

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการประยุกต์ใช้ท่อยืดหยุ่นเป็นอุปกรณ์เติมอากาศแบบท่อ โดยศึกษาตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสารและอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ เพื่อศึกษากลไกการถ่ายเทออกซิเจนโดยพิจารณาสมบัติทางกายภาพของท่อยืดหยุ่น ผลกระทบจากสิ่งเจือปนในน้ำต่อการถ่ายเทออกซิเจนในสภาวะการทำงานจริง แนวทางการใช้งาน และการบำรุงรักษา โดยที่การศึกษาและเปรียบเทียบในหัวข้อต่างๆได้พิจารณาทั้งในด้านประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนและประสิทธิภาพเชิงพลังงาน โดยมีรายละเอียดดังนี้

5.1.1 การศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารของอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่น

- 1.) ตัวอย่างท่อยืดหยุ่นที่ 6.3 เป็นตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่น เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูง และมีค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนมากที่สุด ซึ่งแสดงถึงการมีประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงตามไปด้วย
- 2.) สมบัติทางกายภาพของท่อยืดหยุ่นมีความสัมพันธ์กับกลไกการถ่ายเทออกซิเจน โดยความทนต่อแรงดึงและความยืดหยุ่นของท่อยืดหยุ่นเป็นปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อค่าความดันขณะเติมอากาศซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพเชิงพลังงาน เมื่อท่อยืดหยุ่นมีค่าความทนต่อแรงดึงและความยืดหยุ่นจะส่งผลให้ท่อยืดหยุ่นมีความเหนียวซึ่งต้านทานการไหลผ่านของอากาศทำให้ต้องใช้ความดันสูงขณะเติมอากาศทำให้มีประสิทธิภาพเชิงพลังงานต่ำ
- 3.) ขนาดฟองอากาศมีแนวโน้มใหญ่ขึ้นทำให้ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศเพิ่มขึ้นตามไปด้วย การเพิ่มอัตราการไหลของอากาศทำให้เกิดฟองอากาศจำนวนมากจึงส่งผลให้พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำเพิ่มขึ้นอย่างมากซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ขนาดฟองอากาศที่ใหญ่ขึ้นทำให้ออกซิเจนในฟองอากาศสัมผัสกับน้ำได้น้อยลง ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนจึงมีแนวโน้มลดลง

