและทางน้ำออกต่างๆ

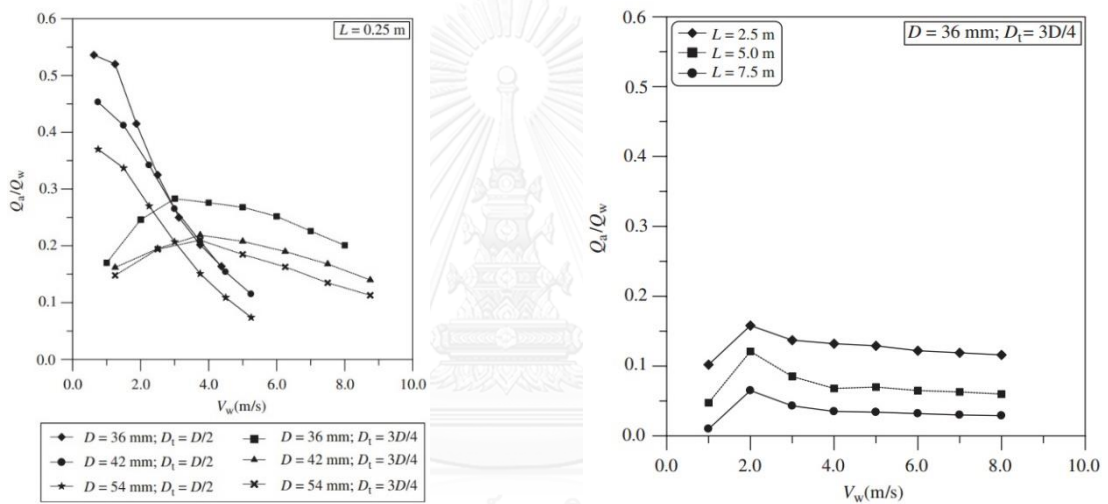
Ozkan และคณะ (2006) ศึกษาผลกระทบของตัวแปร 3 ตัวแปรต่อประสิทธิภาพการดูดอากาศของเวนจูลี ได้แก่ 1.องศาการติดตั้งเวนจูลี 2.ความยาวท่อที่ต่อออกจากเวนจูลี และ 3.ความเร็วน้ำด้านหน้าตัดทางน้ำเข้าเวนจูลี (V_w) โดยใช้สัดส่วนขนาดของเวนจูลีต่างๆดังนี้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางน้ำเข้า (D) 3 ขนาด คือ 36 มม. 42 มม. และ 54 มม. ใช้อัตราส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอดต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางน้ำเข้า (D_c/D) 2 อัตราส่วนคือ 0.5 และ 0.75 ใช้ขนาดความยาวคอคอดยาวเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด มุมทรงกรวยของหน้าตัดลดทางน้ำเข้าและทางน้ำออกเท่ากับ 21° และ 7° ตามลำดับ องศาการติดตั้งเวนจูลีที่ใช้คือ 0° และ 45° ความยาวท่อที่ต่อออกจากเวนจูลี (L) เท่ากับ 2.5 ม. 5.0 ม. และ 7.5 ม. และใช้ความเร็วน้ำสูงสุดไม่เกิน 8.75 m/s

ผลการทดลองพบว่า

1. ค่า V_w มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของอัตราไหลอากาศที่เวนจูลีตูดเข้าสู่ระบบต่ออัตราไหลของน้ำที่ผ่านเวนจูลี (Q_v/Q_w) โดยค่า Q_v/Q_w เพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับค่า V_w จนถึงจุดหนึ่ง จากนั้นค่า Q_v/Q_w จะลดลงแม้จะเพิ่มค่า V_w ให้สูงขึ้น ดังรูปที่ 2-18

2. ยิ่งท่อที่ต่อออกเวนจูลีมีความยาวมาก ยิ่งลดทอนประสิทธิภาพการดูดอากาศของเวนจูลีลง ดังรูปที่ 2-18

3. องศาการติดตั้งเวนจูลีที่ 45° ให้ประสิทธิภาพการดูดอากาศที่ดีกว่าการติดตั้งในแนวระนาบ (Ozkan และคณะ, 2006)



รูปที่ 2-18 กราฟความสัมพันธ์ V_w กับ Q_v/Q_w และกราฟแสดงค่า Q_v/Q_w ที่ความยาว L ต่างๆ

Painmanakul และ Jamnongwong (2007) ศึกษาการทำนายค่าพารามิเตอร์ต่างๆในการถ่ายเทออกซิเจนหรือตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ ในงานวิจัยนี้ได้สนใจทำนายค่าขนาดฟองอากาศ ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ และพื้นที่สัมผัสจำเพาะโดยวิเคราะห์ค่าตัวแปรต่างๆในระดับห้องปฏิบัติการ ทำการเติมอากาศในคอลัมน์รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.05 ม. และสูง 0.4 ม. ใช้เมมเบรนเป็นอุปกรณ์กระจายอากาศ ควบคู่กับการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกนำเสนอในปัจจุบันดังแสดงในตารางที่ 2.1 ถึง 2.5 ซึ่งมาจากการศึกษาความสัมพันธ์ในระดับห้องปฏิบัติการหรือศึกษาความสัมพันธ์จากข้อมูลทุติยภูมิโดยอ้างอิงจากทฤษฎี เพื่อช่วยอำนวยความสะดวกในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน อธิบายกลไกการถ่ายเทออกซิเจนได้อย่างชัดเจน ทำให้สามารถประเมินประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศ และความเหมาะสมของอุปกรณ์ในขั้นต้นได้

จากการศึกษาพบว่า อัตราการไหลของอากาศที่เติมให้กับระบบมีความสัมพันธ์กับตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศซึ่งมีขนาดฟองอากาศเป็นตัวแปรหลักที่ใช้ทำนายค่าตัวแปรอื่นๆ ขนาดฟองอากาศ ความเร็วลอยตัว และพื้นที่สัมผัสจำเพาะสามารถทำนายได้โดยใช้สมการของ Leibson และคณะ (1956) Mendelson (1967) และ Moustiri (2000) ตามลำดับ แต่ยังคงมีความคลาดเคลื่อนระหว่างการวิเคราะห์กับการทำนายประมาณร้อยละ 15 เนื่องจากข้อจำกัดของการใช้แบบจำลองและปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทออกซิเจน จึงควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อการทำนายที่แม่นยำมากขึ้น

Ghomi (2009) ศึกษาผลกระทบของระดับความลึกจุดเติมอากาศ (Aeration Depth) และองศาการติดตั้ง ต่อประสิทธิภาพการเติมอากาศของอุปกรณ์เวนจูรี ทดลองโดยใช้เวนจูรี 3 ขนาด คือ 14 มม. 17 มม. และ 20 มม. ที่ระดับความลึกจุดเติมอากาศเท่ากับ 20 ซม. 40 ซม. และ 60 ซม. องศาการติดตั้งเวนจูรีเท่ากับ 0° 22.5° และ 45°

ผลการทดลองพบว่า

1. Aeration Depth ที่ความลึก 60 ซม. ให้ประสิทธิภาพการเติมอากาศที่ดีกว่าระดับความลึก 20 ซม. และ 40 ซม. ในทุกขนาดของเวนจูรี ดังตารางที่ 2-11 (Ghomi, 2009)

ตารางที่ 2-11 ประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน (SAE) ที่ระดับความลึกจุดเติมอากาศต่างๆ

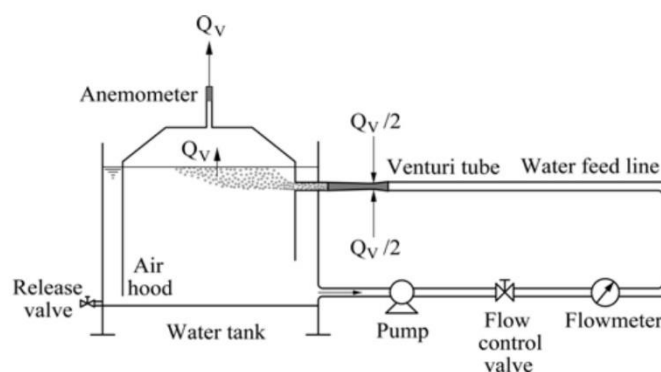
Aeration depths (cm)	Nozzle diameters (mm)	Aeration angles (°)			SAE mean (for each depth) ± SD
		0	22.5	45	
20	14	1.042	0.985	1.137	0.700 ^{a*} ± 0.344
	17	0.740	0.805	0.772	
	20	0.255	0.255	0.315	
40	14	1.116	1.055	1.150	0.740 ^a ± 0.339
	17	0.745	0.783	0.816	
	20	0.262	0.390	0.350	
60	14	1.110	1.148	1.166	0.779 ^a ± 0.348
	17	0.910	0.820	0.808	
	20	0.314	0.365	0.370	

2. องศาการติดตั้งเวนจูรีที่ 45° ให้ประสิทธิภาพการเติมอากาศที่ดีกว่าการติดตั้งที่ 0° และ 22.5° ในทุกขนาดของเวนจูรี ดังตารางที่ 2-12

ตารางที่ 2-12 ประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน (SAE) ที่ระดับองศาการติดตั้งแวนจูรีต่างๆ

Aeration angles (°) (cm)	Nozzle diameters (mm)	Aeration depths (cm)			SAE mean (for each angle) ± SD
		20	40	60	
0	14	1.042	1.116	1.110	0.718 ^a ± 0.365
	17	0.740	0.745	0.910	
	20	0.225	0.262	0.314	
22.5	14	0.985	1.055	1.148	0.734 ^a ± 0.323
	17	0.805	0.783	0.820	
	20	0.255	0.390	0.365	
45	14	1.137	1.150	1.166	0.764 ^a ± 0.350
	17	0.772	0.816	0.808	
	20	0.315	0.350	0.370	

Baylar และคณะ (2010) ศึกษาผลกระทบของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูอากาศเข้า ต่อประสิทธิภาพการดูดอากาศของอุปกรณ์แวนจูรี ทำการทดลองด้วยน้ำสะอาด ในถังเติมอากาศขนาด 1.8 ลบ.ม. (กว้าง 0.75 ม. x ยาว 2.0 ม. x สูง 1.2 ม.) โดยใช้สัดส่วนขนาดของแวนจูรีต่างๆดังนี้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางน้ำเข้า (D) 3 ขนาด คือ 36 มม. 42 มม. และ 54 มม. ใช้อัตราส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอดต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางน้ำเข้า (D_c/D) 2 อัตราส่วนคือ 0.5 และ 0.75 ใช้ขนาดความยาวคอคอดยาวเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด มุมทรงกรวยของหน้าตัดลดทางน้ำเข้าและทางน้ำออกเท่ากับ 21° และ 7° ตามลำดับ ทดลองโดยการสูบน้ำเวียนจากถังเติมอากาศผ่านอุปกรณ์แวนจูรี ดังรูปที่ 3-16 ใช้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re) ที่หน้าตัดทางน้ำเข้าอุปกรณ์แวนจูรีอยู่ในช่วง 22,000 – 437,000 พร้อมทั้งติดตั้งชุดขนาด 0.70x0.75 ม. ครอบบนผิวหน้า และใช้อุปกรณ์วัดความเร็วลม Anemometer วัดอัตราการไหลของอากาศที่ลอยขึ้นจากผิวหน้า



รูปที่ 2-19 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์แวนจูรีในการทดลอง

ที่มา : Baylar และคณะ, 2010

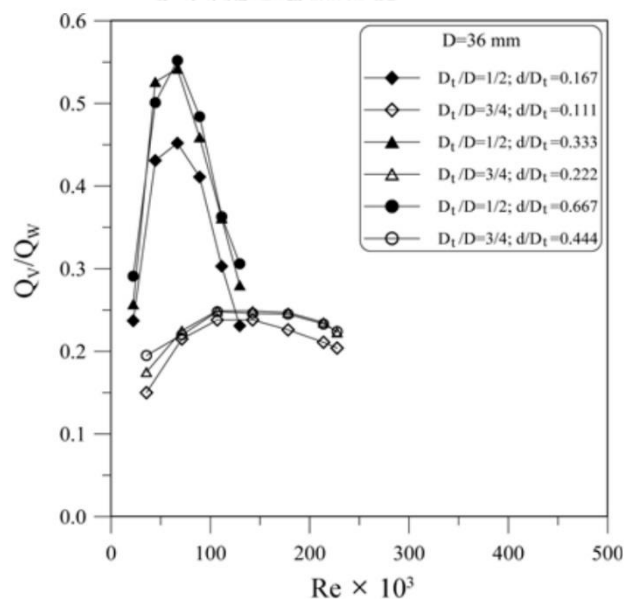
ผลการทดลองพบว่า

1. ค่า Re มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของอัตราไหลอากาศที่เวนจิวรีดูดเข้าสู่ระบบต่ออัตราไหลของน้ำที่ผ่านเวนจิวรี (Q_v/Q_w) โดยค่า Q_v/Q_w เพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับค่า Re จนถึงจุดหนึ่ง จากนั้นค่า Q_v/Q_w จะลดลงเมื่อเพิ่มค่า Re สูงขึ้นไปเรื่อยๆ ดังรูปที่ 2-20

2. ค่าอัตราส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูดูดอากาศต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด (d/D_t) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า Q_v/Q_w โดยค่า Q_v/Q_w เพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับค่า d/D_t จนถึงจุดหนึ่ง จากนั้นค่า Q_v/Q_w จะคงที่เมื่อเพิ่มค่า d/D_t สูงขึ้นไปอีก

3. ที่ค่า Re ต่ำ เวนจิวรีที่ขนาดอัตราส่วน D_t/D เท่ากับ 0.5 ประสิทธิภาพดีกว่า ขนาด D_t/D เท่ากับ 0.75

4. ที่ค่า Re สูง เวนจิวรีที่ขนาดอัตราส่วน D_t/D เท่ากับ 0.75 ประสิทธิภาพดีกว่า ขนาด D_t/D เท่ากับ 0.5 (Baylar และคณะ, 2010)

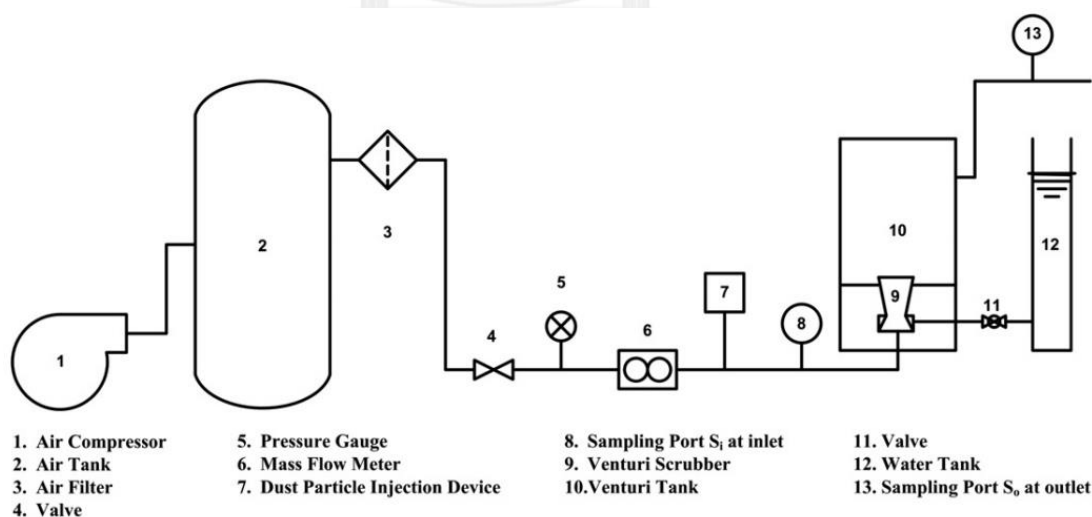


รูปที่ 2-20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Re กับ Q_v/Q_w เวนจิวรีขนาด 36 มม.

Imai และ Zhu (2011) ได้พัฒนาระบบเติมอากาศที่มีการสร้างฟิล์มของเหลวขึ้น ซึ่งทำโดยใช้อุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวติดตั้งที่บริเวณผิวน้ำที่มีการลอยตัวของฟองอากาศ เพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทออกซิเจนบริเวณผิวน้ำโดยอุปกรณ์เป็นลักษณะเหมือนกรวยตัดยอด ทำการทดลองในถังขนาด 40 ลิตร ลึก 44 เซนติเมตร พื้นที่หน้าตัดด้านบน 910 ตารางเซนติเมตร การทดลองใช้วิธีการทดสอบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนแบบปกติ แบบติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว และเติมไนโตรเจน (เพื่อทดสอบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่ผิวน้ำ) รวมทั้งทำการแปรผันลักษณะทางโครงสร้างต่างๆ ได้แก่ ขนาดหน้าตัดของอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว ขนาดท่อ ความสูงเหนือหน้าของอุปกรณ์ ขนาดและจำนวนท่อที่ติดตั้ง ปริมาณการเติมอากาศ

จากการทดลองพบว่าอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนจากการเติมอากาศแบบปกติได้ 37 % อีกทั้งยังช่วยเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนบริเวณผิวน้ำมากกว่าแบบทั่วไป 5.3 เท่า และหลังจากปรับปรุงอุปกรณ์ให้อยู่ในสถานะที่เหมาะสมยังสามารถเพิ่มเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนอิ่มตัวได้ถึง 92%

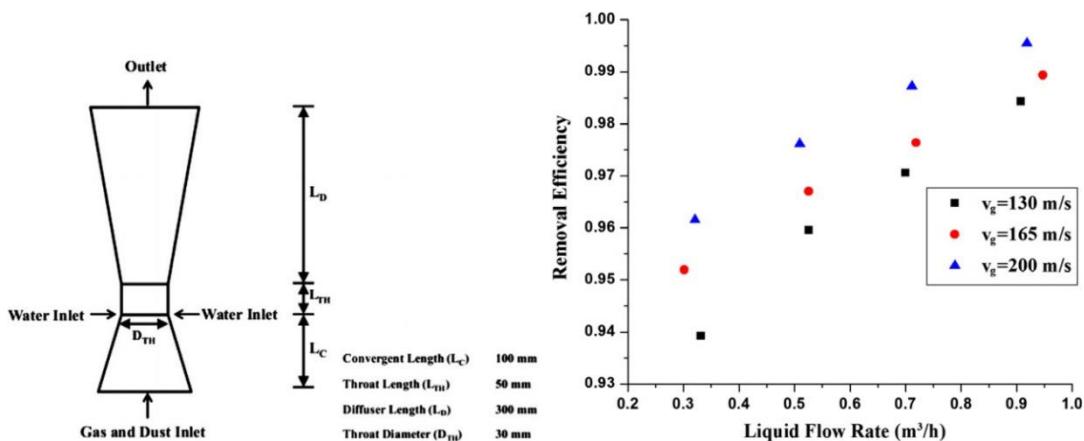
Ali และคณะ (2013) ศึกษาการใช้เวนจูรีในอุปกรณ์ Wet Scrubber หรือเรียกว่า Venturi Scrubber โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อดักจับฝุ่นละอองในอากาศ ซึ่งใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (hydrophobic titanium dioxide, TiO_2) ความหนาแน่น 4.23 กรัม/ลบ.ซม. ขนาดเฉลี่ย 1 ไมโครเมตร เป็นตัวแทนอนุภาคฝุ่นในอากาศที่ใช้ในการทดลอง โดยมีการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง ดังรูปที่ 2-21 (Ali และคณะ, 2013)



รูปที่ 2-21 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง Venturi Scrubber

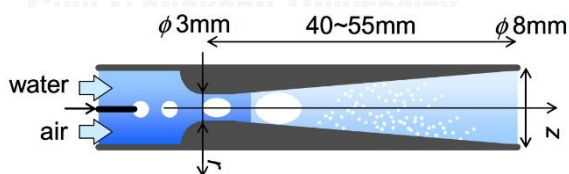
การทดลองใช้เครื่องสูบลมเป่าอากาศที่มีความเข้มข้นของฝุ่น 0.1 – 1.0 กรัม/ลบ.ม. เข้าอุปกรณ์เวนจูรี โดยมีความเร็วอากาศที่หน้าตัดคอคอดเท่ากับ 130, 165 และ 200 เมตร/วินาที

ตามลำดับ สามารถดูน้ำได้ที่อัตราไหล 0.3 – 1.0 ลบ.ม./ชม. สามารถสร้างสเปรย์น้ำดักจับฝุ่นละออง ในอากาศได้ประสิทธิภาพ 94 – 99.5% (Ali และคณะ, 2013)



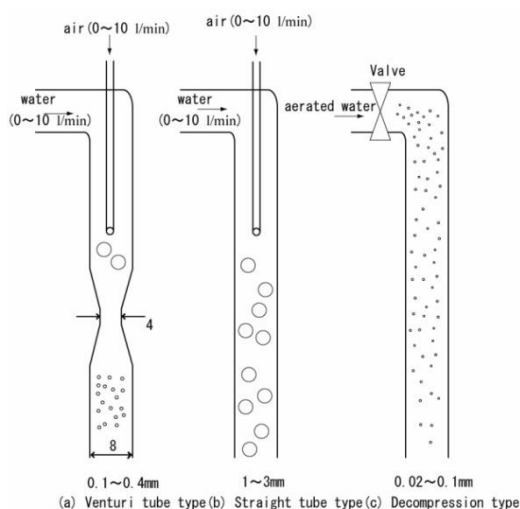
รูปที่ 2-22 ขนาดอุปกรณ์เวนจิวรีที่ใช้ในการทดลอง และประสิทธิภาพการดักจับฝุ่น

Kawamura และคณะ (2015) ศึกษาการสร้างฟองอากาศขนาดไมโครเมตรด้วยอุปกรณ์เวนจิวรี โดยใช้หลักการเพิ่มความเร็วของของเหลวที่บริเวณคอคอของเวนจิวรี จนทำให้ความดัน ณ หน้าตัดคอคอของเวนจิวรี ลดลงต่ำกว่าความดันไอของของเหลวที่อุณหภูมินั้นๆ เกิดปรากฏการณ์คาวิเตชัน (Cavitation) ของเหลวจะกลายเป็นไอและเกิดฟองอากาศที่มีความดันภายในเท่ากับความดันไอและไหลปนรวมไปกับของเหลวนั้น เมื่อฟองอากาศที่มีความดันต่ำไหลไปยังส่วนหน้าตัดขยายของเวนจิวรีที่มีแรงดันเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ฟองอากาศที่มีความดันต่ำแตกตัวเป็นฟองอากาศขนาดเล็ก ในระดับไมโครเมตร ดังรูปที่ 2-23 (Kawamura และคณะ, 2015)



รูปที่ 2-23 ขนาดหน้าตัด และความยาวอุปกรณ์เวนจิวรี ที่ใช้ในการสร้างฟองอากาศขนาดไมโครเมตร

การทดลองสร้างฟองอากาศจากอุปกรณ์เวนจิวรีขนาดหน้าตัดทางหน้าเข้า 8 มม. หน้าตัดคอคอ 3 มม. ความยาวหน้าตัดขยายของเวนจิวรี 40 – 55 มม. ที่มีการเป่าอากาศด้านทางเข้า 0 - 10 ลิตร/นาที เปรียบเทียบขนาดฟองอากาศกับการเป่าอากาศจากท่อโดยตรง และเครื่องสร้างฟองอากาศระดับไมโครเมตร (The decompression type bubble generator) ผลการทดลองพบว่าขนาดฟองอากาศเฉลี่ยจากอุปกรณ์เวนจิวรีเท่ากับ 0.1 – 0.4 มม. ขนาดฟองอากาศเฉลี่ยจากการเป่าอากาศจากท่อลมโดยตรงเท่ากับ 1 – 3 มม. และขนาดฟองอากาศเฉลี่ยจากเครื่องสร้างฟองอากาศระดับไมโครเมตรเท่ากับ 0.02 – 0.1 มม. ดังรูปที่ 2-24 (Kawamura และคณะ, 2015)



รูปที่ 2-24 ขนาดฟองอากาศจากอุปกรณ์สร้างฟองอากาศทั้งสามชนิด

สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์เติมอากาศแบบเวนจูรี

งานวิจัยอุปกรณ์เวนจูรีที่ผ่านมา สามารถแบ่งการวิจัยออกได้เป็น 2 ส่วนคือ

1. งานวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบสัดส่วนและรูปทรงของอุปกรณ์เวนจูรี ไม่ว่าจะเป็น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางน้ำเข้า (D) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด (D_c) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูอากาศ (d) และมุมทรงกรวยของหน้าตัดลดทางน้ำเข้าและทางน้ำออก (Y_1, Y_2)

2. งานวิจัยที่เกี่ยวกับการติดตั้งอุปกรณ์เวนจูรี เป็นการศึกษาเกี่ยวกับ องค์การติดตั้งอุปกรณ์เวนจูรี (α) ระดับความลึกการติดตั้งเวนจูรี (Aeration Depth) ความยาวท่อที่ต่อจากด้านขาออกอุปกรณ์เวนจูรี (L) ความเร็วน้ำด้านขาเข้าอุปกรณ์เวนจูรี (V_w) และค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re) ที่หน้าตัดทางน้ำเข้าอุปกรณ์เวนจูรี เป็นต้น

โดยงานวิจัยที่ผ่านมาจะศึกษาตัวแปรที่กล่าวมาข้างต้น ต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ที่บ่งบอกประสิทธิภาพของอุปกรณ์เวนจูรี ไม่ว่าจะเป็น อัตราส่วนของอัตราไหลอากาศที่เวนจูรีดูดเข้าสู่ระบบต่ออัตราไหลของน้ำที่ผ่านเวนจูรี (Q_a/Q_w) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (K_{La20}) ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน (SAE) และอัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (SOTR) เป็นต้น สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2-13

ตารางที่ 2-13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์เติมอากาศแบบเวนจูรี

งานวิจัย	ตัวแปรต้น	ตัวแปรตาม
Lakitanonta และ Singh (2004)	V_w , Aeration Depth	$K_L a_{L20}$, SOTR
Baylar และคณะ (2006)	Re, d/D_t , D_t/D	Q_v/Q_w
Ozkan และคณะ (2006)	α , L, V_w	Q_v/Q_w
Ghomi (2009)	α , Aeration Depth	SAE
Baylar และคณะ (2011)	Y_1, Y_2	Q_v/Q_w



บทที่ 3

ขั้นตอน และวิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยอุปกรณ์เติมอากาศแบบเวนจูรี สามารถแบ่งการศึกษาได้เป็น 7 ช่วงการทดลองดังนี้

การทดลองที่ 1 ศึกษาประสิทธิภาพการเติมอากาศ และแรงดันสูญเสียของอุปกรณ์เวนจูรี

1.1 ทดลองศึกษาประสิทธิภาพเวนจูรีทั้งหมด 4 ขนาด คือ ขนาด 0.5 นิ้ว, 1.0 นิ้ว, 1.5 นิ้ว และ 2.0 นิ้ว ด้วยการทดสอบตามมาตรฐานวิธีการวิเคราะห์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำสะอาด ขององค์การวิศวกรรมโยธาแห่งสหรัฐอเมริกา (American Society of Civil Engineers, 1992) เพื่อวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทออกซิเจน (K_La) จากนั้นจึงนำไปคำนวณค่าต่างๆดังนี้

- 1) ค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (K_{La20})
- 2) อัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (Standard Oxygen Transfer Rate, SOTR)
- 3) ประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน (Standard Aeration Efficiency, SAE)
- 4) ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (Standard Oxygen Transfer Efficiency, SOTE)

1.2 ทดลองศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความดัน (Minor loss coefficients) ของเวนจูรีทั้งหมด 4 ขนาด คือ ขนาด 0.5 นิ้ว, 1.0 นิ้ว, 1.5 นิ้ว และ 2.0 นิ้ว เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบติดตั้งอุปกรณ์

การทดลองที่ 2 ศึกษาปัจจัยการติดตั้ง ต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์เวนจูรี

ทดลองศึกษาปัจจัยการติดตั้งอุปกรณ์เวนจูรี ในด้านของ 1) อัตราการไหลของน้ำต่อประสิทธิภาพอุปกรณ์เวนจูรี และ 2) ระดับความลึกการติดตั้งอุปกรณ์เวนจูรี ต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์

การทดลองที่ 3 ศึกษาตัวแปรอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศของอุปกรณ์เวนจูรี

ทดลองศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (Bubble diameter, d_b) ที่ออกจากอุปกรณ์เวนจูรี และแนวการเคลื่อนที่ของฟองอากาศที่ออกจากอุปกรณ์เวนจูรี

การทดลองที่ 4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์เติมอากาศเวนจูลี กับอุปกรณ์กระจายอากาศ ในเทอมของประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน และพลังงานที่ใช้ในการเติมอากาศ

ทำการทดลองใช้อุปกรณ์กระจายอากาศ 2 ชนิดคือ หัวกระจายอากาศแบบแข็ง (Rigid Diffuser) และแบบท่อยาง (Elastic Diffuser) เปรียบเทียบกับเวนจูลีขนาด 2 นิ้ว ในเทอมของ ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (Standard Oxygen Transfer Efficiency, SOTE) ต่อการเปลี่ยนแปลงของ 2 ตัวแปร คือ

- 1) ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเติมอากาศ (Power Consumption)
- 2) ระดับความลึกของการเติมอากาศ (Aeration Depth)

การทดลองที่ 5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์เติมอากาศเวนจูลี กับอุปกรณ์กระจายอากาศ ในเทอมของประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน ต่อระยะห่างจากจุดเติมอากาศ

ทำการทดลองใช้อุปกรณ์กระจายอากาศ ชนิดหัวกระจายอากาศแบบท่อยาง (Elastic Diffuser) ติดตั้งร่วมกับอุปกรณ์ Airlift เพื่อช่วยผลักดันฟองอากาศไหลไปด้านหน้าอุปกรณ์ เปรียบเทียบกับอุปกรณ์เวนจูลีในเทอมของประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน ต่อระยะห่างจากจุดเติมอากาศ โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทออกซิเจน (K_La) ที่เปลี่ยนแปลงต่อระยะห่าง (Length) จากจุดเติมอากาศ

การทดลองที่ 6 ศึกษาการประยุกต์ใช้อุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว (LFFA) ร่วมกับอุปกรณ์เวนจูลี

ทดลองติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว (Liquid Film Forming Apparatus, LFFA) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เวนจูลี โดยจะทำการวัดค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศของเวนจูลี เปรียบเทียบก่อนและหลังการติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว

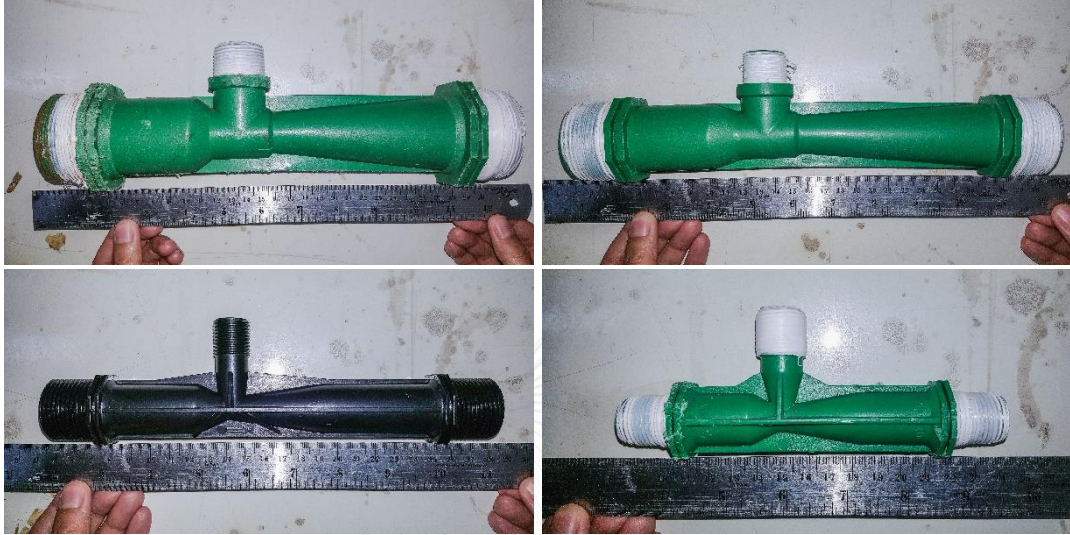
การทดลองที่ 7 สร้างสมการทำนายประสิทธิภาพการเติมอากาศของอุปกรณ์เวนจูลี

นำผลการศึกษาการเดินระบบอุปกรณ์เวนจูลีที่สภาวะต่างๆ มาสร้างสมการทำนายค่าอัตราส่วนการไหลของอากาศต่อน้ำ (Q_g/Q_w) และสร้างสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (K_La_{20}) เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ออกแบบระบบเติมอากาศ

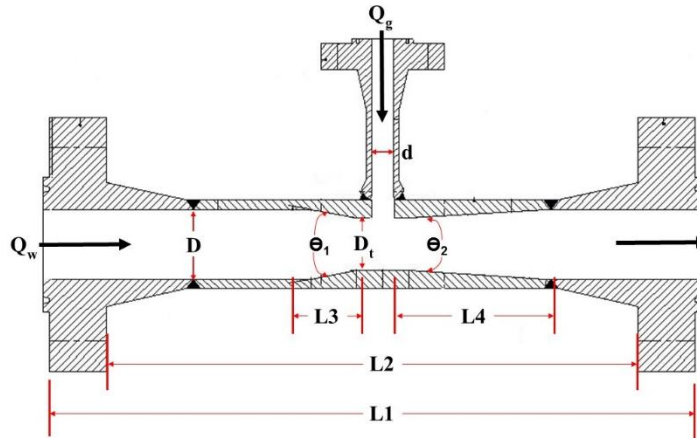
3.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1) เวนจูลี

อุปกรณ์เวนจูลีที่ใช้ในการทดลองมี 4 ขนาด ได้แก่ 0.5 นิ้ว, 1.0 นิ้ว, 1.5 นิ้ว และ 2.0 นิ้ว



รูปที่ 3-1 อุปกรณ์เติมอากาศเวนจูลี



รูปที่ 3-2 ภาพแสดงหน้าตัดอุปกรณ์เวนจูลี

ตารางที่ 3-1 ขนาดหน้าตัด และองศาภายในอุปกรณ์เวนจูลี

ขนาดเวนจูลี (นิ้ว)	ขนาดหน้าตัดภายในอุปกรณ์เวนจูลี (มม.)							องศาภายใน	
	D	D_t	d	L1	L2	L3	L4	θ_1	θ_2
0.5	13.9	4.9	4.4	155	100	10	62	48.2°	8.3°
1.0	23.5	6.1	6.3	233	170	15	105	60.2°	9.5°
1.5	30.3	12.7	9.4	283	209	14	115	64.5°	8.8°
2.0	39.3	18.5	13.9	300	223	12	120	81.9°	19.7°

2) หัวกระจายอากาศ

หัวกระจายอากาศที่ใช้ในการทดลอง 2 ชนิด ได้แก่

- หัวกระจายอากาศแบบแข็ง (Rigid diffuser) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 ซม.



รูปที่ 3-3 หัวกระจายอากาศแบบหยาบหรือแบบแข็ง (Rigid diffuser)

ที่มา : http://img.tarad.com/shop/s/smilepets/img-lib/spd_20100610152617_b.JPG

วันที่สืบค้นข้อมูล : 15 พฤษภาคม 2559

- หัวกระจายอากาศแบบท่อยาง (Rubber diffuser) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5/8 นิ้ว



รูปที่ 3-4 หัวกระจายอากาศแบบท่อยาง (Rubber diffuser)

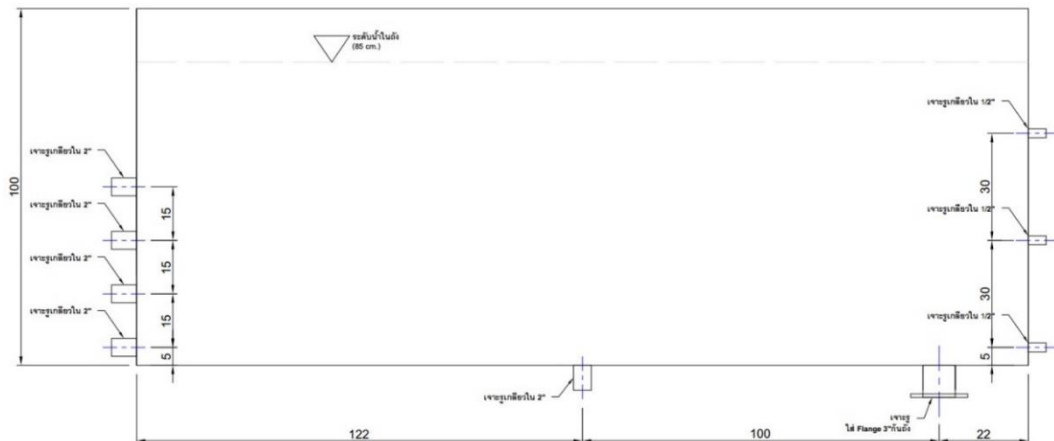
ที่มา : <http://www.airstonesthshop.com/shop/airstonesthshop/images/10m4t30bhcojtur455jq1191220125530000003.jpg>

วันที่สืบค้นข้อมูล : 15 พฤษภาคม 2559

3) ถังเติมอากาศ

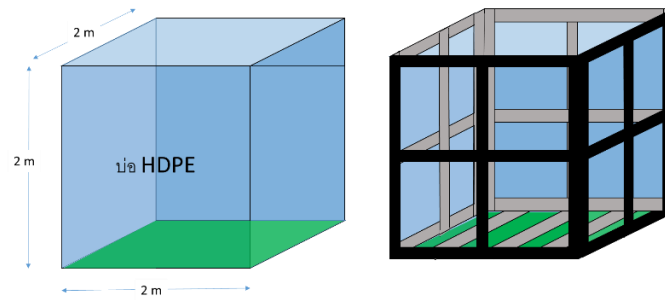
ถังเติมอากาศที่ใช้ในการทดลองมี 2 รูปแบบ ได้แก่

1. ถังเติมอากาศทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ทำจากอะคริลิกใส หนา 10 มิลลิเมตร ขนาดความยาว 2.44 เมตร ความกว้าง 0.5 เมตร ความสูง 1.0 เมตร (ใช้ในการทดลองที่ 1, 3, 5 และ 6)



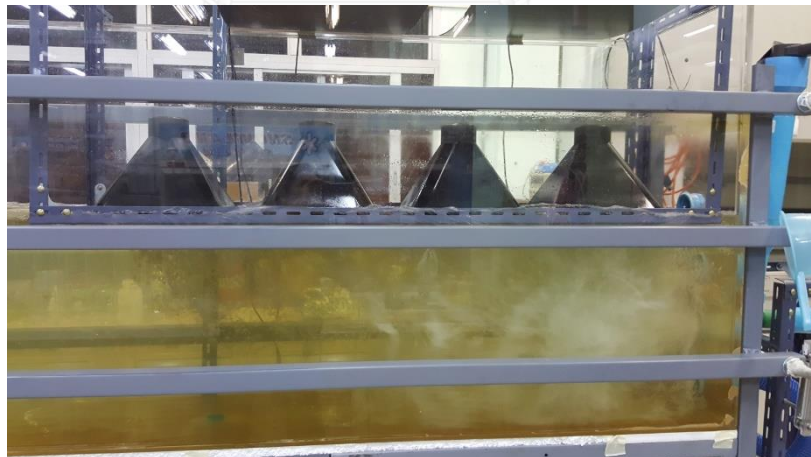
รูปที่ 3-5 ถังเติมอากาศทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดความยาว 2.44 เมตร

2. ถังเติมอากาศทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส ทำจากวัสดุแผ่น HDPE เชื่อมต่อกันเพื่อรองรับน้ำ ติดตั้งในโครงเหล็ก และมีวัสดุแผ่นเรียบเป็นผนัง เพื่อรักษารูปทรงขนาดความยาว 2.0 เมตร ความกว้าง 2.0 เมตร ความสูง 2.0 เมตร (ใช้ในการทดลองที่ 2 และ 4)





รูปที่ 3-6 ถังเติมอากาศทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส กว้าง 2 เมตร ยาว 2 เมตร ลึก 2 เมตร และโครงเหล็ก
4) อุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว

อุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวที่ใช้เป็นพลาสติกแบบทึบสีดำ ขนาดความกว้าง 30 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร สูง 25 เซนติเมตร โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางของยอดกรวย 5 เซนติเมตร (ใช้ในการทดลองที่ 6)



รูปที่ 3-7 การติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวในถังเติมอากาศ

ตารางที่ 3-2 อุปกรณ์อื่นๆที่ใช้ในการทดลอง 1/2

No.	อุปกรณ์	รูปภาพ
1	ปั้มน้ำ Mitsubishi รุ่น WCM-1105S ขนาด 1.1 กิโลวัตต์ จำนวน 1 เครื่อง	
2	ปั้มน้ำ Venz รุ่น VC150 ขนาด 1.1 กิโลวัตต์ จำนวน 1 เครื่อง	
3	ปั้มลม Hailea ACO450 ขนาด 450 วัตต์ จำนวน 2 เครื่อง	
4	เครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัด Vane Anemometer รุ่น DT-620 CEM จำนวน 1 เครื่อง	
5	อุปกรณ์วัดอัตราการไหลน้ำ Rotameter รุ่น Z-5650 Range 30-300 LPM เกลียวในประปา 2 นิ้ว จำนวน 1 ตัว	
6	อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซ อัตราการไหลสูงสุด 250 ลิตร/นาที จำนวน 1 เครื่อง	

ตารางที่ 3-3 อุปกรณ์อื่นๆที่ใช้ในการทดลอง 2/2

No.	อุปกรณ์	รูปภาพ
7	เกจวัดความดัน (Pressure Gauge) ขนาดความดันสูงสุด 1 บาร์ และ 2.5 บาร์	
8	อุปกรณ์วัดออกซิเจนละลาย EXTECH รุ่น SDL150 จำนวน 1 เครื่อง LUTRON รุ่น DO-5512SD 2 เครื่อง	
9	อุปกรณ์วัดค่าพลังงานไฟฟ้า PRIMUS รุ่น KM-06-N จำนวน 1 เครื่อง	
10	อุปกรณ์ Variable Speed Drive NOVEM รุ่น ND 1	
11	Variable Voltage Transformer VOLTAC รุ่น TSB-15M 3KVA	
12	กล้องถ่ายภาพ Nikon รุ่น D7000 จำนวน 1 เครื่อง	

3.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

1. โซเดียมซัลไฟต์ (Na_2SO_3) ชนิดผง เกรดอุตสาหกรรม บริษัท Blueplanet Chemical Trading

ใช้เป็นสารลดออกซิเจนละลายในน้ำ ในอัตราส่วน 8 มิลลิกรัมโซเดียมซัลไฟต์ ต่อออกซิเจนละลายน้ำ 1 มิลลิกรัม และเพื่อปริมาณสารโซเดียมซัลไฟต์เพิ่มขึ้น 15 เปอร์เซ็นต์ จากการคำนวณ (American Society of Civil Engineers, 1992)

2. โคบอลต์คลอไรด์ (CoCl_2) ชนิดเกล็ด เกรดห้องปฏิบัติการ บริษัท UNIVAR

ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการลดออกซิเจนละลายในน้ำ ในอัตราส่วน 50 มิลลิกรัม ต่อน้ำสะอาด 100 ลิตร (He และคณะ, 2003)

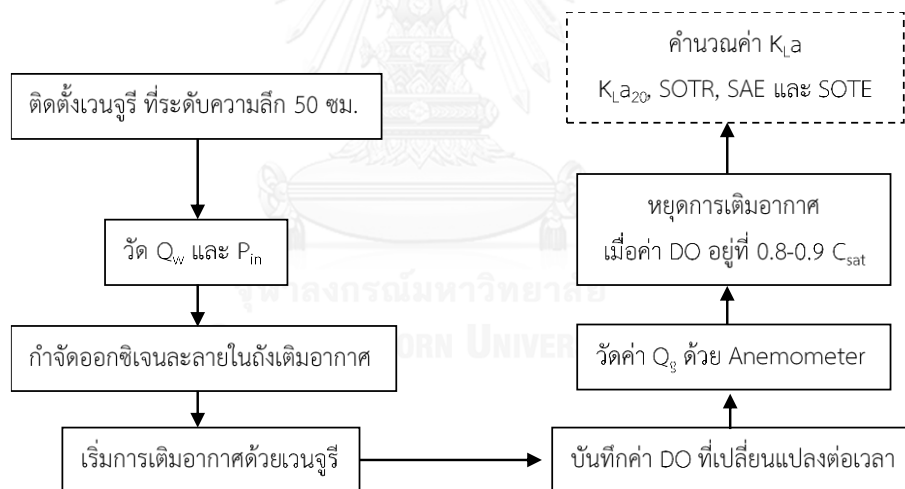


3.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

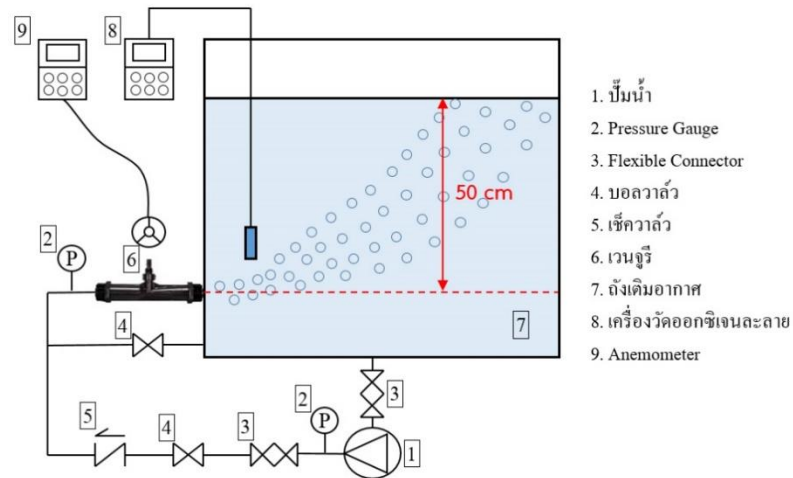
การทดลองที่ 1 ทดสอบประสิทธิภาพอุปกรณ์เติมอากาศเวนจูรี

