



ผลของการใช้ชุดสร้างฟองอากาศแบบเวนจูร์ร่วมกับถังความดันต่อการเกิด ฟองอากาศขนาดเล็กไมครอนสำหรับใช้เติมออกซิเจนในน้ำ

Effect of Using Venturi-type Bubble Generator with Pressure Tank on Micro Bubble Generation for Aeration

ปริญญ์ พานิชย์*, ประไพพิศ ทาวอนศรี¹, ชยุต นันทดุษิต²

Parinya Panich^{1*}, Prapaipis Tawonsri¹, Chayut Nuntadusit²

(Received: June 18, 2021; Revised: July 12, 2021; Accepted: August 5, 2021)

บทคัดย่อ

การใช้หัวพ่นฟองอากาศได้น้ำหรือกักน้ำเพื่อเติมออกซิเจนในน้ำ เป็นเทคนิคที่ใช้กันโดยทั่วไป แต่ฟองอากาศที่ได้มักไม่เสถียร เกิดการลอยขึ้นสู่ผิวน้ำอย่างรวดเร็ว จึงทำให้มีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำน้อย งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดฟองอากาศได้น้ำ ให้สามารถผลิตฟองอากาศที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับไมครอนโดยใช้หลักการเวนจูร์ร่วมกับความดัน จากการศึกษาการใช้ชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กร่วมกับความดัน (1, 2, 3, 4, 5 และ 6 kg/cm²) เปรียบเทียบกับชุดสร้างฟองอากาศชนิดวัตุรูปทรง พบว่าชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กที่ไม่ได้ใช้ความดันและชนิดวัตุรูปทรงให้ฟองอากาศขนาดใหญ่กว่า 1 mm. โดยฟองอากาศที่ได้จะไม่เสถียร ทำให้มีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเฉลี่ยเพียง 3.72 mg/l แต่เมื่อเพิ่มระดับของการให้ความดัน ทำให้ฟองอากาศยังมีขนาดเล็กลง การให้ความดัน 6 kg/cm² เกิดฟองอากาศที่มีขนาด 46.13 μm มีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเฉลี่ย 7.40 mg/l มีอัตราการเพิ่มขึ้นของออกซิเจนละลายน้ำสูงที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนละลายน้ำความสามารถในการเติมออกซิเจนในน้ำ อัตราการถ่ายเทออกซิเจนและประสิทธิภาพของเครื่องเติมอากาศที่ดีที่สุด คือ 6.01 hr⁻¹, 33.20x10⁻⁴ mg O₂/hr, 3.70 mg O₂/kW/hr และ 6.90% ตามลำดับ

คำสำคัญ: ชุดสร้างฟองอากาศแบบเวนจูร์ร่วมกับถังความดัน ชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กไมครอน การเติมออกซิเจนในน้ำ

*คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

¹Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University

²คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

²Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

*Corresponding Author: parinya.p@pnu.ac.th



Abstract

Usage of air diffuser or jet aerator was a typical technique that used for oxygenation process. However, the occurred bubbles were unstable, rapidly floated to the water surface and small amount of dissolved oxygen level. The objective of this study was to increase the efficiency of air bubble generator to produce the microbubble applying the venturi principle and pressure. Venturi-type microbubble generator at various pressure (1, 2, 3, 4, 5 and 6 kg/cm²) and air diffuser were studied and compared. It was found that, the air bubbles from venturi-type microbubble generator without pressure and air diffuser were larger than 1 mm. Because of the unstable bubbles, the water only contained dissolved oxygen level at 3.72 mg/l. Whereas, the size of bubbles was decrease with increasing the pressure level. Venturi-type microbubble generator with pressure at 6 kg/cm² generated the microbubble size 46.13 μ m, the water contained dissolved oxygen level at 7.40 mg/l which had the highest rate of dissolved oxygen level. Moreover, venturi-type microbubble generator with pressure at 6 kg/cm² also had the highest in the oxygen transfer coefficient, oxygenation capacity, oxygen transfer rate and aerator efficiency which were 6.01 hr⁻¹, 33.20x10⁻⁴ mg O₂/hr, 3.70 mg O₂/kW/hr and 6.90%, respectively.

Keywords: Venturi-type bubble generator with pressure tank, Microbubble generator, Oxygenation

บทนำ

ปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีฟองอากาศระดับไมครอน (Microbubble technology) มาประยุกต์ใช้งานในหลายด้าน เช่น การเติมอากาศลงในระบบบำบัดน้ำเสียเพื่ออนุรักษ์สิ่งแวดล้อม การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ การเกษตรกรรม การแปรรูปอาหารและเครื่องดื่ม รวมทั้งงานด้านวิทยาศาสตร์สำหรับสุขภาพและความงาม เนื่องจากฟองอากาศระดับไมครอนเป็นฟองที่มีขนาดเล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง 50-200 μ m ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษ คือ มีพื้นที่ผิวสัมผัสของอากาศจำนวนมาก ไม่เกิดการรวมตัวกันกลายเป็นฟองขนาดใหญ่ สามารถละลายหรือแทรกตัวในของเหลวได้ดี อีกทั้งยังมีแรงลอยตัวต่ำ จึงทำให้เกิดการลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำได้ช้ากว่าฟองอากาศทั่วไป (Liu et al., 2013)

สำหรับวิธีการสร้างฟองอากาศระดับไมครอน (Agarwal, Ng, & Liu, 2011) แบ่งออกเป็น 4 วิธี ได้แก่ วิธีการเคลื่อนที่ของของไหล วิธีการใช้คลื่นเสียง วิธีไฟฟ้าเคมีและวิธีการสั่นเชิงกล ซึ่งทั้ง 4 วิธี ช่วยเพิ่มปริมาณฟองอากาศในระบบได้ ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งานและการควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อขนาดฟอง ทั้งนี้การสร้างฟองอากาศระดับไมครอนด้วยวิธีใช้การเคลื่อนที่ของของไหล



นิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากใช้พลังงานน้อยและสามารถใช้งานได้ในพื้นที่ที่มีความหลากหลาย ดังนั้น จึงมีการพัฒนาตัวกำเนิดฟองอากาศรูปแบบต่าง ๆ (Onari, Saga, Watanabe, Maeda, & Matsuo, 1999; Terasaka, Hirabayashi, Nishino, Fujioka, & Kobayashi, 2011; Nakatake, Kisu, Shigyo, Eguchi, & Watanabe, 2013) ดังแสดงในภาพที่ 1 ใช้วิธีการเคลื่อนที่ของของไหล เช่น แบบของไหลหมุนเป็นเกลียว (Spiral liquid flow type) แบบการละลายด้วยความดัน (Pressurized dissolution type) แบบอีเจ็คเตอร์ (Ejector type) และแบบเวนจูรี (Venturi type)

