

บทที่ 4

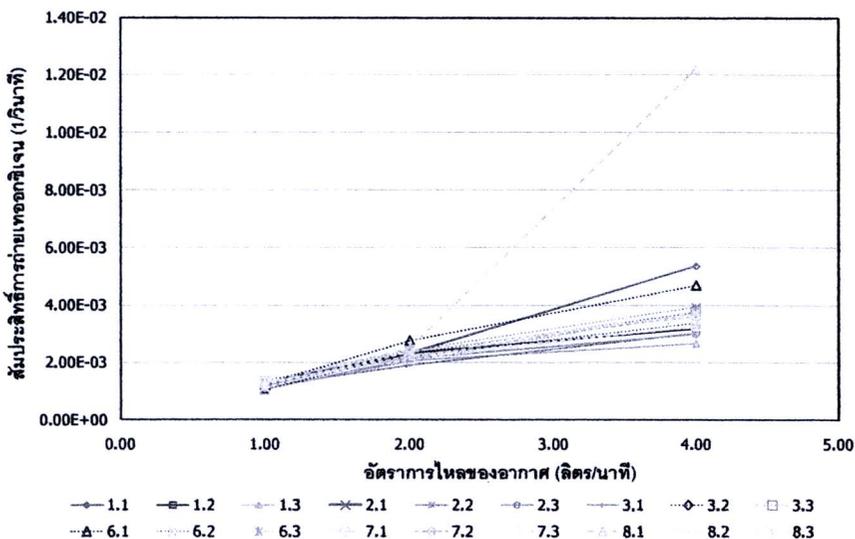
ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 การศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารของอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่น

สำหรับการทดลองในหัวข้อนี้ประกอบไปด้วยการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน การศึกษาตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ และการศึกษาสมบัติทางกายภาพของท่อยืดหยุ่น เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารของท่อยืดหยุ่นทั้งหมด 18 ตัวอย่าง ซึ่งมีสมบัติทางกายภาพแตกต่างกัน และสามารถอธิบายกลไกการถ่ายเทออกซิเจนของท่อยืดหยุ่นซึ่งได้รับผลกระทบจากสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกันได้ แต่ข้อจำกัดในด้านระยะเวลาและค่าใช้จ่ายสำหรับการวิเคราะห์ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ และการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของท่อยืดหยุ่นจึงจำเป็นต้องเลือกท่อยืดหยุ่นบางตัวอย่างซึ่งมีค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารที่น่าสนใจ และมีความแตกต่างไปจากตัวอย่างอื่นๆ ไปวิเคราะห์ตามหัวข้อดังกล่าวเพื่อผลการเปรียบเทียบที่ชัดเจน ดังนั้นผลการทดลองในหัวข้อนี้จะทำให้สามารถเลือกตัวอย่างท่อยืดหยุ่นเพื่อประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์เติมอากาศได้อย่างเหมาะสมโดยมีรายละเอียดดังนี้

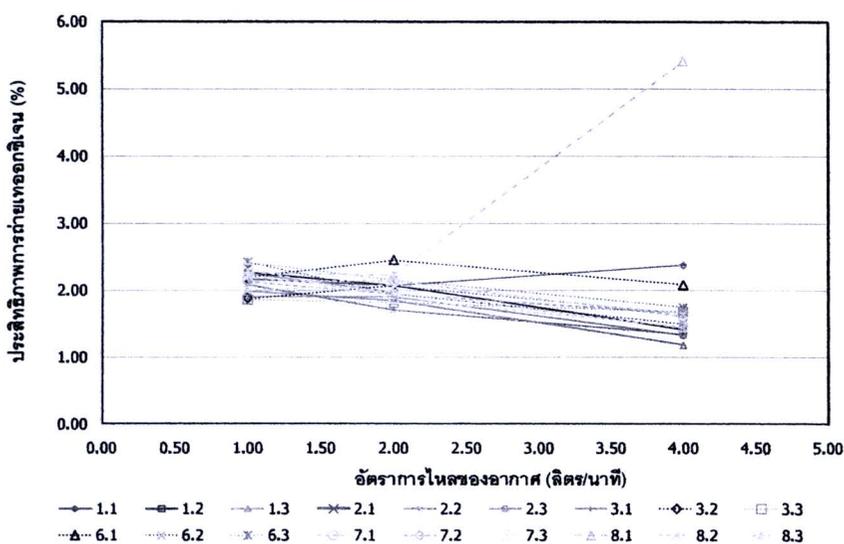
4.1.1 การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน

จากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของตัวอย่างท่อยืดหยุ่นทั้งหมด เติมอากาศด้วยอัตราการไหล 1 2 และ 4 ลิตร/นาที ในน้ำประปา พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมีแนวโน้มสูงขึ้นตามการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และอัตราการไหลของอากาศ

จากรูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศของตัวอย่างท่อยึดหยุ่นทั้งหมด พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของท่อยึดหยุ่นเกือบทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 1.2×10^{-3} ถึง 4.0×10^{-3} 1/วินาที ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 1 ถึง 4 ลิตร/นาที ยกเว้นตัวอย่างที่ 8.1 มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนสูงถึง 1.2×10^{-2} 1/วินาที ด้วยอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 4 ลิตร/นาที แต่ต้องใช้ค่าความดันสูงถึง 31 ปอนด์/ตร.นิ้ว เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน พบว่า ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.2

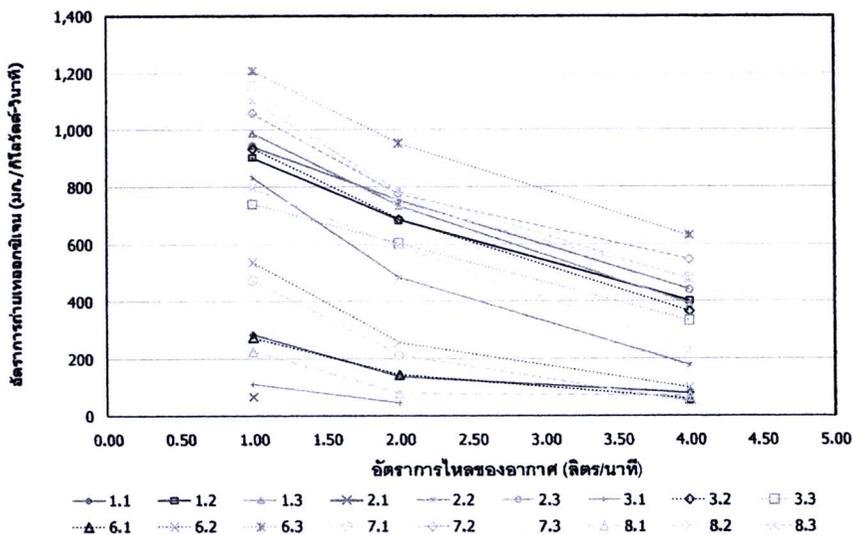


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศ

จากรูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศ พบว่า ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศและมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงร้อยละ 2.3 ลดลงเป็น 1.5 ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 1 ถึง 4 ลิตร/นาที ยกเว้นตัวอย่างที่ 8.1 มีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูงถึงร้อยละ 5.4 แต่ต้องใช้ค่าความดันสูงเช่นกัน การลดลงของประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนตามการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศเป็นผลมาจากการเพิ่มจำนวนฟองอากาศทำให้เกิดความปั่นป่วนในน้ำซึ่งรบกวนผิวสัมผัสระหว่างชั้นกลางของน้ำและฟองอากาศ ออกซิเจนจึงซึมผ่านชั้นกลางได้น้อยลงหรือค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวมีค่าลดลงอย่างมาก (กชกร ก้องกังวาลย์ และคณะ, 2552) เมื่อพิจารณาถึงค่าความดันที่จำเป็นเพื่อทำให้เกิดฟองอากาศ ตัวอย่างที่ 8.1 ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเท

ออกซิเจนและประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูงกว่าตัวอย่างอื่นๆ แต่ต้องใช้ความดันสูงถึง 31 ปอนด์/ตร.นิ้ว ในขณะที่ตัวอย่างอื่นๆโดยส่วนใหญ่ใช้ความดันเพียง 1.4 ปอนด์/ตร.นิ้ว

ดังนั้นการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนเพียงอย่างเดียวอาจไม่เหมาะสมกับการเลือกตัวอย่างท่อใยหินเพื่อประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อใยหิน จึงควรคำนึงถึงค่าความดันที่ต้องใช้ซึ่งมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพเชิงพลังงานควบคู่ไปด้วย เมื่อพิจารณาถึงค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่มีความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน กำลังที่จำเป็นในกระบวนการเติมอากาศ และค่าความดัน ตามสมการที่ 3.10 และสมการที่ 3.32 ซึ่งค่าดังกล่าวแสดงถึงอัตราส่วนระหว่างปริมาณออกซิเจนที่ถ่ายเทลงสู่น้ำต่อค่ากำลังที่ใช้ของเครื่องเป่าอากาศ พบว่าตัวอย่างที่ 6.3 มีอัตราการถ่ายเทออกซิเจนสูงที่สุดคือ 1,210 ลดลงเป็น 631 มก./กิโลวัตต์-วินาที ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศ

จากรูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศ พบว่า อัตราการถ่ายเทออกซิเจนมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศเนื่องจากค่าความดันสูงขึ้นตามอัตราการไหลของอากาศที่เพิ่มขึ้น สำหรับตัวอย่างที่ 8.1 ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูงที่สุดกลับมีค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนน้อยที่สุดเพราะใช้ความดันสูงเพื่อทำให้เกิดฟองอากาศซึ่งแสดงว่ามีประสิทธิภาพเชิงพลังงานต่ำไปด้วย ในขณะที่ ตัวอย่างที่ 6.3 ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนใกล้เคียงกับตัวอย่างอื่นๆแต่ใช้ความดันน้อยกว่า จึงมีค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนสูงที่สุดซึ่งแสดงว่ามีประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูง และมีแนวโน้มที่จะช่วยประหยัดพลังงานได้มากตามไปด้วย

จากผลการทดลองในหัวข้อนี้ จึงเลือกตัวอย่างท่อยึดหยุ่นที่ 6.3 เป็นตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยึดหยุ่น เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูงอยู่ในอันดับต้นๆเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่นๆ และมีค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนมากที่สุด ซึ่งแสดงถึงการมีประสิทธิภาพเชิงพลังงานและความสามารถในการประหยัดพลังงานได้มากอีกด้วย เพื่อให้สามารถอธิบายถึงกลไกการถ่ายเทออกซิเจนได้อย่างชัดเจนจึงมีการศึกษาสมบัติทางกายภาพของท่อยึดหยุ่นและตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศขณะเติมอากาศเพิ่มเติม โดยมีรายละเอียดดังแสดงในหัวข้อถัดไป

4.1.2 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของท่อยึดหยุ่น

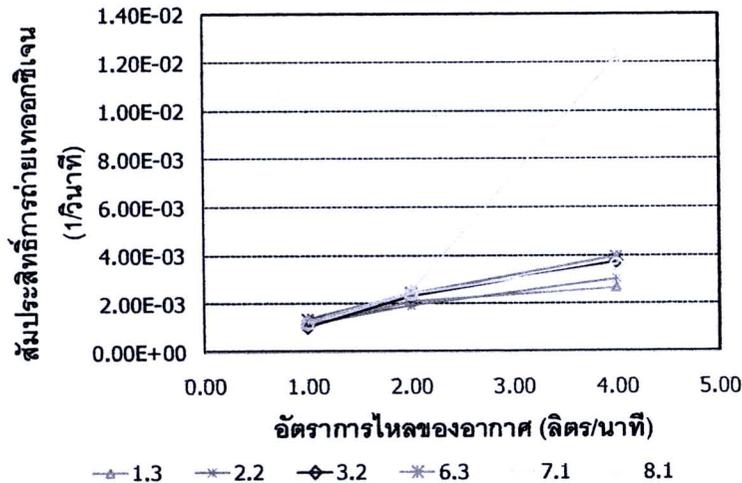
สมบัติทางกายภาพของท่อยึดหยุ่นที่สนใจศึกษาประกอบไปด้วย ความหนาผนังท่อ ความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) ความแข็ง (Hardness) ความยืด (Elongation) และความทนทานต่อสภาพกรดและเบส โดยเลือกตัวอย่างที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่โดดเด่นและน่าสนใจ คือ ตัวอย่างที่ 1.3 2.2 3.2 6.3 7.1 และ 8.1 ทั้งหมด 6 ตัวอย่าง เพื่อศึกษาความสัมพันธ์หรือผลกระทบต่อการถ่ายเทออกซิเจน โดยรายละเอียดของผลวิเคราะห์เป็นดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพของท่อยึดหยุ่น

ตัวอย่างที่	ความหนาผนังท่อ	ความทนต่อแรงดึง	ความแข็ง	ความยืด
	มม.	กิโลนิวตัน/ตร.ม.	-	%
1.3	2.85	1,100	50	22
2.2	2.60	2,900	67	93
3.2	2.55	2,200	57	65
6.3	3.15	1,000	63	19
7.1	2.80	3,000	69	80
8.1	3.40	3,100	72	75

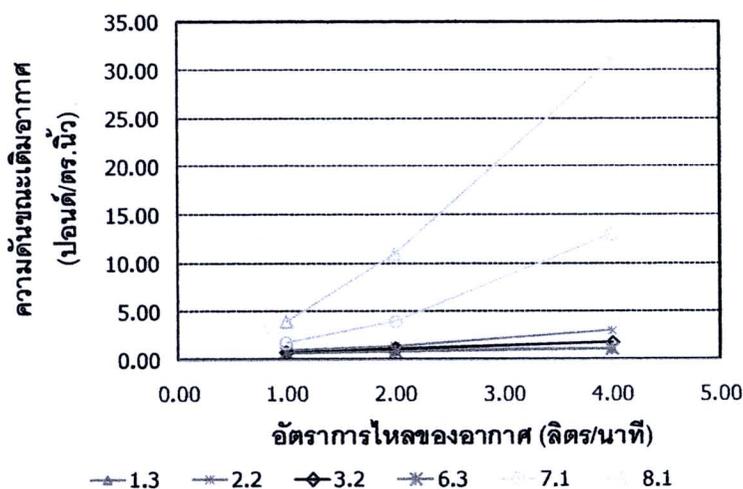
จากตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติทางกายภาพของท่อยึดหยุ่นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5/8 นิ้ว (1.59 ซม.) พบว่า การพิจารณาสมบัติทางกายภาพแยกจากกันไม่สามารถอธิบายผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและค่าความดันขณะเติมอากาศได้อย่างชัดเจน จึงต้องพิจารณาสมบัติต่างๆร่วมกัน เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบจากความหนาผนังท่อและความแข็งต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและค่าความดันขณะเติมอากาศ พบว่ายังไม่สามารถสรุปความสัมพันธ์ได้อย่างชัดเจน เนื่องจากตัวอย่างที่ 8.1 มีความหนาผนังท่อและความแข็งมากที่สุดซึ่งทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและความดันขณะเติมอากาศมากที่สุดตามไปด้วย แต่เมื่อ

เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ 6.3 และ 7.1 ที่มีความหนาแน่นท่อและความแข็งแรงของลงมากลับมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนใกล้เคียงกัน สำหรับค่าความดันขณะเต็มอากาศของตัวอย่างที่ 7.1 มีค่ารองลงมาจากตัวอย่างที่ 8.1 ในขณะที่ตัวอย่างที่ 6.3 มีค่าน้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศ ของตัวอย่างท่อที่ยืดหยุ่นที่วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ

จากรูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศ ของตัวอย่างท่อที่วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ เมื่อเรียงลำดับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนจากมากไปน้อย ตัวอย่างที่มีค่ามากที่สุดคือ 8.1 รองลงมาคือตัวอย่างที่ 6.3 3.2 7.1 2.2 และ 1.3 ตามลำดับ ซึ่งผลการเปรียบเทียบไม่สอดคล้องกับลำดับค่าวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพอย่างชัดเจนนัก เนื่องจากข้อจำกัดของการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่ใช้ถังเต็มอากาศขนาดเล็ก (ปริมาตรน้ำประมาณ 10 ลิตร) และใช้ความยาวท่อที่ยืดหยุ่นสั้น (ท่อยาว 10 ซม.) ทำให้เห็นความสัมพันธ์ได้ไม่ชัดเจน แต่อาจสังเกตในเบื้องต้นได้ว่าตัวอย่างที่มีความหนาแน่นท่อมากโดยส่วนใหญ่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมากตามไปด้วย เนื่องจากรูปทรงของช่องว่างที่ไม่แน่นอนภายในผนังท่อซึ่งถูกใช้เป็นรูเต็มอากาศอาจส่งผลกระทบต่อการกระจายตัวของฟองอากาศได้ดีขึ้นเมื่อมีความหนาแน่นมากขึ้น เพื่อให้อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพของท่อที่ยืดหยุ่นต่อการถ่ายเทออกซิเจนได้ดียิ่งขึ้นจึงต้องพิจารณาถึงค่าความดันขณะเต็มอากาศซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพเชิงพลังงานควบคู่ไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.5



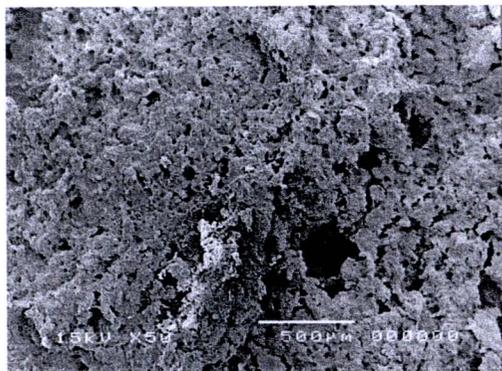
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันขณะเติมอากาศและอัตราการไหลของอากาศของตัวอย่างท่อยึดหยุนที่วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ

จากรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันขณะเติมอากาศและอัตราการไหลของอากาศ ของตัวอย่างท่อยึดหยุนที่วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ พบว่า ตัวอย่างที่ 8.1 ใช้ความดันขณะเติมอากาศมากที่สุด รองลงมาคือตัวอย่างที่ 7.1 2.2 3.2 1.3 และ 6.3 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับลำดับค่าความทนต่อแรงดึงและร้อยละของความยืดอย่างชัดเจน แสดงถึงความเหนียวของท่อยึดหยุนส่งผลกระทบต่อค่าความดันที่ต้องใช้ขณะเติมอากาศ เนื่องจากความดันจากความยืดหยุนของท่อ ด้านทานการขยายขนาดรูเติมอากาศและขีดขวางการไหลผ่านของอากาศ ดังแสดงในสมการที่ 2.27

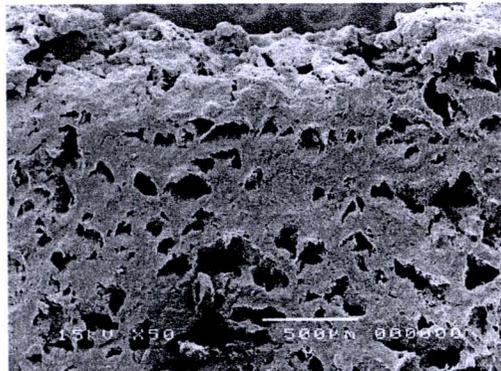
สำหรับตัวอย่างที่ 8.1 ที่มีความหนาผนังท่อ ความทนต่อแรงดึง ความแข็งแรงมากที่สุด และมีค่าร้อยละของความยืดที่สูงเป็นอันดับต้นๆ ส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่นๆ แต่มีข้อเสียทำให้ต้องใช้ค่าความดันขณะเติมอากาศมากที่สุดและมีประสิทธิภาพเชิงพลังงานน้อยที่สุดตามไปด้วย เนื่องจากสมบัติความทนต่อแรงดึงและความยืดซึ่งแสดงถึงความเหนียวของผนังท่อที่ขีดขวางการไหลผ่านของอากาศ ในขั้นตอนของการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศเป็น 4 ลิตร/นาท ซึ่งต้องใช้ค่าความดันสูงถึง 32 ปอนด์/ตร.นิ้ว ค่าความดันดังกล่าวอาจทำให้อากาศสามารถทะลุผ่านรูเติมอากาศขนาดเล็กซึ่งเคยอุดตันมาก่อนได้ ทำให้ขนาดฟองอากาศมีแนวโน้มเล็กลงและประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมีแนวโน้มสูงขึ้น

สำหรับตัวอย่างที่ 6.3 ถึงแม้จะมีความหนาผนังท่อเป็นอันดับที่สอง แต่มีความทนต่อแรงดึงและความยืดน้อย ซึ่งแสดงถึงความเหนียวของผนังท่อที่ขีดขวางการไหลผ่านของอากาศต่ำจึงทำให้ค่าความดันที่ต้องใช้ขณะเติมอากาศต่ำไปด้วย สำหรับค่าความแข็งแรงเท่ากับ 63 ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในอันดับ

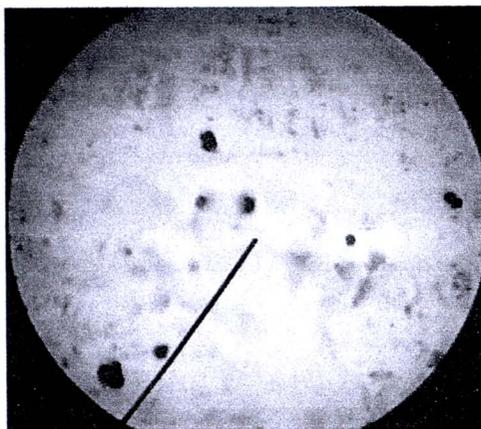
กลางๆเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่นๆ พบว่า ค่าความแข็งในระดับดังกล่าวทำให้ขนาดรูเดิมอากาศไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศในช่วง 1 ถึง 4 ลิตร/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.6



1.) ผนังด้านนอกท่อ



2.) ภาพตัดขวางผนังท่อ



3.) ขนาดรูเดิมอากาศ

รูปที่ 4.6 ภาพแสดงพื้นผิวผนังท่อและรูเดิมอากาศของท่อยึดหุ่น

จากรูปที่ 4.6 ภาพแสดงพื้นผิวผนังท่อและรูเดิมอากาศของท่อยึดหุ่นของตัวอย่างที่ 6.3 พบว่าที่ผนังท่อที่มีรูพรุนจำนวนมากดังแสดงในรูปที่ 1.) และมีรูปทรงของช่องว่างภายในผนังท่อที่ไม่แน่นอนดังแสดงในรูปที่ 2.) ซึ่งถ่ายภาพโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนที่กำลังขยาย 50 เท่า แต่เมื่อวัดขนาดรูเดิมอากาศโดยการหาสี่เหลี่ยมที่อากาศพบที่อากาศสามารถไหลผ่านได้บางรูที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่เท่านั้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเดิมอากาศโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.19 มม. ดังแสดงในรูปที่ 3.) ซึ่งถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยายเท่ากับ 4 เท่า และไม่สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของขนาดรูเดิมอากาศได้เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 1 เป็น 4 ลิตร/นาที ค่าความดันขณะเดิมอากาศเท่ากับ 1.1 ปอนด์/ตร.นิ้ว จึงอาจกล่าวได้ว่าค่าความแข็งส่งผลต่อความคงตัวของขนาดรูเดิมอากาศ โดยที่ค่าความแข็งเท่ากับ 63 ของตัวอย่างท่อที่ 6.3 ทำให้ขนาดรูเดิมอากาศไม่เปลี่ยนแปลงในสภาวะการเดิมอากาศของงานวิจัยนี้

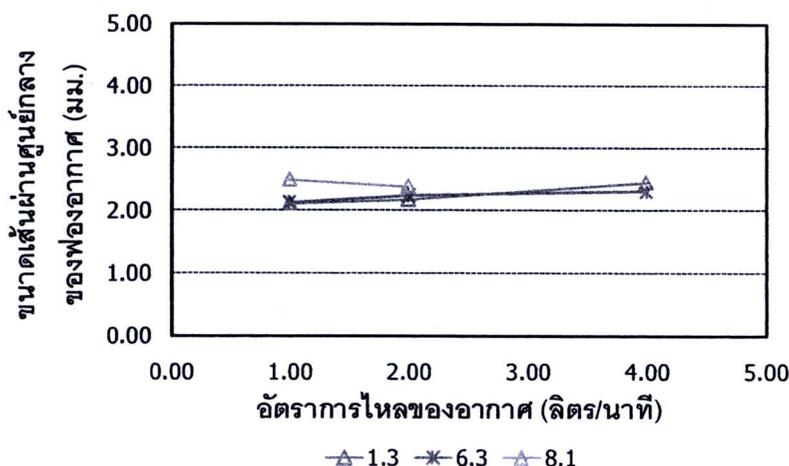
จากผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายของท่อยืดหยุ่น พบว่า ความทนต่อแรงดึงและความยืด เป็นปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อค่าความดันขณะเต็มอากาศซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพเชิงพลังงานของ ท่อยืดหยุ่นอย่างชัดเจน เมื่อท่อยืดหยุ่นมีค่าความทนต่อแรงดึงและความยืดสูงจะส่งผลให้ท่อยืดหยุ่นซึ่งต้านทานการไหลผ่านของอากาศทำให้ต้องใช้ความดันสูงขณะเต็มอากาศจึงมีประสิทธิภาพเชิงพลังงานต่ำ ด้วยสมบัติทางกายภาพต่างๆ ประกอบกันทำให้ตัวอย่างท่อที่ 6.3 มีค่าสัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทออกซิเจนค่อนข้างสูง มีประสิทธิภาพเชิงพลังงานมากที่สุดและมีความเหมาะสมที่สุดในการ ประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์เต็มอากาศชนิดท่อยืดหยุ่น

4.1.3 การศึกษาตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ

สำหรับตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศที่สนใจศึกษาในหัวข้อนี้ประกอบด้วย ขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ และพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะระหว่าง ฟองอากาศและน้ำ โดยการถ่ายภาพด้วยกล้องความเร็วสูง 2,000 ภาพ/วินาที ทำให้สามารถวัดขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางและความเร็วลอยตัวของฟองอากาศได้อย่างชัดเจน หลังจากนั้นจึงนำค่าทั้งสองมา คำนวณเป็นพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศและน้ำตามสมการที่ 2.26 เมื่อทราบค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนจากการทดลองหัวข้อที่ 4.1.1 และพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะแล้ว ทำให้ สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวได้ตามสมการที่ 2.34 จากผล การทดลองในหัวข้อนี้จะทำให้สามารถอธิบายกลไกการถ่ายเทออกซิเจนได้ แต่เนื่องจากข้อจำกัดใน ด้านระยะเวลาและค่าใช้จ่ายสำหรับการวิเคราะห์ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ จึง จำเป็นต้องเลือกตัวอย่างท่อยืดหยุ่นที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่โดดเด่นและน่าสนใจมาทำ การวิเคราะห์ สำหรับการทดลองนี้ได้เลือกตัวอย่างที่ 1.3 6.3 และ 8.1 เป็นตัวแทนของตัวอย่างท่อที่ค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนน้อยที่สุด เหมาะสมที่สุด และมากที่สุดตามลำดับ ทำการวิเคราะห์ ขณะเต็มอากาศด้วยอัตราการไหล 1 2 และ 4 ลิตร/นาที ในน้ำประปาโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

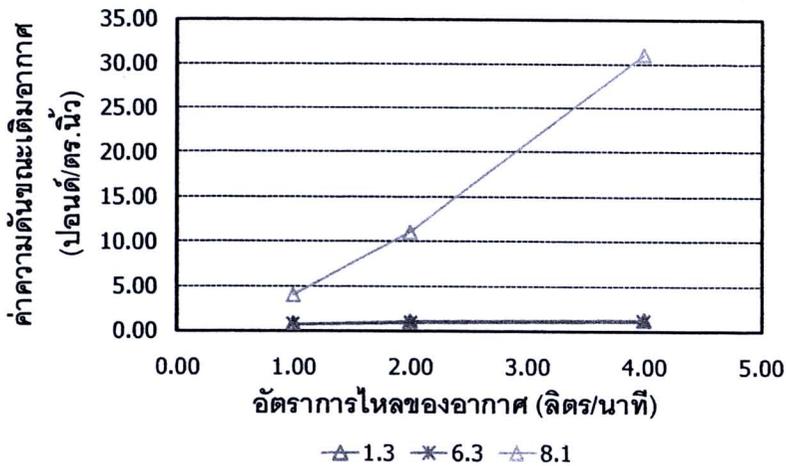
1.) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศสามารถวิเคราะห์ได้จากภาพถ่ายด้วยกล้องความเร็ว สูง โดยสุ่มเลือกตัวอย่างฟองอากาศจำนวน 20 ตัวอย่าง จากภาพถ่ายที่ความลึกประมาณ 0.1 ม.จาก ผิวหน้า วัดขนาดและเฉลี่ยค่าแบบซอเทอร์ (Sauter mean diameter, d_{32}) เนื่องจากการเฉลี่ยโดย ให้ความสำคัญกับอัตราส่วนระหว่างปริมาตรทรงกลมกับพื้นที่ผิวของทรงกลมซึ่งนิยมใช้ในการ วิเคราะห์ฟองอากาศเพราะพื้นที่ผิวของฟองอากาศเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งต่อการถ่ายเทออกซิเจน (Hasanen และคณะ, 2006) รายละเอียดของผลวิเคราะห์ขนาดฟองอากาศเป็นดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศ

จากรูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศที่วิเคราะห์ได้จากภาพถ่ายด้วยกล้องความเร็วสูง พบว่า ขนาดฟองอากาศมีแนวโน้มใหญ่ขึ้นเล็กน้อยประมาณร้อยละ 8 จากขนาด 2.12 เป็น 2.30 มม. (สำหรับตัวอย่างที่ 6.3) เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 1 เป็น 4 ลิตร/นาที ผลดังกล่าวสัมพันธ์กับความแข็งของวัสดุซึ่งควบคุมการเปิดและปิดของรูเดิมอากาศที่มีการเปลี่ยนแปลงต่ำ จึงส่งผลต่อขนาดของฟองอากาศที่ได้ค่อนข้างคงที่ไม่ขึ้นกับอัตราการไหลของอากาศ ปรากฏการณ์ดังกล่าวแตกต่างจากในกรณีของอุปกรณ์เดิมอากาศชนิดอื่นๆ ที่มีความยืดหยุ่นสูง ทำให้ขนาดของฟองอากาศเปลี่ยนแปลงตามอัตราการไหลของอากาศ (Pianmanakul และคณะ, 2004) ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสของฟองอากาศหนึ่งฟองลดลงจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมีแนวโน้มมากขึ้นเพราะการเพิ่มจำนวนฟองอากาศจึงทำให้พื้นที่สัมผัสโดยรวมของฟองอากาศทั้งหมดเพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบขนาดฟองอากาศที่เกิดจากท่อยืดหยุ่นทั้งสามตัวอย่าง พบว่า ตัวอย่างที่ 1.3 และ 6.3 สร้างฟองอากาศได้ขนาดใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของตัวอย่างทั้งสองจึงใกล้เคียงกัน และประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมีแนวโน้มลดลงเหมือนกัน แต่สำหรับตัวอย่างที่ 8.1 ขนาดฟองอากาศใหญ่กว่าฟองอากาศจากตัวอย่างอื่นๆ และมีแนวโน้มลดลง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนจึงมีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่างอื่นๆ ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 1 ถึง 2 ลิตร/นาที แต่กลับสูงขึ้นมากเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศเป็น 4 ลิตร/นาที จากค่าความดันที่จำเป็นในการสร้างฟองอากาศดังแสดงในรูปที่ 4.8