การทดลองที่ 1.1 ทำการทดลองเวนจูรีทั้งหมด 4 ขนาด คือ ขนาด 0.5 นิ้ว, 1.0 นิ้ว, 1.5 นิ้ว และ 2.0 นิ้ว ด้วยเครื่องสูบน้ำขนาด 1.1 กิโลวัตต์ เพื่อการทดสอบประสิทธิภาพการเติมอากาศตามมาตรฐานวิธีการวิเคราะห์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำสะอาด ขององค์กรวิศวกรรมโยธาแห่งสหรัฐอเมริกา (American Society of Civil Engineers, 1992) และวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ($K_L a$) โดยใช้ระดับความลึกจุดเติมอากาศเท่ากับ 50 เซนติเมตร จากนั้นจึงนำไปคำนวณค่าต่างๆดังนี้

- 1) ค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (K_{La20})
- 2) อัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (Standard Oxygen Transfer Rate, SOTR)
- 3) ประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน (Standard Aeration Efficiency, SAE)
- 4) ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (Standard Oxygen Transfer Efficiency, SOTE)



รูปที่ 3-8 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองที่ 1.1

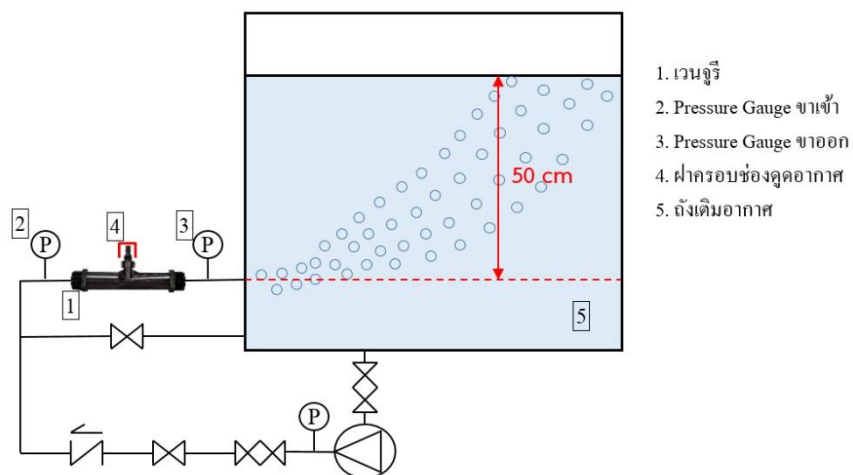


รูปที่ 3-9 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองที่ 1.1

การทดลองที่ 1.2 ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความดัน (Minor loss coefficients) ของเวนจูรีทั้งหมด 4 ขนาด คือ 0.5 นิ้ว, 1.0 นิ้ว, 1.5 นิ้ว และ 2.0 นิ้ว โดยการปิดช่องดูดอากาศของเวนจูรี และปรับอัตราไหลน้ำขาเข้า 4 ค่า จากนั้นวัดค่าความดันขาเข้า (P_{in}) ความดันขาออก (P_{out}) และความเร็วน้ำขาเข้าอุปกรณ์ (v) เพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความดัน (k) จากสมการที่ 3.1

$$h_{minor\ loss} = \frac{kv^2}{2g} \quad (3.1)$$

โดยที่ $h_{minor\ loss}$ = ค่าความดันสูญเสียจากอุปกรณ์ (เมตร)
 k = ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความดัน
 v = ความเร็วน้ำขาเข้าอุปกรณ์ (เมตร/วินาที)
 g = ค่าความโน้มถ่วง 9.81 เมตร/วินาที²



รูปที่ 3-10 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองที่ 1.2

ผลการทดลองที่คาดว่าจะได้รับจากการทดลองที่ 1 คือค่าพารามิเตอร์ที่บ่งบอกประสิทธิภาพของอุปกรณ์เวนจูรี รวมทั้งค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความดัน (Minor loss coefficients) ของเวนจูรีทั้งหมด 4 ขนาด ดังตารางที่ 3-3 และสามารถสรุปตัวแปรที่สนใจศึกษาได้ดังตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-4 สรุปตัวแปรที่สนใจศึกษาในการทดลองที่ 1

	ตัวแปรที่ตรวจวัด	ตัวแปรที่วิเคราะห์	ผลลัพธ์ที่ต้องการ
การทดลองที่ 1	- ค่า DO ที่เปลี่ยนแปลงต่อเวลา	- $K_L a$	- K_{La20}
	- อัตราการไหลของน้ำ (Q_w)	- ค่าพลังงาน (kW)	- SOTR
	- อัตราการไหลของอากาศ (Q_g)	- ความเร็วน้ำ (v)	- SAE
	- ความดันน้ำขาเข้า (P_{in})	- ค่าความดันสูญเสีย	- SOTE
	- ความดันน้ำขาออก (P_{out})	(Head loss)	- $k_{minorloss}$
	- อุณหภูมิ น้ำ และอากาศ		

การทดลองที่ 2 ศึกษาปัจจัยการติดตั้ง ต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์เวนจูรี

ทดลองศึกษาปัจจัยการเกี่ยวกับติดตั้งอุปกรณ์เวนจูรีในด้าน อัตราการไหลน้ำ และระดับความลึกน้ำ เพื่อศึกษาสภาวะการเดินระบบที่ให้ประสิทธิภาพสูง

1) อัตราการไหลของน้ำต่อประสิทธิภาพอุปกรณ์เวนจูรี

ทำการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านอุปกรณ์เวนจูรีทั้งหมด 4 ขนาด คือ 0.5 นิ้ว, 1.0 นิ้ว, 1.5 นิ้ว และ 2.0 นิ้ว ที่อัตราไหลน้ำในช่วง 5 – 300 ลิตร/นาที ระดับความลึกน้ำ 50 ซม. เพื่อศึกษาสภาวะอัตราการไหลน้ำที่เหมาะสมของเวนจูรีแต่ละขนาด ที่ทำให้เวนจูรีมีประสิทธิภาพการดูดอากาศสูง

2) ระดับความลึกการติดตั้งอุปกรณ์เวนจูรี ต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์

ทำการปรับเปลี่ยนระดับความลึกการเติมอากาศของการเดินระบบด้วยอุปกรณ์เวนจูรี ขนาด 2 นิ้ว โดยทำการปรับเปลี่ยนระดับน้ำที่ 50 ซม. 100 ซม. และ 150 ซม. เพื่อศึกษาผลกระทบของการเพิ่มขึ้นของระดับความลึกน้ำต่อประสิทธิภาพการเติมอากาศของอุปกรณ์เวนจูรี

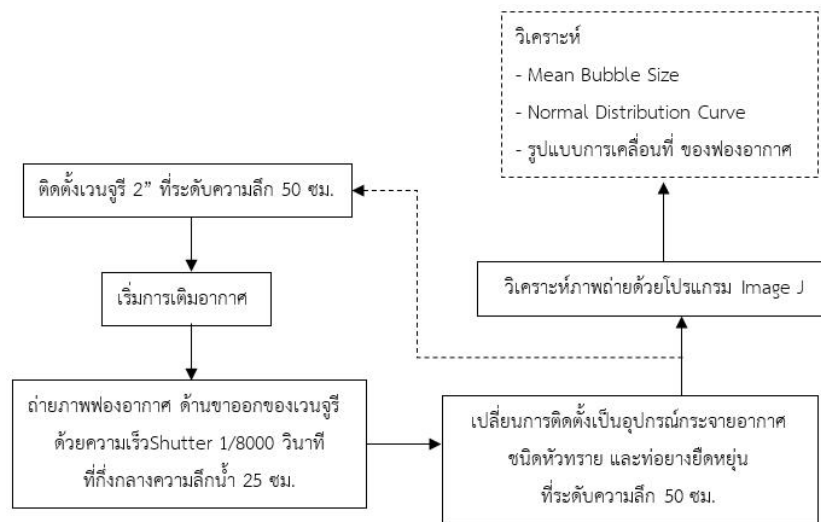
ตารางที่ 3-5 สรุปตัวแปรที่สนใจศึกษาในการทดลองที่ 2

	ตัวแปรที่ตรวจวัด	ตัวแปรที่วิเคราะห์	ผลลัพธ์ที่ต้องการ
การทดลองที่ 2	- ค่า DO ที่เปลี่ยนแปลงต่อเวลา	- $K_L a$	- $K_L a_{20}$
	- อัตราการไหลของน้ำ (Q_w)	- ความเร็วน้ำ	- SOTR
	- อัตราการไหลของอากาศ (Q_g)		- SAE
	- ความดันน้ำขาเข้าเวนจูรี (P_{in})		- SOTE
	- อุณหภูมิน้ำ และอากาศ		- Ratio Q_g/Q_w

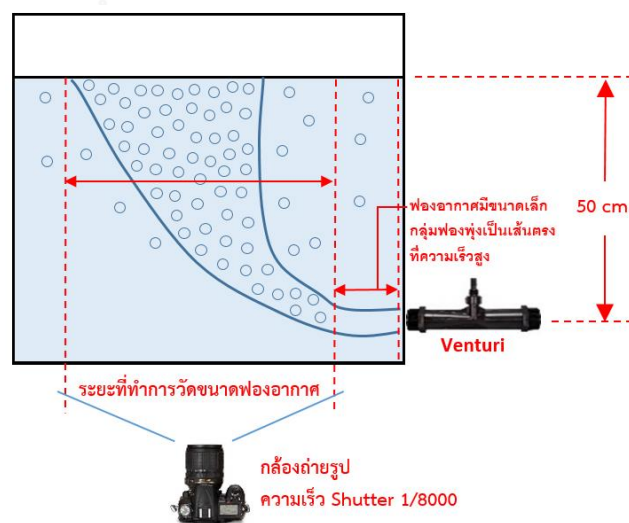
การทดลองที่ 3 ศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเติมอากาศของอุปกรณ์เวนจูรี ในด้านของตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ

ทดลองศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (Bubble diameter, d_B) ที่ออกจากอุปกรณ์เวนจูรี และแนวการเคลื่อนที่ของฟองอากาศที่ออกจากอุปกรณ์เวนจูรี

โดยในการทดลองนี้เป็นแบ่งเป็น 2 ช่วงคือ 1. การศึกษาแนวการเคลื่อนที่ของฟองอากาศที่ออกจากอุปกรณ์เวนจูรี และ 2. การศึกษาขนาดฟองอากาศของเวนจูรีขนาด 2 นิ้ว ที่อัตราการไหลอากาศ 2 ลบ.ม./ชม. ระดับความลึกน้ำ 50 ซม. เปรียบเทียบกับอุปกรณ์กระจายอากาศ 2 ชนิด คือ 1. หัวทราย และ 2. ท่อยางยืดหยุ่น ที่อัตราการไหลอากาศและระดับความลึกเท่ากัน



รูปที่ 3-11 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองที่ 3



รูปที่ 3-12 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองที่ 3

ตารางที่ 3-6 สรุปตัวแปรที่สนใจศึกษาในการทดลองที่ 3

	ตัวแปรที่ตรวจวัด	ตัวแปรที่วิเคราะห์	ผลลัพธ์ที่ต้องการ
การทดลองที่ 3 (d_B)	- ขนาดฟองอากาศ (d_B) - อัตราการไหลอากาศ (Q_g)	- ขนาดฟองอากาศ (d_B) - การเคลื่อนที่ของ ฟองอากาศ	- Mean Bubble Size - Normal Distribution Curve - รูปแบบการเคลื่อนที่ ของฟองอากาศ

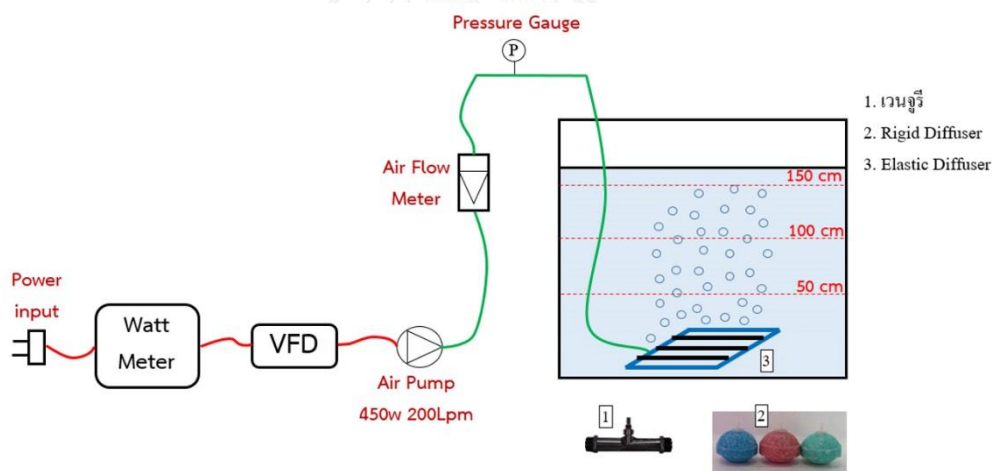


การทดลองที่ 4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์เติมอากาศเวนจูรี กับอุปกรณ์กระจายอากาศ ในเทอมของประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน และพลังงานที่ใช้ในการเติมอากาศ

ทำการทดลองใช้อุปกรณ์กระจายอากาศ 2 ชนิดคือ หัวกระจายอากาศแบบแข็ง (Rigid Diffuser) และแบบท่อยาง (Elastic Diffuser) เปรียบเทียบกับเวนจูรีในเทอมของ ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (Standard Oxygen Transfer Efficiency, SOTE) ต่อการเปลี่ยนแปลงของ 2 ตัวแปร คือ

1) ระดับค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเติมอากาศ (Power Consumption) 4 ค่าพลังงานคือ 280, 550, 825 และ 1100 วัตต์ โดยใช้อุปกรณ์ Variable Speed Drive (Inverter) ในการปรับความเร็วรอบมอเตอร์เครื่องสูบน้ำ เพื่อเปลี่ยนค่าพลังงานไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์เวนจูรี และใช้อุปกรณ์ Variable Voltage Transformer ในการปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเข้าเครื่องสูบลม เพื่อเปลี่ยนค่าพลังงานไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์กระจายอากาศ

2) ระดับความลึกของการเติมอากาศ (Aeration Depth) 3 ระดับความลึกน้ำคือ 50, 100 และ 150 เซนติเมตร ในถังเติมอากาศขนาดหน้าตัด กว้าง 2 เมตร ยาว 2 เมตร



รูปที่ 3-13 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองที่ 4

จากนั้นใช้ข้อมูลจากผลการทดลองเพื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (SOTE) ต่อ ค่าพลังงาน (P) และระดับความลึกของการเติมอากาศ (Aeration Depth) เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพอุปกรณ์เวนจูรีกับอุปกรณ์กระจายอากาศ ที่ระดับความลึกการเติมอากาศต่างๆ และพลังงานที่ใช้ในการเติมอากาศ

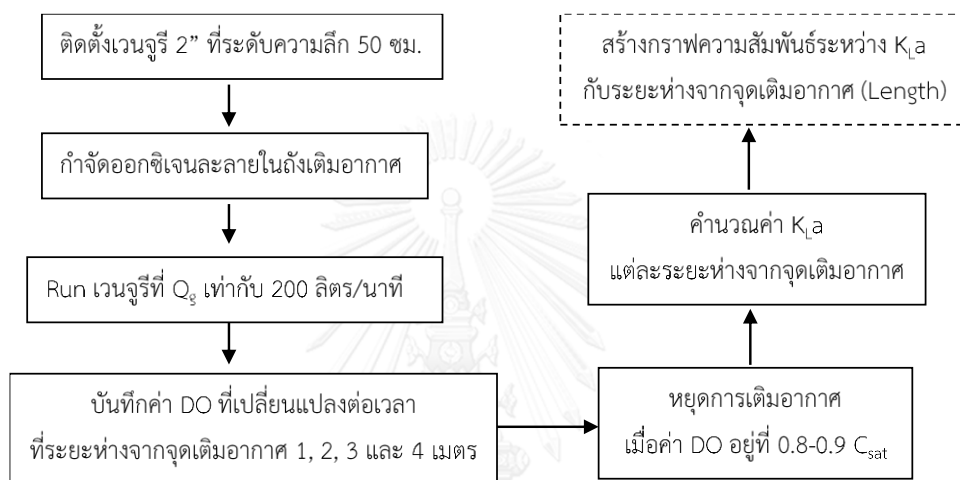
ตารางที่ 3-7 สรุปตัวแปรที่สนใจศึกษาในการทดลองที่ 4

	ตัวแปรที่ตรวจวัด	ตัวแปรที่วิเคราะห์	ผลลัพธ์ที่ต้องการ
การทดลองที่ 4 (SOTE)	<ul style="list-style-type: none"> - ค่า DO ที่เปลี่ยนแปลงต่อเวลา - อัตราการไหลของน้ำ (Q_w) - อัตราการไหลของอากาศ (Q_g) - ความดันน้ำขาเข้าเวนจูรี (P_{in}) - ความลึกจุดเติมอากาศ (Depth) - อุณหภูมิน้ำ และอากาศ 	<ul style="list-style-type: none"> - K_La - ค่าพลังงาน (P, kW) - Depth - SOTE 	<ul style="list-style-type: none"> - กราฟ ความสัมพันธ์ระหว่าง SOTE กับ P และ Depth

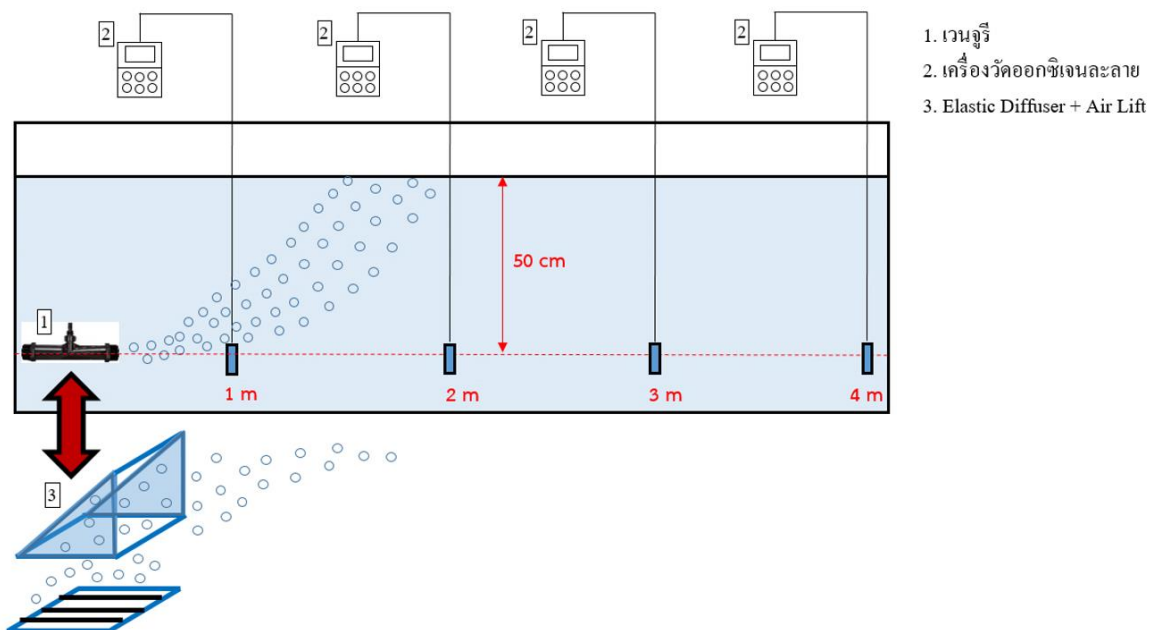


การทดลองที่ 5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์เติมอากาศเวนจูรี กับอุปกรณ์กระจายอากาศ ในเทอมของประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน ต่อระยะห่างจากจุดเติมอากาศ

ทำการทดลองใช้อุปกรณ์กระจายอากาศ ชนิดหัวกระจายอากาศแบบท่อยาง (Elastic Diffuser) ติดตั้งร่วมกับอุปกรณ์ Airlift เพื่อช่วยผลักดันฟองอากาศไหลไปด้านหน้าอุปกรณ์ เปรียบเทียบกับอุปกรณ์เวนจูรีในเทอมของประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน ต่อระยะห่างจากจุดเติมอากาศ โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทออกซิเจน ($K_L a$) ที่เปลี่ยนแปลงต่อระยะห่าง (Length) จากจุดเติมอากาศ



รูปที่ 3-14 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองที่ 5



รูปที่ 3-15 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองที่ 5

จากนั้นใช้ข้อมูลจากผลการทดลองเพื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทออกซิเจน (K_La) ที่เปลี่ยนแปลงต่อระยะห่าง (Length) จากจุดเติมอากาศ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพอุปกรณ์เวนจูรี กับอุปกรณ์กระจายอากาศที่ติดตั้งอุปกรณ์ Air Lift

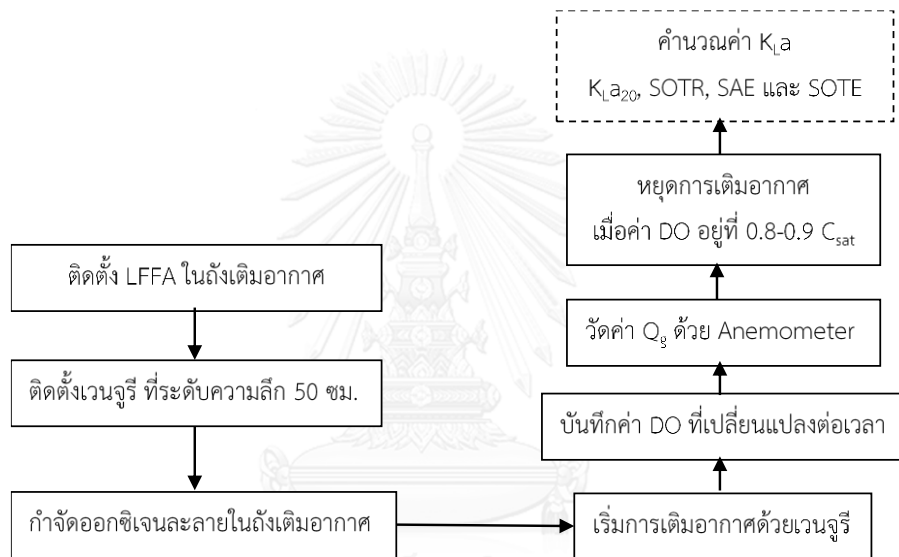
ตารางที่ 3-8 สรุปตัวแปรที่สนใจศึกษาในการทดลองที่ 5

	ตัวแปรที่ตรวจวัด	ตัวแปรที่วิเคราะห์	ผลลัพธ์ที่ต้องการ
การทดลองที่ 5 (K_La & Length)	<ul style="list-style-type: none"> - ค่า DO ที่เปลี่ยนแปลงต่อเวลา และระยะห่างจากจุดเติมอากาศ - อัตราการไหลของน้ำ (Q_w) - อัตราการไหลของอากาศ (Q_g) - ความดันน้ำขาเข้าเวนจูรี (P_{in}) - อุณหภูมิ น้ำ และอากาศ 	<ul style="list-style-type: none"> - K_La - ค่าพลังงาน (P, kW) 	<ul style="list-style-type: none"> - กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง K_La กับระยะห่างจากจุดเติมอากาศ (Length)

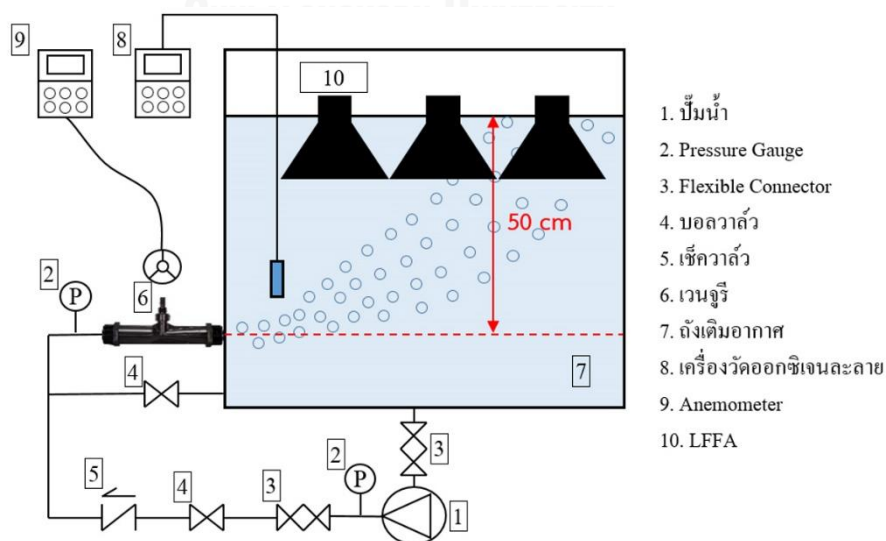
การทดลองที่ 6 ศึกษาการประยุกต์ใช้อุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว (LFFA) ร่วมกับอุปกรณ์เวนจูรี

ทำการติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว (LFFA) เพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เวนจูรี 3 ขนาดคือ 0.5 นิ้ว 1.0 นิ้ว และ 2.0 นิ้ว โดยใช้เครื่องสูบน้ำขนาด 1.1 กิโลวัตต์ และทำการวัดค่า K_La ของเวนจูรีที่เกิดขึ้นภายหลังการติดตั้ง LFFA และคำนวณค่าต่างๆดังนี้

- 1) ค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (K_{La20})
- 2) อัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (SOTR)
- 3) ประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน (SAE)
- 4) ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (SOTE)



รูปที่ 3-16 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองที่ 6



รูปที่ 3-17 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองที่ 6

จากนั้นใช้ข้อมูลจากผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเติมอากาศการติดตั้งอุปกรณ์เวนจูรีแบบธรรมดา และภายหลังการติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว (LFFA)

ตารางที่ 3-9 สรุปตัวแปรที่สนใจศึกษาในการทดลองที่ 6

	ตัวแปรที่ตรวจวัด	ตัวแปรที่วิเคราะห์	ผลลัพธ์ที่ต้องการ
การทดลองที่ 6 (LFFA)	<ul style="list-style-type: none"> - ค่า DO ที่เปลี่ยนแปลงต่อเวลา - อัตราการไหลของน้ำ (Q_w) - อัตราการไหลของอากาศ (Q_g) - ความดันน้ำขาเข้าเวนจูรี (P_{in}) - อุณหภูมิ น้ำ และอากาศ 	<ul style="list-style-type: none"> - K_La - ค่าพลังงาน (P, kW) 	<ul style="list-style-type: none"> - K_La_{20} - SOTR - SAE - SOTE (หลังการติดตั้ง LFFA)

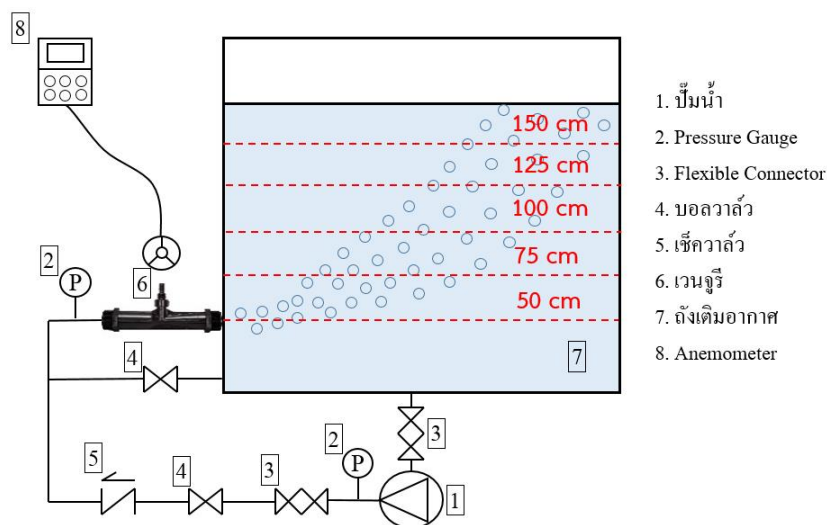


การทดลองที่ 7 สร้างสมการทำนายประสิทธิภาพการเติมอากาศของอุปกรณ์เวนจูรี

นำผลการศึกษาการเดินระบบอุปกรณ์เวนจูรีที่สภาวะต่างๆ มาสร้างสมการทำนายค่าอัตราส่วนการไหลของอากาศต่อน้ำ (Q_g/Q_w) และสร้างสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน ($K_L a_{20}$) เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ออกแบบระบบเติมอากาศ

1. สร้างสมการทำนายค่าอัตราส่วนการไหลของอากาศต่อน้ำ (Q_g/Q_w)

ทดลองศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่ออัตราส่วน Q_g/Q_w ที่ได้จากอุปกรณ์เวนจูรี 2 ตัวแปร คือ ความเร็วน้ำ (V_w) ขาเข้าเวนจูรี และระดับความลึกของการติดตั้งเวนจูรี (Depth) จากนั้นสร้างสมการทำนายอัตราส่วน Q_g/Q_w ในรูปฟังก์ชันของ V_w และ Depth



รูปที่ 3-18 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองที่ 7

ผลการทดลองที่คาดว่าจะได้รับจากการทดลองที่ 7 คือความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างการดูดอากาศต่อน้ำที่ไหลผ่านเวนจูรี (Q_g/Q_w) ความเร็วน้ำขาเข้าเวนจูรี (V_w) และระดับความลึกของการติดตั้งเวนจูรี (Depth) จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้สร้างสมการทำนายอัตราส่วน Q_g/Q_w ในรูปฟังก์ชันของ V_w และ Depth ดังสมการที่ 3.2 เพื่อใช้ทำนายประสิทธิภาพของเวนจูรีที่ได้หลังจากการติดตั้ง ที่ความเร็วน้ำขาเข้า และระดับความลึกต่างๆ

$$Q_g/Q_w = f^n(v_w, \text{Depth}) \quad (3.2)$$

จากนั้นนำผลการทดลองจากการทดลองที่ 4 ซึ่งทดสอบประสิทธิภาพเวนจูรีขนาด 2 นิ้ว ที่อัตราการไหลอากาศต่างๆ ระดับความลึกน้ำ 50, 100 และ 150 ซม. นำค่า $K_L a_{20}$ ที่คำนวณได้มาสร้างสมการทำนาย $K_L a_{20}$ ในรูปของฟังก์ชัน Q_g และ Depth ดังสมการที่ 3.3

$$K_L a_{20} = f^n(Q_g, \text{Depth}) \quad (3.3)$$

ตารางที่ 3-10 สรุปตัวแปรที่สนใจศึกษาในการทดลองที่ 7

	ตัวแปรที่ตรวจวัด	ตัวแปรที่วิเคราะห์	ผลลัพธ์ที่ต้องการ
การทดลองที่ 7 (Q_g)	<ul style="list-style-type: none"> - อัตราการไหลของน้ำ (Q_w) - อัตราการไหลของอากาศ (Q_g) - ความดันน้ำขาเข้าเวนจูรี (P_{in}) - ความลึกจุดเติมอากาศ (Depth) - อุณหภูมิ น้ำ และอากาศ 	<ul style="list-style-type: none"> - Q_g/Q_w - ความเร็ว น้ำ (V_w) - K_{La20} - Depth 	<ul style="list-style-type: none"> - สมการทำนาย $Q_g/Q_w = F_n(V_w, \text{Depth})$ - สมการทำนาย K_{La20}



บทที่ 4

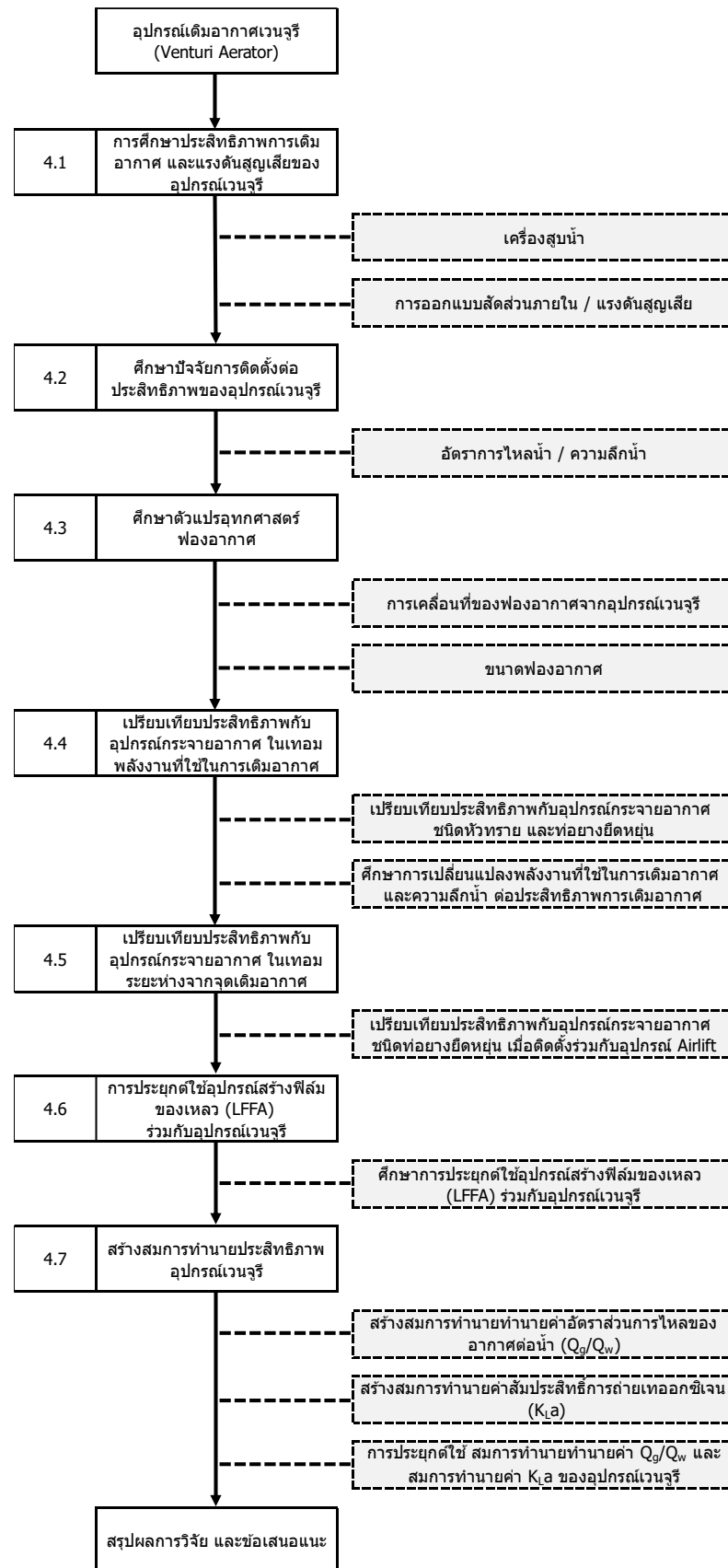
ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 การศึกษาประสิทธิภาพการเติมอากาศ และแรงดันสูญเสียของอุปกรณ์เวนจิวรี

อุปกรณ์เติมอากาศโดยทั่วไปที่ใช้ในงานเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ หรืองานบำบัดน้ำต่าง ๆ ในเชิงวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มักเลือกใช้อุปกรณ์กระจายอากาศ ซึ่งทำงานโดยการใช้เครื่องสูบลมอัดอากาศจากภายนอกผ่านหัวกระจายอากาศชนิดต่างๆ เช่น หัวทราย ท่อยาง เซรามิก หรือหัวเมมเบรน ซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงในการถ่ายเทออกซิเจนลงสู่น้ำ แต่ทว่าอุปกรณ์เติมอากาศแบบเวนจิวรีที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ มีหลักการทำงานที่แตกต่างออกไป โดยไม่ได้ขึ้นกับรูพรุนขนาดเล็กอย่างหัวกระจายอากาศ หรือประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องสูบลม ซึ่งอุปกรณ์เวนจิวรีแต่เดิมนั้นใช้เป็นอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของน้ำในท่อความดัน โดยอาศัยความแตกต่างของความดันในเส้นท่อ และความดัน ณ จุดคอคอดของเวนจิวรี ในการคำนวณหาอัตราการไหลของน้ำจากสมการพลังงาน ซึ่งอุปกรณ์เติมอากาศแบบเวนจิวรีประยุกต์ใช้หลักการนี้ โดยการเปิดช่องคอคอดอากาศ ณ จุดที่เป็นคอคอดของเวนจิวรี พร้อมทั้งปิดหน้าตัดคอคอดให้เล็กลงมาก จนกระทั่งน้ำที่บริเวณคอคอดมีความเร็วสูง และความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศภายนอก ทำให้มวลอากาศภายนอกถูกดูดลงมายังอุปกรณ์เวนจิวรี

จากหลักการทำงานของเวนจิวรีที่กล่าวในข้างต้น ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเวนจิวรีจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก 3 ปัจจัย คือ 1) เครื่องสูบน้ำ 2) การออกแบบอุปกรณ์เวนจิวรี และ 3) การติดตั้งอุปกรณ์เวนจิวรี โดยการติดตั้งเวนจิวรีแต่ละขนาดจะมีความเหมาะสมกับอัตราการไหลน้ำ แรงดันน้ำ ที่แตกต่างกันออกไป การออกแบบติดตั้งเวนจิวรีให้ได้ประสิทธิภาพในการทำงานสูง จึงต้องคำนึงถึงปัจจัยหลักเหล่านี้ เพื่อการเดินระบบเติมอากาศเวนจิวรีในแต่ละขนาดให้เหมาะสมกับการใช้งาน

การศึกษาในหัวข้อนี้จะใช้ตัวแปรหลักในการพิจารณาประสิทธิภาพคือ 1) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (K_La) 2) ค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (Standard Oxygen Transfer Rate, SOTR) 3) ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน (Standard Aeration Efficiency, SAE) 4) ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (Standard Oxygen Transfer Efficiency, SOTE) และ 5) อัตราการไหลอากาศเข้าสู่อุปกรณ์เวนจิวรี (Q_g) เป็นหลัก



รูปที่ 4-1 แผนภาพแสดงภาพรวมงานวิจัย

4.1.1 ทดสอบประสิทธิภาพการเติมอากาศของอุปกรณ์เวเนจิวรี

การทดลองในหัวข้อนี้ใช้เวเนจิวรีทั้งหมด 4 ขนาด คือขนาด 0.5 นิ้ว ขนาด 1.0 นิ้ว ขนาด 1.5 นิ้ว และขนาด 2.0 นิ้ว ใช้เครื่องสูบน้ำขนาด 1.1 กิโลวัตต์ ทดลองในถังเติมอากาศทรงยาว ขนาดกว้าง 50 เซนติเมตร ยาว 244 เซนติเมตร ความลึกน้ำ 70 เซนติเมตร โดยเดินเครื่องสูบน้ำเต็มกำลัง ดันน้ำผ่านเวเนจิวรีทุกขนาดโดยไม่มีการปรับอัตราไหลหรือเปลี่ยนแปลงแรงดันขาเข้าเวเนจิวรี ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4-1 และ 4-2

ตารางที่ 4-1 ค่าตัวแปรควบคุม และตัวแปรตามในการทดสอบประสิทธิภาพอุปกรณ์เวเนจิวรี

ขนาด เวเนจิวรี (นิ้ว)	แรงดันน้ำขา ออกจาก เครื่องสูบน้ำ (บาร์)	แรงดันน้ำ ขาเข้า เวเนจิวรี (บาร์)	อัตราไหล น้ำขาเข้า (ลิตร/นาที่)	ความเร็วน้ำ ที่หน้าตัด คอคอด (เมตร/วินาที)	อัตราไหล อากาศขาเข้า (ลิตร/นาที่)	พลังงานที่ใช้ ในการเติม อากาศ (วัตต์)
	P_{pump}	P_{inlet}	Q_w	V_w	Q_g	Power
0.5	2.00	1.90	22	19.22	7	1100
1.0	1.95	1.74	28	16.18	121	1100
1.5	1.90	1.60	110	14.50	144	1100
2.0	1.63	1.15	240	14.92	354	1100

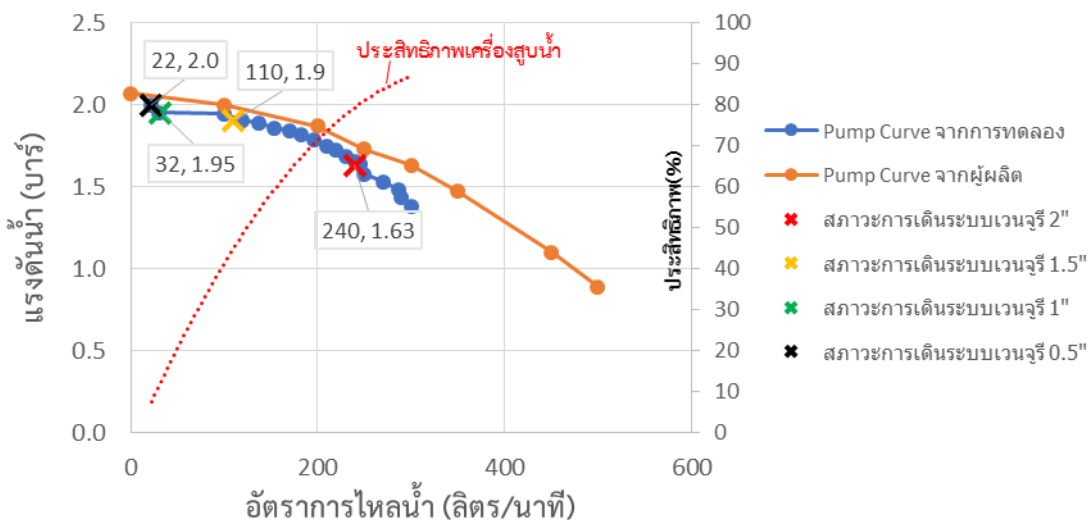
ตารางที่ 4-2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพอุปกรณ์เวเนจิวรี

ขนาด เวเนจิวรี (นิ้ว)	สัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทออกซิเจน (ชม. ⁻¹)	อัตราการถ่ายเท ออกซิเจนมาตรฐาน (กรัม-ออกซิเจน/ชม.)	ประสิทธิภาพ การเติมอากาศมาตรฐาน (กก.ออกซิเจน/กิโลวัตต์-ชม.)	ประสิทธิภาพการ ถ่ายเทออกซิเจน มาตรฐาน (%)
	$K_L a_{20}$	SOTR	SAE	SOTE
0.5	1.36	10.51	0.01	8.96
1.0	6.16	47.68	0.05	2.35
1.5	13.31	103.07	0.09	4.26
2.0	30.57	236.62	0.22	3.98

จากผลการสอบดังตารางที่ 4-2 พบว่าเวนจูรีขนาด 2 นิ้ว ให้อัตราการถ่ายเทออกซิเจนสูงสุด (SOTR) ที่ 236.62 กรัม-ออกซิเจน/ชั่วโมง รวมทั้งเมื่อพิจารณาพลังงานที่ใช้ในการเติมอากาศร่วมกับเวนจูรีขนาด 2 นิ้วก็ให้ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน (SAE) สูงสุดที่ 0.22 กิโลกรัม-ออกซิเจน/กิโลวัตต์-ชั่วโมง ซึ่งหากพิจารณาเพียงค่า SOTR และ SAE อาจสรุปได้ว่าเวนจูรีขนาด 2 นิ้ว มีประสิทธิภาพดีที่สุดในบรรดาเวนจูรีทั้ง 4 ขนาด ทั้งในด้านความเร็วในการถ่ายเทออกซิเจนและประสิทธิภาพในเชิงพลังงาน แต่ทว่าหากพิจารณาตัวแปรต่างๆในการเดินระบบจากตารางที่ 4-1 พบว่า เวนจูรีขนาด 2 นิ้ว มีอัตราไหลของน้ำ 240 ลิตร/นาที่ ในขณะที่ เวนจูรีขนาด 1/2 นิ้ว มีอัตราไหลของน้ำเพียง 22 ลิตร/นาที่ (10.9 เท่า) และเวนจูรีขนาด 2 นิ้ว สามารถดูดอากาศเข้ามาในระบบได้ 354 ลิตร/นาที่ ในขณะที่ เวนจูรีขนาด 0.5 นิ้ว สามารถดูดอากาศเข้ามาในระบบได้เพียง 7 ลิตร/นาที่ เท่านั้น (50.6 เท่า) ในขณะที่ใช้พลังงานในการเติมอากาศเท่ากันคือ 1.1 กิโลวัตต์ (เดินระบบด้วยเครื่องสูบน้ำตัวเดียวกัน) ด้วยเหตุนี้ทำให้เวนจูรีขนาด 0.5 นิ้ว มีประสิทธิภาพในการเติมอากาศต่อค่าพลังงานที่ใช้ต่ำมากเมื่อเทียบกับเวนจูรีขนาด 2 นิ้ว และกล่าวได้ว่าเครื่องสูบน้ำ 1.1 กิโลวัตต์ที่ใช้ในการทดลองนั้น มีขนาดไม่เหมาะสมกับเวนจูรี 0.5 นิ้ว รวมถึงเวนจูรีขนาด 1 และ 1.5 นิ้วด้วย แต่เหมาะสมกับการเดินระบบด้วยเวนจูรีขนาด 2 นิ้วที่สุด