หลักการทำงานของตัวกำเนิดฟองอากาศแต่ละรูปแบบมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะและโครงสร้างของตัวกำเนิดฟอง โดยตัวกำเนิดฟองอากาศแบบของไหลหมุนเป็นเกลียว อาศัยการเคลื่อนที่ของของไหลที่มีความเร็วสูงทำให้เกิดการหมุนเหวี่ยงและแรงเหวี่ยงยอยฟองอากาศให้มีขนาดเล็กลง ส่วนตัวกำเนิดฟองอากาศแบบการละลายด้วยความดัน เมื่อก๊าซในน้ำที่มีความดันสูงอัดตัวถูกปล่อยสู่ความดันปกติ ทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กในปริมาณที่มากขึ้น ส่วนตัวกำเนิดฟองอากาศแบบอีเจ็คเตอร์และแบบเวนจูรี ใช้หลักการที่ของไหลเคลื่อนด้วยความเร็วสูงผ่านบริเวณที่เปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัด ส่งผลต่อความดันที่ทำให้เกิดฟองอากาศระดับไมครอน (Sadatomi, Kawahara, Matsuura, & Shikatani, 2012) แต่ตัวกำเนิดฟองอากาศแบบเวนจูรีมีลักษณะเด่นคือ โครงสร้างไม่ซับซ้อน สะดวกต่อการติดตั้ง ไม่มีการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนภายใน ใช้พลังงานน้อยและบำรุงรักษาได้ง่าย (Parmar & Majumder, 2013) ซึ่งเหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งาน เช่น ใช้เป็นอุปกรณ์เติมอากาศที่สามารถเพิ่มความเข้มข้นของการละลายออกซิเจนในน้ำ เพื่อเพิ่มการเจริญเติบโตของปลาและเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร (Akhtar et al., 2018; Bagatur, 2014; Dahrazma, Naghedinia, Gorji, & Saghravani, 2019) นอกจากนี้ยังมีการเติมอากาศที่ให้ประสิทธิภาพสูง (Li, 2006) ทำให้ตัวกำเนิดฟองอากาศแบบเวนจูรีเป็นตัวเลือกที่ดีในการนำไปใช้กับระบบบำบัดน้ำเสีย (Wastewater treatment) (Mitra, Daltrophe, & Gilron, 2016; Kaya et al., 2017)

การปล่อยน้ำเสียจากแหล่งชุมชนหรือโรงงานอุตสาหกรรมลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ เป็นปัญหาสำคัญที่ต้องได้รับการแก้ไข เนื่องจากน้ำเสียมีสั่งเจือปนทำให้ออกซิเจนในน้ำมีปริมาณน้อย เมื่อปล่อยทิ้งไว้จะทำให้เกิดการสะสมของก๊าซและสิ่งกีดขวาง เป็นมลพิษทางน้ำและเกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจึงเป็นกระบวนการหนึ่งที่จะช่วยลดสิ่งเจือปนและทำให้น้ำมีคุณภาพที่ดีขึ้น

ปัจจุบันการบำบัดน้ำเสียมีหลายวิธี เช่น บ่อปรับเสถียร แบบบึงประดิษฐ์ แบบบ่อเติมอากาศ และการเติมสารชีวภาพ เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีมีความซับซ้อนต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ลักษณะและคุณภาพของน้ำเสีย ค่าใช้จ่ายในการบำบัด ประสิทธิภาพและการควบคุมดูแลระบบบำบัด เป็นต้น



โดยระบบบำบัดน้ำเสียแบบเดิมหรือใช้อากาศ (Aerobic wastewater treatment) (Aan, Wiratni, Tontowi, Indarto, & Iriawan, 2015) เป็นอีกวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่มีการลงทุนต่ำแต่ให้ประสิทธิภาพสูง มีขั้นตอนการทำงานไม่ซับซ้อนและบำรุงรักษาง่าย วิธีนี้อาศัยเครื่องเติมอากาศ (Aerator) (Nadayil, Mohan, Dileep, Rose, & Parambi, 2015) เพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจนในน้ำให้เพียงพอสำหรับจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยใช้เวลาน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการปล่อยให้ออกซิเจนโดยธรรมชาติ ทั้งนี้เครื่องเติมอากาศที่ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบเดิมอากาศมี 4 แบบ ได้แก่ เครื่องเติมอากาศผิวน้ำ เครื่องเติมอากาศใต้น้ำ เครื่องเติมอากาศแบบกังหัน และเครื่องเติมอากาศแบบหัวฉีด ซึ่งเครื่องเติมอากาศแบบหัวฉีดเป็นอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนสูงกว่าเครื่องเติมอากาศรูปแบบอื่น (Panich, Tawonsri, Palasai & Srichai, 2020) ได้ศึกษาผลของความดันต่อการเกิดฟองอากาศขนาดเล็กและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน โดยใช้เครื่องเติมอากาศแบบหัวฉีดที่มีลักษณะเวนจูร์ร่วมกับถังความดัน พบว่าการเพิ่มความดันให้สูงขึ้น มีผลทำให้อัตราการเกิดฟองอากาศขนาดเล็กและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมีค่ามากขึ้น

ดังนั้นเพื่อสามารถนำงานวิจัยไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมได้ งานวิจัยเรื่องนี้จึงจำลองสถานะของน้ำที่ใช้ในการทดลองให้มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำให้มีค่าเท่ากับศูนย์ เช่นเดียวกับปริมาณออกซิเจนในน้ำเสีย จากนั้นทำการประยุกต์ใช้ระบบการเติมอากาศแบบใหม่ที่มีตัวกำเนิดฟองอากาศระดับไมครอนแบบเวนจูร์ร่วมกับถังความดันเปรียบเทียบกับการใช้ตัวกำเนิดฟองอากาศแบบวัสดุพูน โดยศึกษาผลของการใช้ความดันต่อลักษณะการเกิดฟองอากาศ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำตามช่วงเวลาต่าง ๆ ค่าสัมประสิทธิ์ออกซิเจนละลายน้ำ ค่าความสามารถในการเติมออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศ ค่าประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจน และอัตราการถ่ายเทออกซิเจนของแต่ละสถานะการทดลอง

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของการใช้ตัวกำเนิดฟองอากาศแต่ละรูปแบบและเงื่อนไขที่ต่างกัน ที่มีผลต่อขนาดและปริมาณของฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอน
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการละลายออกซิเจนในน้ำ ค่าสัมประสิทธิ์ออกซิเจนละลายน้ำ ค่าความสามารถในการเติมออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศ ค่าประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจน และอัตราการถ่ายเทออกซิเจนของแต่ละสถานะการทดลอง



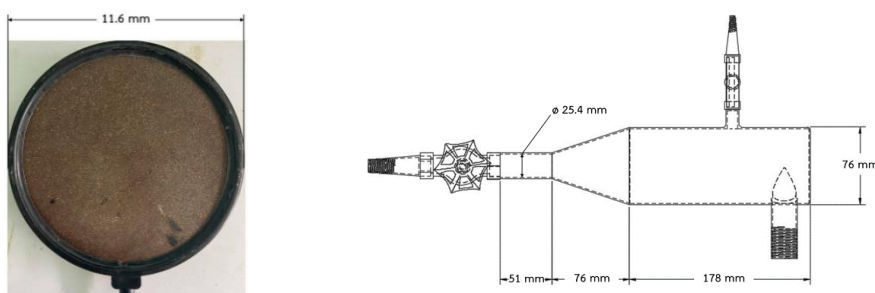
วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ ผู้วิจัยมีวิธีการที่ประกอบด้วย เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย วิธีการวิจัย วิธีการเก็บรวบรวมข้อมูลและวิธีการวิเคราะห์ข้อมูล โดยมีรายละเอียด ดังนี้

1. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1.1 รายละเอียดชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก

ชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กที่ใช้ทดลอง แบ่งเป็น 2 รูปแบบ คือ 1) หัวปล่อยฟองอากาศชนิดวัสดุพรุน (Air diffuser) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11.6 mm ต่อร่วมกับแหล่งจ่ายลม และ 2) ตัวกำเนิดฟองอากาศแบบเวนจูรี (Venturi tube) ทำจากวัสดุ PVC ลักษณะเป็นท่อลดขนาดเพื่อให้เกิดความแตกต่างของความดันและทำให้อากาศสามารถไหลเข้าสู่ตัวกำเนิดฟองได้แบบอัตโนมัติ ซึ่งตัวกำเนิดฟองอากาศแบบเวนจูรีใช้งานโดยการต่อร่วมกับถังความดัน (Pressure tank) ทำจากท่อสแตนเลสซึ่งลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหลักเท่ากับ 76 mm ยาว 178 mm ส่วนท่อทางออกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 mm ติดตั้งเกจวัดความดันและบอลลวลวสำหรับควบคุมความดันของน้ำภายในถังความดัน และต่อกับสายยางสำหรับส่งน้ำที่ผสมกับฟองอากาศเข้าสู่ชุดทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 1



(ก) หัวปล่อยฟองอากาศชนิดวัสดุพรุน (Air Diffuser) (ข) ถังความดัน (Pressure Tank)

ภาพที่ 1 ชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก

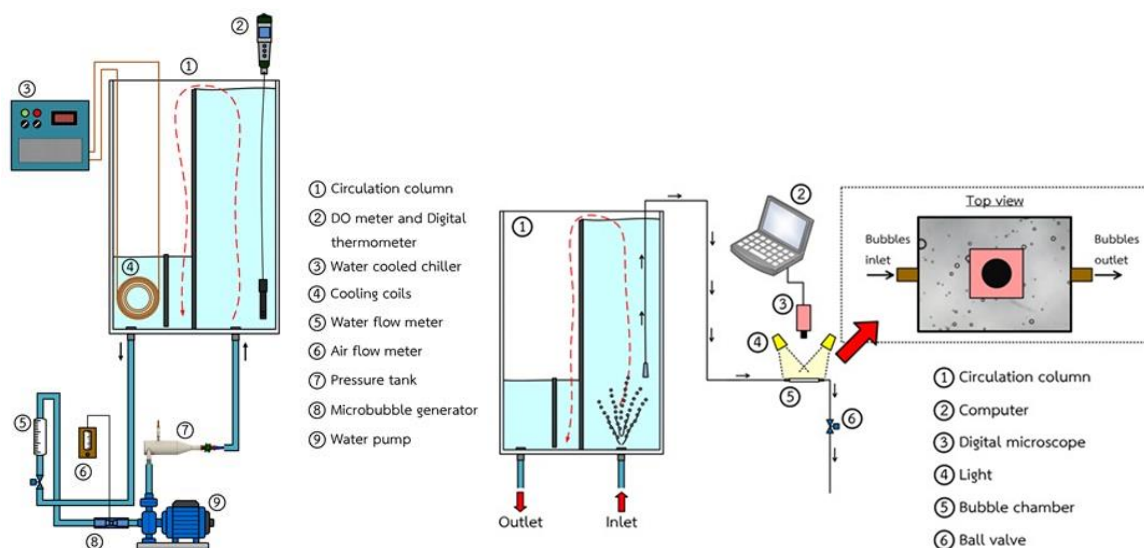
1.2 รายละเอียดชุดทดลองสำหรับศึกษาผลของการเกิดฟองขนาดไมครอนและประสิทธิภาพในการเติมออกซิเจนละลายน้ำ และชุดวัดขนาดฟองอากาศ

ชุดทดลองสำหรับศึกษาผลของการเกิดฟองขนาดไมครอนและประสิทธิภาพในการเติมออกซิเจนละลายน้ำ ประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ชุดทดลองแบบน้ำไหลวน (Circulation column) และชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก (Microbubble generator) ลักษณะของชุดทดลอง จะแบ่งช่องการไหลออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกเป็นส่วนที่เชื่อมต่อกับชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก กว้าง 30 cm ยาว 25 cm และความสูงของแผ่นกั้น 80 cm น้ำในส่วนแรกจะไหลลงไปสู่ส่วนที่ 2 และ 3 ตามลำดับ สำหรับส่วนที่ 2 และ 3



ถูกแบ่งช่องการไหลโดยติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 20 cm โดยจะเว้นช่องว่างที่พื้นตู้ เพื่อให้มีช่องว่างสำหรับน้ำไหลจากส่วนที่ 2 ไปส่วนที่ 3 ได้โดยไม่มีฟองอากาศไหลเข้าไปในช่องทางออก

ส่วนชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก ประกอบด้วยอุปกรณ์สร้างฟองอากาศ ได้แก่ ปั๊มน้ำ (Water pump) ชนิดแรงเหวี่ยงขนาด 1 hp ทำหน้าที่ดูดน้ำจากส่วนที่ 3 และจ่ายน้ำเข้าสู่ตู้ทดลองในส่วนที่ 1 เพื่อให้เกิดการไหลวนของน้ำในระบบ น้ำที่ไหลออกจากตู้ทดลองจะผ่านอุปกรณ์วัดอัตราการไหล (Water flow meter) ซึ่งมีวาล์วสำหรับควบคุมอัตราการไหลของน้ำ จากนั้นจึงไหลเข้าสู่ชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก ควบคุมการไหลของอากาศด้วยอุปกรณ์วัดอัตราการไหล (Air flow meter) ทั้งนี้อากาศภายนอกจะไหลเข้ามาผสมกับน้ำภายในชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก จากนั้นไหลผ่านปั๊มน้ำและเข้าสู่ถังความดัน (Pressure tank) ซึ่งติดตั้งวาล์วสำหรับควบคุมความดันภายในถัง น้ำที่มีฟองอากาศขนาดเล็กจะไหลออกจากถังความดันเข้าสู่ตู้ทดลองต่อไป ขณะทำการทดลองได้ควบคุมอุณหภูมิของน้ำให้มีค่าคงที่ โดยติดตั้งเครื่องทำน้ำเย็น (Water cooled chiller) ซึ่งเชื่อมต่อกับชุดท่อทองแดง (Cooling coils) ที่ติดตั้งไว้ภายในส่วนที่ 3 ของตู้ทดลอง และใช้เครื่องวัดออกซิเจนละลายน้ำและอุณหภูมิน้ำ (DO meter and Digital thermometer ยี่ห้อ EXTECH รุ่น DO 600 มีความละเอียดที่ 0.01 mg/l ความแม่นยำของเครื่องมือวัดที่ 2% FS) สำหรับการวัดค่าการละลายออกซิเจนในน้ำ จากนั้นเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเติมออกซิเจนละลายน้ำ ระหว่างการใช้หัวปล่อยฟองอากาศชนิดวัสดุพอร์ซเลนและการใช้ตัวสร้างฟองอากาศแบบเวนจูรีร่วมกับถังความดัน ส่วนชุดวัดขนาดฟองอากาศ สำหรับห้องกักฟองอากาศ (Bubbles chamber) ทำจากแผ่นอะคริลิกติดประกบกับแผ่นกระจกใส โดยเว้นให้มีช่องว่างระหว่างแผ่น 1 mm ปลายด้านหนึ่งเชื่อมต่อกับสายยางเพื่อให้ น้ำที่ผสมฟองอากาศจากตู้ทดลองไหลเข้ามายังห้องกักฟอง จากนั้นปิดวาล์วเพื่อให้ฟองอากาศที่ไหลผ่านชุดทดลองหยุดการเคลื่อนที่ นอกจากนี้บริเวณด้านบนของห้องกักฟองอากาศ จะติดตั้งไฟส่องสว่างและกล้องไมโครสโคปแบบดิจิทัล (USB Digital microscope 1600X) เพื่อใช้สำหรับถ่ายภาพฟองอากาศและบันทึกภาพในคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แผนภาพชุดทดลองการเกิดฟองอากาศขนาดไมครอนและชุดวัดขนาดฟองอากาศ