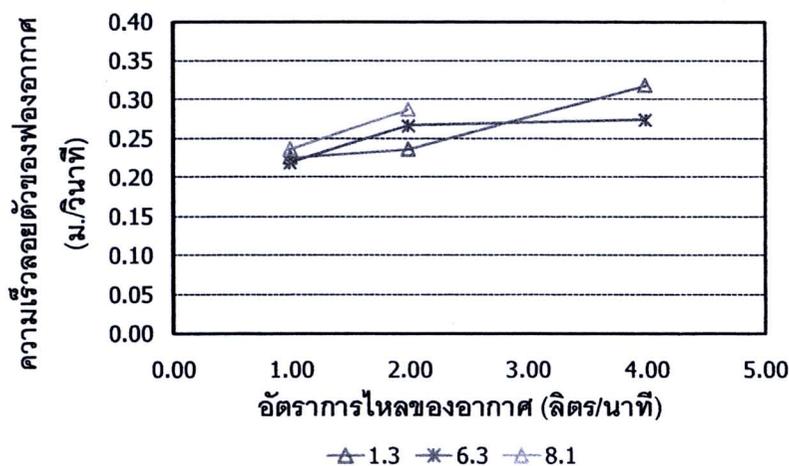


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันขณะเต็มอากาศและอัตราการไหลของอากาศ

จากรูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันขณะเต็มอากาศที่ทำให้เกิดฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศ พบว่า ตัวอย่างที่ 8.1 ต้องใช้ความดันสูงถึง 31 ปอนด์/ตร.นิ้ว ในการสร้างฟองอากาศทำให้อากาศสามารถทะลุผ่านรูเต็มอากาศขนาดเล็กขนาดฟองอากาศจึงมีแนวโน้มเล็กลง ในขณะที่ตัวอย่างอื่นๆโดยส่วนใหญ่ใช้ความดันเพียง 1.4 ปอนด์/ตร.นิ้ว เท่านั้น ค่าความดันที่สูงนี้เป็นอุปสรรคทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ขนาดฟองอากาศและความเร็วลอยตัวของฟองอากาศที่เกิดจากตัวอย่างที่ 8.1 ได้ จึงอาจสรุปในขั้นต้นได้ว่าตัวอย่างที่ 8.1 ไม่เหมาะกับการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์เต็มอากาศเพราะต้องใช้ความดันของเครื่องเป่าอากาศสูงเกินไป

2.) ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ

การวิเคราะห์ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ วิเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนระหว่างระยะทางที่ฟองอากาศลอยขึ้นตามแนวตั้งกับจำนวนภาพที่ถ่ายได้ด้วยความเร็ว 2,000 ภาพ/วินาที ซึ่งคำนวณเป็นระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ดังสมการที่ 2.20 สุ่มเลือกตัวอย่างฟองอากาศจำนวน 20 ตัวอย่างจากภาพถ่ายที่ความลึกประมาณ 0.1 ม.จากผิวน้ำเพื่อนำมาวิเคราะห์และเฉลี่ยโดยจำนวนของฟองอากาศ ผลที่ได้เป็นดังแสดงในรูปที่ 4.9

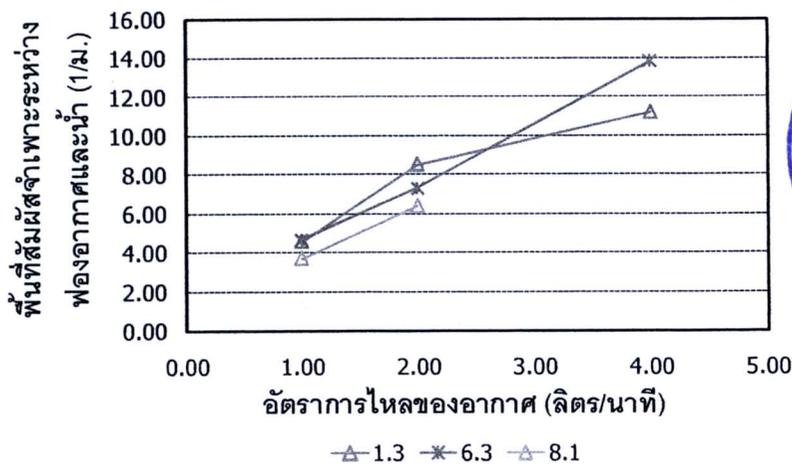


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ และอัตราการไหลของอากาศ

จากรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลอยตัวของฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศของตัวอย่างที่ 1.3 6.3 และ 8.1 พบว่า ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศของตัวอย่างทั้งสามมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขนาดฟองอากาศจาก 0.22 เป็น 0.27 ม./วินาที (สำหรับตัวอย่างที่ 6.3) เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 1 เป็น 4 ลิตร/นาที่ เนื่องจากการเพิ่มขนาดฟองอากาศทำให้ความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างฟองอากาศกับน้ำเพิ่มมากขึ้น ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศจึงสูงขึ้นด้วยซึ่งเป็นไปตามกฎของสโตกส์ดังแสดงในสมการที่ 2.19

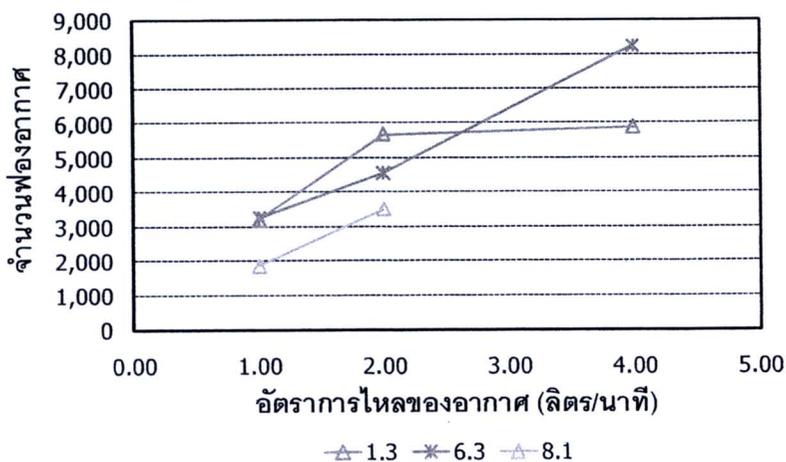
3.) พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศและน้ำ

สำหรับพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศและน้ำ สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความเร็วลอยตัวของฟองอากาศตามสมการที่ 2.26 พบว่าพื้นที่สัมผัสจำเพาะของตัวอย่างทั้งสามมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศและน้ำ และอัตราการใช้ของอากาศ

จากรูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศและน้ำและอัตราการใช้ของอากาศที่เกิดจากท่อยึดหยุ่นทั้งสามตัวอย่าง พบว่า พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะเพิ่มขึ้นประมาณ 3 เท่าคือ 4.68 เป็น 13.82 1/ม. (สำหรับตัวอย่างที่ 6.3) เมื่อเพิ่มอัตราการใช้ของอากาศจาก 1 เป็น 4 ลิตร/นาที่ เนื่องจากการเพิ่มจำนวนฟองอากาศอย่างมากดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.25 พบว่า ในกรณีของตัวอย่างที่ 6.3 จำนวนฟองอากาศเพิ่มขึ้นจาก 3,200 เป็น 8,200 ฟอง เมื่อเพิ่มอัตราการใช้ของอากาศจาก 1 เป็น 4 ลิตร/นาที่ ทำให้พื้นที่สัมผัสจำเพาะและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการใช้ของอากาศ

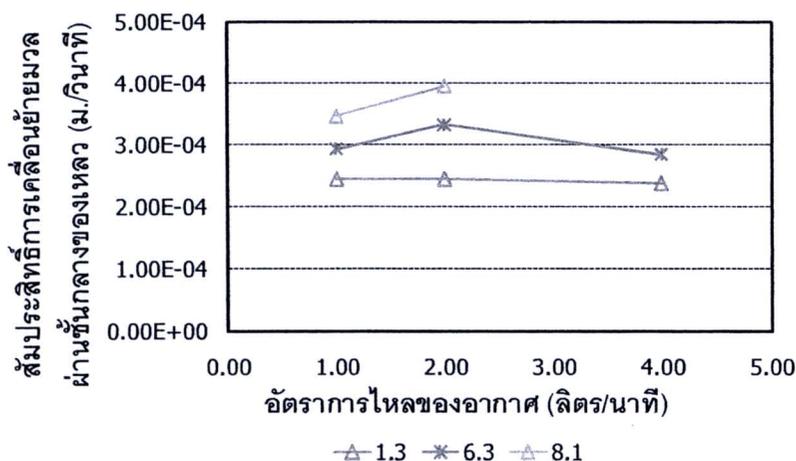


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนฟองอากาศและอัตราการใช้ของอากาศ

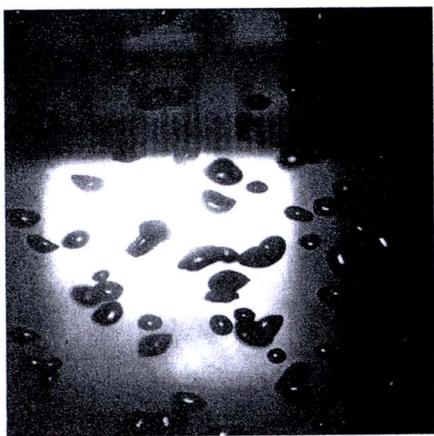
อย่างไรก็ตาม การเพิ่มจำนวนฟองอากาศเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศที่ทำให้เกิดพื้นที่สัมผัสจำเพาะและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนเพิ่มขึ้น กลับทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนลดลง เนื่องจากขนาดฟองอากาศมีแนวโน้มใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนในฟองอากาศสัมผัสกับน้ำและถ่ายเทไปสู่ น้ำได้น้อยลงประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนจึงมีแนวโน้มลดลงตามไปด้วย ประกอบกับค่าความดันที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจึงทำให้มีประสิทธิภาพเชิงพลังงานลดลงตามไปด้วย

4.) สัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว

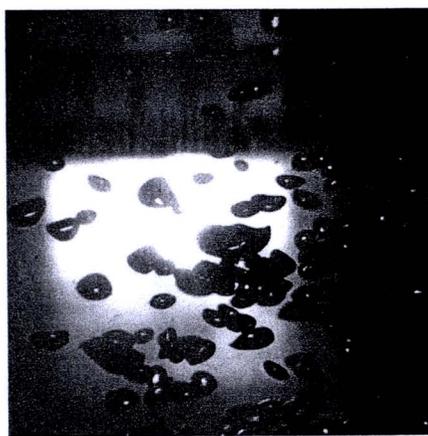
ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวในการทดลองนี้สามารถคำนวณได้จากการหารค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนด้วยพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศและน้ำ ตามสมการที่ 2.34 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวของตัวอย่างที่ 6.3 และ 8.1 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 13.61 คือ 2.93×10^{-4} เป็น 3.33×10^{-4} ม./วินาที เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 1 เป็น 2 ลิตร/นาที และลดลงร้อยละ 14.61 หรือลดลงเป็น 2.84×10^{-4} ม./วินาที (สำหรับตัวอย่างที่ 6.3) เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศเป็น 4 ลิตร/นาที สำหรับตัวอย่างที่ 1.3 ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวมีแนวโน้มลดลงร้อยละ 2.68 หรือลดลงจาก 2.45×10^{-4} เป็น 2.38×10^{-4} ม./วินาที เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 1 เป็น 4 ลิตร/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.12



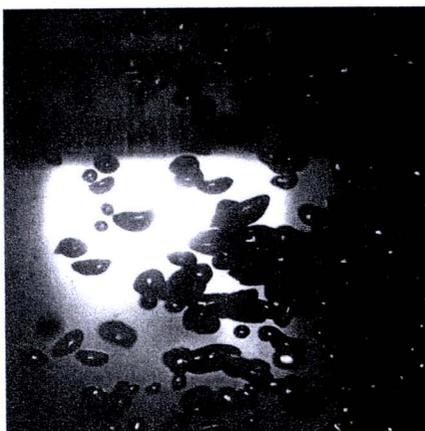
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวและอัตราการไหลของอากาศ



1.) อัตราการไหลของอากาศ 1 ลิตร/นาที



2.) อัตราการไหลของอากาศ 2 ลิตร/นาที



3.) อัตราการไหลของอากาศ 4 ลิตร/นาที

รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายฟองอากาศขณะเติมอากาศด้วยตัวอย่างที่อยุ่ที่ 6.3

จากรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ เนื่องจากความปั่นป่วนในน้ำเพิ่มมากขึ้นและรบกวนการถ่ายเทออกซิเจนผ่านผิวสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับน้ำ จากรูปที่ 4.13 แสดงภาพถ่ายฟองอากาศขณะเติมอากาศโดยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง โดยใช้ตัวอย่างที่อยุ่ที่ 6.3 เป็นอุปกรณ์เติมอากาศ พบว่า จำนวนฟองอากาศเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 1 เป็น 4 ลิตร/นาที การเพิ่มอัตราการไหลของอากาศทำให้เกิดฟองอากาศจำนวนมากที่มีรูปทรงแบนคล้ายใบไม้ผัดเพี้ยนไปจากทรงกลม ฟองอากาศบางฟองมีผิวขรุขระและเคลื่อนไหวตลอดเวลาของการลอยตัวขึ้น และฟองอากาศรูปทรงดังกล่าวโดยส่วนใหญ่มีทิศทางของการลอยตัวไม่เป็นเส้นตรงตามแนวตั้ง นอกจากนี้ ความปั่นป่วนดังกล่าวทำให้ฟองอากาศมีโอกาสชนกันและรวมตัวกัน ทำให้ขนาดฟองอากาศมีแนวโน้มใหญ่ขึ้นพื้นที่ผิวสัมผัสของฟองอากาศหนึ่งฟองจึงลดลงซึ่งสาเหตุให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนลดลง จึงอาจกล่าวได้ว่าการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศส่งผลให้เกิดความปั่นป่วนในน้ำและรบกวนผิวของฟองอากาศ ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่เพิ่ม

มากขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศเป็นผลมาจากการเพิ่มพื้นที่สัมผัสจำเพาะเนื่องจากการเพิ่มจำนวนฟองอากาศเป็นส่วนใหญ่ จึงทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ กชกร ก้องกังวาลย์ และคณะ (2552)

จากผลการทดลองในหัวข้อนี้สามารถสรุปได้ว่า สมบัติทางกายภาพของท่อยืดหยุ่นมีความสัมพันธ์กับกลไกการถ่ายเทออกซิเจนโดยสามารถวิเคราะห์เป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน และตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ โดยที่ค่าความทนต่อแรงดึงและความยืดเป็นปัจจัยหลักต่อค่าความดันที่ต้องใช้ขณะเติมอากาศ ถ้าสมบัติทั้งสองมีค่ามากจะทำให้ต้องใช้ความดันมากขณะเติมอากาศซึ่งส่งผลทำให้ประสิทธิภาพเชิงพลังงานต่ำลง ส่วนความแข็งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดรูเดิมอากาศ สำหรับตัวอย่างที่ 6.3 ที่มีค่าความแข็งเท่ากับ 63 ทำให้รูเดิมอากาศมีขนาดคงที่ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 1 ถึง 4 ลิตร/นาที ที่ความดันขณะเติมอากาศไม่เกิน 1.1 ปอนด์/ตร.นิ้ว จากการศึกษาตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 1 เป็น 4 ลิตร/นาที โดยส่วนใหญ่ขนาดฟองอากาศมีแนวโน้มใหญ่ขึ้นทำให้ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศเพิ่มขึ้นตามไปด้วย การเพิ่มอัตราการไหลของอากาศทำให้เกิดฟองอากาศจำนวนมากจึงส่งผลให้พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำเพิ่มขึ้นอย่างมากซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ขนาดฟองอากาศที่ใหญ่ขึ้นทำให้ออกซิเจนในฟองอากาศสัมผัสกับน้ำได้น้อยลง ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนจึงมีแนวโน้มลดลง

ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพและตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศของท่อยืดหยุ่นตัวอย่างต่างๆ

ตัวอย่างที่	$k_L a$	P	d_b	U_b	a	k_L	OTR
	$\times 10^{-3}$ 1/วินาที	ปอนด์/ตร.นิ้ว	มม.	ม./วินาที	1/ม.	$\times 10^{-4}$ ม./วินาที	มก./กิโลวัตต์-วินาที
1.3	1.12 - 2.66	0.80 - 1.20	2.11 - 2.45	0.22 - 0.32	4.58 - 11.17	2.38 - 2.45	391 - 989
2.2	1.18 - 3.03	1.00 - 3.00	-	-	-	-	178 - 833
3.2	1.06 - 3.37	0.80 - 1.80	-	-	-	-	366 - 936
6.3	1.37 - 3.93	0.80 - 1.10	2.12 - 2.30	0.22 - 0.27	4.68 - 13.82	2.84 - 2.93	631 - 1,210
7.1	1.21 - 3.62	1.80 - 13.00	-	-	-	-	49 - 475
8.1	1.22 - 1.28	4.00 - 31.00	2.38 - 2.49	0.24 - 0.29	3.70 - 6.36	3.46 - 3.94	69 - 226

จากการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและประสิทธิภาพเชิงพลังงานทำให้สามารถเลือกท่อยึดหยุ่นตัวอย่างที่ 6.3 เพื่อประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยึดหยุ่นและใช้ศึกษาแนวทางการใช้งานในหัวข้อถัดไป

4.2 การศึกษาผลกระทบจากสภาวะการทำงานต่างๆต่อประสิทธิภาพการเติมอากาศ การอุดตัน และวิธีทำความสะอาดที่เหมาะสม

การทดลองในหัวข้อนี้ประกอบไปด้วยการศึกษาผลกระทบจากสารเจือปนในน้ำต่อการถ่ายเทออกซิเจน ศึกษาระยะเวลาที่อาจก่อให้เกิดการอุดตันจากการหยุดเติมอากาศ ตลอดจนวิธีทำความสะอาดที่เหมาะสมเพื่อศึกษาแนวทางการประยุกต์ใช้ท่อยึดหยุ่นเป็นอุปกรณ์เติมอากาศ เมื่อเลือกตัวอย่างท่อที่ 6.3 เป็นอุปกรณ์เติมอากาศ และจำแนกลักษณะของน้ำที่ต้องการเติมอากาศออกเป็น 3 ประเภทหลักๆคือ น้ำที่ถูกเจือปนด้วยของแข็งแขวนลอยโดยใช้ดินขาวเป็นสารเจือปน น้ำที่ถูกเจือปนด้วยของแข็งละลายโดยใช้เกลือเป็นสารเจือปน และน้ำที่ถูกเจือปนด้วยของแข็งแขวนลอยในรูปเซลล์จุลชีพโดยใช้จุลชีพจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน เพื่อจำลองลักษณะน้ำที่ต้องการเติมอากาศในสภาวะการทำงานจริงเป็นน้ำจากแม่น้ำลำคลองซึ่งมีตะกอนและความขุ่น น้ำทะเลซึ่งมีเกลือและของแข็งละลายอื่นๆเจือปน และน้ำเสียชุมชนในถังเติมอากาศซึ่งมีเซลล์จุลชีพเจือปน ตามลำดับโดยมีลักษณะของน้ำที่สนใจศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สมบัติของน้ำที่ต้องการเติมอากาศ

ลักษณะน้ำ	ความเข้มข้น	ความหนาแน่น	แรงตึงผิว	ความหนืด	ความเป็นต่าง
	มก./ลิตร	กก./ลบ.ม.	กก./วินาที ²	กก./ม.-วินาที	มก./ลิตร CaCO ₃
น้ำประปา	-	997.00	0.072	0.001	88
ของแข็งแขวนลอย (ดินขาว)	50	980.80	0.072	0.001	100
	100	985.00	0.072	0.001	96
	200	989.20	0.072	0.001	96
ของแข็งละลาย (เกลือ)	7,500	990.90	0.072	0.001	100
	20,000	1001.00	0.073	0.001	100
	30,000	1009.40	0.074	0.001	100
น้ำทะเล	-	1006.20	0.073	0.001	120
ของแข็งแขวนลอย ในรูปเซลล์จุลชีพ (MLSS)	1,000	984.40	0.063	0.001	96
	2,000	986.90	0.048	0.001	96
	3,000	989.00	0.044	0.001	96

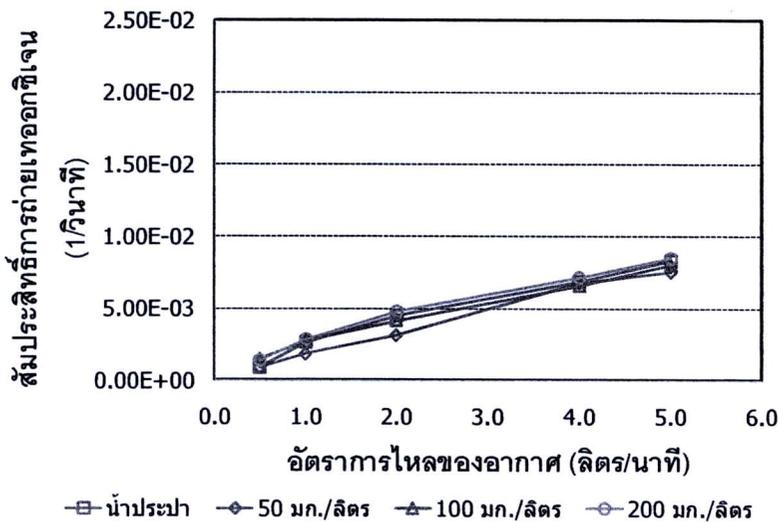
จากตารางที่ 4.3 แสดงสมบัติของน้ำที่ต้องการศึกษาผลกระทบต่อการถ่ายเทออกซิเจนโดยกำหนดความเข้มข้นของสารเจือปนจากลักษณะของน้ำที่พบได้ทั่วไป เช่น ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยที่พบได้จากแหล่งน้ำผิวดิน ความเข้มข้นของของแข็งละลายที่พบได้จากน้ำกร่อยและน้ำทะเล และปริมาณความเข้มข้นของเซลล์จุลชีพในถังเติมอากาศในระบบบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น สำหรับรายละเอียดของผลกระทบต่อการถ่ายเทออกซิเจนซึ่งวิเคราะห์โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและการศึกษาตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ เป็นดังนี้

4.2.1 การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของท่อยืดหยุ่นในสภาวะการทำงานต่างๆ

จากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนโดยใช้ตัวอย่างท่อยืดหยุ่นที่ 6.3 เป็นอุปกรณ์เติมอากาศ ทำการเติมอากาศในช่วงอัตราการไหล 0.5 ถึง 5 ลิตร/นาที ในน้ำที่ถูกเจือปนด้วยสารตามที่กำหนดซึ่งมีปริมาตรประมาณ 10 ลิตร มีผลการวิเคราะห์เป็นดังนี้

1.) สภาวะที่น้ำถูกเจือปนด้วยของแข็งแขวนลอย

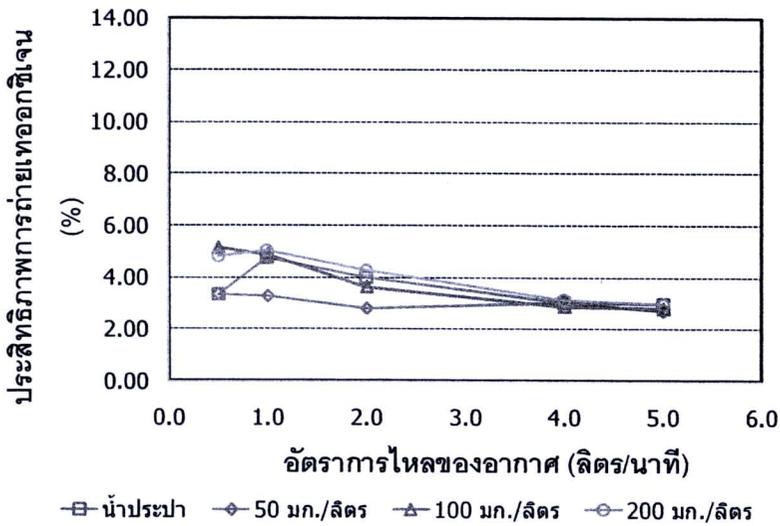
จากผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำซึ่งถูกเจือปนด้วยดินขาว โดยมีความเข้มข้นเท่ากับ 50 100 และ 200 มก./ลิตร ผลที่ได้เป็นดังในแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาว

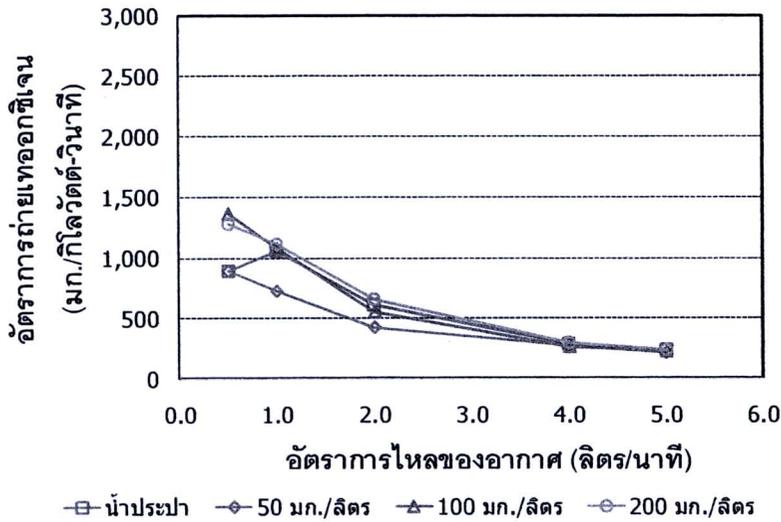
จากรูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวเปรียบเทียบกับในน้ำประปา พบว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในสภาวะที่น้ำถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวทั้งสามความเข้มข้นมีค่าใกล้เคียงกับในน้ำประปา โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นประมาณ 6 เท่าจาก 1.37×10^{-3} เป็น 8.50×10^{-3} 1/วินาที เมื่อเพิ่ม

อัตราการไหลของอากาศจาก 0.5 เป็น 5.0 ลิตร/นาที (สำหรับความเข้มข้น 200 มก./ลิตร) สำหรับประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนเป็นดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาว

จากรูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวเปรียบเทียบกับในน้ำประปา พบว่า ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีแนวโน้มลดลงจากร้อยละ 4.84 เป็น 3.00 เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 0.5 เป็น 5.0 ลิตร/นาที (สำหรับความเข้มข้น 200 มก./ลิตร) สาเหตุที่ผลการเปรียบเทียบการเติมอากาศในน้ำประปากับน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวไม่แตกต่างกัน เพราะความเข้มข้นของดินขาวอยู่ในระดับที่ต่ำสมบัติของน้ำจึงไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนจึงมีค่าใกล้เคียงกับการเติมอากาศในน้ำประปา สำหรับประสิทธิภาพเชิงพลังงานเป็นดังแสดงในรูปที่ 4.16

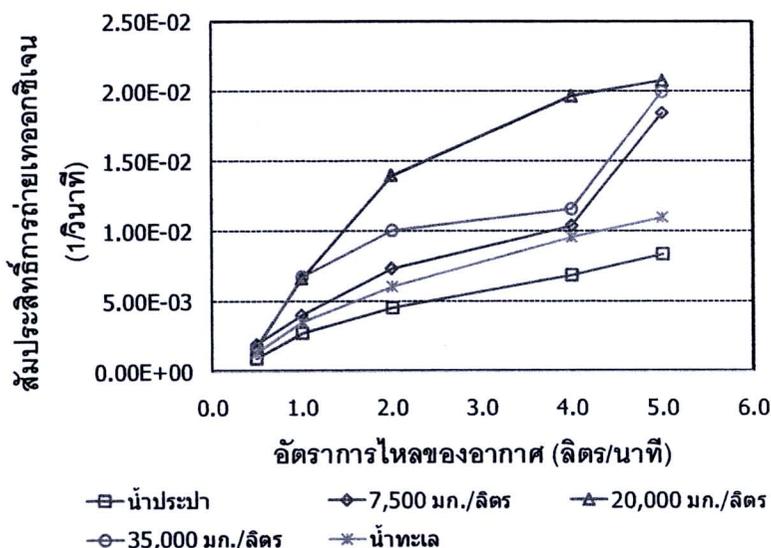


รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตรการถ่ายเทออกซิเจนและอัตรการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาว

จากรูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตรการถ่ายเทออกซิเจนและอัตรการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวเปรียบเทียบ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับในน้ำประปาเนื่องจากใช้ท่อยึดหยุ่นตัวอย่าง 6.3 เป็นอุปกรณ์เติมอากาศเหมือนกัน ค่าความดันขณะเติมอากาศจึงเท่ากับความดันที่ใช้เติมอากาศในน้ำประปา ประกอบกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่ใกล้เคียงกันจึงทำให้อัตรการถ่ายเทออกซิเจนมีค่าใกล้เคียงกันตามไปด้วย

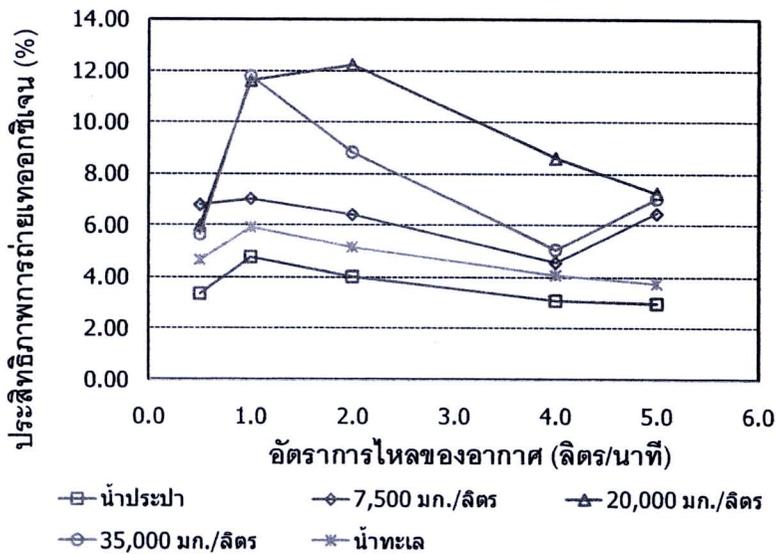
2.) สภาวะที่น้ำถูกเจือปนด้วยของแข็งละลาย

การทดลองในหัวข้อนี้ได้วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำที่ถูกเจือปนด้วยเกลือเพื่อใช้เป็นตัวแทนของของแข็งละลายในน้ำกร่อยและน้ำทะเล โดยมีความเข้มข้น 7,500 20,000 และ 35,000 มก./ลิตร เปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำประปาและน้ำทะเล เพื่อศึกษาผลกระทบจากการปนเปื้อนด้วยของแข็งละลายต่อการถ่ายเทออกซิเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.17