4.1.2 ปัจจัยของเครื่องสูบน้ำ ต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์เวนจูรี

เมื่อพิจารณาสถานะที่เวนจูรีแต่ละขนาดเดินระบบเติมอากาศ ดังค่าในตารางที่ 4-1 เทียบกับ Pump Curve ของเครื่องสูบน้ำที่ใช้ในการทดลองนี้ (เครื่องสูบน้ำ Mitsubishi รุ่น WCM1105s ขนาด 1.1 กิโลวัตต์) ได้ผลดังรูปที่ 4-2



รูปที่ 4-2 กราฟแสดงอัตราไหลและแรงดันน้ำของการเดินระบบเวนจูรีขนาดต่างๆและ Pump Curve

จากรูปที่ 4-2 พบว่าสถานะการเดินระบบของเวนจูรีขนาด 2 นิ้ว ซึ่งอยู่ที่อัตราการไหลน้ำ 240 ลิตร/นาที แรงดันน้ำ 1.63 บาร์ ตกอยู่ในใกล้เคียงบริเวณกึ่งกลางของ Pump Curve จากข้อมูลของผู้ผลิตพอดี้ (Pump Curve Factory) ซึ่งเป็นจุดที่เหมาะสมในการเลือกใช้งานเครื่องสูบน้ำรุ่นนี้ เนื่องจากเดินระบบในย่านบริเวณกึ่งกลางของ Pump Curve เครื่องสูบน้ำจะมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง ในขณะที่เวนจูรีขนาด 1.5 นิ้ว 1 นิ้ว และ ½ นิ้ว มีสถานะการเดินระบบอยู่ในย่านปลายด้านซ้ายของ Pump Curve ซึ่งเป็นจุดที่เครื่องสูบน้ำชนิดนี้มีประสิทธิภาพต่ำ เนื่องจากเป็นสถานะการเดินระบบที่อัตราการไหลของน้ำต่ำแต่แรงดันน้ำสูง ในส่วนนี้จึงสรุปได้ว่าการเลือกใช้เครื่องสูบน้ำเพื่อติดตั้งกับอุปกรณ์เวนจูรี จะต้องรู้อัตราการไหลน้ำและแรงดันน้ำขาเข้าเวนจูรี รวมทั้งความดันสูญเสีย (Head loss) จากการเดินระบบท่อ เพื่อนำค่าอัตราไหลน้ำและแรงดันขาเข้าเวนจูรีร่วมกับแรงดันสูญเสียมาเลือก Pump Curve ที่เหมาะสมกับสถานะการเดินระบบนั้นๆ ซึ่งควรจะตกอยู่ในช่วงกึ่งกลางของ Pump Curve เพื่อเดินระบบในสถานะที่เครื่องสูบน้ำมีประสิทธิภาพการทำงานสูง

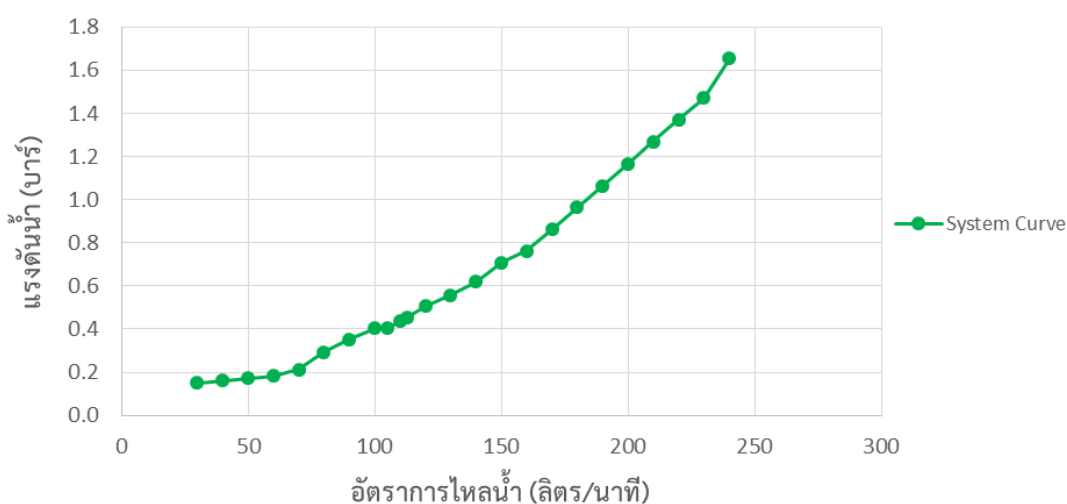
นอกจากการเลือกสถานะการเดินระบบให้ตกอยู่ในช่วงกึ่งกลางของ Pump Curve แล้ว เครื่องสูบน้ำซึ่งมีขนาดกำลังไฟฟ้าเท่ากันแต่มี Pump Curve ที่แตกต่างกัน ก็ทำให้สถานะการเดินระบบของอุปกรณ์เวนจูรีมีความแตกต่างกัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพที่ออกมาแตกต่างกันด้วยเช่นกัน โดยในส่วนของ การทดลองได้นำเครื่องสูบน้ำ 2 ตัว จากสองผู้ผลิตเครื่องสูบน้ำที่มีขนาดกำลังไฟฟ้าเท่ากันคือ

1) เครื่องสูบน้ำ Mitsubishi รุ่น WCM1105s ขนาด 1.1 กิโลวัตต์ และ 2) เครื่องสูบน้ำ Venz รุ่น VC150 ขนาด 1.1 กิโลวัตต์ ได้ผลทดสอบสถานะการเดินระบบดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 สถานะการเดินระบบเวนจูรีขนาด 2 นิ้ว จากเครื่องสูบน้ำ WCM1105s และ VC150

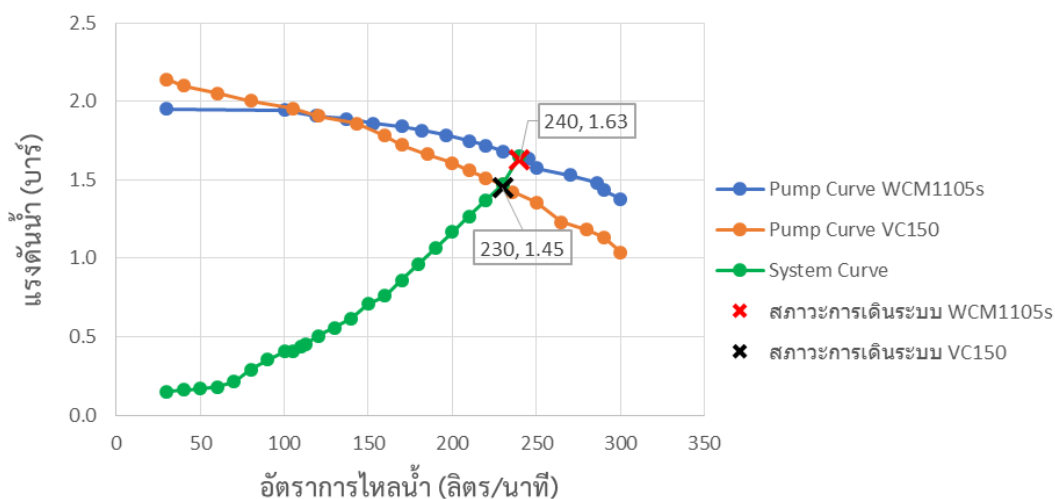
เครื่องสูบน้ำ	ขนาด เวนจูรี (นิ้ว)	แรงดันน้ำขา ออกจาก เครื่องสูบน้ำ (บาร์)	แรงดันน้ำขา เข้า เวนจูรี (บาร์)	อัตราการ ไหล น้ำขาเข้า (ลิตร/นาที่)	อัตราการ ไหลอากาศ ขาเข้า (ลิตร/นาที่)	พลังงานที่ใช้ ในการเติม อากาศ (วัตต์)
		P_{pump}	P_{inlet}	Q_w	Q_g	Power
WCM1105s	2	1.63	1.15	240	354	1100
VC150	2	1.45	1.00	230	329	1100

จากตารางที่ 4-3 พบว่าสถานะการเดินระบบอุปกรณ์เวนจูรีจากเครื่องสูบน้ำทั้งสองตัว มีความแตกต่างกันเล็กน้อย โดยเครื่องสูบน้ำ WCM1105s สามารถเดินระบบที่แรงดันและอัตราการไหลน้ำที่สูงกว่าเครื่องสูบน้ำ VC150 ทำให้สามารถดูดอากาศเข้าสู่ระบบได้มากกว่าในขณะที่ใช้กำลังไฟฟ้าเท่ากันที่ 1.1 กิโลวัตต์ โดยในส่วนนี้จะต้องพิจารณาจาก System Curve ของระบบ ซึ่งคือกราฟที่แสดงถึงแรงดันน้ำที่ระบบต้องการ ณ อัตราการไหลของน้ำต่างๆ โดยยิ่งอัตราการไหลของน้ำมาก ระบบยิ่งต้องการแรงดันน้ำที่สูงขึ้น ดังรูปที่ 4-3 โดยแรงดันน้ำของ System Curve คือแรงดันน้ำขาออกจากเครื่องสูบน้ำ ซึ่งเป็นพลังงานที่เครื่องสูบน้ำเพิ่มให้แก่ของเหลว ที่อัตราไหลน้ำต่างๆ



รูปที่ 4-3 กราฟ System Curve ของการเดินระบบด้วยอุปกรณ์เวนจูรีขนาด 2 นิ้ว

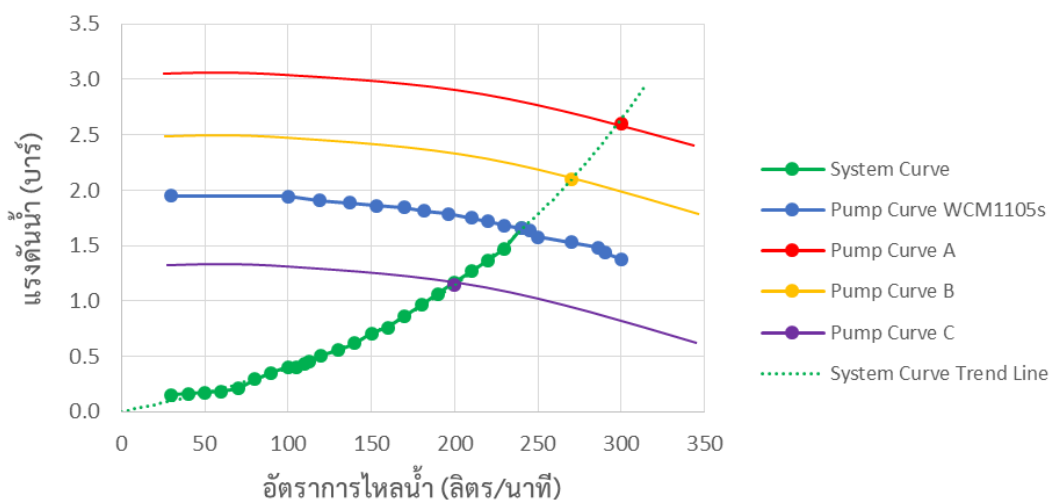
เมื่อพิจารณา System Curve ร่วมกับ Pump Curve จะสามารถเห็นความแตกต่างของสถานะการเดินระบบจากเครื่องสูบน้ำทั้งสองตัว ดังรูปที่ 4-4



รูปที่ 4-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง System Curve และ Pump Curve ของการเดินระบบอุปกรณ์เวนจูรีขนาด 2 นิ้ว ด้วยเครื่องสูบน้ำ WCM 1105s และ VC150

จากรูปที่ 4-4 พบว่าด้วยลักษณะเฉพาะตัวของ Pump Curve ที่แตกต่างกัน ตัดกับกราฟ System Curve ที่สถานะการเดินระบบแตกต่างกัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของเวนจูรีแตกต่างกันไปด้วย ทั้งนี้สามารถสรุปได้ว่าสถานะการเดินระบบของอุปกรณ์เวนจูรีทั้งในส่วนของการไหลและแรงดันน้ำ จะเป็นไปตาม System Curve และหาก Pump Curve ของเครื่องสูบน้ำตัดกับ System Curve ที่จุด Operating Point ใดๆ สถานะการเดินระบบทั้งอัตราการไหลและแรงดันน้ำจะเป็นไปตาม System Curve ที่จุด Operating Point นั้นๆ และหากเครื่องสูบน้ำที่มีขนาดกำลังไฟฟ้าเท่ากัน แต่ตัวหนึ่งมีลักษณะเฉพาะตัวของกราฟ Pump Curve ที่สามารถตัดกับกราฟ System Curve ณ จุดที่มีอัตราไหลและแรงดันน้ำสูงกว่า เครื่องสูบน้ำตัวนั้นก็จะมีประสิทธิภาพในการเดินระบบสูงกว่าเครื่องสูบน้ำอีกตัวหนึ่งที่ Pump Curve ตัดกับกราฟ System Curve ณ จุดที่มีอัตราไหลและแรงดันน้ำต่ำกว่า ในที่นี้สามารถสรุปได้ว่าเครื่องสูบน้ำ WCM 1105s สามารถเดินระบบได้ประสิทธิภาพสูงกว่า VC150

ในทางกลับกัน หากเลือกเครื่องสูบน้ำที่มีความแรงมากกว่า WCM 1105s ขึ้นไปอีก (สมมติเครื่องสูบน้ำ A และ B) จะพบความสัมพันธ์ระหว่าง System Curve และ Pump Curve เป็นดังรูปที่ 4-5



รูปที่ 4-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง System Curve และ Pump Curve ของการเดินระบบ อุปกรณ์เวนจูรีขนาด 2 นิ้ว ด้วยขนาดของเครื่องสูบน้ำที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4-5 สามารถกล่าวได้ว่า สถานะการเดินระบบทั้งอัตราการไหลและแรงดันของน้ำจะเป็นไปตาม System Curve โดยเมื่อนำเครื่องสูบน้ำแต่ละขนาดมาต่อเข้ากับระบบ จะทำให้เกิดสถานะการเดินระบบที่อัตราการไหลและแรงดันของน้ำค่าหนึ่ง ณ จุดที่ Pump Curve ของเครื่องสูบน้ำนั้นๆ ตัดกับ System Curve จึงกล่าวได้ว่าเครื่องสูบน้ำสองตัวที่ขนาดแตกต่างกัน ไม่สามารถมีสถานะการเดินระบบที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากันแต่แรงดันน้ำต่างกันได้ รวมถึงไม่สามารถมีสถานะการเดินระบบที่แรงดันน้ำเท่ากันแต่อัตราการไหลของน้ำต่างกันได้ด้วยเช่นกัน ดังนั้นหากเลือกใช้เครื่องสูบน้ำที่ขนาดใหญ่กว่า WCM1105s ตาม Pump Curve A และ B ในรูปที่ 4-5 จะพบว่า Pump Curve ขยับขึ้นไปตัด System Curve ในตำแหน่งที่สูงขึ้น ทำให้สถานะการเดินระบบของเครื่องสูบน้ำ A และ B จะมีอัตราการไหลและแรงดันน้ำที่สูงกว่าเครื่องสูบน้ำ WCM1105s และด้วยเหตุผลเดียวกัน หากเลือกเครื่องสูบน้ำที่มีขนาดเล็กกว่า WCM1105s คือเครื่องสูบน้ำ C ในที่รูปที่ 4-5 จะพบว่าเส้นกราฟ Pump Curve C ขยับลงไปตัด System Curve ในตำแหน่งที่ต่ำกว่า Pump Curve WCM1105s ทำให้สถานะการเดินระบบของเครื่องสูบน้ำ C จะมีอัตราการไหลและแรงดันน้ำที่ต่ำกว่าเครื่องสูบน้ำ WCM1105s

ทั้งนี้จากรูปที่ 4-5 ไม่สามารถสรุปได้ว่าเครื่องสูบน้ำ A เหมาะสมกับการเดินระบบเวนจูรีขนาด 2 นิ้ว มากกว่าเครื่องสูบน้ำ B C หรือ WCM1105s แต่ขึ้นอยู่กับลักษณะการออกแบบเวนจูรี ว่าต้องการให้มีอัตราการไหลผ่านเวนจูรีปริมาณเท่าใด ซึ่งแรงดันน้ำที่ระบบต้องการจะเป็นไปตาม

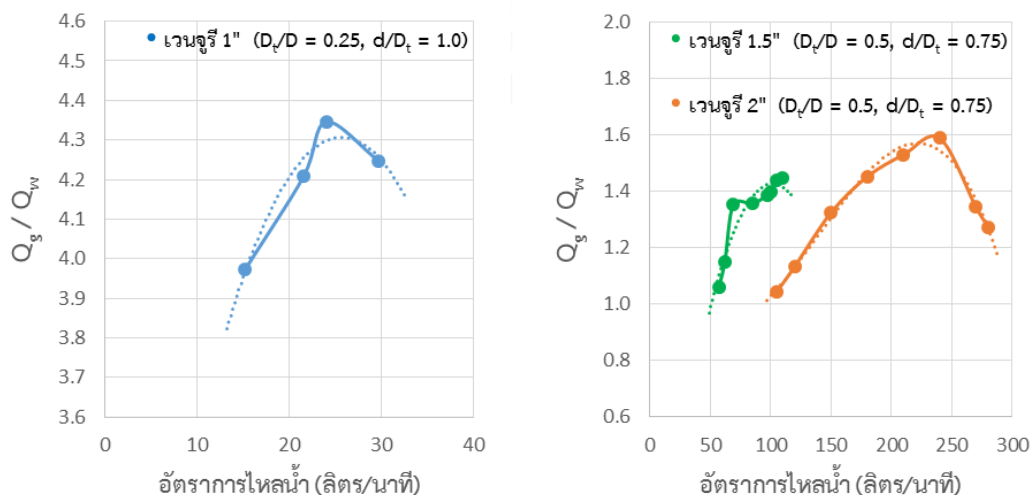
System Curve จากนั้นจึงเลือกเครื่องสูบน้ำที่มีสภาวะการเดินระบบตามอัตราการไหลและแรงดันน้ำนั้น ตกอยู่บริเวณกึ่งกลางของ Pump Curve เพื่อให้เครื่องสูบน้ำมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง

4.1.3 ปัจจัยของการออกแบบสัดส่วนภายใน และแรงดันสูญเสียของอุปกรณ์เวนจูลี

1. การออกแบบสัดส่วนภายในของอุปกรณ์เวนจูลี

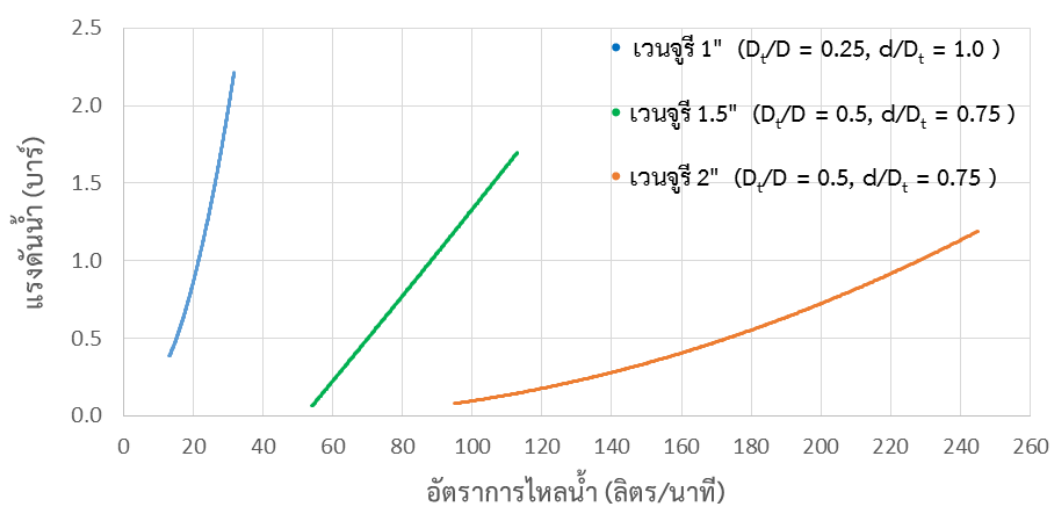
ขนาดสัดส่วนภายในอุปกรณ์เวนจูลีนั้นส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดอากาศของอุปกรณ์ โดยขนาดสัดส่วนภายในของเวนจูลีที่พิจารณาคือ หน้าตัดทางน้ำเข้า (D) ขนาดหน้าตัดคอคอด (D_c) และขนาดหน้าตัดช่องดูดอากาศ (d) ซึ่งอุปกรณ์เวนจูลีที่ออกแบบมาในสัดส่วนที่เหมาะสม จะมีอัตราส่วนการดูดอากาศต่ออัตราการไหลน้ำที่ผ่านเวนจูลี (Q_g/Q_w) ในสัดส่วนที่สูง ณ อัตราการไหลของน้ำที่เหมาะสม

จากการทดลองด้วยเวนจูลีขนาดมาตรฐานที่ขายตามท้องตลาด พบว่า ณ สภาวะการเดินระบบที่มีอัตราการไหลของน้ำต่ำในช่วง 15 – 30 ลิตรต่อนาที เวนจูลีขนาด 1 นิ้ว ที่มีอัตราส่วนขนาดหน้าตัดคอคอด ต่อหน้าตัดทางน้ำเข้า (D_c/D) เท่ากับ 0.25 และขนาดหน้าตัดช่องดูดอากาศ ต่อขนาดหน้าตัดคอคอด (d/D_c) เท่ากับ 1.0 ให้อัตราส่วนการดูดอากาศต่ออัตราการไหลน้ำที่ผ่านเวนจูลี (Q_g/Q_w) ในสัดส่วนที่สูงอยู่ในช่วง 3.9 – 4.3 แต่ทว่าหากอัตราการไหลในระบบเพิ่มสูงขึ้น แนวโน้มของอัตราส่วน Q_g/Q_w จะลดลง ดังรูปที่ 4-6



รูปที่ 4-6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำ (Q_w) ขาเข้าอุปกรณ์เวนจูลี และอัตราส่วนการดูดอากาศต่ออัตราไหลน้ำผ่านเวนจูลี (Q_g/Q_w) ของเวนจูลีขนาด 1, 1.5 และ 2 นิ้ว

หากเปรียบเทียบอัตราส่วน Q_g/Q_w ของเวนจูรีทั้งสามขนาดในรูปที่ 4-7 จะพบว่าค่า Q_g/Q_w ของเวนจูรีขนาด 1.5 และ 2 นิ้ว ช่วงในช่วง 1.0 ถึง 1.6 ซึ่งน้อยกว่าอัตราส่วน Q_g/Q_w ของเวนจูรีขนาด 1 นิ้ว ประมาณสามเท่า แต่ทว่าการออกแบบคอคอดเวนจูรี (D_t) ให้มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับหน้าตัดทางน้ำเข้า (D) ซึ่ง D_t/D ของเวนจูรีขนาด 1 นิ้ว มีอัตราส่วน 0.25 ส่งผลให้ต้องการแรงดันขาเข้าของน้ำสูงดังรูปที่ 4-7 แม้จะสามารถดูดอากาศเข้าระบบได้ในปริมาณมากเมื่อเทียบกับอัตราการไหลน้ำที่ผ่านเข้าไป แต่ก็ต้องแลกมาด้วยการสิ้นเปลืองพลังงานมากเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้น เนื่องจากหน้าตัดถูกกลดลงเหลือเพียงหนึ่งในสี่จากทางน้ำเข้า



รูปที่ 4-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำ (Q_w) ขาเข้าอุปกรณ์เวนจูรี และแรงดันน้ำขาเข้าเวนจูรี ของเวนจูรีขนาด 1, 1.5 และ 2 นิ้ว

ด้วยเหตุผลข้างต้นการออกแบบเวนจูรีเพื่อรองรับกับระบบที่มีอัตราการไหลของน้ำสูงขึ้นอยู่ในช่วง 60 ถึง 250 ลิตรต่อนาที ของเวนจูรีขนาด 1.5 และ 2 นิ้ว ที่มีอัตราส่วน D_t/D เท่ากับ 0.5 จะมีความเหมาะสมกว่าเนื่องจากทำให้ระบบต้องการแรงดันน้ำไม่มากนัก อยู่ในช่วง 0.2 ถึง 1.6 บาร์ แต่ทว่าในการทดลองนี้ไม่สามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วนหน้าตัด D_t/D และ d/D_t ที่ดีที่สุดควรจะเป็นเท่าใด เนื่องจากข้อจำกัดที่จะต้องใช้เวนจูรีขนาดมาตรฐานที่ขายตามท้องตลาดในการทดลอง จึงสามารถสรุปได้เบื้องต้นว่าจากการออกแบบเวนจูรีเพื่อให้ได้ อัตราส่วน Q_g/Q_w ที่สูงนั้น จะต้องคำนึงถึงอัตราการไหลและแรงดันที่เหมาะสมกับการใช้งานด้วย โดยเครื่องสูบน้ำชนิด End Suction Centrifugal Pump ขนาดทั่วไปตามท้องตลาดจะมีแรงดันน้ำที่นิยมใช้งานอยู่ในช่วง 2 ถึง 3 บาร์ ซึ่งย่านอัตราการไหลต่ำสามารถใช้เวนจูรีที่มีการบีบหน้าตัดเล็กลงมากที่ D_t/D เท่ากับ 0.25 ได้ แต่ในย่านอัตราการไหลที่สูงขึ้น จำเป็นต้องขยายการบีบหน้าตัดที่คอคอดขึ้นเป็น D_t/D เท่ากับ 0.5 หรือมากขึ้นกว่านั้นที่

อัตราการไหลสูงขึ้นไป เพื่อลดแรงดันที่ใช้ในการเดินระบบไม่ให้สูงจนเกินไป สอดคล้องกับงานวิจัยของ Baylar และคณะ (2010) ที่แนะนำอัตราส่วน D_t/D ไว้สองค่าคือ 0.5 และ 0.75 โดยอัตราส่วนที่ 0.5 จะเหมาะสมกับย่านอัตราการไหลที่มีค่า Reynolds numbers ที่ต่ำกว่าอัตราส่วนการบีบหน้าตัด 0.75 หรือกล่าวได้ว่าที่อัตราส่วนการบีบหน้าตัด 0.5 เหมาะกับอัตราการไหลที่ต่ำกว่าอัตราส่วนการบีบหน้าตัด 0.75 สรุปได้ดังตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 สัดส่วนภายในอุปกรณ์เวนจิวรี และสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสม

ขนาดเวนจิวรี (D)	อัตราส่วนขนาดหน้าตัดคอคอด (D_t) ต่อหน้าตัดทางน้ำเข้า (D)	ขนาดหน้าตัดช่องดูดอากาศ (d) ต่อขนาดหน้าตัดคอคอด (D_t)	ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ด้านขาเข้าเวนจิวรีที่เหมาะสม	หมายเหตุ
	D_t/D	d/D_t	Re_{inlet}	
1.0” (23.5 mm.)	0.25	1.0	17,000 – 33,000	เวนจิวรีขนาดมาตรฐานตามท้องตลาด
1.5” (30.3 mm.)	0.50	0.75	63,000 – 96,000	
2.0” (39.3 mm.)	0.50	0.75	70,000 – 188,000	
42 mm.	0.50	0.57	70,000 – 180,000	Baylar และคณะ (2010)
54 mm.	0.50	0.44	80,000 – 200,000	
42 mm.	0.75	0.38	180,000 – 370,000	
54 mm.	0.75	0.30	200,000 – 440,000	

2. แรงดันสูญเสียของอุปกรณ์เวนจิวรี

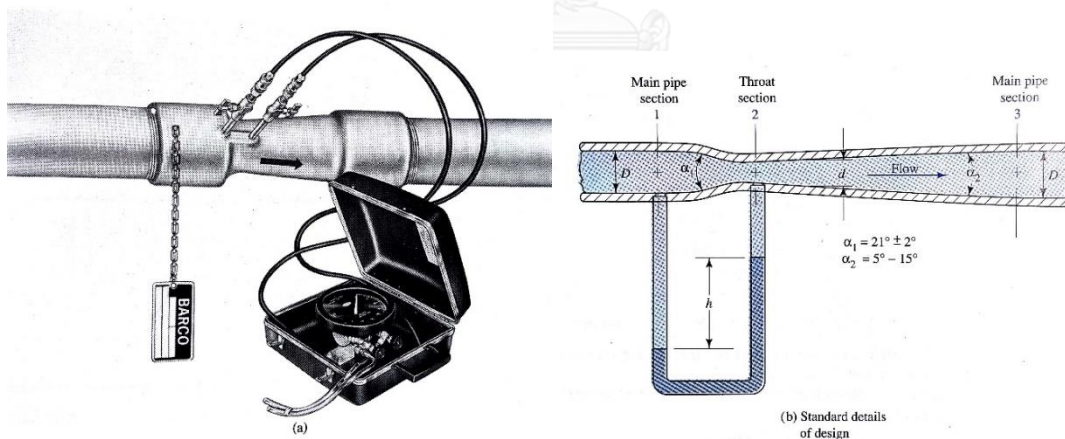
ผลทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความดัน (Minor loss coefficients) ของเวนจิวรีทั้งหมด 4 ขนาด คือ ขนาด 2 นิ้ว, 1.5 นิ้ว, 1 นิ้ว และ ½ นิ้ว โดยการปิดช่องดูดอากาศของเวนจิวรี จากนั้นวัดค่าความแตกต่างระหว่างความดันขาเข้า (P_{in}) ความดันขาออก (P_{out}) และอัตราการไหลของน้ำขาเข้าอุปกรณ์ (Q_w) เพื่อคำนวณหาค่าแรงดันสูญเสียเมื่อน้ำไหลผ่านอุปกรณ์เวนจิวรีดังสมการที่ 4.1

และความเร็วน้ำที่ไหลผ่านคอคอของเวนจูรี (v_t) เพื่อใช้คำนวณสัมประสิทธิ์การสูญเสียความดัน (k) ดังสมการที่ 4.2

$$h_L = P_{in} - P_{out} \quad (4.1)$$

$$k = \frac{h_L * 2g}{v_t^2} \quad (4.2)$$

ลักษณะการติดตั้งเวนจูรีเพื่อใช้เป็นอุปกรณ์เติมอากาศนั้นจะแตกต่างกับการติดตั้งอุปกรณ์เวนจูรีที่ใช้วัดอัตราการไหลในเส้นท่อ โดยการติดตั้งเวนจูรีเพื่อใช้ในการเติมอากาศนั้นด้านปลายขาออกของอุปกรณ์จะต่อเข้ากับถังเติมอากาศขนาดใหญ่ซึ่งมีลักษณะเป็นถังเปิดสู่บรรยากาศ ทำให้แรงดันด้านขาออกของเวนจูรี (P_{out}) เท่ากับศูนย์ ในขณะที่อุปกรณ์เวนจูรีซึ่งใช้วัดอัตราการไหลจะถูกติดตั้งวางในแนวท่อความดันเพื่อวัดความแตกต่างของแรงดัน ณ บริเวณท่อขาเข้า (จุดที่ 1) และบริเวณคอคอของเวนจูรี (จุดที่ 2) ดังรูปที่ 4-8 เพื่อนำไปคำนวณอัตราการไหลในท่อความดัน และแรงดันด้านขาออกของเวนจูรี (P_{out}) จะไม่เท่ากับศูนย์เนื่องจากด้านปลายของอุปกรณ์ไม่ได้ต่อเข้ากับถังที่เปิดสู่บรรยากาศ



รูปที่ 4-8 ลักษณะอุปกรณ์เวนจูรีที่ใช้ตรวจวัดอัตราการไหลในเส้นท่อ
ที่มา: (Mott, 1994)

ดังนั้นการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความดันของอุปกรณ์เติมอากาศเวนจูรี นอกจากจะต้องปิดช่องดูดอากาศที่คอคอของเวนจูรีแล้ว ยังจะต้องลดหน้าตัดท่อขาออกต่อจากเวนจูรีให้เล็กกว่าหน้าตัดคอคอของเวนจูรี เพื่อให้เกิดการอันของแรงดันน้ำก่อนที่จะไหลออกสู่ถังเติมอากาศซึ่งมีแรงดันเป็นศูนย์ ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความดัน (Minor loss coefficients)

ขนาดเวนจูรี (นิ้ว)	ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความดัน (Minor loss coefficients)
	k
2	0.20
1.5	0.41
1	0.19
0.5	0.31

ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความดัน (Minor loss coefficients) ของเวนจูรีทั้ง 4 ขนาดดังตารางที่ 4-6 เหมาะสำหรับนำไปใช้คำนวณแรงดันสูญเสียจากอุปกรณ์เดิมอากาศเวนจูรีในกรณีที่ตั้งตั้งขวางในท่อความดัน ซึ่งแรงดันด้านขาออกของเวนจูรีไม่เท่ากับศูนย์ ซึ่งในกรณีที่ต้องการทราบค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความดันของเวนจูรีขนาดอื่นหรือมีส่วนภายในแตกต่างจากเวนจูรีที่ใช้ในการทดลองนี้ สามารถคำนวณได้จากผลรวมของค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความดันการลดพื้นที่หน้าตัดที่ลงทีละน้อย (Gradual Contraction) และการขยายพื้นที่หน้าตัดที่ขึ้นทีละน้อย (Gradual Enlargement) ดังสมการที่ 4.4

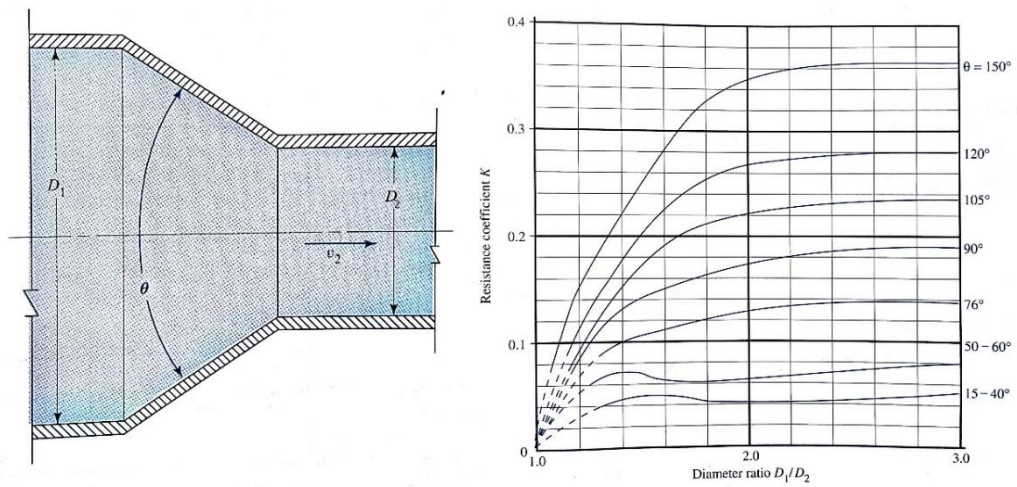
$$h_L = \sum k * \frac{v_t^2}{2g} \quad (4.3)$$

$$\text{โดยที่} \quad \sum k = k_{venturi} = k_{Contraction} + k_{Enlargement} \quad (4.4)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความดันการลดพื้นที่หน้าตัดที่ลงทีละน้อย (Gradual Contraction) และการขยายพื้นที่หน้าตัดที่ขึ้นทีละน้อย (Gradual Enlargement) สามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน้าตัด และองศาภายใน ดังรูปที่ 4-9 และ 4-10 โดยสามารถนำมาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความดันที่ได้จากการทดลอง ดังตารางที่ 4-6

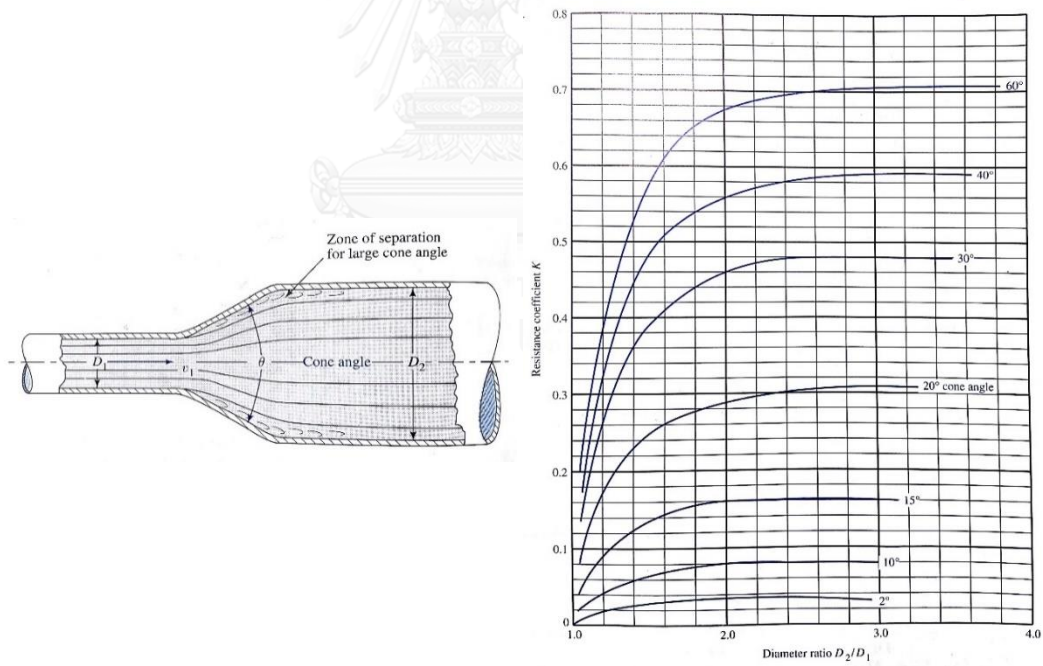
ตารางที่ 4-6 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความดัน (Minor loss coefficients)

ขนาดเวนจูรี (นิ้ว)	ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความดัน จากการทดลอง	ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความดัน จากการใช้กราฟความสัมพันธ์	ความแตกต่าง
	k	$k_{Contraction} + k_{Enlargement}$	%
2	0.20	0.44	+ 120%
1.5	0.41	0.17	- 58.5%
1	0.19	0.16	- 15.8%
0.5	0.31	0.16	- 48.4%



รูปที่ 4-9 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความดันการลดพื้นที่หน้าตัดท่อลงทีละน้อย
(Gradual Contraction)

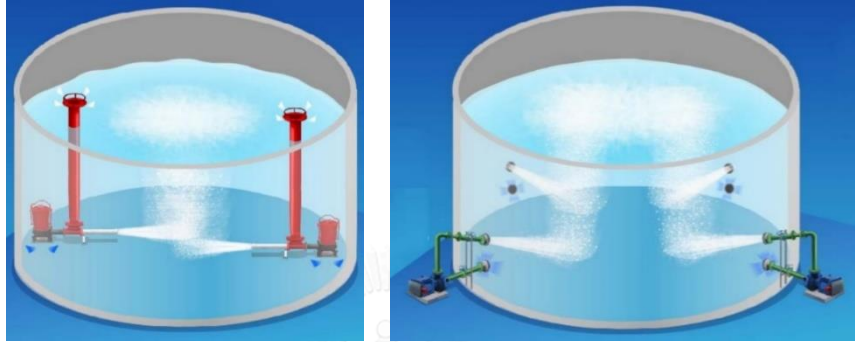
ที่มา: (Mott, 1994)



รูปที่ 4-10 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความดันการขยายพื้นที่หน้าตัดท่อขึ้นทีละน้อย
(Gradual Enlargement)

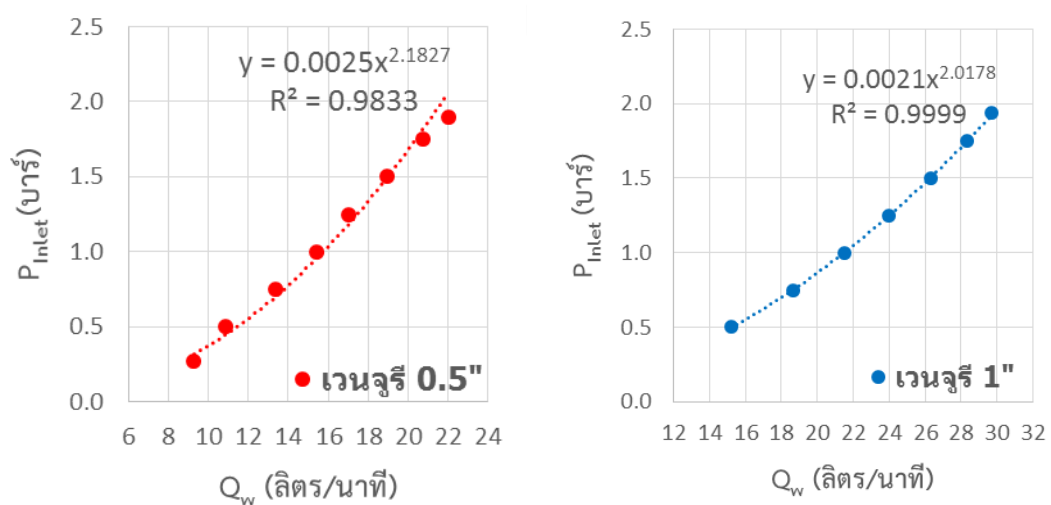
ที่มา: (Mott, 1994)

อย่างไรก็ตามการใช้งานอุปกรณ์เวนจรีเพื่อการเติมอากาศ โดยทั่วไปจะติดตั้งเวนจรีต่อเข้ากับเครื่องสูบน้ำสูบน้ำแบบจุ่ม (Submersible Pump) และติดตั้งไว้ใต้น้ำ อีกแบบหนึ่งคือการติดตั้งเวนจรีไว้ภายนอกถังเติมอากาศและใช้เครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่ง (Centrifugal Pump) ในการสูบน้ำหมุนเวียนจากถังเติมอากาศเข้าสู่เวนจรี ไม่ได้ติดตั้งขวางในท่อความดันแบบเวนจรีที่ใช้วัดอัตราการไหล ดังรูปที่ 4-11

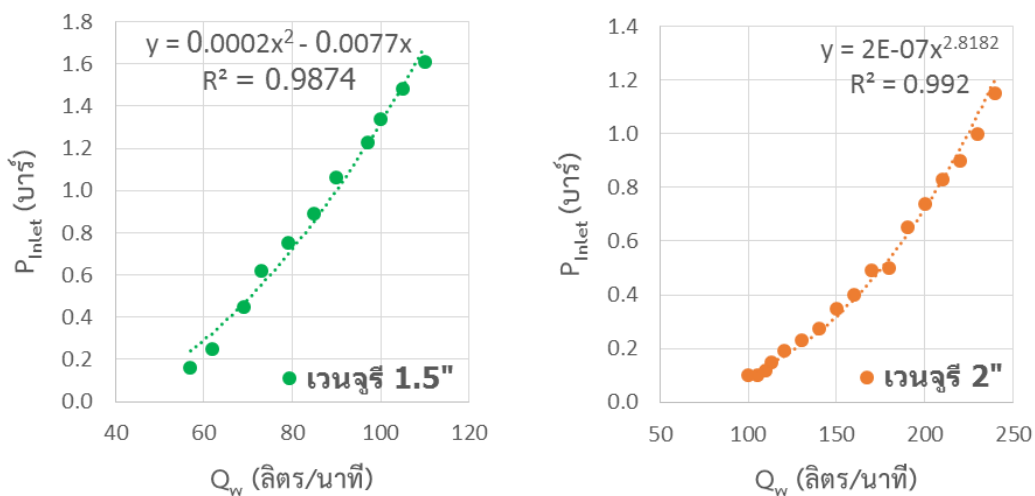


รูปที่ 4-11 การติดตั้งอุปกรณ์เติมอากาศเวนจรีแบบติดตั้งใต้น้ำ และติดตั้งภายนอกถังเติมอากาศ ที่มา : (กระทรวงพลังงาน, 2552)

ดังนั้นการติดตั้งเวนจรีเพื่อเติมอากาศในลักษณะดังกล่าว จึงต้องการแรงดันน้ำด้านขาเข้าเวนจรีที่แตกต่างออกไปตามขนาดของเวนจรี และอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านหัวเวนจรีขนาดนั้นๆ โดยจากการทดลองได้กราฟความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำ (Q_w) และแรงดันน้ำขาเข้าเวนจรี (P_{inlet}) ที่ระดับความลึกน้ำ 50 เซนติเมตร ของเวนจรีขนาด 0.5", 1.0", 1.5" และ 2.0" ดังรูปที่ 4-12 และ 4-13



