

ผลของรูปแบบท่อบังคับการไหลที่มีผลต่อลักษณะการไหลภายในชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก Effect of Cylindrical Pipe Geometry on Flow in Microbubble Generator

ศิริชัย สังขพันธ์¹, ศุภวิชญ์ พงษ์ธัญญะวิริยา¹ มัฏฐาร์ แวหะยี¹ และ ชยุต นันทดุสิต^{1*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ต.คอหงส์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

*ติดต่อ: E-mail: chayut@me.psu.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 0-7428-7035, เบอร์โทรสาร 0-7455-8830

บทคัดย่อ

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาผลของรูปแบบท่อบังคับการไหลที่มีผลต่อลักษณะการไหลภายในชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก ตัวสร้างฟองอากาศขนาดเล็กเป็นแบบท่อทรงกระบอกและท่อทรงกระบอกที่มีท่อบังคับการไหลอยู่ภายใน มีน้ำไหลเข้าในแนวรัศมีท่อหลักและเกิดการไหลหมุนวนภายในท่อ ด้านท้ายของท่อเป็นทางเข้าของอากาศ อากาศที่เข้ามาจะถูกกระแสไหลวนของน้ำตัดย่อยจนเป็นฟองอากาศขนาดเล็ก ก่อนที่จะไหลออกทางด้านหน้าของท่อ ในการทดลองได้พิจารณาผลของรูปแบบท่อบังคับการไหลซึ่งต่างกัน 3 รูปแบบ ประกอบด้วย (1) แบบท่อทรงกระบอกกลวง (2) แบบท่อทรงกระบอกติดตั้งท่อบังคับการไหลขนาด $D_c = 11$ mm $L_c = 20, 40, 60$ mm และ (3) แบบท่อทรงกระบอกติดตั้งท่อบังคับการไหลขนาด $D_c = 21$ mm $L_c = 20, 40, 60$ mm ผลจากการทดลองพบว่าท่อทรงกระบอกติดตั้งท่อบังคับการไหลขนาด $D_c = 11$ mm $L_c = 60$ mm สามารถให้ฟองอากาศที่มีขนาดเล็กและในปริมาณที่มากที่สุด

คำหลัก: ฟองอากาศขนาดเล็ก, การเติมอากาศ, การไหลวน

Abstract

The purpose of the research is to study the effects of cylindrical pipe geometry on flow in microbubble generator. A Microbubble generator is a convectional pipe and a pipe with guide tube. The water flow radially into the main pipe and circulates inside the pipe. The air flows into the bottom of pipe. The air is then cut by swirling flows and flows out at the front of pipe. In the investigation 3 types of guide tube was considered including of (1) Conventional pipe (2) A pipe with guide tube $D_c = 11$ mm $L_c = 40, 60, 80$ mm and (3) A pipe with guide tube $D_c = 21$ mm $L_c = 40, 60, 80$ mm. The results are found that a pipe with guide tube $D_c = 21$ mm $L_c = 60$ mm getting small bubbles in the most of amount of bubbles.

Keywords: Microbubble, Aeration, Swirling flow

1. บทนำ

ในภาคอุตสาหกรรม น้ำเป็นสิ่งที่สำคัญในกระบวนการผลิต เมื่อน้ำเหล่านี้ผ่านออกจากกระบวนการแล้วก็จะกลายเป็นน้ำเสีย การบำบัดน้ำเสียเหล่านี้ก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง เพื่อป้องกันผลกระทบที่เกิดจากน้ำเน่าเสียส่งกลิ่นเหม็นแก่ชุมชนโดยรอบ การเติมอากาศลงในน้ำโดยใช้ฟองอากาศขนาดเล็กซึ่งได้มีการพัฒนารูปแบบและหลักการต่างๆ มาแล้วดังในงานวิจัย [2,3,5] เป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากคุณสมบัติของฟองอากาศขนาดเล็กมีแรงลอยตัวน้อยกว่าเมื่อเทียบกับฟองอากาศขนาดใหญ่ ทำให้สามารถลอยอยู่ในน้ำได้นานกว่า ส่งผลทำให้ออกซิเจนละลายในน้ำได้ดีขึ้น ในงานวิจัยจะศึกษาผลของรูปแบบท่อบังคับการไหลที่มีผลต่อลักษณะการไหลภายในชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก โดยใช้หลักการหมุนวนของของไหลซึ่งจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนที่ดีที่สุด [1,4] วัตถุประสงค์ของงานวิจัยเพื่อศึกษาผลของรูปแบบท่อบังคับการไหลที่มีผลต่อลักษณะการไหลภายในชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการทดลองได้แก่ ขนาดของท่อบังคับการไหลที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D_c = 11$ และ 21 mm ความยาว $L_c = 20, 40, 60$ mm อัตราการไหลของน้ำเข้า $Q_w = 35$ l/min อัตราการไหลของอากาศเข้า $Q_a = 0.1$ l/min