2. วิธีการเก็บรวบรวมข้อมูล

2.1 การศึกษาประสิทธิภาพการเติมออกซิเจนละลายน้ำ

การศึกษาชุดสร้างฟองอากาศขนาดไมครอนโดยใช้หลักการเวเนจัวร์ร่วมกับถังความดัน และชุดสร้างฟองอากาศชนิดวัฏศูรพวนเติมอากาศลงในน้ำ โดยทำการเก็บข้อมูลปริมาณออกซิเจนในน้ำที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ขั้นตอนการทดลองเริ่มต้นจากเติมน้ำประปา 75 liter ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ $29 \pm 1^\circ \text{C}$ ลดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำด้วยสารโซเดียมซัลไฟต์ (Sodium Sulfite, Na_2SO_3) ผสมกับน้ำกลั่นในสัดส่วน 1:10 และใช้สารโคบอลต์คลอไรด์ (Cobalt (II) Chloride, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ผสมกับน้ำกลั่นในสัดส่วน 1:100 จากนั้นนำสารละลายทั้งสองใส่ในน้ำที่ใช้ทดลอง โดยใส่สารละลายโซเดียมซัลไฟต์ 1.5 ml ต่อ น้ำ 1 liter และสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ 0.5 ml ต่อ น้ำ 1 liter คนให้สารละลายน้ำทั้งหมดและรอจนออกซิเจนละลายน้ำมีค่าเป็น 0 mg/l จากนั้นเปิดเครื่องทดลองโดยเริ่มต้นจากชุดสร้างฟองอากาศชนิดวัฏศูรพวน ควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ 0.3 l/min จากนั้นวัดค่าออกซิเจนที่ละลายน้ำทุก 5 min จนปริมาณออกซิเจนละลายน้ำมีค่าอิ่มตัว พร้อมทั้งถ่ายภาพฟองอากาศในช่วงต้นการทดลอง หลังเสร็จสิ้นการทดลอง ปิดเครื่องและทำการวัดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำที่ลดลงตามเวลาเก็บข้อมูลทุก ๆ 5 min จนออกซิเจนละลายน้ำมีค่าคงที่ จากนั้นเปลี่ยนถ่ายน้ำใหม่เพื่อเริ่มขั้นตอนการทดลองถัดไป เปลี่ยนเป็นชุดสร้างแบบเวเนจัวร์ร่วมกับถังความดัน โดยควบคุมสถานะเริ่มต้นเช่นเดียวกับชุดสร้างฟองอากาศชนิดวัฏศูรพวน ควบคุมอัตราการไหลของน้ำให้คงที่ที่ 12 l/min และอัตราการไหลของอากาศที่ 0.3 l/min ส่วนเงื่อนไขการทดลองปรับเปลี่ยนค่าความดันในถังความดัน ตั้งแต่ 0 – 6 kg/cm^2



โดยวัดค่าออกซิเจนละลายน้ำทุก 5 min จนปริมาณออกซิเจนในน้ำมีค่าอิ่มตัว พร้อมทั้งถ่ายภาพฟองอากาศในช่วงต้นการทดลอง หลังจากเสร็จสิ้นการทดลอง ปิดเครื่องและทำการวัดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำที่ลดลงตามเวลา เก็บข้อมูลทุก ๆ 5 min จนออกซิเจนละลายน้ำมีค่าคงที่ สำหรับเงื่อนไขการทดลองสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เงื่อนไขและตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

อัตราการไหลน้ำ	12 l/min
อัตราการไหลอากาศ	0.3 l/min
อุณหภูมิน้ำทดลอง	29±1 °C
ชุดสร้างฟองอากาศความดันเกจ	- ชุดสร้างฟองอากาศชนิดวัสดุรูพรุน ความดัน 0 kg/cm ² - ชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กพร้อมกับถังความดัน 0 - 6 kg/cm ²

2.2 การศึกษาขนาดของฟองอากาศที่มีผลจากถังความดันที่ความดันต่าง ๆ

การศึกษขนาดฟองอากาศจากถังความดันที่ความดันต่าง ๆ โดยจะทำการดูค่าน้ำที่มีฟองอากาศในชุดทดลองหาประสิทธิภาพออกซิเจนละลายน้ำไหลผ่านชุดวัดขนาดฟองอากาศ โดยจะปล่อยให้ น้ำที่ผสมกับฟองอากาศไหลเข้าเต็มชุดทดลอง จากนั้นปิดช่องไหลออกเพื่อให้น้ำที่ผสมฟองอากาศไม่มีการเคลื่อนที่ ถ่ายภาพฟองอากาศในชุดวัดขนาดฟองอากาศด้วยกล้องไมโครสโคปแบบดิจิทัล (USB Digital microscope 1600X) และทำการปล่อยน้ำให้ฟองอากาศที่ถ่ายภาพไว้ไหลออกไป จากนั้นจึงทำการปิดท่อทางออกอีกครั้งเพื่อถ่ายภาพขนาดฟองจำนวน 100 ครั้ง ในแต่ละชุดทดลองแล้วนำภาพถ่ายในแต่ละชุดทดลองมาวิเคราะห์หาขนาดของฟองอากาศด้วยวิธีการเทียบขนาดกับจำนวนพิกเซลใน 1 mm

2.3 ทฤษฎีการคำนวณ

การเติมอากาศและการตีน้ำเป็นตัวแปรสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของอัตราการถ่ายเทออกซิเจนเติมอากาศแบบชีวภาพ ดังนั้นต้องใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (K_La) (Moutafchieva, Popova, Dimitrova, & Tchaoushev, 2013) โดยขึ้นอยู่กับระบบการเติมอากาศ รูปแบบของอุปกรณ์เติมอากาศ ลักษณะและอุณหภูมิของน้ำ โดยสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนจากสมการที่ (1)

$$\text{ความชื้น} = K_La = 2.303 \left(\frac{\log(C_s - C_1) - \log(C_s - C_2)}{t_2 - t_1} \right) \quad (1)$$

เมื่อ K_La = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (hr⁻¹)

C_s = ค่าความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำอิ่มตัว ณ อุณหภูมิขณะทดลอง (mg/l)



C_t = ค่าความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำที่เวลาต่างๆ (mg/l)
 t = เวลา (min)