รูปที่ 4-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำ (Q_w) ขาเข้าอุปกรณ์เวนจรีและแรงดันน้ำขาเข้าเวนจรี (P_{inlet}) ของเวนจรีขนาด 0.5 และ 1.0 นิ้ว ที่ระดับความลึกน้ำ 50 เซนติเมตร



รูปที่ 4-13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำ (Q_w) ขาเข้าอุปกรณ์เวนจรีและแรงดันน้ำขาเข้าเวนจรี (P_{inlet}) ของเวนจรีขนาด 1.5 และ 2.0 นิ้ว ระดับความลึกน้ำ 50 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4-12 และ 4-13 พบว่าอัตราการไหลของน้ำและความดันขาเข้าอุปกรณ์เวนจรีมีลักษณะแปรผันตรง กล่าวได้ว่าเมื่ออัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้น แรงดันสูญเสียที่เกิดจากความเสียดทาน และการลดหน้าตัดภายในเวนจรี ส่งผลให้ระบบต้องการแรงดันน้ำขาเข้าเวนจรีที่มากขึ้น เป็นไปตามสมการพลังงานของเบอร์นูลลี (Bernoulli's Equation) โดยจากกราฟความสัมพันธ์ สามารถสร้างสมการทำนายแรงดันน้ำขาเข้า (P_{inlet}) ที่ระบบต้องการ จากอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านหัวเวนจรี (Q_w) ที่ระดับความลึกน้ำ 50 เซนติเมตร ของเวนจรีทั้งสี่ขนาดได้ดังตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-7 สมการทำนายแรงดันน้ำขาเข้าของเวนจรีขนาด 0.5, 1, 1.5 และ 2 นิ้ว

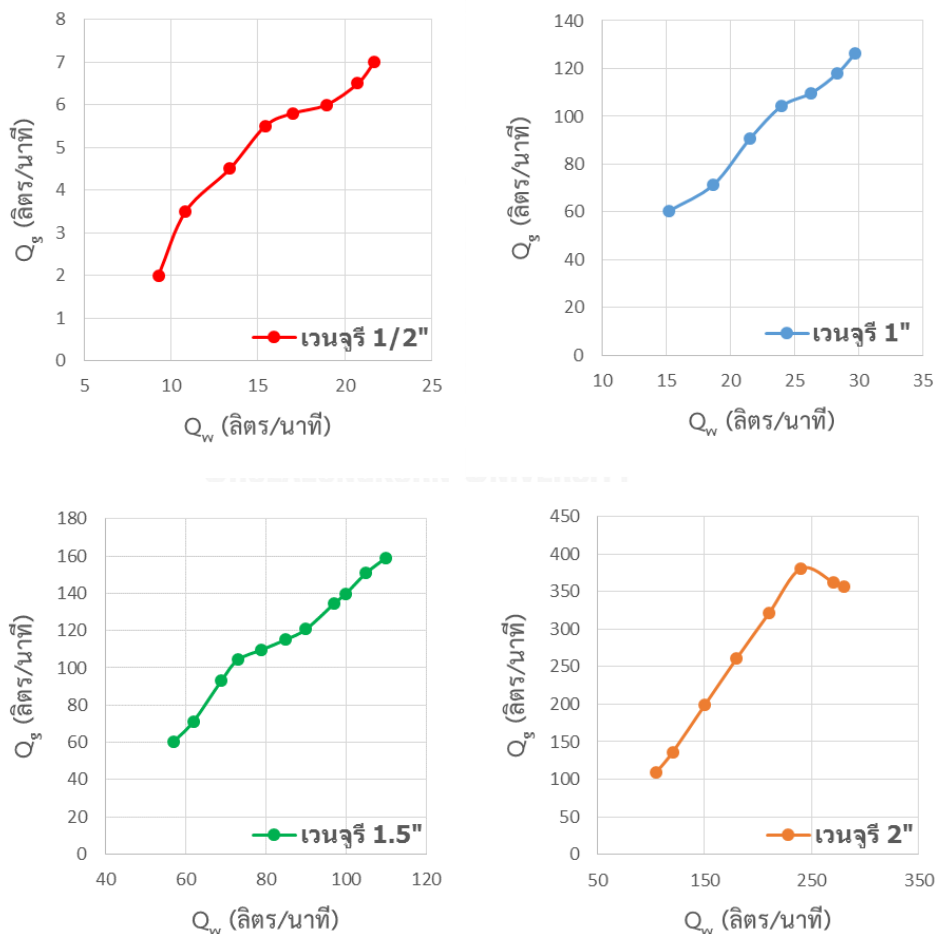
ขนาดเวนจรี (นิ้ว)	สมการ	อัตราไหลของน้ำที่ใช้ในการทดลอง (ลิตร/นาที)	แรงดันขาเข้าเวนจรี (บาร์)	ระดับความลึกน้ำ (เซนติเมตร)	ลักษณะน้ำ
0.5	$P_{inlet} = 0.0025Q_w^{2.1827}$	9 - 21	0.3 - 1.9	50	น้ำประปา
1	$P_{inlet} = 0.0021Q_w^{2.0178}$	15 - 30	0.5 - 1.9	50	น้ำประปา
1.5	$P_{inlet} = 0.0002Q_w^2 - 0.0077Q_w$	57 - 110	0.2 - 1.6	50	น้ำประปา
2	$P_{inlet} = 2E-07Q_w^{2.8182}$	105 - 250	0.2 - 1.2	50	น้ำประปา

4.2 ศึกษาปัจจัยการติดตั้ง ต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์เวนจูรี

การติดตั้งอุปกรณ์เวนจูรีมี 2 ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการดูดอากาศของอุปกรณ์ ได้แก่ 1) อัตราการไหลของน้ำที่เลือกใช้ และ 2) ระดับความลึกการติดตั้งอุปกรณ์เวนจูรี โดยทั้งสองปัจจัยนี้จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องคำนึงถึงในการออกแบบติดตั้งอุปกรณ์เวนจูรี เนื่องจากเป็นหัวใจหลักที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์

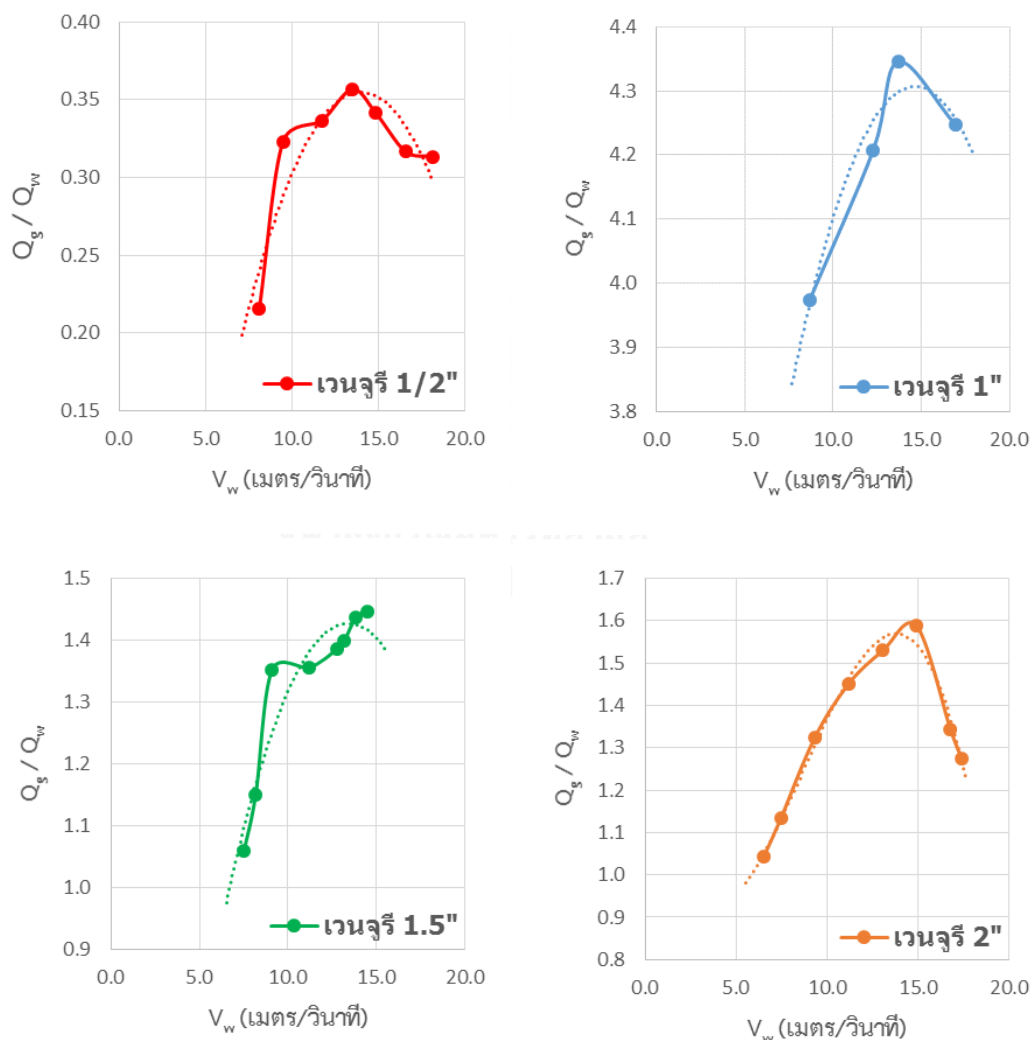
4.2.1 อัตราการไหลของน้ำต่อประสิทธิภาพอุปกรณ์เวนจูรี

เนื่องจากเวนจูรีเป็นอุปกรณ์ที่อาศัยหลักการความเปลี่ยนแปลงของความดันน้ำที่ลดลงต่ำกว่าความดันบรรยากาศภายในหน้าตัดของอุปกรณ์ เพื่อดูดอากาศจากภายนอกเข้าสู่ระบบ การเพิ่มอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านเวนจูรี จึงเท่ากับเป็นการเพิ่มความเร็วของน้ำภายในหน้าตัดของอุปกรณ์ ส่งผลให้เกิดความดันติดลบมากขึ้น ณ จุดคอขวดของเวนจูรี อากาศภายนอกจึงถูกดูดเข้าสู่ระบบมากขึ้น แปรผันตรงกับอัตราการไหลของน้ำที่เพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูป 4-14



รูปที่ 4-14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำ (Q_w) ขาเข้าอุปกรณ์เวนจูรี และ อัตราไหลอากาศเข้าเวนจูรี (Q_g) ของเวนจูรีขนาด 0.5, 1, 1.5 และ 2 นิ้ว

จากผลการทดลองของเวนจูลีขนาด 2 นิ้ว ในรูปที่ 4-14 พบว่า อัตราการไหลอากาศเข้าสู่เวนจูลี (Q_g) เพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับอัตราการไหลของน้ำ (Q_w) จนเมื่ออัตราการไหลน้ำเพิ่มขึ้นสูงกว่า 240 ลิตร/นาที อัตราการไหลอากาศเข้าเวนจูลีจะเริ่มลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากความดันติดลบที่บริเวณหน้าตัดคอขวด สามารถมีค่าความดันติดลบได้สูงสุดเท่ากับ 10 เมตร-น้ำ ตามความดันบรรยากาศโดยรอบ 1 atm ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของความเร็วน้ำภายในเวนจูลี เมื่อสูงขึ้นเกินช่วง 12 – 15 เมตร/วินาที จะไม่สามารถสร้างความดันติดลบได้มากกว่า 10 เมตร-น้ำ และแรงดันน้ำขาเข้าที่สูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราไหลน้ำ จะส่งผลให้ความดันที่หน้าตัดคอขวดติดลบน้อยลง อัตราไหลอากาศจึงเข้าสู่ระบบได้น้อยลง เมื่อเทียบเป็นอัตราส่วนของน้ำที่ไหลผ่านเวนจูลีไป ดังรูปที่ 4-15



รูปที่ 4-15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วน้ำที่คอขวด (V_w) ขาเข้าอุปกรณ์เวนจูลี และ อัตราส่วนการดูดอากาศต่ออัตราไหลน้ำที่ผ่านเวนจูลี (Q_g/Q_w) ของเวนจูลี 0.5, 1, 1.5 และ 2 นิ้ว

จากรูปที่ 4-15 อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลอากาศและอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านเข้าเวนจูรี (Q_g/Q_w) จะเพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับความเร็วน้ำที่คอคอดของเวนจูรี (V_w) จนความเร็วน้ำเพิ่มขึ้นสูงถึงจุดหนึ่งอัตราส่วน Q_g/Q_w จะค่อยๆมีแนวโน้มลดลง โดยข้อมูลจากการทดลองนี้สามารถสรุปความเร็วของน้ำที่เหมาะสม ซึ่งเป็นช่วงให้อัตราส่วนการไหลของอากาศต่ออัตราการไหลของน้ำผ่านเวนจูรีในปริมาณที่สูง สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบอัตราการไหลน้ำผ่านอุปกรณ์เวนจูรีขนาดต่างๆได้ ดังตารางที่ 4-8

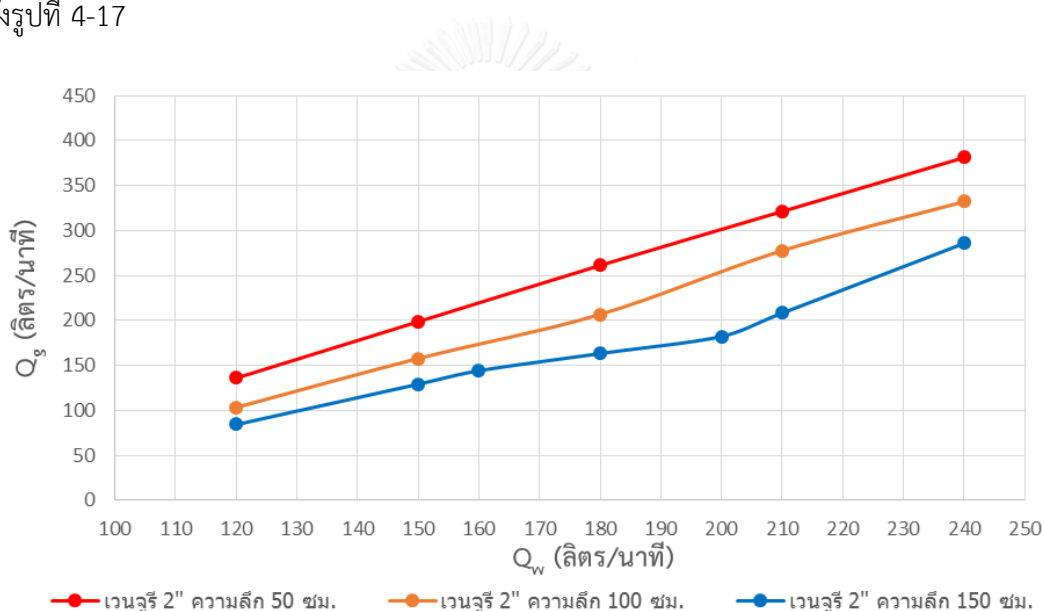
ตารางที่ 4-8 ความเร็วและอัตราไหลน้ำเข้าที่ที่เหมาะสมของเวนจูรีขนาด 0.5, 1, 1.5 และ 2 นิ้ว

ขนาดเวนจูรี (นิ้ว)	ความเร็วน้ำ ที่คอคอดของเวนจูรี (เมตร/วินาที)	อัตราการไหลน้ำ ผ่านเวนจูรี (ลิตร/นาที่)	อัตราส่วนระหว่าง อัตราการไหลอากาศและ อัตราการไหลของน้ำ
	V_w	Q_w	Q_g/Q_w
1/2	11.7 – 14.8	13 - 17	0.34 – 0.36
1	12.3 – 15.0	20 - 26	4.17 – 4.35
1.5	12.0 – 15.0	90 - 110	1.34 – 1.45
2	11.2 – 15.0	180 - 240	1.45 – 1.59

จากตารางที่ 4-8 พบว่าอัตราการไหลน้ำที่เหมาะสมของแต่ละขนาดอุปกรณ์เวนจูรีมีความแตกต่างกัน โดยเวนจูรีขนาดเล็กจะเหมาะสำหรับย่านอัตราการไหลของน้ำต่ำ และเวนจูรีขนาดใหญ่จะเหมาะกับอัตราการไหลน้ำที่สูงขึ้น เช่นเวนจูรีขนาด 0.5 นิ้ว มีอัตราการไหลของน้ำที่เหมาะสมอยู่ในช่วงไม่เกิน 17 ลิตร/นาที่ หากใช้ที่อัตราการไหลน้ำที่สูงมากเกินไป อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลอากาศและอัตราการไหลของน้ำ (Q_g/Q_w) จะค่อยๆลดลง รวมทั้งใช้ความดันสูงขึ้นเพื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำ ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานมากขึ้น แต่ได้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ต่ำลง ดังนั้นหากอัตราการไหลน้ำที่ออกแบบสูงกว่า 17 ลิตร/นาที่ เช่นที่ 20 ลิตร/นาที่ ควรขยับขึ้นไปใช้เวนจูรีขนาด 1 นิ้ว ที่มีขนาดใหญ่กว่า ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าที่อัตราการไหลน้ำ 20 ลิตร/นาที่ และด้วยเหตุผลเดียวกัน หากอัตราการไหลน้ำที่ออกแบบต่อเวนจูรีหนึ่งหัว เท่ากับ 100 ลิตร/นาที่ ก็ควรขยับขึ้นไปใช้เวนจูรีขนาด 1.5 นิ้ว แทนที่ขนาด 1 นิ้ว เนื่องจากเวนจูรีขนาด 1 นิ้ว ไม่เหมาะสำหรับอัตราการไหล 100 ลิตร/นาที่ เพราะใช้แรงดันน้ำที่สูงเกินไป และประสิทธิภาพตกลงจากจุดการทำงานที่เหมาะสม แต่จากการทดลองพบสิ่งที่คล้ายกันในอุปกรณ์เวนจูรีทุกขนาดคือ ค่าความเร็วน้ำที่คอคอดของเวนจูรี (V_w) ที่ให้อัตราส่วน Q_g/Q_w สูงสุด จะอยู่ในช่วงความเร็ว 12 ถึง 15 เมตร/วินาที ในทุกขนาดของเวนจูรีที่ใช้ทดลอง ดังนั้นจากผลการทดลองในส่วนนี้ จึงแนะนำค่า V_w เท่ากับ 12 ถึง 15 เมตร/วินาที สำหรับใช้เป็นข้อกำหนดในการออกแบบอัตราการไหลน้ำผ่านเวนจูรี

4.2.2 ระดับความลึกการติดตั้งอุปกรณ์เวนจูลี ต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์

จากการทดลองพบว่าอีกตัวแปรหนึ่งที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเวนจูลีโดยตรงคือ ระดับความลึกน้ำ โดยยิ่งติดตั้งเวนจูลีไว้ลึกใ้ระดับผิวน้ำมากขึ้น ยิ่งดูดอากาศเข้าสู่ระบบได้น้อยลง ผลการทดลองเดินระบบด้วยเวนจูลีขนาด 2 นิ้ว ที่ระดับความลึกน้ำ 50, 100 และ 150 เซนติเมตร ในช่วงอัตราการไหลน้ำผ่านเวนจูลีเท่ากับ 120 ถึง 240 ลิตร/นาที พบว่าที่การเดินระบบที่ระดับความลึก 50 เซนติเมตร เวนจูลีจะดูดอากาศเข้าระบบได้มากกว่าการเดินระบบที่ระดับความลึกน้ำ 100 และ 150 เซนติเมตร ในทำนองเดียวกันการเดินระบบที่ระดับความลึกน้ำ 100 เซนติเมตร เวนจูลีก็จะดูดอากาศเข้าระบบได้มากกว่าที่ระดับความลึกน้ำ 150 เซนติเมตร ในทุกอัตราการไหลของน้ำที่ใช้ในการทดลอง ดังรูปที่ 4-17

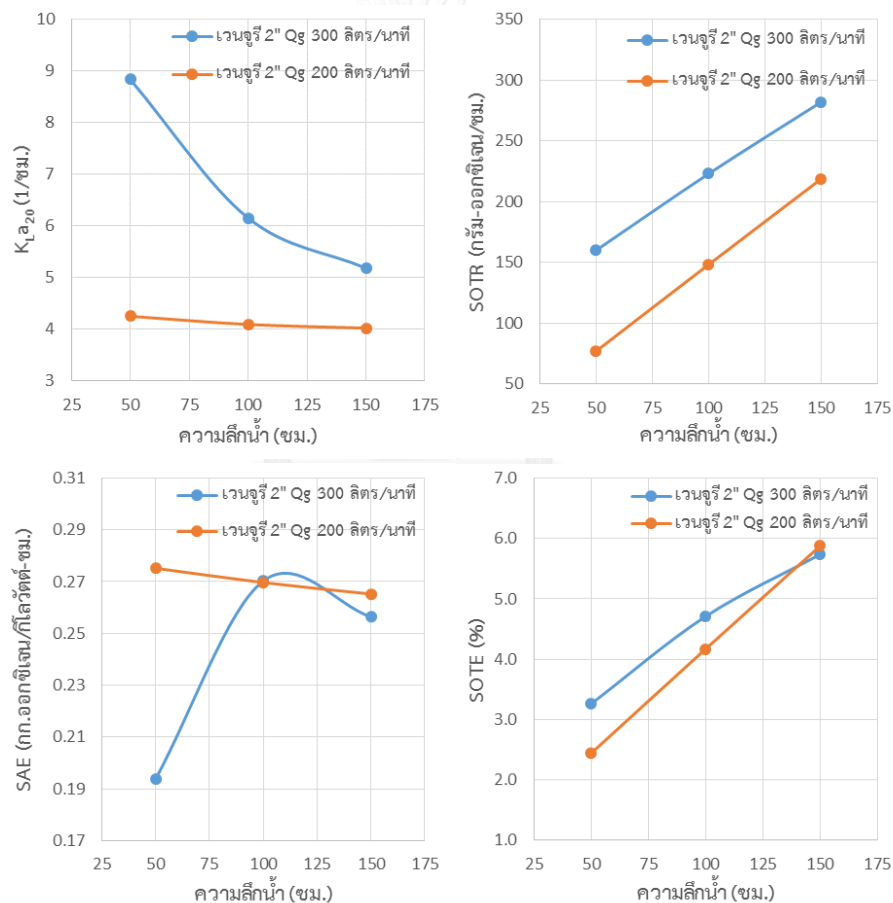


รูปที่ 4-16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำ (Q_w) เข้าอุปกรณ์เวนจูลี และ อัตราไหลอากาศเข้าเวนจูลี (Q_g) ของเวนจูลีขนาด 2" ที่ความลึก 50, 100 และ 150 ซม.

สาเหตุที่เวนจูลีดูดอากาศได้น้อยลงเมื่อระดับน้ำเพิ่มขึ้นเนื่องมาจาก ความดันด้านขาออกของเวนจูลี โดยจากการทดลองของ Ozkan และคณะ (2006) พบว่ายิ่งต่อท่อด้านขาออกเวนจูลียาวขึ้นเท่าไร ประสิทธิภาพการดูดอากาศยิ่งลดลงเท่านั้น เนื่องจากการต่อท่อด้านขาออกของเวนจูลีให้ยาวขึ้น เป็นการเพิ่มแรงดันน้ำที่จะอั้นกลับมาที่ด้านปลายขาออกเวนจูลี ทำให้ระบบต้องการแรงดันน้ำที่มากขึ้น จากแรงดันสูญเสียในเส้นท่อ (Friction loss, H_f) หากพิจารณาจากสมการพลังงานของเบอร์นูลลีจะพบว่า การเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำด้านขาเข้า (P_{inlet}) ในขณะที่อัตราการไหลน้ำเท่าเดิมหรือความเร็วน้ำที่ผ่านคอคอดเวนจูลี (V_w) เท่าเดิม ความดัน ณ จุดคอคอดของเวนจูลีจะติดลบน้อยลง ส่งผลให้ดูดอากาศเข้าสู่ระบบได้น้อยลง ด้วยเหตุผลเดียวกันการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำจึงเป็นเหมือนการเพิ่มขึ้นของ

ความดันด้านขาออกเวนจอร์รี่ ยิ่งระดับน้ำเพิ่มขึ้นสูงเท่าไรยิ่งเสมือนเป็นการเพิ่มความดันด้านขาออกเวนจอร์รี่มากขึ้นเท่านั้น ส่งผลให้เวนจอร์รี่ดูดอากาศเข้าสู่ระบบน้อยลงด้วยเหตุผลดังกล่าว

ถึงแม้การเพิ่มระดับความลึกการติดตั้งอุปกรณ์เวนจอร์รี่จะทำให้สามารถดูดอากาศเข้าสู่ระบบได้น้อยลง แต่ทว่ากลับส่งผลดีในด้านระยะเวลาที่ฟองอากาศสัมผัสกับน้ำนานยิ่งขึ้น ทำให้ฟองอากาศมีเวลาถ่ายเทออกซิเจนลงสู่น้ำมากขึ้น เป็นผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบเติมอากาศเวนจอร์รี่เพิ่มขึ้น โดยจากผลการทดลองที่อัตราการไหลอากาศเข้าสู่ระบบ 200 และ 300 ลิตร/นาที ที่ความลึกน้ำ 50, 100 และ 150 เซนติเมตร พบว่าที่อัตราการไหลอากาศเท่ากัน การเพิ่มระดับความลึกน้ำส่งผลให้อัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (SOTR) และค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (SOTE) เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4-18



รูปที่ 4-17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับความลึกน้ำการเติมอากาศ (ชม.) และค่า K_{La20} , SOTR, SAE และ SOTE ของเวนจอร์รี่ขนาด 2 นิ้ว ที่อัตราไหลอากาศเข้า 200 และ 300 ลิตร/นาที

จากผลการทดลองในรูปที่ 4-17 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ($K_L a$) ของการเดินระบบที่อัตราการไหลอากาศ 200 และ 300 ลิตร/นาทิจึงมีค่าลดลงเมื่อระดับน้ำสูงขึ้น เหตุผลมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำในถังเติมอากาศในขณะที่ใช้อัตราการไหลอากาศเข้าระบบเท่าเดิม ส่งผลให้ระดับค่าออกซิเจนละลาย (DO) เพิ่มขึ้นช้าลงตามมวลของน้ำที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งค่า $K_L a$ ในส่วนนี้ยังไม่สามารถระบุได้ว่าประสิทธิภาพโดยรวมของระบบดีขึ้นหรือแย่ลงเมื่อเพิ่มระดับน้ำ แต่สามารถทราบได้เพียงว่าค่าระดับ DO ของระบบเพิ่มขึ้นเร็วหรือช้ากว่ากันเท่านั้น โดยจากผลการทดลองในส่วนนี้หากพิจารณาอีก 2 หน่วยวัดประสิทธิภาพคือ ค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (SOTR) และค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (SOTE) พบว่าที่อัตราการไหลอากาศ 200 และ 300 ลิตร/นาทิจึงสองหน่วยวัดประสิทธิภาพนี้เพิ่มขึ้นตามระดับความลึกน้ำที่เพิ่มสูงขึ้น บ่งบอกถึงการถ่ายเทออกซิเจนลงสู่น้ำได้มากขึ้น เป็นผลเนื่องมาจากฟองอากาศมีระยะเวลาสัมผัสกับน้ำนานขึ้นดังที่กล่าวไว้ข้างต้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ghomi (2009) ที่ศึกษาประสิทธิภาพของเวนจิวรีที่ระดับความลึกน้ำ 20, 40 และ 60 เซนติเมตร ซึ่งได้ผลการทดสอบประสิทธิภาพเวนจิวรีที่ระดับน้ำ 60 เซนติเมตร ดีกว่าที่ระดับน้ำ 20 และ 40 เซนติเมตร ในทุกขนาดเวนจิวรีที่ใช้ในการทดลอง กล่าวได้ว่าการติดตั้งเวนจิวรีระดับความลึกน้ำมากกว่าที่อัตราการไหลอากาศเท่ากัน จะให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่านั่นเอง

แต่ทว่าหากพิจารณาตัวแปรในเชิงพลังงานที่ใช้ในการเติมอากาศร่วมด้วย ในส่วนของหน่วยวัดค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน (SAE) พบว่าไม่ได้เพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับความลึกน้ำที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากที่ระดับน้ำเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ระบบต้องการแรงดันน้ำที่มากขึ้น เพื่อเดินระบบด้วยอัตราไหลน้ำเท่าเดิม ทำให้พลังงานที่ใช้ในการเติมอากาศสูงขึ้นตาม จากผลการทดลองพบว่าที่อัตราการไหลอากาศ 200 ลิตร/นาทิจึงให้ค่า SAE สูงสุดเท่ากับ 0.28 กิโลกรัมออกซิเจน/กิโลวัตต์-ชั่วโมง ที่ระดับความลึกน้ำ 50 เซนติเมตร ในขณะที่อัตราการไหลอากาศ 300 ลิตร/นาทิจึงให้ค่า SAE เท่ากับ 0.19 กิโลกรัมออกซิเจน/กิโลวัตต์-ชั่วโมง ที่ระดับความลึกเดียวกัน ทั้งที่มีอัตราการไหลอากาศสูงกว่า ดังรูปที่ 4-17 กล่าวได้ว่าการออกแบบอัตราการไหลอากาศเข้าสู่ระบบ ให้สัมพันธ์กับระดับความลึกน้ำก็มีความสำคัญ เนื่องจากการใช้อัตราการไหลอากาศที่สูง ในขณะที่ความลึกน้ำอยู่ในระดับต่ำ ส่งผลให้ฟองอากาศลอยออกสู่อากาศอย่างรวดเร็ว ถึงแม้จะได้อัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่สูง แต่ก็แลกมาด้วยการสิ้นเปลืองพลังงาน ในส่วนนี้การเดินระบบที่อัตราการไหลอากาศ 200 ลิตร/นาทิจึงถึงแม้จะมีอัตราการถ่ายเทออกซิเจนต่ำกว่าที่อัตราการไหลอากาศ 300 ลิตร/นาทิจึงแต่ก็ใช้พลังงานในเติมอากาศที่น้อยกว่า ส่งผลให้มีค่า SAE ที่สูงกว่า มีความคุ้มค่ามากกว่าเมื่อพิจารณาตัวแปรในเชิงพลังงานร่วมด้วย แต่

เมื่อพิจารณากราฟ SAE ของอัตราการไหลอากาศ 200 ลิตร/นาที ที่ความลึกน้ำสูงขึ้น พบว่าค่า SAE มีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ ในขณะที่ค่า SAE ของอัตราการไหล 300 ลิตร/นาที มีแนวโน้มสูงกว่าที่ระดับความลึก 100 ถึง 125 เซนติเมตร กล่าวได้ว่าที่ระดับน้ำสูงขึ้น อัตราการไหลอากาศที่เหมาะสมก็จะสูงขึ้นตาม เพราะที่ระดับความลึกน้ำสูง หากใช้อัตราการไหลอากาศที่ต่ำเกินไปจะทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของ DO ช้า ทำให้ใช้ระยะเวลาในการเติมอากาศยาวนานกว่า พลังงานที่ใช้โดยรวมจึงมากกว่า การใช้อัตราการไหลอากาศที่สูงกว่าในระดับที่เหมาะสม ภายในระยะเวลาการเติมอากาศที่สั้นกว่า

นอกจากปัจจัยหลักทั้ง 3 ปัจจัย คือเครื่องสูบน้ำ การออกแบบอุปกรณ์เวนจิวรี และการติดตั้งอุปกรณ์เวนจิวรี ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเวนจิวรีแล้ว ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศก็เป็นอีกตัวแปรสำคัญในการอธิบายถึงประสิทธิภาพในการเติมอากาศของอุปกรณ์เวนจิวรีด้วยเช่นกัน ซึ่งจะกล่าวถึงในผลการทดลองส่วนถัดไป

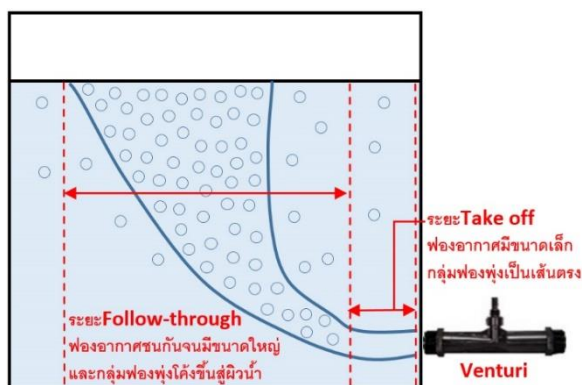


4.3 ศึกษาตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศจากอุปกรณ์เวนจูรี

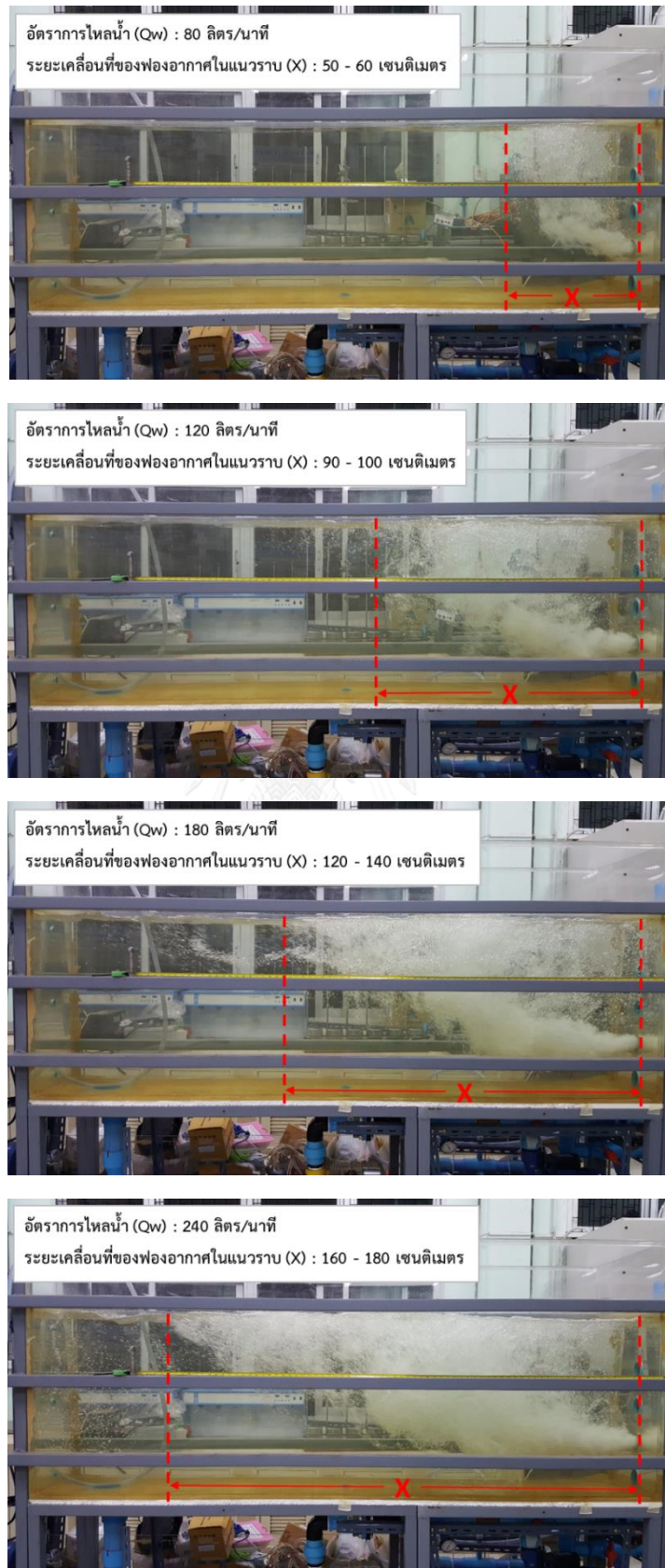
ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศเป็นตัวแปรสำคัญในการอธิบายถึงประสิทธิภาพในการเติมอากาศของอุปกรณ์เติมอากาศชนิดต่างๆ โดยทั่วไปอุปกรณ์เติมอากาศที่สามารถสร้างฟองอากาศขนาดเล็กจะมีประสิทธิภาพเติมอากาศที่ดีกว่าอุปกรณ์เติมอากาศที่สร้างฟองขนาดใหญ่ เนื่องจากฟองอากาศที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่สัมผัสระหว่างอากาศและน้ำมากกว่า อีกทั้งฟองอากาศขนาดเล็กจะมีความเร็วในการลอยตัวที่ต่ำกว่าฟองอากาศขนาดใหญ่อีกด้วย ส่งผลให้มีระยะเวลาสัมผัสระหว่างอากาศและน้ำนานกว่า อัตราการถ่ายเทออกซิเจนลงสู่น้ำจึงดีกว่า ซึ่งขนาดฟองอากาศจากหัวกระจายอากาศโดยทั่วไปไม่ว่าจะเป็น หัวทราย ท่อยาง เซรามิก หรือหัวเมมเบรน จะมีความสัมพันธ์กับขนาดรูอากาศ หรือขนาดรูพุนของวัสดุประเภทนั้นๆว่าฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กหรือขนาดใหญ่ แต่ทว่าอุปกรณ์เวนจูรีมีกระบวนการสร้างฟองอากาศที่แตกต่างออกไป เนื่องจากใช้หลักการดูดอากาศจากภายนอกเข้ามาผสมกับลำน้ำที่มีความเร็วและความปั่นป่วนสูงภายในบริเวณคอคอดของเวนจูรี เกิดเป็นฟองอากาศขนาดเล็กพุ่งออกไปตามทิศทางการไหลของน้ำ โดยในส่วนี้ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศของเวนจูรีที่ทำการศึกษามีสองส่วนคือ 1) ทิศทางการเคลื่อนที่ของฟองอากาศออกจากเวนจูรี 2) ขนาดฟองอากาศ (D_B)

4.3.1 ทิศทางการเคลื่อนที่ของฟองอากาศออกจากเวนจูรี

ลักษณะการเคลื่อนที่ของฟองอากาศจากเวนจูรีจะแตกต่างจากหัวกระจายอากาศทั่วไปที่ฟองอากาศจะลอยขึ้นจากหัวกระจายอากาศเป็นเส้นตรงในแนวตั้ง แต่การเคลื่อนที่ของฟองอากาศออกจากเวนจูรีมีลักษณะเป็นเส้นตรงในแนวราบในช่วงแรก และลอยโค้งขึ้นสู่ผิวน้ำ ดังรูปที่ 4-18 ซึ่งมีข้อดีคือทำให้ฟองอากาศเคลื่อนที่อยู่ในน้ำได้นานกว่าการลอยขึ้นเป็นเส้นตรงในแนวตั้ง อีกทั้งยังครอบคลุมพื้นที่ได้กว้างกว่าในแนวราบต่างจากหัวกระจายอากาศที่ฟองอากาศจะครอบคลุมพื้นที่ในระยะความกว้างของหัวกระจายอากาศเท่านั้น โดยฟองอากาศพุ่งออกจากเวนจูรีจะมีระยะการเคลื่อนที่ไกลขึ้นแปรผันตรงกับอัตราการไหลน้ำที่สูงขึ้น ดังรูป 4-19



รูปที่ 4-18 ภาพแสดงการกระจายตัวของกลุ่มฟองอากาศที่พุ่งออกจากเวนจูรี



รูปที่ 4-19 ระยะเคลื่อนที่ในแนวราบของฟองอากาศจากเวนจูรีขนาด 2" ที่อัตราไหลน้ำต่างๆ

จากรูปที่ 4-19 ระยะทางการเคลื่อนที่ของฟองอากาศในแนวราบของเวนจูรีขนาด 2” มีความเปลี่ยนแปลงตามอัตราการไหลน้ำที่ผ่านอุปกรณ์เวนจูรี โดยอัตราการไหลน้ำเริ่มต้น 80 ลิตร/นาที่ ฟองอากาศมีระยะทางการเคลื่อน 50 ถึง 60 เซนติเมตรจากอุปกรณ์เวนจูรี และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลสูงขึ้นถึง 240 ลิตร/นาที่ พบว่าฟองอากาศมีระยะทางการเคลื่อนที่ไปไกลถึง 160 ถึง 180 เซนติเมตร หรือไกลกว่าที่อัตราไหล 80 ลิตร/นาที่ ประมาณสามเท่า โดยข้อมูลในส่วนนี้จะต้องนำไปพิจารณาในขั้นตอนการออกแบบความยาวถังเติมอากาศที่เหมาะสม เพราะหากออกแบบความยาวถังเติมอากาศสั้นกว่าระยะทางการเคลื่อนที่ของฟองอากาศ ณ อัตราการไหลน้ำนั้นๆ ฟองอากาศจากเวนจูรีจะพุ่งไปชนผนังถังเติมอากาศ รวมตัวกันเป็นฟองอากาศขนาดใหญ่ และประสิทธิภาพการเติมอากาศของเวนจูรีจะต่ำลง

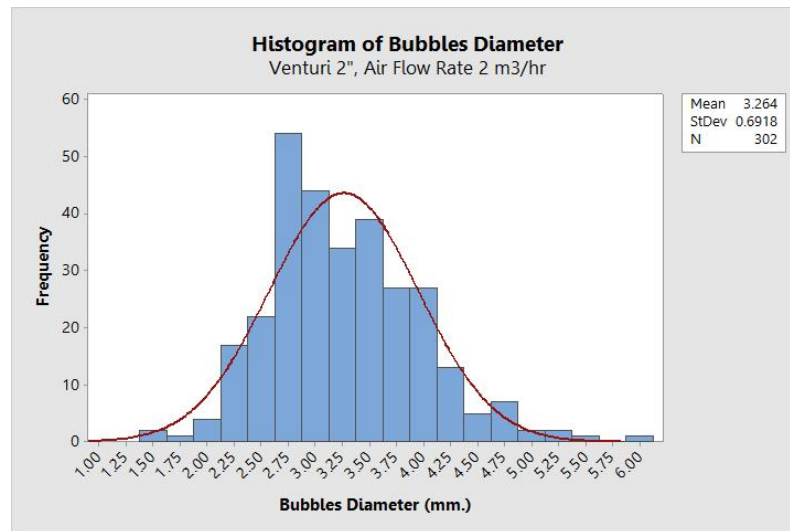
4.3.2 ขนาดฟองอากาศ (D_b)

ขนาดฟองอากาศที่ถูกปล่อยออกจากอุปกรณ์เวนจูรีในช่วงเริ่มต้นนั้นจะมีขนาดเล็กมาก ลักษณะคล้ายฝุ่นสีขาวมีเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับไมโครเมตร ในช่วงแรกที่พุ่งเป็นเส้นตรงออกจากเวนจูรี โดยจากงานวิจัยของ (Kawamura et al., 2004) พบว่าที่อัตราการไหลน้ำและอากาศผ่านอุปกรณ์เวนจูรีผ่านเวนจูรีในช่วง 0 – 10 ลิตร/นาที่ สามารถวัดขนาดฟองอากาศหลังจากผ่านคอคอดของเวนจูรีอยู่ในช่วง 0.1 -0.4 มิลลิเมตร หรือเท่ากับ 100 – 400 ไมโครเมตร หลังจากนั้นฟองอากาศขนาดเล็กจะเริ่มชนกันเองบริเวณศูนย์กลางกลุ่มฟองที่พุ่งออกจากอุปกรณ์เวนจูรี ดังรูปที่ 4-20 โดยฟองอากาศจะรวมกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้นในระดับมิลลิเมตรและลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ ซึ่งการศึกษาในส่วนนี้ใช้อุปกรณ์เวนจูรีขนาด 2 นิ้ว ระดับน้ำสูง 70 เซนติเมตร และเก็บภาพถ่ายฟองอากาศที่ระดับกึ่งกลางความลึกน้ำ หรือที่ระดับ 35 เซนติเมตร เพื่อเป็นตัวแทนขนาดเฉลี่ยของฟองอากาศ ในการเปรียบเทียบกับขนาดฟองอากาศจากอุปกรณ์เติมอากาศชนิดอื่น



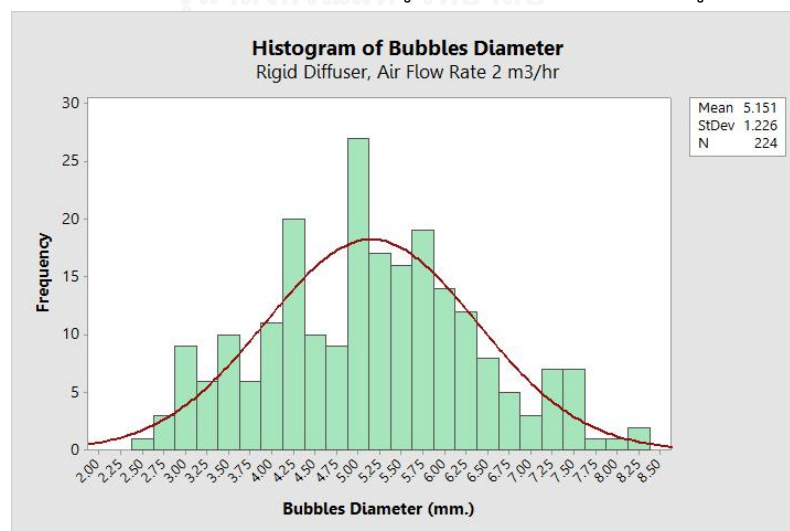
รูปที่ 4-20 กลุ่มฟองอากาศพุ่งออกจากอุปกรณ์เวนจูรี

