

การเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนในระบบเติมอากาศ  
โดยใช้หัวฉีดสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก

Enhancement of Oxygen Transfer Coefficient in Aeration System using Nozzle  
for Generating Fine Air Bubbles

ชยต นันทดลิต<sup>1\*</sup> และ มักรัตร์ แวหะยี<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

\* ติดต่อ: E-mail: chayut@me.psu.ac.th โทรศัพท์: 074 287 035, โทรสาร: 074 558 830

**บทคัดย่อ**

บทความนี้นำเสนอเทคนิคการเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนในระบบเติมอากาศ โดยใช้หัวฉีดสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก โดยหัวฉีดที่ศึกษามีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกและท่อทรงกรวย มีน้ำไหลเข้าในแนวสัมผัสของท่อเพื่อสร้างการไหลวนความเร็วสูงในท่อทรงกระบอก ด้านท้ายของท่อมีทางเข้าของอากาศ อากาศที่เข้าหัวฉีดจะถูกกระแสไหลวนของน้ำที่มีความเร็วสูงตัดย่อยจนเป็นฟองอากาศขนาดเล็ก ก่อนที่จะไหลออกจากรูหัวฉีดที่อยู่ทางด้านหน้าของท่อ และหัวฉีดแบบท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีแท่งทรงกระบอกวางขวางเพื่อเร่งความเร็วน้ำให้ไหลตัดฟองอากาศจากแถวของรูที่ติดตั้งบนผนังท่อ ในการทดลองกำหนดให้อัตราการไหลของน้ำ  $Q_w = 25, 35$  และ  $45$  ลิตร/นาที และอัตราการไหลของอากาศกำหนดที่  $Q_a = 0.1, 0.2$  และ  $0.3$  ลิตร/นาที ในการทดลองทำการวัดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายในน้ำเพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจน และถ่ายรูปด้วยกล้องดิจิทัลเพื่อวัดขนาดฟองอากาศ จากการทดลองพบว่าเงื่อนไขอัตราการไหลของน้ำ  $45$  ลิตร/นาที และอัตราการไหลของอากาศ  $0.3$  ลิตร/นาที ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนสูงสุดในกรณีใช้หัวฉีดแบบท่อทรงกระบอก เนื่องจากฟองอากาศที่สร้างมีขนาดเล็กที่สุด

**คำหลัก:** การเติมอากาศ, ฟองอากาศขนาดเล็ก, หัวฉีด, สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจน

**Abstract**

This article presents technique to enhance oxygen transfer coefficient in aeration system by using nozzle for generating fine air bubbles. The nozzle has cylindrical shape and conical shape with water inlet flow into nozzle in tangential direction to produce high speed of swirl flow in nozzle. The air flows into the nozzle from the bottom of cylindrical. The air is then cut by swirl flow and flows out from nozzle outlet as fine bubbles. The other nozzle has rectangular cross-section with installed cylindrical rod to accelerate the water velocity to shear the air bubbles from a row of holes on nozzle wall. In the study, the flow rate of water was varied at  $Q_w = 25, 35$  and  $45$  l/min, and the flow rate of air was varied at  $Q_a = 0.1, 0.2$  and  $0.3$  l/min. In the experiment, the variation of dissolved oxygen with time was measured, and the oxygen transfer coefficient was calculated. In addition, the generated fine bubbles were captured with digital camera for size measurement. The result shows that the flow rate of water for case of  $Q_w = 45$  l/min and  $Q_a = 0.3$  l/min give the highest of oxygen transfer coefficient for case of cylindrical nozzle due to having smallest bubble size when compare to the other cases.

**Keywords:** Aeration, Fine air bubble, Nozzle, Oxygen transfer coefficient

## TSF-19

### 1. บทนำ

น้ำเสียจากโรงงานส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยของแข็งในรูปของสารอินทรีย์ เช่น ดิน ทราย กรวด เศษไม้ และสารอินทรีย์ เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมันอยู่ในปริมาณมาก ซึ่งเหมาะแก่การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่เป็นสารอาหารของแบคทีเรีย ยีสต์ รา เป็นต้น การวัดความสกปรกของน้ำเสียส่วนใหญ่จะวัดจากความต้องการออกซิเจนในเทอมของ BOD (Biochemical Oxygen Demand) ดังนั้นน้ำทิ้งที่มีค่า BOD ค่อนข้างสูงหมายถึงมีความสกปรกและมีปริมาณสารอินทรีย์ที่สูง ดังนั้นแต่ละโรงงานจึงนิยมใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพเนื่องจากประหยัดค่าใช้จ่ายเมื่อเทียบกับกระบวนการบำบัดแบบอื่น ๆ เพราะมีการกำจัดหรือลดสารอินทรีย์ได้มากที่สุด ระบบชีวภาพที่ใช้กันทั่วไป เช่น ระบบตะกอนเร่ง ระบบเติมอากาศ ระบบไร้อากาศ ระบบบ่อธรรมชาติ เป็นต้น

ในระบบบำบัดระบบตะกอนเร่งจะใช้เครื่องเติมอากาศ (Aerator) ในการเติมอากาศ เพื่อเพิ่มออกซิเจนในน้ำให้เพียงพอสำหรับจุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้เร็วขึ้นกว่าการปล่อยให้ย่อยสลายตามธรรมชาติ ทำให้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อเติมอากาศสามารถบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถลดปริมาณความสกปรกของน้ำเสียในรูปของ BOD ได้ 80-95% โดยอาศัยหลักการทำงานของจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน (Aerobic) โดยเครื่องเติมอากาศนอกจากจะทำหน้าที่เพิ่มออกซิเจนในน้ำแล้วยังทำให้เกิดการกวนผสมของน้ำในบ่อด้วย ทำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างทั่วถึงภายในบ่อ

