



บทความวิจัย

บทความจากงานประชุมวิชาการทางวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26 (TlChE2016)

## เครื่องเติมอากาศชนิดเทอร์ไบน์ความเร็วรอบสูงที่ป้อนอากาศเข้าที่เพลากลวง

อนุรักษ์ ปิติรักษ์สกุล\* จิตรา นามโคตร ทิพาวรรณ ภัทตร์จันทร์ และ กิตติ คุ้มสัตยา  
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

\*ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2555-2000 ต่อ 8247 อีเมล: anurak.p@eng.kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.01.012  
รับเมื่อ 1 มิถุนายน 2560 ตอรับเมื่อ 30 สิงหาคม 2560 เผยแพร่ออนไลน์ 17 มกราคม 2561

© 2018 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาเครื่องเติมอากาศชนิดเทอร์ไบน์ความเร็วรอบสูงป้อนอากาศเข้าที่เพลากลวง ในขนาดสามมิติ โดยทดสอบในบ่อเติมอากาศทรงสี่เหลี่ยมขนาด 50x50x50 เซนติเมตร น้ำทดสอบปริมาตร 100 ลิตร อัตราการไหลของอากาศ 15 ลิตรต่อนาที โดยมีการปรับค่าความเร็วรอบมอเตอร์ในช่วง 800-1,200 รอบต่อนาที และเปลี่ยนใบกวนที่มีลักษณะการไหลที่แตกต่างกัน 3 แบบ คือ Flat Disc-6-Blade Turbine, 45° Pitched-4-Blade Turbine และ 45° Flat Disc-6-Blade Turbine ผลจากการทดลองพบว่าที่สภาวะการทำงานใบกวนชนิด 45° Flat Disc-6-Blade Turbine ที่ความเร็วรอบใบกวน 800 รอบต่อนาที ให้ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศที่สภาวะมาตรฐาน (SAE<sub>p</sub>) เท่ากับ 1.334 kgO<sub>2</sub>/kWh ซึ่งมีค่าสูงที่สุดสำหรับการศึกษาในครั้งนี้

**คำสำคัญ:** การเติมอากาศ, เครื่องเติมอากาศแบบเทอร์ไบน์, ประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน (SAE), ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม (K<sub>La</sub>)

การอ้างอิงบทความ: อนุรักษ์ ปิติรักษ์สกุล จิตรา นามโคตร ทิพาวรรณ ภัทตร์จันทร์ และ กิตติ คุ้มสัตยา, “เครื่องเติมอากาศชนิดเทอร์ไบน์ความเร็วรอบสูงที่ป้อนอากาศเข้าที่เพลากลวง,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 28, ฉบับที่ 1, หน้า 103-111, ม.ค.-มี.ค. 2561.

## High Speed Turbine Aerators with Air Feeding into Hollowed Shaft

Anurak Petiraksakul\*, Jittra Namkod, Thipawan Papakchan and Kitti Thumasattaya

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

\*Corresponding Author, Tel. 0-2555-2000 Ext. 8247, E-mail: anurak.p@eng.kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.01.012

Received 1 June 2017; Accepted 30 August 2017; Published online: 17 January 2018

© 2018 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### Abstract

This research aims to study and fabricate a high speed submerged turbine aerator in pilot scale. All aeration experiments were conducted in a glass square tank with dimension of 50×50×50 cm, tested water volume of 100 l, air flowrate of 15 l/min. Three types of turbine, namely, Flat Disc-6-Blade Turbine, 45° Pitch-4-Blade Turbine and 45° Flat Disc-6-Blade Turbine were studied with various rotor speeds in the range of 800 to 1200 rpm. Results showed that the 45° Flat Disc-6-Blade Turbine gave the maximum Standard Aeration Efficiency (SAE<sub>D</sub>) of 1.334 kgO<sub>2</sub>/kW-h at 800 rpm of the rotor speed.

**Keywords:** Aeration, Turbine Aerator, Standard Aeration Efficiency (SAE), Overall Mass Transfer Coefficient (K<sub>L</sub>a)

Please cite this article as: A. Petiraksakul, J. Namkod, T. Papakchan, and K. Thumasattaya, "High speed turbine aerators with air feeding into hollowed shaft," *The Journal of KMUTNB*, vol. 28, no. 1, pp. 103-111, Jan.-Mar. 2018 (in Thai).