การทดลองในส่วนนี้ใช้หัวกระจายอากาศสองชนิดคือ หัวทราย และท่ออย่างยืดหยุ่น ในการเปรียบเทียบขนาดฟองอากาศที่ออกจากเวนจูรี ณ จุดกึ่งกลางความลึกน้ำ โดยผลการวัดขนาดฟองอากาศที่ออกจากอุปกรณ์เวนจูรีขนาด 2 นิ้ว พบว่าขนาดฟองอากาศส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 2.50 – 4.00 มิลลิเมตร ขนาดฟองอากาศเฉลี่ยเท่ากับ 3.26 มิลลิเมตร ที่อัตราการไหลอากาศเข้าเวนจูรีเท่ากับ 2 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ดังรูปที่ 4-21



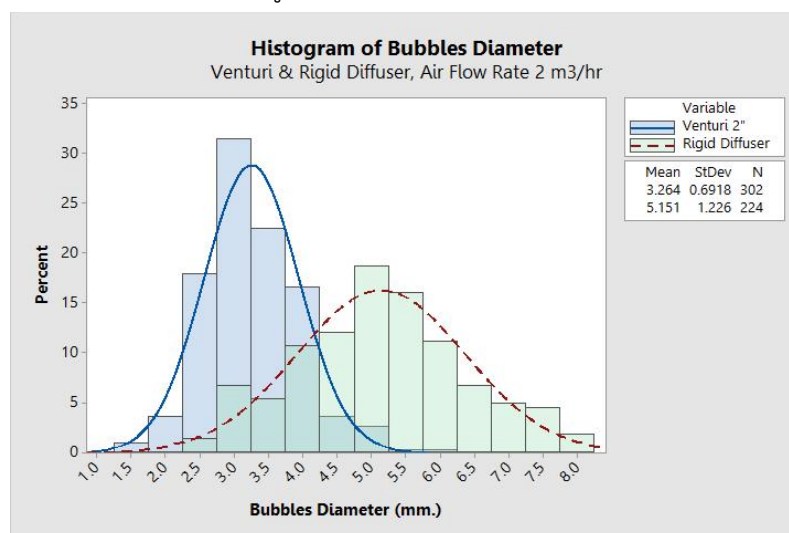
รูปที่ 4-21 กราฟ Histogram แสดงความถี่ขนาดฟองอากาศที่ออกจากเวนจูรีขนาด 2 นิ้ว

ในขณะที่ผลการวัดขนาดฟองอากาศที่ออกจากหัวกระจายอากาศชนิดหัวทราย พบว่าขนาดฟองอากาศส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 3.90 – 6.40 มิลลิเมตร ขนาดฟองอากาศเฉลี่ยเท่ากับ 5.15 มิลลิเมตร ที่อัตราการไหลอากาศออกจากหัวทรายเท่ากับ 2 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ดังรูปที่ 4-22



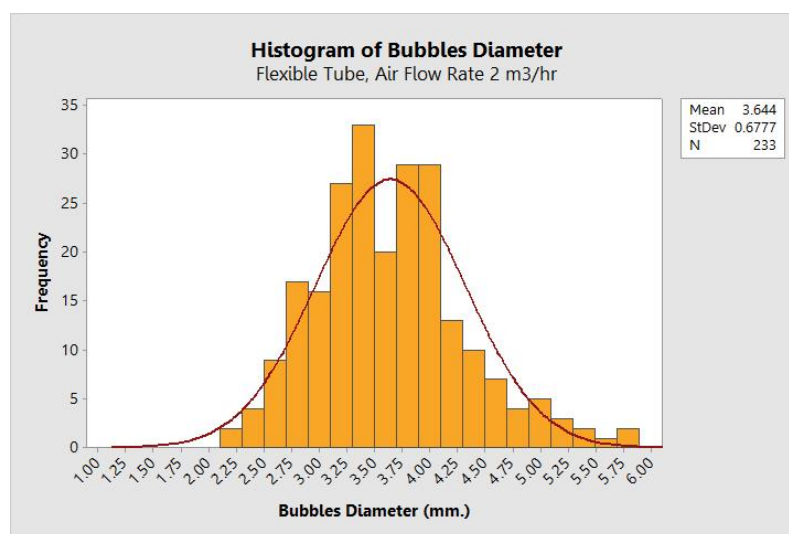
รูปที่ 4-22 กราฟ Histogram แสดงความถี่ขนาดฟองอากาศที่ออกจากหัวทราย

เมื่อเปรียบเทียบผลการวัดขนาดฟองอากาศจากเวนจูรีกับหัวทราย พบว่าฟองอากาศจากเวนจูรีมีขนาดเล็กกว่าฟองอากาศที่ออกจากหัวทราย โดยขนาดฟองอากาศเฉลี่ยจากเวนจูรีเท่ากับ 3.26 มิลลิเมตร ในขณะที่ขนาดฟองอากาศเฉลี่ยจากหัวทรายเท่ากับ 5.15 มิลลิเมตร รวมทั้งค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (StDev) ของขนาดฟองอากาศจากเวนจูรีเท่ากับ 0.69 ในขณะที่หัวทรายเท่ากับ 1.23 แสดงให้เห็นว่าขนาดฟองอากาศจากเวนจูรีมีความสม่ำเสมอ (Uniform) และมีการกระจายตัวของขนาดฟองอากาศน้อยกว่าหัวทราย ดังรูปที่ 4-23



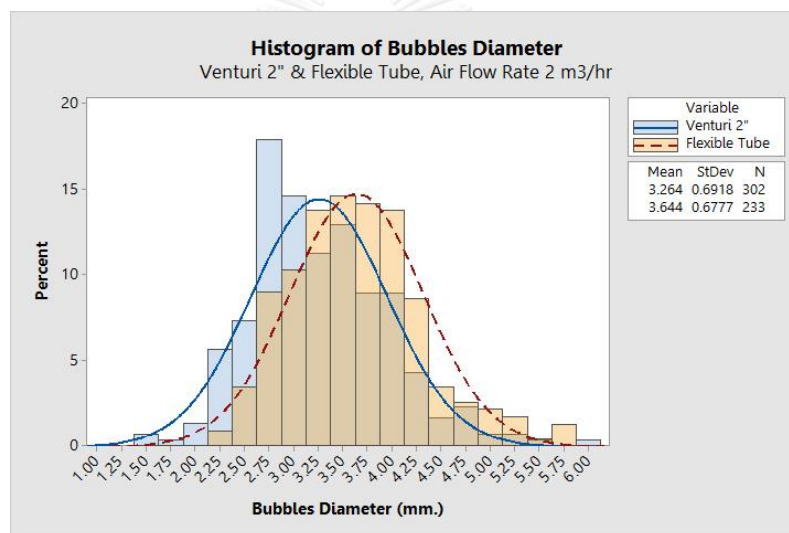
รูปที่ 4-23 กราฟ Histogram เปรียบเทียบขนาดฟองอากาศเวนจูรีขนาด 2 นิ้ว กับหัวทราย

ในส่วนของหัวกระจายอากาศอีกหนึ่งชนิดที่นำมาเปรียบเทียบขนาดฟองอากาศกับเวนจูรี คือ ท่อยางยืดหยุ่น ผลการวัดขนาดฟองอากาศพบว่าขนาดส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 3.00 – 4.30 มิลลิเมตร ขนาดฟองอากาศเฉลี่ยเท่ากับ 3.64 มิลลิเมตร ที่อัตราการไหลอากาศเท่ากับ 2 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ดังรูปที่ 4-24



รูปที่ 4-24 กราฟ Histogram แสดงความถี่ขนาดฟองอากาศจากหัวกระจายอากาศ ชนิดท่อยาง

จากผลการวัดขนาดฟองอากาศจากท่ออย่างยัดหยุ่นสามารถเปรียบเทียบกับเวเนจูรีได้ดังรูปที่ 4-25 พบว่าขนาดฟองอากาศเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกัน โดยขนาดฟองอากาศเฉลี่ยจากเวเนจูรีเท่ากับ 3.26 มิลลิเมตร ในขณะที่ขนาดฟองอากาศเฉลี่ยจากท่ออย่างยัดหยุ่นเท่ากับ 3.64 มิลลิเมตร และเมื่อเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานขนาดฟองอากาศจากท่ออย่างยัดหยุ่น พบว่ามีค่าน้อยกว่าเวเนจูรีเล็กน้อย โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดฟองอากาศจากท่ออย่างยัดหยุ่นเท่ากับ 0.67 ในขณะที่เวเนจูรีเท่ากับ 0.69 แสดงให้เห็นถึงขนาดฟองอากาศที่มีขนาดสม่ำเสมอกว่าเวเนจูรี ทั้งนี้เนื่องจากขนาดฟองอากาศในระดับมิลลิเมตรของเวเนจูรี มาจากการชนกันของฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอนขณะออกจากอุปกรณ์เวเนจูรี ทำให้มีการกระจายตัวของฟองอากาศทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่มากกว่าท่ออย่างยัดหยุ่น โดยท่ออย่างยัดหยุ่นมีขนาดฟองอากาศที่ใกล้เคียงกันเนื่องมาจากขนาดรูพรุนของวัสดุท่ออย่างยัดหยุ่นเป็นตัวแปรกำหนดขนาดฟองอากาศที่ออกมาจากอุปกรณ์



รูปที่ 4-25 กราฟ Histogram เปรียบเทียบขนาดฟองอากาศที่ออกเวเนจูรีขนาด 2 นิ้ว กับท่ออย่าง

จากผลการทดลองที่กล่าวข้างต้น ในส่วนของผลการวัดขนาดฟองอากาศจากเวเนจูรีขนาด 2 นิ้ว เทียบกับหัวกระจายอากาศชนิดหัวทราย และท่ออย่างยัดหยุ่น สามารถสรุปได้ว่าขนาดฟองอากาศเฉลี่ยที่ออกมาจากอุปกรณ์เวเนจูรีมีขนาดใกล้เคียงกับท่ออย่างยัดหยุ่น แต่มีการกระจายตัวของขนาดฟองอากาศมากกว่า และมีขนาดฟองอากาศเล็กกว่าหัวทราย ซึ่งในทางทฤษฎีหากอัตราการไหลของอากาศ (Q_g) เท่ากัน อุปกรณ์ที่ให้ฟองอากาศ (D_b) ขนาดเล็กกว่า จะมีความถี่ในการเกิดฟองอากาศ (f_b) และจำนวนฟองอากาศ (N_b) มากกว่า ส่งผลให้พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างก๊าซและของเหลว (Interfacial area, a) มีค่ามากกว่า ซึ่งเป็นปัจจัยให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ($K_L a$) สูงกว่าด้วยเช่นกัน โดยผลทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเติมอากาศของเวเนจูรีขนาด 2 นิ้ว กับหัวกระจายอากาศทั้งสองชนิดนั้นจะกล่าวถึงในส่วนถัดไป

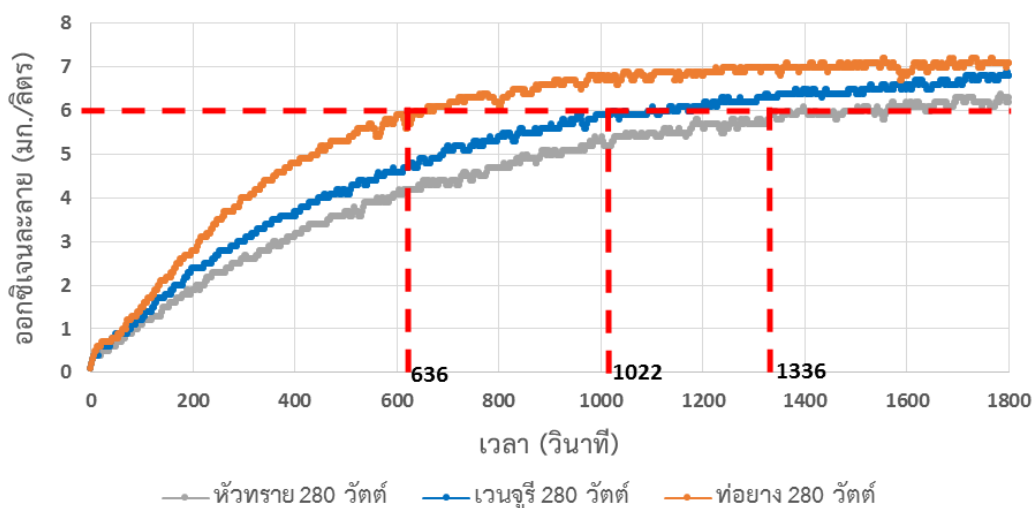
4.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์เติมอากาศเวนจูรี กับอุปกรณ์กระจายอากาศ ในเทอมของประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน และพลังงานที่ใช้ในการเติมอากาศ

ในส่วนของการเปรียบเทียบอุปกรณ์เวนจูรีขนาด 2 นิ้ว กับอุปกรณ์กระจายอากาศ 2 ชนิด คือ หัวกระจายอากาศแบบแข็ง (Rigid Diffuser) และแบบท่อยาง (Elastic Diffuser) ในเทอมของประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน ต่อการเปลี่ยนแปลงของ 2 ตัวแปร คือ 1) ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเติมอากาศ (Power Consumption) และ 2) ระดับความลึกของการเติมอากาศ (Aeration Depth) สามารถแบ่งผลวิเคราะห์การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเติมอากาศออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

- 1) ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเติมอากาศ และระดับความลึกการเติมอากาศคงที่
- 2) ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเติมอากาศคงที่แต่เปลี่ยนแปลงระดับความลึกการเติมอากาศ
- 3) การเปลี่ยนแปลงทั้งค่าพลังงานไฟฟ้า และระดับความลึกการเติมอากาศ

4.3.1 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเติมอากาศ ที่ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเติมอากาศ และระดับความลึกการเติมอากาศคงที่

เปรียบเทียบการเดินระบบเติมอากาศที่ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเติมอากาศเท่ากับ 280 วัตต์ ระดับความลึกการเติมอากาศ 50 เซนติเมตร และพื้นที่การเติมอากาศ 4 ตารางเมตร เท่ากันทั้งเวนจูรี และอุปกรณ์กระจายอากาศ 2 ชนิด พบว่าหัวกระจายอากาศชนิดท่อยางยืดหยุ่น สามารถเพิ่มระดับค่าออกซิเจนละลายจาก 0 ถึง 6 มิลลิกรัม/ลิตร ได้เร็วที่สุดในอุปกรณ์เติมอากาศทั้งสามชนิด ด้วยเวลา 10 นาที 36 วินาที รองลงมาคือเวนจูรีขนาด 2 นิ้ว ใช้เวลา 17 นาที 3 วินาที และช้าที่สุดคือหัวทราย ใช้เวลา 22 นาที 16 วินาที ดังรูปที่ 4-26



รูปที่ 4-26 การเพิ่มขึ้นของระดับออกซิเจนละลายต่อเวลา ของอุปกรณ์เวนจูรีขนาด 2 นิ้ว ท่อยางยืดหยุ่น และหัวทราย ที่ค่าพลังงานไฟฟ้า 280 วัตต์ ความลึกน้ำ 50 เซนติเมตร

จากผลการทดลองในรูป 4-26 สามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการพิจารณาประสิทธิภาพการเติมอากาศได้ดังตารางที่ 4-9 ซึ่งผลการทดลองพบว่าที่ค่าพลังงานไฟฟ้า 280 วัตต์ ความลึกน้ำ 50 เซนติเมตรอุปกรณ์เวนจูรีขนาด 2 นิ้ว ให้อัตราการไหลอากาศเข้าสู่ระบบมากที่สุด เท่ากับ 193.25 ลิตร/นาที่ แต่ทว่าอุปกรณ์เติมอากาศที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดคือ หัวกระจายอากาศแบบท่ออย่างยืดหยุ่น โดยให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ($K_L a_{20}$) 6.78 ชม.^{-1} ค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (SOTR) 123.0 กรัม-ออกซิเจน/ชม. ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน (SAE) 0.44 กก.ออกซิเจน/กิโลวัตต์-ชม. และค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (SOTE) 4.23 % อุปกรณ์เติมอากาศที่ให้ประสิทธิภาพรองลงมาคือเวนจูรี และอุปกรณ์กระจายอากาศแบบหัวทรายให้ประสิทธิภาพต่ำที่สุดในการเปรียบเทียบ

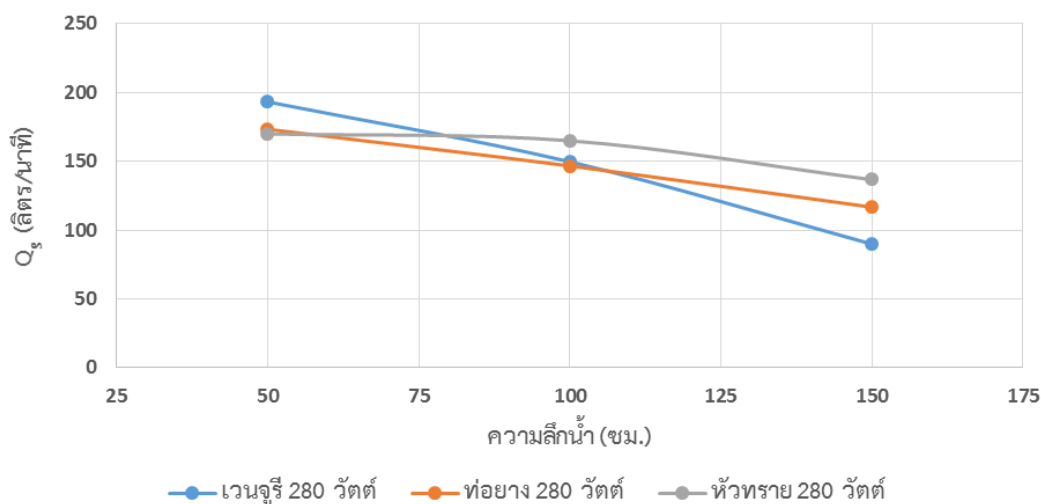
ตารางที่ 4-9 ประสิทธิภาพการเติมอากาศของอุปกรณ์เวนจูรีขนาด 2 นิ้ว อุปกรณ์กระจายอากาศชนิดท่ออย่างยืดหยุ่นและหัวทราย ที่ค่าพลังงานไฟฟ้า 280 วัตต์ ความลึกน้ำ 50 เซนติเมตร

อุปกรณ์เติมอากาศ	อัตราการไหลอากาศเข้า (ลิตร/นาที่)	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (ชม.^{-1})	อัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (กรัม-ออกซิเจน/ชม.)	ประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน (กก.ออกซิเจน/กิโลวัตต์-ชม.)	ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (%)
	Q_g	$K_L a_{20}$	SOTR	SAE	SOTE
เวนจูรี 2"	193.25	4.25	77.05	0.28	2.44
ท่ออย่าง	173.33	6.78	123.00	0.44	4.23
หัวทราย	170.00	2.95	53.48	0.19	1.88

สาเหตุที่อุปกรณ์กระจายอากาศชนิดท่ออย่างยืดหยุ่นให้ประสิทธิภาพการกระจายอากาศที่ดีกว่าเวนจูรี ทั้งที่เวนจูรีให้อัตราการไหลอากาศเข้าสู่ระบบมากกว่าท่ออย่างยืดหยุ่น 20 ลิตร/นาที่ และในการทดลองที่ 4.2 พบว่าฟองอากาศจากอุปกรณ์ทั้งสองมีขนาดใกล้เคียงกัน เกิดจากลักษณะการติดตั้งท่ออย่างยืดหยุ่นในโครงท่อ PVC ขนาดยาว 165 เซนติเมตร กว้าง 70 เซนติเมตร ทำให้สามารถครอบคลุมพื้นที่ถังเติมอากาศทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2x2 เมตร ได้มากกว่าเวนจูรีขนาด 2 นิ้ว ซึ่งที่ค่าพลังงานไฟฟ้า 280 วัตต์ ความลึกน้ำ 50 เซนติเมตร จะมีอัตราการไหลน้ำ 130 ลิตร/นาที่ สามารถสร้างฟองอากาศพุ่งไปด้านหน้าได้ไกลเพียง 90 – 100 เซนติเมตร หรือเพียงครึ่งหนึ่งของความยาวบ่อเติมอากาศ ด้วยเหตุนี้แผงเติมอากาศที่ติดตั้งด้วยท่ออย่างยืดหยุ่นจึงสามารถกระจายฟองอากาศออกไปครอบคลุมพื้นที่ได้มากกว่าตามลักษณะการติดตั้ง ประสิทธิภาพการเติมอากาศจึงสูงกว่าเวนจูรี

4.3.2 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเติมอากาศ ที่ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเติมอากาศ คงที่แต่เปลี่ยนแปลงระดับความลึกการเติมอากาศ

เปรียบเทียบการเดินระบบเติมอากาศที่ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเติมอากาศคงที่เท่ากับ 280 วัตต์ แต่เปลี่ยนแปลงระดับความลึกการเติมอากาศที่ 50, 100 และ 150 เซนติเมตร พบว่า อุปกรณ์เวนจูรีให้อัตราการไหลอากาศ (Q_g) สูงสุดที่น้ำระดับต่ำหรือที่ความลึก 50 เซนติเมตร จากนั้นเมื่อเพิ่มระดับน้ำสูงขึ้น แนวนอนของอัตราการไหลอากาศ (Q_g) จะลดต่ำลงทั้งสามอุปกรณ์ เนื่องจาก Static Head ของน้ำที่สูงขึ้น แต่ใช้พลังงานในการเติมอากาศเท่าเดิม โดยที่อุปกรณ์เวนจูรีมีแนวโน้มการลดลงของ Q_g สูงที่สุด ที่ระดับความลึก 100 เซนติเมตร อุปกรณ์เวนจูรีให้อัตราการไหลอากาศใกล้เคียงกับหัวกระจายอากาศแบบท่ออย่างยืดหยุ่นที่ 150 ลิตร/นาที่ และเมื่อเพิ่มระดับความลึกไปที่ 150 เซนติเมตร อุปกรณ์เวนจูรีให้อัตราการไหลอากาศเหลือเพียง 90 ลิตร/นาที่ ซึ่งต่ำสุดในการเปรียบเทียบอุปกรณ์ทั้งสามที่ใช้พลังงานไฟฟ้าในการเติมอากาศเท่ากัน ดังรูปที่ 4-27



รูปที่ 4-27 อัตราการไหลอากาศ (Q_g) ของอุปกรณ์เวนจูรีขนาด 2 นิ้ว ท่ออย่างยืดหยุ่น และหัวทราย ที่ค่าพลังงานไฟฟ้า 280 วัตต์ ระดับความลึกน้ำ 50 ถึง 150 เซนติเมตร

สาเหตุที่อัตราการไหลอากาศของเวนจูรีลดต่ำกว่าอุปกรณ์หัวกระจายอากาศเนื่องมาจากลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ที่แตกต่างกัน อุปกรณ์เวนจูรีนั้นอาศัยการสูบน้ำผ่านหัวเวนจูรีเพื่อดึงอากาศจากภายนอกเข้ามา โดยที่ความลึก 100 เซนติเมตร เวนจูรีต้องใช้อัตราการไหลน้ำ (Q_w) 125 ลิตร/นาที่ เพื่อดึงอากาศเข้าระบบ 150 ลิตร/นาที่ และที่ความลึกน้ำ 150 เซนติเมตร เวนจูรีต้องใช้อัตราการไหลน้ำ (Q_w) 120 ลิตร/นาที่ เพื่อดึงอากาศเข้าระบบ 90 ลิตร/นาที่ แต่ขณะที่อุปกรณ์กระจายอากาศนั้นอาศัยการสูบลมไปยังหัวกระจายอากาศโดยตรง ในขณะที่ Static Head ด้านขา

ออกเท่ากัน อุปกรณ์ที่ใช้การสูบน้ำจึงสูญเสียพลังงานมากกว่าอุปกรณ์ที่ใช้การสูบบอากาศโดยตรง เนื่องจากมวลของน้ำที่มีน้ำหนักมากกว่าอากาศ ย่อมต้องใช้พลังงานในสูบน้ำจากตัวเครื่องสูบน้ำมากกว่าที่อัตราการไหลใกล้เคียงกัน การเพิ่มขึ้นของระดับน้ำจึงมีผลต่อเครื่องสูบน้ำที่ใช้กับอุปกรณ์เวนจูรีมากกว่าเครื่องสูบลมที่ใช้กับหัวกระจายอากาศ

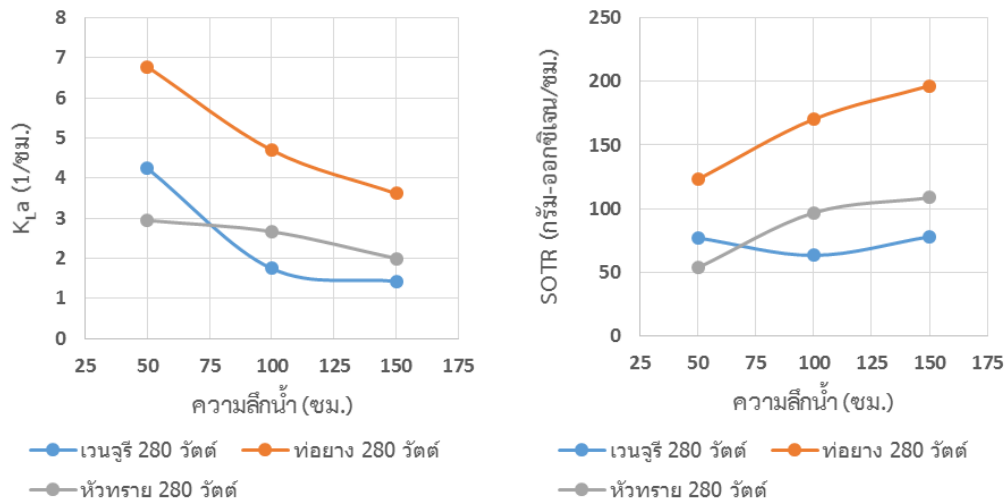
ยกตัวอย่างเช่นการเปรียบเทียบกันระหว่างหัวกระจายอากาศ กับเวนจูรี ที่อัตราไหลอากาศเข้าระบบเท่ากัน สมมติอัตราการไหลอากาศเท่ากับ 150 ลิตร/นาที่ ถ้าใช้หัวกระจายอากาศ จะใช้การเครื่องสูบลมโดยตรงเข้าสู่ระบบ 150 ลิตร/นาที่ แต่การใช้อุปกรณ์เวนจูรีต้องสูบน้ำ 100 ลิตร/นาที่ เพื่อดึงอากาศ 150 ลิตร/นาที่ เข้าสู่ระบบ (ในกรณีนี้ที่อัตราส่วน $Q_g/Q_w = 1.5$ สำหรับเวนจูรี 2 นิ้ว) อุปกรณ์เวนจูรีจึงใช้พลังงานเติมอากาศมากกว่า สามารถคำนวณเปรียบเทียบค่าพลังงานไฟฟ้าได้จากสมการที่ 4.5 และ 4.6

$$\text{กำลังไฟฟ้าของเครื่องสูบลม} \quad P_W = \frac{w \cdot R \cdot T_1}{29.7 \cdot n \cdot e} \left\{ \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{0.283} - 1 \right\} \quad (4.5)$$

$$\text{กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์เครื่องสูบน้ำ} \quad P_W = \frac{Q \cdot H}{102 \cdot \eta} \quad (4.6)$$

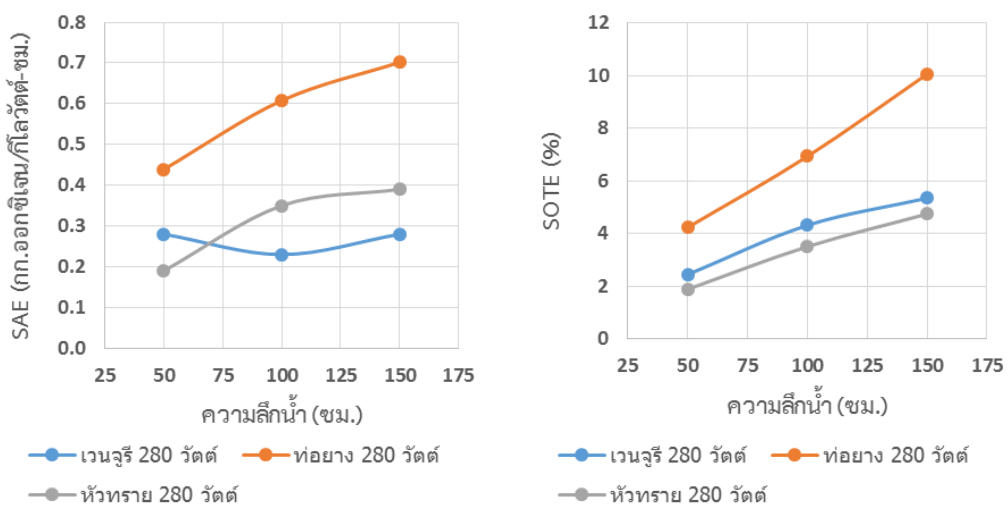
โดยข้อมูลจากการทดลองที่อัตราไหลอากาศ 150 ลิตร/นาที่ ความลึกน้ำ 100 เซนติเมตร อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส สำหรับเครื่องสูบลมต้องใช้แรงดันในการเติมอากาศผ่านหัวกระจายอากาศแบบท่ออย่างเท่ากับ 0.18 บาร์ และเครื่องสูบน้ำต้องใช้แรงดัน 0.4 บาร์ ในการสูบน้ำ 100 ลิตร/นาที่ ผ่านระบบท่อและหัวเวนจูรี เมื่อคำนวณพลังงานที่ใช้สำหรับเครื่องสูบลมจากสมการที่ 4.5 จะได้เท่ากับ 59 วัตต์ และคำนวณพลังงานที่ใช้สำหรับเครื่องสูบน้ำจากสมการที่ 4.6 จะได้เท่ากับ 94 วัตต์ จะเห็นได้ว่าที่อัตราการไหลอากาศเท่ากันพลังงานไฟฟ้าจากการเดินระบบด้วยเวนจูรี จะมากกว่าการเดินระบบโดยใช้อุปกรณ์กระจายอากาศดังกล่าวในกรณีตัวอย่างนี้

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (K_{La20}) และอัตราการถ่ายเทออกซิเจน (SOTR) เป็นผลต่อเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลอากาศ (Q_g) ของเวนจูรีที่มีอัตราลดลงมากกว่า อุปกรณ์กระจายอากาศทั้งสองชนิดเนื่องจากความลึกน้ำที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่า K_{La20} และ SOTR ของเวนจูรีมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับอุปกรณ์กระจายอากาศอีกสองชนิด ที่ระดับความลึก 100 และ 150 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4-28 โดยอีกสาเหตุหนึ่งที่เวนจูรีให้ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนต่ำกว่า เนื่องมาจากการกระจายตัวของฟองอากาศจากหัวเวนจูรีที่มีระยะสั้นลง เกิดจากการเพิ่มระดับความลึกน้ำทำให้ Head น้ำด้านขาออกสูงขึ้น เครื่องสูบน้ำต้องเดินระบบที่แรงดันสูงขึ้น อัตราการไหลน้ำ (Q_w) เวนจูรีจึงต่ำลง ฟองจึงพุ่งออกไปด้านหน้าในระยะที่สั้นลง แตกต่างจากอุปกรณ์กระจายอากาศแบบท่ออย่างและหัวทราย ที่พื้นที่การกระจายอากาศยังคงที่ตามลักษณะการติดตั้งหัวกระจายอากาศ



รูปที่ 4-28 ค่า K_{La} และ SOTR ของอุปกรณ์เวนจูรีขนาด 2 นิ้ว อุปกรณ์กระจายอากาศชนิดท่อยาง ยัดหยุ่นและหัวทราย ที่ค่าพลังงานไฟฟ้า 280 วัตต์ ระดับความลึกน้ำ 50 ถึง 150 เซนติเมตร

ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน (SAE) เป็นผลต่อเนื่องมาจากค่า SOTR ในรูป 4-29 ซึ่งค่า SAE เป็นตัวแปรที่พิจารณาอัตราการถ่ายเทออกซิเจนเมื่อเทียบกับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ หรือเรียกได้ว่าเป็นค่า SOTR ทหารด้วยค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้นั่นเอง ซึ่งในที่นี้การทดลองควบคุมระดับค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ 280 วัตต์ในทุกความลึกที่ใช้ทดลอง ผลของ SAE ที่ออกมาจึงมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับ SOTR โดยในที่ระดับความลึก 100 ถึง 150 เซนติเมตร อุปกรณ์กระจายอากาศชนิดท่อยางให้ค่า SAE สูงสุดอยู่ในช่วง 0.61 – 0.70 กก.ออกซิเจน/กิโลวัตต์-ชม. รองลงมาคือหัวทรายให้ค่า SAE อยู่ในช่วง 0.35 - 0.39 กก.ออกซิเจน/กิโลวัตต์-ชม. และต่ำสุดคือเวนจูรีให้ค่า SAE อยู่ในช่วง 0.23 - 0.28 กก.ออกซิเจน/กิโลวัตต์-ชม. ดังรูปที่ 4-29



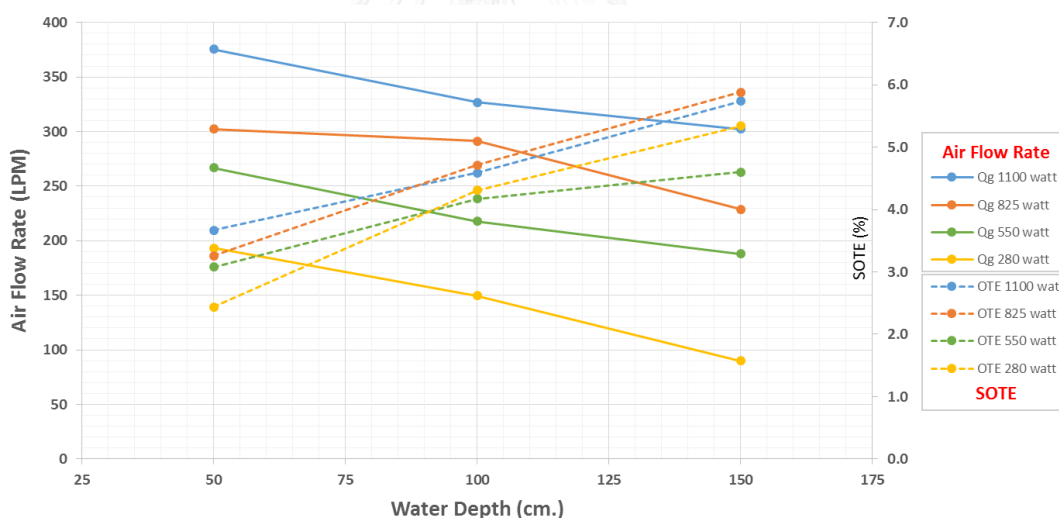
รูปที่ 4-29 ค่า SAE และ SOTE ของอุปกรณ์เวนจูรีขนาด 2 นิ้ว อุปกรณ์กระจายอากาศชนิดท่อยาง ยัดหยุ่นและหัวทราย ที่ค่าพลังงานไฟฟ้า 280 วัตต์ ระดับความลึกน้ำ 50 ถึง 150 เซนติเมตร

ในส่วนของคุณค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (SOTE) ซึ่งเป็นค่าบ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการเปลี่ยนมวลออกซิเจนในอากาศที่ไหลเข้าระบบให้กลายเป็นมวลออกซิเจนละลายน้ำ มีได้ค่านิ่งถึงความเร็วในการถ่ายเทออกซิเจนลงสู่น้ำ หรือค่าพลังงานที่ใช้ในการเติมอากาศ โดยจากกราฟในรูป 4-29 อุปกรณ์เติมอากาศทั้งสามชนิดมีแนวโน้มของ SOTE ที่เพิ่มขึ้น แปรผันตรงกับระดับความลึกน้ำที่เพิ่มสูงขึ้น เป็นผลเนื่องมาจากระยะเวลาสัมผัสระหว่างฟองอากาศและน้ำมีเวลานานขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำ โดยที่ระดับความลึกน้ำ 50 ถึง 150 เซนติเมตร อุปกรณ์ที่ให้ค่า SOTE สูงสุดในการเปรียบเทียบคือ หัวกระจายอากาศแบบท่ออย่าง ให้ค่า SOTE อยู่ในช่วง 4.23 – 10.06 % รองลงมาคือเวนจูรี ให้ค่า SOTE อยู่ในช่วง 2.44 – 5.34 % และต่ำที่สุดคือหัวทราย ให้ค่า SOTE อยู่ในช่วง 1.88 – 4.74 % โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า SOTE นอกเหนือจากความลึกน้ำที่เพิ่มขึ้นคือ ขนาดฟองอากาศ และการกระจายตัวของฟองอากาศ ด้วยเหตุนี้หัวกระจายอากาศแบบท่ออย่าง ถึงจะมีขนาดฟองอากาศเฉลี่ยใกล้เคียงกับเวนจูรี แต่ด้วยการติดตั้งที่ทำให้ฟองอากาศกระจายตัวได้ดีกว่า ค่า SOTE ของท่ออย่างจึงสูงกว่าเวนจูรี และสาเหตุที่ทำให้หัวทรายมีค่า SOTE ต่ำสุดเนื่องจากหัวทรายให้ขนาดฟองอากาศเฉลี่ย 5.15 มิลลิเมตร (ผลการทดลองที่ 4.2) ซึ่งเป็นฟองขนาดใหญ่ (Coarse Bubbles) ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนต่ำ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างฟองอากาศและน้ำน้อยกว่าฟองขนาดเล็ก อีกทั้งฟองขนาดใหญ่มีความเร็วในการลอยตัวสูง ระยะเวลาสัมผัสระหว่างฟองอากาศและน้ำจึงมีน้อยกว่าฟองขนาดเล็กด้วยเช่นกัน

4.3.3 ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงทั้งค่าพลังงานไฟฟ้า และระดับความลึกการเติมอากาศ

ทดลองศึกษาประสิทธิภาพการเติมอากาศเมื่อเดินระบบด้วยแวนจูรีขนาด 2 นิ้ว ที่ระดับค่าพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องสูบน้ำ 4 ค่าคือ 1,100 วัตต์ (100% ของกำลังเครื่องสูบน้ำ), 825 วัตต์ (75%), 550 วัตต์ (50%) และ 280 วัตต์ (25%) โดยใช้อุปกรณ์ Variable Speed Drive (VSD) ในการปรับเปลี่ยนความเร็วรอบมอเตอร์เครื่องสูบน้ำเพื่อเปลี่ยนระดับค่าพลังงานการเติมอากาศ พบว่าลักษณะของกราฟโดยทั่วไปตามรูปที่ 4-30 เป็นดังนี้

- อัตราการไหลของอากาศ (เส้นทึบ) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มพลังงานที่ใช้ในการเติมอากาศ โดยที่ค่าพลังงาน 280 วัตต์ (เส้นสีเหลือง) ซึ่งเป็นค่าพลังงานต่ำสุดจะมีอัตราการไหลอากาศน้อยที่สุด และค่าพลังงาน 1,100 วัตต์ (เส้นสีฟ้า) เป็นค่าพลังงานสูงสุดจะมีอัตราการไหลอากาศมากที่สุด โดยในทุกระดับค่าพลังงานที่ใช้ในการเติมอากาศมีอัตราการไหลอากาศลดลงเมื่อระดับน้ำสูงขึ้น
- ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน SOTE (เส้นประ) ในทุกระดับค่าพลังงานที่ใช้ในการเติมอากาศมีค่า SOTE เพิ่มขึ้นเมื่อระดับน้ำสูงขึ้น

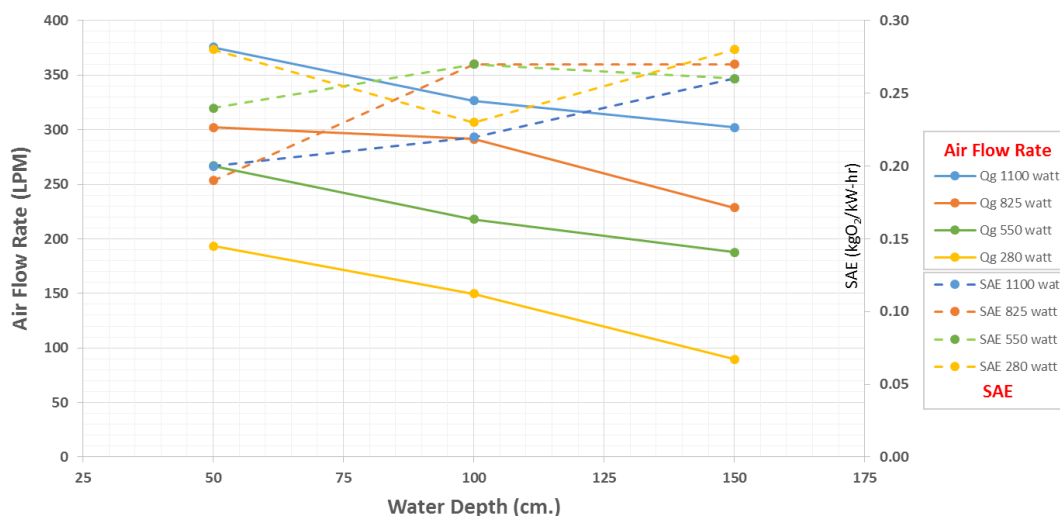


รูปที่ 4-30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าพลังงานที่ใช้เติมอากาศ อัตราการไหลอากาศ (Q_g) และค่า SOTE ของอุปกรณ์แวนจูรีขนาด 2 นิ้ว ระดับความลึกน้ำ 50 ถึง 150 เซนติเมตร

กราฟจากรูป 4-30 สามารถใช้ในการทำนายค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน SOTE ที่การเดินระบบแวนจูรี 2 นิ้วที่สภาวะต่างๆได้ โดยสามารถแบ่งการอ่านกราฟได้เป็น 2 กรณี

- 1) สภาวะการเดินระบบตรงกับที่ใช้ในการทดลอง เช่นหากเดินระบบเวนจูรี 2 นิ้ว ที่ความลึกน้ำ 100 เซนติเมตร ด้วยอัตราการไหลอากาศเข้าเวนจูรีเท่ากับ 150 ลิตร/นาท (เส้นทึบ-สีเหลือง) ณ การเดินระบบที่จุดนี้ จะได้ค่า SOTE เท่ากับ 4.31% (เส้นประ-สีเหลือง) และใช้ค่าพลังงานไฟฟ้าในการเติมอากาศเท่ากับ 280 วัตต์ หรือหากต้องเลือกเครื่องสูบน้ำในการเดินระบบเวนจูรี 2 นิ้วที่สภาวะนี้จะต้องเลือกใช้เครื่องสูบน้ำขนาด 280 วัตต์ หรือมากกว่าในการเดินระบบ
- 2) สภาวะการเดินระบบไม่ตรงกับที่ทดลอง แต่อยู่ในช่วงของข้อมูลการทดลอง เช่นหากเดินระบบเวนจูรี 2 นิ้ว ที่ความลึกน้ำ 125 เซนติเมตร ด้วยอัตราการไหลอากาศเข้าเวนจูรีเท่ากับ 230 ลิตร/นาท ซึ่งอัตราการไหลอากาศ ณ จุดนี้จะอยู่ระหว่าง 200 ลิตร/นาท (เส้นทึบ-สีเขียว) และ 260 ลิตร/นาท (เส้นทึบ-สีส้ม) การเดินระบบ ณ จุดนี้ จะได้ค่า SOTE อยู่กึ่งกลางระหว่าง 4.4% (เส้นประ-สีเขียว) และ 5.2% (เส้นประ-สีส้ม) ซึ่งอ่านค่า SOTE ได้เท่ากับ 4.8% และเช่นเดียวกันค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเติมอากาศก็จะอยู่กึ่งกลางระหว่าง 550 วัตต์ (เส้นสีเขียว) และ 825 วัตต์ (เส้นสีส้ม) ซึ่งมีค่าพลังงานเท่ากับ 688 วัตต์ โดยหากต้องเลือกเครื่องสูบน้ำในการเดินระบบเวนจูรี 2 นิ้วที่สภาวะนี้จะต้องเลือกใช้เครื่องสูบน้ำขนาด 688 วัตต์หรือมากกว่าในการเดินระบบ

ข้อมูลผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงทั้งค่าพลังงานไฟฟ้า และระดับความลึกการเติมอากาศ นอกจะใช้สร้างกราฟทำนายค่า SOTE ได้แล้ว ยังสามารถนำไปคำนวณค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน (SAE) เพื่อใช้ในการพิจารณาสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสม ณ ระดับความลึกน้ำต่างๆ โดยเลือกจากสภาวะการเดินระบบที่ให้ค่า SAE สูงสุด เนื่องจากค่า SAE เป็นตัวแปรที่พิจารณาทั้งค่าอัตราการเติมออกซิเจนและค่าพลังงานที่ใช้ในการเติมอากาศ โดยผลการทดลองของการเดินระบบ ด้วยเวนจูรีขนาด 2 นิ้ว ดังรูปที่ 4-31 สามารถแบ่งช่วงสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสม ณ ระดับความลึกน้ำต่างๆ ได้ดังนี้



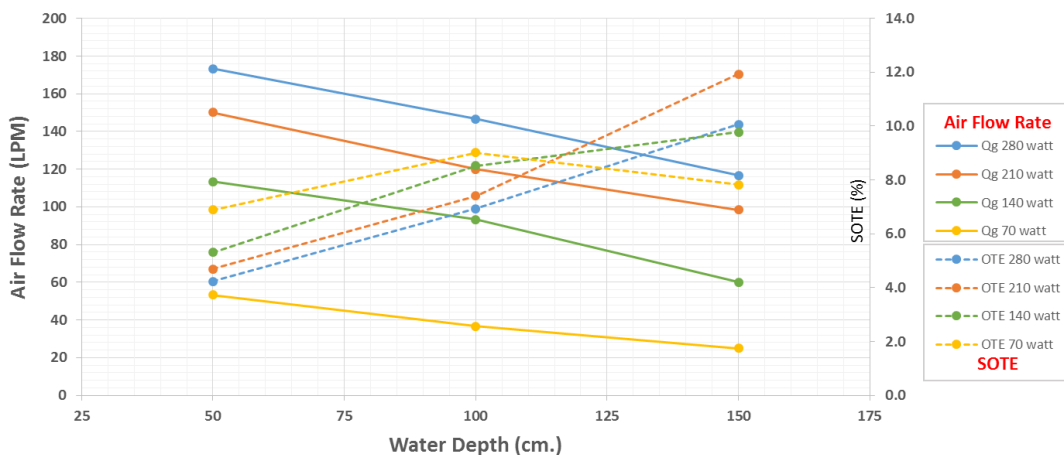
รูปที่ 4-31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าพลังงานที่ใช้เติมอากาศ อัตราการไหลอากาศ (Qg) และค่า SAE ของอุปกรณ์เวนจิวรีขนาด 2 นิ้ว ระดับความลึกน้ำ 50 ถึง 150 เซนติเมตร

- 1) ที่ระดับความลึกน้ำ 50 ถึง 75 เซนติเมตร ค่าพลังงานไฟฟ้าในการเติมอากาศที่เหมาะสมคือ 280วัตต์ (เส้นสีเหลือง) โดยมีค่าอัตราการไหลอากาศอยู่ในช่วง 170 - 193 ลิตร/นาที่ ได้ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ (SAE) อยู่ในช่วง 0.25 - 0.28 กก.ออกซิเจน/กิโลวัตต์-ชม.
- 2) ที่ระดับความลึกน้ำ 75 ถึง 100 เซนติเมตร ค่าพลังงานไฟฟ้าในการเติมอากาศที่เหมาะสมคือ 550 วัตต์ (เส้นสีเขียว) โดยมีค่าอัตราการไหลอากาศอยู่ในช่วง 217 - 240 ลิตร/นาที่ ได้ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ (SAE) อยู่ในช่วง 0.25 - 0.27 กก.ออกซิเจน/กิโลวัตต์-ชม.
- 3) ที่ระดับความลึกน้ำ 100 ถึง 150 เซนติเมตร ค่าพลังงานไฟฟ้าในการเติมอากาศที่เหมาะสมคือ 825 วัตต์ (เส้นสีส้ม) โดยมีค่าอัตราการไหลอากาศอยู่ในช่วง 230 - 290 ลิตร/นาที่ ได้ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ (SAE) เท่ากับ 0.27 กก.ออกซิเจน/กิโลวัตต์-ชม.