ค่าความสามารถในการเติมออกซิเจน (Oxygenation capacity, OC) ของเครื่องเติมอากาศ โดยการแทนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ซึ่งความสามารถในการเติมออกซิเจนจะขึ้นอยู่กับลักษณะของเครื่องเติมอากาศ ซึ่งในกรณีที่ใช้เครื่องเติมอากาศได้ผิวน้ำสามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ (2)

$$OC \left(\frac{\text{mg O}_2}{\text{hr}} \right) = [K_L a_{(T)} 1.024^{(20-T)}] \left[C_{S(T)} \frac{P + 73.53d - p}{760 - p} \right] V \quad (2)$$

เมื่อ OC = ความสามารถในการเติมออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศ (mg O₂/hr)
 $K_L a_{(T)}$ = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ณ อุณหภูมิขณะทดลอง (hr⁻¹)
 T = อุณหภูมิน้ำ ณ ขณะทดลอง (°C)
 P = ค่าความดันค่าความดันบรรยากาศใดๆ (mmHg)
 p = ค่าความดันไอของน้ำ (mmHg)
 d = ค่าความลึกของน้ำในชุดทดลอง (m)
 V = ปริมาตรของน้ำในชุดทดลอง (liter)

แทนค่าความสามารถในการเติมออกซิเจน เพื่อหาค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจน (Oxygen Transfer Rate, R_O) ได้ดังสมการที่ (3) และคำนวณหาค่าประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศต่างๆ (E) จากสมการที่ (4) และ (5)

$$R_O = \frac{OC}{P} \quad (3)$$

เมื่อ R_O = อัตราการถ่ายเทออกซิเจน (mg O₂/kW/hr)
 P = กำลังงานที่ให้กับเครื่องเติมอากาศ (kW)

$$E = \frac{OC}{A} \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ E = ประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศ (%)
 A = ปริมาณของออกซิเจนที่เติมลงไปในพื้นที่ สภาวะมาตรฐาน (mg O₂/hr)

$$\text{โดยที่} \quad A = Q_a \rho_{\text{อากาศ}} (0.23) \quad (5)$$

Q_a = ปริมาณอากาศที่ไหลเข้า (m³/s)
 0.23 = น้ำหนักออกซิเจนต่อหนึ่งหน่วยของอากาศ



$p_{\text{อากาศ}}$ = ความหนาแน่นของอากาศ ณ อุณหภูมิใดๆ
 ($p_{\text{อากาศ}}$ ที่อุณหภูมิ 30 °C เท่ากับ $1.164 \times 10^{-6} \text{ g/m}^3$)

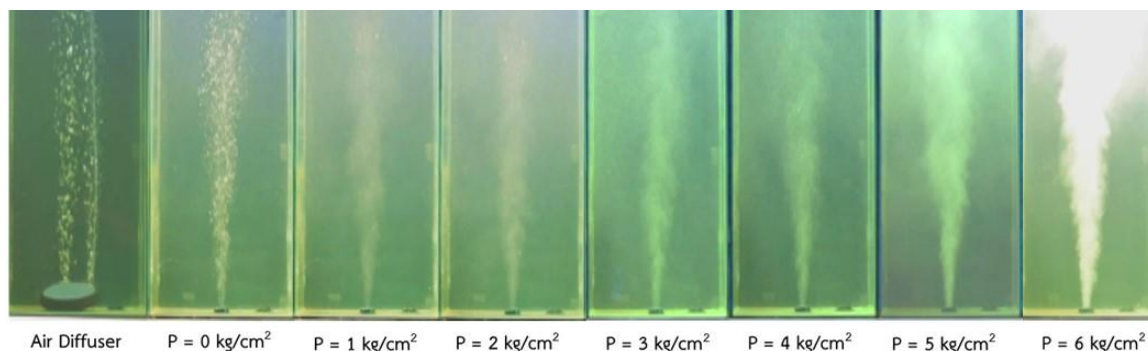
3. วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล

จากการทดลองประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของเครื่องกำเนิดฟองอากาศแบบเวนจูร์ร่วมกับถังความดันที่มีผลต่อการเกิดฟองอากาศขนาดไมครอนสำหรับเติมอากาศในน้ำ โดยแต่ละเงื่อนไขมีการทดลอง 3 ครั้ง ส่วนการวัดขนาดฟองอากาศได้ข้อมูลจากภาพถ่าย 100 รูปต่อหนึ่งเงื่อนไขการทดลอง นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อรายงานผลและอภิปรายผลการทดลอง

ผลการวิจัย

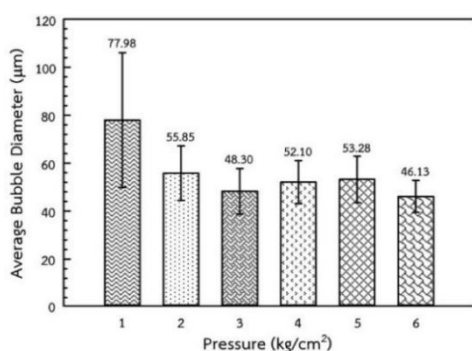
จากการทดลองการเกิดฟองขนาดไมครอนและประสิทธิภาพการเติมออกซิเจนละลายน้ำ ผลการทดลองได้อธิบายลักษณะการเกิดฟองของชุดสร้างฟองอากาศรูปแบบต่าง ๆ และเงื่อนไขที่มีผลต่อลักษณะการเกิดฟองอากาศ รวมทั้งขนาดฟองอากาศที่ได้จากชุดสร้างฟองอากาศรูปแบบต่าง ๆ ศึกษาปริมาณออกซิเจนละลายน้ำตามช่วงเวลาต่าง ๆ จนค่าออกซิเจนละลายน้ำมีค่าอิ่มตัว หาค่าสัมประสิทธิ์ออกซิเจนละลายน้ำ ค่าความสามารถในการเติมออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศ ค่าประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการถ่ายเทออกซิเจนของแต่ละสภาวะการทดลอง

จากการศึกษาผลการเกิดฟองอากาศจากชุดสร้างฟองอากาศแต่ละรูปแบบ พบว่าชุดสร้างฟองอากาศชนิดวัศดุรูปุน สามารถทำให้เกิดฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นฟองอากาศจึงลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำอย่างรวดเร็ว ส่วนฟองอากาศที่ได้จากชุดสร้างฟองอากาศแบบเวนจูร์ร่วมกับถังความดัน พบว่าที่ความดัน 0 kg/cm^2 ฟองอากาศที่ได้มีขนาดเล็กลง นอกจากนี้ความดันในถังความดัน ตั้งแต่ $1 - 4 \text{ kg/cm}^2$ ส่งผลให้ฟองอากาศที่ได้มีขนาดเล็กลงและมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากความดันภายในถังมีผลต่อการสะสมของปริมาณฟองอากาศขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามยังมีฟองอากาศบางส่วนที่มีขนาดใหญ่และลอยขึ้นสู่ผิวน้ำอย่างรวดเร็ว ส่วนกรณีที่เพิ่มความดันในถังความดันเป็น 5 kg/cm^2 และ 6 kg/cm^2 พบว่ามีฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมากและเกิดการสะสมของฟอง ซึ่งมีลักษณะเป็นกลุ่มฟองอากาศสีขาวขุ่นคล้ายกับน้ำมันอยู่ภายในตู้ทดลองและกลุ่มฟองอากาศยังลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำอย่างช้า ๆ ดังแสดงในภาพที่ 3