แต่ปัญหาสำคัญของการบำบัดน้ำเสียโดยการเติมอากาศคือ มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงเนื่องจากต้องใช้ไฟฟ้าขับเคลื่อนมอเตอร์ของเครื่องเติมอากาศในการบำบัดน้ำเสีย และเครื่องเติมอากาศมักจะเสียบ่อย ต้องหยุดเดินเครื่องเพื่อซ่อมบำรุง ในกรณีที่สามารถปรับปรุงและพัฒนาระบบเติมอากาศที่มีประสิทธิภาพในการเติมออกซิเจนที่สูงขึ้นกว่าเครื่องเติมอากาศแบบเดิม จะสามารถช่วยประหยัดต้นทุนการใช้พลังงานไฟฟ้า และสามารถช่วยลดขนาดของบ่อบำบัดได้

Terasaka และคณะ [1] ได้ศึกษาเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและประสิทธิภาพของการเติมออกซิเจนในน้ำโดยใช้ตัวกำเนิดฟองอากาศแบบต่างๆ ได้แก่ แบบใช้การไหลวนของของเหลว แบบท่อเวินทูลี่

แบบอ็ีเจ็คเตอร์ แบบอัดแก๊สด้วยความดันสูง และแบบแผ่นเจาะรู จากผลการศึกษาพบว่า ที่เงื่อนไขอัตราการไหลของแก๊สเดียวกัน ตัวกำเนิดฟองระดับไมครอนให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนสูงกว่าแบบแผ่นเจาะรูธรรมดา โดยเฉพาะอย่างยิ่งแบบใช้การไหลวนของของเหลวจะให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่ค่อนข้างสูง แต่ก็พบว่ามีการใช้พลังงานที่ค่อนข้างสูงกว่าแบบแผ่นเจาะรู

Sadatomิ และคณะ [2] ได้ศึกษาสมรรถนะของตัวกำเนิดฟองอากาศระดับไมครอนที่ได้ออกแบบใหม่ น้ำที่ต้องการเติมอากาศจะถูกส่งผ่านก่อนทรงกลมที่ติดตั้งตรงกลางของท่อส่งน้ำ เมื่อน้ำไหลผ่านระหว่างผิวท่อกับก้อนทรงกลมนี้แล้ว จะเกิดการเปลี่ยนแปลงความดันขึ้นกะทันหัน เช่นเดียวกับการไหลผ่านคอคอดในท่อเวินทูลี่

Kawahara และคณะ [3] ได้ศึกษาลักษณะการถ่ายโอนออกซิเจนในน้ำของตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กที่ออกแบบโดย Sadatomิ และคณะ [2] โดยทดลองเติมฟองอากาศขนาดเล็กลงในน้ำประปาและน้ำเค็มที่มีความเข้มข้นของเกลือที่ 1 และ 3 % ของน้ำหนักน้ำ จากการทดลองพบว่า พฤติกรรมการถ่ายโอนออกซิเจนในน้ำแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน การถ่ายโอนออกซิเจนของน้ำประปามีความเร็วกว่าน้ำเค็มที่สัดส่วนช่องว่าง (Void fraction) เท่ากัน ในขณะที่การถ่ายโอนออกซิเจนในน้ำเค็มที่มีความเข้มข้นของเกลือที่ 3 % ของน้ำหนักน้ำมีค่าต่ำสุด

นอกจากนี้ Sadatomิ และคณะ [4] ยังได้พัฒนาตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กที่มีการติดตั้งอริฟิสในท่อการไหลของน้ำเพื่อเร่งความเร็วของน้ำให้ไหลเหนือฟองอากาศ โดยที่รูทางเข้าของฟองอากาศได้มีการติดตั้งวัสดุที่เป็นรูพรุน จากการทดลองพบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของอริฟิสและอัตราส่วนความหนาแน่นของวัสดุรูพรุนมีผลต่อการถ่ายโอนออกซิเจนในน้ำ อย่างไรก็ตามแนวโน้มความเร็วในการถ่ายโอนออกซิเจนของตัวกำเนิดฟองอากาศแบบใหม่นี้ถือว่ายังช้ากว่ากรณีแบบแรกที่มีการติดตั้งวัตถุทรงกลมในท่อการไหลของ Sadatomิ และคณะ [2]

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการเติมอากาศโดยใช้วิธีสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก เนื่องจากคุณสมบัติของฟองอากาศขนาดเล็กมีมีแรงลอยตัวน้อยกว่าเมื่อเทียบกับฟองอากาศขนาดใหญ่ ทำให้สามารถลอยอยู่ในน้ำได้นาน

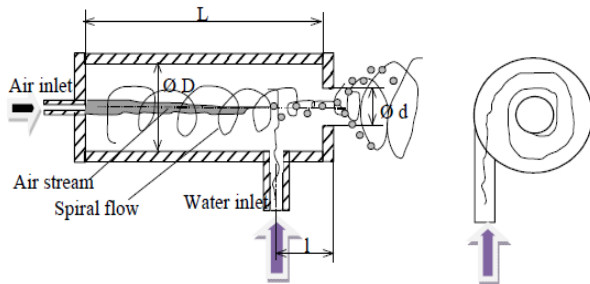
## TSF-19

กว่า ส่งผลทำให้ออกซิเจนละลายในน้ำได้ดีขึ้น ในงานวิจัย จะทำการศึกษาดังกล่าวนี้เพื่อหาประสิทธิภาพของเครื่องกลเติมอากาศขนาดเล็กสามแบบ คือ แบบทรงกระบอก แบบทรงกรวยและแบบทรงสี่เหลี่ยม แล้วทำการเปรียบเทียบกับตัวกำเนิดฟองแบบทั่วไปที่ใช้ในตู้ปลา