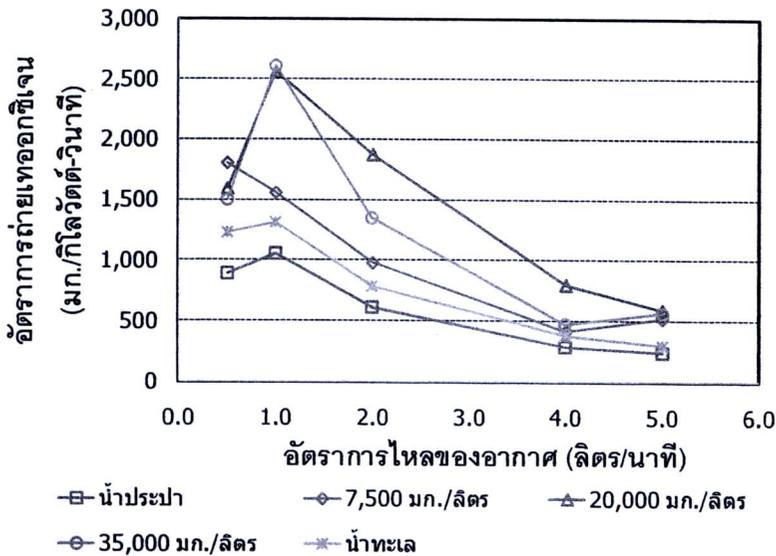
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและอัตรากาการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเกลือ

จากรูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและอัตรากาการไหลของอากาศในน้ำเกลือและน้ำทะเลเปรียบเทียบกับในน้ำประปา พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตรากาการไหลของอากาศ โดยค่าสัมประสิทธิ์ในน้ำเกลือมีค่ามากกว่าในน้ำประปาประมาณ 2.55 เท่า คือเพิ่มจาก 1.72×10^{-3} เป็น 2.08×10^{-2} 1/วินาที เมื่อเพิ่มอัตรากาการไหลของอากาศจาก 0.5 เป็น 5.0 ลิตร/นาที่ (สำหรับน้ำเกลือความเข้มข้น 20,000 มก./ลิตร) และพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ในน้ำเกลือที่มากกว่าในน้ำประปา 1.78 เท่าเพิ่มขึ้นเป็น 2.55 เท่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเกลือจาก 7,500 เป็น 20,000 มก./ลิตร แต่กลับลดลงเป็น 2.10 เท่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 35,000 มก./ลิตร สำหรับในน้ำทะเลมีค่าสัมประสิทธิ์มากกว่าในน้ำประปา 1.36 เท่า คือเพิ่มจาก 1.37×10^{-3} เป็น 1.10×10^{-2} 1/วินาที เมื่อเพิ่มอัตรากาการไหลของอากาศจาก 0.5 เป็น 5.0 ลิตร/นาที่ สำหรับประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนพบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตรากาการไหลของอากาศจาก 0.5 เป็น 1.0 ลิตร/นาที่ หลังจากนั้นแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตรากาการไหลของอากาศเป็น 5.0 ลิตร/นาที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเกลือ

จากรูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเกลือ พบว่าในน้ำเกลือความเข้มข้น 20,000 มก./ลิตร มีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมากกว่าในน้ำประปาประมาณ 2.51 เท่า โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 6.01 เป็น 11.61 เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 0.5 เป็น 1.0 ลิตร/นาที่ หลังจากนั้นเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยเป็นร้อยละ 12.22 ที่อัตราการไหล 2.0 ลิตร/นาที่ และมีแนวโน้มลดลงเป็นร้อยละ 7.26 เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเป็น 5.0 ลิตร/นาที่ ในขณะที่น้ำทะเลมีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมากกว่าในน้ำประปาประมาณ 1.30 เท่า โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 4.65 เป็น 5.95 เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 0.5 เป็น 1.0 ลิตร/นาที่ และหลังจากนั้นมีแนวโน้มลดลงเป็นร้อยละ 3.73 เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเป็น 5.0 ลิตร/นาที่ สำหรับอัตราการถ่ายเทออกซิเจน เนื่องจากความดันขณะเติมอากาศมีค่าใกล้เคียงกันค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลงคล้ายกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเกลือ

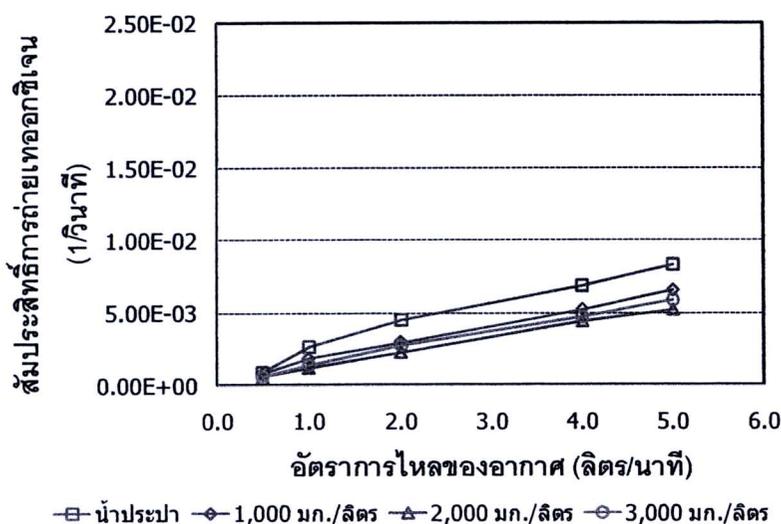
จากรูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเกลือ พบว่าในน้ำเกลือความเข้มข้น 20,000 มก./ลิตร มีค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนมากกว่าในน้ำประปาประมาณ 2.51 เท่า โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1,594 เป็น 2,568 มก./กิโลวัตต์-วินาที เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 0.5 เป็น 1.0 ลิตร/นาที หลังจากนั้นมามีค่าลดลงเป็น 590 มก./กิโลวัตต์-วินาที เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเป็น 5.0 ลิตร/นาที ในน้ำทะเลมีค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนมากกว่าในน้ำประปาประมาณ 1.30 เท่า โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1,234 เป็น 1,317 มก./กิโลวัตต์-วินาที เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 0.5 เป็น 1.0 ลิตร/นาที หลังจากนั้นมามีค่าลดลงเป็น 303 มก./กิโลวัตต์-วินาที

สาเหตุที่ในน้ำเกลือมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมากกว่าในน้ำประปา เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของเกลือทำให้เกิดปริมาณไอออนในน้ำมากขึ้นจากการแตกตัวของเกลือเป็นโซเดียมไอออน (Na^+) และคลอไรด์ไอออน (Cl^-) ซึ่งไอออนดังกล่าวทำให้แรงตึงผิวของน้ำเพิ่มขึ้นและขัดขวางการรวมตัวของฟองอากาศทำให้ฟองอากาศมีขนาดเล็กลง พื้นที่สัมผัสจำเพาะจึงมีค่ามากขึ้นส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน และอัตราการถ่ายเทออกซิเจนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเกลือมากขึ้นไปอีกปริมาณไอออนดังกล่าวจะรบกวนการซึมของออกซิเจนผ่านผิวสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับน้ำส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวลดลง ค่าของประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารทั้งสามจึงลดลงตามไปด้วย (Jamnongwong และคณะ, 2010) สำหรับน้ำทะเลที่มีปริมาณของแข็งแขวนลอย 244 มก./ลิตร และของแข็งละลายเท่ากับ 40,511 มก./ลิตร ซึ่งมีการปนเปื้อนจากไอออนชนิดอื่น ๆ นอกจากโซเดียมไอออน

และคลอไรด์ไอออน และมีแรงตึงผิวเท่ากับ 0.073 กก./วินาที² ซึ่งน้อยกว่าในน้ำเกลือ จึงมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนต่ำกว่าน้ำเกลือความเข้มข้น 35,000 มก./ลิตร

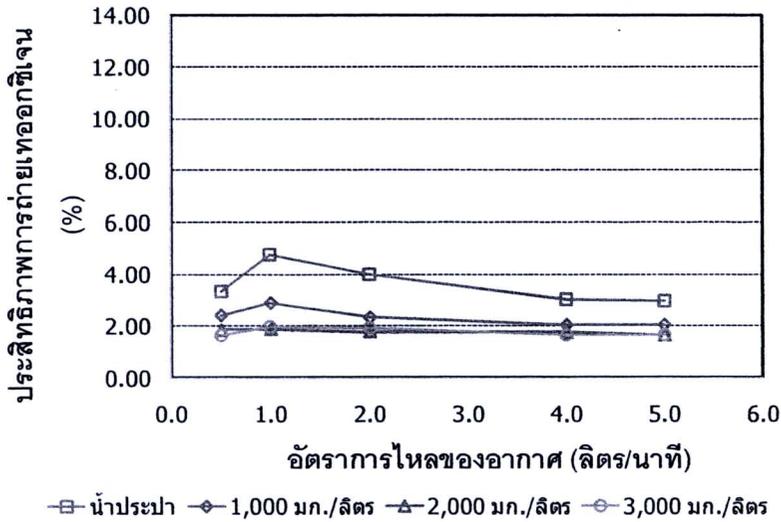
3.) สภาวะที่น้ำถูกเจือปนด้วยของแข็งแขวนลอยในรูปเซลล์จุลชีพ

การทดลองในหัวข้อนี้ได้วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำที่ถูกเจือปนด้วยของแข็งแขวนลอยในรูปเซลล์จุลชีพเพื่อจำลองสภาวะการเติมอากาศในถังเติมอากาศของระบบบำบัดน้ำเสีย โดยมีความเข้มข้น 1,000 2,000 และ 3,000 มก./ลิตร ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่พบได้ทั่วไปในระบบบำบัดน้ำเสีย เปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำประปา พบว่า ในน้ำที่ถูกเจือปนด้วยเซลล์จุลชีพมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนน้อยกว่าในน้ำประปา ดังแสดงในรูปที่ 4.20

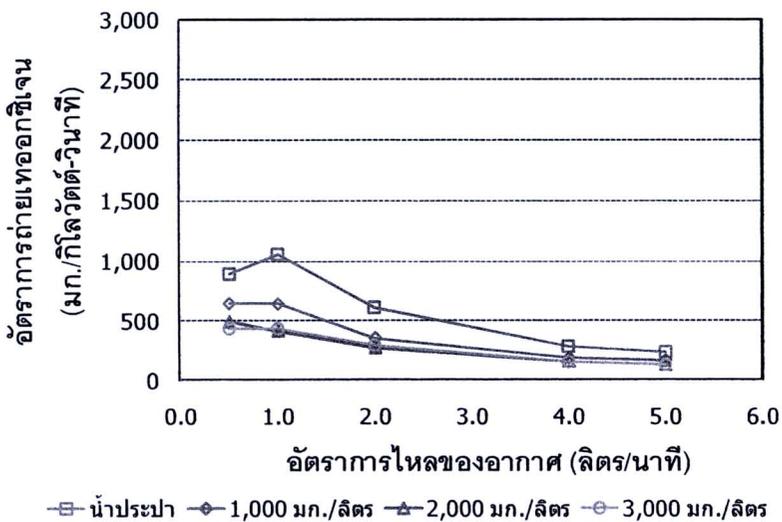


รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยของแข็งแขวนลอยในรูปเซลล์จุลชีพ

จากรูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพ พบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมีค่าน้อยกว่าในน้ำประปาประมาณ 0.65 เท่า คือมีค่าเท่ากับ 7.80×10^{-4} เพิ่มขึ้นเป็น 6.57×10^{-3} 1/วินาที เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 0.5 เป็น 5.0 ลิตร/นาที่ (สำหรับความเข้มข้น 1,000 มก./ลิตร) และค่าสัมประสิทธิ์มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเซลล์จุลชีพ สำหรับค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพพบว่ามีค่าต่ำกว่าในน้ำประปาประมาณ 0.55 เท่า โดยที่มีค่าเป็นร้อยละ 2.45 เพิ่มขึ้นเป็น 2.92 ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 0.5 ถึง 1.0 ลิตร/นาที่ หลังจากนั้นลดลงเป็นร้อยละ 2.07 เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเป็น 5.0 ลิตร/นาที่ (สำหรับความเข้มข้น 1,000 มก./ลิตร) ดังแสดงในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยของแข็งแขวนลอยในรูปเซลลูลูสซีฟ



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยของแข็งแขวนลอยในรูปเซลลูลูสซีฟ

จากรูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลลูลูสซีฟ พบว่า อัตราการถ่ายเทออกซิเจนในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลลูลูสซีฟมีค่าน้อยกว่าในน้ำประปาประมาณ 0.55 เท่า โดยที่มีค่าเท่ากับ 651 ลดลงเป็น 168 มก./กิโวลต์-วินาที เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 0.5 เป็น 5.0 ลิตร/นาที (สำหรับความเข้มข้น 1,000 มก./ลิตร) สาเหตุที่ทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลลูลูสซีฟมีค่าน้อยกว่าในน้ำประปา เนื่องจากการนำเซลลูลูสซีฟจากระบบบำบัดน้ำเสีย

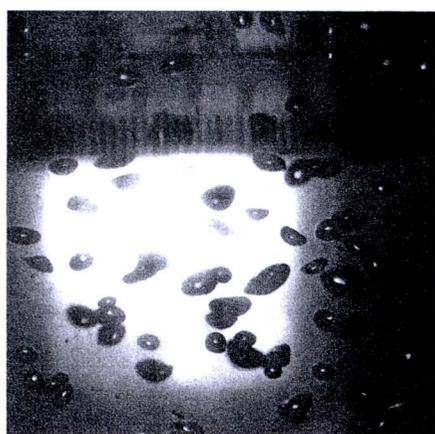
มาเจือจางในน้ำประปาตามความเข้มข้นที่กำหนด ปริมาณไอออนที่มีอยู่ในน้ำเสียเดิมหรือที่เกิดจากการสังเคราะห์โดยจุลชีพจึงเจือปนอยู่ในน้ำที่ต้องการเติมอากาศซึ่งไอออนดังกล่าวอาจเป็นสารประเภทสารลดแรงตึงผิวเนื่องจากค่าแรงตึงผิวของน้ำลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเซลล์จุลชีพ (ดังแสดงในตารางที่ 4.3) ปริมาณไอออนดังกล่าวจะล้อมรอบฟองอากาศทำให้ฟองอากาศมีขนาดเล็กลงแต่รบกวนการซึมของออกซิเจนผ่านผิวสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับน้ำส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวลดลงอย่างมาก (Hebrard และคณะ, 2000) ประกอบกับความสามารถในการละลายของออกซิเจนลดลงซึ่งสังเกตได้จากความเข้มข้น ณ จุดอิ่มตัวของออกซิเจนละลายลดลงจาก 8.24 มก./ลิตร (ในน้ำประปา) ลดลงเป็น 6.50 มก./ลิตร (สำหรับเซลล์จุลชีพความเข้มข้น 3,000 มก./ลิตร) จึงส่งผลให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน และอัตราการถ่ายเทออกซิเจนมีค่าน้อยกว่าในน้ำประปาเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเซลล์จุลชีพ

4.2.2 การศึกษาตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศขณะเติมอากาศในสภาวะการทำงานต่างๆ

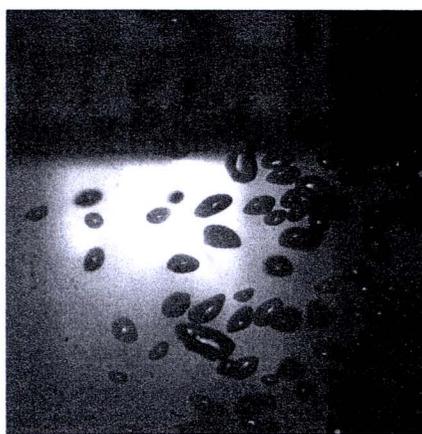
การวิเคราะห์ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศในหัวข้อนี้ได้วิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ และความเร็วลอยตัวของฟองอากาศจากภาพถ่ายโดยกล้องความเร็วสูงขณะเติมอากาศด้วยอัตราการไหล 1.0 และ 4.0 ลิตร/นาที ใช้ท่อยึดหุ่นตัวอย่างที่ 6.3 เป็นอุปกรณ์เติมอากาศแบบท่อน้ำที่ถูกเจือปนด้วยสารตามที่กำหนด (ดินขาว เกลือ และจุลชีพจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน) หลังจากนั้นจึงคำนวณค่าพื้นที่สัมผัสจำเพาะและค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว เพื่อเปรียบเทียบตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศขณะเติมอากาศในน้ำประปา โดยมีผลการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1.) สภาวะที่น้ำถูกเจือปนด้วยของแข็งแขวนลอย

จากการวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความเร็วลอยตัวของฟองอากาศโดยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง ในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวซึ่งใช้เป็นตัวแทนของแข็งแขวนลอยความเข้มข้น 50 100 และ 200 มก./ลิตร พบว่า ขนาดฟองอากาศและความเร็วลอยของฟองอากาศขณะเติมอากาศในสภาวะดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับการเติมอากาศในน้ำประปา ดังแสดงในรูปที่ 4.23 ซึ่งเป็นภาพถ่ายฟองอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวทั้งสามความเข้มข้นเปรียบเทียบกับเติมอากาศในน้ำประปาด้วยอัตราการไหลของอากาศ 1.0 ลิตร/นาที



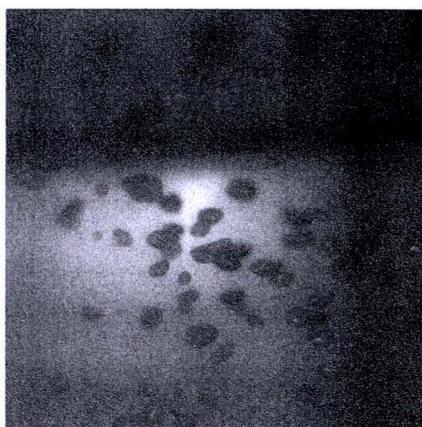
1.) น้ำประปา



2.) ดินขาว 50 มก./ลิตร

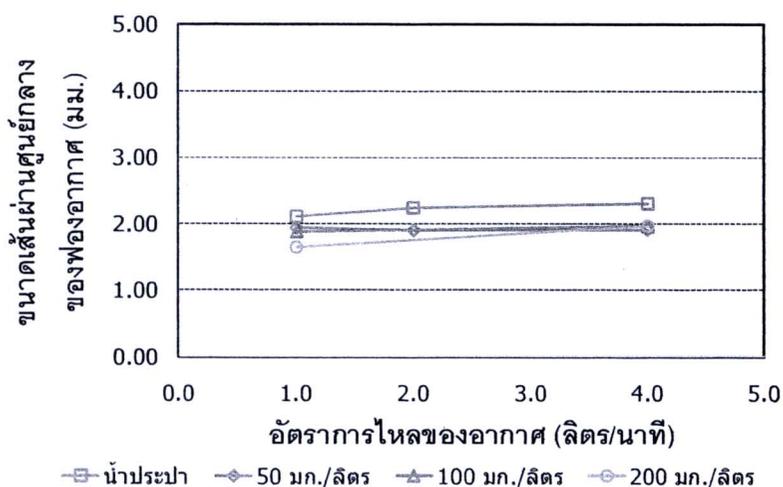


3.) ดินขาว 100 มก./ลิตร



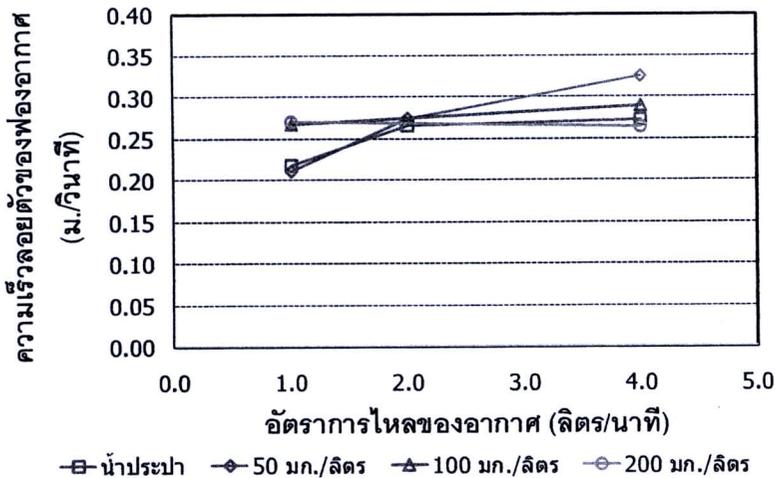
3.) ดินขาว 200 มก./ลิตร

รูปที่ 4.23 ภาพถ่ายฟองอากาศขณะเติมอากาศในน้ำที่ถูกเจือปนด้วยดินขาว
เปรียบเทียบกับในน้ำประปา



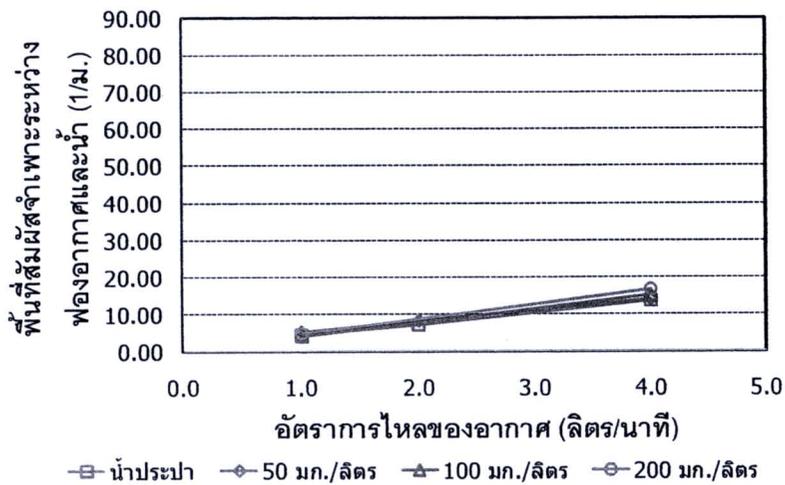
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาว

จากรูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวเปรียบเทียบกับในน้ำประปา พบว่า ขนาดฟองอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวมีขนาดเล็กกว่าในน้ำประปาเล็กน้อย คือมีขนาดเท่ากับ 1.65 เพิ่มขึ้นเป็น 1.97 มม. เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 1.0 เป็น 4.0 ลิตร/นาที (สำหรับความเข้มข้นเท่ากับ 200 มก./ลิตร) สำหรับความเร็วลอยตัวของฟองอากาศมีค่าใกล้เคียงกับในน้ำประปา ดังแสดงในรูปที่ 4.25



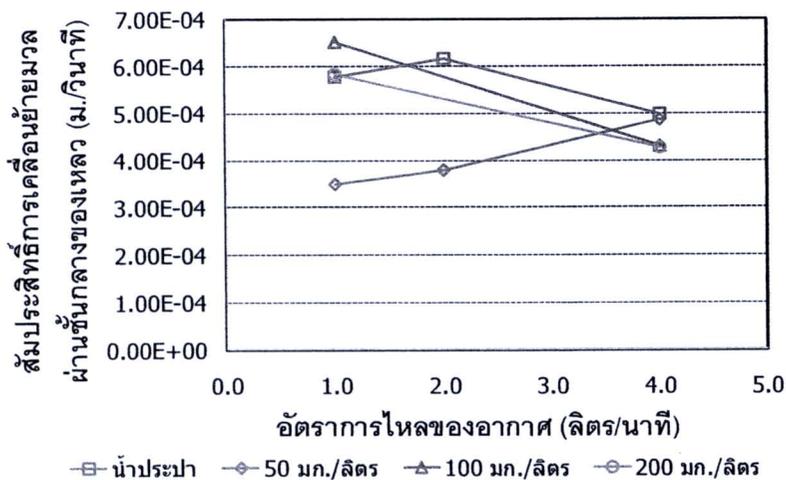
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลอยตัวของฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาว

จากรูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลอยตัวของฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวเปรียบเทียบกับในน้ำประปา พบว่า มีค่าใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มคงที่คือ 0.27 เป็น 0.26 ม./วินาที เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 1.0 เป็น 4.0 ลิตร/นาที (สำหรับความเข้มข้นเท่ากับ 200 มก./ลิตร) ขนาดฟองอากาศและความเร็วลอยตัวของฟองอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวที่มีค่าใกล้เคียงกับในน้ำประปา เมื่อนำค่าตัวแปรทั้งสองไปคำนวณค่าพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำจึงทำให้มีค่าใกล้เคียงกับในน้ำประปาตามไปด้วย โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 4.89 เป็น 16.73 1/ม. เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 1.0 เป็น 4.0 ลิตร/นาที (สำหรับความเข้มข้นเท่ากับ 200 มก./ลิตร) ดังแสดงในรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศและน้ำ และอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาว

เมื่อคำนวณค่าพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศและน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาว ดังแสดงในรูปที่ 4.26 หลังจากนั้นจึงสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวได้ พบว่า สัมประสิทธิ์ดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับน้ำประปาและมีแนวโน้มลดลงในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 1.0 ถึง 4.0 ลิตร/นาที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว และอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาว

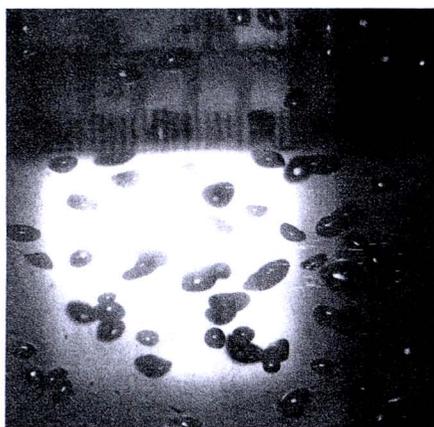
จากรูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวเปรียบเทียบกับในน้ำประปา

พบว่า ในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวมีค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวใกล้เคียงกับในน้ำประปาโดยมีแนวโน้มลดลงจาก 5.85×10^{-4} เป็น 4.28×10^{-4} ม./วินาที เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 1.0 เป็น 4.0 ลิตร/นาที (สำหรับความเข้มข้น 200 มก./ลิตร)

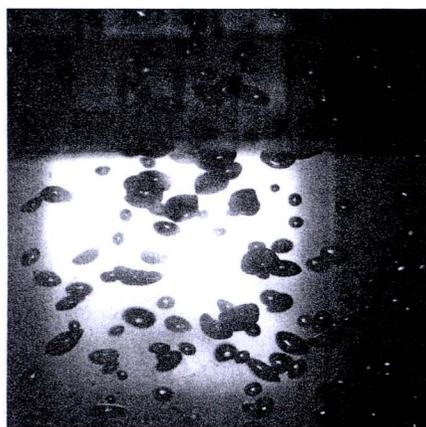
จากผลการทดลองในหัวข้อนี้อาจสรุปในเบื้องต้นได้ว่า น้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวซึ่งใช้เป็นตัวแทนของของแข็งแขวนลอยที่ความเข้มข้น 50 100 และ 200 มก./ลิตร ไม่ส่งผลกระทบต่อส่งผลกระทบเพียงเล็กน้อยซึ่งไม่สามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนต่อกลไกการถ่ายเทออกซิเจนขณะเติมอากาศสำหรับงานวิจัยนี้ เนื่องจากมีสมบัติของน้ำไม่แตกต่างไปจากน้ำประปามากนัก จึงทำให้ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศขณะเติมอากาศ ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ และความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ มีค่าใกล้เคียงกับการเติมอากาศในน้ำประปา เมื่อคำนวณเป็นตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสาร ได้แก่ พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำ และสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว จึงมีค่าใกล้เคียงกันตามไปด้วย ดังนั้น สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน และประสิทธิภาพเชิงพลังงานในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวจึงมีค่าใกล้เคียงกับในน้ำประปา

2.) สภาวะที่น้ำถูกเจือปนด้วยของแข็งละลาย

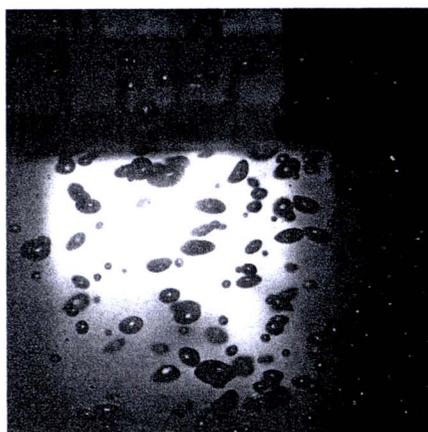
จากการวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ และความเร็วลอยตัวของฟองอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเกลือความเข้มข้น 7,500 20,000 และ 35,000 มก./ลิตร พบว่า ฟองอากาศที่เกิดขึ้นขณะเติมอากาศในน้ำเกลือมีขนาดเล็กกว่าในน้ำประปา และมีขนาดเล็กลงอีกเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเกลือจาก 7,500 เป็น 35,000 มก./ลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.28



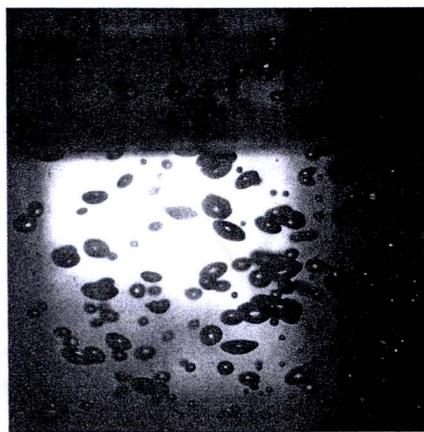
1.) น้ำประปา



2.) เกลือ 7,500 มก./ลิตร

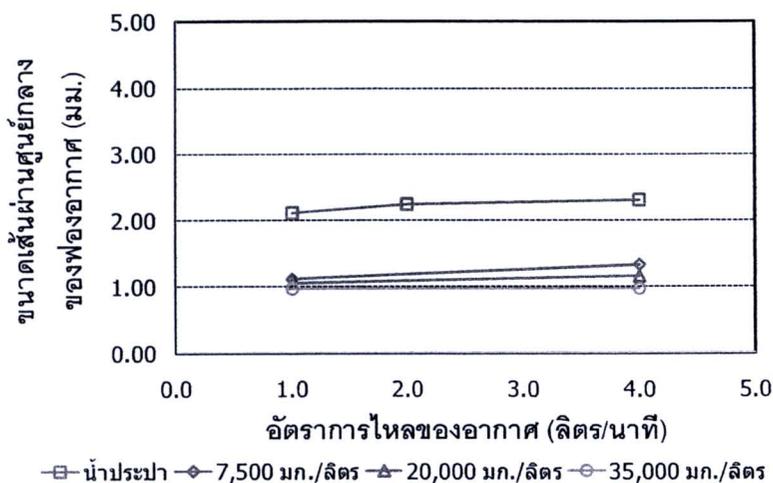


3.) เกลือ 20,000 มก./ลิตร



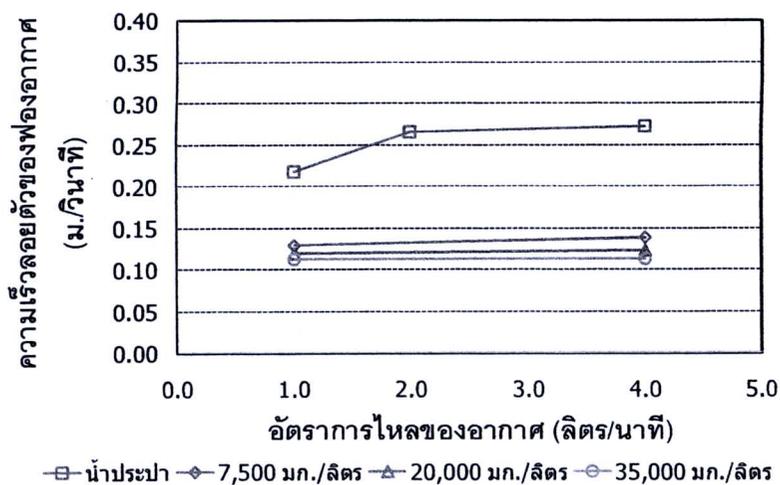
4.) เกลือ 35,000 มก./ลิตร

รูปที่ 4.28 ภาพถ่ายฟองอากาศขณะเติมอากาศในน้ำที่ถูกเจือปนด้วยเกลือบเทียบเทียบกับในน้ำประปา