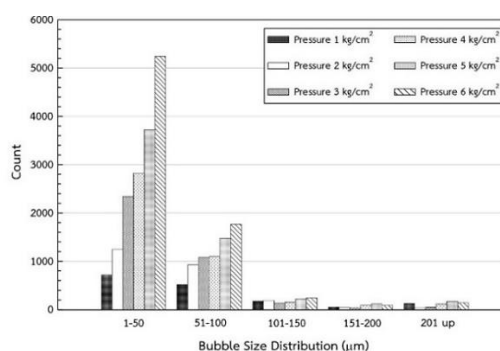


ภาพที่ 3 ลักษณะการเกิดฟองอากาศจากชุดสร้างฟองอากาศรูปแบบต่าง ๆ

จากการศึกษาขนาดฟองอากาศชุดสร้างฟองอากาศชนิดวัสดุพูน และชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กร่วมกับถังความดันที่ 0 kg/cm^2 พบว่าฟองอากาศที่ได้มีขนาดใหญ่เกินกว่า 1 mm แต่เมื่อเพิ่มความดันในถังความดัน ตั้งแต่ $1 - 6 \text{ kg/cm}^2$ ฟองอากาศมีขนาดเล็กลงในระดับไมครอน นอกจากนี้ที่ความดัน ตั้งแต่ $4 - 6 \text{ kg/cm}^2$ ฟองอากาศที่ได้มีขนาดที่ใกล้เคียงกัน โดยที่ความดัน 6 kg/cm^2 ขนาดของฟองอากาศเฉลี่ยอยู่ที่ $46.13 \text{ }\mu\text{m}$ ดังแสดงในภาพที่ 4 สำหรับปริมาณการกระจายตัวของขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้น จากภาพที่ 5 พบว่าชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กร่วมกับถังความดัน สามารถเกิดฟองอากาศขนาดเล็กในระดับไมครอนเป็นจำนวนมาก โดยขนาดฟองอากาศส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง $1 - 50 \text{ }\mu\text{m}$ จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความดันในถังมีผลทำให้ฟองอากาศขนาดเล็กเกิดการสะสมและลอยอยู่ในน้ำนานขึ้น จึงทำให้ในน้ำมีปริมาณฟองอากาศเพิ่มขึ้น โดยที่ความดัน 6 kg/cm^2 มีปริมาณฟองอากาศขนาดเล็กมากที่สุด



ภาพที่ 4 ขนาดฟองอากาศเฉลี่ย

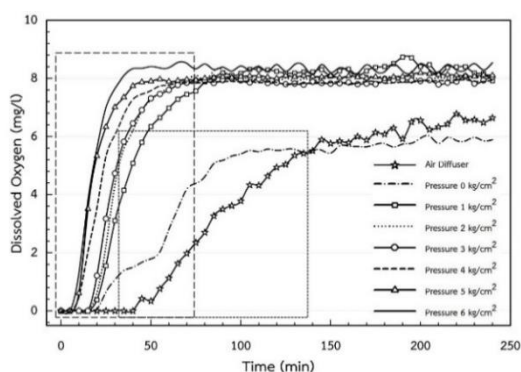


ภาพที่ 5 ปริมาณฟองอากาศขนาดไมครอน

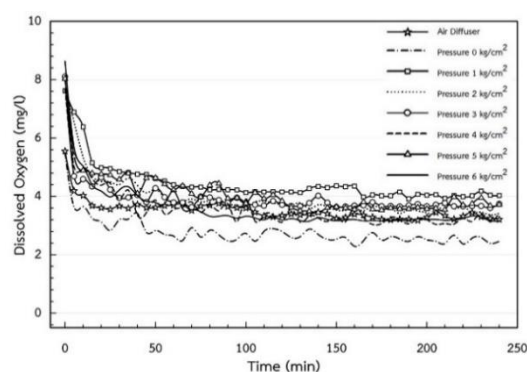
ผลการศึกษาออกซิเจนละลายน้ำแต่ละช่วงเวลาที่เปิดเครื่องสร้างฟองอากาศ เริ่มต้นน้ำได้ถูกปรับสภาพให้มีปริมาณออกซิเจนเท่ากับ 0 mg/l จากการทดลองพบว่าชุดสร้างฟองอากาศชนิดวัสดุพูนทำให้เกิดฟองอากาศขนาดใหญ่และลอยขึ้นผิวน้ำอย่างรวดเร็วมีปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำน้อย



โดยมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ 3.72 mg/l และอัตราการเปลี่ยนแปลงของออกซิเจนละลายในน้ำเกิดขึ้นได้ช้ากว่า ส่วนการใช้ชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กพร้อมกับความดัน ในกรณีที่มีความดันเท่ากับ 0 kg/cm^2 ฟองอากาศมีขนาดเล็กและสามารถลอยตัวอยู่ในน้ำได้นานขึ้น ซึ่งมีผลให้อัตราการละลายออกซิเจนในน้ำเกิดขึ้นได้รวดเร็วกว่า อย่างไรก็ตามการใช้ชุดสร้างฟองอากาศชนิดวัสดุพรุน และชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กพร้อมกับความดันที่ 0 kg/cm^2 ยังคงให้ผลของอัตราการละลายออกซิเจนในน้ำที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้กรณีที่ใช้ชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กพร้อมกับความดัน ตั้งแต่ $1 - 6 \text{ kg/cm}^2$ มีผลโดยตรงต่อขนาดฟองอากาศที่เล็กลงและปริมาณของฟองอากาศที่มากขึ้นตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าอัตราการละลายออกซิเจนในน้ำมีความเร็วที่เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความดัน โดยที่ความดัน 6 kg/cm^2 มีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ 7.40 mg/l นอกจากนี้พบว่าเมื่อถึงจุดที่ออกซิเจนละลายน้ำเริ่มอิ่มตัว อัตราของค่าออกซิเจนละลายน้ำจะมีค่าใกล้เคียงกัน จากความชันกราฟของออกซิเจนละลายน้ำที่แสดงอยู่ในเส้นประ สามารถนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนลงในน้ำต่อไป ส่วนการศึกษาผลของออกซิเจนละลายน้ำแต่ละช่วงเวลาหลังจากปิดเครื่อง พบว่าปริมาณของออกซิเจนละลายน้ำลดลงอย่างรวดเร็วในทุกการทดลอง และเมื่อเวลาผ่านไปอัตราการเปลี่ยนแปลงของออกซิเจนละลายน้ำเริ่มคงที่และใกล้เคียงกันทุกการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 6