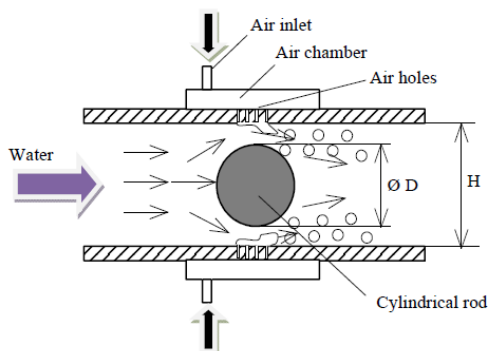
### 2. รายละเอียดการทดลอง

#### 2.1 โมเดลตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก

รูปที่ 1 แสดงตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กแบบใช้วิธีสร้างการไหลหมุนวนของน้ำที่มีความเร็วสูงตัดย่อยฟองอากาศ จากรูปน้ำจะถูกฉีดเข้าสู่ท่อทรงกระบอกในแนวสัมผัสเพื่อสร้างการไหลแบบหมุนวนในท่อ ในขณะที่อากาศจะไหลเข้าสู่ด้านท้ายของท่อทรงกระบอกและถูกการไหลหมุนวนของน้ำตัดย่อยฟองอากาศจนเป็นฟองละเอียดขนาดเล็ก ก่อนที่จะไหลออกทางปากทางออกของท่อทรงกระบอกซึ่งอยู่อีกด้านหนึ่ง ซึ่งเป็นรูปแบบเดียวกับของ Ohanari และคณะ [5]



รูปที่ 1 ตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กแบบใช้วิธีสร้างการไหลหมุนวนที่มีความเร็วสูงตัดย่อยฟองอากาศ



รูปที่ 2 ตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กแบบใช้วิธีสร้างการไหลความเร็วสูงตัดย่อยฟองอากาศ

รูปที่ 2 แสดงตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กแบบใช้วิธีสร้างการไหลของน้ำที่มีความเร็วสูงตัดย่อยฟองอากาศ วิธีนี้ใช้หลักการเดียวกับท่อแบบเวนทูรีที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดการไหล เพื่อเร่งความเร็วของน้ำ แล้วลดความเร็วของน้ำเพื่อเพิ่มความดันของไหล แต่ตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กที่ออกแบบนี้จะมีโครงสร้างที่ง่ายกว่า คือในช่องการไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความสูงของช่องเท่ากับ H ตรงกลางของท่อจะติดตั้งแท่งทรงกระบอกตันที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D มีความยาวเท่ากับความกว้างของช่องขวางการไหล เพื่อให้เกิดการไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดเช่นเดียวกับท่อแบบเวนทูรี และจากรูปตรงตำแหน่งใกล้เคียงกับบริเวณที่มีความเร็วของน้ำสูงที่สุด จะเจาะแถวของรูส่งอากาศเพื่อให้อากาศที่อยู่ในถังอากาศด้านบนและด้านล่างของช่องไหลผ่าน แล้วให้น้ำที่มีความเร็วสูงไหลตัดย่อยฟองอากาศ

#### 2.2. รายละเอียดของชุดทดลอง

รูปที่ 3 แสดงแผนภาพชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนในน้ำของตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กที่ได้สร้างขึ้น จากรูปแท่งน้ำมีรูปทรงสี่เหลี่ยมทำจากกระจกใสที่มีความหนา 10 mm กว้าง 74 cm ยาว 92 cm และสูง 76 cm ในแต่ละการทดลองจะเติมน้ำจนสูง 47.5 cm ซึ่งคิดเป็นปริมาตรน้ำประมาณ 320 ลิตร ในชุดทดลองมีปั้มน้ำสำหรับดูดน้ำในแท่งกึ่งไปยังตัวกำเนิดฟองอากาศ โดยน้ำที่ออกจากปั้มน้ำจะไหลผ่านวาล์ว และโรตารีเมตรสำหรับวัดอัตราการไหลของน้ำในช่วง 10-100 LPM ก่อนไหลเข้าตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก สำหรับอากาศจะถูกส่งออกจากปั้มน้ำอากาศขนาดเล็ก 2 แรงม้า ผ่านถังกักเก็บ วาล์วปรับความดัน วาล์วปรับอัตราการไหล โรตารีเมตรสำหรับวัดอัตราการไหลที่ต่อแบบขนาน ซึ่งสามารถใช้วัดอัตราการไหลของอากาศในช่วง 0-100 CCM และ 100-1000 CCM ก่อนไหลเข้าตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก และฟองอากาศขนาดเล็กจะไหลผสมกับน้ำแล้วพ่นออกจากตัวกำเนิดฟองขนาดเล็ก

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาดังกล่าวนี้เพื่อหาประสิทธิภาพของเครื่องกลเติมอากาศ 3 รูปแบบ ดังนี้

1. แบบสร้างกระแสหมุนวนในท่อทรงกระบอก ตัวกำเนิดฟองอากาศนี้มีท่อหลักเป็นทรงกระบอก ทำจากท่อพีวีซี มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 43 mm ยาว 138 mm

## TSF-19

โดยท่อทางเข้าน้ำเป็นท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 21 mm ประกอบในแนวสัมผัสกับท่อหลัก ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 4 (ก) สำหรับทางเข้าอากาศได้เจาะรูขนาดเล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 mm ที่ตำแหน่งศูนย์กลางบนฝาปิดท้ายของท่อหลัก โดยทางออกของฟองอากาศขนาดเล็กมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm อยู่กลางฝาปิดทางด้านหน้าของท่อหลัก