## 1. บทนำ

น้ำเป็นทรัพยากรสำคัญของการดำรงชีวิต สภาวะการขาดแคลนน้ำจืดทั่วโลกมีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมเสื่อมโทรม และสภาพอากาศที่แปรปรวน ซึ่งคุณภาพน้ำที่ต้นออกจากไม่มีโลหะหนักเจือปนแล้วค่าออกซิเจนละลายต้องมีค่าสูง เครื่องเติมอากาศเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเพิ่มออกซิเจนลงในน้ำ เครื่องเติมอากาศจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างมากในการบำบัดน้ำเสียและการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ประเทศไทยเป็นประเทศที่ประชากรส่วนใหญ่ทำเกษตรกรรม จึงหลีกเลี่ยงไม่พ้นที่ต้องเผชิญกับสภาวะขาดแคลนน้ำคุณภาพดี การทำฟาร์มเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นอาชีพที่สร้างรายได้ให้กับเกษตรกร โดยอาจเป็นได้ทั้งอาชีพเสริมหรืออาชีพหลัก โดยเฉพาะการเลี้ยงปลาซึ่งเป็นแหล่งโปรตีนคุณภาพสูง ได้มีการเลี้ยงกันอย่างแพร่หลายทั้งในระบบเปิดและระบบปิด การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบเปิดแบบดั้งเดิมมักพบปัญหาที่น้ำเสียจากบ่อเลี้ยงไม่ได้รับการบำบัดก่อนระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ ในขณะที่มีความต้องการน้ำใหม่ที่มีคุณภาพดีเพื่อเติมเข้าในบ่อเลี้ยง กระบวนการนี้อาจเกิดขึ้นได้ถ้าสภาวะแวดล้อมสามารถปรับตัวได้ทันการระบายน้ำเสียในลักษณะนี้อาจก่อให้เกิดการแพร่ระบาดของโรคทางน้ำขึ้นได้ และยังเพิ่มโอกาสให้มีการแพร่ระบาดของสุนัขอีกทางหนึ่ง ในหลายๆ ประเทศจึงได้ปรับกฎระเบียบด้านความปลอดภัยอาหาร [1], [2] ให้มีความเข้มงวดมากขึ้น อย่างไรก็ตามทางเลือกของเกษตรกรสามารถนำเทคโนโลยีของการเลี้ยงปลาในระบบปิดมาใช้ ระบบนี้บางครั้งเรียกว่าการเลี้ยงสัตว์น้ำระบบป้อนเวียนกลับ (Recirculation Aquaculture Systems; RAS) [3], [4] ซึ่งเป็นระบบที่มีการป้อนน้ำบางส่วนเข้าสู่การบำบัดและวนกลับเข้าสู่บ่อเลี้ยง ระบบนี้มีข้อดี คือ ใช้น้ำทดแทนในปริมาณน้อย (เกิดขึ้นจากการระเหยของน้ำ หรืออาจต้องมีการ Blow Down บางส่วน) และยังเป็นกรควบคุมโรคทางน้ำได้ดี Martins *et al.* [1] รายงานในรูปแบบการเลี้ยงต่างๆ ถ้าเป็นระบบน้ำไหลผ่าน เช่น การเลี้ยงปลาในกระชัง ใช้น้ำในการเพาะเลี้ยงมากกว่า  $50 \text{ m}^3/\text{kg}$  feed การเพาะเลี้ยงในบ่อเปิดใช้น้ำ  $1-50 \text{ m}^3/\text{kg}$  feed การเพาะเลี้ยงระบบป้อนเวียนกลับแบบเดิม

(Conventional Recirculation) ใช้น้ำ  $0.1-1 \text{ m}^3/\text{kg}$  feed และการเพาะเลี้ยงระบบป้อนเวียนกลับแบบใหม่ ใช้น้ำต่ำกว่า  $0.1 \text{ m}^3/\text{kg}$  feed และการควบคุมคุณภาพน้ำในบ่อปิดทำได้ดี จะเพิ่มอัตราการรอดชีวิตของสัตว์น้ำ อีกทั้งลดความเครียดของสัตว์น้ำทำให้ได้เนื้อสัตว์ที่มีคุณภาพสูง โดยทั่วไปน้ำในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำควรมีค่า pH ในช่วง 6.5-8.5 บีโอดีไม่เกิน  $20 \text{ mg/l}$  ค่าออกซิเจนละลาย (Dissolved Oxygen; DO) ไม่ต่ำกว่า  $3-4 \text{ mg/l}$  ในโตรเจนในรูปแอมโมเนีย  $\text{NH}_3\text{-N}$  ไม่เกิน  $1.1 \text{ mg/l}$  และค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) ไม่เกิน  $50 \text{ mg/l}$  รวมทั้งอุณหภูมิไม่ควรมีเกิน  $30^\circ\text{C}$  และควรมีปริมาณจุลินทรีย์และปรสิตต่ำ [5] ทั้งนี้ยังขึ้นกับชนิดสัตว์น้ำแต่ละชนิดที่มีความต้องการสภาวะแวดล้อมที่ต่างกัน

ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในประเทศไทยนิยมใช้เครื่องเติมอากาศ 2 รูป แบบ คือแบบใบกังหัน (Paddle Wheels) ในบ่อดิน และแบบอากาศผ่านหัวกระจาย (Air Diffuser) ในบ่อปูนหรือพลาสติก ซึ่งเครื่องอากาศทั้ง 2 แบบมีประสิทธิภาพปานกลางในการเติมอากาศ แต่มีการกวนผสมต่ำ จากปัญหาดังกล่าวจึงได้เกิดแนวคิดในการสร้างเครื่องเติมอากาศ ที่มีหน้าที่ในการเพิ่มปริมาณออกซิเจนลงในแหล่งน้ำและกระจายออกซิเจนในน้ำให้ทั่วถึง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาเครื่องเติมอากาศชนิดเทอร์โบความเร็วรอบสูงเพื่อใช้ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ หลักการทำงานของเครื่องเติมอากาศชนิดเทอร์โบความเร็วรอบสูง คือ การเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลาย โดยการป้อนออกซิเจนจากอากาศภายนอกลงไปแหล่งน้ำ อาศัยการปั่นกวนของใบกวนเป็นตัวช่วยในการกระจายฟองอากาศให้ทั่วถึง ข้อดีของเครื่องเติมอากาศชนิดเทอร์โบใบเต้าน้ำ คือ มีความสามารถในการถ่ายเทออกซิเจนสูงและช่วยในการหมุนเวียนน้ำให้ทั่วถึง ดังนั้นใบกวนจึงเป็นส่วนที่สำคัญในการตีฟองอากาศให้แตกกระจาย จากฟองอากาศขนาดใหญ่ที่ป้อนเข้าไปเป็นฟองอากาศขนาดเล็ก ในช่วงที่มีการพ่นฟองอากาศยังพบว่าจำนวนใบกวนส่งผลโดยตรงต่อพลังงานที่ตีฟองอากาศ

จากสมการแสดงอัตราการถ่ายเทมวลสารตามกฎของฟลิค (Flick's Law) จะได้สมการที่ (1) [6]

$$dC/dt = K_L a_T (C_s - C_t) \quad (1)$$

โดย  $K_L a$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (Overall Oxygen Transfer Coefficient)  $T$  คือ อุณหภูมิน้ำที่ทำการทดลอง ( $^{\circ}\text{C}$ )  $C_s$  คือ ความเข้มข้นที่สภาวะอิ่มตัว  $C_t$  ความเข้มข้นที่เวลาใดๆ และ  $t$  คือ เวลาเมื่อจัดรูปสมการใหม่ จะได้สมการที่ (2)

$$K_L a_T = [\ln(C_s - C_0) - \ln(C_s - C_t)] / t \quad (2)$$

โดย  $C_0$  คือ ค่าความเข้มข้นของออกซิเจน ณ เวลาเริ่มต้น และปรับให้เป็นสภาวะมาตรฐานที่  $20^{\circ}\text{C}$  ตามสมการที่ (3) [6]

$$K_L a_{20} = K_L a_T \theta^{(20-T)} \quad (3)$$

เมื่อ  $\theta$  คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (Temperature Coefficient) ของน้ำบริสุทธิ์ เท่ากับ 1.024

คำนวณหาค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (Standard Oxygen Transfer Rate; SOTR) ตามสมการที่ (4) [7]

$$\text{SOTR} = K_L a_{20} C_{S20} V \quad (4)$$

เมื่อ  $C_{S20}$  คือ ค่าความเข้มข้นออกซิเจนที่อิ่มตัวที่อุณหภูมิ  $20^{\circ}\text{C}$  ความดัน 1 atm,  $V$  คือ ปริมาตรของน้ำในถังที่เติมอากาศ และคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศที่สภาวะมาตรฐาน (Standard Aeration Efficiency; SAE<sub>D</sub>) จากสมการที่ (5) [7]

$$\text{SAE}_D = \frac{\text{SOTR}}{P_{del}} \quad (5)$$

โดย  $P_{del}$  (Delivered Power) คือ กำลังที่ถ่ายเทจากเครื่องเติมอากาศสู่น้ำ (kW) ในกรณีนี้เกิดขึ้นจากแหล่งจ่าย

กำลัง 2 แหล่ง จึงมีค่าเท่ากับผลรวมของกำลังจากลมอัดที่ส่งผ่านลงในน้ำ  $P_{del,B}$  จากสมการที่ (6) [7] และกำลังจากใบกวนส่งผ่านลงในน้ำ  $P_{del,M}$  จากสมการที่ (7) ตามลำดับ

$$P_{del,B} = \frac{wRT_a}{K} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^K - 1 \right] \quad (6)$$

โดย  $w$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)  $R$  คือ ค่าคงที่ของก๊าซ 8.314 kJ/k mol K,  $T_a$  คือ อุณหภูมิอากาศ (K),  $P_1$  คือ ความดันสมบูรณ์ ณ จุดจ่ายอากาศเข้าสู่น้ำ (mmHg),  $P_2$  ความดันบรรยากาศ ณ จุดทดสอบ (mmHg),  $K = \frac{(k-1)}{k}$  เป็นเทอมไร้มิติค่าเท่ากับ 0.283 สำหรับอากาศ  $k$  คือ อัตราส่วน  $\frac{C_P}{C_V}$ ,  $C_p$  คือ ค่าความจุความร้อนเมื่อความดันคงที่ และ  $C_v$  คือ ค่าความจุความร้อนเมื่อปริมาตรคงที่