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเกลือบ

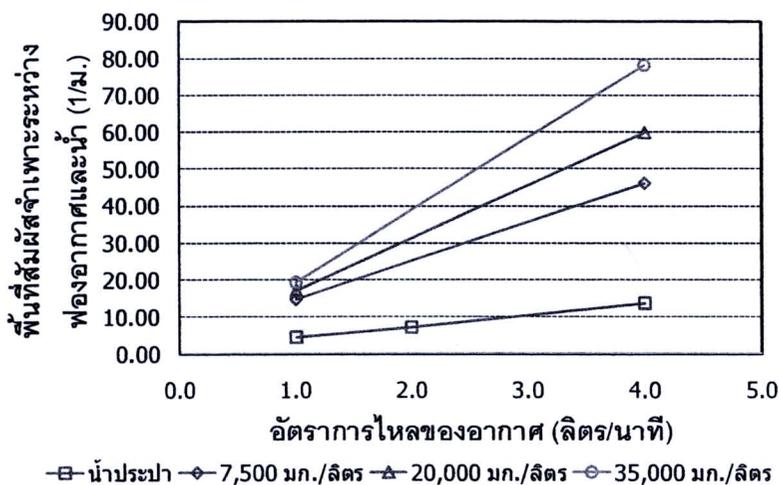
จากรูปที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเกลือบ พบว่า ฟองอากาศในน้ำเกลือบมีขนาดเล็กกว่าในน้ำประปาประมาณร้อยละ 50 และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเกลือบจาก 7,500 เป็น 35,000 มก./ลิตร ฟองอากาศมีขนาดเล็กลงจากเดิมประมาณร้อยละ 20 แสดงถึงการรวมตัวของฟองอากาศน้อยลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเกลือบ นอกจากนั้นขนาดฟองอากาศมีแนวโน้มคงที่ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 1.0 ถึง 4.0 ลิตร/นาที จากแนวโน้มของขนาดฟองอากาศในน้ำเกลือบที่คงที่และมีขนาดเล็กกว่าในน้ำประปา จึงทำให้ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศมีแนวโน้มคงที่ และมีค่าน้อยกว่าในน้ำประปาประมาณร้อยละ 50 ตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลอยตัวของฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเกลือ

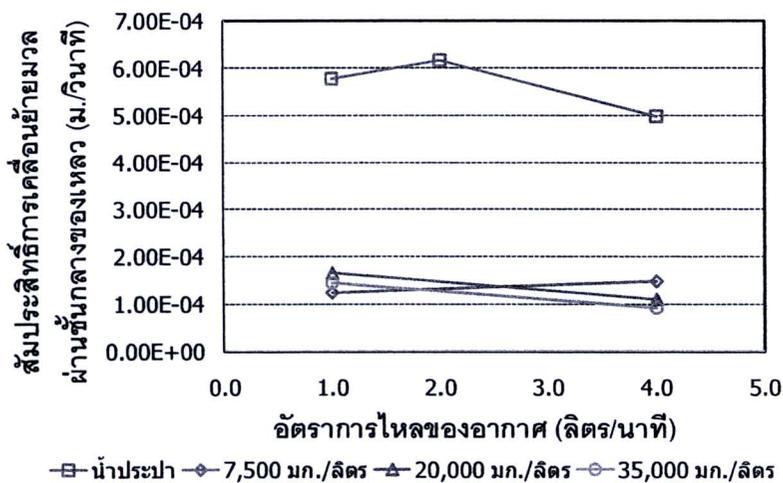
จากรูปที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลอยตัวของฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเกลือ พบว่า ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศในน้ำเกลือมีค่าน้อยกว่าในน้ำประปา และมีค่าลดลงจากเดิมอีกประมาณร้อยละ 16 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเกลือจาก 7,500 เป็น 35,000 มก./ลิตร ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดฟองอากาศที่เล็กลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเกลือ นอกจากนี้ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศในน้ำเกลือมีแนวโน้มคงที่คือ 0.11 ม./วินาที ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 1.0 ถึง 4.0 ลิตร/นาที่ (สำหรับความเข้มข้น 35,000 มก./ลิตร) จากฟองอากาศที่มีขนาดเล็กและความเร็วลอยตัวของฟองอากาศที่มีค่าน้อยในน้ำเกลือ

เมื่อนำขนาดฟองอากาศและความเร็วลอยตัวของฟองอากาศในน้ำเกลือมาคำนวณเป็นพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำทำให้มีค่ามากกว่าในน้ำประปาประมาณ 3.27 เท่าสำหรับความเข้มข้น 7,500 มก./ลิตร และเพิ่มขึ้นเป็น 4.93 เท่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเกลือเป็น 35,000 มก./ลิตร ค่าพื้นที่สัมผัสจำเพาะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 3.53 เท่า คือ 19.60 เพิ่มขึ้นเป็น 78.25 1/ม. (สำหรับความเข้มข้น 35,000 มก./ลิตร) เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 1.0 เป็น 4.0 ลิตร/นาที่ เนื่องจากการเพิ่มจำนวนฟองอากาศที่เกิดขึ้นขณะเติมอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศและน้ำ และอัตราการใช้ปุ๋ยในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเกลือ

จากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว พบว่า สัมประสิทธิ์ดังกล่าวในน้ำเกลือมีค่าน้อยกว่าในน้ำประปาประมาณ 0.24 เท่า และมีแนวโน้มลดลงจากเดิมประมาณร้อยละ 10.13 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นจาก 7,500 เป็น 35,000 มก./ลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว และอัตราการใช้ปุ๋ยในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเกลือ

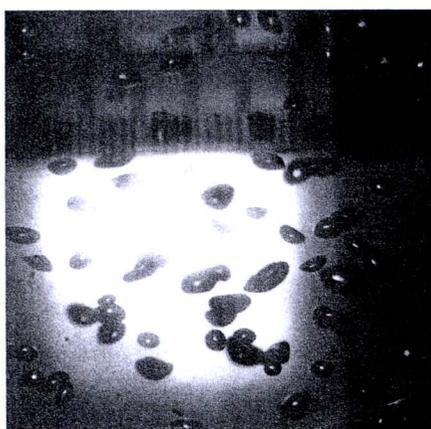
จากรูปที่ 4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวและอัตราการใช้ปุ๋ยในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเกลือ พบว่า สัมประสิทธิ์ดังกล่าวมี

แนวโน้มลดลงประมาณร้อยละ 17.46 คือ 1.46×10^{-4} ลดลงเป็น 9.16×10^{-5} ม./วินาที เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 1.0 เป็น 4.0 ลิตร/นาที (สำหรับความเข้มข้น 35,000 มก./ลิตร)

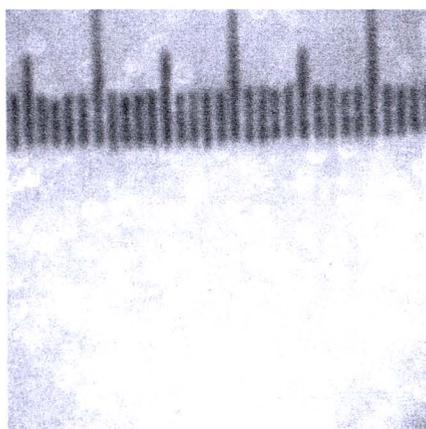
จากผลการทดลองในหัวข้อนี้อาจสรุปในเบื้องต้นได้ว่า น้ำเกลือความเข้มข้น 7,500 20,000 และ 35,000 มก./ลิตร ซึ่งใช้เป็นตัวแทนของปริมาณของแข็งละลายในน้ำที่พบได้ทั่วไปในน้ำกร่อยหรือน้ำทะเลส่งผลกระทบท่อกลไกการถ่ายเทออกซิเจนขณะเติมอากาศอย่างชัดเจน เนื่องจากปริมาณไอออนที่เกิดขึ้นจากการเพิ่มความเข้มข้นของเกลือได้ล้อมรอบฟองอากาศซึ่งขัดขวางการรวมตัวของฟองอากาศทำให้ฟองอากาศมีขนาดเล็กกว่าในน้ำประปา ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศในน้ำเกลือจึงมีค่าน้อยกว่าในน้ำประปาตามไปด้วย เมื่อนำค่าตัวแปรทั้งสองมาคำนวณเป็นพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำจึงมีค่ามากกว่าในน้ำประปา เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสของฟองอากาศขนาดเล็กและจำนวนฟองอากาศที่มากกว่าในน้ำประปา ซึ่งส่งผลต่อการถ่ายเทออกซิเจนมากกว่าการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวเนื่องจากปริมาณไอออนในน้ำเกลือ ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน และประสิทธิภาพเชิงพลังงานจึงมีค่ามากกว่าการเติมอากาศในน้ำประปา

3.) สภาวะที่น้ำถูกเจือปนด้วยของแข็งแขวนลอยในรูปเซลล์จุลชีพ

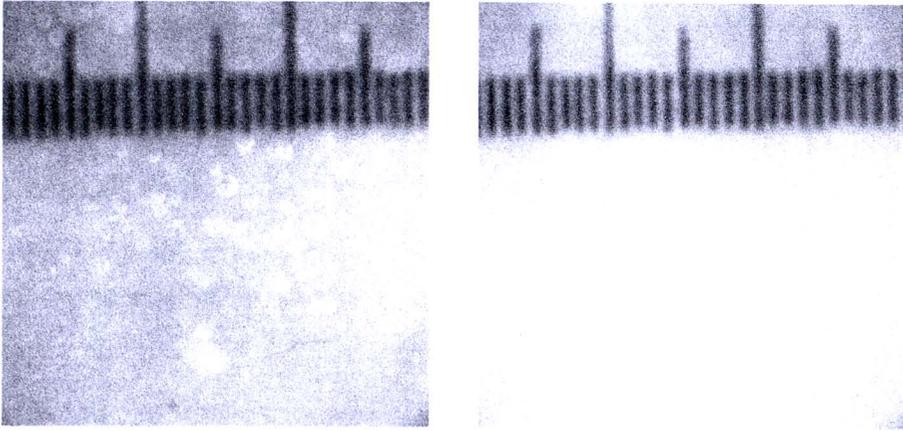
จากการวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ และความเร็วลอยตัวของฟองอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยของแข็งแขวนลอยในรูปเซลล์จุลชีพความเข้มข้น 1,000 2,000 และ 3,000 มก./ลิตร พบว่า ขนาดฟองอากาศมีขนาดเล็กกว่าในน้ำประปา ฟองอากาศเป็นรูปทรงกลม มีขนาดใกล้เคียงกันอย่างสม่ำเสมอ และไม่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของขนาดฟองอากาศได้ชัดเจนเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเซลล์จุลชีพ ดังแสดงในรูปที่ 4.33



1.) น้ำประปา



2.) เซลล์จุลชีพ 1,000 มก./ลิตร

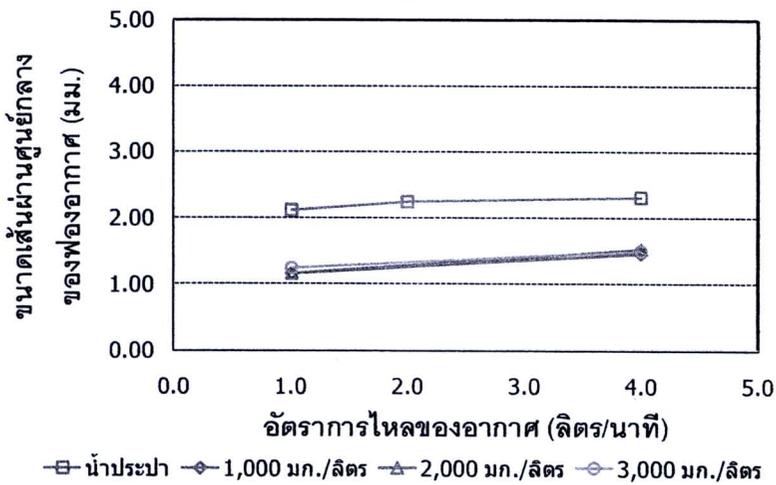


3.) เซลล์จุลชีพ 2,000 มก./ลิตร

4.) เซลล์จุลชีพ 3,000 มก./ลิตร

รูปที่ 4.33 ภาพถ่ายฟองอากาศขณะเดิมอากาศในน้ำที่ถูกเจือปนด้วยเซลล์จุลชีพเปรียบเทียบกับในน้ำประปา

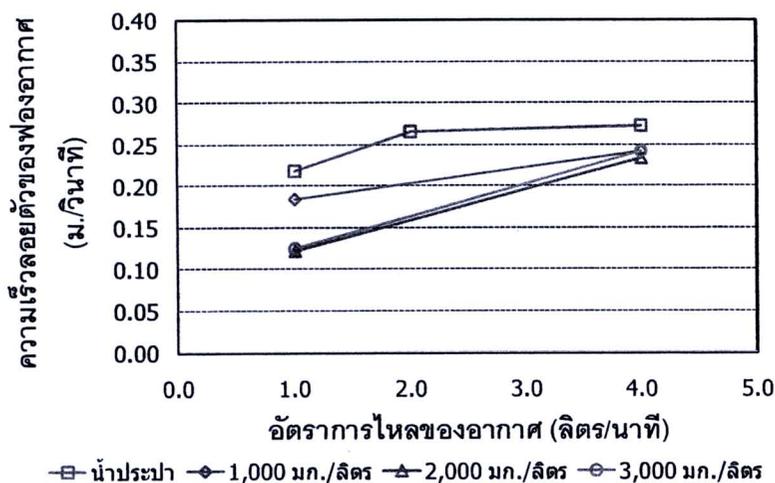
จากรูปที่ 4.33 เมื่อวิเคราะห์ขนาดฟองอากาศจากภาพ พบว่า ฟองอากาศที่เกิดขึ้นขณะเดิมอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพมีขนาดเล็กกว่าในน้ำประปาประมาณ 0.61 เท่า และมีแนวโน้มคงที่ในช่วงความเข้มข้น 1,000 ถึง 3,000 มก./ลิตร เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 1.0 เป็น 4.0 ลิตร/นาที พบว่าฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้นจากเดิมประมาณร้อยละ 26 คือ 1.25 เพิ่มขึ้นเป็น 1.51 มม. (สำหรับความเข้มข้น 3,000 มก./ลิตร) ดังแสดงในรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพ

จากรูปที่ 4.34 ฟองอากาศที่เกิดขึ้นขณะเดิมอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพมีขนาดเล็กกว่าในน้ำประปาจึงทำให้ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศมีค่าน้อยกว่าในน้ำประปาตามไปด้วย โดย

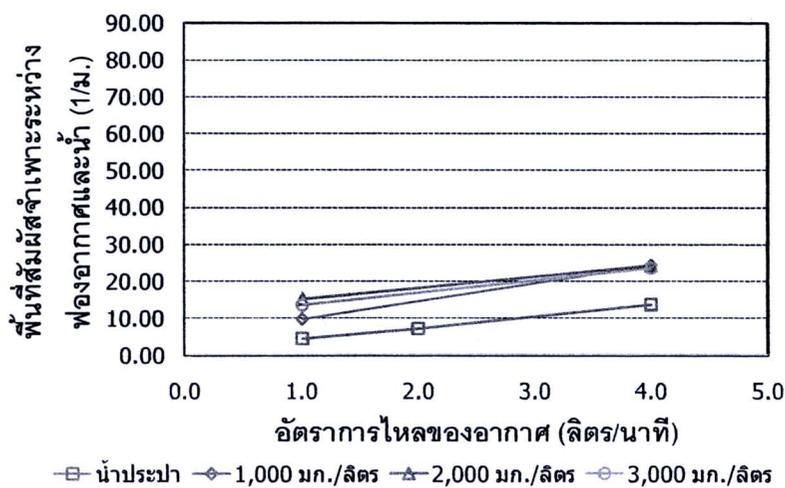
มีแนวโน้มคงที่ในช่วงความเข้มข้น 1,000 ถึง 3,000 มก./ลิตร สำหรับความเข้มข้น 1,000 มก./ลิตร ขณะเดิมอากาศด้วยอัตราการไหล 1.0 ลิตร/นาที พบว่าความเร็วลอยตัวของฟองอากาศมีค่ามากกว่าความเข้มข้นอื่นๆ เนื่องจากความเข้มข้นดังกล่าวทำให้สมบัติของน้ำเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมน้อยที่สุดจึงอาจส่งผลต่อค่าความเร็วลอยตัวของฟองอากาศที่ใกล้เคียงกับในน้ำประปามากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.35



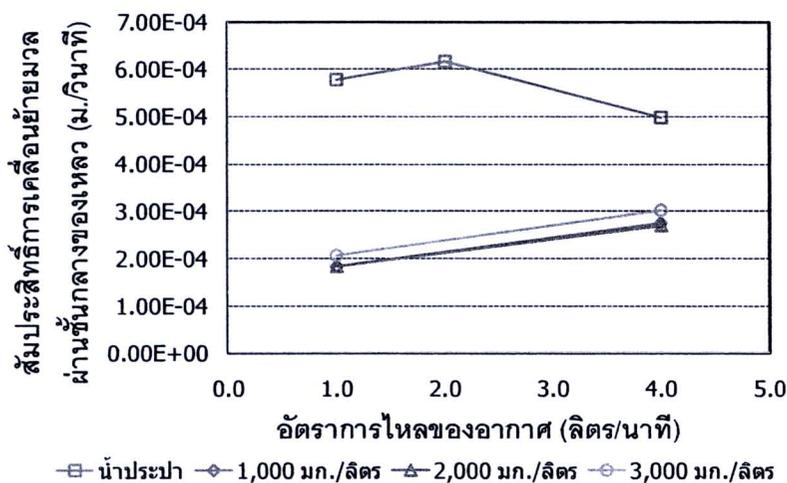
รูปที่ 4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลอยตัวของฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลลูล์ซึฟ

จากรูปที่ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลอยตัวของฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลลูล์ซึฟ พบว่า ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลลูล์ซึฟมีค่าน้อยกว่าในน้ำประปาประมาณ 0.77 เท่า และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นคือ 0.13 เพิ่มขึ้นเป็น 0.24 ม./วินาที เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 1.0 เป็น 4.0 ลิตร/นาที (สำหรับความเข้มข้น 3,000 มก./ลิตร)

จากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศและความเร็วลอยตัวของฟองอากาศขณะเดิมอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลลูล์ซึฟที่มีค่าน้อยกว่าในน้ำประปา เมื่อคำนวณเป็นพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำพบว่ามีความมากกว่าในน้ำประปาประมาณ 2.28 เท่า โดยมีแนวโน้มคงที่ในช่วงความเข้มข้น 1,000 ถึง 3,000 มก./ลิตร เนื่องจากขนาดฟองอากาศและความเร็วลอยตัวของฟองอากาศมีแนวโน้มคงที่ในช่วงความเข้มข้นดังกล่าว นอกจากนั้น พื้นที่สัมผัสจำเพาะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 1.91 เท่า คือเพิ่มขึ้นจาก 13.86 เป็น 23.77 1/ม. เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 1.0 เป็น 4.0 ลิตร/นาที (สำหรับความเข้มข้น 3,000 มก./ลิตร) ดังแสดงในรูปที่ 4.36



รูปที่ 4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศและน้ำ และอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพ



รูปที่ 4.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว และอัตราการไหลของอากาศในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพ

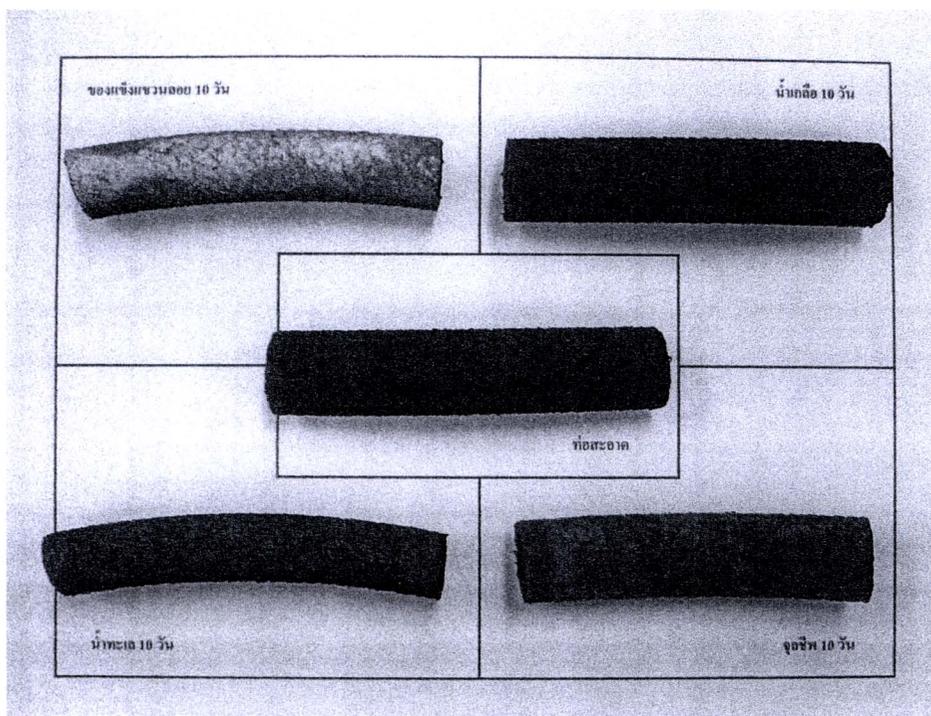
จากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว พบว่า สัมประสิทธิ์ดังกล่าวในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพมีค่าน้อยกว่าในน้ำประปาประมาณ 0.45 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.37 โดยสัมประสิทธิ์ดังกล่าวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นประมาณ 1.48 เท่า คือ 2.06×10^{-4} เพิ่มขึ้นเป็น 3.02×10^{-4} ม.วินาที เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 1.0 เป็น 4.0 ลิตร/นาที (สำหรับความเข้มข้น 3,000 มก./ลิตร)

จากผลการทดลองในหัวข้อนี้อาจสรุปในเบื้องต้นได้ว่า น้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพความเข้มข้น 1,000 2,000 และ 3,000 มก./ลิตร ซึ่งใช้เป็นตัวแทนของปริมาณเซลล์จุลชีพในถังเติมอากาศของระบบบำบัดน้ำเสียส่งผลกระทบต่อกลไกการถ่ายเทออกซิเจนขณะเติมอากาศอย่างชัดเจน เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของเซลล์จุลชีพทำให้ค่าแรงตึงผิวในน้ำลดลงจากสารที่เกิดจากกระบวนการทางชีวภาพ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเป็นสารประเภทสารลดแรงตึงผิว โดยโมเลกุลของสารดังกล่าวสามารถเกาะติดและล้อมรอบฟองอากาศและขัดขวางการรวมตัวของฟองอากาศทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวลดลงอย่างมาก (Jamnongwong และคณะ, 2010) ถึงแม้ว่า ฟองอากาศที่เกิดขึ้นขณะเติมอากาศมีลักษณะเป็นทรงกลมและมีขนาดเล็กกว่าในน้ำประปา ซึ่งทำให้ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศมีค่าน้อยกว่าในน้ำประปาตามไปด้วย เมื่อนำค่าตัวแปรทั้งสองมาคำนวณเป็นพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำจึงมีค่ามากกว่าในน้ำประปา แต่การลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวส่งผลต่อการถ่ายเทออกซิเจนมากกว่าการเพิ่มพื้นที่สัมผัสจำเพาะ ดังนั้นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน และประสิทธิภาพเชิงพลังงานจึงมีค่าน้อยกว่าการเติมอากาศในน้ำประปา

4.2.3 การศึกษาระยะเวลาที่อาจก่อให้เกิดการอุดตันจากการหยุดเติมอากาศ

การทดลองในหัวข้อนี้ได้ทำการศึกษาระยะเวลาที่อาจก่อให้เกิดการอุดตันจากการหยุดเติมอากาศ โดยใช้ท่อยืดหยุ่นตัวอย่างที่ 6.3 แชน้ำน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาว เกลีส และเซลล์จุลชีพที่ความเข้มข้นสูงสุดคือ 200 35,000 และ 3,000 มก./ลิตร ตามลำดับ เพื่อให้สามารถพิจารณาการอุดตันได้อย่างชัดเจน แชน้ำเป็นระยะเวลาไม่เกิน 10 วัน เนื่องจากข้อจำกัดของระยะเวลาในการทำงานวิจัย พิจารณาการอุดตันโดยการวิเคราะห์ตัวคูณปรับแก้ของการอุดตันซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของท่อที่อุดตันกับท่อสะอาด ดังแสดงในสมการที่ 2.15 การวิเคราะห์ค่าความดันขณะเติมอากาศ และภาพถ่ายลักษณะการอุดตันโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน

จากการแช่ท่อยืดหยุ่นในน้ำที่มีสารเจือปนต่างๆ พบว่า การแช่ท่อในน้ำที่ถูกเจือปนด้วยดินขาวและน้ำทะเลเป็นระยะเวลา 10 วัน สามารถสังเกตเห็นตะกอนสะสมอยู่ที่ผิวด้านบนของท่อได้อย่างชัดเจน โดยเห็นตะกอนสีขาวที่ผิวท่อสำหรับการแช่ในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาว และเห็นตะกอนสีน้ำตาลซึ่งเกิดจากของแข็งแขวนลอยในน้ำทะเลสะสมอยู่ที่ผิวท่อ การแช่ท่อในน้ำเกลือยังไม่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างกับท่อสะอาดได้ และสำหรับการแช่ท่อในน้ำที่ถูกเจือปนด้วยเซลล์จุลชีพสามารถเห็นตะกอนสีน้ำตาลของเซลล์จุลชีพสะสมตัวที่ผิวของท่อโดยรอบอย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากการตกตะกอนและการสร้างไบโอฟิล์ม (Biofilm) ของเซลล์จุลชีพเคลือบที่ผิวทุกด้านของท่อ ดังแสดงในรูปที่ 4.38

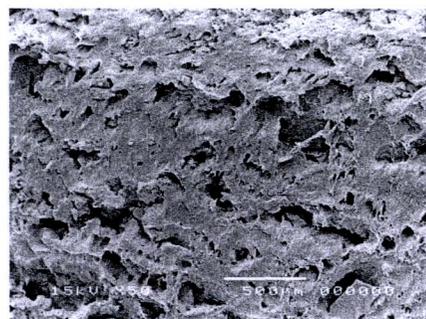


รูปที่ 4.38 ภาพถ่ายท่อยึดดินที่ถูกแช่ในสภาวะต่างๆ

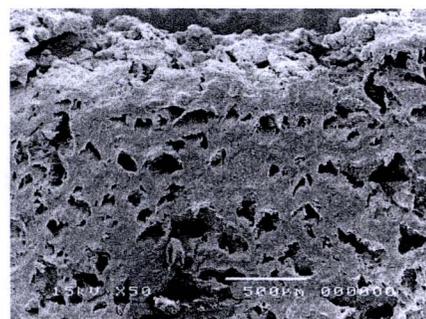
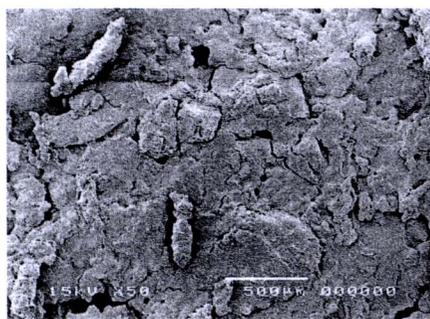
ภาพพื้นผิวด้านบน

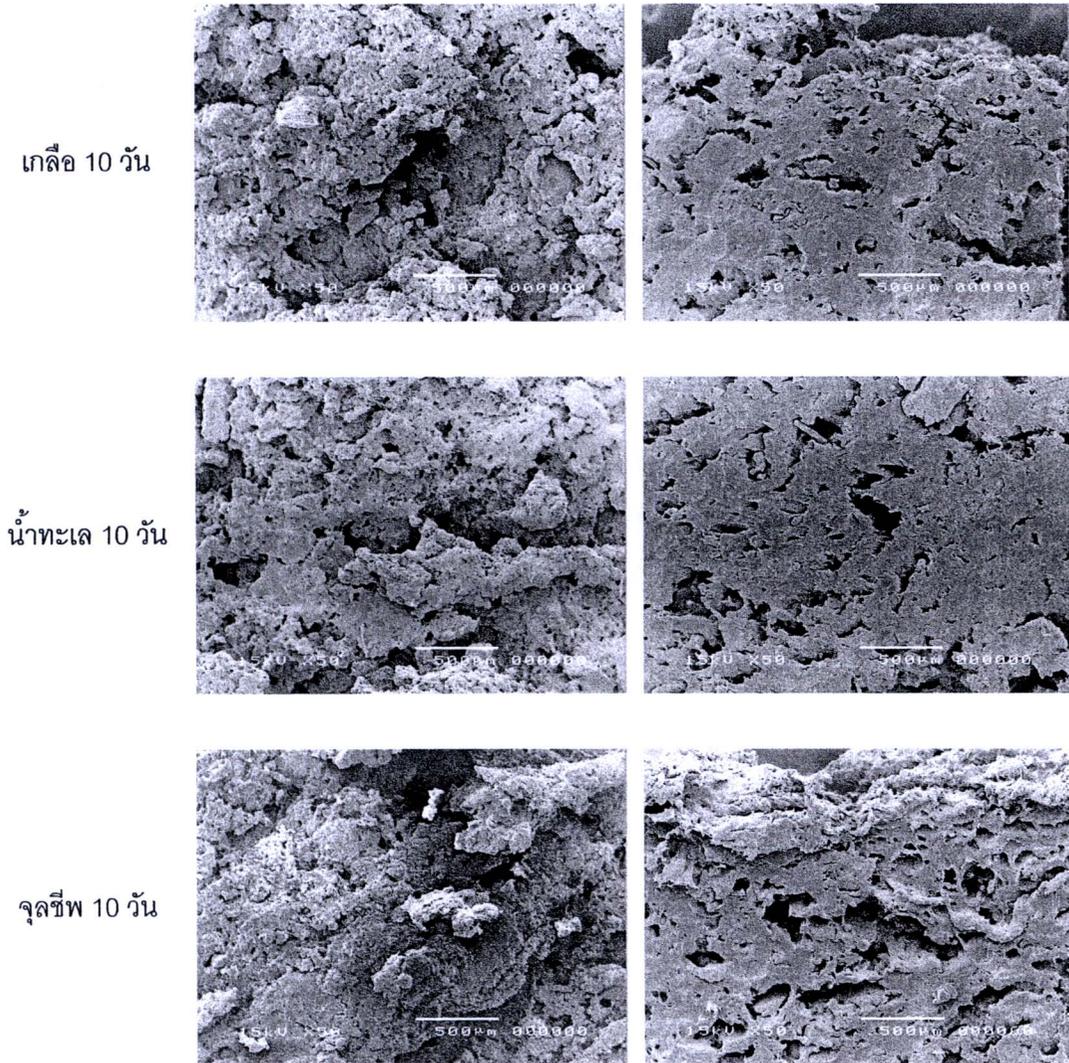
ภาพตัดขวาง

ท่อสะอาด



ดินขาว 10 วัน



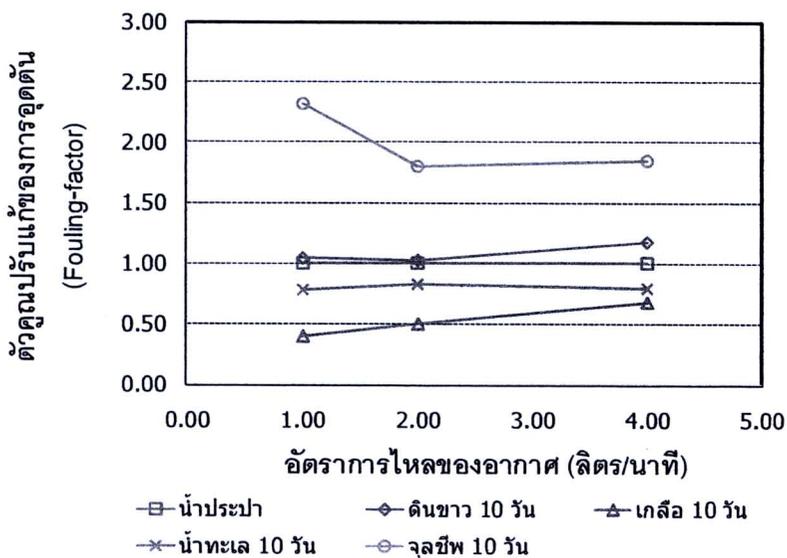


รูปที่ 4.39 ภาพถ่ายท่อยืดหยุ่นที่ถูกแช่ในสภาวะต่างๆโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน