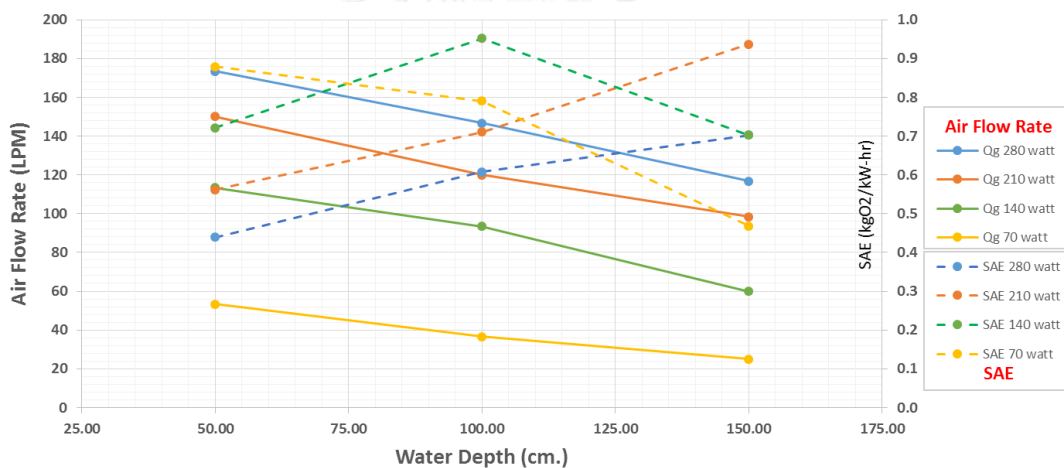
จากผลการทดลองวิเคราะห์ค่า SAE ที่เหมาะสมในแต่ละระดับความลึกน้ำจะเห็นได้ว่า ยิ่งระดับน้ำเพิ่มสูงขึ้น ระดับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเติมอากาศที่เหมาะสมก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นที่ระดับพลังงานไฟฟ้าในการเติมอากาศเท่ากับ 1,100 วัตต์ (เส้นสีฟ้า) ที่อัตราการไหลอากาศสูงกว่า 300 ลิตร/นาที่ มีแนวโน้มที่จะให้ค่า SAE สูงสุดที่ระดับน้ำลึกกว่า 150 เซนติเมตร ขึ้นไป ด้วยเหตุนี้ การเลือกใช้อัตราการไหลอากาศที่เหมาะสมกับปริมาตรและความลึกน้ำที่ใช้ในการเติมอากาศจึงมี

ความจำเป็นที่จะต้องพิจารณา เพราะหากเลือกอัตราการไหลอากาศที่สูงเกินไปที่ความลึกน้ำระดับต่ำ อาจได้อัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่รวดเร็ว แต่ก็แลกมาด้วยการสิ้นเปลืองค่าพลังงานไฟฟ้ามาก ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ (SAE) จึงต่ำ หรือหากเลือกอัตราการไหลอากาศที่ต่ำเกินไปที่ความลึกน้ำระดับสูง อาจได้ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนที่สูง (SOTE) แต่อัตราการถ่ายเทออกซิเจนลงสู่น้ำจะมีค่าน้อย และใช้เวลายาวนานมากในการเพิ่มระดับค่าออกซิเจนละลาย (DO) ของน้ำในบ่อเติมอากาศ

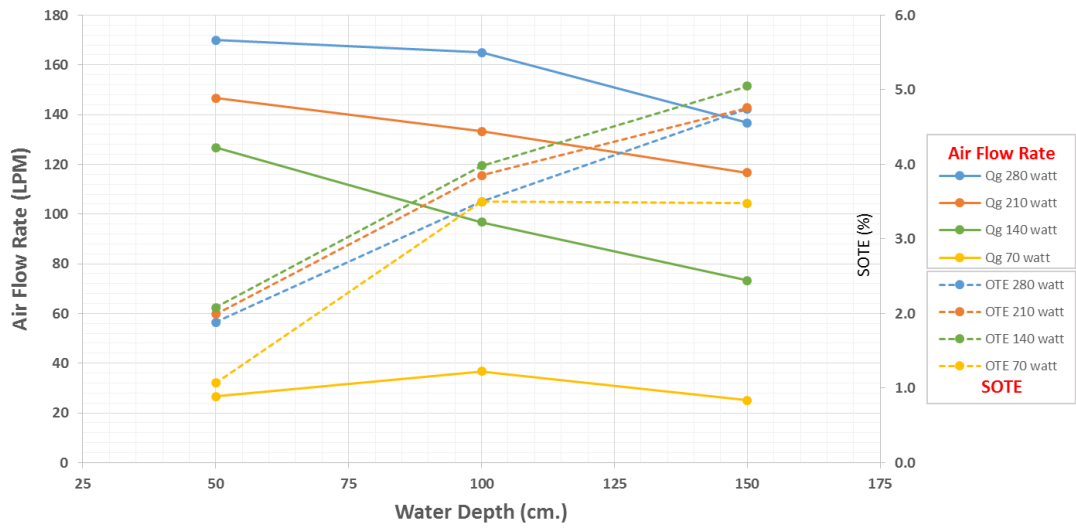
ผลการทดลองสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าพลังงานที่ใช้เติมอากาศ อัตราการไหลอากาศ (Q_g) ค่า SOTE และ SAE ของอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดท่ออย่างยืดหยุ่น และหัวทราย พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับเวนจูรีคือ อัตราการไหลของอากาศ (Q_g) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มพลังงานที่ใช้ในการเติมอากาศ และลดลงเมื่อระดับน้ำสูงขึ้น ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน SOTE ในทุกระดับค่าพลังงานที่ใช้ในการเติมอากาศจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระดับน้ำสูงขึ้น โดยหัวกระจายอากาศชนิดท่ออย่างยืดหยุ่น ให้ค่า SOTE สูงสุดที่ 11.93% ที่ค่าพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 210 วัตต์ ระดับความลึกน้ำ 150 เซนติเมตร และหัวกระจายอากาศชนิดหัวทราย ให้ค่า SOTE สูงสุดที่ 5.05% ที่ค่าพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 140 วัตต์ ระดับความลึกน้ำ 150 เซนติเมตร ส่วนค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน SAE ของหัวกระจายอากาศชนิดท่ออย่างยืดหยุ่น ให้ค่า SAE สูงสุดที่ 0.94 กก.ออกซิเจน/กิโลวัตต์-ชม. ที่ค่าพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 210 วัตต์ ระดับความลึกน้ำ 150 เซนติเมตร และหัวกระจายอากาศชนิดหัวทราย ให้ค่า SAE สูงสุดที่ 0.44 กก.ออกซิเจน/กิโลวัตต์-ชม. ที่ค่าพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 140 วัตต์ ระดับความลึกน้ำ 150 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4-33 ถึง 4-36



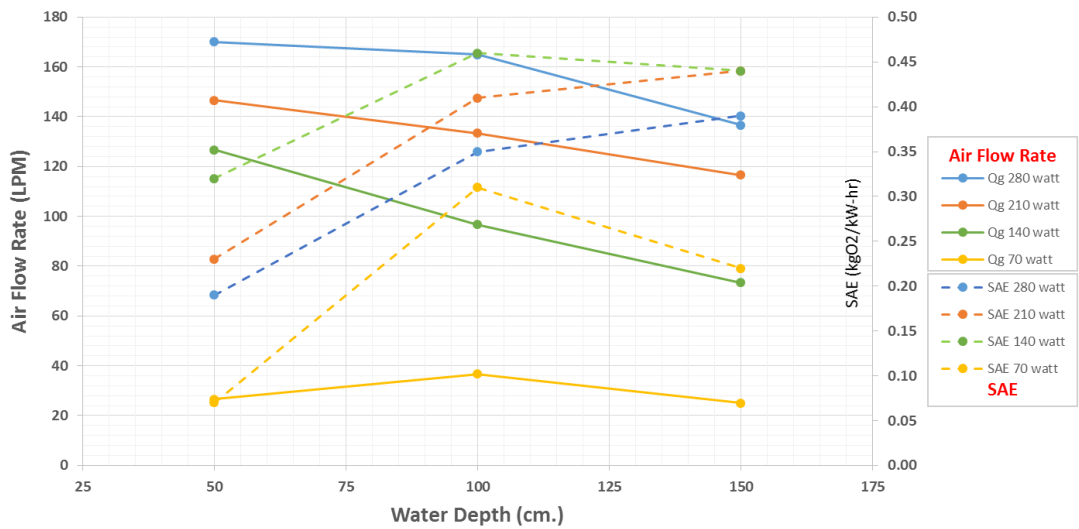
รูปที่ 4-32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าพลังงานที่ใช้เติมอากาศ อัตราการไหลอากาศ (Q_g) และค่า SOTE ของอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดท่ออย่างยืดหยุ่น ระดับความลึกน้ำ 50 ถึง 150 ซม.



รูปที่ 4-33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าพลังงานที่ใช้เติมอากาศ อัตราการไหลอากาศ (Q_g) และค่า SAE ของอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดท่ออย่างยืดหยุ่น ระดับความลึกน้ำ 50 ถึง 150 ซม.



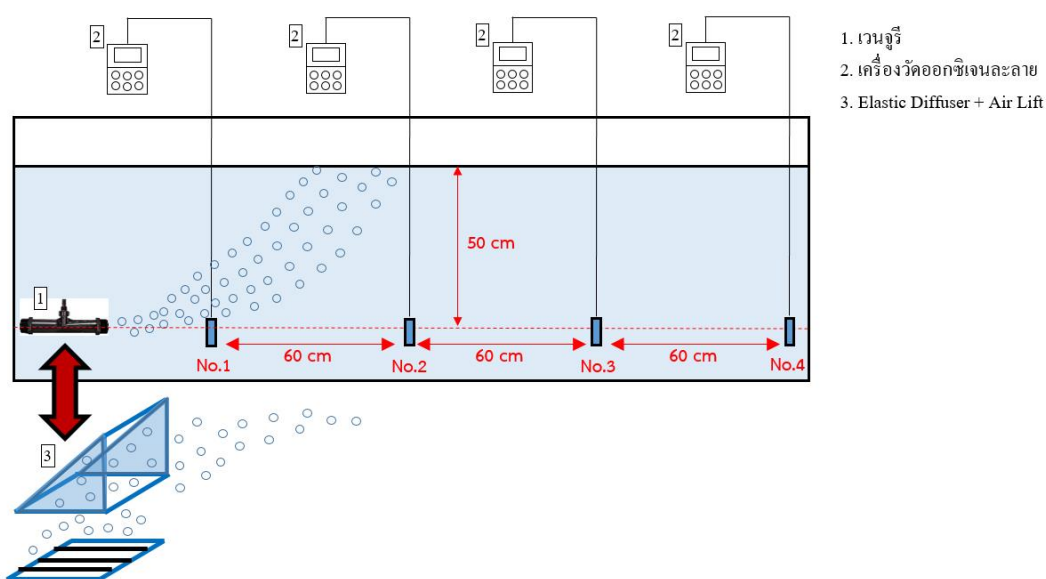
รูปที่ 4-34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าพลังงานที่ใช้เติมอากาศ อัตราการไหลอากาศ (Q_g) และค่า SOTE ของอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดหัวทราย ระดับความลึกน้ำ 50 ถึง 150 ซม.



รูปที่ 4-35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าพลังงานที่ใช้เติมอากาศ อัตราการไหลอากาศ (Q_g) และค่า SAE ของอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดหัวทราย ระดับความลึกน้ำ 50 ถึง 150 ซม.

4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์เติมอากาศเวนจูรี กับอุปกรณ์กระจายอากาศ ในเทอมของประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน ต่อระยะห่างจากจุดเติมอากาศ

ผลการทดลองเปรียบเทียบอุปกรณ์กระจายอากาศแบบท่ออย่าง (Elastic Diffuser) ติดตั้งร่วมกับอุปกรณ์ AirLift เพื่อช่วยผลักดันฟองอากาศไหลไปด้านหน้าอุปกรณ์ กับอุปกรณ์เวนจูรีขนาด 2 นิ้ว ในถังเติมอากาศทรงยาว ขนาดความกว้าง 50 เซนติเมตร ยาว 244 เซนติเมตร โดยควบคุมอัตราการไหลอากาศเข้าอุปกรณ์เท่ากันคือ 200 ลิตร/นาที เปรียบเทียบประสิทธิภาพในเทอมของประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน ต่อระยะห่างจากจุดเติมอากาศ ได้ผลดังตารางที่ 4-10 และ 4-11



รูปที่ 4-36 ตำแหน่งเครื่องวัดออกซิเจนละลายในถังเติมอากาศ

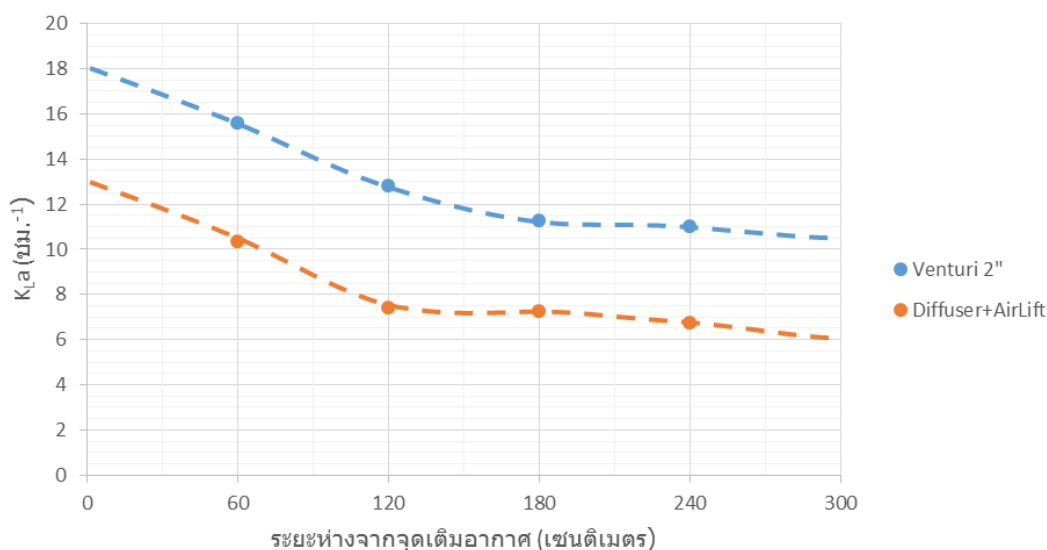
ตารางที่ 4-10 ผลการทดสอบประสิทธิภาพอุปกรณ์เวนจูรี

ตำแหน่งเครื่องวัดออกซิเจนละลาย	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (ชม.^{-1})	อัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (กรัม-ออกซิเจน/ชม.)	ประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน (กก.ออกซิเจน/กิโลวัตต์-ชม.)	ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (%)
	$K_L a_{20}$	SOTR	SAE	SOTE
No.1	15.60	120.80	0.43	3.75
No.2	12.85	99.46	0.36	3.09
No.3	11.26	87.18	0.31	2.71
No.4	11.02	85.33	0.30	2.65

ตารางที่ 4-11 ผลการทดสอบประสิทธิภาพอุปกรณ์กระจายอากาศแบบท่ออย่าง (Elastic Diffuser) ติดตั้งร่วมกับอุปกรณ์ Airlift

ตำแหน่งเครื่องวัดออกซิเจนละลาย	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (ชม.-1)	อัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (กรัม-ออกซิเจน/ชม.)	ประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน (กก.ออกซิเจน/กิโลวัตต์-ชม.)	ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (%)
	K_{La20}	SOTR	SAE	SOTE
No.1	10.38	80.38	0.29	2.40
No.2	7.40	57.30	0.21	1.71
No.3	7.25	56.15	0.20	1.68
No.4	6.75	52.26	0.19	1.56

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจุดเติมอากาศ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (K_{La20}) ได้ผลดังกราฟในรูปที่ 4-37

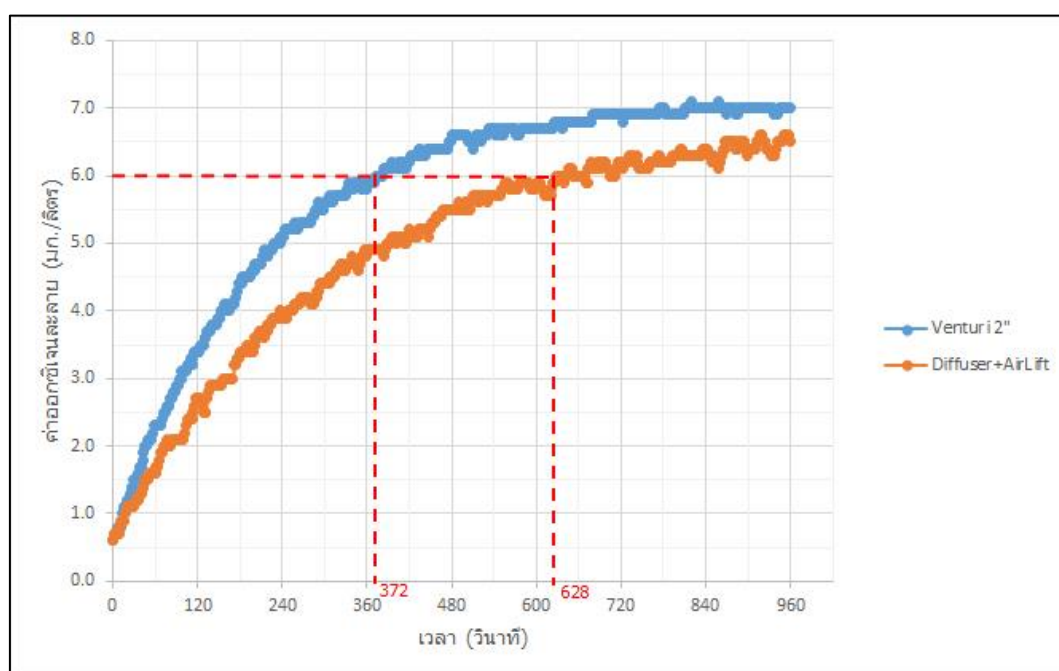


รูปที่ 4-37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_{La} และระยะห่างจากจุดเติมอากาศ

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าในถังเติมอากาศรูปทรงยาว ซึ่งมีอัตราส่วนด้านกว้างต่อด้านยาวประมาณ 1 ต่อ 4 อุปกรณ์เวนจูรีมีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนที่ดีกว่าอุปกรณ์กระจายอากาศแบบท่ออย่าง ที่ติดตั้งร่วมกับอุปกรณ์ Airlift โดยเมื่อพิจารณาที่ระยะห่างจากอุปกรณ์เติมอากาศเท่ากับ 60 120 และ 180 เซนติเมตร พบว่าค่า K_{La20} ที่ได้จากอุปกรณ์เวนจูรีเท่ากับ 15.60 ชม.^{-1} 12.85^{-1} และ 11.26 ชม.^{-1} ตามลำดับ ในขณะที่อุปกรณ์กระจายอากาศแบบท่ออย่างได้ค่า K_{La20} เท่ากับ

7.40 ชม.⁻¹ 7.25 ชม.⁻¹ และ 6.75 ชม.⁻¹ ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกันแล้วค่า K_{La20} ของเวนจูรีจะสูงกว่าอยู่ถึง 66.8 - 110.8%

เมื่อพิจารณาความเร็วในการเพิ่มค่าออกซิเจนละลายในถังเดิมอากาศไปถึงระดับ 80% ของค่าอิ่มตัวของออกซิเจนละลายเท่ากับ 6.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำอุณหภูมิ 30°C ณ ตำแหน่งเครื่องวัดออกซิเจนละลายที่ระยะห่าง 180 เซนติเมตร พบว่าอุปกรณ์เวนจูรีใช้เวลาในการเติมอากาศ 372 วินาที (6 นาที 12 วินาที) ส่วนอุปกรณ์กระจายอากาศแบบท่ออย่างติดตั้งร่วมกับอุปกรณ์ Airlift ใช้เวลาอยู่ที่ 628 วินาที (10 นาที 28 วินาที) ดังรูปที่ 4-38



รูปที่ 4-38 ผลการทดสอบเวนจูรีขนาด 2 นิ้ว และอุปกรณ์กระจายอากาศแบบท่ออย่างติดตั้งร่วมกับ Airlift

อย่างไรก็ตาม ข้อมูลที่ได้จากการทดลองข้างต้น ไม่สามารถสรุปได้ว่าอุปกรณ์เติมอากาศแบบเวนจูรี มีประสิทธิภาพดีกว่าอุปกรณ์กระจายอากาศแบบท่ออย่าง แต่สามารถบอกได้ว่าอุปกรณ์เวนจูรีมีความเหมาะสมที่จะติดตั้งในถังเดิมอากาศลักษณะรูปทรงยาว มากกว่าอุปกรณ์กระจายอากาศแบบท่ออย่างติดตั้งร่วมกับอุปกรณ์ Airlift เนื่องจากลักษณะการทำงานของเวนจูรีที่สามารถส่งฟองอากาศไปด้านหน้าอุปกรณ์ได้เป็นระยะทางไกล ตามความแรงของน้ำขาเข้าอุปกรณ์ ซึ่งดีกว่าอุปกรณ์กระจายอากาศแบบท่ออย่างที่มีลักษณะแบบ Diffuser ทั่วไป คือสร้างฟองอากาศจากรูพรุนของหัวกระจายอากาศลอยขึ้นตรงในแนวตั้ง ถึงแม้จะติดตั้งอุปกรณ์ Airlift ก็ไม่ทำให้ฟองอากาศพุ่งออกไปด้านหน้าได้ไกลนัก โดยฟองอากาศมีแนวโน้มที่จะโค้งขึ้นสู่วิวน้ำทันทีที่หลุดออกจากระยะแผ่นเอียงของ Airlift

ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนในระยะทางยาวไม่ดีเท่าอุปกรณ์เติมอากาศเวนจูรี หากต้องการประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนในระยะทางยาวควรติดตั้งหัวกระจายอากาศตลอดระยะทางตามแนวความยาวถังเติมอากาศ ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพดีกว่าการติดตั้งอุปกรณ์ Airlift

ถึงแม้ว่าการติดตั้งอุปกรณ์ Airlift จะไม่สามารถทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนในระยะทางยาวดีขึ้น แต่การติดตั้ง Airlift มีข้อดีคือสามารถควบคุมให้เกิดการพลิกค้ำน้ำไปด้านหลังตามทิศทางที่ต้องการ สามารถใช้ประโยชน์ในการพลิกค้ำตะกอนหรือวัตถุแขวนลอยในบ่อเติมอากาศหรือบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ให้ไหลไปยังจุดรวบรวมตะกอน เพื่อง่ายต่อการจัดเก็บหรือสูบออก



4.6 การประยุกต์ใช้อุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว (LFFA) ร่วมกับอุปกรณ์เวนจูรี

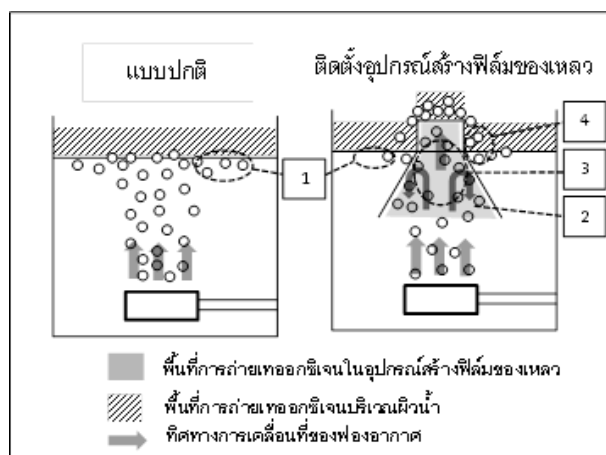
การพัฒนาประสิทธิภาพอุปกรณ์เวนจูรี และอุปกรณ์กระจายอากาศ สามารถทำได้โดยการติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว (Liquid Film Forming Apparatus, LFFA) ดังรูปที่ 4-39 โดย LFFA เป็นอุปกรณ์รูปทรงกรวย มีหน้าที่กักฟองอากาศให้ขึ้นสู่ผิวหน้าข้างลง เพิ่มระยะเวลาสัมผัสระหว่างฟองอากาศและน้ำมากขึ้น ส่งผลให้สามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (K_La) ได้ประมาณ 5.10 – 9.43 % ดังแสดงในตารางที่ 4-12 โดยไม่ต้องใช้พลังงานเพิ่มเติม

ตารางที่ 4-12 ผลการพัฒนาประสิทธิภาพการเติมอากาศ ด้วยอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว

อุปกรณ์	อัตราการไหลอากาศ (ลิตร/นาท)	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (ชม.-1)	อัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (กรัม-ออกซิเจน/ชม.)	ประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน (กก.ออกซิเจน/กิโลวัตต์-ชม.)	ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (%)
	Q_g	K_La_{20}	SOTR	SAE	SOTE
เวนจูรี 2"	350	30.57	236.62	0.26	3.98
เวนจูรี 2" + LFFA	350	33.10	256.23	0.28	4.31
ความแตกต่าง (%)		8.28	8.29	7.69	8.29
เวนจูรี 1"	90	3.53	27.32	0.31	1.76
เวนจูรี 1" + LFFA	90	3.71	28.71	0.47	1.85
ความแตกต่าง (%)		5.10	5.09	6.45	5.11
เวนจูรี 1/2"	5	1.06	8.23	0.13	9.81
เวนจูรี 1/2" + LFFA	5	1.16	8.96	0.14	10.28
ความแตกต่าง (%)		9.43	8.87	7.69	4.79

จากการทดลองสามารถสรุปกลไกการถ่ายเทออกซิเจนของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวซึ่งมีทั้งหมดสี่กลไกดังแสดงในรูป 4-40 (ตาวัน เจริญพิทยา, 2556)

- 1) ความปั่นป่วนที่บริเวณผิวหน้าลดลง ฟองอากาศที่ลอยขึ้นมา มีพื้นที่การกระจายตัวที่ลดลง
- 2) มีความปั่นป่วนของฟองอากาศภายในอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว
- 3) ฟองอากาศบางส่วนจะลอยเข้าสู่ผิวหน้าได้ข้างลง (มีระยะเวลาอยู่ในระบบนานขึ้น) เนื่องจากภายในอุปกรณ์มีความปั่นป่วน จะมีฟองอากาศบางส่วนหมุนวนกลับลงไปด้วยด้านล่าง
- 4) ฟองอากาศ และน้ำบางส่วนที่พุ่งออกมาจาก LFFA จะตกกลับไปใต้น้ำอีกครั้ง



รูปที่ 4-39 แสดงลักษณะการถ่ายเทออกซิเจนของระบบสร้างฟิล์มของเหลว

ที่มา : (ดาวัน เจริญพิทยา, 2556)

จากผลการทดลองค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (SOTE) ในตารางที่ 4-12 พบว่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นจากการติดตั้ง LFFA มีเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับอัตราการไหลอากาศ สังเกตได้จากเวจรูรีขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว ที่ให้อัตราการไหลอากาศต่ำ 5 ลิตร/นาที่ มีเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของ SOTE หลังจากติดตั้ง LFFA เท่ากับ 4.79% เมื่อเดินระบบด้วยเวจรูรีขนาด 1 นิ้ว ที่อัตราการไหลอากาศ 90 ลิตร/นาที่ มีเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของ SOTE หลังจากติดตั้ง LFFA เท่ากับ 5.11% และเวจรูรีขนาด 2 นิ้ว อัตราการไหลอากาศ 350 ลิตร/นาที่ มีเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของ SOTE หลังจากติดตั้ง LFFA เท่ากับ 8.29% ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลอากาศทำให้ฟองอากาศเกิดการหมุนวนอยู่ภายใน LFFA นานขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับน้ำยาวนานขึ้น อีกทั้งการเพิ่มขึ้นของอัตราไหลอากาศส่งผลให้ฟองอากาศที่กลายเป็นชั้นฟิล์มของเหลวด้านบนอุปกรณ์ LFFA มีการแผ่ขยายเป็นวงกว้างและตกกลับลงมาในน้ำมากขึ้น ฟองอากาศจึงมีระยะเวลาถ่ายเทออกซิเจนลงสู่น้ำนานขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูงขึ้นตามการเพิ่มอัตราการไหลอากาศ

4.7 สมการทำนายประสิทธิภาพการเติมอากาศของอุปกรณ์เวนจรี

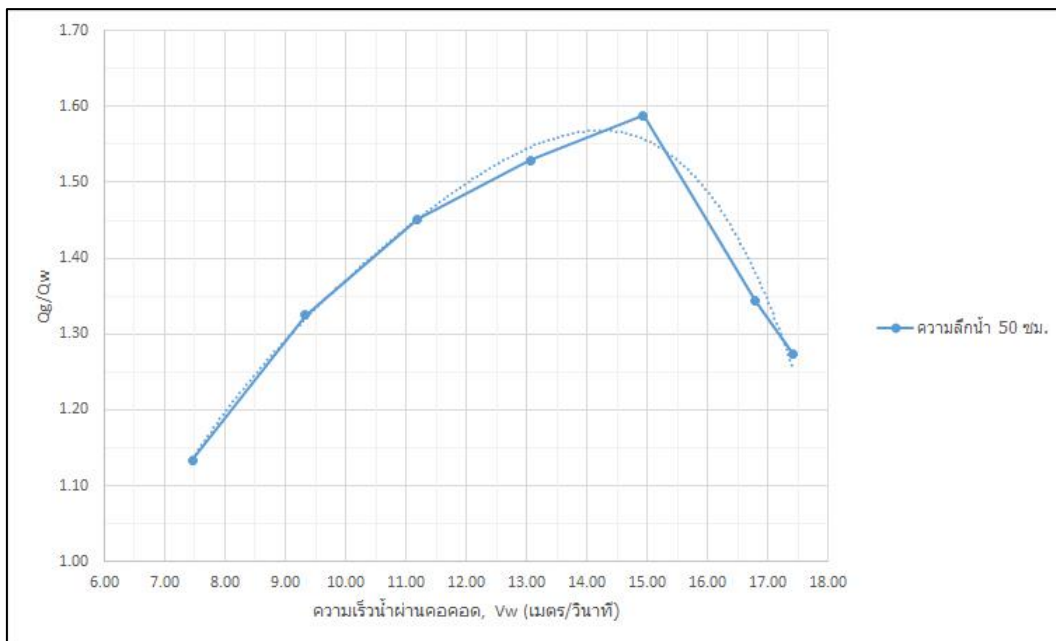
ในทางทฤษฎี หนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้เวนจรีทั้งสามขนาดมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ($K_L a$) ที่แตกต่างกันคือ ค่าพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างก๊าซและของเหลว (Specific interfacial area, a) ดังสมการที่ 4.5

$$K_L a = K_L * a \quad (4.7)$$

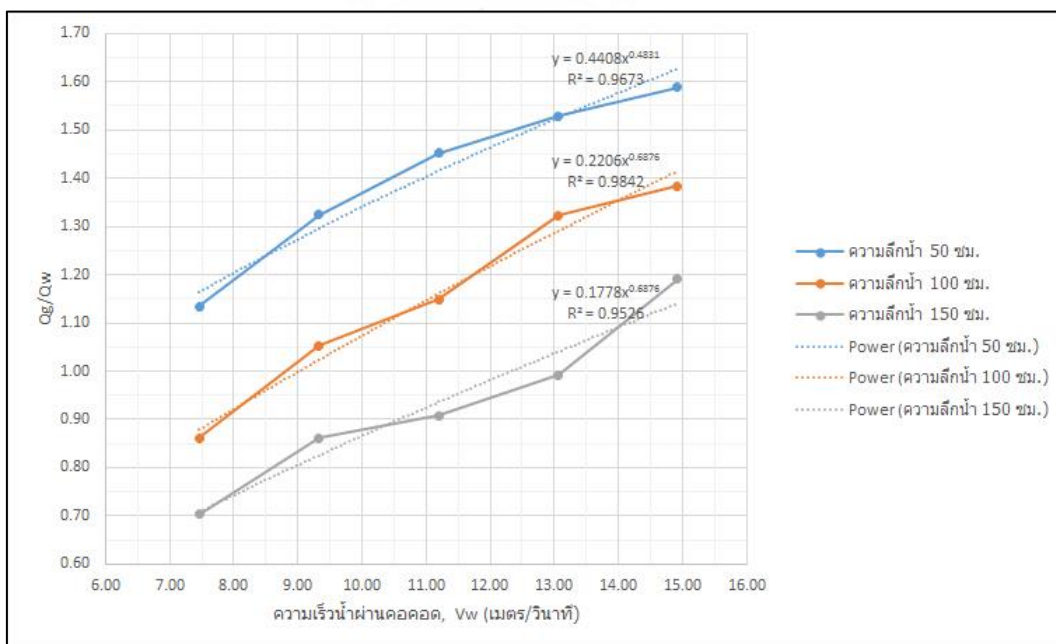
ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่าพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างก๊าซและของเหลว (a) ได้แก่ อัตราการไหลของอากาศ (Q_g) ขนาดฟองอากาศ (D_B) และความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (U_B) โดยเมื่อพิจารณาเฉพาะตัวแปรอัตราส่วนการไหลของอากาศ (Q_g) ที่เวนจรีสามารถดูดเข้ามาในระบบ ต่ออัตราการไหลของน้ำผ่านเวนจรี (Q_w) พบว่าอัตราส่วน Q_g/Q_w มีผลต่อประสิทธิภาพการเติมอากาศของเวนจรี ยกตัวอย่างเช่นเวนจรี A และ B ขนาด 2 นิ้วเท่ากัน แต่มีการออกแบบสัดส่วนภายในเวนจรีที่แตกต่างกัน เวนจรี A ผ่านน้ำ 100 ลิตร/นาที่ สามารถดึงอากาศเข้าระบบได้ 150 ลิตร/นาที่ คิดเป็นอัตราส่วน Q_g/Q_w เท่ากับ 1.5 ส่วนเวนจรี B ผ่านน้ำ 100 ลิตร/นาที่ สามารถดึงอากาศเข้าสู่ระบบได้ 100 ลิตร/นาที่ คิดเป็นอัตราส่วน Q_g/Q_w เท่ากับ 1.0 ฉะนั้นเมื่อทำการทดลองเติมอากาศ เวนจรี A ย่อมได้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า เนื่องจากดึงอากาศเข้าสู่ระบบได้มากกว่า ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าความเร็วผ่านคอคอดเวนจรี (V_w) และระดับความลึกน้ำ (Aeration Depth) ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน Q_g/Q_w อย่างมีนัยสำคัญ

4.7.1 สมการทำนายประสิทธิภาพการดูดอากาศเข้าสู่ระบบของอุปกรณ์เวนจรี

จากการทดลองใช้ความเร็วผ่านคอคอด (V_w) กับอุปกรณ์เวนจรีขนาด 2 นิ้ว ในช่วงความเร็ว 7.46 - 17.41 เมตร/วินาที ที่ระดับน้ำคงที่ 50 เซนติเมตร พบว่าค่าอัตราส่วน Q_g/Q_w มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มค่าความเร็วผ่านคอคอดไปจนถึงจุดหนึ่ง และอัตราส่วน Q_g/Q_w จะลดต่ำลงเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นเลยจุดที่เหมาะสมไป พบว่าที่ความเร็วน้ำเริ่มต้น 7.46 เมตร/วินาที เมื่อเพิ่มความเร็วขึ้นไปจนถึง 14.92 เมตร/วินาที ค่าอัตราส่วน Q_g/Q_w จะเพิ่มสูงขึ้นจาก 1.13 ไปเป็น 1.59 แต่ทว่าเมื่อเพิ่มความเร็วน้ำสูงขึ้นอีกเป็น 17.41 เมตร/วินาที ค่าอัตราส่วน Q_g/Q_w กลับลดต่ำลงเป็น 1.27 ดังรูปที่ 4-40

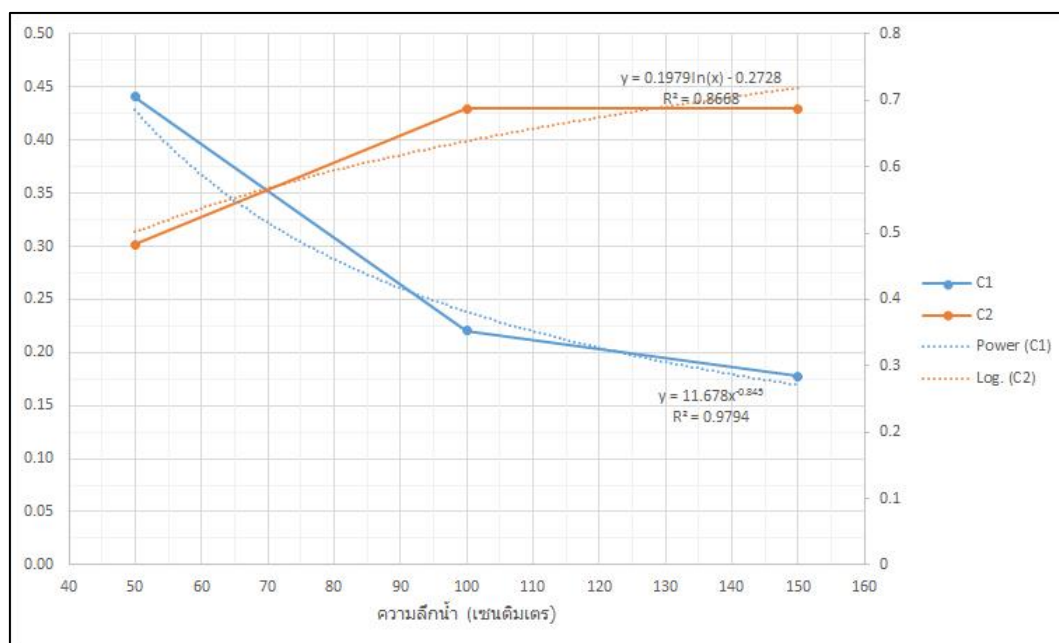


รูปที่ 4-40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า V_w และอัตราส่วน Q_g/Q_w ที่ความลึกน้ำ 50 เซนติเมตร จากการทดลองพบว่าอีกหนึ่งตัวแปรที่ส่งผลให้เวเนจูรีสามารถดูดอากาศเข้าสู่ระบบได้มากขึ้น ได้แก่ ระดับความลึกของจุดเติมอากาศ (Aeration Depth) โดยเมื่อทดสอบการเติมอากาศด้วยเวเนจูรีขนาด 2 นิ้ว ที่ระดับความลึกจากผิวน้ำต่างกัน ได้แก่ 50 100 และ 150 เซนติเมตร พบว่าอัตราส่วน Q_g/Q_w มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อลดระดับความลึกจากผิวน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 4-41 กล่าวได้ว่า หากแรงต้านหรือความดันด้านขาออกของเวเนจูรีลดลง อุปกรณ์เวเนจูรีจะสามารถดูดอากาศเข้าสู่ระบบได้มากขึ้น



รูปที่ 4-41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า V_w และอัตราส่วน Q_g/Q_w ที่ความลึกจากผิวน้ำระดับต่างๆ

จากผลการทดลองทำให้ทราบว่าค่าอัตราส่วนการไหลของอากาศต่อน้ำ (Q_g/Q_w) แปรผันตามสองตัวแปร คือ ค่าความเร็วน้ำผ่านคอคอดของเวนจูรี (V_w) และระดับความลึกของจุดเติมอากาศ (Aeration depth) โดยจากกราฟในรูปที่ 4-41 พบว่าเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า V_w และอัตราส่วน Q_g/Q_w อยู่ในรูปของสมการ Power เช่นที่ความลึก 50 เซนติเมตร จะมีความสัมพันธ์เป็นสมการ Power คือ $Y = 0.4408X^{0.4831}$ เช่นเดียวกับระดับความลึกอื่น ซึ่งมีความสัมพันธ์เป็นสมการ Power ในรูปของ $Y = C_1X^{C_2}$ โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ C_1 และ C_2 มีความสัมพันธ์กับระดับความลึกที่เปลี่ยนแปลงไป จึงสามารถนำมาพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่าง C_1 และ C_2 กับระดับความลึกของจุดเติมอากาศ (Aeration depth) ได้ดังรูปที่ 4-42



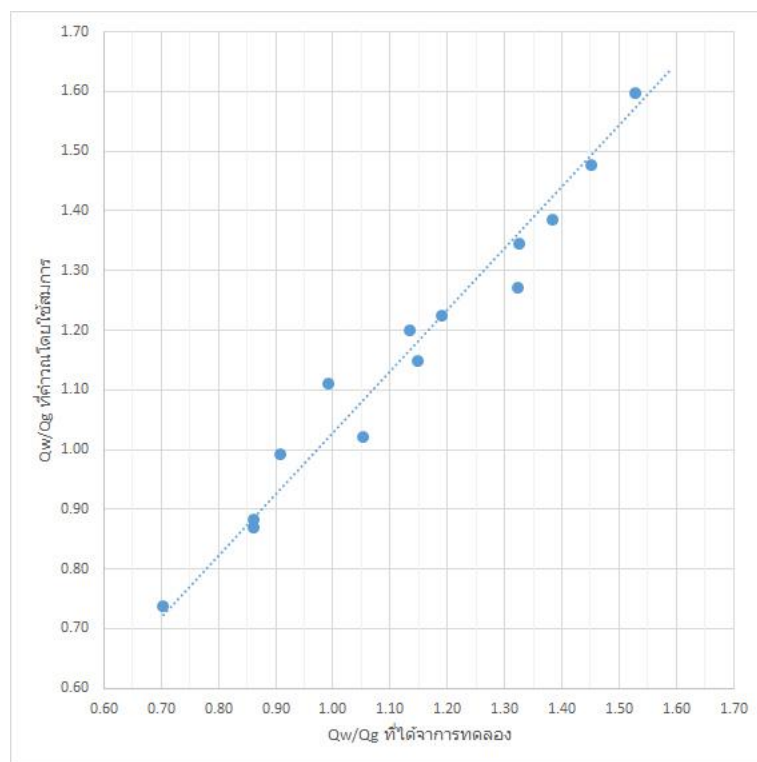
รูปที่ 4-42 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_1 และ C_2 กับระดับความลึกของจุดเติมอากาศ

พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ C_1 และความลึกน้ำอยู่รูปฟังก์ชันของสมการ Power คือ $C_1 = 11.678(\text{Depth})^{-0.845}$ และพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ C_2 และความลึกน้ำอยู่รูปฟังก์ชันของสมการลอการิทึม $C_2 = 0.1979\ln(\text{Depth}) - 0.2728$

เมื่อนำฟังก์ชันของ C_1 และ C_2 แทนลงในสมการ Power $Y = C_1X^{C_2}$ ของความสัมพันธ์ระหว่างค่า อัตราส่วน Q_g/Q_w และค่า V_w หรือเขียนได้เป็น $Q_g/Q_w = C_1V_w^{C_2}$ จะสามารถสร้างสมการสำหรับทำนายประสิทธิภาพของอุปกรณ์เวนจูรีขนาด 2 นิ้วได้ ดังสมการที่ 4.8

$$\frac{Q_g}{Q_w} = \frac{11.678 * V_w^{0.1979 \ln(\text{Depth})}}{\text{Depth}^{0.845} * V_w^{0.27}} \quad (4.8)$$

เมื่อทดลองใช้สมการสำหรับทำนายประสิทธิภาพของอุปกรณ์เวนจูรี ค่าพจน์ Q_g/Q_w เปรียบเทียบกับค่า Q_g/Q_w ที่ได้จากการทดลอง พบค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ที่ 12.03% ดังรูปที่ 4-43



รูปที่ 4-43 กราฟเปรียบเทียบค่า Q_g/Q_w ที่ได้จากการทดลอง และสมการทำนายประสิทธิภาพสมการทำนายนี้มีข้อจำกัดคือ เหมาะที่จะใช้ทำนายประสิทธิภาพของเวนจูรีขนาด 2 นิ้ว เท่านั้นเนื่องจากชุดข้อมูลที่ใช้สร้างสมการมาจากผลการทดลองของเวนจูรีขนาด 2 นิ้ว ที่ระดับความลึกน้ำไม่เกิน 150 เซนติเมตร และสมการนี้ใช้ทำนายได้เพียงอัตราไหลอากาศ (Q_g) ที่จะเข้าสู่ระบบเท่านั้น ยังไม่สามารถทำนายถึงอัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่จะเข้าสู่ระบบได้ ซึ่งจะกล่าวถึงในสมการถัดไป

4.7.2 สมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (K_La) ของอุปกรณ์เวเนจูรี

ในการออกแบบระบบเติมอากาศ สิ่งที่จะต้องคำนึงถึงคือความต้องการออกซิเจนของระบบ (Oxygen Requirement) เช่นระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้บ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon) จะมีความต้องการออกซิเจนเท่ากับ 0.7-1.4 กรัมออกซิเจนต่อกรัมบีโอดีที่ถูกกำจัด (Metcalf & Eddy, 2004) จากนั้นจึงคำนวณออกมาเป็นอัตราความต้องการออกซิเจนต่อหน่วยเวลา เช่น กิโลกรัมออกซิเจนต่อชั่วโมง เป็นต้น ซึ่งค่าดังกล่าวคืออัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (Standard Oxygen Transfer Rate, SOTR) ดังสมการ 4.9

$$SOTR = K_La_{20}(C_{s,20} - C_t)V \quad (4.9)$$

จากสมการที่ 4.9 หากรู้ค่า K_La ที่ระบบเติมอากาศเวเนจูรีสามารถทำได้ เมื่อนำมาคำนวณกับค่าออกซิเจนละลายอิมิตัวที่อุณหภูมิใดๆ (C_s) ระดับค่าออกซิเจนละลายของบ่อเติมอากาศ (C_t) และปริมาตรน้ำที่เติมอากาศ (V) ก็จะได้ค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจน (OTR) ที่ระบบอากาศเวเนจูรีที่สภาวะการเดินระบบนั้นๆทำได้ การสร้างสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (K_La) ของอุปกรณ์เวเนจูรี จึงมีความสำคัญในการนำไปประยุกต์ใช้ออกแบบระบบเติมอากาศ

จากการทดลองเดินระบบเติมอากาศด้วยเวเนจูรีขนาด 2 นิ้ว ในถังเติมอากาศขนาด 2x2 เมตร ระดับความลึกน้ำ 50 ถึง 150 เซนติเมตร พบว่ามี 2 ปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อค่า K_La ในผลการทดลองคือ

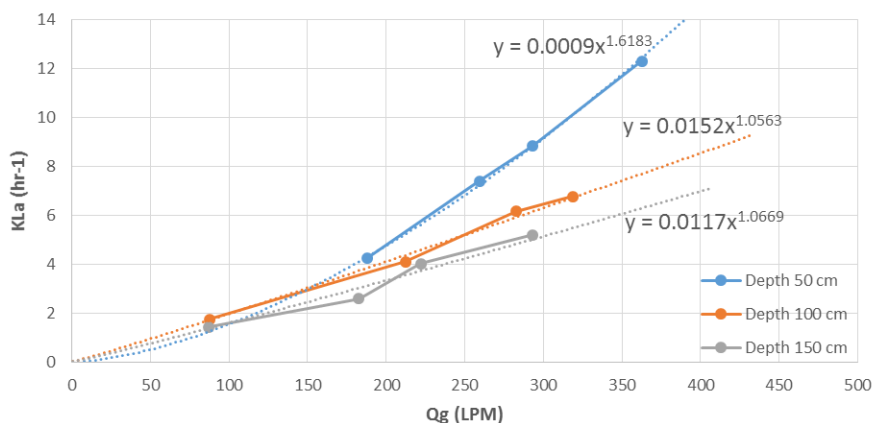
- 1) อัตราการไหลอากาศ (Q_g) เนื่องจากอัตราการไหลอากาศที่เพิ่มขึ้น จำนวนฟองอากาศที่เข้าสู่ระบบจึงมีมากขึ้น ทำให้มีค่าพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างก๊าซและของเหลว (a) สูงขึ้น ส่งผลให้ค่า K_La เพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับอัตราการไหลอากาศ
- 2) ระดับความลึกการเติมอากาศ (Depth) เนื่องจากความลึกน้ำที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้มีปริมาตรน้ำในถังเติมอากาศมากขึ้น ระดับอัตราการเพิ่มขึ้นของออกซิเจนละลายในถังเติมอากาศจึงช้าลง

จากกราฟผลการทดลองในรูปที่ 4-44 พบว่าเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_La และอัตราการไหลอากาศ (Q_g) อยู่ในรูปของสมการ Power ในรูปของ $Y = C_1X^{C_2}$ โดยแตกต่างกันไปในแต่ละความลึกดังนี้

$$\text{ที่ความลึก 50 เซนติเมตร} \quad K_La = 0.0009 Q_g^{1.6183} \quad (4.10)$$

$$\text{ที่ความลึก 100 เซนติเมตร} \quad K_La = 0.0152 Q_g^{1.0563} \quad (4.11)$$

$$\text{ที่ความลึก 150 เซนติเมตร} \quad K_La = 0.0117 Q_g^{1.0669} \quad (4.12)$$



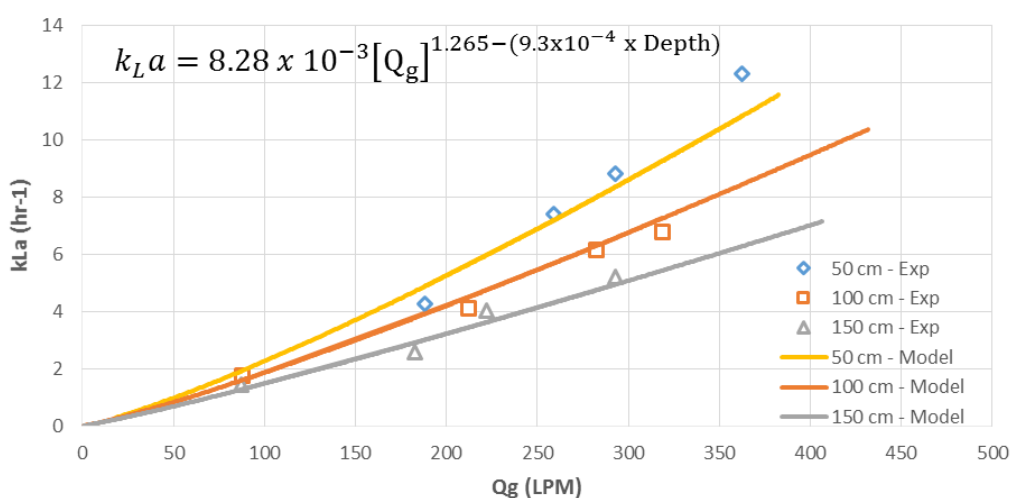
รูปที่ 4-44 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_La และอัตราไหลอากาศ (Q_g) ที่ความลึกน้ำระดับต่างๆ

จากสมการ Power ในรูปของ $Y = C_1 X^{C_2}$ สามารถนำมาคำนวณเพื่อหาความสัมพันธ์ของแต่ละระดับความลึกน้ำ โดยได้ C_1 เป็นค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ 0.00828 และ C_2 อยู่ในรูปความสัมพันธ์ของสมการเส้นตรง $1.265 - (0.00093 \times \text{Depth})$

เมื่อนำค่า C_1 และ C_2 แทนลงในสมการ Power $Y = C_1 X^{C_2}$ ของความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_La และอัตราการไหลอากาศ (Q_g) หรือเขียนได้เป็น $K_La = C_1 Q_g^{C_2}$ จะสามารถสร้างสมการสำหรับทำนายประสิทธิภาพของอุปกรณ์เวเนจิวรีขนาด 2 นิ้วได้ ดังสมการที่ 4.13

$$K_La_{20} = 8.28 \times 10^{-3} [Q_g]^{1.265 - (9.3 \times 10^{-4} \times \text{Depth})} \quad (4.13)$$

เมื่อทดลองใช้สมการสำหรับทำนายประสิทธิภาพของอุปกรณ์เวเนจิวรี คำนวณค่า K_La เปรียบเทียบกับค่า K_La ที่ได้จากการทดลอง พบค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ที่ 14.5% ดังรูปที่ 4-45

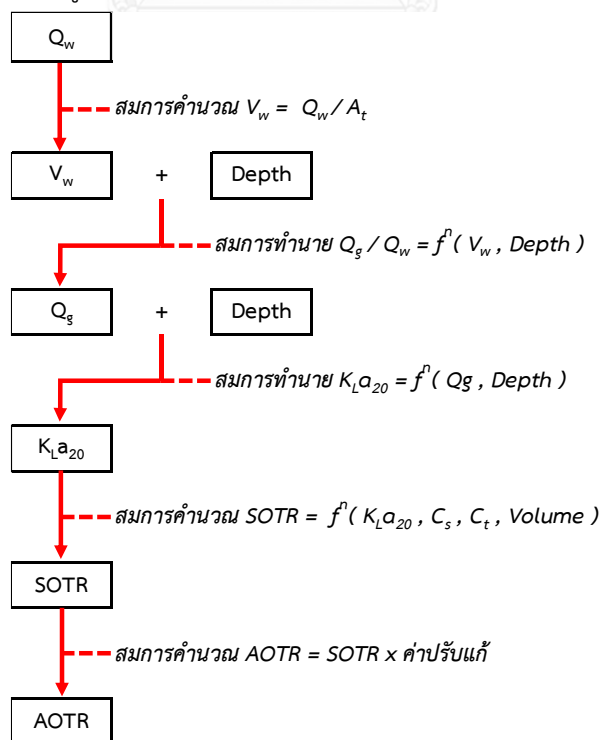


รูปที่ 4-45 กราฟเปรียบเทียบค่า K_La ที่ได้จากการทดลอง และสมการทำนายประสิทธิภาพ

สมการทำนายนี้มีข้อจำกัดเช่นเดียวกับสมการทำนายค่าอัตราส่วนการไหลของอากาศต่อน้ำ (Q_g/Q_w) คือสามารถใช้ทำนายประสิทธิภาพของเวเนจอร์ขนาด 2 นิ้วเท่านั้นเนื่องจากชุดข้อมูลที่ใช้สร้างสมการมาจากผลการทดลองของเวเนจอร์ขนาด 2 นิ้ว ที่ระดับความลึกน้ำไม่เกิน 150 เซนติเมตร

4.5.3 การประยุกต์ใช้ สมการทำนายทำนายค่าอัตราส่วนการไหลของอากาศต่อน้ำ (Q_g/Q_w) และสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ($K_L a_{20}$) ของอุปกรณ์เวเนจอร์

ในการประยุกต์ใช้เวเนจอร์เพื่อเติมอากาศในถังหรือบ่อเติมอากาศ การออกแบบระบบเติมอากาศจำเป็นต้องทราบอัตราการเติมออกซิเจนที่เวเนจอร์ทำได้ ในสภาวะการทำงานนั้นๆ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการทำนายประสิทธิภาพ โดยในการเดินระบบเติมอากาศด้วยอุปกรณ์เวเนจอร์ขนาด 2 นิ้ว หากทราบค่าอัตราส่วนการไหลของน้ำ (Q_w) ระดับความลึกการเติมอากาศ (Depth) และคำนวณความเร็วน้ำผ่านคอคอด (V_w) จะสามารถทำนายค่าอัตราส่วนการไหลของอากาศต่อน้ำ (Q_g/Q_w) และคำนวณอัตราส่วนการไหลอากาศ (Q_g) ที่เข้าสู่ระบบได้ด้วยสมการที่ 4.8 จากนั้นสามารถใช้ค่าอัตราส่วนการไหลอากาศ (Q_g) กับระดับความลึกการเติมอากาศ (Depth) เพื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน ($K_L a_{20}$) ได้ด้วยสมการที่ 4.13 และนำค่า $K_L a_{20}$ ที่ได้ไปคำนวณค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (SOTR) ด้วยสมการที่ 4.9 ซึ่งเป็นค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนในน้ำสะอาด ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส โดยการนำไปใช้งานจริงจะต้องปรับแก้ให้เป็นค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่ถ่ายเทลงสู่ได้จริง (Actual Oxygen Transfer Rate, AOTR) ดังรูปที่ 4-46



รูปที่ 4-46 ขั้นตอนการใช้สมการคำนวณค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนลงสู่ได้จริง (AOTR)

จากขั้นตอนการใช้สมการคำนวณดังรูปที่ 4-46 สามารถนำไปใช้คำนวณอัตราการถ่ายเทออกซิเจนลงสู่น้ำได้จริง (AOTR) ได้ตั้งสมการที่ 4.14 ณ สภาวะการเดินระบบของเวนจูรีขนาด 2 นิ้ว ในการบำบัดน้ำเสีย ที่อุณหภูมิ 30°C อัตราการไหลของน้ำ 50 ถึง 250 ลิตร/นาที ระดับค่าออกซิเจนละลายในปอเติมอากาศ (C_t) 0 ถึง 6 มิลลิกรัม/ลิตร และระดับความลึกการเติมอากาศ 50 ถึง 150 เซนติเมตร ได้ผลการทำนายค่า AOTR ดังตารางที่ 4-13 ถึง 4-16

ตารางที่ 4-13 ผลการทำนายค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนลงสู่น้ำได้จริง (AOTR) ของอุปกรณ์เวนจูรีขนาด 2 นิ้ว ที่ระดับความลึกการเติมอากาศ 50 เซนติเมตร

Q_w (ลิตร/นาที)	50	100	150	200	250
V_w (เมตร/วินาที)	3.11	6.22	9.33	12.44	15.55
Q_g/Q_w	0.76	1.08	1.32	1.53	1.71
Q_g (ลิตร/นาที)	37.94	107.62	198.05	305.29	427.05
$K_L a_{20}$ (1/ชม.)	0.70	2.48	5.21	8.82	13.28
C_t (มก./ลิตร)	AOTR (กรัมออกซิเจน/ชั่วโมง) ที่อุณหภูมิ 30°C ค่าปรับแก้ $\beta = 0.95$ และ $\alpha = 0.8$				
0	10.09	35.96	75.60	128.09	192.82
1	8.68	30.93	65.03	110.19	165.86
2	7.27	25.90	54.46	92.28	138.91
3	5.86	20.88	43.90	74.37	111.95
4	4.45	15.85	33.33	56.47	85.00
5	3.04	10.82	22.76	38.56	58.05
6	1.63	5.80	12.19	20.65	31.09

ตารางที่ 4-14 ผลการทำนายค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนลงสู่น้ำได้จริง (AOTR) ของอุปกรณ์เวนจูรี ขนาด 2 นิ้ว ที่ระดับความลึกการเติมอากาศ 100 เซนติเมตร

Q_w (ลิตร/นาที)	50	100	150	200	250
V_w (เมตร/วินาที)	3.11	6.22	9.33	12.44	15.55
Q_g/Q_w	0.49	0.77	1.00	1.20	1.39
Q_g (ลิตร/นาที)	24.68	76.99	149.77	240.16	346.40
$K_L a_{20}$ (1/ชม.)	0.35	1.35	2.94	5.10	7.84
C_t (มก./ลิตร)	AOTR (กรัมออกซิเจน/ชั่วโมง) ที่อุณหภูมิน้ำ 30°C ค่าปรับแก้ $\beta = 0.95$ และ $\alpha = 0.8$				
0	10.30	39.07	85.22	148.21	227.67
1	8.86	33.60	73.31	127.49	195.84
2	7.42	28.14	61.39	106.77	164.02
3	5.98	22.68	49.48	86.06	132.19
4	4.54	17.22	37.57	65.34	100.36
5	3.10	11.76	25.65	44.62	68.54
6	1.66	6.30	13.74	23.90	36.71

ตารางที่ 4-15 ผลการทำนายค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนลงสู่น้ำได้จริง (AOTR) ของอุปกรณ์เวนจูรี ขนาด 2 นิ้ว ที่ระดับความลึกการเติมอากาศ 150 เซนติเมตร

Q_w (ลิตร/นาที)	50	100	150	200	250
V_w (เมตร/วินาที)	3.11	6.22	9.33	12.44	15.55
Q_g/Q_w	0.38	0.63	0.85	1.04	1.23
Q_g (ลิตร/นาที)	19.19	63.28	127.19	208.71	306.47
$K_L a_{20}$ (1/ชม.)	0.23	0.88	1.93	3.38	5.21
C_t (มก./ลิตร)	AOTR (กรัมออกซิเจน/ชั่วโมง) ที่อุณหภูมิน้ำ 30°C ค่าปรับแก้ $\beta = 0.95$ และ $\alpha = 0.8$				
0	10.03	38.40	84.25	147.12	226.70
1	8.62	33.04	72.48	126.56	195.01
2	7.22	27.67	60.70	105.99	163.32
3	5.82	22.30	48.92	85.42	131.63
4	4.42	16.93	37.14	64.86	99.94
5	3.02	11.56	25.36	44.29	68.25
6	1.62	6.19	13.59	23.72	36.56

เนื่องจากค่า SOTR เป็นค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนในน้ำสะอาด ที่อุณหภูมิ 20°C และค่าออกซิเจนละลายเริ่มต้นเท่ากับศูนย์ ดังนั้นหากนำไปประยุกต์ใช้ออกแบบบ่อเติมอากาศในการบำบัดน้ำเสีย จะต้องปรับแก้ค่า SOTR ให้เป็นค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่ถ่ายเทลงสู่น้ำได้จริง (AOTR) ด้วยสมการที่ 4.14 (Metcalf & Eddy, 2004)

$$AOTR = SOTR \left(\frac{\beta C_{s,T,H} - C_L}{C_{s,20}} \right) (1.024^{T-20}) (\alpha) (F) \quad (4.14)$$

- โดยที่ AOTR = อัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่ถ่ายเทลงสู่น้ำได้จริง (กก.ออกซิเจน/ชม.)
- SOTR = อัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน ที่ 20 องศาเซลเซียส (กก.ออกซิเจน/ชม.)
- β = ตัวคูณปรับแก้เบต้า เนื่องจากผลกระทบจากส่วนประกอบในน้ำมีค่าประมาณ 0.7 ถึง 0.98 สำหรับน้ำเสียทั่วไปนิยมใช้ตัวคูณปรับแก้เบต้าเท่ากับ 0.95
- $C_{s,T,H}$ = ค่าออกซิเจนละลายอิ่มตัว ณ อุณหภูมิ และความสูงเหนือน้ำทะเลนั้นๆ (มก./ล.)
- $C_{s,20}$ = ค่าออกซิเจนละลายอิ่มตัว ณ อุณหภูมิ 20°C ความดัน 1 atm (มก./ล.)
- C_L = ค่าออกซิเจนละลายของการเดินระบบบ่อเติมอากาศ (มก./ล.)
- T = อุณหภูมิของบ่อเติมอากาศ (องศาเซลเซียส)
- α = ตัวคูณปรับแก้อัลฟา เนื่องจากผลกระทบจากการกวนผสมและรูปทรงของถังเติมอากาศ มีค่าประมาณ 0.3 ถึง 1.2 หากใช้ระบบกระจายอากาศลงสู่น้ำ (Diffused Aeration) จะมีค่าประมาณ 0.4 ถึง 0.8 และหากใช้ระบบเติมอากาศแบบเชิงกล (Mechanical Aeration) จะมีค่าประมาณ 0.6 ถึง 1.2
- F = Fouling Factor มีค่าประมาณ 0.65 ถึง 0.9 (กรณีเวนจูรีจะไม่ใช้ Fouling Factor เนื่องจาก คำนี้อาจใช้สำหรับหัวกระจายอากาศที่มีการอุดตันจากการเดินระบบ)

4.7.3 ตัวอย่างการคำนวณระบบเติมอากาศเวนจูรี โดยใช้ผลการสมการทำนายประสิทธิภาพ

สมมติถังเติมอากาศขนาดกว้าง 1.5 เมตร ยาว 1.5 เมตร ระดับน้ำในถังลึก 1.5 เมตร (ปริมาตร 3.38 ลบ.ม.) สมมติให้มีความต้องการออกซิเจน (Oxygen Requirement) เท่ากับ 250 กรัม-ออกซิเจน/ชม. ที่อุณหภูมิน้ำ 30 องศาเซลเซียส ระดับค่าออกซิเจนละลายในถังเท่ากับ 2.0 มิลลิกรัม/ลิตร ต้องการออกแบบระบบเติมอากาศโดยใช้เวนจูรีขนาด 2 นิ้ว

จากความต้องการออกซิเจน 250 กรัม-ออกซิเจน/ชม. ที่สภาวะการใช้งานจริง สามารถใช้ผลจากสมการทำนายค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนลงสู่ น้ำได้จริง (AOTR) ของอุปกรณ์เวนจูรีขนาด 2 นิ้ว ที่ระดับความลึกการเติมอากาศ 150 เซนติเมตร ระดับค่าออกซิเจนละลายในถัง (C_r) เท่ากับ 2.0 มิลลิกรัม/ลิตร ได้จากตารางที่ 4-15 ซึ่งผลการทำนายค่า AOTR ของเวนจูรีขนาด 2 นิ้ว ที่ระดับความลึก 150 ซม. อัตราการไหลน้ำ 250 ลิตร/นาที ค่าออกซิเจนละลายในถังเติมอากาศเท่ากับ 2 มิลลิกรัม/ลิตร จะได้

$$\text{AOTR} = 163.32 \text{ กรัม-ออกซิเจน/ชม./เวนจูรี}$$

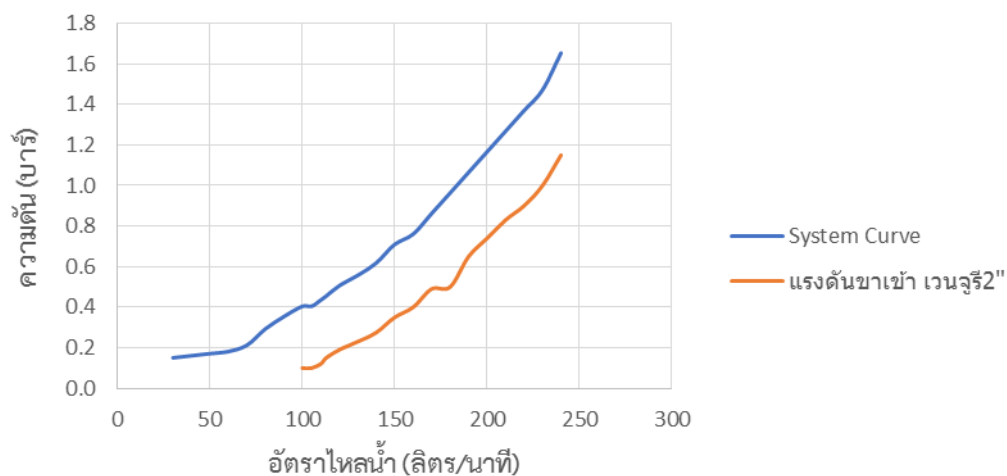
ดังนั้นจะต้องใช้เวนจูรีจำนวนการติดตั้งสองชุด ถึงจะเพียงพอต่อความต้องการออกซิเจน

$$\text{AOTR} = 163.32 \times 2 = 326.64 > 250 \text{ กรัม-ออกซิเจน/ชม.}$$

โดยการเลือกขนาดเครื่องสูบน้ำ จะต้องรู้อัตราการไหลน้ำและแรงดันน้ำที่ใช้ โดยอัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 250 ลิตร/นาที สามารถคำนวณแรงดันน้ำขาเข้าเวนจูรีได้ดังสมการในตารางที่ 4-7

$$P_{\text{Inlet}} = 2E-07Q_w^{2.8182} \quad (4.16)$$

จากสมการที่ 4.16 สามารถคำนวณแรงดันด้านขาเข้าของเวนจูรีขนาด 2 นิ้วได้เท่ากับ 1.15 บาร์ โดยการเลือกแรงดันของเครื่องสูบน้ำจะต้องเผื่อแรงดันสูญเสียจากการไหลของน้ำในเส้นท่อด้วย ดังรูปที่ 4-47



รูปที่ 4-47 กราฟแสดงการสูญเสียแรงดันในเส้นท่อ จากการเดินระบบด้วยเวนจอร์ขนาด 2 นิ้ว

จากรูปที่ 4-47 ที่อัตราการไหลน้ำเกินกว่า 200 ลิตร/นาที่ แรงดันสูญเสียในเส้นท่อจะอยู่ในช่วง 0.47 - 0.50 บาร์ (เปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะการเดินท่อน้ำ) ดังนั้นการเลือกเครื่องสูบน้ำจึงควรเลือกที่อัตราการไหลน้ำ 250 ลิตร/นาที่ แรงดันน้ำ 1.65 บาร์ ซึ่งเมื่อกำหนดขนาดเครื่องสูบน้ำดังสมการที่ 4.6 จะได้ขนาดเครื่องสูบน้ำเท่ากับ 0.96 กิโลวัตต์ หรือประมาณ 1 กิโลวัตต์

ดังนั้นการออกแบบระบบเติมอากาศในตัวอย่างนี้ จะใช้เวนจอร์ขนาด 2 นิ้ว ติดตั้งกับเครื่องสูบน้ำอัตราไหล 250 ลิตร/นาที่ แรงดัน 1.65 บาร์ ขนาดกำลังไฟฟ้า 1 กิโลวัตต์ ที่ระดับความลึกการเติมอากาศ 150 เซนติเมตร จำนวนสองชุด

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

1) อุปกรณ์เวนจอร์ที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพการเติมอากาศทั้ง 4 ขนาด คือ ขนาด 0.5 นิ้ว, 1 นิ้ว, 1.5 นิ้ว และ 2 นิ้ว พบว่าอุปกรณ์เวนจอร์ขนาด 2 นิ้วให้ประสิทธิภาพการเติมอากาศสูงสุด โดยได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (K_{La20}) เท่ากับ 30.57 ชม.^{-1} ค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (SOTR) เท่ากับ 236.62 กรัม-ออกซิเจน/ชม. ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน (SAE) เท่ากับ 0.22 กก.ออกซิเจน/กิโลวัตต์-ชม. และค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (SOTE) เท่ากับ 3.98% ตามลำดับ

2) ปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเวนจอร์ได้แก่ 1) เครื่องสูบน้ำ 2) การออกแบบอุปกรณ์เวนจอร์ 3) การติดตั้งอุปกรณ์เวนจอร์ โดยปัจจัยแรกควรเลือกเครื่องสูบน้ำให้เหมาะสมกับสภาวะการทำงาน เนื่องจากเวนจอร์แต่ละขนาดมีอัตราการไหลน้ำและแรงดันที่เหมาะสมต่างกัน โดยสภาวะการเดินระบบที่ทำให้เวนจอร์แต่ละขนาดมีอัตราการดูดอากาศเข้าระบบสูงเป็นดังนี้ เวนจอร์ 0.5 นิ้ว ที่อัตราไหลน้ำ 15 ลิตร/นาที่ แรงดัน 1 บาร์, เวนจอร์ขนาด 1 นิ้ว ที่อัตราการไหลน้ำ 24 ลิตร/นาที่ แรงดัน 1.25 บาร์, เวนจอร์ 1.5 นิ้ว ที่อัตราไหลน้ำ 110 ลิตร/นาที่ แรงดัน 1.61 บาร์ และเวนจอร์ขนาด 2 นิ้ว ที่อัตราการไหลน้ำ 240 ลิตร/นาที่ แรงดัน 1.15 บาร์ ปัจจัยที่สองการออกแบบอุปกรณ์เวนจอร์พบว่าการลดหน้าตัดทางน้ำเขาลงเหลืออัตราส่วน $1/4$ ที่บริเวณคอคอด เหมาะสำหรับอัตราการไหลที่มีค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ด้านขาเข้าอยู่ในช่วง 17,000 – 33,000 และอัตราส่วนการลดหน้าตัดเท่ากับ $1/2$ เหมาะกับอัตราการไหลที่มีค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ด้านขาเข้าอยู่ในช่วง 63,000 – 188,000 ปัจจัยที่สามคือการติดตั้งเวนจอร์โดยเลือกอัตราการไหลน้ำและระดับความลึกน้ำที่เหมาะสม จากการทดลองพบว่าความเร็วน้ำที่บริเวณคอคอดของเวนจอร์ในช่วง 12 – 15 เมตร/วินาที ให้ประสิทธิภาพในการดูดอากาศสูงในทุกขนาดเวนจอร์ที่ใช้ทดลอง และระดับความลึกน้ำที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลประสิทธิภาพการเติมอากาศดีขึ้น โดยที่อัตราไหลน้ำขาเข้าเวนจอร์คงที่ ระดับความลึก 1.0 – 1.5 เมตร ให้ประสิทธิภาพการเติมอากาศที่ใกล้เคียงกัน และมีประสิทธิภาพดีกว่าการติดตั้งที่ระดับความลึก 0.5 เมตร เนื่องจากมีระยะเวลาสัมผัสระหว่างฟองอากาศและน้ำมากกว่า

3) ด้านตัวแปรอุทกศาสตร์ฟองอากาศจากอุปกรณ์เวนจอร์พบว่า การเคลื่อนที่ฟองอากาศจากอุปกรณ์เวนจอร์มีลักษณะเป็นเส้นโค้งขึ้นสู่ผิวน้ำ โดยระยะทางที่ฟองอากาศพุ่งไปด้านหน้าจะแปรผันตรงกับอัตราการไหลน้ำ และตัวแปรขนาดฟองอากาศ (D_B) ของเวนจอร์ขนาด 2 นิ้ว ที่อัตราการไหล

อากาศ 2 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง พบว่ามีค่าเฉลี่ยขนาดฟองอากาศเท่ากับ 3.26 มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าฟองอากาศจากหัวทราย แต่มีขนาดใกล้เคียงกับฟองอากาศจากท่ออย่างยืดหยุ่น

4) การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเติมอากาศระหว่างอุปกรณ์เวนจูรี หัวทราย และท่ออย่างยืดหยุ่น ที่ระดับค่าพลังงานไฟฟ้าในการเติมอากาศ และความลึกน้ำเท่ากัน จากผลการทดลองพบว่า อุปกรณ์กระจายอากาศชนิดท่ออย่างยืดหยุ่นให้ประสิทธิภาพดีที่สุดในการเปรียบเทียบ ถึงแม้จะมีขนาดฟองอากาศเฉลี่ยใกล้เคียงกับเวนจูรี แต่ด้วยลักษณะการติดตั้งที่มีความยืดหยุ่นสามารถวางท่อได้อย่างครอบคลุมพื้นที่ถึงมากกว่า ทำให้กระจายฟองอากาศออกไปยังพื้นที่กว้างกว่า ส่งผลให้ประสิทธิภาพการเติมอากาศดีกว่าเวนจูรีที่ระยะการกระจายฟองอากาศขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำ ส่วนอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดหัวทรายให้ประสิทธิภาพต่ำที่สุดในการเปรียบเทียบ เนื่องจากหัวทรายให้ฟองอากาศเฉลี่ยขนาดใหญ่กว่าเวนจูรี และท่ออย่างยืดหยุ่น

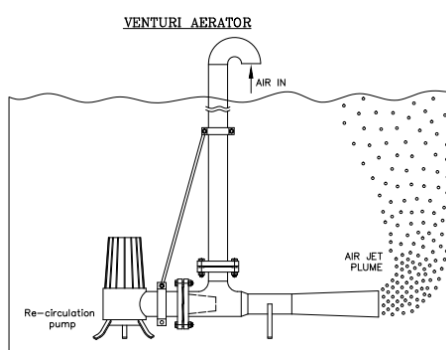
5) การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเติมอากาศระหว่างอุปกรณ์เวนจูรีขนาด 2 นิ้ว และอุปกรณ์กระจายอากาศที่ติดตั้งร่วมกับอุปกรณ์ Airlift พบว่าอุปกรณ์เวนจูรีให้ประสิทธิภาพการเติมอากาศต่อระยะห่างจากจุดเติมอากาศที่สูงกว่า แต่ถึงแม้การติดตั้ง Airlift จะไม่ได้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเติมอากาศในระยะทางยาวของอุปกรณ์กระจายอากาศอย่างมีนัยยะสำคัญ แต่มีข้อดีคือสามารถสร้างกระแสทำให้เกิดการผลักดันน้ำไปด้านหน้าตามทิศทางที่ต้องการ สามารถใช้ประโยชน์ในการผลักดันตะกอนหรือวัตถุแขวนลอยในบ่อเติมอากาศหรือบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ให้ไหลไปยังจุดรวบรวมตะกอน เพื่อง่ายต่อการจัดเก็บหรือสูบลอก

6) การพัฒนาประสิทธิภาพอุปกรณ์เวนจูรีโดยการติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว (LFFA) สามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (K_La) ได้ประมาณ 5.10 – 9.43 % โดยแนวโน้มของการติดตั้ง LFFA ส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมากขึ้นแปรผันตรงอัตราการไหลอากาศที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลอากาศทำให้ฟองอากาศเกิดการหมุนวนอยู่ภายใน LFFA นานขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับน้ำยาวนานขึ้น อีกทั้งการเพิ่มขึ้นของอัตราไหลอากาศส่งผลให้ฟองอากาศที่กลายเป็นชั้นฟิล์มของเหลวด้านบนอุปกรณ์ LFFA มีการแผ่ขยายเป็นวงกว้างและตกลงมาในน้ำมากขึ้น ฟองอากาศจึงมีระยะเวลาถ่ายเทออกซิเจนลงสู่น้ำนานขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูงขึ้นตามการเพิ่มอัตราการไหลอากาศ

7) จากผลการทดลองประสิทธิภาพของเวนจูรีขนาด 2 นิ้ว สามารถนำมาสร้างสามารถสมการทำนายค่าอัตราส่วนการไหลของอากาศต่อน้ำ (Q_g/Q_w) โดยมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ที่ 12.03% และสร้างสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (K_{La20}) พบค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ที่ 14.5% โดยสามารถนำค่า K_{La20} ที่ได้ไปคำนวณค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (SOTR) เพื่อใช้ในการออกแบบถังเติมอากาศ โดยการกอนำไปใช้งานจริงจะต้องปรับแก้ให้เป็นค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่ถ่ายเทลงสู่น้ำได้จริง (Actual Oxygen Transfer Rate, AOTR)

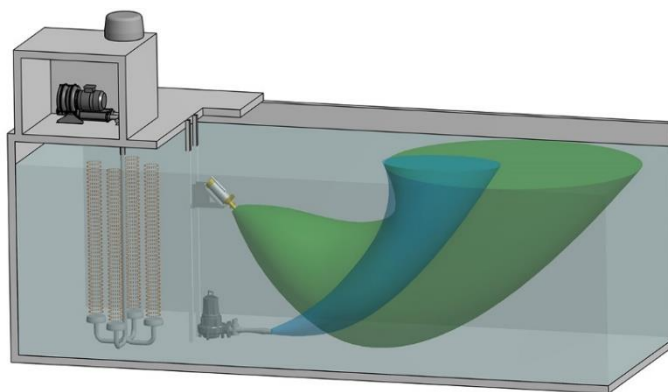
5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะการติดตั้งเวนจูรี จากการติดตั้งภายนอกถังโดยเครื่องสูบน้ำชนิด Centrifugal Pump เป็นการติดตั้งภายในถังเดิมอากาศโดยใช้เครื่องสูบน้ำชนิด Submersible Pump ซึ่งเป็นเครื่องสูบน้ำที่มีอัตราการไหลสูงแต่แรงดันน้ำต่ำ เหมาะกับการประยุกต์ใช้กับเวนจูรีขนาดใหญ่ อีกทั้งการติดตั้งเวนจูรีสามารถต่อเข้ากับ Submersible Pump ได้โดยตรง ไม่ต้องสูญเสียแรงดันจากการไหลของน้ำในเส้นท่อผ่านข้องอและวาล์วต่างๆเหมือนการติดตั้งภายนอกด้วย Centrifugal Pump



รูปที่ 5-1 การติดตั้งเวนจูรีภายในถังเดิมอากาศโดยใช้เครื่องสูบน้ำชนิด Submersible Pump
ที่มา : http://primetechejectors.com/images/products/venturi_air_movers.gif
วันที่สืบค้นข้อมูล : 12 มิถุนายน 2560

2) ศึกษาการเปลี่ยนองศาการติดตั้งเวนจูรี จากการติดตั้งในแนวนอนขนานกับพื้น เปลี่ยนเป็นมุมกลงไปในน้ำแบบเฉียง 45 องศา และยกความสูงการติดตั้งเวนจูรีจากก้นถังขึ้นมาให้สัมพันธ์กับระยะฟองอากาศที่พุ่งออกไปด้านหน้าเวนจูรี ซึ่งจะส่งผลให้ฟองอากาศกระจายตัวอยู่ในน้ำได้นานและเป็นวงกว้างยิ่งขึ้น อีกทั้งการยกความสูงการติดตั้งขึ้นทำให้ Head ด้านขาออกเวนจูรีต่ำลง

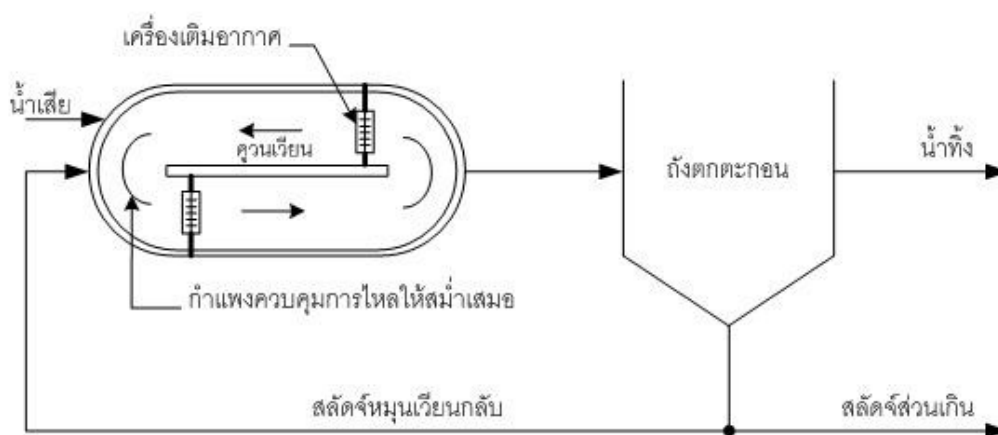


รูปที่ 5-2 การติดตั้งเวนจูรีแบบมุมเฉียง 45 องศา

ที่มา : http://www.acquaecoremedy.com/wp-content/uploads/2017/03/curve_new.jpg

วันที่สืบค้นข้อมูล : 12 มิถุนายน 2560

3) ศึกษาการติดตั้งเวนจูรีกับการใช้ในถังเติมอากาศที่ต้องการการไหลเวียนของน้ำ เช่น ระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียน (Oxidation Ditch) เป็นต้น เนื่องจากเวนจูรีสามารถสร้างกระแสผลัดกันน้ำไปด้านหลังหน้าได้ตามความแรงของอัตราไหลน้ำจากเครื่องสูบน้ำ สามารถนำไปศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับการเติมอากาศโดยใช้ใบพัดกังหันน้ำ (Mechanical Surface Aerator) ที่นิยมใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียน



รูปที่ 5-3 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียน (Oxidation Ditch)

ที่มา : <https://static1-velaeasy.readyplanet.com/www.greenwatertreat.com/images/content/original-1473436650592.jpg>

วันที่สืบค้นข้อมูล : 12 มิถุนายน 2560

5.3 การประยุกต์ใช้อุปกรณ์เวนจูรีในทางวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อุปกรณ์เวนจูรีนั้นนอกจากจะใช้ในกระบวนการเติมอากาศ เพื่อเพิ่มออกซิเจนละลายในถังเติมอากาศหรือบ่อเติมอากาศเพื่อบำบัดน้ำในเชิงวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังสามารถประยุกต์ใช้ในงานด้านอื่นๆได้อีกดังนี้

1) การสร้างฟองอากาศขนาดไมโครเมตร (Microbubbles) ด้วยอุปกรณ์เวนจูรี

การสร้างฟองขนาด Microbubbles โดยใช้หลักการเพิ่มความเร็วของของเหลวที่บริเวณคอคอดของเวนจูรี จนทำให้ความดัน ณ หน้าตัดคอคอดเวนจูรี ลดลงต่ำกว่าความดันไอของของเหลวที่อุณหภูมินั้นๆ เกิดปรากฏการณ์ควิเตชัน (Cavitation) ฟองอากาศแยกตัวออกจากเฟสของเหลวที่บริเวณหน้าตัดคอคอดของเวนจูรี ใช้ร่วมกับการเป่าอากาศด้านขาเข้าอุปกรณ์เวนจูรี เพื่อแตกฟองอากาศขนาดใหญ่ให้เป็นฟองอากาศขนาดเล็กเมื่อผ่านบริเวณคอคอดของเวนจูรี สามารถนำฟองขนาด Microbubbles ที่ได้ประยุกต์ใช้ในกระบวนการ Flotation เพื่อแยกของแข็งแขวนลอย หรืออนุภาคน้ำมันในน้ำได้

ที่มา : Kawamura และคณะ (2015)

2) การประยุกต์ใช้อุปกรณ์เวนจูรีในการจับอนุภาคแขวนลอยในอากาศ (Venturi Scrubber)

การดักจับอนุภาคแขวนลอยในอากาศโดยใช้เวนจูรี ใช้วิธีการเป่าอากาศที่มีฝุ่นและอนุภาคแขวนลอยเข้าอุปกรณ์เวนจูรี โดยอากาศที่ไหลผ่านหน้าตัดคอคอดจนมีความเร็วสูงจนเกิดความดันติดลบ สามารถดูดน้ำที่ช่องเปิดบริเวณคอคอด สร้างสเปรย์น้ำดักจับฝุ่นละอองในอากาศได้

ที่มา : Ali และคณะ (2013)

3) การประยุกต์ใช้อุปกรณ์เวนจูรีเติมอากาศเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

การเพิ่มค่าออกซิเจนละลายให้กับน้ำเพื่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ มีหลักการเช่นเดียวกันกับการออกแบบระบบเติมอากาศเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำในเชิงวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม โดยข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบจะต้องทราบค่าความต้องการออกซิเจน (Oxygen Requirement) ของบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เพื่อติดตั้งอุปกรณ์เติมอากาศให้เพียงพอต่อความต้องการออกซิเจนของระบบ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

การออกแบบระบบเติมอากาศเพื่อเพาะเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม (Litopenaeus Vanamei) ในบ่อขนาด 1 ไร่ (1,600 ตารางเมตร) ความลึกน้ำ 1.5 เมตร อุณหภูมิน้ำ 30 องศาเซลเซียส ค่าความเค็ม 25 PPT ความหนาแน่นกุ้งขาว 40 ตัว/ตารางเมตร น้ำหนักเฉลี่ยของกุ้งเท่ากับ 20 กรัม ระดับค่าออกซิเจนละลายในน้ำเท่ากับ 5 มก./ลิตร

ความต้องการออกซิเจนทั้งหมดของบ่อเพาะเลี้ยงกุ้งเท่ากับ

$$\text{TOD} = \text{ShR} + \text{SR} + \text{WR} \quad (5.1)$$

โดยที่

TOD = Total Oxygen Demand (กก.ออกซิเจน/ชั่วโมง)

ShR = Shrimp Respiration Rate (กก.ออกซิเจน/ชั่วโมง)

SR = Sediment Respiration Rate (กก.ออกซิเจน/ชั่วโมง)

WR = Water Respiration Rate (กก.ออกซิเจน/ชั่วโมง)

ค่าอัตราการใช้ออกซิเจนของตะกอนและน้ำในบ่อเพาะเลี้ยง (SR+WR) เท่ากับ 0.2, 1.0 และ 2.0 มก.ออกซิเจน/ลิตร/ชั่วโมง ที่ความหนาแน่นกุ้งขาวเท่ากับ 10, 40 และ 120 ตัว/ตารางเมตร ตามลำดับ (Fast และ Boyd, 1992) ส่วนค่าอัตราการใช้ออกซิเจนจากการหายใจของกุ้งขาว มีค่าดังตารางที่ 5-1

ตารางที่ 5-1 อัตราการใช้ออกซิเจนจากการหายใจของกุ้งขาว (กก.ออกซิเจน/ตัว/ชั่วโมง)

ค่าความเค็ม (PPT)	อุณหภูมิน้ำ (องศาเซลเซียส)	น้ำหนักกุ้งขาว (กรัม)			
		5	10	15	20
37	20	0.80	1.91	3.20	4.60
	25	1.22	1.84	2.35	2.79
	30	1.73	3.19	4.55	5.86
25	20	0.81	1.88	3.08	4.37
	25	1.23	2.50	3.78	5.08
	30	1.63	3.22	4.80	6.36
13	20	1.01	2.22	3.52	4.88
	25	1.25	2.53	3.83	5.13
	30	1.61	3.28	4.96	6.65
1	20	0.86	1.66	2.42	3.18
	25	1.19	2.55	3.98	5.45
	30	1.91	4.25	6.77	9.42

ที่มา : Vinatea และคณะ, 2011

การคำนวณหาอัตราการใช้ออกซิเจนจากการหายใจของกุ้งขาว (ShR)

$$\begin{aligned}
 \text{จำนวนกุ้งขาวทั้งหมด} &= 40 \text{ ตัว/ตร.ม.} \times 1,600 \text{ ตร.ม.} \\
 &= 64,000 \text{ ตัว} \\
 \text{อัตราการใช้ออกซิเจนของกุ้งขาว} &= 6.36 \text{ มก.ออกซิเจน/ตัว/ชม.} \\
 \text{ดังนั้น ShR} &= 407,040 \text{ มก.ออกซิเจน/ชม.} \\
 &= 0.407 \text{ กก.ออกซิเจน/ชม.}
 \end{aligned}$$

การคำนวณหาอัตราการใช้ออกซิเจนจากตะกอนและน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงกุ้ง (SR+WR)

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาตรน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงกุ้ง} &= 1,600 \text{ ตร.ม.} \times 1.5 \text{ เมตร} \\
 &= 2,400 \text{ ลบ.ม.} \\
 \text{อัตราการใช้ออกซิเจนจากตะกอนและน้ำ} &= 1.0 \text{ มก./ลิตร/ชม.} \\
 \text{ดังนั้น SR + WR} &= 2,400,000 \text{ มก.ออกซิเจน/ชม.} \\
 &= 2.4 \text{ กก.ออกซิเจน/ชม.}
 \end{aligned}$$

การคำนวณหาอัตราการใช้ออกซิเจนทั้งหมด (TOD)

$$\begin{aligned}
 \text{TOD} &= \text{ShR} + \text{SR} + \text{WR} \\
 &= 0.407 + 2.4 \\
 &= 2.807 \text{ กก.ออกซิเจน/ชม.}
 \end{aligned}$$

จากตารางที่ 4-15 ซึ่งผลการทำนายค่า AOTR ของเวนจูรีขนาด 2 นิ้ว ที่ระดับความลึก 150 ซม. อัตราการไหลน้ำ 250 ลิตร/นาที ค่าออกซิเจนละลายในบ่อเติมอากาศเท่ากับ 5 มิลลิกรัม/ลิตร จะได้

$$\begin{aligned}
 \text{AOTR} &= 68.25 \text{ กรัมออกซิเจน/ชม.} \\
 &= 0.068 \text{ กก.ออกซิเจน/ชม.}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้นจะต้องใช้อุปกรณ์เวนจูรีขนาด 2 นิ้ว ทั้งหมด} &= 2.807 / 0.068 \\
 &= 41.28 \text{ ชุด}
 \end{aligned}$$

หรือต้องใช้อุปกรณ์เวนจูรีขนาด 2 นิ้ว ที่ระดับความลึก 150 ซม. อัตราการไหลน้ำ 250 ลิตร/นาที จำนวน 42 ชุด ต่อบ่อเพาะเลี้ยงกุ้งขาวจำนวน 1 ไร่ (1,600 ตร.ม.)