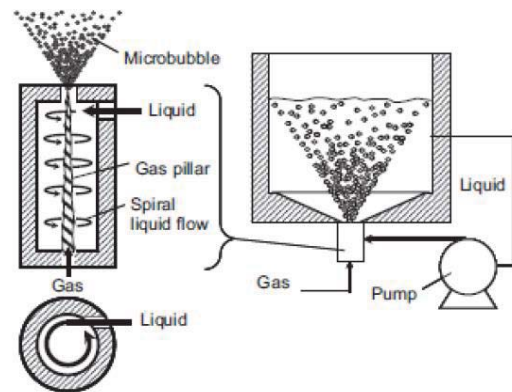
2. หลักการสร้างฟองอากาศขนาดเล็กและ

การถ่ายโอนออกซิเจน

2.1 หลักการสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก

หลักการสร้างฟองอากาศขนาดเล็กที่เลือกใช้คือวิธีการผสมแก๊สในของเหลวและใช้แรงเฉือนตัดย่อยฟองอากาศให้มีขนาดเล็ก ซึ่งอาจใช้ใบพัดหมุนสร้างแรงเฉือนตัดย่อยฟอง หรือบังคับให้ฟองแก๊สไหลปะทะผิวขรุขระหรือผิวของแท่งทรงกระบอกจนมีขนาดเล็กลง หรืออาจใช้ของเหลวพ่นด้วยความเร็วสูงจนเกิดบริเวณที่มีความดันต่ำที่สามารถดึงฟองแก๊สเข้ามาผสมในของเหลวอย่างรุนแรงเกิดการเฉือนฟองแก๊สให้มีขนาดเล็กลง วิธีนี้มีข้อดีคือ สามารถสร้างฟองแก๊สที่มีขนาดเล็กเป็นจำนวน

มากได้และสามารถควบคุมขนาดของฟองแก๊สได้ง่าย เพียงควบคุมความเร็วของของเหลวหรือควบคุมใบพัดตัดย่อยฟอง



รูปที่ 1 โครงสร้างการไหลที่เกิดขึ้นภายในตัวกำเนิด

ฟองอากาศแบบใช้การไหลวนของของเหลว

(Ohnari และคณะ, 1999) [2]

2.2 การถ่ายโอนออกซิเจน

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำจะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในการเติมออกซิเจนในขณะนั้น ถึงแม้เป็นเครื่องเติมอากาศแบบเดิม เมื่อสภาพแวดล้อมในน้ำเปลี่ยนแปลงก็จะทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนเปลี่ยนไปด้วย ดังนั้นในการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนลงในน้ำจำเป็นต้องคำนึงถึงปริมาตรของน้ำ ความปั่นป่วนระหว่างชั้นน้ำและบรรยากาศ สภาพของถังเติมอากาศ อุณหภูมิของน้ำ และสภาพของน้ำ เป็นต้น

สมการที่ใช้ในการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน คือ

$$K_L a = 2.303 \left(\frac{\log(C_s - C_t)_1 - \log(C_s - C_t)_2}{t_2 - t_1} \right), (mg/l) \quad (1)$$

ในที่นี้ t (s) คือเวลา และ C_t (mg/l) คือค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำที่เวลาต่างๆ สำหรับ C_s (mg/l) คือค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิที่อยู่ในช่วงทดลองโดยใช้สมการ

$$C_{s(T)} = 14.652 + 10.53(e^{-0.03896T} - 1), (mg/l) \quad (2)$$

โดยที่ T ($^{\circ}C$) คืออุณหภูมิที่อยู่ในช่วงทดลอง โดยทั่วไปแล้วจะทำการเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่อุณหภูมิของน้ำ $20^{\circ}C$ โดยใช้สมการ

$$K_L a_{(20^{\circ}C)} = \frac{K_L a}{1.024^{(T-20)}}, (min^{-1}) \quad (3)$$

ความสามารถการเติมออกซิเจนจะขึ้นอยู่กับลักษณะของเครื่องเติมอากาศ ในกรณีที่ใช้เครื่องเติมอากาศแบบเติมอากาศใต้ผิวน้ำจะใช้สมการ

$$OC = K_L a_{(20^{\circ}C)} \left(C_{s(20^{\circ}C)} \frac{P+73.53h-p}{760-p} \right) V, (mg - O_2/hr) \quad (4)$$

ในที่นี้ P (mmHg) คือ ความดันบรรยากาศบริเวณที่เติมอากาศ, h (m) คือ ความลึกจากผิวน้ำ จนถึงหัวเติมอากาศ, p (mmHg) คือ ความดันไอน้ำที่อุณหภูมิ $20^{\circ}C$ และ V (l) คือ ปริมาตรของแท่งค้ำ

อัตราการถ่ายเทออกซิเจนสามารถคำนวณได้จากความสามารถในการเติมออกซิเจนหารด้วยกำลังงานที่ใช้กับเครื่องเติมอากาศ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$R_o = \frac{OC}{P}, (mg - O_2/kW \cdot hr) \quad (5)$$

โดยที่ P (kW) คือพลังงานที่ใช้ในการเติมออกซิเจน ในการทดลองที่สภาวะเงื่อนไขข้างต้น สามารถคำนวณหาพลังงานของไหลที่ไหลผ่านตัวกำเนิดฟองอากาศ ซึ่งหาพลังงานได้จากสมการ

$$\begin{aligned} \Delta E &= \dot{E}_1 - \dot{E}_2 \\ &= \dot{m}(e_1 - e_2) \\ &= \dot{m} \left(\frac{P_1}{\rho_w} - \frac{P_2}{\rho_w} + \frac{V_1^2}{2} - \frac{V_2^2}{2} \right) \\ &= \dot{m} \left(\frac{P_{gauge}}{\rho_w} + \frac{V_1^2}{2} - \frac{V_2^2}{2} \right), (W) \quad (6) \end{aligned}$$