- 5.1.2 การศึกษาผลกระทบจากสภาวะการทำงานต่างๆต่อประสิทธิภาพการเติมอากาศ การอุดต้น และวิธีทำความสะอาดที่เหมาะสม
- 1.) น้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวซึ่งใช้เป็นตัวแทนของของแข็งแขวนลอยที่มีความเข้มข้น 50 100 และ 200 มก./ลิตร ไม่ส่งผลกระทบต่อกลไกการถ่ายเทออกซิเจน เนื่องจากมีสมบัติของน้ำไม่แตกต่างไปจากน้ำประปาจึงทำให้ตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสารและอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศจึงมีค่าใกล้เคียงกับในน้ำประปา
 - 2.) น้ำเกลือความเข้มข้น 7,500 20,000 และ 35,000 มก./ลิตร ส่งผลกระทบต่อกลไกการถ่ายเทออกซิเจนขณะเติมอากาศอย่างชัดเจน เนื่องจากปริมาณไอออนที่เกิดขึ้นได้ล้อมรอบฟองอากาศซึ่งขัดขวางการรวมตัวของฟองอากาศทำให้ฟองอากาศมีขนาดเล็กกว่าในน้ำประปา ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศในน้ำเกลือจึงมีค่าน้อย พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำจึงมีค่ามากกว่าในน้ำประปาซึ่งส่งผลต่อการถ่ายเทออกซิเจนมากกว่าการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวเนื่องจากปริมาณไอออนในน้ำเกลือ ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน และประสิทธิภาพเชิงพลังงานจึงมีค่ามากกว่าการเติมอากาศในน้ำประปา
 - 3.) น้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพความเข้มข้น 1,000 2,000 และ 3,000 มก./ลิตร ส่งผลกระทบต่อกลไกการถ่ายเทออกซิเจนขณะเติมอากาศอย่างชัดเจน เนื่องจากปริมาณไอออนในน้ำที่เกิดขึ้นจากการเพิ่มความเข้มข้นของเซลล์จุลชีพทำให้ค่าแรงตึงผิวในน้ำลดลงซึ่งส่งผลต่อรูปทรงของฟองอากาศและขัดขวางการรวมตัวของฟองอากาศทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวลดลงอย่างมาก ถึงแม้ว่าฟองอากาศที่เกิดขึ้นขณะเติมอากาศมีลักษณะเป็นทรงกลมและมีขนาดเล็กกว่าในน้ำประปา ซึ่งทำให้พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำมีค่ามากกว่าในน้ำประปา แต่การลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวส่งผลต่อการถ่ายเทออกซิเจนมากกว่า ดังนั้นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน และประสิทธิภาพเชิงพลังงานจึงมีค่าน้อยกว่าการเติมอากาศในน้ำประปา
 - 4.) ของแข็งแขวนลอยและเซลล์จุลชีพเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการอุดต้น โดยที่ดินขาวซึ่งสามารถทำให้เกิดการอุดต้นได้ทันทีเนื่องจากมีขนาดอนุภาคเล็กกว่ารูเติมอากาศ และใช้ระยะเวลาสั้นในการตกตะกอน สำหรับเซลล์จุลชีพสามารถทำให้เกิดการอุดต้นได้จากการตกตะกอนทับถมและสร้างไบโอฟิล์มเคลือบที่ผิวท่อภายในระยะเวลา 3 วัน ดังนั้น จึง

ไม่ควรหยุดเติมอากาศนานเกิน 3 วัน หลังจากนั้นจึงควรทำความสะอาดอุปกรณ์เติมอากาศด้วยวิธีที่เหมาะสม

- 5.) การเป่าด้วยความดันเป็นวิธีทำความสะอาดท่อยึดหยุ่นที่เหมาะสม โดยในงานวิจัยนี้ได้เป่าอากาศด้วยความดัน 3 บาร์ เป็นระยะเวลา 30 นาที พบว่าสามารถกำจัดสิ่งอุดตันได้ดีทั้งในรูปของแข็งแขวนลอยและเซลล์จุลชีพ เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถกำจัดสิ่งอุดตันได้ทั้งบริเวณผิวด้านนอกของท่อและภายในผนังท่อ และสามารถทำได้สะดวก
- 5.1.3 การศึกษารูปแบบการจัดเรียงท่อยึดหยุ่นในถังเติมอากาศ พบว่า การจัดเรียงท่อยึดหยุ่นรูปแบบที่ 2 (ดังแสดงในรูปที่ 4.50) เป็นรูปแบบที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากเป็นรูปแบบที่มีความสมมาตรสามารถกระจายฟองอากาศได้สม่ำเสมอ สามารถสร้างความปั่นป่วนภายในถังเติมอากาศจนมีเกิดการไหลแบบกวนสมบูรณ์ทำให้การถ่ายเทออกซิเจนกระจายตัวอย่างทั่วถึง มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน 1.81×10^{-3} ถึง 3.68×10^{-3} 1/วินาที และประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนร้อยละ 12.36 ถึง 15.08 (ความลึกของน้ำ 1.3 ม.) ซึ่งอยู่ในช่วงของอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อพลาสติก เพอร์ฟอเรทเมมเบรน เจ็ท หรือชนิดไม่มีรูพรุน (ดังแสดงในภาคผนวก ข-6) ประกอบกับการมีอัตราการถ่ายเทออกซิเจนสูงประมาณ 1,430 มก./กิโลวัตต์-วินาที ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 60 ถึง 100 ลิตร/นาที ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพเชิงพลังงานที่สูง โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้ท่อยึดหยุ่นยาว 7.5 ม. ต่อพื้นที่ก้นถังเติมอากาศ 1.33 ตร.ม.
- 5.1.4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (d_b) สามารถสามารถใช้เป็นตัวแปรหลักในการทำนายค่าตัวแปรด้านการถ่ายเทออกซิเจนและตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศอื่นๆได้ โดยทำนายค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว (k_L) และพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำ (a) หลังจากนั้นจึงนำค่าตัวแปรทั้งสองมาคูณกันเป็นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ($k_L a$) โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 20 สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิธีการปรับแก้ค่าที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังตาราง

ตารางที่ 5.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน

ลักษณะน้ำ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ ฟองอากาศ (d_B)	ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (U_B)	พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่าง ฟองอากาศกับน้ำ (a)
น้ำประปา	$d_B = \left[\frac{6 \times d_{OR} \times \sigma \times g_c}{g \times \Delta p} \right]^{1/3}$	$U_B = \left[\frac{2\sigma}{d_B \times \rho} + 0.5d_B \times g \right]^{0.5}$	$a = \frac{N_B \times S_B}{V_{Total}} = \frac{N_B \times \pi \times d_B^2}{A \times H_L + N_B \times V_B}$
ดินขาว	$d_B = 7.1 \times 10^{-4} \times \Delta P^{0.328}$	กราฟของ Grace และ Wairegi สภาวะของน้ำที่มีสารเจือปน	
เกลือ	$d_B = \frac{(d_B - 3) + (d_B - 4)}{2}$	$U_B = \frac{d_B - Actual}{d_B - Water} \times (U_B - 4)$	
เซลด์ลูซีฟ	$d_B - 3 = \left[\frac{72 \times \rho_L}{\pi^2 \times g \times \Delta p} \right]^{1/5} \times Q_{go}^{0.4}$ $d_B - 4 = 7.1 \times 10^{-4} \times \Delta P^{0.328}$	$U_B - 4 = \left[\frac{2\sigma}{d_B \times \rho} + 0.5d_B \times g \right]^{0.5}$	



ตารางที่ 5.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (ต่อ)

ลักษณะน้ำ	สัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว (k_L)	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ($k_L a$)
น้ำประปา	$k_L = \frac{(k_L - 1) - (k_L - 2)}{d_{B \rightarrow \text{Max}} - d_{B \rightarrow \text{min}}} \times (d_B - d_{B \rightarrow \text{Min}}) + (k_L - 2)$	$k_L a = k_L \times a$
ดินขาว		
เกลือ	$k_L = \frac{(k_L - 1) + (k_L - 2)}{2}$	
เซตัสจุลชีพ	$k_L = \frac{(k_L - 1) - (k_L - 2)}{d_{B \rightarrow \text{Max}} - d_{B \rightarrow \text{min}}} \times (d_B - d_{B \rightarrow \text{Min}}) + (k_L - 2)$	

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสารและอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศกับอุปกรณ์เติมอากาศชนิดอื่น เพื่อศึกษาการเลือกใช้อุปกรณ์เติมอากาศที่เหมาะสมกับสภาวะการเติมอากาศต่างๆ
- 5.2.2 ควรศึกษาผลกระทบจากลักษณะน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยสารหลายชนิดในเวลาเดียวกัน เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบกระบวนการเติมอากาศสำหรับการใช้งานด้านอื่น เช่น ด้านการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เป็นต้น
- 5.2.3 ควรดำเนินการศึกษาและยืนยันผลการทดลองในช่วงสภาวะการทำงานที่กว้างขึ้น เช่น ขยายช่วงอัตราการไหลของอากาศให้กว้างขึ้น ทำงานทดลองในถังเติมอากาศขนาดใหญ่ และศึกษาผลกระทบจากการทำความสะอาดด้วยสารเคมีต่อสมบัติของอุปกรณ์เติมอากาศ เป็นต้น เพื่อให้สามารถนำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลายด้าน