(ก) ขณะเปิดเครื่องสร้างฟองอากาศ



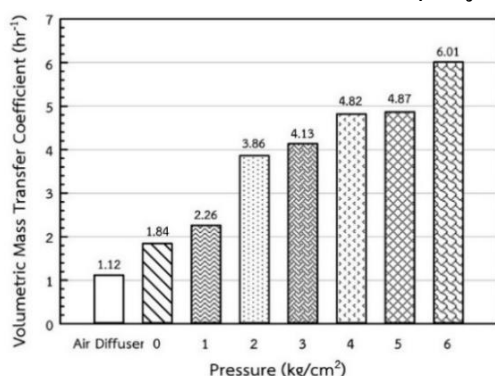
(ข) หลังปิดเครื่องสร้างฟองอากาศ

ภาพที่ 6 ผลของออกซิเจนละลายน้ำแต่ละช่วงเวลา

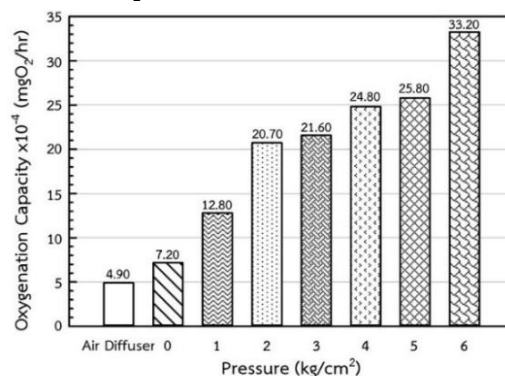
ผลการศึกษาออกซิเจนละลายน้ำเพิ่มขึ้นในช่วงความชันเส้นกราฟในเส้นประ ดังแสดงในภาพที่ 6 นำมาหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำ ดังสมการที่ (1) พบว่าชุดสร้างฟองอากาศชนิดวัสดุพรุนมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนลงในน้ำมีค่าน้อยที่สุด เนื่องจากฟองอากาศมีขนาดใหญ่ จึงลอยขึ้นสู่ผิวน้ำอย่างรวดเร็ว การถ่ายเทออกซิเจนลงในน้ำมีปริมาณน้อย เมื่อพิจารณาชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กพร้อมกับความดัน พบว่าเมื่อความดันเพิ่มสูงขึ้นฟองอากาศจะมีขนาดเล็กและมีปริมาณเพิ่ม



มากขึ้นทำให้ลอยตัวอยู่ในน้ำได้นานและมีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น ซึ่งช่วยจับตัวเกาะติดกับน้ำได้มากขึ้น ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำจึงเพิ่มขึ้น โดยที่ความดัน 6 kg/cm^2 มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนลงไปในน้ำดีที่สุดคือ 6.01 hr^{-1} ดังแสดงในภาพที่ 7 สำหรับการเติมออกซิเจนในน้ำที่ได้จากการนำค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำ แทนค่าลงในสมการ (2) พบว่าชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กรูปแบบต่าง ๆ เติมออกซิเจนลงในน้ำได้ดีขึ้นตามความดัน โดยที่ความดัน 6 kg/cm^2 มีค่าความสามารถการเติมออกซิเจนในน้ำดีที่สุดอยู่ที่ $33.20 \times 10^{-4} \text{ mg O}_2/\text{hr}$ ดังแสดงในภาพที่ 8

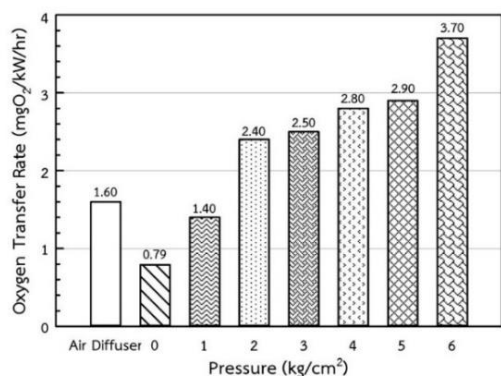


ภาพที่ 7 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำ

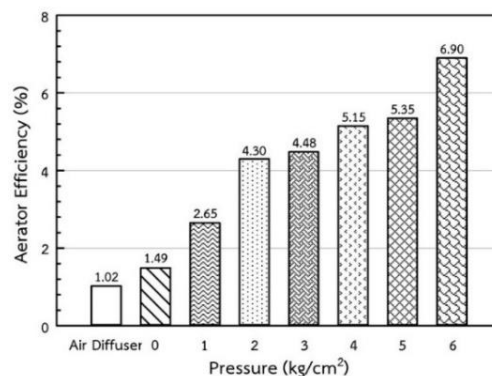


ภาพที่ 8 ความสามารถในการเติมออกซิเจนในน้ำ

จากการศึกษาอัตราการถ่ายเทออกซิเจน โดยแทนค่าการเติมออกซิเจนในน้ำ ในสมการ (3) พบว่าชุดสร้างฟองอากาศชนิดวัสดุรูพรุน มีค่าความสามารถในการเติมออกซิเจนในน้ำน้อยที่สุด อยู่ที่ $4.90 \times 10^{-4} \text{ mg O}_2/\text{hr}$ (จากภาพที่ 8) แต่เนื่องจากหวัปล้อยฟองชนิดวัสดุรูพรุนอาศัยเครื่องอัดอากาศขนาดเล็ก จึงทำให้พลังงานที่ใช้้น้อยกว่าเมื่อเทียบกับชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กพร้อมกับถังความดันที่ 0 kg/cm^2 และ 1 kg/cm^2 ดังนั้นการใช้วัสดุรูพรุนมีอัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่ดีกว่า ส่วนกรณีที่มีความดันมีค่าเพิ่มขึ้น ตั้งแต่ $2 - 6 \text{ kg/cm}^2$ ทำให้ความสามารถในการเติมออกซิเจนในน้ำได้ดีขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้กรณีที่ความดัน 6 kg/cm^2 มีอัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่ดีที่สุดอยู่ที่ $3.70 \text{ mg O}_2/\text{kW/hr}$ ดังแสดงในภาพที่ 9 ส่วนประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศ ได้จากการนำค่าความสามารถการเติมออกซิเจนในน้ำ แทนค่าลงในสมการ (4) และ (5) พบว่าชุดสร้างฟองอากาศชนิดวัสดุรูพรุน ให้ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศน้อยที่สุด อยู่ที่ 1.02% ส่วนฟองอากาศที่เกิดจากการใช้ชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กพร้อมกับถังความดัน มีค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนเพิ่มขึ้นเมื่อความดันมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยที่ความดัน 6 kg/cm^2 จะมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศมากที่สุด คือ 6.90% ดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 9 อัตราการถ่ายเทออกซิเจน

ภาพที่ 10 ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน
ของเครื่องเติมอากาศ

อภิปรายผล

จากการศึกษาการเกิดฟองอากาศจากชุดสร้างฟองอากาศแต่ละรูปแบบ พบว่าชุดสร้างฟองอากาศชนิดวัสดุรูพรุน ทำให้เกิดฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นฟองอากาศจึงลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำอย่างรวดเร็ว และมีฟองบางส่วนที่แตกตัวก่อนขึ้นสู่ผิวน้ำ ส่วนฟองอากาศที่ได้จากชุดสร้างฟองอากาศแบบเวนจูร์ร่วมกับถังความดัน ส่งผลให้ฟองอากาศที่ได้มีขนาดเล็กและฟองอากาศมีปริมาณมากขึ้นตามค่าความดันที่เพิ่มขึ้นภายในถังความดัน ดังนั้นลักษณะของฟองอากาศที่เกิดขึ้น ส่งผลต่อการละลายออกซิเจนในน้ำ สอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ความสามารถและอัตราการถ่ายเทออกซิเจน แสดงถึงประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศแต่ละรูปแบบ ดังนั้นการเพิ่มความดันในถังมากขึ้น มีผลทำให้ปัจจัยที่ศึกษาดังข้างต้นมีค่าที่เพิ่มสูงขึ้นตามอย่างมีนัยสำคัญ