จากสมการที่ (6) $\dot{m}$ (kg/s) คืออัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ, P_{gauge} (N/m²) คือความดันเกจที่ปากทางน้ำเข้า

ρ (kg/m³) ความหนาแน่นของน้ำ, V_1 และ V_2 (m/s) คือความเร็วที่ทางเข้าและทางออกตามลำดับ

ประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศสามารถคำนวณได้จากสมการ

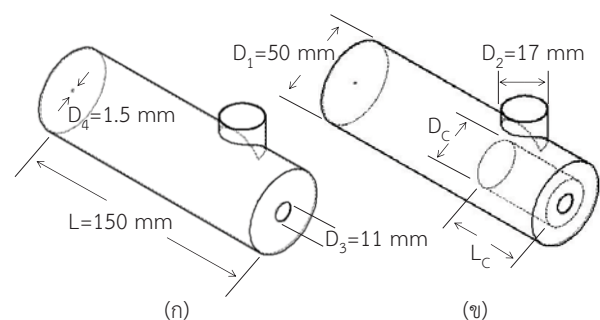
$$E = \frac{OC}{A} \times 100, (\%) \quad (7)$$

โดย A คือ ปริมาณออกซิเจนที่เติมลงไปในน้ำ ณ สภาวะมาตรฐาน ($mg - O_2/hr$) โดยทั่วไปปริมาณออกซิเจนที่อยู่ในอากาศต่อ 1 หน่วยลูกบาศก์เมตรมีค่า $282,900 mg - O_2/m^3$

3. ชุดหัวฉีดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กและชุดทดลอง

3.1 ชุดหัวฉีดสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก

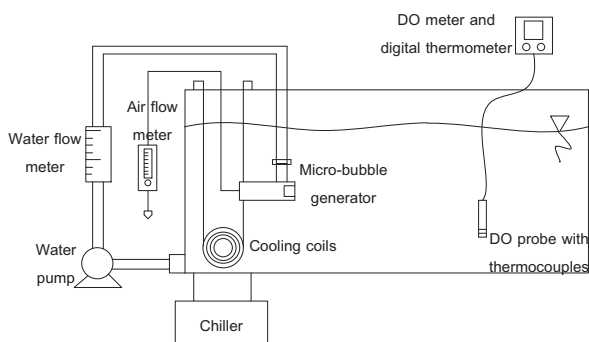
ชุดหัวฉีดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กมีท่อหลักเป็นทรงกระบอก ทำจากท่ออะคริลิก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D_1=50$ mm ยาว $L=150$ mm โดยท่อทางน้ำเข้าเป็นท่ออะคริลิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D_2=17$ mm ประกอบในแนวสัมผัสกับท่อหลัก สำหรับทางเข้าอากาศได้เจาะรูขนาดเล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D_4=1.5$ mm ที่ตำแหน่งศูนย์กลางบนฝาปิดท้ายของท่อหลัก โดยทางออกของฟองอากาศขนาดเล็กมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D_3=11$ mm อยู่กลางฝาปิดทางด้านหน้าของท่อหลัก



รูปที่ 2 ลักษณะหัวฉีดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กแบบท่อทรงกระบอกกลาง (ก) และแบบท่อทรงกระบอกติดตั้งท่อบังคับการไหล (ข)

3.2 รายละเอียดของชุดทดลอง

จากรูปที่ 7 แสดงแผนภาพชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนในน้ำของตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กที่ได้สร้างขึ้น จากรูปแท่งค้ำน้ำมีรูปทรงสี่เหลี่ยมทำจากกระจกใสที่มีความหนา 10 mm กว้าง 18 in ยาว 36 in และสูง 18 in ในแต่ละการทดลองจะเติมน้ำจนสูง 17 in ซึ่งคิดเป็นปริมาตรน้ำประมาณ 180.52 ลิตร ในชุดทดลองมีปั้มน้ำสำหรับดูดน้ำในแทงค์ส่งไปยังตัวกำเนิดฟองอากาศ โดยน้ำที่ออกจากปั้มน้ำจะไหลผ่านวาล์ว และโรตารี่เมตรสำหรับวัดอัตราการไหลของน้ำในช่วง 10-100 LPM ก่อนไหลเข้าตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก สำหรับอากาศจะถูกดูดโดยผลต่างความดันระหว่างภายในและภายนอกของชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก ผ่านโรตารี่เมตรสำหรับวัดอัตราการไหล ซึ่งสามารถใช้วัดอัตราการไหลของอากาศในช่วง 0-100 CCM ก่อนไหลเข้าตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก และฟองอากาศจะไหลผสมกับน้ำแล้วพุ่งออกจากตัวกำเนิดฟองขนาดเล็กตามที่ได้แสดง ในรูปที่ 4