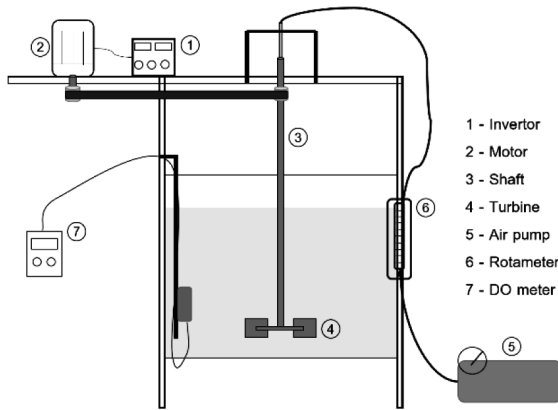
$$P_{del,M} = P_{load} - P_{unload} \quad (7)$$

โดย  $P_{load}$  คือ กำลังที่ตรวจวัดจากเครื่องเติมอากาศเมื่อมีน้ำในถัง (kW) และ  $P_{unload}$  คือ กำลังที่ตรวจวัดจากเครื่องเติมอากาศเมื่อไม่มีน้ำในถัง (kW) การตรวจวัดกำลังของเครื่องเติมอากาศใช้วัตต์มิเตอร์ชนิดแคลมป์ (Clamp on Power Meter, YOKOGAWA CW140, Japan)

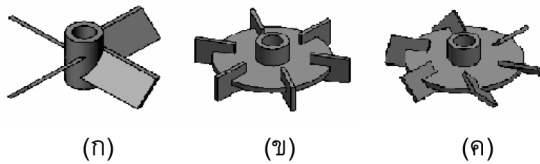
## 2. วิธีการวิจัย

### 2.1 วัสดุ อุปกรณ์

สารเคมีที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดเป็นเกรดวิเคราะห์และน้ำที่ใช้มีคุณภาพระดับน้ำประปา เครื่องเติมอากาศชนิดเทอร์โบความเร็วรอบสูงที่ป้อนอากาศเข้าที่เพลาลงแสดงตามรูปที่ 1 โดยศึกษาใบกวน 3 แบบ คือ  $45^{\circ}$  Pitched-4-Blade Turbine, Flat-Disc-6-Blade Turbine และ  $45^{\circ}$  Flat Disc-6-Blade Turbine แสดงตามรูปที่ 2 เส้นผ่านศูนย์กลางใบกวนเท่ากันทั้ง 3 ใบที่ 75 mm



รูปที่ 1 เครื่องเติมอากาศติดตั้งในถังทดสอบ

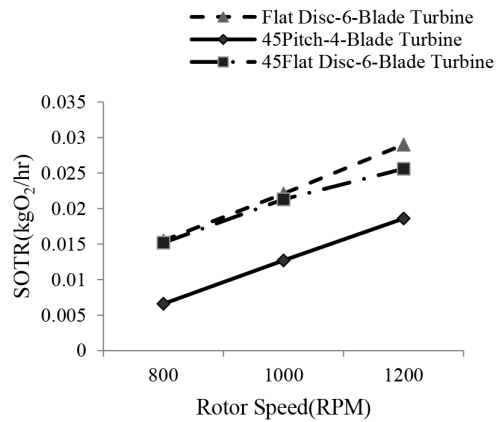


รูปที่ 2 เครื่องเติมอากาศติดตั้งในถังทดสอบ (ก) 45° Pitched-4-Blade Turbine (ข) Flat-Disc-6 Blade Turbine และ (ค) 45° Flat Disc-6- Blade Turbine

## 2.2 การทดสอบประสิทธิภาพเครื่องเติมอากาศ

เติมน้ำประปา 100 ลิตร ในถังทดสอบที่ติดตั้งเครื่องเติมอากาศตามรูปที่ 1 ละลายโคบอลต์คลอไรด์ ( $\text{CoCl}_2$ ) 0.12 กรัม ลงในน้ำ (0.3 มิลลิกรัม/ลิตร) กวนผสมด้วยเครื่องเติมอากาศ จากนั้นหยุดเครื่องเติมอากาศ ละลายโซเดียมซัลไฟต์ ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) 5.89 กรัม โดยใช้ในถังทดสอบเติมลงในถังทดสอบกวนสารละลายเบาๆ โดยใช้ใบพายเพื่อให้ออกซิเจนในน้ำลดลงจนมีค่าต่ำกว่า 0.5 mg/l จึงเปิดเครื่องเติมอากาศพร้อมปรับอัตราการไหลอากาศผ่านโรตاميเตอร์ (Dwyer Rotameter, USA) บันทึกค่าออกซิเจนละลาย (Dissolved Oxygen) ด้วยเครื่องวัดออกซิเจนละลาย (YSI 550 DO meter, USA) ที่เวลาต่างๆ

ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนใบเทอร์ไบน์และความเร็วรอบมอเตอร์ ในระหว่างทดสอบทำการตรวจวัดอุณหภูมิน้ำโดยใช้อุปกรณ์วัดอุณหภูมิจากเครื่อง YSI 550 DO Meter ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์