จากรูปที่ 4.39 แสดงภาพถ่ายท่อยืดหยุ่นที่ถูกแช่ในสภาวะต่างๆโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนด้วยกำลังขยาย 50 เท่า พบว่า ที่พื้นผิวของท่อที่มีรูพรุนจำนวนมากและมีขนาดที่หลากหลาย แต่จากการสังเกตการเกิดฟองอากาศขณะเติมอากาศพบว่าที่ความดันต่ำฟองอากาศส่วนใหญ่เกิดจากรูเติมอากาศขนาดใหญ่ (ขนาดรูเติมอากาศโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.19 มม.) แต่ที่ความดันสูงในกรณีการเติมอากาศโดยใช้ท่อยืดหยุ่นตัวอย่างที่ 8.1 พบว่าฟองอากาศสามารถทะลุผ่านรูเติมอากาศขนาดเล็กได้ด้วย ลักษณะพื้นผิวของท่อที่ถูกแช่ในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวและในน้ำทะเลมีความขรุขระน้อยกว่าพื้นผิวของท่อสะอาดเนื่องจากมีตะกอนมาสะสมอย่างเห็นได้ชัดดังแสดงในรูปที่ 4.38 และจากภาพตัดขวางของผนังท่อสามารถสังเกตเห็นตะกอนบางส่วนหลุดลอดเข้ามาอุดตันใน

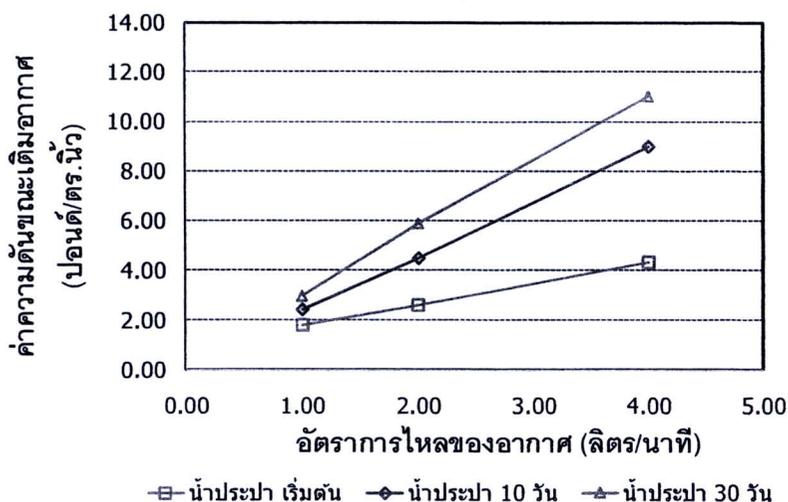
ผนังท่อซึ่งแสดงถึงการอุดตันของของแข็งแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่ารูเดิมอากาศ สำหรับท่อที่ถูกแช่ในน้ำเกลือยังไม่สามารถสังเกตเห็นการอุดตันได้ ส่วนท่อที่ถูกแช่ในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพพบว่าจุดที่มีไบโอฟิล์มเคลือบที่ผิวท่อจะเป็นจุดที่มีสีขาวและเรืองแสงในภาพ เนื่องจากจุดที่มีไบโอฟิล์มเคลือบที่ผิวทำให้ความนำไฟฟ้าของตัวอย่างที่ลดลง ซึ่งรบกวนการถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนที่อาศัยความนำไฟฟ้าของตัวอย่าง ความชัดเจนของภาพถ่ายจึงลดลง ณ จุดนั้น นอกจากนี้ ไม่สามารถสังเกตเห็นการอุดตันภายในผนังท่อจากการแช่ท่อในสภาวะดังกล่าว

จากการวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนและคำนวณเป็นตัวคูณปรับแก้ของการอุดตัน เปรียบเทียบการอุดตันจากการแช่ท่อในน้ำในแต่ละสภาวะเป็นระยะเวลา 10 วัน พบว่า ตัวคูณปรับแก้ของการอุดตันในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาว และเซลล์จุลชีพเป็นระยะเวลา 10 วัน มีค่ามากกว่าในน้ำประปา โดยในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวมีค่าเท่ากับ 1.05 เพิ่มขึ้นเป็น 1.18 และในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพมีค่าเท่ากับ 2.32 ลดลงเป็น 1.85 เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจาก 1.0 เป็น 4.0 ลิตร/นาที แสดงว่าเกิดการอุดตันที่ทำให้รูเดิมอากาศมีขนาดเล็กลง ทำให้ฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มลดลง จึงส่งผลทำให้พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่า ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากปกติ แต่การเพิ่มขึ้นของค่าความดันขณะเติมอากาศอย่างมากอาจเป็นผลเสียต่อการทำงานของเครื่องเป่าอากาศ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Rosso และคณะ (2008) ดังแสดงในรูปที่ 4.40



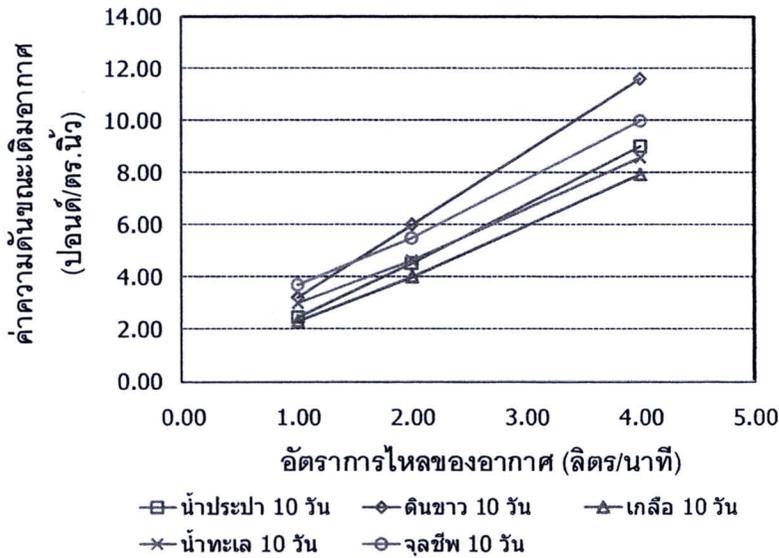
รูปที่ 4.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวคูณการปรับแก้ของการอุดตันและอัตราการไหลของอากาศของท่อที่ยืดหยุ่นที่ถูกแช่ในสภาวะต่างๆ

จากรูปที่ 4.40 แสดงถึงการเกิดการอุดตันจากการแช่ท่อยึดหยุ่นในน้ำถูกปนเปื้อนด้วยดินขาว และเซลล์จุลินทรีย์เป็นระยะเวลา 10 วัน เมื่อพิจารณาถึงค่าความดันขณะเต็มอากาศของท่อที่ถูกแช่ในสถานะต่างๆเปรียบเทียบกับค่าความดันเริ่มต้นของท่อสะอาด จากการทดลองเมื่อนำท่อยึดหยุ่นแช่ในน้ำประปาซึ่งใช้เป็นตัวแทนของน้ำสะอาด พบว่า ค่าความดันขณะเต็มอากาศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อแช่ท่อในน้ำประปาเป็นระยะเวลานาน ดังแสดงในรูปที่ 4.41



รูปที่ 4.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันขณะเต็มอากาศและอัตราการไหลของอากาศของท่อยึดหยุ่นที่ถูกแช่ในน้ำประปา

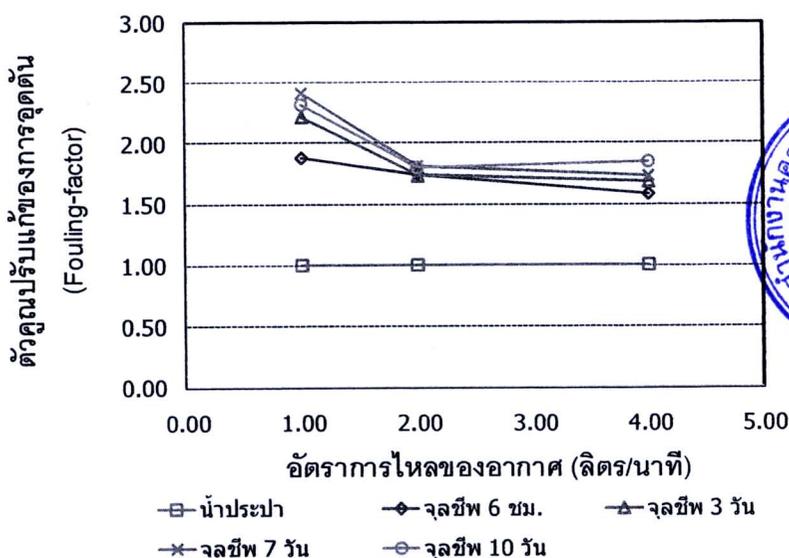
จากรูปที่ 4.41 แสดงค่าความดันขณะเต็มอากาศของท่อยึดหยุ่นที่ถูกแช่ในน้ำประปาเป็นระยะเวลา 10 และ 30 วัน พบว่าเมื่อแช่ท่อในน้ำประปาเป็นระยะเวลา 10 วัน ทำให้มีค่าความดันเท่ากับ 2.45 เพิ่มขึ้นเป็น 9.00 ปอนด์/ตร.นิ้ว ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 1.0 ถึง 4.0 ลิตร/นาที อาจเป็นเพราะการแช่น้ำเป็นระยะเวลานานทำให้ท่อยึดหยุ่นเกิดการบวมน้ำและลดขนาดของรูเต็มอากาศให้เล็กลง จึงทำให้ค่าความดันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อแช่ท่อเป็นระยะเวลานาน จากการเพิ่มค่าความดันขณะเต็มอากาศของท่อยึดหยุ่นจึงเลือกใช้ค่าความดันของท่อที่ถูกแช่ในน้ำประปานาน 10 วัน เป็นตัวแทนของค่าความดันเริ่มต้นของท่อสะอาดเพื่อใช้เปรียบเทียบกับท่อที่อุดตันจากการแช่ในน้ำที่มีสารปนเปื้อนอื่นๆ



รูปที่ 4.42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันขณะเติมอากาศและอัตราการไหลของอากาศของท่อยึดหยุ่นที่ถูกแช่ในสภาวะต่างๆ

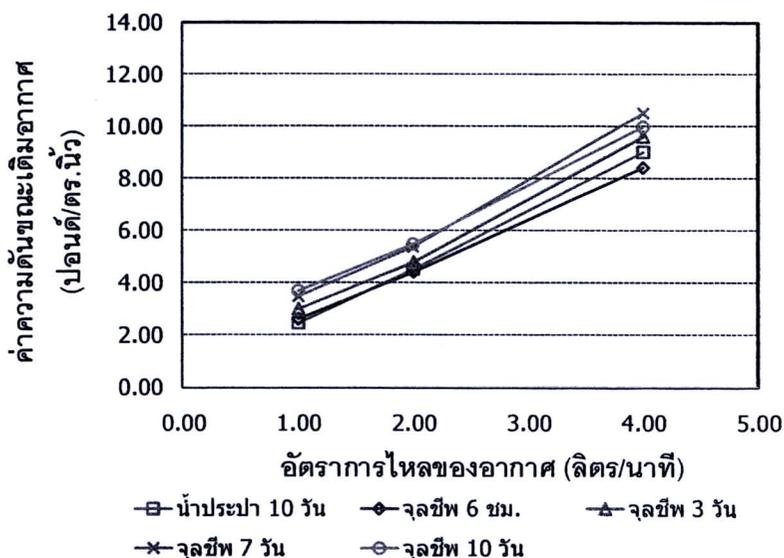
จากรูปที่ 4.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันขณะเติมอากาศและอัตราการไหลของอากาศของท่อยึดหยุ่นที่ถูกแช่ในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาว เกลือ และเซลล์จุลชีพเปรียบเทียบกับท่อที่ถูกแช่ในน้ำประปาและน้ำทะเล พบว่าท่อที่ถูกแช่ในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวและเซลล์จุลชีพมีความดันมากกว่าในน้ำประปา ในขณะที่ท่อที่ถูกแช่ในน้ำทะเลและในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเกลือมีความดันน้อยกว่าหรือเท่ากับในน้ำประปา จึงอาจสรุปในเบื้องต้นได้ว่าของแข็งแขวนลอยและเซลล์จุลชีพเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการอุดตันในท่อยึดหยุ่นสำหรับงานวิจัยนี้

จากการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยของดินขาว พบว่า ดินขาวมีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยเท่ากับ 9.85 มค.ม. (9.85×10^{-3} มม.) ซึ่งเป็นขนาดที่เล็กกว่าขนาดรูเติมอากาศประมาณ 20 เท่า (0.19 มม.) ดินขาวจึงสามารถตกตะกอนมาอุดตันรูเติมอากาศได้ ประกอบกับรูเติมอากาศมีขนาดคงที่และดินขาวมีความเร็วในการตกตะกอนประมาณ 0.023 ม./วินาที ซึ่งใช้เวลาในการตกตะกอนประมาณ 9.45 วินาที สำหรับระดับน้ำสูง 0.215 ม. หรือกล่าวได้ว่าดินขาวสามารถตกตะกอนได้ทันทีหลังจากหยุดเติมอากาศ ดังนั้น ดินขาวที่เลือกใช้เป็นตัวแทนของของแข็งแขวนลอยในน้ำซึ่งมีขนาดอนุภาคและค่าความเร็วในการตกตะกอนดังกล่าวจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ท่อยึดหยุ่นอุดตันได้ทันทีหลังหยุดเติมอากาศ สำหรับการศึกษาระยะเวลาที่อาจก่อให้เกิดการอุดตันจึงสนใจศึกษาระยะเวลาการแช่ท่อยึดหยุ่นในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพ ดังแสดงในรูปที่ 4.43



รูปที่ 4.43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวคูณการปรับแก้ของการอุดตันและอัตราการไหลของอากาศของท่อยึดหยุนที่ถูกแช่ในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพ

จากรูปที่ 4.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวคูณการปรับแก้ของการอุดตันและอัตราการไหลของอากาศของท่อยึดหยุนที่ถูกแช่ในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพ พบว่า ค่าตัวคูณปรับแก้ของการอุดตันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการแช่ท่อที่นานขึ้นซึ่งแสดงว่าเกิดการอุดตันมากขึ้นตามระยะเวลาของการแช่ท่อ เนื่องจากเซลล์จุลชีพตกตะกอนทับถมบนผิวท่อและสร้างไบโอฟิล์มเคลือบที่ผิวท่อทำให้เกิดการอุดตันที่รูเติมอากาศทำให้อากาศมีขนาดเล็กลงจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนเพิ่มขึ้นจนมีค่ามากกว่าท่อสะอาด แต่การอุดตันดังกล่าวทำให้ความดันขณะเติมอากาศมีค่าสูงขึ้นไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.44 โดยพบว่า เมื่อแช่ท่อนาน 6 ชม. ความดันขณะเติมอากาศยังมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าความดันของท่อสะอาด แต่เมื่อแช่ท่อนาน 3 วัน พบว่าความดันเริ่มมีค่ามากกว่าในท่อสะอาดและมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆเมื่อแช่ท่อนานขึ้นจนครบ 10 วัน จึงมีค่าความดันมากที่สุดซึ่งแสดงถึงเกิดการอุดตันมากที่สุด จากค่าความดันของท่อยึดหยุนที่แช่ในน้ำที่ถูกเจือปนด้วยเซลล์จุลชีพเป็นระยะเวลา 3 วัน อาจสรุปในเบื้องต้นได้ว่า การเติมอากาศในสภาวะที่มีเซลล์จุลชีพความเข้มข้น 3,000 มก./ลิตร ไม่ควรหยุดเติมอากาศนานเกิน 3 วัน เพราะจะทำให้เกิดการอุดตันต่ออุปกรณ์เติมอากาศได้



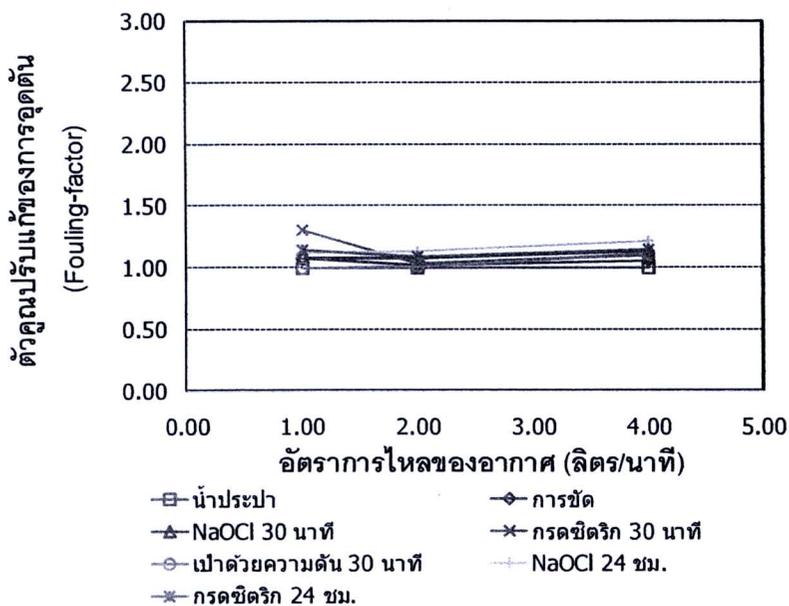
รูปที่ 4.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันขณะเติมอากาศและอัตราการไหลของอากาศของท่อยืดหยุ่นที่ถูกแช่ในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพ

จากผลการทดลองในหัวข้อนี้สามารถสรุปได้ว่า ของแข็งแขวนลอยและเซลล์จุลชีพเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการอุดตัน โดยที่ดินขาวซึ่งใช้เป็นตัวแทนของของแข็งแขวนลอยในน้ำสามารถทำให้เกิดการอุดตันได้ทันทีเนื่องจากมีขนาดอนุภาคเล็กกว่ารูเติมอากาศประมาณ 20 เท่า และใช้ระยะเวลาสั้นในการตกตะกอนจึงสามารถก่อให้เกิดการอุดตันได้ทันทีหลังหยุดเติมอากาศ สำหรับเซลล์จุลชีพซึ่งใช้เป็นตัวแทนของสภาวะการเติมอากาศในระบบบำบัดน้ำเสียสามารถทำให้เกิดการอุดตันได้จากการตกตะกอนทับถมและสร้างไบโอฟิล์มเคลือบที่ผิวท่อภายในระยะเวลา 3 วัน ดังนั้น ในกระบวนการเติมอากาศจึงไม่ควรหยุดเติมนานเกิน 3 วัน หลังจากนั้นจึงควรทำความสะอาดอุปกรณ์เติมอากาศด้วยวิธีที่เหมาะสม

4.2.4 การศึกษาวิธีทำความสะอาดที่เหมาะสม

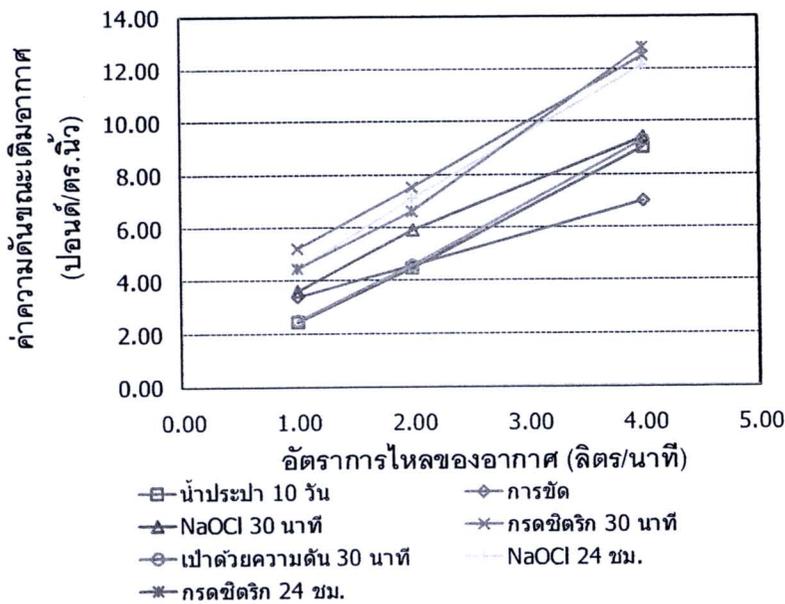
การทดลองในหัวข้อนี้ได้ศึกษาวิธีทำความสะอาดที่เหมาะสมประกอบไปด้วย การขัดที่ผิวด้วยแปรงขนอ่อน (แปรงสีฟัน) การแช่ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยมวลต่อปริมาตร เป็นระยะเวลา 30 นาที และ 24 ชม. การแช่ในสารละลายกรดซิตริกความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยมวลต่อปริมาตร เป็นระยะเวลา 30 นาที และ 24 ชม. และการเป่าด้วยความดัน 3 บาร์ (300 กิโลปาสกาล) นาน 30 นาที โดยใช้ท่อยืดหยุ่นตัวอย่างที่ 6.3 แช่ในน้ำสภาวะเดียวกับผลการทดลองหัวข้อที่ 4.2.3 ระยะเวลา 10 วัน สำหรับการแช่ในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพได้แช่ท่อนาน 3 และ 10 วัน เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำความสะอาดโดยวิเคราะห์ค่าตัวคูณปรับแก้ของการอุดตันและความดันขณะเติมอากาศ

ในกรณีการทำความสะอาดท่อที่ถูกแช่ในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยดินขาวความเข้มข้น 200 มก./ลิตร เป็นระยะเวลา 10 วัน พบว่า หลังทำความสะอาดด้วยวิธีต่างๆยังไม่สามารถสังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงของค่าตัวคูณปรับแก้ของการอุดตันได้ชัดเจนนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.43 เนื่องจาก ค่าเดิมของท่อที่อุดตันมีค่าใกล้เคียงกับท่อสะอาด ดังแสดงในรูปที่ 4.39 จึงจำเป็นต้องพิจารณาค่าความดันขณะเติมอากาศควบคู่ไปด้วย



รูปที่ 4.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวคูณการปรับแก้ของการอุดตันหลังทำความสะอาดและอัตราการไหลของอากาศของท่อที่ยึดหยุ่นที่อุดตันด้วยดินขาว

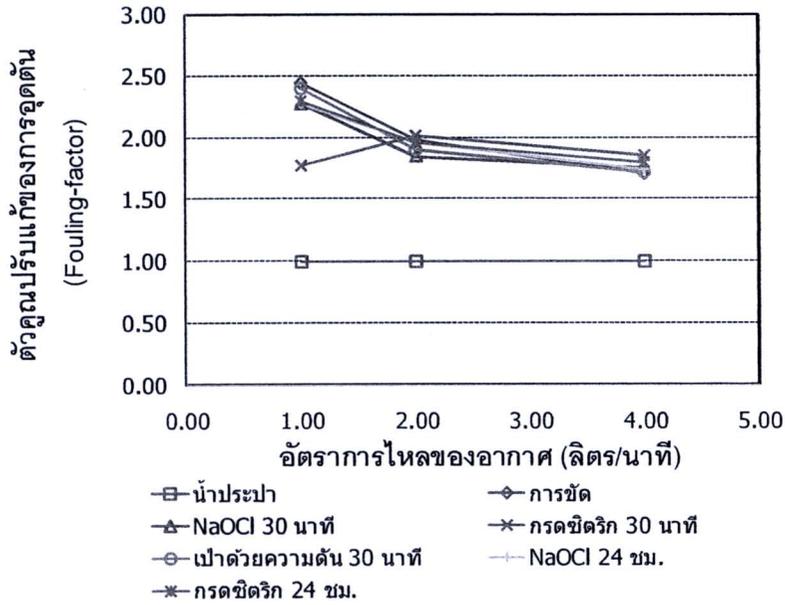
จากการพิจารณาค่าความดันขณะเติมอากาศของท่อที่อุดตันด้วยดินขาว พบว่า การทำความสะอาดโดยวิธีการขัดสามารถกำจัดดินขาวที่อุดตันได้บางส่วน เนื่องจากค่าความดันลดลงจากท่ออุดตันอย่างเห็นได้ชัด คือ ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 1.0 ถึง 4.0 ลิตร/นาที ค่าความดันเดิมอยู่ในช่วง 3.20 ถึง 11.60 ปอนด์/ตร.นิ้ว ลดลงเป็น 3.40 ถึง 7.00 ปอนด์/ตร.นิ้ว ในขณะที่การทำทำความสะอาดโดยสารเคมี (สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์และกรดซิทริก) ไม่สามารถทำความสะอาดดินขาวได้เนื่องจากค่าความดันมีแนวโน้มคงเดิมจากท่ออุดตัน ถึงแม้ว่าจะเพิ่มระยะเวลาการทำความสะอาดจาก 30 นาที เป็น 24 ชม. ก็ตาม สำหรับการเป่าด้วยความดันพบว่าสามารถกำจัดดินขาวที่อุดตันได้เป็นอย่างดี เนื่องจากค่าความดันลดลงจนมีค่าเท่ากับท่อสะอาด ดังแสดงในรูปที่ 4.46



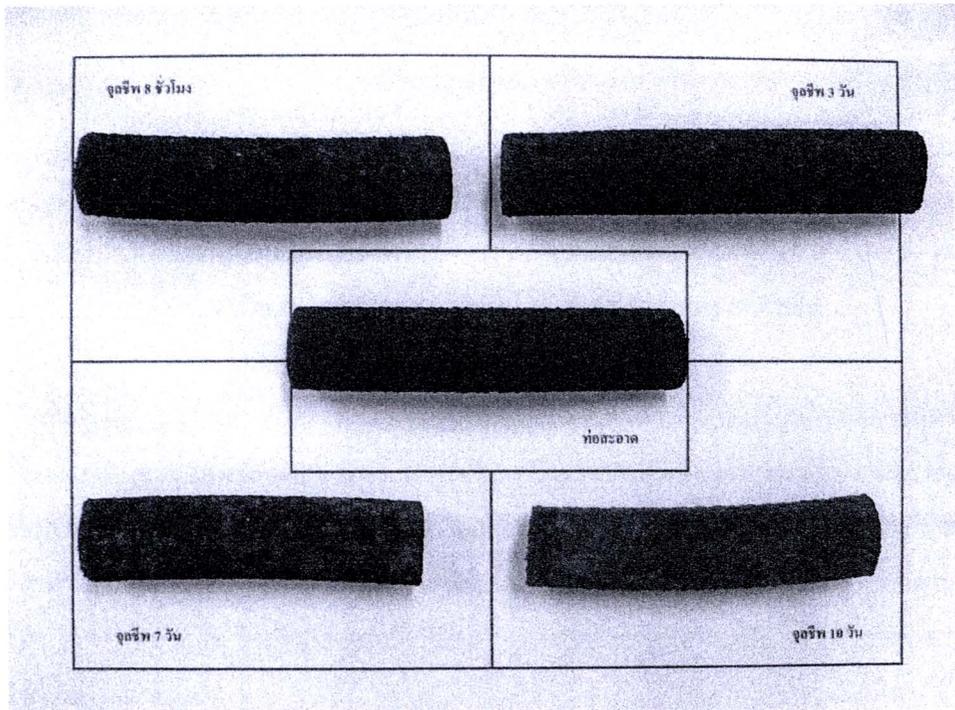
รูปที่ 4.46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันขณะเติมอากาศหลังทำความสะอาดและอัตราการไหลของอากาศของท่อยืดหยุ่นที่อุดตันด้วยดินขาว

จากรูปที่ 4.45 และ 4.46 อาจสรุปในเบื้องต้นได้ว่าการกำจัดสิ่งอุดตันที่เกิดจากการตกตะกอนของแข็งแขวนลอยในน้ำควรจะทำทำความสะอาดด้วยวิธีทางกายภาพ ได้แก่ การขัดที่ผิวท่อด้วยแปรงขนอ่อน และการเป่าด้วยความดัน เป็นต้น มากกว่าวิธีทางเคมี จากผลการทดลองในงานวิจัยนี้พบว่าการเป่าด้วยความดันมีประสิทธิภาพสูงกว่า และมีความสะดวกมากกว่าการขัด

ในกรณีการทำทำความสะอาดท่อที่ถูกแช่ในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพความเข้มข้น 3,000 มก./ลิตร เป็นระยะเวลา 10 วัน พบว่า หลังทำความสะอาดด้วยวิธีต่างๆยังไม่สามารถสังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงของค่าตัวคูณปรับแก้ของการอุดตันได้ชัดเจนนัก เนื่องจากมีค่าใกล้เคียงกับค่าของท่ออุดตันคือ 2.32 ลดลงเป็น 1.85 ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 1.0 ถึง 4.0 ลิตร/นาที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.47 อาจเป็นเพราะการแช่ท่อเป็นระยะเวลาดังกล่าวทำให้เกิดการอุดตันที่ฝังแน่น เนื่องจากผิวท่อถูกเคลือบด้วยไบโอฟิล์มชั้นหนาซึ่งสามารถสังเกตเห็นเป็นจุดสีน้ำตาลได้ชัดเจนกว่าระยะเวลาอื่นๆที่สั้นกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.48 จึงทำให้ทำความสะอาดได้ยาก