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กระทรวงพลังงาน, ก. (2552). การสาธิตเทคโนโลยีเชิงลึกเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน เทคโนโลยี "ระบบเติมอากาศแบบเวนจูรี". Retrieved 12 มิถุนายน 2560, from กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน
- กรีนวอเตอร์ทรีท. (2560). ระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียน. Retrieved 12 มิถุนายน 2560, from <https://static1-velaeasy.readyplanet.com/www.greenwatertreat.com/images/content/original-1473436650592.jpg>
- ดาวัน เจริญพิทยา. (2556). การวิเคราะห์ระบบเติมอากาศแบบกระจายอากาศที่ใช้อุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- นราพงศ์ หงส์ประสิทธิ์. (2554). การพัฒนาอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่นจากของเสียประเภทยาง เพื่อใช้ในกระบวนการเติมอากาศ. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- มันสิน ตันฑุลเวศน์. (2542). วิศวกรรมการประปา เล่ม 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ร้านสมายเพ็ท. (2559). หัวกระจายอากาศแบบหยาดหรือแบบแข็ง Retrieved 15 พฤษภาคม 2559, from http://img.tarad.com/shop/s/smilepets/img-lib/spd_20100610152617_b.JPG
- ร้านแอร์สโตน. (2559). หัวกระจายอากาศแบบท่อยาง. Retrieved 15 พฤษภาคม, 2559, from <http://www.airstonestop.com/shop/airstonestop/images/10m4t30bhcojtur455jq1191220125530000003.jpg>
- วริทธิ์ อึ้งภากรณ์. (2541). การออกแบบระบบท่อภายในอาคาร. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์.

ภาษาอังกฤษ

- Ali, M., Yan, C., Sun, Z., Gu, H. and Mehboob, K. (2013). Dust particle removal efficiency of a venturi scrubber. *Annals of Nuclear Energy*, 54, 178 - 183.

- American Society of Civil Engineers. (1992). Measurement of Oxygen Transfer in Clean Water. *the American Society of Civil Engineers*(ANSI/ASCE 2-91), 1-42.
- Aquaecoremedy. (2017). Stormix Aerator. Retrieved 12 June 2017, from http://www.aquaecoremedy.com/wp-content/uploads/2017/03/curve_new.jpg
- Baylar, A. and Ozkan, F. (2006). Applications of Venturi Principle to Water Aeration Systems. *Environmental Fluid Mechanics*, 6(4), 341-357.
- Baylar, A., Ozkan, F., and Unsal, M. (2010). Effect of air inlet hole diameter of venturi tube on air injection rate. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 14(4), 489-492.
- Baylar A. (2009). Numerical Modeling of Venturi Flows for Determining Air Injection Rates Using Fluent V6.2. *Mathematical and Computational Applications*, 14(2), 97-108.
- Cole-Parmer Instrument Company. (2016). Plenum Coarse Bubble Diffuser. Retrieved 15 May, 2016, from http://static.coleparmer.com/large_images/7002512.jpg
- Courtesy of Environmental Dynamics Inc. (2010). FlexAir Fine Bubble Tube Diffuser. Retrieved 15 May, 2016, from https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/57/Fine_Bubble_Diffuser_%28Tube%29.jpg
- FAST, A. and BOYD, C. (1992). Water circulation, aeration and other management practices. *Marine shrimp culture*, 457 - 495.
- Ghomi, M. R. (2009). An experimental study of nozzle diameters, aeration depths and angles on standard aeration efficiency (SAE) in a venturi aerator. *Water Practice and Technology*, 4(3), 1-8.
- Imai T. and Zhu H. (2011). Improvement of Oxygen Transfer Efficiency in Diffused Aeration Systems Using Liquid-Film-Forming Apparatus. *Mass Transfer - Advanced Aspects H. Nakajima*, 341-370.
- Kawamura, T., Fujiwara, A., Takahashi, T., Kato, H., Matsumoto, Y. and Kodama, Y. (2004). The Effects of the Bubble size on the Bubble Dispersion and Skin Friction Reduction. *The 5th Symposium on Smart Control of Turbulence, Tokyo*, 145-151.
- Laksitanonta S. and Singh G. (2004). Design of a combined propeller and venturi tube system for aquaculture ponds. *Kasetsart J. (Nat. Sci.)*, 38, 267-277.

- Lewis W.K. and Whitman W.C. (1924). Principles of Gas Adsorption. *Journal Industrial and Engineering Chemistry*, 16, 1215-1220.
- Metcalf & Eddy. (2004). Wastewater Engineering Treatment and Reuse. Singapore: McGraw-Hill.
- Mott, R. L. (1994). Applied Fluid Mechanics (Fourth ed.). United States of America: Macmillan Publishing Company.
- Mueller, J., Boyle, W. and Popel, J. (2002). Aeration: Principles and Practice: Taylor & Francis.
- Ozkan, F., Ozturk, M., and Baylar, A. (2006). Experimental investigations of air and liquid injection by venturi tubes. *Water and Environment Journal*
- Painmanakul, P. and Jamnongwong, M. (2007). Theoretical prediction of mass transfer parameters in small bubble column. *Asian-Pacific Regional conference on Practical Environmental Technology Proceedings of Asian-Pacific Regional Conference on Practical Environmental Technologies*
- Painmanakul P., Loubiere K., Hebrard G. and Buffiere. (2004). Study of different membrane spargers used in wastewater treatment: characterization and performance. *Chemical Engineering and Processing*, 43, 1347-1359.
- Primetechejectors. (2017). Venturi Air Mover. Retrieved 12 June 2017, from http://primetechejectors.com/images/products/venturi_air_movers.gif
- Vinatea, L., Muedas, W. and Arantes, R. (2011). The impact of oxygen consumption by the shrimp *Litopenaeus vannamei* according to body weight, temperature, salinity and stocking density on pond aeration: a simulation. *Acta Scientiarum. Biological Sciences*, 33, 125 - 132.
- He, Zhen., Petiraksakul, A. and Meesapya, W. (2003). Oxygen-Transfer Measurement in Clean Water. *The Journal of KMITNB*, 13(1), 14-19.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

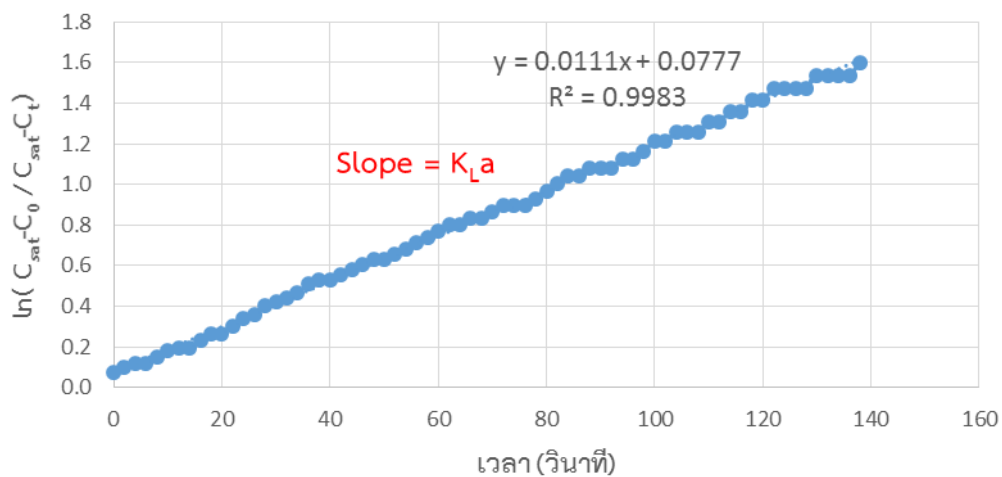
ผลการทดลอง

1. ผลการทดสอบประสิทธิภาพการเติมอากาศเวนจูรีขนาด 2 นิ้ว

ตารางแสดงสภาวะการเดินระบบ

พารามิเตอร์	หน่วย	พารามิเตอร์	หน่วย
อัตราการไหลน้ำ	240 ลิตร/นาทึ	ปริมาตรน้ำ	854 ลิตร
อัตราการไหลอากาศ	354 ลิตร/นาทึ	อุณหภูมิน้ำ	31.3 องศาเซลเซียส
แรงดันน้ำขาเข้าเวนจูรี	1.15 บาร์	ค่าพลังงานไฟฟ้า	0.913 กิโลวัตต์
แรงดันขาออกเครื่องสูบน้ำ	1.63 บาร์	ระดับความลึกน้ำ	70 เซนติเมตร

จากผลการทดลองได้กราฟเส้นตรง แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \frac{(C_s - C_0)}{(C_s - C_t)}$ กับเวลา (t) โดยมี Slope เท่ากับค่า K_La



ตารางแสดงผลการคำนวณประสิทธิภาพ

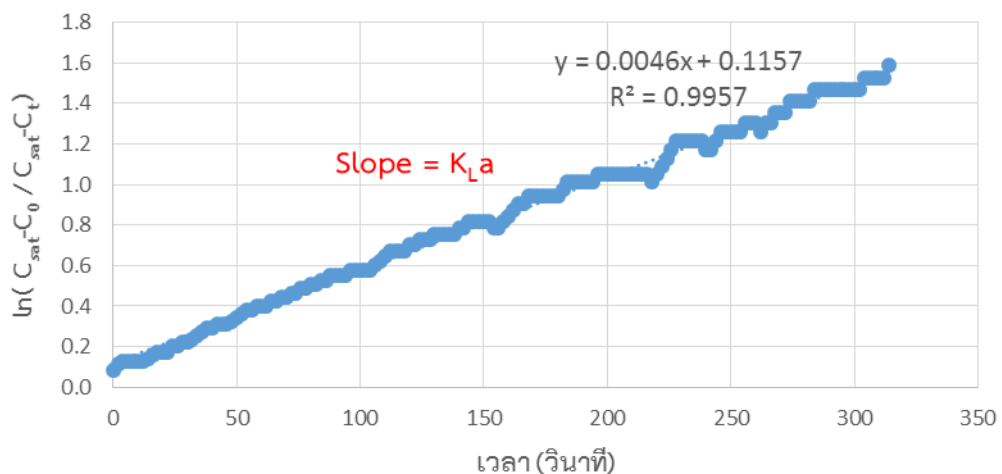
K_La	K_La_{20}	SOTR	SAE	SOTE
0.0111 s^{-1} (39.96 hr^{-1})	0.0085 s^{-1} (30.57 hr^{-1})	0.23662 kgO_2/hr (236.62 gO_2/hr)	0.259 $\text{kgO}_2/\text{kW-hr}$	3.98 %

2. ผลการทดสอบประสิทธิภาพการเติมอากาศเวนจูรีขนาด 1.5 นิ้ว

ตารางแสดงสภาวะการเดินระบบ

พารามิเตอร์	หน่วย	พารามิเตอร์	หน่วย
อัตราการไหลน้ำ	110 ลิตร/นาที	ปริมาตรน้ำ	854 ลิตร
อัตราการไหลอากาศ	144 ลิตร/นาที	อุณหภูมิน้ำ	29.2 องศาเซลเซียส
แรงดันน้ำขาเข้าเวนจูรี	1.60 บาร์	ค่าพลังงานไฟฟ้า	0.913 กิโลวัตต์
แรงดันขาออกเครื่องสูบน้ำ	1.90 บาร์	ระดับความลึกน้ำ	70 เซนติเมตร

จากผลการทดลองได้กราฟเส้นตรง แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \frac{(C_s - C_0)}{(C_s - C_t)}$ กับเวลา (t) โดยมี Slope เท่ากับค่า $K_L a$



ตารางแสดงผลการคำนวณประสิทธิภาพ

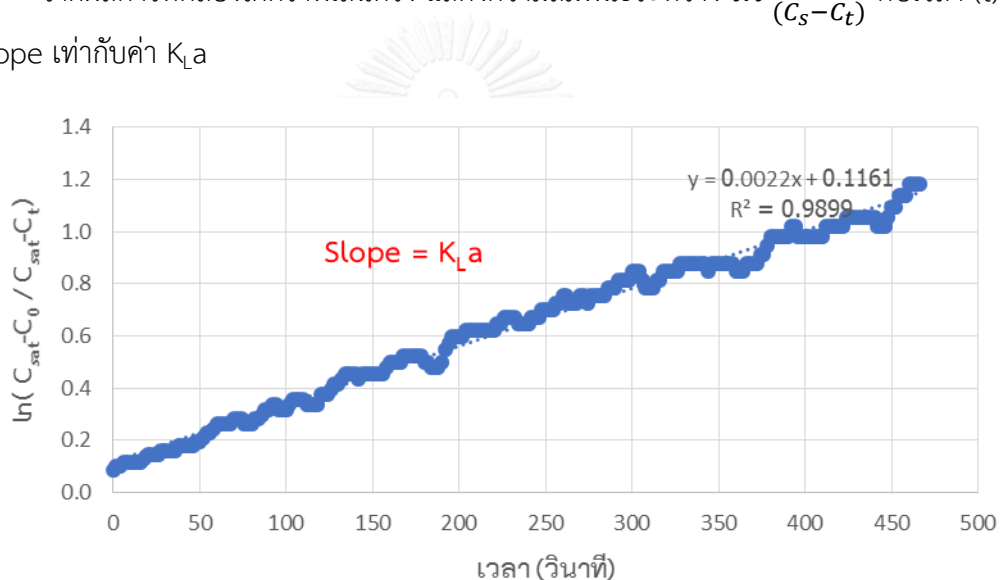
KLa	KLa20	SOTR	SAE	SOTE
0.0046 s ⁻¹ (16.56 hr ⁻¹)	0.0037 s ⁻¹ (13.31 hr ⁻¹)	0.10307 kgO ₂ /hr (103.07 gO ₂ /hr)	0.113 kgO ₂ /kW-hr	4.26 %

3. ผลการทดสอบประสิทธิภาพการเติมอากาศเวนจูรีขนาด 1 นิ้ว

ตารางแสดงสภาวะการเดินระบบ

พารามิเตอร์	หน่วย	พารามิเตอร์	หน่วย
อัตราการไหลน้ำ	32 ลิตร/นาที	ปริมาตรน้ำ	854 ลิตร
อัตราการไหลอากาศ	121 ลิตร/นาที	อุณหภูมิน้ำ	31.9 องศาเซลเซียส
แรงดันน้ำขาเข้าเวนจูรี	1.74 บาร์	ค่าพลังงานไฟฟ้า	0.913 กิโลวัตต์
แรงดันขาออกเครื่องสูบน้ำ	1.95 บาร์	ระดับความลึกน้ำ	70 เซนติเมตร

จากผลการทดลองได้กราฟเส้นตรง แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \frac{(C_s - C_0)}{(C_s - C_t)}$ กับเวลา (t) โดยมี Slope เท่ากับค่า $K_L a$



ตารางแสดงผลการคำนวณประสิทธิภาพ

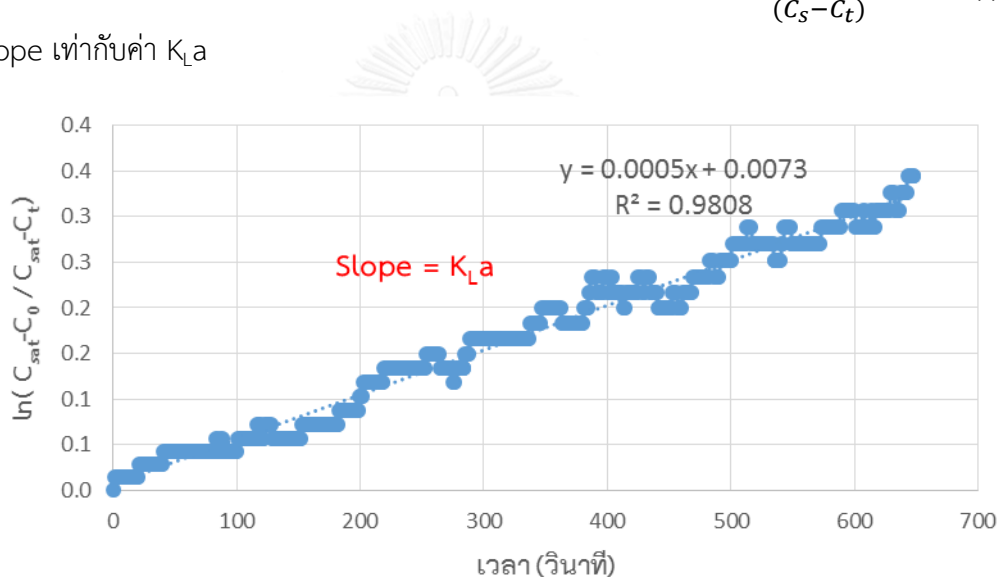
KLa	KLa20	SOTR	SAE	SOTE
0.0022 s ⁻¹ (7.92 hr ⁻¹)	0.0017 s ⁻¹ (6.16 hr ⁻¹)	0.04768 kgO ₂ /hr (47.68 gO ₂ /hr)	0.052 kgO ₂ /kW-hr	2.35 %

4. ผลการทดสอบประสิทธิภาพการเติมอากาศเวนจูรีขนาด 1/2 นิ้ว

ตารางแสดงสภาวะการเดินระบบ

พารามิเตอร์	หน่วย	พารามิเตอร์	หน่วย
อัตราการไหลน้ำ	22 ลิตร/นาที	ปริมาตรน้ำ	854 ลิตร
อัตราการไหลอากาศ	7 ลิตร/นาที	อุณหภูมิน้ำ	31.9 องศาเซลเซียส
แรงดันน้ำขาเข้าเวนจูรี	1.90 บาร์	ค่าพลังงานไฟฟ้า	0.913 กิโลวัตต์
แรงดันขาออกเครื่องสูบน้ำ	2.00 บาร์	ระดับความลึกน้ำ	70 เซนติเมตร

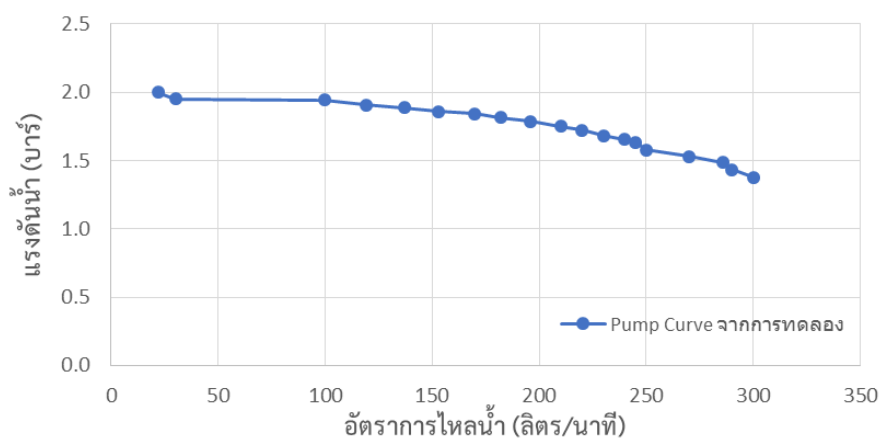
จากผลการทดลองได้กราฟเส้นตรง แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \frac{(C_s - C_0)}{(C_s - C_t)}$ กับเวลา (t) โดยมี Slope เท่ากับค่า $K_L a$



ตารางแสดงผลการคำนวณประสิทธิภาพ

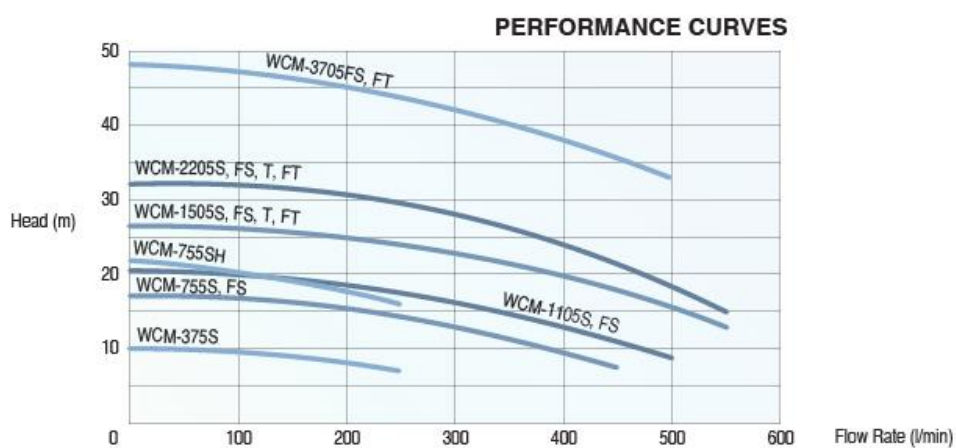
KLa	KLa20	SOTR	SAE	SOTE
0.0005 s ⁻¹ (1.8 hr ⁻¹)	0.00037 s ⁻¹ (1.36 hr ⁻¹)	0.01051 kgO ₂ /hr (10.51 gO ₂ /hr)	0.011 kgO ₂ /kW-hr	8.96 %

5. ผลการทดลองหา Pump Curve ของเครื่องสูบน้ำ Mitsubishi รุ่น WCM1105s

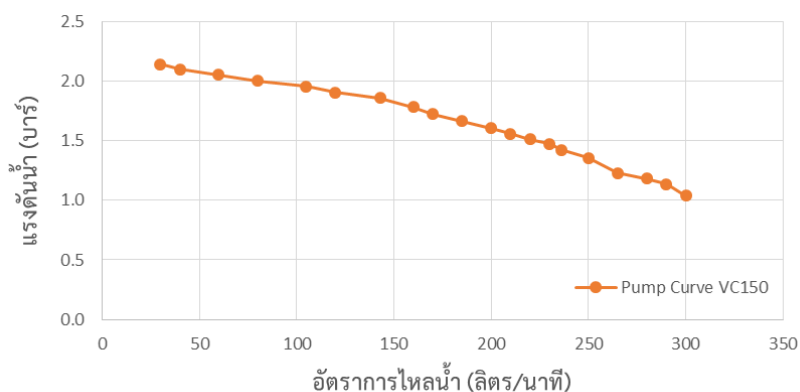


อัตราไหลน้ำ (ลิตร/นาที)	แรงดันขาออก จากเครื่องสูบน้ำ (บาร์)	อัตราไหลน้ำ (ลิตร/นาที)	แรงดันขาออก จากเครื่องสูบน้ำ (บาร์)
300	1.38	196	1.79
290	1.43	182	1.81
286	1.48	170	1.84
270	1.53	153	1.86
250	1.58	137	1.89
245	1.63	119	1.91
240	1.65	100	1.94
230	1.68	30	1.95
220	1.72	22	2.00
210	1.75		

Pump Curve ของเครื่องสูบน้ำ Mitsubishi รุ่น WCM1105s จากผู้ผลิต

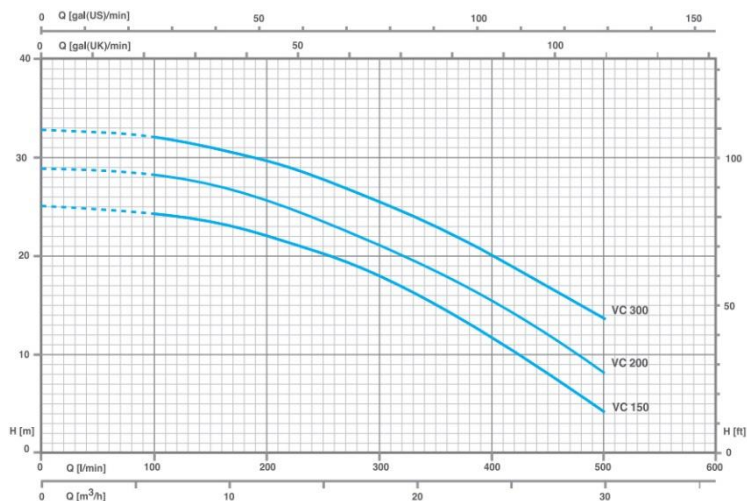


6. ผลการทดลองหา Pump Curve ของเครื่องสูบน้ำ Venz รุ่น VC150

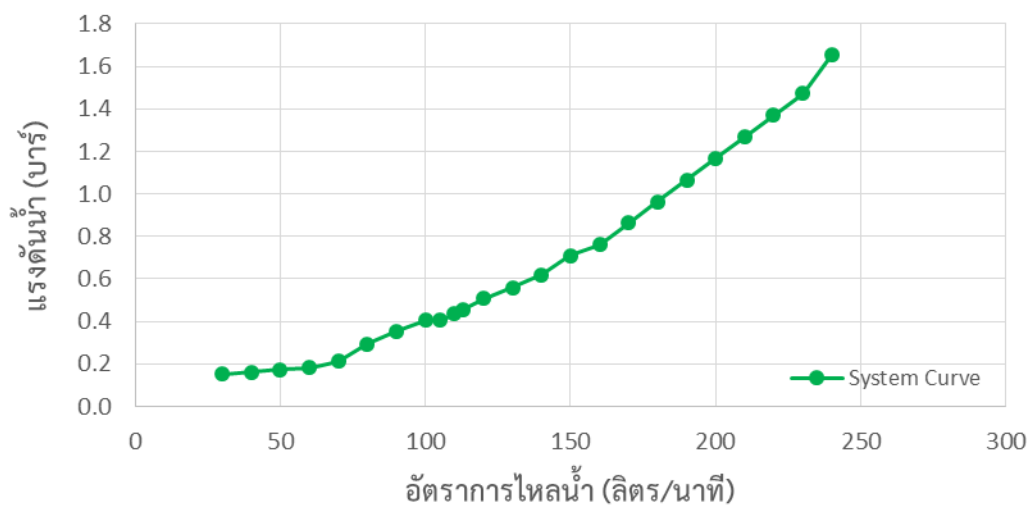


อัตราไหลน้ำ (ลิตร/นาที)	แรงดันขาออก จากเครื่องสูบน้ำ (บาร์)	อัตราไหลน้ำ (ลิตร/นาที)	แรงดันขาออก จากเครื่องสูบน้ำ (บาร์)
300	1.04	185	1.66
290	1.13	170	1.72
280	1.18	160	1.78
265	1.23	143	1.86
250	1.36	120	1.91
236	1.42	105	1.95
230	1.47	80	2.00
220	1.51	60	2.05
210	1.56	40	2.10
200	1.61	30	2.14

Pump Curve ของเครื่องสูบน้ำ Venz รุ่น VC150 จากผู้ผลิต



7. ผลการทดลองหา System Curve ของการเดินระบบเติมอากาศด้วยเวนจูรีขนาด 2 นิ้ว ด้วยการใช้ อุปกรณ์ Variable Speed Drive



อัตราไหลน้ำ (ลิตร/นาที)	แรงดันขาออก จากเครื่องสูบน้ำ (บาร์)	อัตราไหลน้ำ (ลิตร/นาที)	แรงดันขาออก จากเครื่องสูบน้ำ (บาร์)
240	1.65	120	0.51
230	1.47	113	0.46
220	1.37	110	0.44
210	1.27	105	0.40
200	1.17	100	0.40
190	1.06	90	0.35
180	0.96	80	0.29
170	0.86	70	0.21
160	0.76	60	0.18
150	0.71	50	0.17
140	0.62	40	0.16
130	0.56	30	0.15

8. ผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ Minor loss Coefficient

ผลการคำนวณ Minor loss Coefficient ของเวนจูรีขนาด 2 นิ้ว

P_{inlet} (bar)	P_{outlet} (bar)	$P_{in} - P_{out}$ (bar)	Q_w (LPM)	D_t (mm)	V_t (m/s)	K
0.50	0.28	0.22	220	18.47	13.68	0.203
0.75	0.50	0.25	250	18.47	15.54	0.194
0.90	0.60	0.3	280	18.47	17.41	0.188
0.80	0.55	0.25	260	18.47	16.16	0.186
0.70	0.48	0.22	245	18.47	15.23	0.182
0.60	0.41	0.19	230	18.47	14.30	0.231
Average						0.197

ผลการคำนวณ Minor loss Coefficient ของเวนจูรีขนาด 1 นิ้ว

P_{inlet} (bar)	P_{outlet} (bar)	$P_{in} - P_{out}$ (bar)	Q_w (LPM)	D_t (mm)	V_t (m/s)	K
1.00	0.65	0.35	30	6.10	17.11	0.234
1.10	0.75	0.35	35	6.10	19.97	0.172
1.20	0.85	0.35	36	6.10	20.54	0.163
1.30	0.90	0.40	38	6.10	21.68	0.167
Average						0.184

ผลการคำนวณ Minor loss Coefficient ของเวนจูรีขนาด 0.5 นิ้ว

P_{inlet} (bar)	P_{outlet} (bar)	$P_{in} - P_{out}$ (bar)	Q_w (LPM)	D_t (mm)	V_t (m/s)	K
0.50	0.40	0.10	10.8	4.93	9.44	0.220
0.70	0.50	0.20	12.7	4.93	11.10	0.319
1.00	0.70	0.30	15.6	4.93	13.63	0.317
1.20	0.80	0.40	16.8	4.93	14.68	0.364
Average						0.305

9. ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราไหลของน้ำ (Q_w) ขาเข้าอุปกรณ์เวนจรี และแรงดันน้ำขาเข้าเวนจรี (P_{inlet})

อัตราไหลน้ำและแรงดันของเวนจรีขนาด 2 นิ้ว

อัตราไหลน้ำ (ลิตร/นาที)	แรงดันขาเข้าเวนจรี (บาร์)	อัตราไหลน้ำ (ลิตร/นาที)	แรงดันขาเข้าเวนจรี (บาร์)
240	1.15	150	0.35
230	1.00	140	0.28
220	0.90	130	0.23
210	0.83	120	0.19
200	0.74	113	0.15
190	0.65	110	0.12
180	0.50	105	0.10
170	0.49	100	0.10
160	0.40		

อัตราไหลน้ำและแรงดันของเวนจรีขนาด 1.5 นิ้ว

อัตราไหลน้ำ (ลิตร/นาที)	แรงดันขาเข้าเวนจรี (บาร์)	อัตราไหลน้ำ (ลิตร/นาที)	แรงดันขาเข้าเวนจรี (บาร์)
110	1.61	79	0.75
105	1.48	73	0.62
100	1.34	69	0.45
97	1.23	62	0.25
90	1.06	57	0.16
85	0.89		

อัตราไหลน้ำและแรงดันของเวนจรีขนาด 1 นิ้ว

อัตราไหลน้ำ (ลิตร/นาที)	แรงดันขาเข้าเวนจรี (บาร์)	อัตราไหลน้ำ (ลิตร/นาที)	แรงดันขาเข้าเวนจรี (บาร์)
30	1.94	21.52	1.00
28	1.75	18.67	0.75
26	1.50	15.19	0.50
24	1.25		

อัตราไหลน้ำและแรงดันของเวนจูรีขนาด 0.5 นิ้ว

อัตราไหลน้ำ (ลิตร/นาที)	แรงดันขาเข้าเวนจูรี (บาร์)	อัตราไหลน้ำ (ลิตร/นาที)	แรงดันขาเข้าเวนจูรี (บาร์)
22	1.90	15	1.00
21	1.75	13	0.75
19	1.50	11	0.50
17	1.25	9	0.27

10. ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราไหลของน้ำ (Q_w) ขาเข้าอุปกรณ์เวนจูรี และอัตราไหลอากาศ (Q_g) ขาเข้าเวนจูรี

อัตราไหลน้ำและอากาศของ เวนจูรีขนาด 2 นิ้ว

อัตราไหลน้ำ (ลิตร/นาที)	อัตราไหลอากาศ (ลิตร/นาที)	อัตราไหลน้ำ (ลิตร/นาที)	อัตราไหลอากาศ (ลิตร/นาที)
280	357	180	261
270	363	150	199
240	381	120	136
210	321	105	110

อัตราไหลน้ำและอากาศของ เวนจูรีขนาด 1.5 นิ้ว

อัตราไหลน้ำ (ลิตร/นาที)	อัตราไหลอากาศ (ลิตร/นาที)	อัตราไหลน้ำ (ลิตร/นาที)	อัตราไหลอากาศ (ลิตร/นาที)
110	159	79	110
105	151	73	104
100	140	69	93
97	134	62	71
90	121	57	60
85	115		

อัตราไหลน้ำและอากาศของ เวนจรีขนาด 1 นิ้ว

อัตราไหลน้ำ (ลิตร/นาท)	อัตราไหลอากาศ (ลิตร/นาท)	อัตราไหลน้ำ (ลิตร/นาท)	อัตราไหลอากาศ (ลิตร/นาท)
30	126	22	91
28	118	19	71
26	110	15	60
24	104		

อัตราไหลน้ำและอากาศของ เวนจรีขนาด 0.5 นิ้ว

อัตราไหลน้ำ (ลิตร/นาท)	อัตราไหลอากาศ (ลิตร/นาท)	อัตราไหลน้ำ (ลิตร/นาท)	อัตราไหลอากาศ (ลิตร/นาท)
22	7.0	15	5.5
21	6.5	13	4.5
19	6.0	11	3.5
17	5.8	9	2.0

11. ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงทั้งค่าพลังงานไฟฟ้า และระดับความลึกการเติมอากาศ

เวนจูลรี 2 นิ้ว พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเติมอากาศ 1,100 วัตต์

Probe Position : Mid Depth				Unit
Air Flow Rate	375.62	326.63	302.13	LPM
Water Level	50	100	150	cm
$K_L a_{20}$	12.3	6.77	5.18	hr ⁻¹
SOTR	222.97	245.41	282.01	gO ₂ /hr
SAE	0.2	0.22	0.26	kgO ₂ /kW-hr
SOTE	3.67	4.59	5.74	%

เวนจูลรี 2 นิ้ว พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเติมอากาศ 825 วัตต์

Probe Position : Mid Depth				Unit
Air Flow Rate	302.13	291.24	228.64	LPM
Water Level	50	100	150	cm
$K_L a_{20}$	8.83	6.15	4.02	hr ⁻¹
SOTR	159.99	223.01	218.82	gO ₂ /hr
SAE	0.19	0.27	0.27	kgO ₂ /kW-hr
SOTE	3.26	4.71	5.88	%

เวนจูลรี 2 นิ้ว พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเติมอากาศ 550 วัตต์

Probe Position : Mid Depth				Unit
Air Flow Rate	266.74	217.75	187.81	LPM
Water Level	50	100	150	cm
$K_L a_{20}$	7.38	4.09	2.59	hr ⁻¹
SOTR	133.86	148.32	140.67	gO ₂ /hr
SAE	0.24	0.27	0.26	kgO ₂ /kW-hr
SOTE	3.08	4.17	4.6	%

เวนจูลรี 2 นิ้ว พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเติมอากาศ 280 วัตต์

Probe Position : Mid Depth				Unit
Air Flow Rate	193.25	149.70	89.82	LPM
Water Level	50	100	150	cm
$K_L a_{20}$	4.25	1.75	1.43	hr ⁻¹
SOTR	77.05	63.27	77.97	gO ₂ /hr
SAE	0.28	0.23	0.28	kgO ₂ /kW-hr
SOTE	2.44	4.31	5.34	%

อุปกรณ์กระจายอากาศท่อยางยืดหยุ่น พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเติมอากาศ 280 วัตต์

Probe Position : Mid Depth				Unit
Air Flow Rate	173.33	146.67	116.67	LPM
Water Level	50.00	100.00	150.00	cm
$K_L a_{20}$	6.78	4.70	3.62	hr ⁻¹
SOTR	123.00	170.32	196.67	gO ₂ /hr
SAE	0.44	0.61	0.70	kgO ₂ /kW-hr
SOTE	4.23	6.93	10.06	%

อุปกรณ์กระจายอากาศท่อยางยืดหยุ่น พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเติมอากาศ 210 วัตต์

Probe Position : Mid Depth				Unit
Air Flow Rate	150.00	120.00	98.33	LPM
Water Level	50.00	100.00	150.00	cm
$K_L a_{20}$	6.50	4.11	3.62	hr ⁻¹
SOTR	117.93	149.03	196.67	gO ₂ /hr
SAE	0.56	0.71	0.94	kgO ₂ /kW-hr
SOTE	4.69	7.41	11.93	%

อุปกรณ์กระจายอากาศท่อยางยืดหยุ่น พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเติมอากาศ 140 วัตต์

Probe Position : Mid Depth				Unit
Air Flow Rate	113.33	93.33	60.00	LPM
Water Level	50.00	100.00	150.00	cm
$K_L a_{20}$	5.57	3.67	1.81	hr ⁻¹
SOTR	100.94	133.31	98.34	gO ₂ /hr
SAE	0.72	0.95	0.70	kgO ₂ /kW-hr
SOTE	5.31	8.52	9.78	%

อุปกรณ์กระจายอากาศท่อยางยืดหยุ่น พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเติมอากาศ 70 วัตต์

Probe Position : Mid Depth				Unit
Air Flow Rate	53.33	36.67	25.00	LPM
Water Level	50.00	100.00	150.00	cm
$K_L a_{20}$	3.39	1.53	0.60	hr ⁻¹
SOTR	61.54	55.41	32.78	gO ₂ /hr
SAE	0.88	0.79	0.47	kgO ₂ /kW-hr
SOTE	6.88	9.02	7.82	%

อุปกรณ์กระจายอากาศหัวทราย พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเติมอากาศ 280 วัตต์

Probe Position : Mid Depth				Unit
Air Flow Rate	170.00	165.00	136.67	LPM
Water Level	50	100	150	cm
$K_L a_{20}$	2.95	2.67	2	hr ⁻¹
SOTR	53.48	96.72	108.64	gO ₂ /hr
SAE	0.19	0.35	0.39	kgO ₂ /kW-hr
SOTE	1.88	3.5	4.74	%

อุปกรณ์กระจายอากาศหัวทราย พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเติมอากาศ 210 วัตต์

Probe Position : Mid Depth				Unit
Air Flow Rate	146.67	133.33	116.67	LPM
Water Level	50	100	150	cm
$K_L a_{20}$	2.71	2.37	1.71	hr ⁻¹
SOTR	49.05	85.97	93.12	gO ₂ /hr
SAE	0.23	0.41	0.44	kgO ₂ /kW-hr
SOTE	1.99	3.85	4.76	%

อุปกรณ์กระจายอากาศหัวทราย พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเติมอากาศ 140 วัตต์

Probe Position : Mid Depth				Unit
Air Flow Rate	126.67	96.67	73.33	LPM
Water Level	50	100	150	cm
$K_L a_{20}$	2.43	1.78	1.14	hr ⁻¹
SOTR	44.23	64.48	62.08	gO ₂ /hr
SAE	0.32	0.46	0.44	kgO ₂ /kW-hr
SOTE	2.08	3.98	5.05	%

อุปกรณ์กระจายอากาศหัวทราย พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเติมอากาศ 70 วัตต์

Probe Position : Mid Depth				Unit
Air Flow Rate	26.67	36.67	25.00	LPM
Water Level	50	100	150	cm
$K_L a_{20}$	0.26	0.59	0.29	hr ⁻¹
SOTR	4.8	21.49	15.56	gO ₂ /hr
SAE	0.07	0.31	0.22	kgO ₂ /kW-hr
SOTE	1.07	3.5	3.48	%

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายรัชกาล พันธวิศิษฐ์ เกิดวันที่ 19 ตุลาคม 2531 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2554 จากนั้นไปประกอบอาชีพ วิศวกรสิ่งแวดล้อม ที่บริษัท ไฮโดรเทค จำกัด มหาชน เป็นเวลาสองปีครึ่ง ตั้งแต่ปี 2555 ถึงเดือน กรกฎาคม ปี 2557 และเข้าศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ในภาคการศึกษาต้น ปีการศึกษา 2557

ผลงานที่ได้รับการเผยแพร่

รัชกาล พันธวิศิษฐ์ ดาวัน เจริญพิทยา นราพงศ์ หงส์ประสิทธิ์ ญัฐวิญญ์ ชวเลิศพรศิยา และพิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล. *การวิเคราะห์อุปกรณ์เติมอากาศแบบเวนจูรีในด้านการถ่ายเทออกซิเจน และการใช้งานร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว*. การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 15, 11-13 พฤษภาคม 2559, จัดโดยสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. โรงแรมเดอะ ทวินทาวเวอร์ กรุงเทพมหานคร. (นำเสนองานแบบบรรยายมีเรื่องเต็ม)