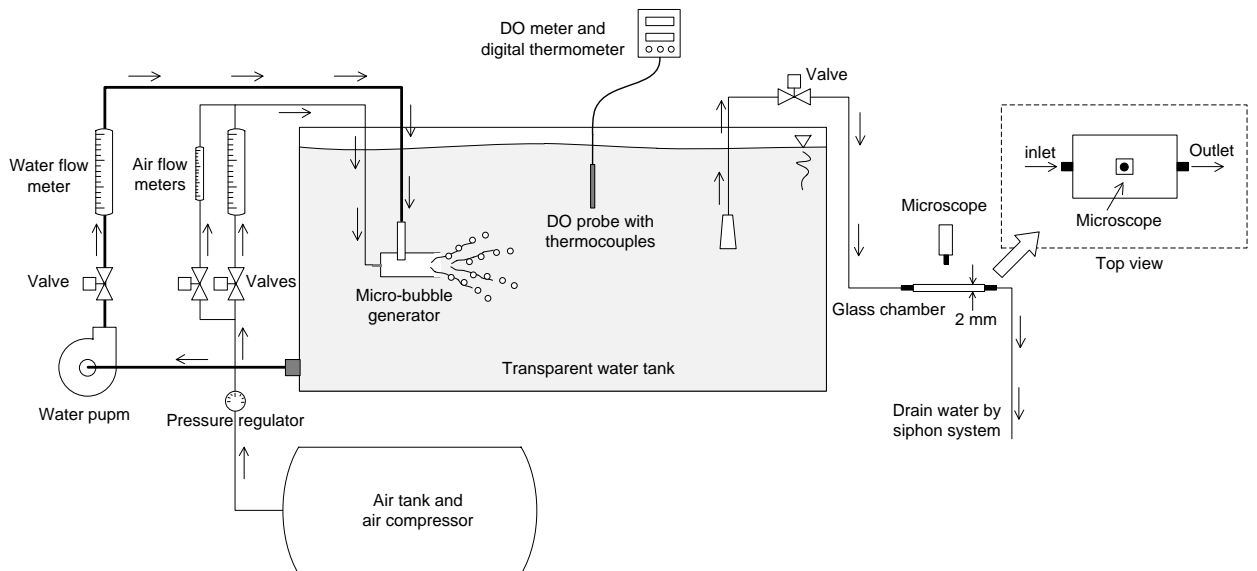
2. แบบสร้างกระแสนวนในท่อทรงกรวย เป็นแบบท่อหลักมีลักษณะเป็นทรงกรวย ขึ้นรูปด้วยวัสดุไฟเบอร์กลาสโดยพื้นที่หน้าตัดท่อด้านทางออกของฟองอากาศมีขนาดใหญ่กว่าด้านท้ายที่มีรูป้อนอากาศตามที่ได้แสดงในรูปที่ 4 (ข) สำหรับการประกอบของท่อน้ำเข้ากับท่อหลักและตำแหน่งของรูอากาศเข้ามีลักษณะเหมือนกับแบบของท่อทรงกระบอกคือ น้ำไหลเข้าท่อหลักในแนวสัมผัสและอากาศเข้าทางด้านท้ายของท่อหลัก

3. แบบติดตั้งแท่งทรงกระบอกขวางการไหลในท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยม สำหรับตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กนี้จะแตกต่างจากสองแบบแรก คือ จะติดตั้งแท่งทรงกระบอกทำจากแท่งทองเหลือง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 mm วางขวางการไหลของน้ำในช่องน้ำที่มี

หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง 150 mm สูง 11 mm เพื่อที่จะเพิ่มความเร็วของน้ำสำหรับตัดย่อยฟองอากาศสำหรับทางเข้าอากาศได้ทำการเจาะรูแถวของรูปนผนังของช่องการไหลด้านบนและด้านล่างของผนังท่อที่ตรงกับตำแหน่งแท่งทรงกระบอก ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 4 (ค)

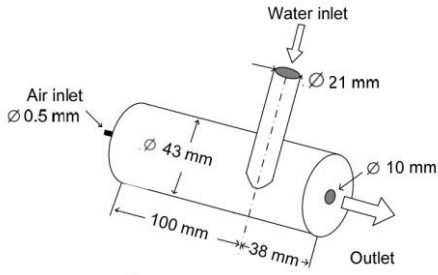
นอกจากนี้ได้ทำการทดลองกรณีใช้ตัวกำเนิดฟองแบบแผ่นวัสดุพรุณ เพื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองของตัวกำเนิดฟองทั้งสามแบบ ในการทดลองได้ติดตั้งอุปกรณ์ตามที่แสดงในรูปที่ 5 โดยอากาศไหลเข้าสู่ตัวกำเนิดฟองอากาศโดยตรงและพ่นออกจากแผ่นวัสดุพรุณโดยตรง แผ่นนี้มีความหนา เท่ากับ 2 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 12 เซนติเมตร และในการทดลองได้ให้น้ำในถังไหลเวียนที่อัตราการไหลเงื่อนไขเดียวกับที่ใช้ในการทดลองกรณีของตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กทั้งสามแบบ

ในการทดลองจะทำการกำหนดให้อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำอยู่ในที่  $Q_w = 25, 35$  และ  $45$  ลิตร/นาที อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ  $Q_a = 0.1, 0.2$  และ  $0.3$  ลิตร/นาที

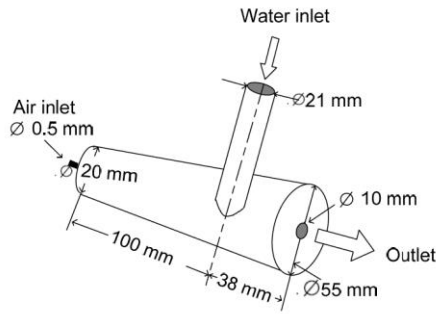


รูปที่ 3 แผนภาพชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทออกซิเจนในน้ำของตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก

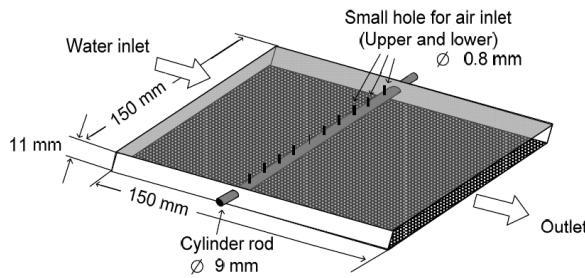
## TSF-19



(ก) แบบสร้างกระแสนวนในท่อทรงกระบอก



(ข) แบบสร้างกระแสนวนในท่อทรงกรวย



(ค) แบบติดตั้งแท่งทรงกระบอกขวางการไหลในท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยม

รูปที่ 4 รูปแบบตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก



รูปที่ 5 ตัวกำเนิดฟองอากาศแบบแผ่นวัสดุพรุนที่ใช้ในการทดลอง

### 2.3 การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำ

ในการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำหาได้จากสมการ

$$K_L a = 2.303 \left( \frac{\log(C_t - C_s)_1 - \log(C_t - C_s)_2}{T_2 - T_1} \right) \quad (1)$$

โดยที่  $C_t$  คือ ออกซิเจนที่ละลายในน้ำที่เวลาต่างๆ (mg/l)  
 $T_2 - T_1$  คือ ผลต่างของระยะเวลาที่เลือกค่า  $C_t$  ที่ตำแหน่ง 1 และ 2 (min) สำหรับ  $C_s$  คือออกซิเจนที่ละลายในน้ำอิ่มตัวหาได้จากสมการ

$$C_{s(T)} = 14.652 + 10.53(e^{-0.0389T} - 1) \quad (2)$$

โดยที่  $T$  คืออุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำตลอดช่วงที่ใช้ในการทดลอง ( $^{\circ}\text{C}$ ) จากสมการที่ (1) ค่า  $K_L a$  ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในการทดลอง ดังนั้นในการเปรียบเทียบค่า  $K_L a$  ของแต่ละตัวแปรทั้งหมด จะทำการเทียบที่อุณหภูมิเดียวกัน ( $20^{\circ}\text{C}$ ) โดยใช้สมการ

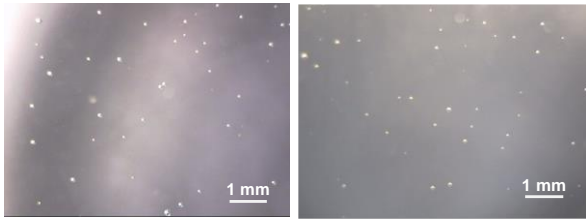
$$K_L a_{(20^{\circ}\text{C})} = \frac{K_L a}{1.024^{(T-20)}} \quad (3)$$

### 2.4 การวัดขนาดฟองอากาศ

ในการทดลองนี้ทำการวัดขนาดฟองอากาศที่ออกจากตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก เพื่อนำมาเปรียบเทียบขนาดฟองในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง รูปที่ 3 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้วัดขนาดฟองอากาศ น้ำในถังที่กำลังเติมฟองอากาศจะถูกดูดไหลผ่านวาล์วและไหลเข้าห้องกักที่ทำจากกระจกมีรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง 120 mm ยาว 160 mm และสูง 2 mm โดยด้านบนของห้องกักได้ติดตั้งกล้องจุลทรรศน์เพื่อถ่ายรูปฟองอากาศสำหรับน้ำที่ไหลออกจากห้องกักจะทำการปล่อยทิ้ง ในขั้นตอนการเก็บตัวอย่างจะดูดน้ำที่กำลังเติมฟองอากาศให้ไหลผ่านอุปกรณ์โดยใช้วิธีกาลักน้ำ หลังจากที่น้ำและฟองอากาศไหลผ่านอุปกรณ์อย่างต่อเนื่องก็จะปิดวาล์วแล้วทำการถ่ายรูปตัวอย่างฟองอากาศที่ติดค้างอยู่ในห้องกักโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัล และหาขนาดของฟองอากาศโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพ (Image processing method) ในแต่ละรูปจะมีจำนวนฟองอากาศประมาณ 10-30 ฟอง ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 6 ในแต่ละตัวแปรจะใช้รูปถ่ายฟองอากาศประมาณ 5-7 ภาพ เพื่อนำไปหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางฟองอากาศเฉลี่ย



## TSF-19



(ก) แบบทรงกระบอก (ข) แบบทรงกรวย

รูปที่ 6 แสดงตัวอย่างฟองอากาศที่ได้จากการถ่ายรูปด้วยกล้องจุลทรรศน์ ( $Q_w = 45$  ลิตร/นาที และ  $Q_a = 0.2$  ลิตร/นาที)

### 3. ผลการศึกษา

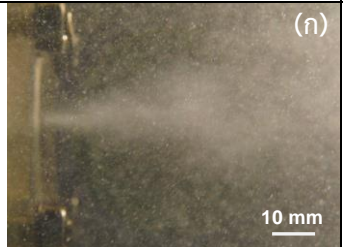
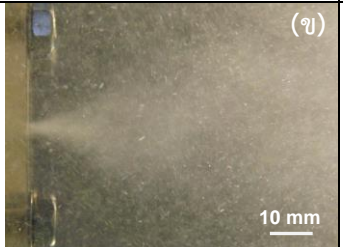
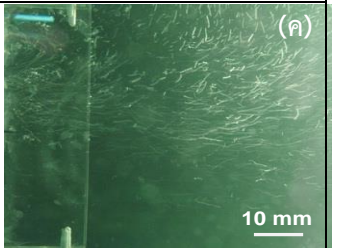