รูปที่ 3 แผนภาพชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนในน้ำ



รูปที่ 4 การติดตั้งตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กในแทงค์น้ำและลักษณะการเกิดฟองอากาศขนาดเล็ก

4. การศึกษาอัตราการเติมออกซิเจนในน้ำ

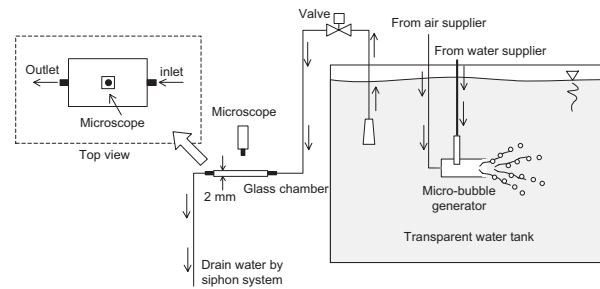
ในงานวิจัยนี้ศึกษาอัตราการเติมออกซิเจนในน้ำ โดยเริ่มต้นจะลดปริมาณออกซิเจนในน้ำให้น้อยที่สุดโดยวิธีปฏิบัติทางเคมี หลังจากนั้นจะใช้ตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กเติมออกซิเจนภายในน้ำ และวัดปริมาณออกซิเจนในน้ำที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยเครื่อง DO meter สำหรับในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เครื่องมือวัด DO meter (EXTECHZ[®], DO700) เนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้ได้ง่าย สามารถแสดงค่าเป็นตัวเลขออกมาโดยตรง อย่างไรก็ตาม การวัดปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำให้ได้ค่าแม่นยำต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายอย่าง เช่น ถ้าความดันอากาศสูง ออกซิเจนจะละลายน้ำได้มากขึ้น ถ้าอุณหภูมิของน้ำสูงสามารถทำให้ออกซิเจนจะละลายได้น้อยลง หรือถ้าความเข้มข้นของเกลือในน้ำสูง ออกซิเจนจะละลายได้น้อยลง ดังนั้นทุกการทดลองจะทำการเปลี่ยนน้ำใหม่ทุกครั้งและในระหว่างการทดลองได้ควบคุมอุณหภูมิของน้ำให้คงที่ โดยควบคุมไว้ที่ 32.5 °C และมีความคลาดเคลื่อน 0.3 °C ที่ความดันบรรยากาศ ในการทดลองจะทำการกรองน้ำประปาและเปลี่ยนน้ำใหม่ทุกครั้งหลังการทดลองแต่ละตัวแปร

สำหรับการลดออกซิเจนในน้ำก่อนเริ่มการทดลองมีจุดประสงค์เพื่อควบคุมตัวแปรออกซิเจนในน้ำให้มีค่าใกล้เคียง 0 mg/L ทุกการทดลองก่อนการเพิ่มออกซิเจนด้วยตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก ในการลดค่าออกซิเจนในน้ำสามารถทำได้โดยการเติมสาร Sodium Sulfite (Na_2SO_3) และ Cobalt Chloride (CoCl_2) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยจะใช้ 10% ของ Na_2SO_3 + 1% ของ CoCl_2 ในอัตราส่วน 1.5:0.5 ml ต่อน้ำ 1 ลิตร [6]

สำหรับขั้นตอนการทดลองได้ทำการกรองน้ำประปาใส่แทงค์ให้ได้ปริมาณที่กำหนด (180 ลิตร) ทำการลดออกซิเจนโดยการเติมสารเคมี แล้วจึงเดินเครื่องกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กที่อัตราการไหลของน้ำและอากาศตามที่กำหนดไว้ ทำการบันทึกค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำทุกๆ 10 นาที โดยจุ่มหัววัด DO ลงไปในน้ำที่ความลึก 30 cm จากผิวน้ำ นำค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำจากการบันทึกมาคำนวณหาความสัมพันธ์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำต่อไป หลังจากเสร็จการทดลองทุกครั้งจะทำการล้างหัววัด DO ด้วยน้ำสะอาด

5. การวัดขนาดฟองอากาศจากตัวกำเนิดฟองอากาศ

ในการทดลองนี้ทำการวัดขนาดฟองอากาศที่ออกจากตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก เพื่อนำมาเปรียบเทียบขนาดฟองในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง ดังรูปที่ 5 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้วัดขนาดฟองอากาศ น้ำในถังที่กำลังเติมฟองอากาศจะถูกดูดไหลผ่านวาล์วและไหลเข้าห้องกักที่ทำจากกระจกมีรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง 120 mm ยาว 160 mm และสูง 2 mm โดยด้านบนของห้องกักได้ติดตั้งกล้องจุลทรรศน์เพื่อถ่ายรูปฟองอากาศ สำหรับน้ำที่ไหลออกจากห้องกักจะทำการปล่อยทิ้ง ในขั้นตอนการเก็บตัวอย่างจะดูน้ำที่กำลังเติมฟองอากาศให้ไหลผ่านอุปกรณ์โดยใช้วิธีกลักน้ำ หลังจากให้น้ำและฟองอากาศไหลผ่านอุปกรณ์อย่างต่อเนื่องก็จะปิดวาล์วแล้วทำการถ่ายรูปตัวอย่างฟองอากาศที่ติดค้างอยู่ในห้องกักโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัล และหาขนาดของฟองอากาศโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพ (Image processing method)