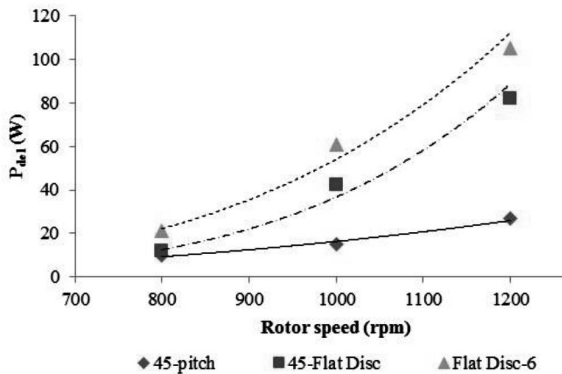
รูปที่ 3 ค่า SOTR และความเร็รรอบของใบกวนแต่ละชนิด

อากาศ (BARIGO, Germany) สภาวะในการทดสอบเครื่องเติมอากาศคือ ความเร็วโรเตอร์ 800, 1,000 และ 1,200 รอบต่อนาที (rpm) และใช้ใบกวนแบบ 45° Pitched-4-Blade Turbine, 45° Flat Disc-6-Blade Turbine และ Flat-Disc-6 Blade Turbine อัตราการป้อนอากาศคงที่ที่ 15 ลิตรต่อนาที โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำในแต่ละสภาวะ และเมื่อทำการหาค่าความคลาดเคลื่อน (%) จากค่าเฉลี่ย พบว่าให้ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำกว่า 5% ยกเว้นข้อมูลที่ 1,200 รอบต่อนาที ของใบกวนแบบ 45° Flat Disc-6-Blade Turbine ที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่ 7%

## 3. ผลการทดลอง

### 3.1 ผลของความเร็รรอบของใบกวนต่ออัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน

การเพิ่มความเร็รรอบของใบกวนแต่ละชนิดส่งผลให้แนวโน้มของค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (SOTR) มีค่าเพิ่มขึ้น รูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าใบกวนชนิด Flat Disc-6-Blade Turbine และ 45° Flat Disc-6-Blade Turbine มีอัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐานมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่ใบกวนชนิด 45° Pitch-4-Blade Turbine มีปริมาณ SOTR ต่ำกว่าใบกวนอีก 2 ชนิด ซึ่งเกิดขึ้นจากใบกวนแบบ 45° Pitch-4-Blade Turbine มีพื้นที่สัมผัสกับของเหลวน้อยที่สุด ซึ่งจะขอกว่าอีกครั้งในหัวข้อ 3.2 จากข้อมูลข้างต้นทำให้พบว่า SOTR ของ



รูปที่ 4  $P_{del}$  ของใบกวนทั้ง 3 ชนิด ที่ความเร็วรอบ 800–1200 rpm

ใบกวนทั้ง 3 ชนิด ที่ทำการทดสอบมีแนวโน้มสัมพันธ์กับความเร็วยรอบโรเตอร์เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear Relation)

### 3.2 ผลจากการปรับความเร็วรอบของใบกวนต่อกำลังที่ใช้ในการกวน

รูปที่ 4 แสดงค่า  $P_{del}$  จากการตรวจวัดกำลังของใบกวนทั้ง 3 ชนิด พบว่าใบกวนแบบ 45° Pitched-4-Blade Turbine ใช้กำลังต่ำที่สุดในการให้กำลัง รองลงมาคือใบกวนแบบ 45° Flat Disc-6-Blade Turbine และใบกวนที่ใช้กำลังสูงที่สุดคือใบกวนแบบ Flat-Disc-6 Blade Turbine

ที่ความเร็วโรเตอร์ 800 rpm พบว่า ค่า  $P_{del}$  มีอัตราการส่วนกำลังเพิ่มขึ้นต่ำที่สุด คือร้อยละ 21.8 สำหรับใบกวน 45° Pitched-4- Blade Turbine เทียบกับใบกวน 45° Flat Disc-6- Blade Turbine และร้อยละ 118.7 สำหรับใบกวน 45° Pitched-4- Blade Turbine เทียบกับใบกวน Flat-Disc-6 Blade Turbine และในขณะที่เพิ่มความเร็วยรอบโรเตอร์  $P_{del}$  มีสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นมากและมีแนวโน้มที่มีความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น

เมื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่าง  $P_{del}$  กับความเร็วโรเตอร์ในรูปยกกำลัง (Power Law) ตามสมการที่ (8) ได้ค่าคงที่แสดงตามตารางที่ 1

$$P_{del} = a(S)^x \quad (8)$$

โดย  $a$  คือ ค่าคงที่  $S$  คือ ความเร็วโรเตอร์ (rpm) และ  $x$  คือ ค่าคงที่ยกกำลัง