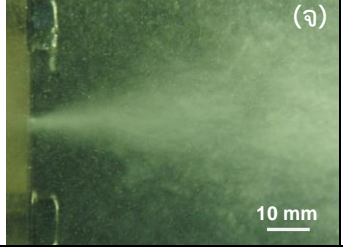
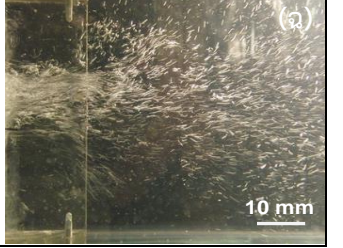
#### 3.1 ลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำผสมฟองอากาศ

รูปที่ 7 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำผสมฟองอากาศที่ได้จากการถ่ายรูปด้วยกล้องดิจิทัลที่บริเวณใกล้ปากทางออกของตัวกำเนิดฟองเงื่อนไขอัตราการไหลน้ำ  $Q_w = 45$  ลิตร/นาที โดยเปรียบเทียบที่อัตราการไหลของอากาศ  $Q_a = 0.1$  ลิตร/นาที และ  $0.2$  ลิตร/นาที โดยภาพรวมแล้วพบว่าปริมาณของฟองอากาศกรณีใช้อัตราการไหลของอากาศ  $Q_a = 0.2$  ลิตร/นาทีมากกว่าที่  $Q_a = 0.1$  ลิตร/นาที

สำหรับตัวกำเนิดฟองแบบทรงกระบอกและแบบทรงกรวยสามารถสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก โดยลักษณะการขยายตัวของลำเจ็ท (การกระจายตัวของฟองอากาศ)

ของตัวกำเนิดฟองแบบทอกรวยมากกว่าแบบทอทรงกระบอก สำหรับกรณีของตัวกำเนิดฟองแบบสอดแท่งทรงกระบอกในท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีตัวกำเนิดฟองแบบทรงกระบอกและทรงกรวยพบว่า ฟองอากาศที่ได้จากตัวกำเนิดฟองนี้มีขนาดใหญ่กว่าแบบสองกรณีแรกอย่างเห็นได้ชัด คือสามารถเห็นการไหลของฟองอากาศเป็นจุดซึ่งแตกต่างจากสองกรณีของท่อทรงกระบอกและท่อทรงกรวยที่เห็นการไหลของฟองอากาศเป็นจุดเล็กๆ

สำหรับตัวกำเนิดฟองแบบทรงกระบอกและแบบทรงกรวยสามารถสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก โดยลักษณะการขยายตัวของลำเจ็ท (การกระจายตัวของฟองอากาศ) ของตัวกำเนิดฟองแบบทอกรวยมากกว่าแบบทอทรงกระบอก สำหรับกรณีของตัวกำเนิดฟองแบบสอดแท่งทรงกระบอกในท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีตัวกำเนิดฟองแบบทรงกระบอกและทรงกรวยพบว่า ฟองอากาศที่ได้จากตัวกำเนิดฟองนี้มีขนาดใหญ่กว่าแบบสองกรณีแรกอย่างเห็นได้ชัด คือสามารถเห็นการไหลของฟองอากาศเป็นจุดซึ่งแตกต่างจากสองกรณีของท่อทรงกระบอกและท่อทรงกรวยที่เห็นการไหลของฟองอากาศเป็นจุดเล็กๆ

	Cylindrical	Conical	Rectangular
$Q_a = 0.1$ ลิตร/นาที	 (ก) 10 mm	 (ข) 10 mm	 (ค) 10 mm
$Q_a = 0.2$ ลิตร/นาที	 (ง) 10 mm	 (จ) 10 mm	 (ฉ) 10 mm

รูปที่ 7 ลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำผสมฟองอากาศที่เงื่อนไขอัตราการไหลน้ำ  $Q_w = 45$  ลิตร/นาที

## TSF-19

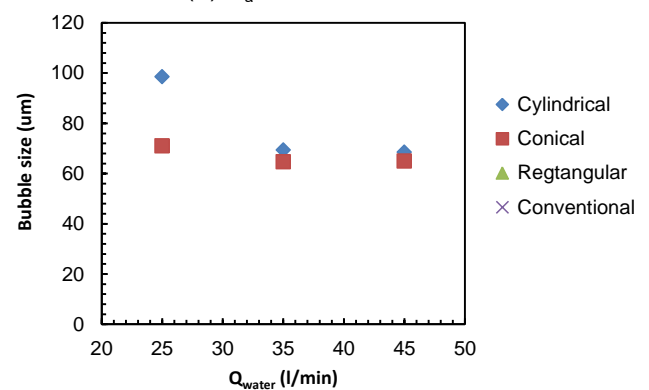
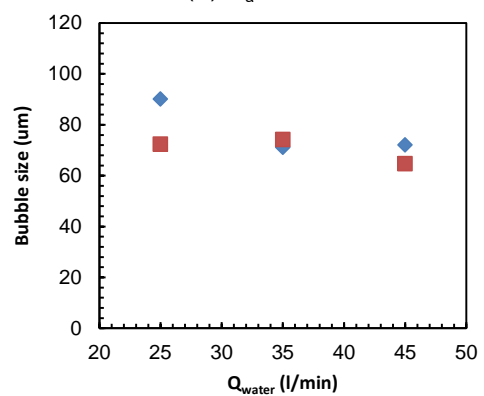
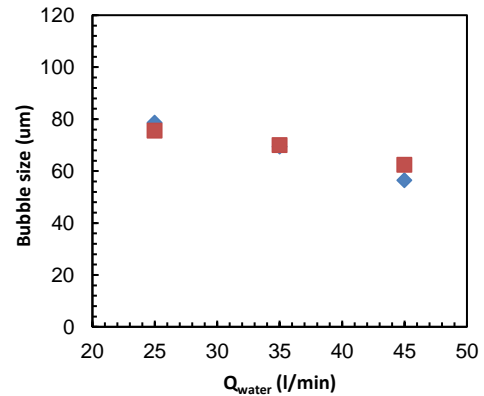
### 3.2 การเปรียบเทียบขนาดของฟองอากาศและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน

รูปที่ 8 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของฟองอากาศที่ได้จากการวัดขนาดฟองอากาศขนาดเล็กตามที่ได้แสดงตัวอย่างในรูปที่ 6 จากรูปพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของฟองอากาศอยู่ในช่วง 60-100  $\mu\text{m}$  โดยเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของฟองอากาศมีขนาดลดลง เมื่ออัตราการไหลของน้ำมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาลักษณะการไหลของน้ำภายในตัวกำเนิดฟองอากาศ ที่แสดงการหมุนวนของน้ำภายในตัวกำเนิดฟองอากาศมีความเร็วสูงขึ้นและมีความชันของความเร็ว (ความเค้นเฉือน) ตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำ สำหรับกรณีตัวกำเนิดฟองแบบท่อทรงกระบอกที่เงื่อนไขอัตราการไหล  $Q_a=0.3$  ลิตร/นาที และ  $Q_w=25$  ลิตร/นาที มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของฟองอากาศใหญ่ที่สุด และที่เงื่อนไขอัตราการไหล  $Q_a=0.1$  ลิตร/นาที และ  $Q_w=45$  ลิตร/นาที มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของฟองอากาศเล็กที่สุด เมื่อเทียบกับเงื่อนไขอื่น ๆ และจากผลการทดลอง พบว่า ที่เงื่อนไขอัตราการไหลของน้ำ  $Q_w=35$  และ  $45$  ลิตร/นาที หรือที่อัตราการไหลของอากาศ  $Q_a=0.1$  ลิตร/นาที ตัวกำเนิดฟองแบบท่อทรงกระบอกและท่อทรงกรวยให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของฟองอากาศที่ไม่แตกต่างกันมากนัก

รูปที่ 9 แสดงสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ( $K_{La}$ ) โดยคำนวณเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่ละลายในน้ำที่อุณหภูมิ  $20^\circ\text{C}$  โดยทั่วไปแล้วสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและความสามารถในการเติมออกซิเจนมีค่าสูง แสดงถึงสภาวะการเติมออกซิเจนในน้ำดีกวาระบบที่สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและความสามารถในการเติมออกซิเจนมีค่าต่ำ โดยเทียบในช่วงระยะเวลาที่เท่ากัน

จากรูปพบว่าเมื่ออัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้น แนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนสูงขึ้น ยกเว้นที่เงื่อนไขอัตราการไหลของอากาศและน้ำ  $Q_a=0.2$  ลิตร/นาที  $Q_w=45$  ลิตร/นาที (รูปที่ 9 (ข)) อัตราการไหลของน้ำที่เพิ่มจาก 35 ลิตร/นาที เป็น 45 ลิตร/นาที ไม่ได้ช่วยทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและความสามารถในการเติมออกซิเจนสูงขึ้น ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลของเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย

ของฟองอากาศ สำหรับเงื่อนไขที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและความสามารถในการเติมออกซิเจนสูงสุดคือ ตัวกำเนิดฟองแบบท่อทรงกระบอก  $Q_a=0.3$  ลิตร/นาที  $Q_w=45$  ลิตร/นาที เนื่องจากที่เงื่อนไขนี้ฟองอากาศมีขนาดเล็กและมีปริมาณมาก