รูปที่ 5 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้วัดขนาดฟองอากาศ

6. ผลการทดลอง

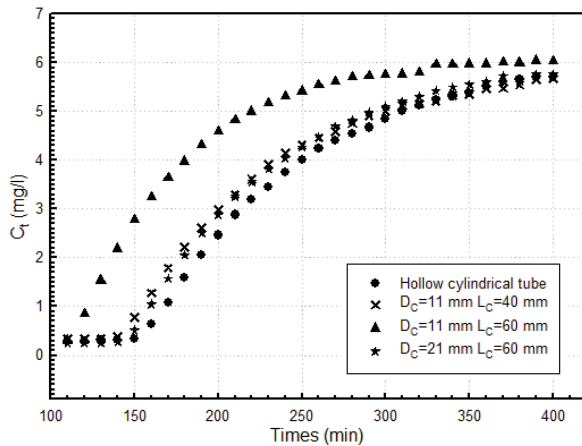
6.1 สมรรถนะในการเติมออกซิเจน

จะอธิบายถึงการคำนวณเพื่อหาสมรรถนะการเติมออกซิเจน เช่นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (K_La) ความสามารถในการเติมออกซิเจน (Oxygenation Capacity, OC) อัตราการถ่ายเทออกซิเจน (Oxygen Transfer, RO) และประสิทธิภาพในการเติมออกซิเจน (E)

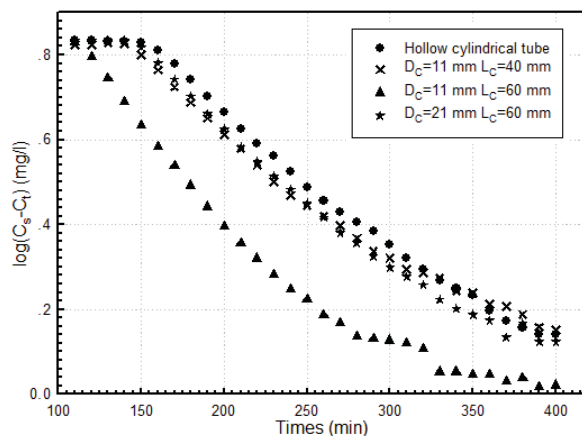
6.1.1 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (K_La)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน โดยทั่วไปขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในการเติมออกซิเจนในขณะนั้น ถึงแม้จะเป็นเครื่องเติมอากาศแบบเดียวกัน เมื่อสภาพแวดล้อมในน้ำเปลี่ยนแปลงก็มีผลให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนเปลี่ยนไปด้วย ดังนั้นในการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนลงในน้ำ จำเป็นต้องคำนึงถึงปริมาตรของน้ำ ความปั่นป่วนระหว่างชั้นน้ำและบรรยากาศ อุณหภูมิของน้ำ และสภาพของน้ำด้วย ในการทดลองแต่ละครั้งจึงจำเป็นต้องควบคุมตัวแปรตามที่ได้อธิบายมาข้างต้น

ในการเพิ่มค่าออกซิเจนลงในน้ำเมื่อเวลาผ่านไป ค่าออกซิเจนก็จะมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ และจะมีความไวในการเพิ่มขึ้นของค่าออกซิเจนที่แตกต่างกันไปในแต่ละรูปแบบของเครื่องกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก ดังแสดงในรูปที่ 6

รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_t กับเวลา

จากรูปที่ 6 เห็นได้ว่าค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในกรณีของเครื่องกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กที่มีท่อบังคับการไหลขนาด $D_c = 11$ mm $L_c = 60$ mm คือจะใช้เวลาในการเพิ่มค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำได้อย่างรวดเร็วกว่ากรณีอื่นๆ โดยเวลาในการเพิ่มออกซิเจนจากค่าต่ำสุดขึ้นสู่ค่าสูงสุดที่ 220 นาที ซึ่งหัวฉีดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กรูปแบบอื่นๆ จะทำได้ ที่เวลา ดังนี้ $D_c = 21$ mm $L_c = 60$ mm ใช้เวลา 300 นาที $D_c = 11$ mm $L_c = 40$ mm ใช้เวลา 320 นาที และรูปแบบท่อทรงกระบอกกลวงใช้เวลา 350 นาที

รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $C_t - C_s$ กับเวลา

จากรูปที่ 7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของผลต่างระหว่างค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ณ เวลาใดๆ กับค่า

ออกซิเจนที่ละลายในน้ำอิ่มตัว จากนั้นจะหาค่าความชันของการเปลี่ยนแปลง $C_s - C_t$ ที่เวลาต่างๆ แล้วจึงนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนตามสมการที่ (1) ดังแสดงค่าในตารางที่ 1

โดยค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิ 32.5°C ($C_{s(32.5)} = 7.0904$ mg/l จากสมการที่ (2)

ตารางที่ 1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของหัวฉีดรูปแบบต่างๆ

รูปแบบหัวฉีด	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (mg/l)
ท่อทรงกระบอกกลวง	0.0078
$D_c=11$ mm $L_c=40$ mm	0.0081
$D_c=11$ mm $L_c=60$ mm	0.0107
$D_c=21$ mm $L_c=60$ mm	0.0083

ดังตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนตามที่ได้แสดง คำนวณที่อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ 32.50°C ซึ่งจำเป็นต้องแปลงให้เป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่อุณหภูมิของน้ำ 20°C โดยใช้สมการที่ (3) ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่อุณหภูมิของน้ำ 20°C ของหัวฉีดรูปแบบต่างๆ โดยใช้สมการที่ (3)

รูปแบบหัวฉีด	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่อุณหภูมิของน้ำ 20°C (min^{-1})
ท่อทรงกระบอกกลวง	0.0058
$D_c=11$ mm $L_c=40$ mm	0.0059
$D_c=11$ mm $L_c=60$ mm	0.0079
$D_c=21$ mm $L_c=60$ mm	0.0062

เมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่อุณหภูมิของน้ำ 20°C ก็จะได้นำไปใช้ในการคำนวณค่าความสามารถในการเติมออกซิเจนต่อไป

6.1.2 ความสามารถในการเติมออกซิเจน (OC)

ในการคำนวณความสามารถในการเติมออกซิเจนจะขึ้นอยู่กับลักษณะของเครื่องเติมอากาศ ในกรณีที่ใช้เครื่องเติมอากาศแบบเติมอากาศใต้ผิวน้ำจะใช้สมการ (4)

ในที่นี้ความดันบรรยากาศบริเวณที่ใช้ในการทดลอง $P = 760$ mmHg, ความลึกจากผิวน้ำจนถึงหัวเติมอากาศ $h = 0.3$ m, ความดันไอน้ำที่อุณหภูมิ 20°C ซึ่งมีค่า $p = 17.5$ mmHg และปริมาตรของน้ำในแท่งที่ใช้ในการเติมอากาศที่มีรูปทรงสี่เหลี่ยมมีปริมาตรของน้ำ $V = 180.52$ l สำหรับค่าออกซิเจนอิ่มตัวที่อุณหภูมิของน้ำ 20°C คำนวณได้จากสมการ (1) จะได้ $C_{s(20^{\circ}\text{C})} = 8.9529$ mg/l เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการ (4) จะได้ค่าความสามารถในการเติมออกซิเจนดังแสดง ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงความสามารถในการเติมออกซิเจนของหัวฉีดรูปแบบต่างๆ

รูปแบบหัวฉีด	ความสามารถในการเติมออกซิเจน ($\text{mg} - \text{O}_2/\text{hr}$)
ท่อทรงกระบอกกลวง	580.80
Dc=11 mm Lc=40 mm	598.77
Dc=11 mm Lc=60 mm	794.32
Dc=21 mm Lc=60 mm	616.08

6.1.3 อัตราการถ่ายเทออกซิเจน (R_O)

อัตราการถ่ายเทออกซิเจนสามารถคำนวณได้จาก ความสามารถในการเติมออกซิเจนหารด้วยกำลังงานที่ใช้กับเครื่องเติมอากาศ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5) ค่าที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 4

ในการทดลองที่สภาวะเงื่อนไขข้างต้นสามารถคำนวณหาพลังงานจากของไหลที่ไหลผ่านตัวกำเนิดฟองอากาศได้จากสมการที่ (6)

ตารางที่ 4 แสดงอัตราการถ่ายเทออกซิเจนของหัวฉีดรูปแบบต่างๆ

รูปแบบหัวฉีด	อัตราการถ่ายเทออกซิเจน ($\text{kg} - \text{O}_2/\text{kw} - \text{hr}$)
ท่อทรงกระบอกกลวง	10.23
Dc=11 mm Lc=40 mm	10.04
Dc=11 mm Lc=60 mm	12.72
Dc=21 mm Lc=60 mm	11.43

6.1.4 ประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจน (E)

ประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7)

สำหรับในเงื่อนไขอัตราการไหลของอากาศ คือ $1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{min}$ หรือ $6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{hr}$ เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (7) จะได้ค่าประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนดังตารางที่ 5

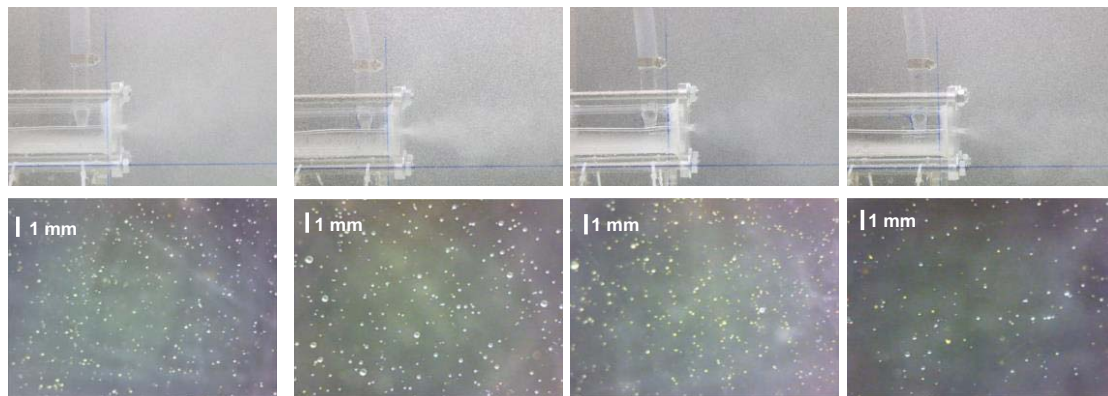
ตารางที่ 5 แสดงประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนของหัวฉีดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กรูปแบบต่างๆ