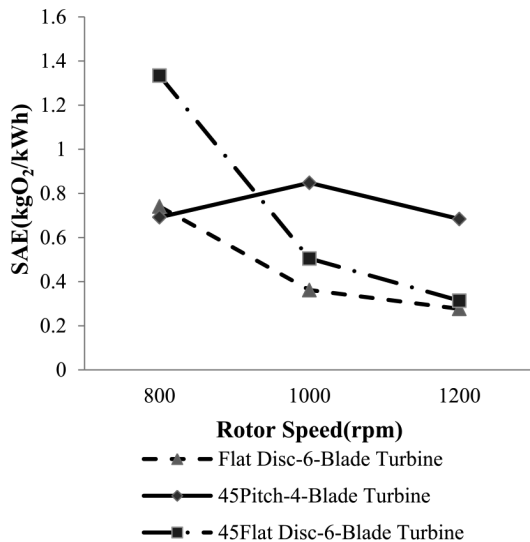
ตารางที่ 1 ค่าคงที่  $P_{del}$  ของใบกวนทั้ง 3 ชนิด

ค่าคงที่	Delivered Power, $P_{del}$ (W)		
	45° Pitched	45° Flat Disc	Flat-Disc-6
$a$	4E-07	1E-13	5E-13
$x$	2.5378	4.8429	3.9992
$R^2$	0.9788	0.9851	0.9838

เมื่อพิจารณาจากค่า  $x$  พบว่าใบกวนแบบ 45° Flat Disc-6-Blade Turbine ให้ค่า  $P_{del}$  ที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อเพิ่มความเร็วยรอบโรเตอร์ รองมาคือ Flat-Disc-6-Blade Turbine และ 45° Pitched-4-Blade Turbine ตามลำดับ ซึ่งใบพัดที่เอียง 45 องศา มีส่วนช่วยให้การเคลื่อนที่ของของไหลกระจายลงสู่ด้านล่างของถังทดสอบได้ดีกว่าใบตรง และจากการสังเกตที่ความเร็วรอบ 800 rpm เมื่อพองอากาศถูกฉีดพ่นเข้าสู่แกนใบกวน พองอากาศจะถูกแรงกระทำเคลื่อนเป็นวงกระจายตัวในน้ำกว้างกว่าใบ Flat-Disc-6-Blade Turbine ทำให้  $P_{del}$  ของใบ 45° Flat Disc-6-Blade Turbine จึงมีค่าน้อยกว่า ซึ่งอาจเกิดจากความหนืดเฉลี่ยที่มีน้ำผสมกับอากาศมีค่าต่ำกว่า ส่วนใบกวนแบบ 45° Pitched-4-Blade Turbine ให้ค่าตอบสนองน้อยที่สุด เนื่องจากมีใบเพียง 4 ใบ แรงต้านของใบพัดจึงมีค่าต่ำกว่าแบบ 6 ใบพัด

### 3.3 ประสิทธิภาพการเติมอากาศที่สภาวะมาตรฐาน (SAE<sub>0</sub>)

ถึงแม้ว่าการเพิ่มความเร็วยรอบของใบกวนแต่ละชนิดส่งผลให้แนวโน้มของค่า SOTR เพิ่มขึ้น แต่การใช้กำลัง  $P_{del}$  ก็มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน เมื่อนำมาคำนวณค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศที่สภาวะมาตรฐาน (SAE<sub>0</sub>) ให้ผลการทดสอบตามรูปที่ 5 พบว่า SAE<sub>0</sub> ของใบกวนแบบ 45° Pitched-4-Blade Turbine ให้ค่าที่ค่อนข้างคงที่ไม่ขึ้นกับความเร็วโรเตอร์ในช่วง 800–1200 rpm ในขณะที่ใบกวนอีก 2 แบบคือ 45° Flat Disc-6-Blade Turbine และ Flat-Disc-6



รูปที่ 5 ค่า SAE<sub>0</sub> ที่ความเร็วรอบต่างๆ ของใบกวน 3 ชนิด (45° Pitched-4-Blade Turbine, Flat Disc-6-Blade Turbine และ 45° Flat Disc-6-Blade Turbine)

Blade Turbine ให้ค่า SAE<sub>0</sub> ที่ลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วโรเตอร์ในช่วง 800–1200 rpm โดยใบกวนแบบ 45° Flat Disc-6-Blade Turbine ให้ค่า SAE<sub>0</sub> สูงสุด 1.33 kgO<sub>2</sub>/kWh ที่ความเร็วโรเตอร์ 800 rpm

ปัจจัยในการเลือกเครื่องเติมอากาศนอกจากการพิจารณาอัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่สูงแล้วประสิทธิภาพในการเติมอากาศเป็นปัจจัยสำคัญในการใช้พลังงานงานอย่างมีประสิทธิภาพ เครื่องเติมอากาศที่มีอัตราการถ่ายเทออกซิเจนสูงจำเป็นมากในระบบที่มีภาระบีโอดี (BOD Loading) สูง เช่น ในระบบบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น ในขณะที่บางระบบมีภาระบีโอดีต่ำถึงปานกลางต้องการเครื่องเติมอากาศที่มีประสิทธิภาพสูงและมีการเคลื่อนที่ของน้ำ เช่น ในระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ และการเติมอากาศในสระน้ำตามสวนสาธารณะ เป็นต้น