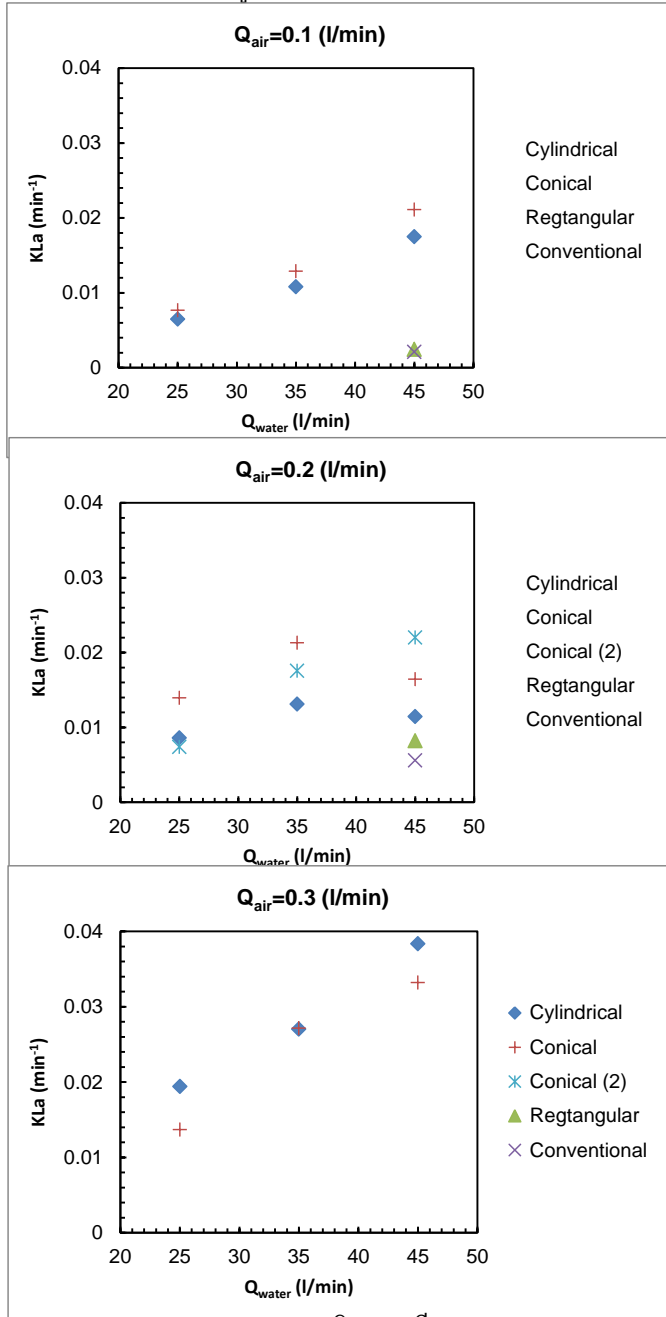


รูปที่ 8 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของฟองอากาศ

ในรูปที่ 9 (ก) แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนกรณีของตัวกำเนิดฟองอากาศแบบสอดแท่งทรงกระบอกในท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมและแบบแผ่นวัสดุ

## TSF-19

พุนที่เงื่อนไขอัตราการไหล  $Q_a=0.1$  ลิตร/นาที,  $Q_w=45$  ลิตร/นาที ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของทั้งสองกรณีมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับกรณีตัวกำเนิดฟองแบบท่อทรงกระบอกและท่อทรงกรวย เนื่องจากตัวกำเนิดฟองทั้งสองแบบไม่สามารถสร้างฟองอากาศขนาดเล็กตามที่ได้แสดงในรูปที่ 7



(ค)  $Q_a=0.3$  ลิตร/นาที

รูปที่ 9 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ( $K_{La}$ ) ของตัวกำเนิดฟองอากาศ

ในกรณีที่เพิ่มอัตราการไหลของอากาศให้มากขึ้นเป็น  $Q_a=0.2$  ลิตร/นาที ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 9 (ข)) พบว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของทั้งสองกรณียังคงมีค่าต่ำกว่าตัวกำเนิดแบบท่อทรงกระบอกและท่อทรงกรวย โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนกรณีของตัวกำเนิดฟองแบบสอดแท่งทรงกระบอกในท่อน้ำตัดสี่เหลี่ยมมีค่าสูงกว่าแบบแผ่นวัสดุพุนเล็กน้อย นอกจากนี้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในกรณีของตัวกำเนิดแบบท่อทรงกระบอกและท่อทรงกรวยจะมีค่าลดลงเล็กน้อย เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำ  $Q_w$  จาก 35 ลิตร/นาที เป็น 45 ลิตรต่อนาที จากการทดลองซ้ำในกรณีตัวกำเนิดแบบกรวยพบว่าค่าเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกับกรณีอัตราการไหลของน้ำ  $Q_w=35$  ลิตรต่อนาที อาจเกิดจากผลของขนาดฟองอากาศมีขนาดเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังแสดงในรูปที่ 8(ข)

อย่างไรก็ตามในกรณีที่เปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของตัวกำเนิดฟองอากาศแบบแผ่นวัสดุพุนที่อัตราการไหลของอากาศ  $Q_a=0.1$  และ  $0.2$  ลิตร/นาที (รูป 9 (ก) และ 9 (ข)) ที่เงื่อนไขอัตราการไหลของน้ำ  $Q_w=45$  ลิตร/นาที พบว่าที่เงื่อนไขอัตราการไหลของอากาศ  $Q_a=0.2$  ลิตร/นาที ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนสูงกว่าที่เงื่อนไข  $Q_a=0.1$  ลิตร/นาที ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มปริมาณอากาศ ซึ่งไม่เกี่ยวกับการสร้างฟองอากาศให้มีขนาดเล็ก

## 4. สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษา สรุปได้ดังนี้

1. ตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กแบบท่อทรงกระบอกและแบบท่อทรงกรวยสามารถสร้างฟองอากาศขนาดเล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยในช่วง  $60-100 \mu m$  ในขณะที่ตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กแบบสอดแท่งทรงกระบอกในท่อน้ำตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าไม่สามารถสร้างฟองที่มีขนาดเล็กได้ ฟองที่เกิดขึ้นลอยสู่ผิวน้ำในทันทีเช่นเดียวกับฟองจากแผ่นวัสดุพุน โดยการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำหรืออัตราการไหลของอากาศมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนเพิ่มขึ้น

2. สำหรับเงื่อนไขที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและความสามารถในการเติมออกซิเจนสูงสุดคือ กรณีของตัวกำเนิดฟองแบบท่อทรงกระบอกที่เงื่อนไข



## TSF-19

$Q_a=0.3$  ลิตร/นาที และ  $Q_w=45$  ลิตร/นาที ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนประมาณ  $0.038 \text{ min}^{-1}$  เนื่องจากที่เงื่อนไขนี้ฟองอากาศมีขนาดเล็กและมีปริมาณของอากาศมาก ในขณะที่ตัวกำเนิดฟองแบบสอดแห่งทรงกระบอกในท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าและแบบแผ่นวัสดุพอร์นที่เงื่อนไขเดียวกัน มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนประมาณ  $0.008 \text{ min}^{-1}$  เท่านั้น

### 5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่สนับสนุนทุนอุดหนุนในงานวิจัยครั้งนี้

### 6. 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] 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
- [3] 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
- [4] 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.
- [5] 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