รูปแบบหัวฉีด	ประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจน (%)
ท่อทรงกระบอกกลวง	34.22
Dc=11 mm Lc=40 mm	35.28
Dc=11 mm Lc=60 mm	46.80
Dc=21 mm Lc=60 mm	36.30

จากค่าสมรรถนะการเติมออกซิเจนทั้ง 4 ค่าที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าการติดตั้งท่อบังคับการไหลมีผลทำให้ค่าต่างๆ มีค่าที่สูงขึ้นตามไปด้วย โดยจะเห็นได้ชัดในกรณีท่อบังคับการไหลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับช่องทางออกและความยาวที่มาก คือ $D_c = 11$ mm $L_c = 60$ mm จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน 0.0107 mg/l ความสามารถในการเติมออกซิเจน $794.32 \text{ mg} - \text{O}_2/\text{hr}$ อัตราการถ่ายเทออกซิเจน $12.72 \text{ kg} - \text{O}_2/\text{kw} - \text{hr}$ ประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจน 46.80 % ซึ่งค่าสมรรถนะเหล่านี้มีค่าที่เพิ่มมากขึ้นจากรูปแบบที่ไม่ได้ติดตั้งท่อบังคับการไหลที่ 37.18 % 36.77 % 24.34 % 12.58 % ตามลำดับ

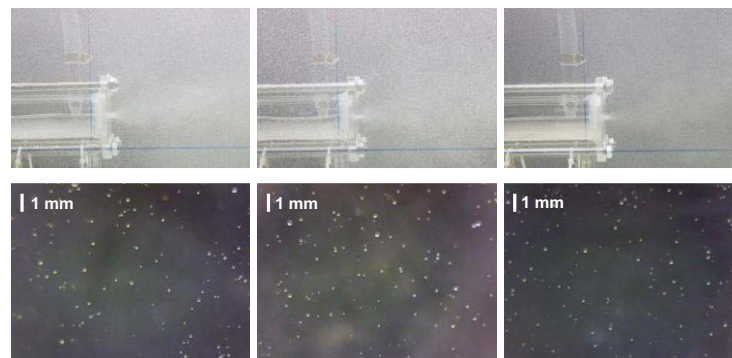
6.2 ขนาดฟองอากาศจากตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก

จากผลของการติดตั้งท่อบังคับการไหลพบว่าในทุกกรณีสามารถให้ฟองอากาศที่มีขนาดเล็กออกมาได้แต่จะมีความแตกต่างกันในเรื่องของขนาดและปริมาณฟองอากาศขนาดเล็ก โดยในกรณี (b), (e), (f) เป็นกรณีที่เกิดความไม่เสถียรในการดูดอากาศเข้าลำหัวฉีดเนื่องจากลำอากาศโดนกระแสน้ำเข้า เบนให้ส่วนท้ายของลำอากาศไม่ตรงกับรูอากาศเข้า จึงทำให้อากาศเข้าในลำหัวฉีดในปริมาณไม่สม่ำเสมอจึงส่งผลให้มีฟองอากาศขนาดใหญ่ปะปนออกมามากกว่ากรณีอื่น



(a) ปริมาณและลักษณะ ฟองอากาศจากตัวกำเนิดแบบ ท่อทรงกระบอกกรวง
(b) ปริมาณและลักษณะ ฟองอากาศจากตัวกำเนิดติดตั้ง ท่อบังคับการไหล $D_c=11\text{mm}$ $L_c=20\text{mm}$
(c) ปริมาณและลักษณะ ฟองอากาศจากตัวกำเนิดติดตั้ง ท่อบังคับการไหล $D_c=11\text{mm}$ $L_c=40\text{mm}$
(d) ปริมาณและลักษณะ ฟองอากาศจากตัวกำเนิดติดตั้ง ท่อบังคับการไหล $D_c=11\text{mm}$ $L_c=60\text{mm}$

รูปที่ 8 ปริมาณฟองอากาศที่ออกจากตัวกำเนิดฟองอากาศรูปแบบท่อทรงกระบอกกลางและท่อทรงกระบอกติดตั้งท่อบังคับการไหลขนาด $D_c=11\text{ mm}$ $L_c=20, 40, 60\text{ mm}$ และขนาดฟองอากาศที่ได้



(e) ปริมาณและลักษณะ ฟองอากาศจากตัวกำเนิดติดตั้ง ท่อบังคับการไหล $D_c=21\text{mm}$ $L_c=20\text{mm}$
(f) ปริมาณและลักษณะ ฟองอากาศจากตัวกำเนิดติดตั้ง ท่อบังคับการไหล $D_c=21\text{mm}$ $L_c=40\text{mm}$
(g) ปริมาณและลักษณะ ฟองอากาศจากตัวกำเนิดติดตั้ง ท่อบังคับการไหล $D_c=21\text{mm}$ $L_c=60\text{mm}$