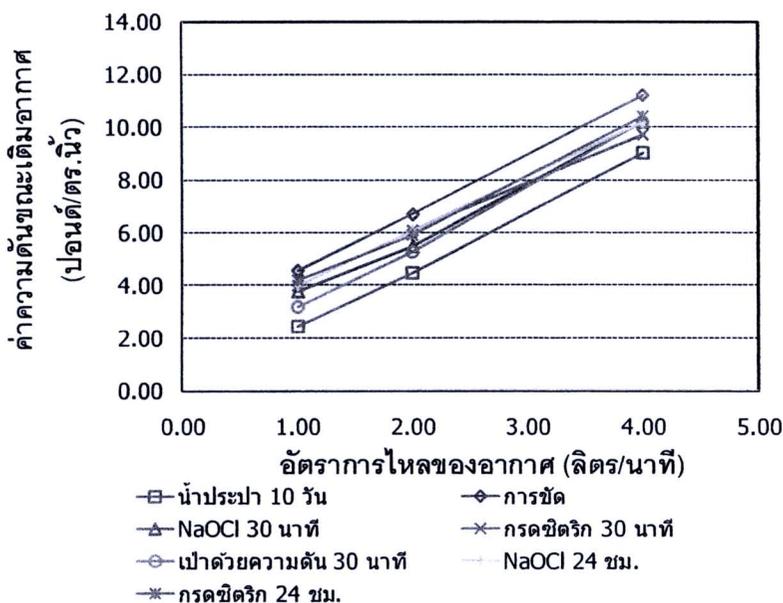
รูปที่ 4.47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวคูณการปรับแก้ของการอุดตันหลังทำความสะอาด และอัตราการไหลของอากาศของท่อยึดหยุ่นที่อุดตันด้วยเซลล์จุลชีพ



รูปที่ 4.48 ภาพถ่ายท่อยึดหยุ่นที่อุดตันด้วยเซลล์จุลชีพ

เมื่อพิจารณาค่าความดันขณะเต็มอากาศของท่อยึดหยุ่นที่ถูกแช่ในน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยเซลล์จุลชีพเป็นระยะเวลา 10 วัน พบว่า การขัดไม่สามารถทำความสะอาดเซลล์จุลชีพที่อุดตันได้เนื่องจาก

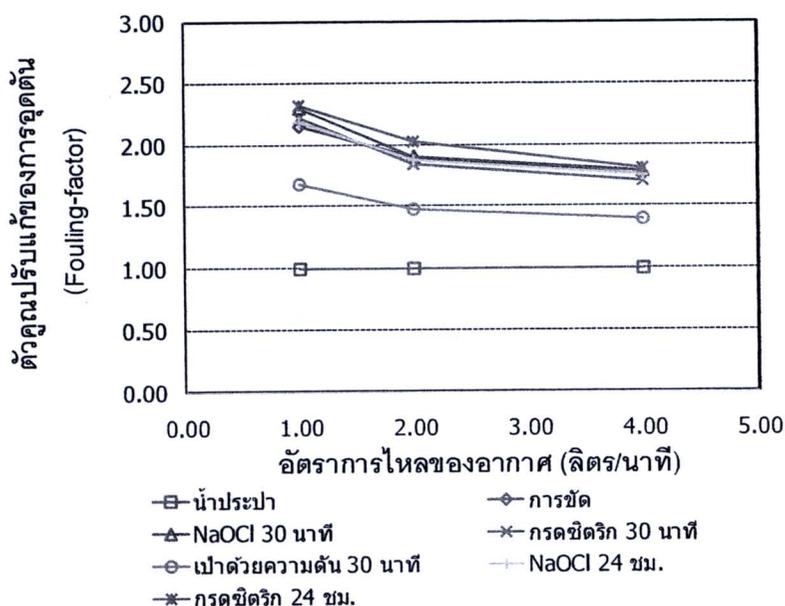
ความดันยังคงมีค่าเท่ากับท่อที่อุดตันคือ 4.60 ถึง 11.20 ปอนด์/ตร.นิ้ว ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 1.0 ถึง 4.0 ลิตร/นาที แต่สำหรับการทำความสะอาดด้วยสารเคมีสามารถกำจัดเซลล์จุลชีพที่อุดตันได้บางส่วน โดยลดค่าความดันลงอยู่ในช่วง 3.80 ถึง 10.20 ปอนด์/ตร.นิ้ว แต่การเพิ่มระยะเวลาทำความสะอาดจาก 30 นาที เป็น 24 ชม. ยังไม่สามารถสังเกตเห็นการเพิ่มประสิทธิภาพการทำความสะอาดได้ชัดเจนนัก นอกจากนี้ การเป่าด้วยความดันสามารถกำจัดเซลล์จุลชีพที่อุดตันได้ค่อนข้างมากที่สุดโดยมีค่าความดันอยู่ในช่วง 3.20 ถึง 10.20 ปอนด์/ตร.นิ้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.49



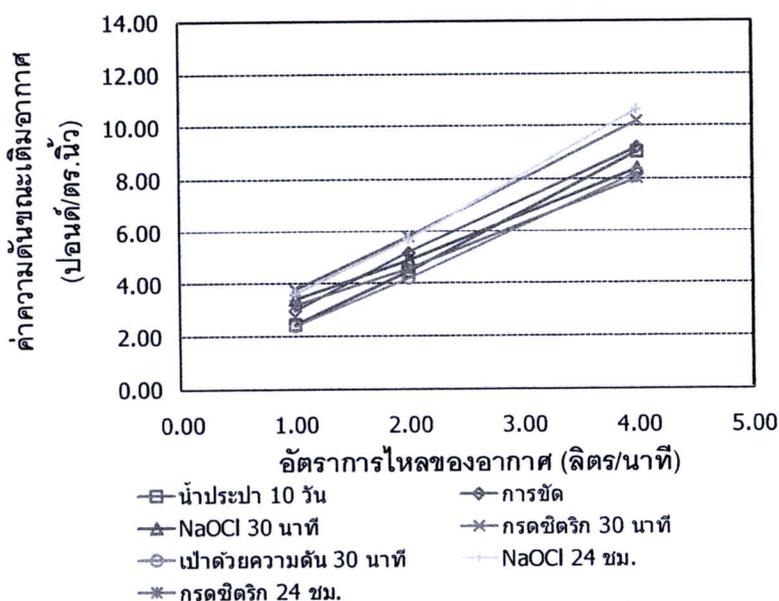
รูปที่ 4.49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันขณะเติมอากาศหลังทำความสะอาดและอัตราการไหลของอากาศของท่อยึดหยุ่นที่อุดตันด้วยเซลล์จุลชีพ

จากรูปที่ 4.47 และ 4.49 ยังไม่พบความแตกต่างของค่าตัวคูณปรับแก้ของการอุดตันและความดันขณะเติมอากาศที่ชัดเจน จึงไม่สามารถเลือกวิธีที่เหมาะสมสำหรับการทำความสะอาดเซลล์จุลชีพที่อุดตันเพราะหยุดเติมอากาศนาน 10 วันได้ เนื่องจากเป็นระยะเวลาหยุดเติมอากาศที่นานเกินไปจนทำให้เกิดการอุดตันที่ทำความสะอาดได้ยาก ดังนั้น จึงพิจารณาวิธีทำความสะอาดในกรณีที่หยุดเติมอากาศนาน 3 วัน ซึ่งเป็นระยะเวลาที่เริ่มเกิดการอุดตันและน่าจะสามารถทำความสะอาดได้ง่ายกว่าควบคุมไปด้วย

ในกรณีของการอุดตันโดยเซลล์จุลชีพจากการหยุดเติมอากาศเป็นระยะเวลา 3 วัน พบว่าค่าตัวคูณปรับแก้ของการอุดตันหลังทำความสะอาดด้วยวิธีต่างๆ ส่วนใหญ่มีแนวโน้มเท่ากับท่อที่อุดตัน ยกเว้นการเป่าด้วยความดันสามารถลดค่าตัวคูณปรับแก้ของการอุดตันเท่ากับ 1.68 ลดลงเป็น 1.40 ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 1.0 ถึง 4.0 ลิตร/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.50



รูปที่ 4.50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวคูณการปรับแก้ของการอุดตันหลังทำความสะอาดและอัตราการไหลของอากาศของท่อยึดหุ่นที่อุดตันด้วยเซลล์จุลชีพในช่วง 3 วัน



รูปที่ 4.51 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันขณะเต็มอากาศหลังทำความสะอาดและอัตราการไหลของอากาศของท่อยึดหุ่นที่อุดตันด้วยเซลล์จุลชีพในช่วง 3 วัน

เมื่อพิจารณาค่าความดันขณะเต็มอากาศ พบว่า การขัดสามารถทำความสะอาดเซลล์จุลชีพที่อุดตันท่อได้บางส่วน เนื่องจากเป็นวิธีที่กำจัดสิ่งอุดตันบริเวณผิวด้านนอกได้ แต่ไม่สามารถกำจัดสิ่งอุดตันภายในผนังท่อได้ค่าความดันจึงลดลงจากท่อที่อุดตันเพียงเล็กน้อย สำหรับการทำความสะอาด

ด้วยสารเคมี พบว่าสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถทำความสะอาดเซลล์ที่อุดตันได้โดยการแช่ท่อนาน 30 นาที ค่าความดันลดลงอยู่ในช่วง 3.40 ถึง 8.40 ปอนด์/ตร.นิ้ว สำหรับสารละลายกรดซิตริกต้องแช่ท่อนาน 24 ชม. จึงสามารถทำความสะอาดได้ซึ่งมีค่าความดันอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่การเป่าด้วยความดันนาน 30 นาที สามารถทำความสะอาดได้เป็นอย่างดีโดยลดค่าความดันจนเท่ากับค่าของท่อสะอาดคือ 2.40 ถึง 8.20 ปอนด์/ตร.นิ้ว ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 1.0 ถึง 4.0 ลิตร/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.51

ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพและตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศของท่ออุดตันในสภาวะการเติมอากาศต่างๆ

ลักษณะน้ำ	$k_L a$	P	d_b	U_b	a	k_L
	$\times 10^{-3}$ 1/วินาที	ปอนด์/ตร.นิ้ว	มม.	ม./วินาที	1/ม.	$\times 10^{-1}$ ม./วินาที
น้ำประปา	0.95 - 8.36	1.50 - 4.90	2.12 - 2.30	0.22 - 0.27	4.68 - 13.82	4.98 - 5.78
ดินขาว	0.95 - 8.50	1.50 - 4.90	1.65 - 1.97	0.21 - 0.32	4.31 - 16.73	3.51 - 6.52
เกลือ	1.95 - 20.80	1.50 - 4.90	0.98 - 1.34	0.11 - 0.14	14.97 - 78.25	2.25 - 3.90
น้ำทะเล	1.37 - 11.00	1.50 - 4.90	-	-	-	-
เซลล์จุลชีพ	0.59 - 6.57	1.50 - 4.90	1.16 - 1.53	0.12 - 0.24	10.05 - 24.57	1.02 - 2.13

ตารางที่ 4.5 ตัวคูณปรับแก้ของการอุดตันของท่ออุดตันจากการศึกษาวิธีทำความสะอาดที่เหมาะสม

ลักษณะท่อ	ตัวคูณปรับแก้ของการอุดตัน				
	น้ำประปา	ดินขาว	เกลือ	น้ำทะเล	เซลล์จุลชีพ
ท่อสะอาด	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
ท่ออุดตัน	-	1.05 - 1.18	0.40 - 0.68	0.78 - 0.80	1.58 - 2.42
การขัด	-	1.02 - 1.07	0.40 - 0.68	0.77 - 0.83	1.71 - 2.44
NaOCl	-	1.07 - 1.13	0.33 - 0.64	0.88 - 1.01	1.62 - 2.30
กรดซิตริก	-	1.03 - 1.30	0.48 - 0.71	0.90 - 1.02	1.65 - 2.27
เป่าด้วยความดัน	-	0.99 - 1.11	0.29 - 0.61	0.86 - 0.90	1.40 - 2.40

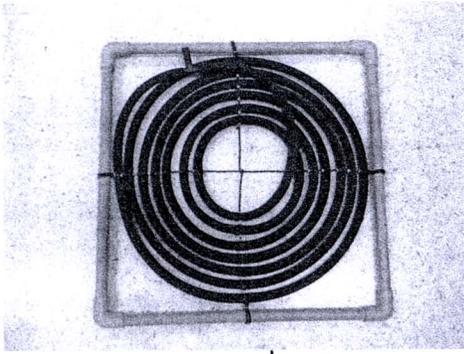
ตารางที่ 4.6 ความดันขณะเติมอากาศของท่อยัดหยุ่นจากการศึกษาวิธีทำความสะอาดที่เหมาะสม

ลักษณะท่อ	ความดัน (ปอนด์/ตร.นิ้ว)				
	น้ำประปา	ดินขาว	เกลือ	น้ำทะเล	เซลล์จูลซีฟ
ท่อสะอาด	1.50 - 4.90	1.50 - 4.90	1.50 - 4.90	1.50 - 4.90	1.50 - 4.90
ท่ออุดตัน	2.45 - 9.00	3.20 - 11.60	2.30 - 7.90	3.00 - 8.60	2.60 - 10.50
การขัด	-	3.40 - 7.00	3.00 - 8.00	3.60 - 8.80	3.00 - 11.20
NaOCl	-	3.60 - 9.40	3.30 - 8.00	3.40 - 7.90	3.10 - 10.20
กรดซัลฟิวริก	-	5.20 - 12.50	3.20 - 7.40	3.60 - 9.40	3.00 - 10.20
เป่าด้วยความดัน	-	2.50 - 9.30	2.40 - 9.00	2.40 - 8.20	2.40 - 10.20

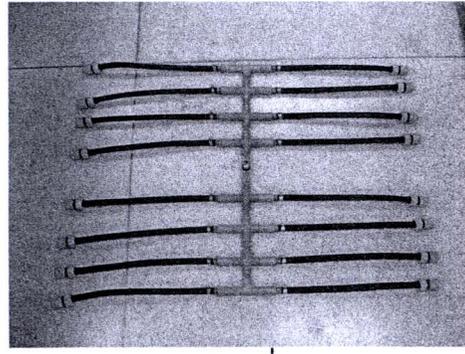
จากตารางที่ 4.4 แสดงช่วงของประสิทธิภาพการเติมอากาศของท่อยัดหยุ่นและตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศขณะเติมอากาศในสภาวะต่างๆที่สนใจศึกษาในหัวข้อนี้ ส่วนตารางที่ 4.5 และ 4.6 แสดงช่วงของค่าตัวคูณปรับแก้ของการอุดตันและความดันขณะเติมอากาศของท่อยัดหยุ่นจากการทดลองศึกษาวิธีทำความสะอาดที่เหมาะสม จากผลการทดลองในหัวข้อนี้สามารถสรุปได้ว่าวิธีทำความสะอาดท่อยัดหยุ่นที่เหมาะสมคือ การเป่าด้วยความดัน โดยในงานวิจัยนี้ได้เป่าอากาศด้วยความดัน 3 บาร์ เป็นระยะเวลา 30 นาที พบว่าสามารถกำจัดสิ่งอุดตันได้ดีทั้งในรูปแบบของแข็งแขวนลอยและเซลล์จูลซีฟ เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถกำจัดสิ่งอุดตันได้ทั้งบริเวณผิวด้านนอกของท่อและภายในผนังท่อซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Van Halem และคณะ (2009) ที่ศึกษาวิธีทำความสะอาดเมมเบรนเพื่อกรองน้ำดื่ม

4.3 การศึกษารูปแบบการจัดเรียงท่อยัดหยุ่นในถังเติมอากาศ

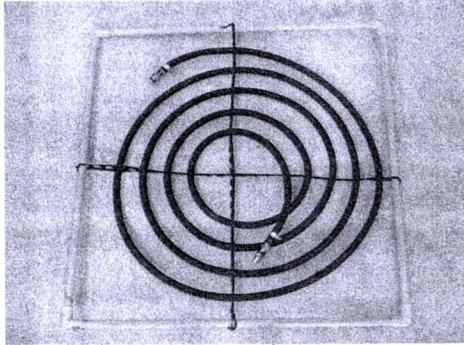
จากการศึกษาตัวแปรด้านการถ่ายเทมวลสารและอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศในหัวข้อการทดลองข้างต้นซึ่งเป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการโดยเติมอากาศในถังขนาดเล็ก การทดลองในหัวข้อนี้จึงได้ศึกษาตัวแปรดังกล่าวในถังเติมอากาศขนาดใหญ่ (ปริมาตรน้ำ 2,000 ลิตร) เพื่อศึกษาแนวทางการประยุกต์ใช้ท่อยัดหยุ่นเป็นอุปกรณ์เติมอากาศแบบท่อในด้านรูปแบบการจัดเรียงท่อที่เหมาะสมในถังเติมอากาศ โดยกำหนดเป็น 4 รูปแบบที่สนใจศึกษาโดยแต่ละรูปแบบใช้ท่อยัดหยุ่นยาว 7.5 ม. ดังแสดงในรูปที่ 4.52



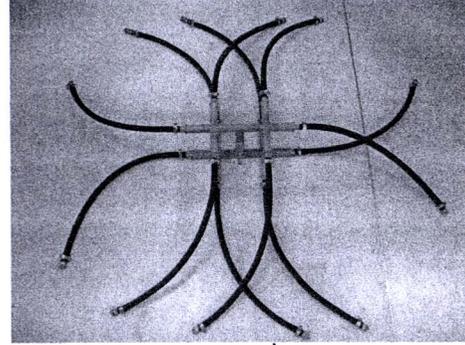
รูปแบบที่ 1



รูปแบบที่ 2



รูปแบบที่ 3



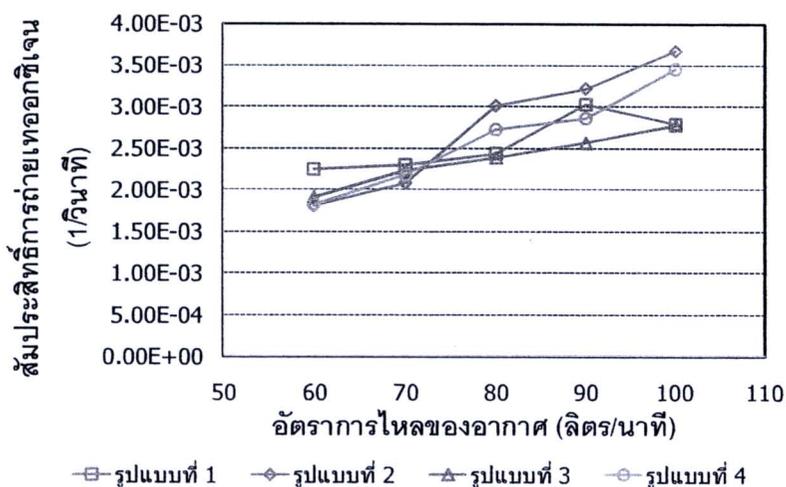
รูปแบบที่ 4

รูปที่ 4.52 รูปแบบการจัดเรียงท่อยืดหยุ่น

การทดลองในหัวข้อนี้ประกอบไปด้วยการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และการวิเคราะห์ฟังก์ชันการกระจายระยะเวลาักเก็บ (Residence Time Distribution, RTD) เพื่อพิจารณารูปแบบการจัดเรียงท่อที่เหมาะสมทั้งด้านประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนและประสิทธิภาพเชิงพลังงาน โดยมีรายละเอียดดังนี้

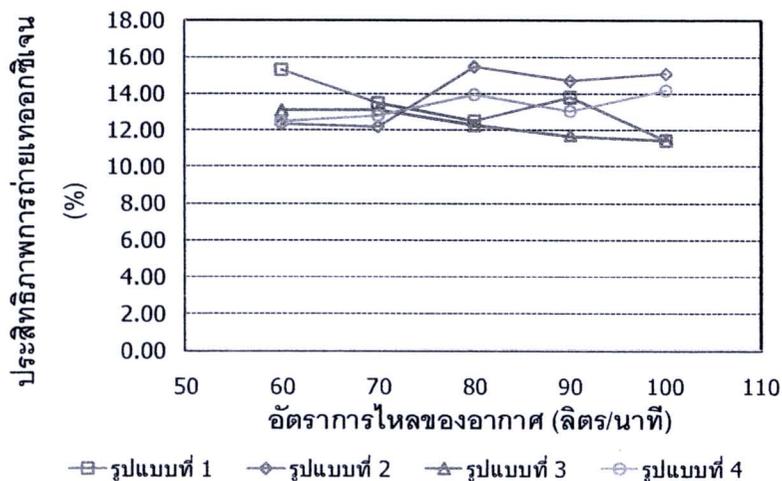
4.3.1 การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน

การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในหัวข้อนี้ได้ทำการเติมอากาศในถังขนาด 2,500 ลิตร (ปริมาตรน้ำ 2,000 ลิตร) โดยใช้ท่อยืดหยุ่นตัวอย่างที่ 6.3 เป็นอุปกรณ์เติมอากาศจัดเรียงเป็นรูปแบบตามที่กำหนด เติมอากาศด้วยอัตราการไหลในช่วง 60 ถึง 100 ลิตร/นาที เปรียบเทียบรูปแบบที่เหมาะสมโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน และอัตราการถ่ายเทออกซิเจน

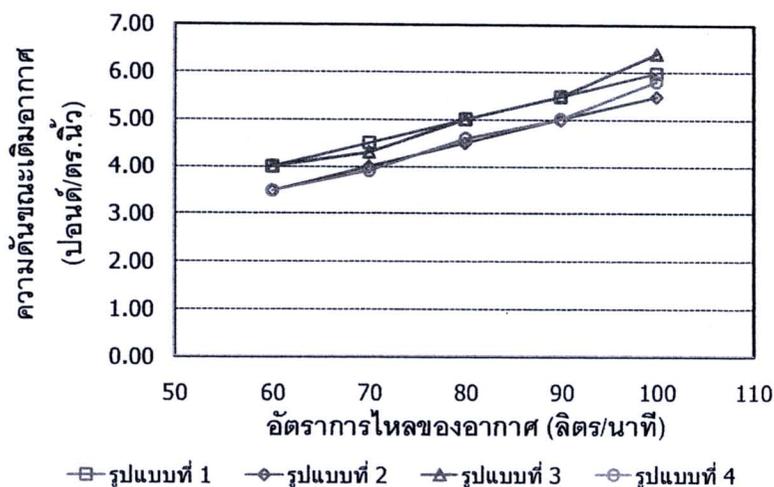


รูปที่ 4.53 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการใช้ไฟของอากาศของการจัดเรียงที่อัดหยุนรูปแบบต่างๆ

จากรูปที่ 4.53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการใช้ไฟของอากาศของการจัดเรียงที่อัดหยุนรูปแบบต่างๆ พบว่า รูปแบบที่ 2 มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมากที่สุดโดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 1.81×10^{-3} เป็น 3.68×10^{-3} 1/วินาที และเมื่อคำนวณเป็นประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนจึงมีค่ามากที่สุดตามไปด้วย คือร้อยละ 12.36 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 15.08 ในช่วงอัตราการใช้ไฟของอากาศ 60 ถึง 100 ลิตร/นาฬิกา ดังแสดงในรูปที่ 4.54

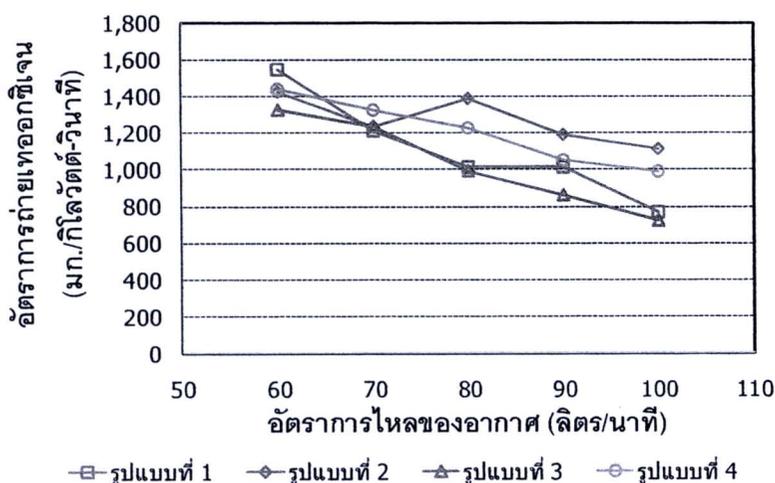


รูปที่ 4.54 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการใช้ไฟของอากาศของการจัดเรียงที่อัดหยุนรูปแบบต่างๆ



รูปที่ 4.55 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันขณะเติมอากาศและอัตราการไหลของอากาศของการจัดเรียงท่อยึดหยุ่นรูปแบบต่างๆ

จากรูปที่ 4.55 เมื่อพิจารณาค่าความดันขณะเติมอากาศ พบว่า รูปแบบที่ 2 และ 4 มีค่าความดันดันทันน้อยกว่ารูปแบบอื่นๆ คือ 3.50 เพิ่มขึ้นเป็น 5.50 ปอนด์/ตร.นิ้ว ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 60 ถึง 100 ลิตร/นาที เนื่องจากช่วงความยาวของท่อยึดหยุ่นในแต่ละสาขาสั้นกว่ารูปแบบอื่นๆ คือ 0.47 ม. (สำหรับรูปแบบที่ 2) และ 0.62 ม. (สำหรับรูปแบบที่ 4) ในขณะที่รูปแบบที่ 1 และ 3 เกิดจากการจัดเรียงท่อที่ยาว 7.5 ม. จึงมีค่าความดันมากกว่า



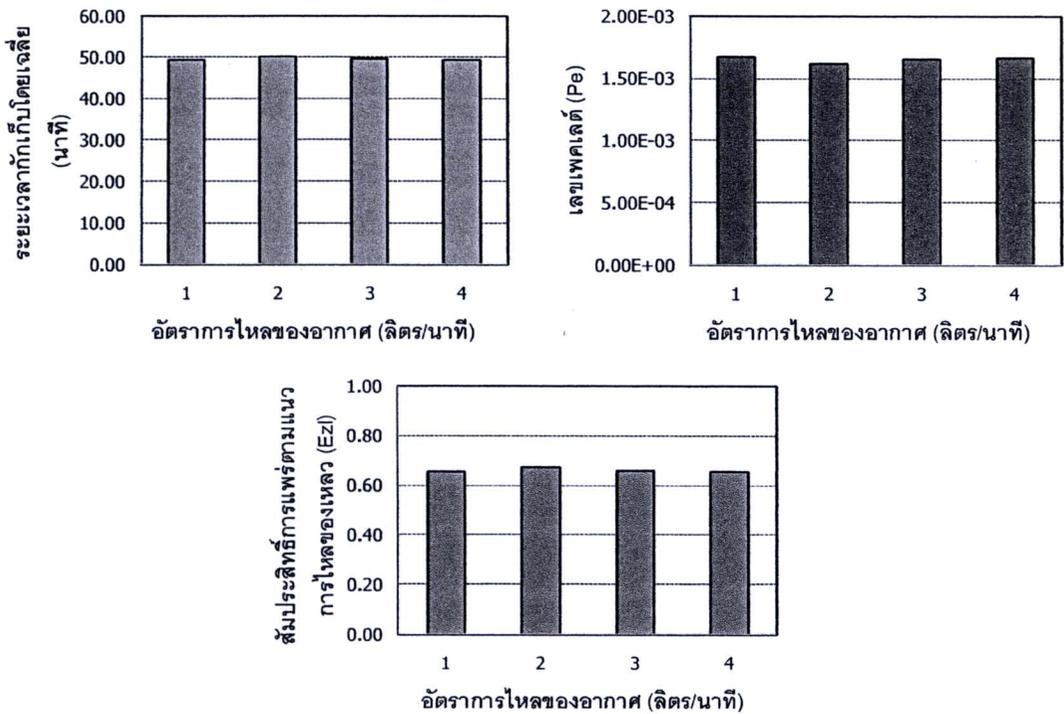
รูปที่ 4.56 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศของการจัดเรียงท่อยึดหยุ่นรูปแบบต่างๆ

จากรูปที่ 4.56 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการไหลของอากาศของการจัดเรียงท่อยึดหุ่นรูปแบบต่างๆ พบว่า รูปแบบที่ 2 มีค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนมากที่สุดคือ 1,430 มีแนวโน้มลดลงเป็น 1,110 มก./กิโลวัตต์-วินาที ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 60 ถึง 100 ลิตร/นาที เนื่องจากเป็นรูปแบบที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมากที่สุด ประกอบกับใช้ค่าความดันขณะเต็มอากาศน้อยที่สุด จึงมีประสิทธิภาพเชิงพลังงานมากที่สุด

จากการทดลองในหัวข้อนี้สรุปได้ว่า การจัดเรียงท่อยึดหุ่นรูปแบบที่ 2 ในถังเต็มอากาศมีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากเป็นรูปแบบที่มีความสมมาตรสามารถกระจายฟองอากาศได้สม่ำเสมอ จึงมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูงซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอุปกรณ์ชนิดท่อพลาสติก เพอร์ฟอเรทเมมเบรน เจ็ท หรือชนิดไม่มีรูพรุน (ดังแสดงในภาคผนวก ข-6) โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองที่ความลึกของน้ำเท่ากับ 1.3 ม. อย่างไรก็ตาม ถ้าเพิ่มความลึกของน้ำเป็น 4.5 ม. ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเช่นกันจนมีค่าเทียบเท่ากับอุปกรณ์ชนิดอื่นที่มีประสิทธิภาพสูงได้ ประกอบกับท่อในแต่ละสาขามีความยาวเท่ากันและสันกว่ารูปแบบอื่นๆ ทำให้ใช้ความดันขณะเต็มอากาศน้อยกว่ารูปแบบอื่นๆตามไปด้วย จึงมีอัตราการถ่ายเทออกซิเจนสูงซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพเชิงพลังงานที่สูงเช่นกัน โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้ท่อยึดหุ่นยาว 7.5 ม. ต่อพื้นที่ก้นถังเต็มอากาศ 1.33 ตร.ม.