สรุป

จากการศึกษาชุดสร้างฟองอากาศชนิดวัสดุรูพรุน และชุดสร้างฟองอากาศแบบเวนจูร์ร่วมกับถังความดันที่ 0 – 6 kg/cm² สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ลักษณะของฟองอากาศมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับรูปแบบของชุดสร้างฟองอากาศ สำหรับชุดสร้างฟองชนิดวัสดุรูพรุน สามารถเกิดฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 mm ทำให้ฟองอากาศมีพื้นที่ผิวสัมผัสผิวน้ำและลอยขึ้นสู่ผิวน้ำอย่างรวดเร็ว ส่วนชุดสร้างฟองอากาศแบบเวนจูร์ร่วมกับถังความดันพบว่าเมื่อความดันมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ฟองอากาศมีขนาดเล็กและมีปริมาณมากขึ้น โดยที่ความดัน 6 kg/cm² เกิดฟองอากาศขนาดเล็กในปริมาณมากที่สุด และขนาดของฟองอากาศเฉลี่ยอยู่ที่ 46.13 μ m



2. ผลของการละลายออกซิเจนในน้ำขณะที่เปิดเครื่องชุดสร้างฟองอากาศ พบว่าชุดสร้างฟองอากาศชนิดวัสุครุพุน มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำได้น้อย ทำให้ระยะเวลาการลอยตัวอยู่ในน้ำได้น้อยกว่า ส่วนการใช้ชุดสร้างฟองอากาศแบบเวนจูร์ร่วมกับถังความดัน พบว่าความดันที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการละลายออกซิเจนในน้ำ โดยที่ความดัน 6 kg/cm^2 มีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำสูงที่สุด คือ 8.55 mg/l เมื่อถึงจุดที่ออกซิเจนละลายน้ำเริ่มอิ่มตัว อัตราของค่าออกซิเจนละลายน้ำจะมีค่าใกล้เคียงกันหลังจากที่ปิดเครื่อง ผลการทดลองพบว่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำลดลงอย่างรวดเร็วในทุกการทดลอง และเมื่อเวลาผ่านไปอัตราการเปลี่ยนแปลงของออกซิเจนละลายน้ำเริ่มคงที่และใกล้เคียงกันทุกการทดลอง

3. ชุดสร้างฟองอากาศแบบเวนจูร์ร่วมกับถังความดัน โดยที่ความดัน 6 kg/cm^2 ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ค่าความสามารถในการเติมออกซิเจนและอัตราการถ่ายเทออกซิเจนในน้ำมีค่าสูงที่สุดคือ 6.01 hr^{-1} , $33.20 \times 10^{-4} \text{ mg O}_2/\text{hr}$ และ $3.70 \text{ mg O}_2/\text{kW/hr}$ ตามลำดับ นอกจากนี้ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศมีค่ามากที่สุดที่ 6.90% ได้จากการทดลองสร้างฟองอากาศโดยชุดสร้างฟองอากาศแบบเวนจูร์ร่วมกับถังความดัน ที่ความดันเท่ากับ 6 kg/cm^2

ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดสอบพบว่าควรมีการทดสอบต่อยอดไปดังนี้

1. ทดสอบในบ่อบำบัดน้ำเสียจริง
2. ประยุกต์ใช้เครื่องกำเนิดฟองอากาศแบบเวนจูร์ร่วมกับถังความดันในการใช้ประโยชน์ด้านอื่น ๆ
3. ศึกษาเปรียบเทียบทางเศรษฐศาสตร์เกี่ยวกับต้นทุน ความคุ้มค่าในการสร้าง และพลังงานที่ใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ ที่สนับสนุนงบประมาณในการตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

รายการอ้างอิง (References)

- Aan, D., Wiratni, W., Tontowi, A., Indarto, I., & Iriawan, A.G.W. (2015). The Implementation of a Developed Microbubble Generator on the Aerobic Wastewater Treatment. *International Journal of Technology*, 5, 327-333.



- Agarwal, A., Ng, W.J., & Liu, Y. (2011). Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment. *Chemosphere*, 84, 1175-1180.
- Akhtar, M.S., Rajesh, M., Ciji, A., Sharma, P., Kamalam, B.S., Patiyal, ... Sarma, D. (2018). Photo-thermal manipulations induce captive maturation and spawning in endangered golden mahseer (*Tor putitora*): A silver-lining in the strangled conservation efforts of decades. *Aquaculture*, 497, 336-347.
- Bagatur, T. (2014). Evaluation of plant growth with aerated irrigation water using venturi pipe part. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39, 2525-2533.
- Dahrazma, B., Naghedinia, A., Gorji, H.G., & Saghravani, S.F. (2019). Morphological and physiological responses of *Cucumis sativus* L. to water with micro-nanobubbles. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 21, 181-192.
- Kaya, Y., Bacaksiz, A.M., Bayrak, H., Gönder, Z.B., Vergili, I., Hasar, H., & Yilmaz, G. (2017). Treatment of chemical synthesis-based pharmaceutical wastewater in an ozonation-anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) system. *Chemical Engineering Journal*, 322, 293-301.
- Li, P. (2006). *Development of Advanced Water Treatment Technology using Microbubbles*. Dissertation of Keio University, Japan.
- Liu, C., Hiroshi, T., Zhang, J., Zhang, L., Yang, J., Huang, X., & Kubota, N. (2013). Successful application of shirasu porous glass (SPG) membrane system for microbubble aeration in biofilm reactor treating synthetic wastewater. *Separation and Purification Technology*, 103, 53-59.
- Mitra, S., Daltrophe, N.C., & Gilron, J. (2016). A novel eductor-based MBR for the treatment of domestic wastewater. *Water Research*, 100, 65-79.
- Moutafchieva, D., Popova, D., Dimitrova, M., & Tchaoushev, S. (2013). Experimental determination of the volumetric mass transfer coefficient. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 48, 351-356.
- Nadayil, J., Mohan, D., Dileep, K., Rose, M., & Parambi, R.R. (2015). A Study on effect of aeration on domestic wastewater. *International Journal of Interdisciplinary Research and Innovations*, 3, 10-15.



- Nakatake, Y., Kisu, S., Shigyo, K., Eguchi, T., & Watanabe, T. (2013). Effect of nano air-bubbles mixed into gas oil on common-rail diesel engine. *Energy*, 59, 233-239.
- Onari, H., Saga, T., Watanabe, K., Maeda, K., & Matsuo, K. (1999). High functional characteristics of micro-bubbles and water purification. *Resour Process*, 46, 238-244.
- Panich, P., Tawonsri, P., Palasai, W., & Srichai, P. (2020). Application of Venturi Type Bubbles Generator Combine with Pressure Tank on Small Bubbles Generation for Aeration. *Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, 34, 861-869.
- Parmar, R., & Majumder, S.K. (2013). Microbubble Generation and Microbubble-aided Transport Intensification – A State-of-the-art Report, *Chemical Engineering and Process: Process Intensification*, 64, 79-97.
- Sadatomi, M., Kawahara, A., Matsuura, H., & Shikatani, S. (2012). Microbubble generation rate and bubble dissolution rate into water by a simple multi-fluid mixer with orifice and porous tube. *Experimental Thermal Thermal and Fluid Science*, 41, 23-30.
- 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*, 66, 3172-3179.