#### 4. อภิปรายผลและสรุป

เมื่อเพิ่มความเร็วโรเตอร์ การเพิ่มขึ้นของ SOTR เกิดจากการตีฟองอากาศขนาดใหญ่ที่ไหลผ่านเข้าสู่เครื่องเติมอากาศที่เปลวกลวงให้กระจายตัวเป็นฟองอากาศ

ขนาดเล็ก ความเร็วรอบที่สูงขึ้นส่งผลให้ความเร็วปลายใบ (Tip Speed) มีค่าเพิ่มขึ้น ความเร็วปลายใบจาก 3.135 เป็น 3.936 และ 4.714 m/s (คำนวณจาก  $2\pi r n$  โดย  $r$  คือรัศมีใบกวนเท่ากับ 37.5 mm และ  $n$  คือ ความเร็วโรเตอร์, rps) ทำให้แรงเฉือนที่ใบกวนกระทำกับฟองอากาศและน้ำมีค่าสูงขึ้น ความเร็วรอบที่สูงขึ้นยังส่งผลให้การกระจายตัวของฟองอากาศตามแนวรัศมีเป็นวงกว้างขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยที่สนับสนุนว่าเกิดการเหวี่ยงออกไปได้ไกลขึ้น และเมื่อทำการคำนวณเลขเรย์โนลด์ (Reynold Number;  $N_{Re}$ ) ตามสมการ (9) [8] พบว่าทั้งหมดอยู่ในช่วงการไหลปั่นป่วน (Turbulent Flow) และสามารถคำนวณค่ากำลังได้ตามสมการที่ (10)

$$N_{Re} = \frac{\rho n D^2}{\mu} \quad (9)$$

โดย  $\rho$  คือ ความหนาแน่นน้ำ (kg/m<sup>3</sup>)  $n$  คือ ความเร็วรอบโรเตอร์ (rps)  $D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางใบกวน (m) และ  $\mu$  คือ ความหนืดของน้ำ (kg/m-s)

$$P = \frac{K_T n^3 D^5 \rho}{g_c} \quad (10)$$

โดย  $P$  คือ กำลังที่ใบกวนถ่ายให้กับของเหลว (W)  $K_T$  คือ ค่าคงที่การกวนในช่วงการไหลปั่นป่วน (ไร้หน่วย) ซึ่งขึ้นกับชนิดใบกวนและการติดตั้ง  $g_c$  คือ ค่าคงที่ (Gravitational Conversion Constant)

ในการคำนวณ  $P$  ทางทฤษฎีตามสมการที่ (10) พบว่า  $P$  แปรผันตามความเร็วโรเตอร์ยกกำลัง 3 ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลกำลังที่ตรวจวัดในตารางที่ 1 ซึ่งค่า  $P_{del}$  แปรแบบไม่ผันตรงกับความเร็วโรเตอร์ (ในกรณีนี้เปรียบเทียบที่ความเร็วอากาศเข้าคังที่ ทำให้เทอม  $P_{del,B}$ ) มีค่าเท่ากันทั้ง 3 ใบกวน)

ที่ความเร็วรอบโรเตอร์ 800 rpm ใบกวนชนิด 45° Flat Disc-6-Blade Turbine ให้ค่า SAE<sub>0</sub> สูงสุดเท่ากับ 1.334 kgO<sub>2</sub>/kWh ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงมาตรฐาน เนื่องจากโดยทั่วไปเครื่องเติมอากาศชนิดเทอร์ไบน์ใต้น้ำซึ่งเป็นเครื่องเติมอากาศลักษณะใกล้เคียงกับที่ศึกษาจะมี SAE

อยู่ในช่วง 0.9–1.52 kgO<sub>2</sub>/kWh [9] โดยปกติใบกวน 6 ใบ จะใช้พลังงานในการหมุนที่มากกว่าใบกวน 4 ใบ เนื่องจากพื้นที่ต้านทานการเคลื่อนที่มากกว่า และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างใบกวนแบบ 45° Flat Disc–6–Blade Turbine กับ Flat Disc–6–Blade Turbine พบว่า ใบกวนแบบ 45° Flat Disc–6–Blade Turbine ใช้พลังงานน้อยกว่า ซึ่งเกิดจากค่า K<sub>r</sub> ของใบกวน 45° Flat Disc–6–Blade Turbine มีค่าน้อยกว่า [10] ส่งผลให้พลังงานที่ใช้ในใบพัดแบบ 45° Flat Disc–6–Blade Turbine จึงมีค่าต่ำกว่า แต่ทั้งสองใบพัดให้ค่า SOTR ที่ใกล้เคียงกัน ทำให้ SAE<sub>0</sub> ของ 45° Flat Disc–6–Blade Turbine จึงสูงกว่าของ Flat Disc–6–Blade Turbine