รูปที่ 9 ปริมาณฟองอากาศที่ออกจากตัวกำเนิดฟองอากาศรูปแบบท่อทรงกระบอกติดตั้งท่อบังคับการไหลขนาด $D_c=21\text{ mm}$ $L_c=20, 40, 60\text{ mm}$ และขนาดฟองอากาศที่ได้

ผลของการติดตั้งท่อบังคับการไหลจะทำให้การไหลหมุนวนของน้ำเมื่อเข้าสู่ท่อบังคับจะมีความเร็วในการไหลหมุนวนที่สูงขึ้น จะเห็นได้ชัดในกรณีของท่อบังคับการไหลที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับช่องทางออกของน้ำโดยจะสังเกตเห็นการบิดเป็นเกลียวของลำอากาศภายในท่อบังคับการไหล จึงทำให้มีแรงเฉือนในการตัดย่อยฟองที่สูงขึ้นจึงได้ฟองอากาศที่มีขนาดเล็กลง ดังผลที่ออกมาในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แสดงขนาดฟองโดยเฉลี่ยที่ได้จากเครื่องกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กรูปแบบต่างๆ

รูปแบบหัวฉีด	ขนาดฟองอากาศเฉลี่ย (μm)
ท่อทรงกระบอกกลวง	149.16
Dc=11 mm Lc=20 mm	154.16
Dc=11 mm Lc=40 mm	130.00
Dc=11 mm Lc=60 mm	83.33
Dc=21 mm Lc=20 mm	165.00
Dc=21 mm Lc=40 mm	158.33
Dc=21 mm Lc=60 mm	120.00

7. สรุปผล

จากการศึกษาผลของรูปแบบท่อบังคับการไหลที่มีผลต่อลักษณะการไหลภายในชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก สามารถสรุปได้ดังนี้

- (1) ผลของการติดตั้งท่อบังคับการไหลสามารถทำให้ฟองอากาศที่ได้มีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับรูปแบบหัวฉีดสร้างฟองอากาศที่ไม่ได้ติดตั้งท่อบังคับการไหล
- (2) ผลของความยาวและขนาดของท่อบังคับการไหลมีผลต่อความเสถียรของการดูดอากาศเข้าของหัวฉีดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กโดยในกรณีของท่อบังคับการไหล $D_c=11\text{ mm } L_c=20\text{ mm}$, $D_c=21\text{ mm } L_c=20\text{ mm}$, $D_c=21\text{ mm } L_c=40\text{ mm}$ ล้ออากาศจะถูกเบนโดยกระแสน้ำจากท่อน้ำเข้าทำให้ล้ออากาศส่วนท้ายคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งรูทางเข้าอากาศ จึงต้องใช้ปั๊มลมช่วยในการอัดอากาศเข้าเป็นผลให้มีการสิ้นเปลืองพลังงานเพิ่มขึ้น และจะได้ฟองอากาศออกมาไม่ต่อเนื่อง
- (3) รูปแบบของท่อบังคับการไหลที่ให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ความสามารถในการเติมออกซิเจนที่สูง และขนาดฟองที่เล็กที่สุด คือ $D_c=11\text{ mm } L_c=60\text{ mm}$ โดยมีขนาดฟองเล็กถึงคิดเป็น 44.13% ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนเพิ่มขึ้น 37.18% มีความสามารถในการเติมออกซิเจนเพิ่มขึ้น 36.77% อัตราการถ่ายเทออกซิเจนเพิ่มขึ้น 24.34% และมีประสิทธิภาพในการ

ถ่ายเทออกซิเจนเพิ่มขึ้น 12.58% เมื่อเทียบกับหัวฉีดสร้างฟองอากาศที่ไม่ได้ติดตั้งท่อบังคับการไหล

เอกสารอ้างอิง

- [1] Terasaka, K., Hirabayashi, A., Nishino, T., Fujioka, S., Kobayashi, D., 2011. Development of microbubble aerator for waste water treatment using aerobic activated sludge. Chemical Engineering Science, Vol. 66, pp. 3172-3179.
- [2] Ohnari, H., Saga, T., Watanabe, K., Maeda, K., Maeda, K., 1999. High functional characteristics of micro-bubbles and water purification, Resources Processing, Vol. 46 (4), pp. 238-244.
- [3] Sadatomi, M., Kawahara, A., Kano, K. and Ohtomo, A., 2005, Performance of a new micro-bubble generator with a spherical body in a flowing water tube, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 29, pp. 615-623.
- [4] Kawahara, A., Sadatomi, M., Matsuyama, F., Matsuura, H., Tominaga, M., Noguchi, M., 2009, Prediction of micro-bubble dissolution characteristics in water and seawater, Experimental Thermal and Fluid Science Vol. 33, pp. 883-894.
- [5] Sadatomi, M., Kawahara, A., Matsuura, H. and Shikatani, S., 2012, Micro-bubble generation rate and bubble dissolution rate into water by a simple multi-fluid mixer with orifice and porous tube, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 41, pp. 23-30.
- [6] อุดมผล พิษไพบูลย์ คณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (2555) ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 4 คู่มือปฏิบัติการ 224-323 ปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, ปฏิบัติการที่ 4 Aeration