4.3.2 ฟังก์ชันการกระจายเวลาดำเนินการ (Retention Time Distribution, RTD)

การวิเคราะห์ฟังก์ชันการกระจายเวลากักน้ำในหัวข้อนี้ได้ศึกษาโดยการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นเทรเซอร์ (Tracer) แบบพัลส์ (Pulse) ที่ผิวน้ำในถังเต็มอากาศขนาด 2,500 ลิตร (ปริมาตรน้ำประมาณ 2,000 ลิตร) มีน้ำประปาไหลเข้าที่ก้นถังด้วยอัตราการไหล 45 ลิตร/นาที และมีท่อรับน้ำล้นที่ผิวน้ำด้านบนฝั่งตรงข้ามกับจุดเติมสาร ใช้ท่อยึดหุ่นที่ถูกจัดเรียงเป็นรูปแบบต่างๆ ดังรูปที่ 4.52 เติมอากาศด้วยอัตราการไหล 70 ลิตร/นาที จับเวลาพร้อมกับวิเคราะห์ค่าความนำไฟฟ้า ณ จุดน้ำล้นโดยเครื่องวัดความนำไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์รูปแบบการไหล (Flow pattern) และการกวนผสม (Mixing) ที่เกิดจากอุปกรณ์เต็มอากาศรูปแบบต่างๆ โดยการคำนวณระยะเวลาที่เก็บโดยเฉลี่ย (Average residence time, \bar{t}) เลขเพคเลต (Peclet number, Pe) และสัมประสิทธิ์การแพร่ตามแนวการไหล (Liquid axial dispersion coefficient, E_{z1}) ตามสมการที่ 3.1 ถึง 3.4 เพื่ออธิบายถึงระดับความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นจากการเติมอากาศโดยท่อยึดหุ่นที่ถูกจัดเรียงเป็นรูปแบบตามที่กำหนด ผลการวิเคราะห์มีรายละเอียดดังนี้



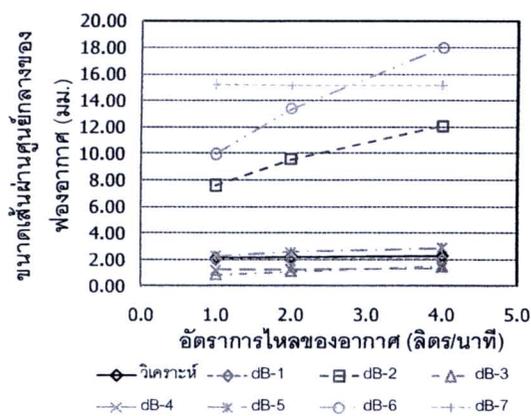
รูปที่ 4.57 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ฟังก์ชันการกระจายเวลากักน้ำ

จากรูปที่ 4.57 แสดงผลการเปรียบเทียบระยะเวลาที่เก็บโดยเฉลี่ย พบว่า มีค่าใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วง 49.35 ถึง 50.47 นาที แสดงถึงการจัดเรียงท่อแบบต่างๆทำให้เกิดความปั่นป่วนได้ใกล้เคียงกัน แต่ระยะเวลาที่เก็บโดยเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎีคือ 56.29 นาที แสดงว่าเกิดการไหลลัดวงจร (Short circuit) เนื่องจากการเติมสารที่ผิวน้ำซึ่งใกล้กับจุดน้ำคั้น อย่างไรก็ตาม เมื่อคำนวณเลขเพคเลต์และสัมประสิทธิ์การแพร่ตามแนวการไหลของเหลว พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน เช่นเดียวกัน ซึ่งเลขเพคเลต์ที่มีค่าเข้าใกล้ศูนย์แสดงว่ารูปแบบการไหลภายในถังเป็นแบบกวนผสมสมบูรณ์ (Completely mixed flow) ดังนั้น การจัดเรียงท่อที่ยืดหยุ่นตามแบบที่กำหนดสามารถทำให้เกิดการปั่นป่วนระดับเดียวกันในถังเติมอากาศ คือ ทำให้รูปแบบการไหลของน้ำเป็นแบบกวนผสมสมบูรณ์ การพิจารณาเลือกรูปแบบการจัดเรียงที่เหมาะสมจึงพิจารณาจากประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนและประสิทธิภาพเชิงพลังงานคือรูปแบบที่ 2 ตามผลการทดลองหัวข้อที่ 4.3.1 อย่างไรก็ตาม แนวทางการวิเคราะห์ฟังก์ชันการกระจายเรซิเดนไทม์ น่าจะเป็นประโยชน์สำหรับการพิจารณารูปแบบการไหลของน้ำในถังเติมอากาศของระบบที่แตกต่างกัน ในกรณีที่ถังเติมอากาศมีขนาดใหญ่รูปแบบการวางอุปกรณ์เติมอากาศที่หลากหลาย รวมถึงการเดินระบบด้วยอัตราการไหลของน้ำและอากาศที่แตกต่างกันออกไปซึ่งอาจทำให้เกิดความแตกต่างของฟังก์ชันการกระจาย และทำให้สามารถอธิบายกลไกที่เกิดขึ้นได้ รวมถึงออกแบบและประยุกต์ใช้ระบบกับกระบวนการเติมอากาศได้อย่างเหมาะสม

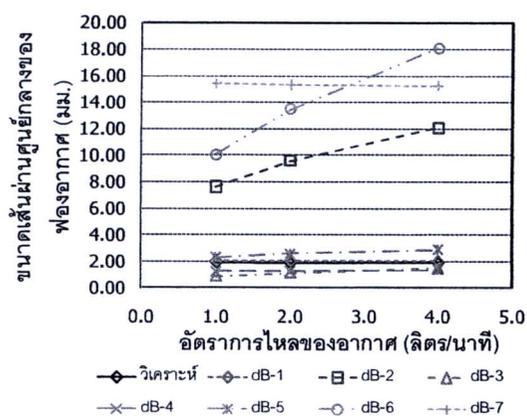
4.4 การทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน

การทดลองในหัวข้อนี้ประกอบไปด้วยการทำนายค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (d_b) ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (U_b) พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำ (a) สัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว (k_L) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ($k_L a$) โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ถึง 2.7 เพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ และนำเสนอแบบจำลองที่เหมาะสมในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน สำหรับที่อ้อยหน่และสภาวะการเติมอากาศที่กำหนดในงานวิจัยนี้ โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการไหลของอากาศ ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสมบัติทางกายภาพของที่อ้อยหน่และสมบัติของน้ำ ทำนายขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้น หลังจากนั้นจึงใช้เป็นตัวแปรหลักในการทำนายค่าตัวแปรอื่นๆ จนกระทั่งสามารถทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนได้ โดยมีรายละเอียดดังนี้

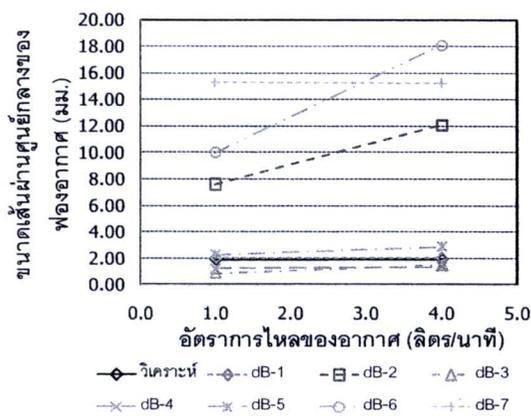
4.4.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (d_b)



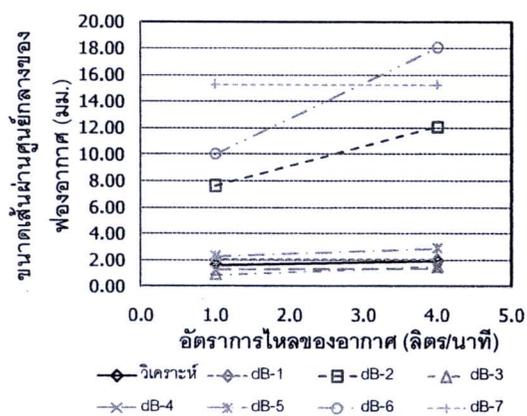
1.) น้ำประปา



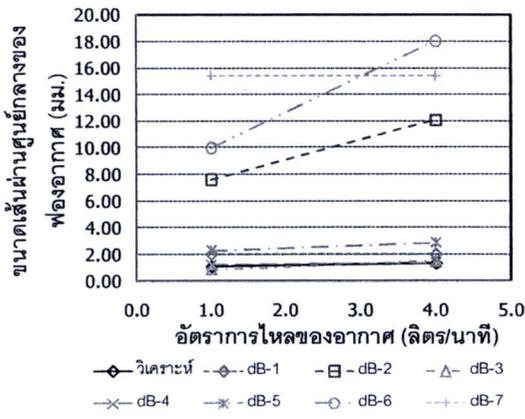
2.) ดินขาว 50 มก./ลิตร



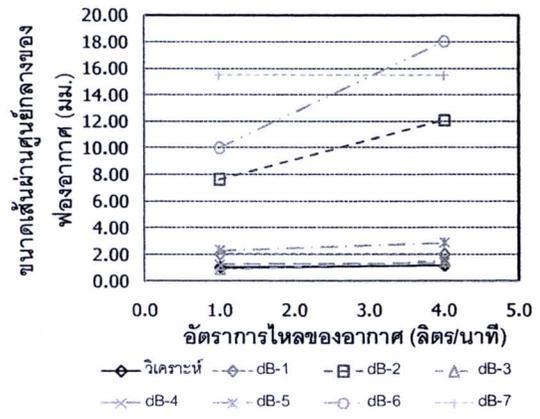
3.) ดินขาว 100 มก./ลิตร



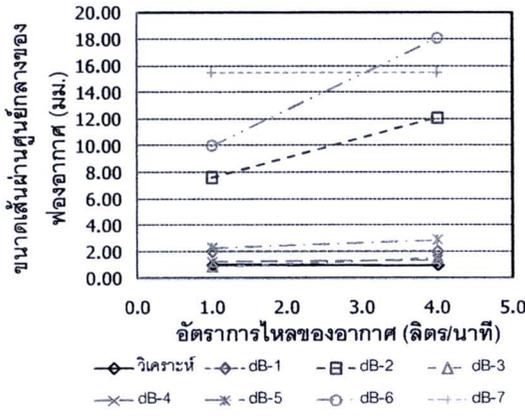
4.) ดินขาว 200 มก./ลิตร



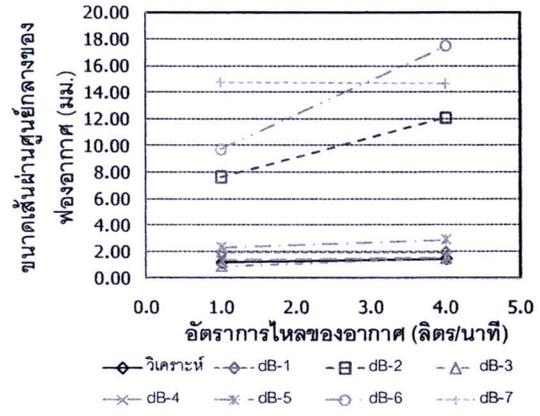
5.) เกลือช 7,500 มก./ลิตร



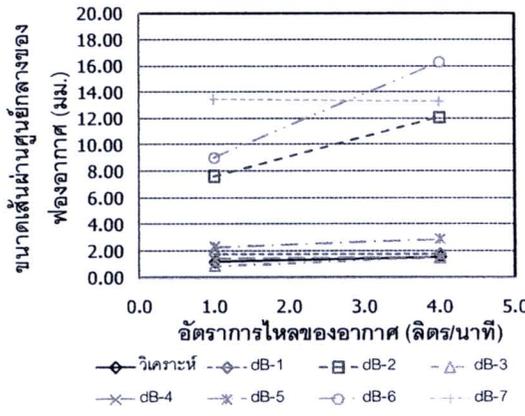
6.) เกลือช 20,000 มก./ลิตร



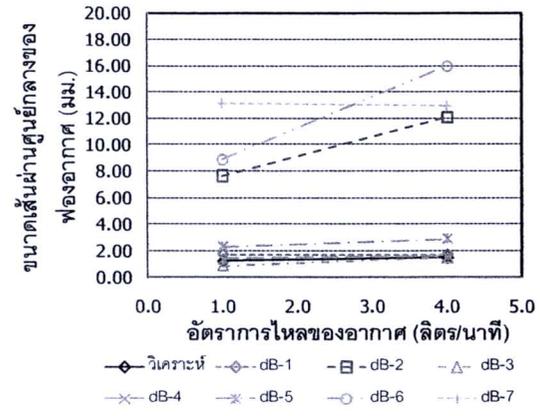
7.) เกลือช 35,000 มก./ลิตร



8.) เซลล์จุลชีพ 1,000 มก./ลิตร



9.) เซลล์จุลชีพ 2,000 มก./ลิตร



10.) เซลล์จุลชีพ 3,000 มก./ลิตร

รูปที่ 4.58 กราฟแสดงผลการทำนายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ

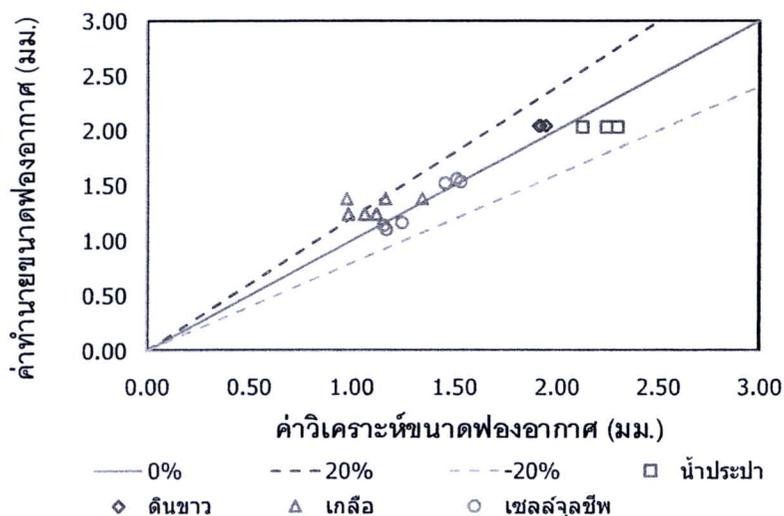
จากรูปที่ 4.58 แสดงผลการทำนายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ พบว่า สารเจือปนแต่ละชนิดส่งผลต่อกลไกการถ่ายเทออกซิเจนที่แตกต่างกัน (ดังแสดงในผลการทดลองที่ 4.2.1 และ 4.2.2) จึงทำให้การเลือกใช้สมการที่เหมาะสมในการทำนายแตกต่างกัน



กันด้วย โดยพิจารณาเลือกสมการที่ให้ผลทำนายมีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลวิเคราะห์มากที่สุด พบว่าน้ำที่ถูกเจือปนด้วยดินขาวมีสมบัติของน้ำไม่แตกต่างไปจากน้ำประปามากนัก (ดังตารางที่ 4.3) จึงใช้สมการเดียวกันในการทำนายขนาดฟองอากาศ คือ สมการ d_{B-1} สำหรับในน้ำเกลือเลือกสมการ d_{B-4} แต่สำหรับน้ำที่ถูกเจือปนด้วยเซลล์จุลชีพพบว่าไม่สามารถเลือกใช้สมการใดสมการหนึ่งในการทำนายได้ เมื่อพิจารณาแนวโน้มของค่าวิเคราะห์พบว่าอยู่ในช่วงระหว่างสมการ d_{B-3} และ d_{B-4} ซึ่งมีความสัมพันธ์กับสมบัติของน้ำและความดันขณะเดิมอากาศ (เกี่ยวข้องกับสมบัติทางกายภาพของอุณหภูมิตั้งเดิมอากาศ) จึงเลือกใช้ค่าเฉลี่ยจากสมการทั้งในการทำนายขนาดฟองอากาศ ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับทำนายขนาดฟองอากาศ

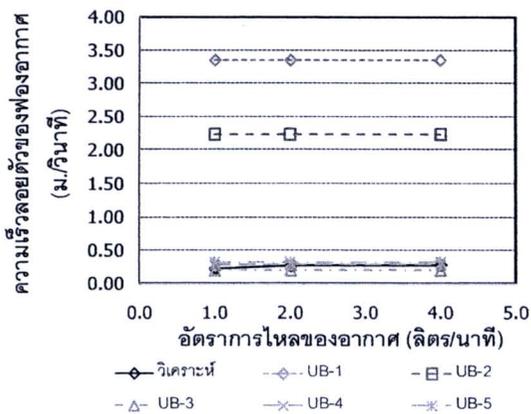
ลักษณะน้ำ	สมการ		อ้างอิง
น้ำประปา	d_{B-1}	$d_B = \left[\frac{6 \times d_{OR} \times \sigma \times g_c}{g \times \Delta p} \right]^{1/3}$	Krevelen และคณะ (1959)
ดินขาว			
เกลือ	d_{B-4}	$d_B = 7.1 \times 10^{-4} \times \Delta P^{0.328}$	Hebrard (1995)
เซลล์จุลชีพ	$\frac{(d_B - 3) + (d_B - 4)}{2}$	$d_B - 3 = \left[\frac{72 \times \rho_L}{\pi^2 \times g \times \Delta p} \right]^{1/5} \times Q_{go}^{0.4}$ $d_B - 4 = 7.1 \times 10^{-4} \times \Delta P^{0.328}$	Krevelen และคณะ (1959) Hebrard (1995)



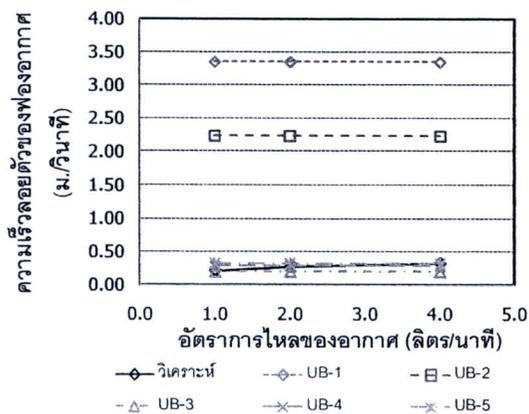
รูปที่ 4.59 กราฟแสดงความแม่นยำของผลทำนายขนาดฟองอากาศ

จากรูปที่ 4.59 เมื่อทำนายขนาดฟองอากาศโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงในตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบกับค่าที่วิเคราะห์ได้ พบว่ามีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 20 เป็นส่วนใหญ่จึงใช้ค่าขนาดฟองอากาศที่ทำนายได้เป็นตัวแปรหลักในการทำนายค่าตัวแปรอื่นๆต่อไป

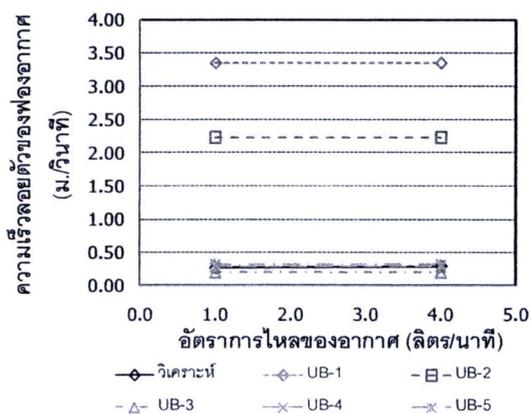
4.4.2 ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (U_B)



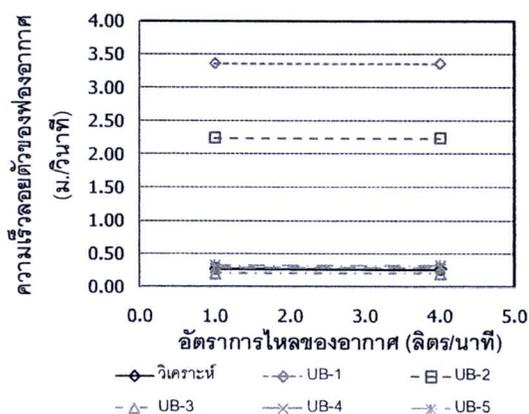
1.) น้ำประปา



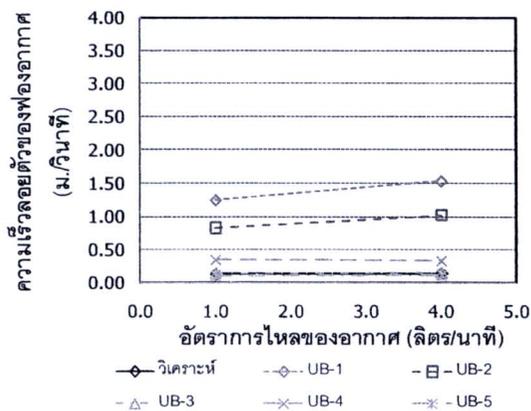
2.) ดินขาว 50 มก./ลิตร



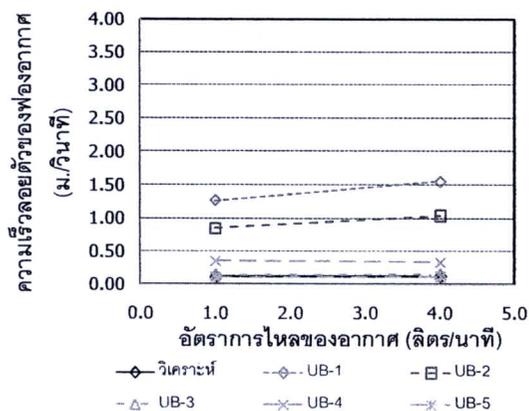
3.) ดินขาว 100 มก./ลิตร



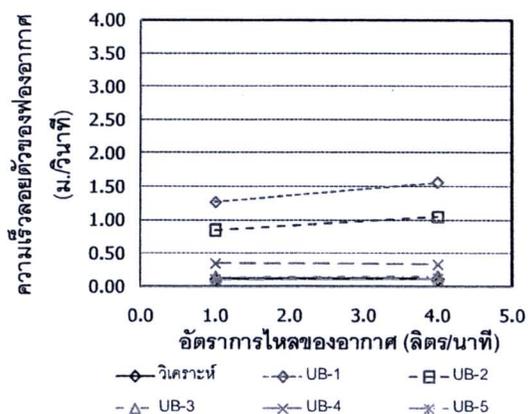
4.) ดินขาว 200 มก./ลิตร



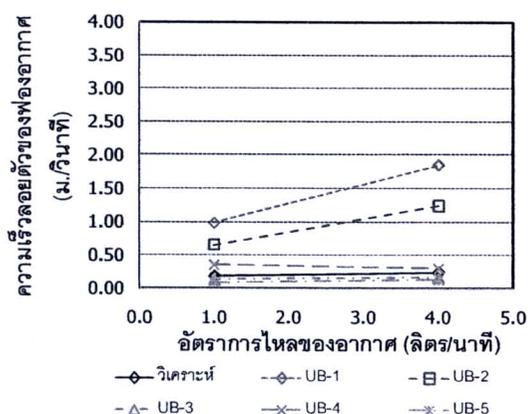
5.) เกลือ 7,500 มก./ลิตร



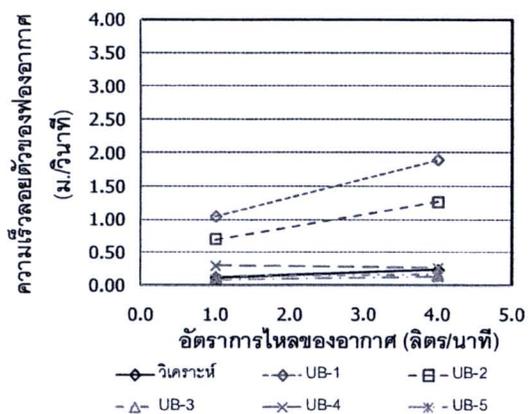
6.) เกลือ 20,000 มก./ลิตร



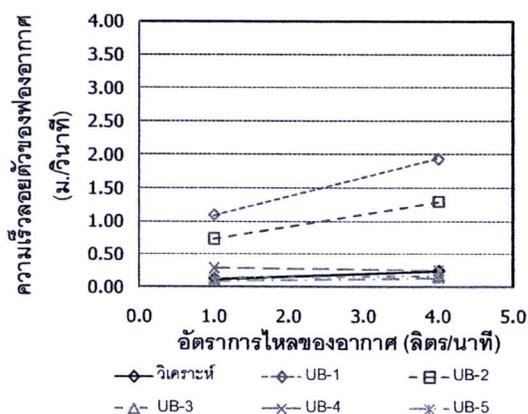
7.) กลี้อ 35,000 มก./ลิตร



8.) เซลล์จุลชีพ 1,000 มก./ลิตร



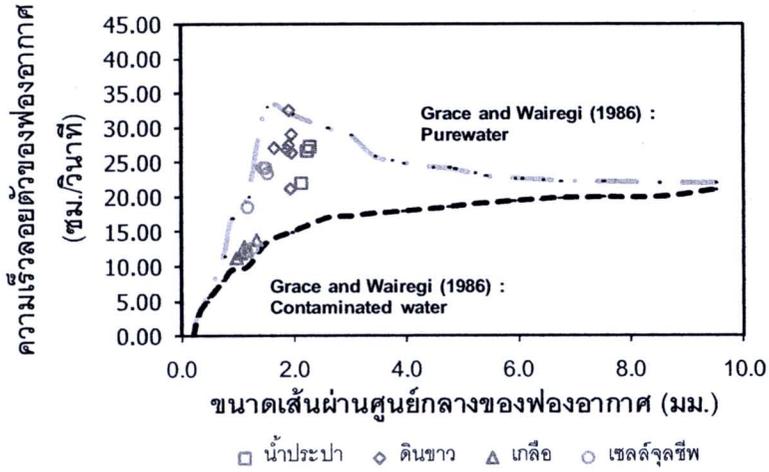
9.) เซลล์จุลชีพ 2,000 มก./ลิตร



10.) เซลล์จุลชีพ 3,000 มก./ลิตร

รูปที่ 4.60 กราฟแสดงผลการทำนายความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ

จากรูปที่ 4.60 แสดงผลการทำนายความเร็วลอยตัวของฟองอากาศเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ พบว่า ในน้ำประปาและน้ำที่ถูกเจือปนด้วยดินขาวสามารถใช้สมการ U_b-4 ทำนายค่าได้ ในขณะที่ในน้ำเกลือสามารถอ่านค่าได้จากกราฟของ Grace และ Wairegi (1986) (สมการที่ U_b-5) โดยอ่านค่าจากสภาวะน้ำที่ถูกปนเปื้อน (Contaminated water) ดังแสดงในรูปที่ 4.61



รูปที่ 4.61 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลอยตัวของฟองอากาศกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ โดย Grace และ Wairegi (1986)

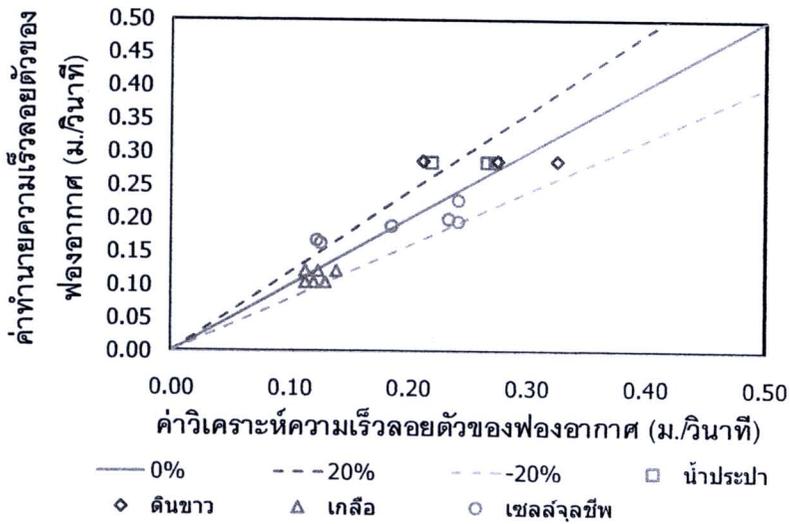
แต่สำหรับน้ำที่ถูกเจือปนด้วยเซลล์จุลชีพพบว่าไม่สามารถใช้สมการใดสมการหนึ่งทำนายค่าได้ จึงใช้วิธีนำผลการทำนายจากสมการ U_{B-4} ปรับแก้ค่าโดยอัตราส่วนระหว่างขนาดฟองอากาศในน้ำที่ถูกเจือปนด้วยเซลล์จุลชีพกับในน้ำประปา ดังแสดงในสมการ

$$U_B = \frac{d_{B-Actual}}{d_{B-Water}} \times (U_B - 4) \tag{4.1}$$

เมื่อ $d_{B-Actual}$ และ $d_{B-Water}$ คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศในน้ำที่ถูกเจือปนด้วยเซลล์จุลชีพและในน้ำประปา ตามลำดับ

ตารางที่ 4.8 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับทำนายความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ

ลักษณะน้ำ	สมการ		อ้างอิง
น้ำประปา	U_{B-4}	$U_B = \left[\frac{2\sigma}{d_B \times \rho} + 0.5d_B \times g \right]^{0.5}$	Mendelson (1967)
ดินขาว			
เกลือ	U_{B-5}	-	Grace and Wairegi (1986)
เซลล์จุลชีพ	$\frac{d_{B-Actual}}{d_{B-Water}} \times (U_B - 4)$	$U_B - 4 = \left[\frac{2\sigma}{d_B \times \rho} + 0.5d_B \times g \right]^{0.5}$	Mendelson (1967)

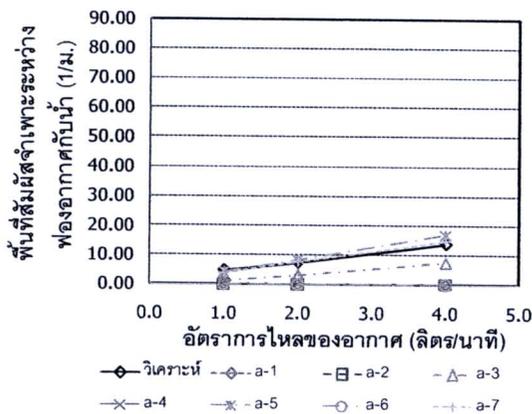


รูปที่ 4.62 กราฟแสดงความแม่นยำของผลทำนายความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ

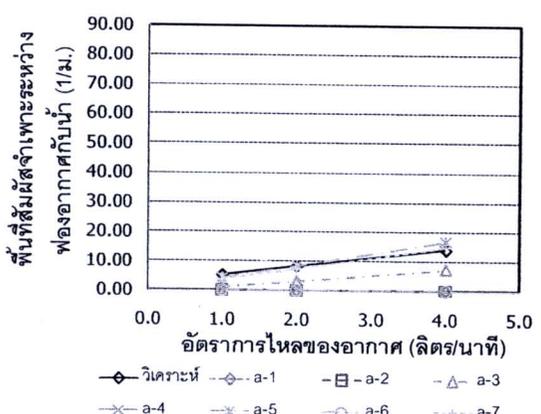
จากรูปที่ 4.62 เมื่อทำนายความเร็วลอยตัวของฟองอากาศโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงในตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบกับค่าที่วิเคราะห์ได้ พบว่ามีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 20 จึงใช้ค่าความเร็วลอยตัวของฟองอากาศที่ทำนายได้ประกอบการทำนายตัวแปรอื่นต่อไป

4.4.3 พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำ (a)

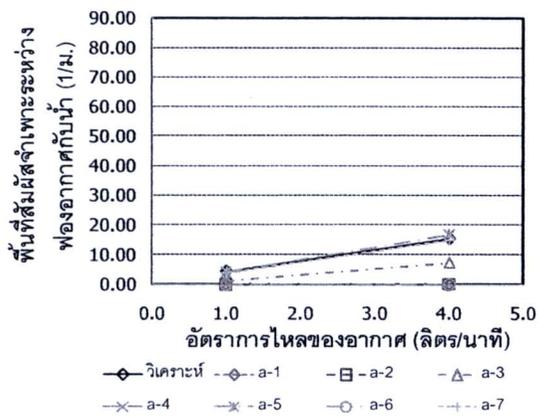
เนื่องจากการคำนวณพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำได้ใช้สมการที่ 2.26 ซึ่งเป็นสมการเดียวกับสมการ a-7 (Painmanakul และคณะ, 2004) เมื่อเปรียบเทียบกับการทำนายโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อื่นๆจึงมีความแม่นยำมากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.63