ที่ความเร็วรอบโรเตอร์ 1,000–1,200 rpm ใบกวนชนิด 45° Pitched–4–Blade Turbine ใช้พลังงานต่ำที่สุดจากการสังเกตพบว่า ฟองอากาศมีขนาดใหญ่กระจายตัวในวงที่แคบกว่าใบพัดที่เหลืออีก 2 ใบ เนื่องจากใบพัดของ 45° Pitched–4–Blade Turbine มีจำนวนใบที่น้อยกว่าจากรูปที่ 3 จึงแสดงค่า SOTR ที่ต่ำที่สุด และกราฟรูปที่ 4 สอดคล้องกันคือให้ค่าพลังงานในการหมุนโรเตอร์ต่ำ อย่างไรก็ตาม SAE<sub>0</sub> ของใบกวน 45° Pitched–4–Blade Turbine ที่ความเร็วรอบโรเตอร์ 1,000–1,200 rpm ให้ค่าที่สูงกว่า Flat Disc–6–Blade Turbine และ 45° Flat Disc–6–Blade Turbine ดังนั้นที่ความเร็วรอบในช่วงนี้ ใบ 45° Pitched–4–Blade Turbine จึงดีกว่า ในสถานการณ์ของการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ นอกจากต้องการค่าออกซิเจนละลายตามมาตรฐานของการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแล้ว ความเร็วของน้ำเป็นปัจจัยสำคัญอีกพารามิเตอร์หนึ่ง เนื่องจากในบ่อเพาะเลี้ยงจะมีตะกอนจากเศษอาหารที่เหลือจากการกินอาหารของสัตว์น้ำ และยังมีมูลของสัตว์น้ำที่ถ่ายในบ่อเพาะเลี้ยง ความเร็วที่เหมาะสมจะช่วยพาตะกอนแขวนลอยไปส่วนต่ำสุดของบ่อเลี้ยง และกำจัดออกจากบ่อเลี้ยงต่อไป ส่วนใบกวนแบบ Flat Disc–6–Blade Turbine และ 45° Flat Disc–6–Blade Turbine ให้ค่า SAE<sub>0</sub> ที่ต่ำกว่า เนื่องจากมีการใช้พลังงานในการหมุนโรเตอร์ที่สูงมาก

สรุปผลการทดลองจากการเลือกและแปรผันชนิดใบกวนที่ความเร็วรอบ 800–1,200 rpm ของเครื่องเติม

อากาศชนิดเทอร์โบความเร็วรอบสูงป้อนอากาศเข้าที่เพลากลวงนี้ใบกวนแบบ 45° Flat Disc–6–Blade Turbine ให้ประสิทธิภาพสูงสุด ที่ความเร็วโรเตอร์ 800 rpm แต่ถ้ายต้องการให้มีความเร็วเพิ่มขึ้น ใบกวนชนิด 45° Pitched–4–Blade Turbine จะเป็นทางเลือกที่ให้ความเร็วสูง ในขณะที่ให้ค่า SAE<sub>0</sub> ที่สูง เกษตรกรสามารถเลือกใช้ใบพัดแต่ละชนิดตามความเหมาะสม ในแต่ละช่วงเวลาของการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เพื่อลดต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้าของการเติมอากาศ

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] C. I. M. Martins, E. H. Eding, M. C. J. Verdegema, L. T. N. Heinsbroek, O. Schneider, J. P. Blancheton, E. Roque d’Orbcastel, and J. A. J. Verreth, “New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability,” *Aquacultural Engineering*, vol. 43, no. 3, pp. 83–93, 2010.
- [2] J. He, “A review of Chinese fish trade involving the development and limitations of food safety strategy,” *Ocean & Coastal Management*, vol. 116, pp.150–161, 2015.
- [3] T. J. Pfeiffer, A. Osborn, and M. Davis, “Particle sieve analysis for determining solids removal efficiency of water treatment components in a recirculating aquaculture system,” *Aquacultural Engineering*, vol. 39, no. 1, pp. 24–29, 2008.
- [4] J. Davidson, C. Good, F.T. Barrows, C. Welsh, P. BrettKenney, and S.T. Summerfelt, “Comparing the effects of feeding a grain-or





- a fish meal-based diet on water quality, waste production, and rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* performance within low exchange water recirculating aquaculture systems,” *Aquacultural Engineering*, vol. 52, pp. 45–57, 2013.
- [5] *Good aquaculture practices for freshwater aquatic animal farm*, Thai Agricultural Standard TAS 7417–2009, July 2012.
- [6] Metcalf and Eddy, *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*, 4th ed., Singapore: McGraw Hill, 2004.
- [7] *Measurement of Oxygen Transfer in Clean Water*, ASCE standard ANSI/ASCE 2–91, 1992.
- [8] A. Petiraksakul and P. Worathanakul, *Environmental Technology*. Bangkok: KMUTNB Textbook Publishing Center, 2014.
- [9] Technical Bulletin Environmental Dynamics Published: 6/2005 Energy Consumption and Typical Performance of Various Types of Aeration Systems (Online). Available: <http://www.wastewater.com/docs/default-source/tech-bulletins/127-energy-consumption-and-typical-performance-of-various-types-of-aeration-systems.pdf?sfvrsn=4>, (31/8/2016).
- [10] K. Rosselot and A. V. Naimpally. (2013, September). *Environmental Engineering: Review for the Professional Engineering Examination* [Online]. Available: <http://www.springer.com/la/book/9780387290720>.