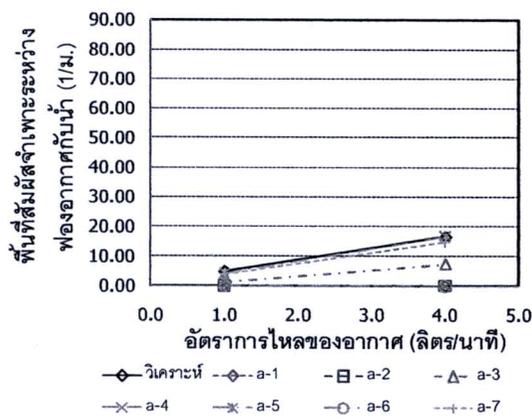
1.) น้ำประปา



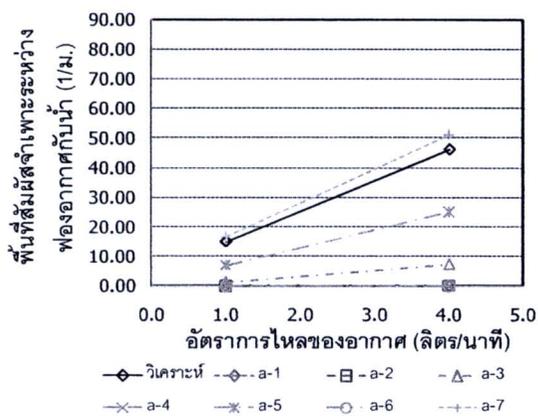
2.) ดินขาว 50 มก./ลิตร



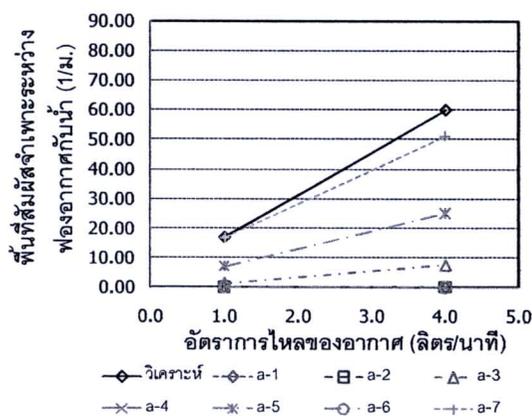
3.) ดินขาว 100 มก./ลิตร



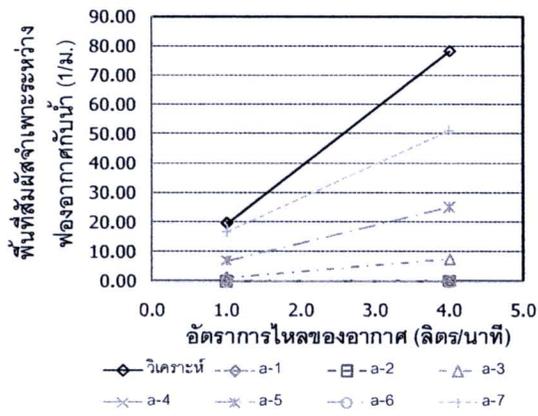
4.) ดินขาว 200 มก./ลิตร



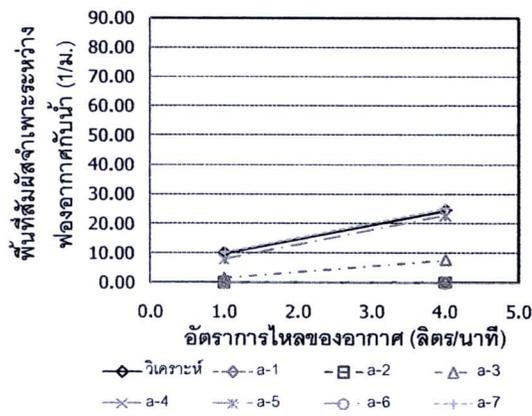
5.) เกือบ 7,500 มก./ลิตร



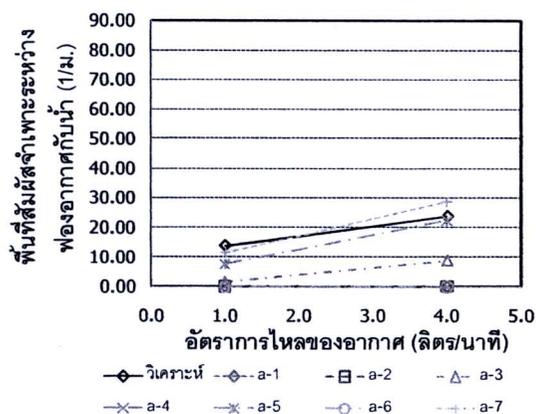
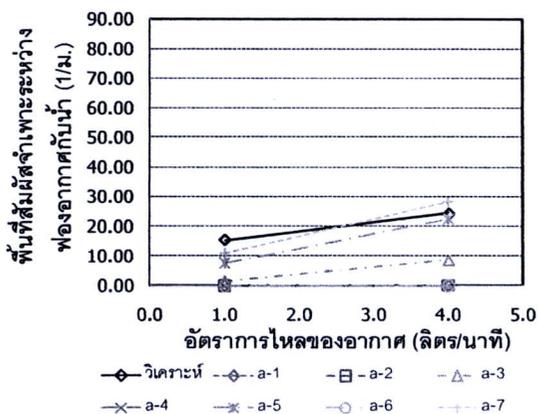
6.) เกือบ 20,000 มก./ลิตร



7.) เกือบ 35,000 มก./ลิตร



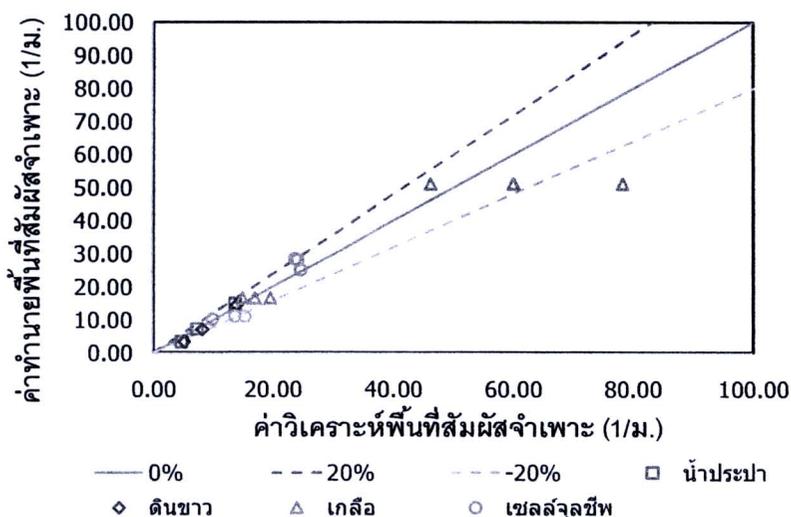
8.) เซลล์จุลชีพ 1,000 มก./ลิตร



9.) เซลล์จุลชีพ 2,000 มก./ลิตร

10.) เซลล์จุลชีพ 3,000 มก./ลิตร

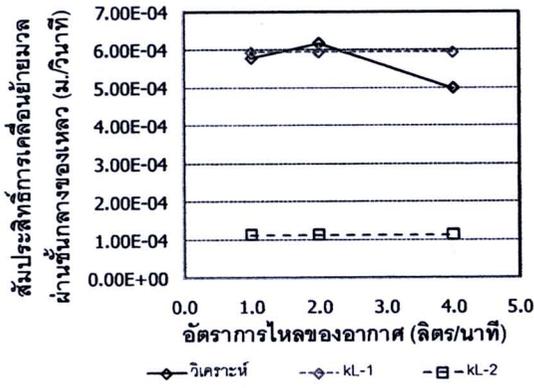
รูปที่ 4.63 กราฟแสดงผลการทำนายพื้นที่สัมพัทธ์จำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำ



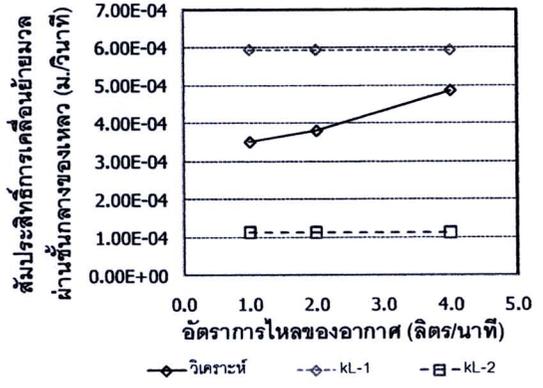
รูปที่ 4.64 กราฟแสดงความแม่นยำของผลทำนายพื้นที่สัมพัทธ์จำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำ

จากรูปที่ 4.64 เมื่อทำนายพื้นที่สัมพัทธ์จำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำโดยสมการ a-7 เปรียบเทียบกับค่าที่วิเคราะห์ได้ พบว่ามีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 20 จึงใช้ค่าดังกล่าวที่ทำนายได้ประกอบการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนต่อไป

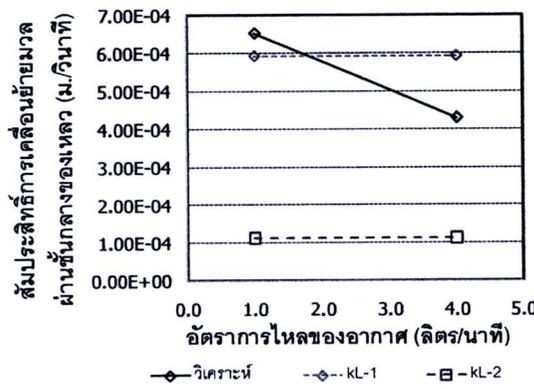
4.4.4 สัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว (k_f)



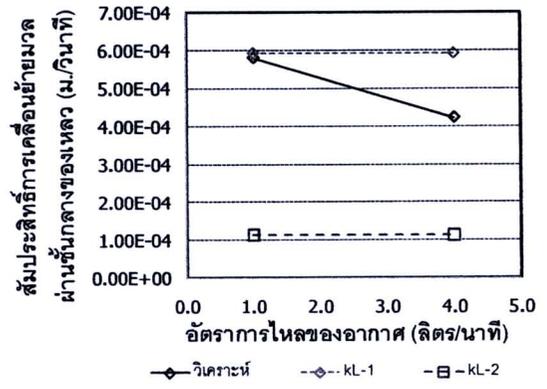
1.) น้ำประปา



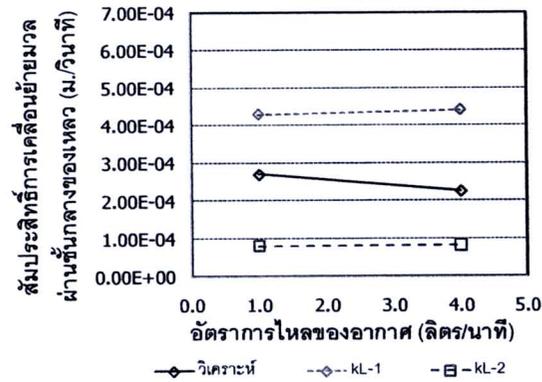
2.) ดินขาว 50 มก./ลิตร



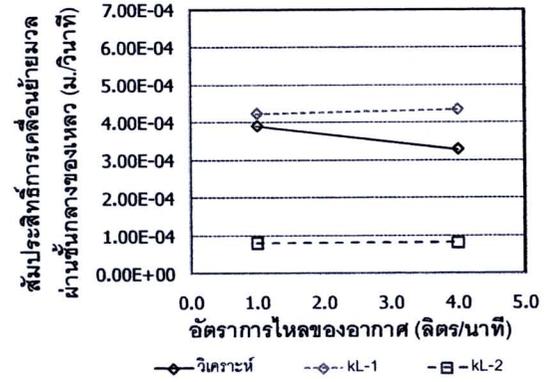
3.) ดินขาว 100 มก./ลิตร



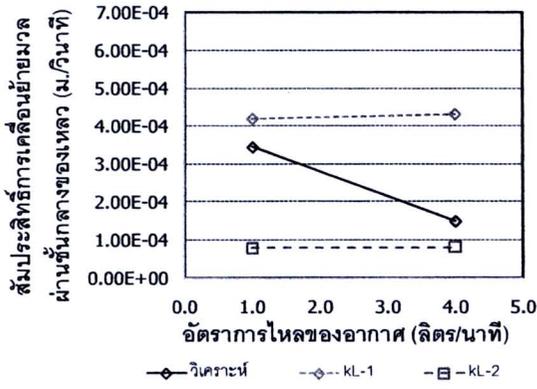
4.) ดินขาว 200 มก./ลิตร



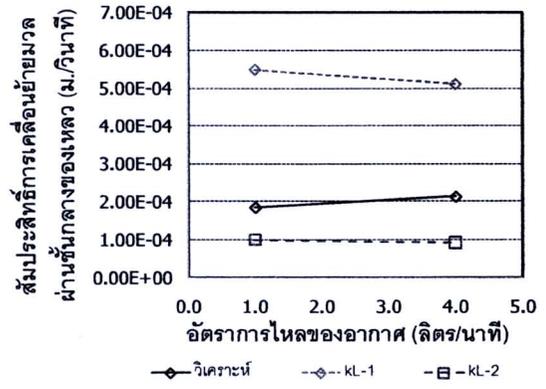
5.) เกล็ด 7,500 มก./ลิตร



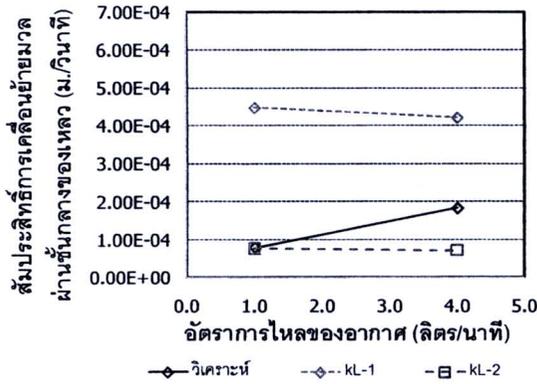
6.) เกล็ด 20,000 มก./ลิตร



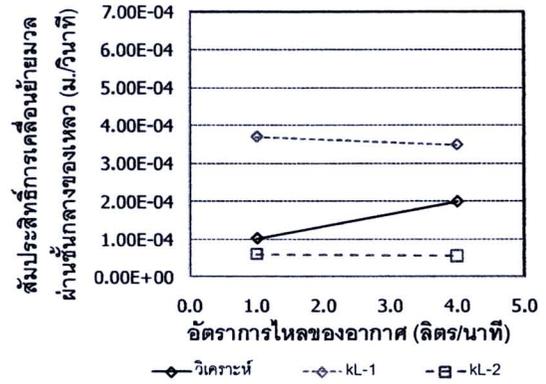
7.) เกลือ 35,000 มก./ลิตร



8.) เซลล์จุลชีพ 1,000 มก./ลิตร



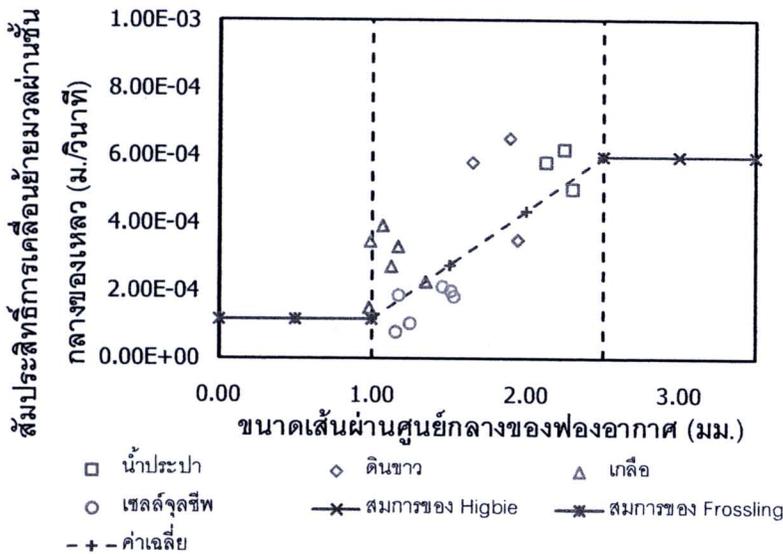
9.) เซลล์จุลชีพ 2,000 มก./ลิตร



10.) เซลล์จุลชีพ 3,000 มก./ลิตร

รูปที่ 4.65 กราฟแสดงผลการทำนายสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว

จากรูปที่ 4.65 แสดงผลการทำนายสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว เปรียบเทียบกับค่าที่วิเคราะห์ พบว่า แนวโน้มของค่าวิเคราะห์อยู่ในช่วงกึ่งกลางระหว่างผลทำนายโดยสมการทั้งสองทำให้ไม่สามารถใช้สมการใดสมการหนึ่งในการทำนายค่าได้ จึงมีความจำเป็นต้องมีการปรับแก้ค่า โดยงานวิจัยของ Painmanakul และคณะ (2004) พบว่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวมีความสัมพันธ์กับขนาดฟองอากาศ โดยที่สมการของ Frossling (Roustan, 2003) สามารถทำนายค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวในช่วงต่ำและมีความแม่นยำเมื่อฟองอากาศมีขนาดเล็กกว่า 1.0 มม. ในขณะที่สมการของ Higbie (Roustan, 2003) สามารถทำนายค่าได้ในช่วงสูงและมีความแม่นยำเมื่อฟองอากาศมีขนาดใหญ่กว่า 2.5 มม. แต่ฟองอากาศในงานวิจัยนี้มีขนาดอยู่ในช่วง 1.0 ถึง 2.5 มม. เป็นส่วนใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 4.66



รูปที่ 4.66 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ

จากรูปที่ 4.66 แสดงให้เห็นว่าขนาดฟองอากาศในงานวิจัยนี้อยู่ในช่วง 1.0 ถึง 2.5 มม. ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยที่คำนวณได้จากสมการของ Frossling และ Higbie ดังนั้นการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวจึงใช้วิธีเฉลี่ยและปรับแก้ค่าโดยอัตราส่วนของขนาดฟองอากาศ ดังแสดงในสมการ

$$k_L = \frac{(k_L - 1) - (k_L - 2)}{d_{B-\text{Max}} - d_{B-\text{min}}} \times (d_B - d_{B-\text{Min}}) + (k_L - 2) \quad (4.2)$$

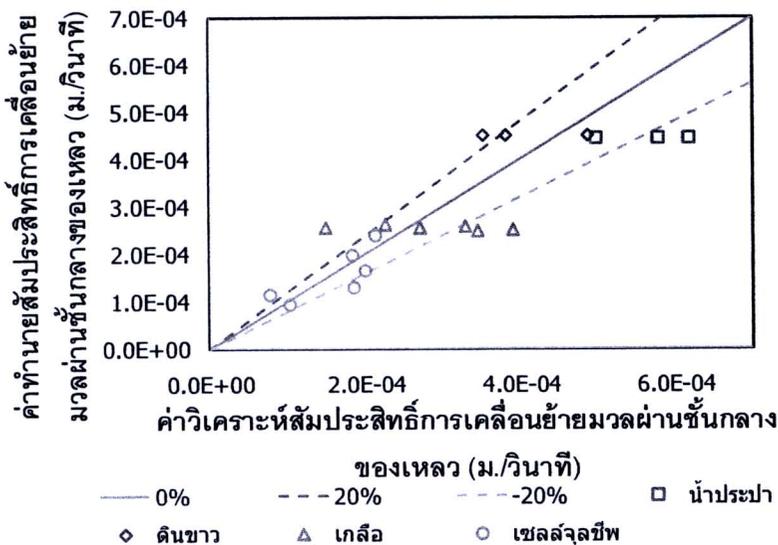
$$k_L = \frac{(k_L - 1) + (k_L - 2)}{2} \quad (4.3)$$

เมื่อ $d_{B-\text{Max}}$ และ $d_{B-\text{Min}}$ มีค่าเท่ากับ 2.5 และ 1.0 มม. ตามลำดับ d_B คือขนาดฟองอากาศในสภาวะการเติมอากาศนั้นๆ โดยสมการที่ 4.2 ใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวในน้ำประปาและน้ำที่ถูกเจือปนด้วยดินขาว ส่วนสมการที่ 4.3 ใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวในน้ำที่ถูกเจือปนด้วยเซลล์จูลซีฟ

ตารางที่ 4.9 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับทำนายค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว

ลักษณะน้ำ	สมการ	
น้ำประปา	$k_L = \frac{(k_{L-1}) - (k_{L-2})}{d_{B-Max} - d_{B-min}} \times (d_B - d_{B-Min}) + (k_{L-2})$	$k_{L-1} = 2 \left[\frac{D \times U_B}{\pi \times h} \right]^{0.5}$ $k_{L-2} = \frac{D}{d_B} \left(2 + 0.6 Re^{1/2} \times Sc^{1/3} \right)$
ดินขาว		
เกลือ	$k_L = \frac{(k_{L-1}) + (k_{L-2})}{2}$	
เซลล์จุลชีพ	$k_L = \frac{(k_{L-1}) - (k_{L-2})}{d_{B-Max} - d_{B-min}} \times (d_B - d_{B-Min}) + (k_{L-2})$	

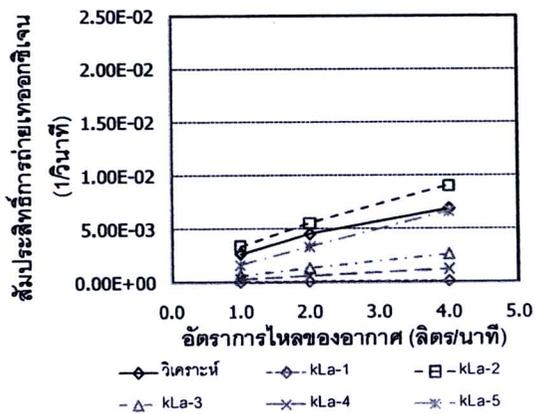
หมายเหตุ สมการ k_{L-1} คือ สมการของ Higbie (Roustan, 2003)
 สมการ k_{L-2} คือ สมการของ Frossling (Roustan, 2003)



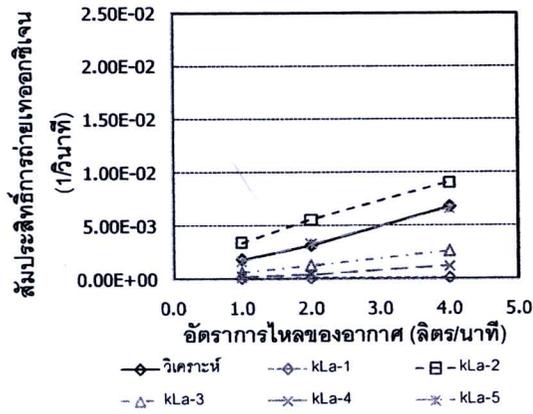
รูปที่ 4.67 กราฟแสดงความแม่นยำของผลทำนายค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว

จากรูปที่ 4.67 เมื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงในตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบกับค่าที่วิเคราะห์ได้ พบว่าโดยส่วนใหญ่มีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 20 ส่วนที่เหลือจะมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 30 จึงใช้ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวที่ทำนายได้ประกอบการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนต่อไป

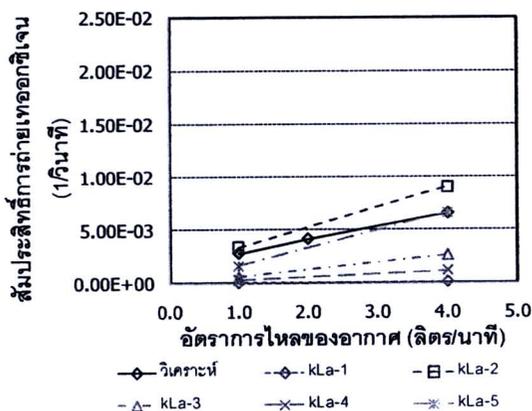
4.4.5 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ($k_L a$)



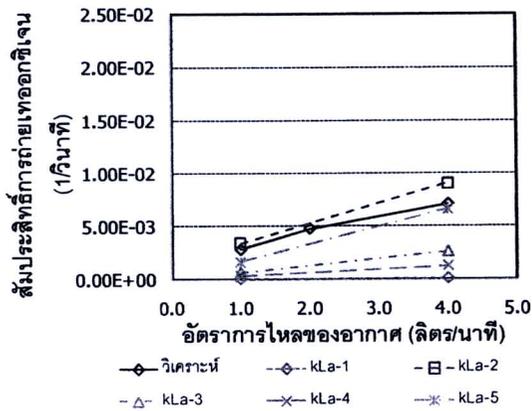
1.) น้ำประปา



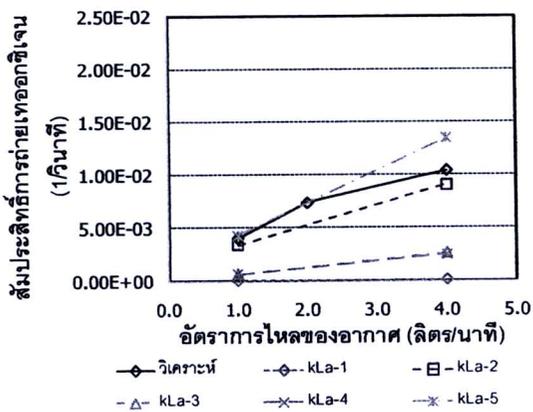
2.) ดินขาว 50 มก./ลิตร



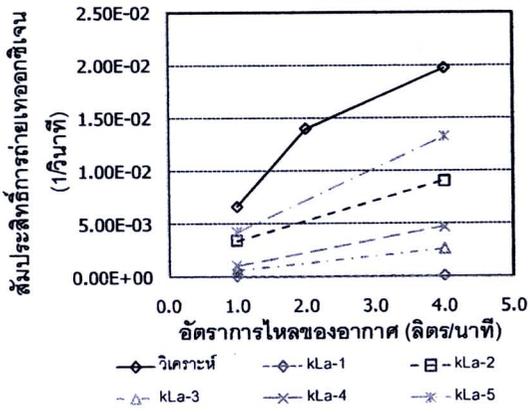
3.) ดินขาว 100 มก./ลิตร



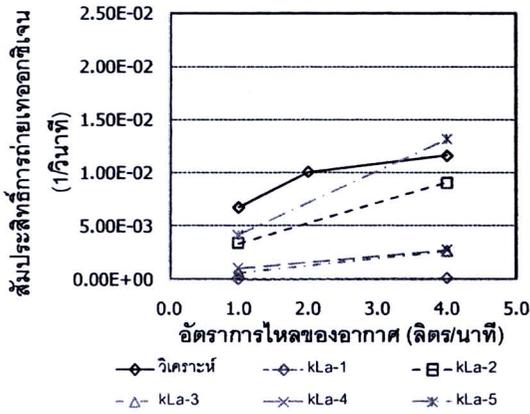
4.) ดินขาว 200 มก./ลิตร



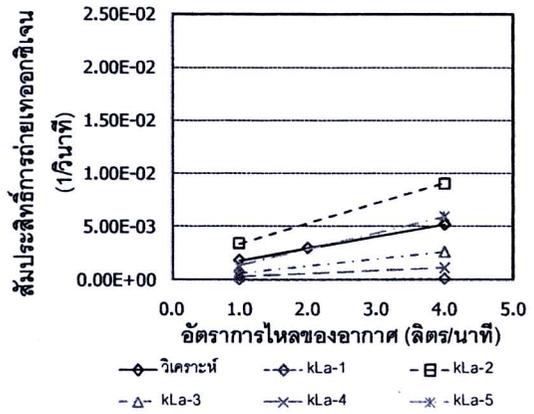
5.) เกล็ด 7,500 มก./ลิตร



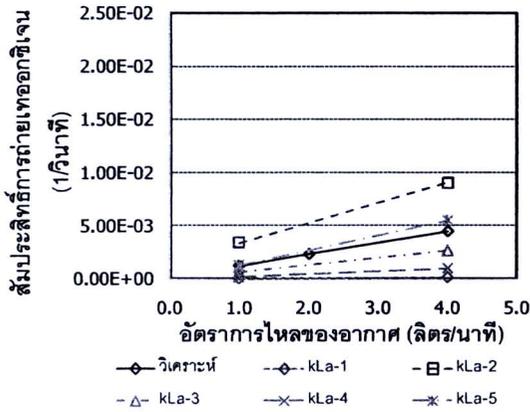
6.) เกล็ด 20,000 มก./ลิตร



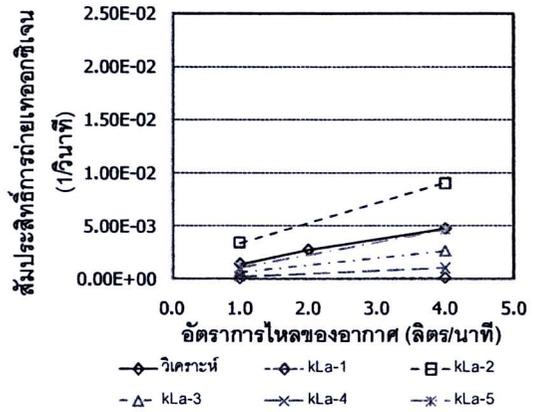
7.) เกลือ 35,000 มก./ลิตร



8.) เซลล์จุลชีพ 1,000 มก./ลิตร



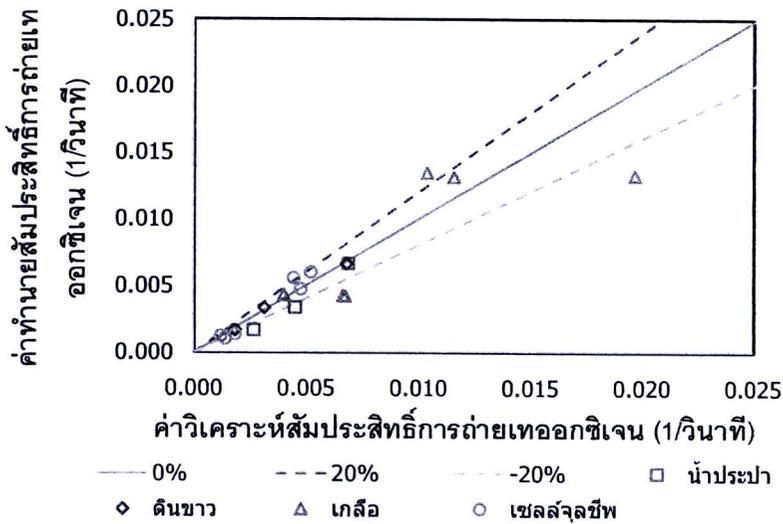
9.) เซลล์จุลชีพ 2,000 มก./ลิตร



10.) เซลล์จุลชีพ 3,000 มก./ลิตร

รูปที่ 4.68 กราฟแสดงผลการทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน

จากรูปที่ 4.68 แสดงผลการทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนเปรียบเทียบกับค่าที่วัโคระห์ พบว่า การทำนายโดยใช้ผลคูณระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวกับพื้นที่สัมผัสจำเพาะตามสมการที่ 2.33 ให้ผลการทำนายที่แม่นยำมากกว่าการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อื่นๆ โดยมีความแม่นยำดังแสดงในรูปที่ 4.69



รูปที่ 4.69 กราฟแสดงความแม่นยำของผลทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน

จากรูปที่ 4.69 เมื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนโดยใช้ผลคูณระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวกับพื้นที่สัมผัสจำเพาะเปรียบเทียบกับค่าที่วิเคราะห์ได้ พบว่าโดยส่วนใหญ่มีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 20 ส่วนที่เหลือจะมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 25 ซึ่งเป็นสภาวะการเติมอากาศในน้ำเกลือ จากการสังเกตขณะทำการทดลองพบว่าฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กกว่าในน้ำประปาทำให้มีความเร็วลอยตัวต่ำและถูกพัดไปตามกระแสได้ง่าย ทิศทางการลอยตัวของฟองอากาศจึงเบี่ยงเบนไปจากแนวตั้งทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ได้ง่าย ซึ่งอาจต้องใช้อุปกรณ์ที่มีความละเอียดสูงหรือทำการทดลองซ้ำหลายๆรอบเพื่อลดความคลาดเคลื่อนดังกล่าว อย่างไรก็ตาม ผลการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนโดยรวมทุกสภาวะของการทดลองมีความแม่นยำอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้วิธีทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่ได้นำเสนอไปข้างต้น ประกอบการออกแบบกระบวนการเติมอากาศได้