

การปรับปรุงพื้นผิวตะแกรงกรองตะกอนเพื่อลดการเกาะติดของฟิล์มอินทรีย์สำหรับระบบหมุนเวียน  
น้ำเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2562  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Surface Modification of Suspended Solid Filter Screen in Recirculating Aquaculture  
System to Reduce Organic Film Formation



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงพื้นผิวตะแกรงกรองตะกอนเพื่อลดการเกาะติดของฟิล์มอินทรีย์สำหรับระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำ
โดย	นายเหมือนตะวัน อ่อนน้อม
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณะ พิ๊งรัมย์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.สรวิศ เผ่าทองสุข

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณะ พิ๊งรัมย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ดร.สรวิศ เผ่าทองสุข)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.เจนยุกต์ โล่ห์วีชรินทร์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.กฤตภาส เลหาสุรโยธิน)

เหมือนตะวัน อ่อนน้อม : การปรับปรุงพื้นผิวตะแกรงกรองตะกอนเพื่อลดการเกาะติด  
ของฟิล์มอินทรีย์สำหรับระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำ. ( Surface  
Modification of Suspended Solid Filter Screen in Recirculating Aquaculture  
System to Reduce Organic Film Formation) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.วิบูลย์  
ลักษณะ พิธีกรรม, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.สรวิศ เผ่าทองสุข

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวตะแกรงกรองตะกอนของเสียจากระบบ  
หมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยวัสดุนาโนเพื่อป้องกันการเกาะติดของฟิล์มชีวภาพ โดย  
ช่วงแรกเป็นการศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวด้วยแนวทางต่างๆ ผลการทดลองพบว่าการพ่นเคลือบ  
ด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโนลงบนพื้นผิวตะแกรงหนา 1 ชั้นทำให้พื้นผิวตะแกรงมีสมบัติความไม่  
ชอบน้ำยิ่งยวดโดยวัดค่ามุมสัมผัสบนพื้นผิวได้มากกว่า  $150^\circ$  ซึ่งเพิ่มขึ้นจากการวัดบนพื้นผิว  
ตะแกรงแบบปกติ  $30^\circ$  ในขณะที่การสังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่แทรกด้วยสเต็มเรต  
ไอออนสามารถเพิ่มค่ามุมสัมผัสได้เพียง  $16^\circ$  ทั้งนี้การปรับปรุงพื้นผิวทั้งสองแนวทางส่งผลให้พื้นที่  
การไหลของน้ำลดลงไม่เกินร้อยละ 5 และ 6 ตามลำดับ สำหรับการศึกษาประสิทธิภาพการทำงาน  
ของตะแกรงที่ปรับปรุงพื้นผิว พบว่าโครงสร้างของอนุภาคซิลิกาขนาดนาโนและชั้นเลเยอร์  
ดับเบิลไฮดรอกไซด์มีความคงทนอยู่บนพื้นผิวตะแกรงได้สูงสุด 15 และ 10 วัน ตามลำดับ ภายใต้  
อัตราการไหลของน้ำที่ 750 ล./ชม. การทดลองช่วงสุดท้ายเป็นการประยุกต์ใช้หน่วยแยกตะกอน  
กับน้ำเสียจากระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำ พบว่าประสิทธิภาพในการแยกตะกอนของตะแกรง  
ปกติ ตะแกรงที่สังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และแทรกด้วยสเต็มเรตไอออน และ  
ตะแกรงที่พ่นเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโน มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 59 52 และ 65 ตามลำดับ ทั้งนี้ตะแกรงที่พ่นเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโนสามารถ  
ป้องกันการสะสมของตะกอนและการเกาะติดของฟิล์มชีวภาพบนพื้นผิวตะแกรงได้นานกว่า  
ตะแกรงปกติ 7-10 วัน ดังนั้นการปรับปรุงพื้นผิวตะแกรงให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดจึงเป็น  
แนวทางในการพัฒนาหน่วยแยกตะกอนในระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำให้มี  
ประสิทธิภาพในการป้องกันการเกิดฟิล์มชีวภาพเพื่อเพิ่มระยะเวลาการทำงานได้ดียิ่งขึ้น

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 6070363021 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORD: Surface Modification, Stainless Steel Filter, Hydrophobicity,  
Nanomaterial, Biofilm

Muentawan Onnom : Surface Modification of Suspended Solid Filter  
Screen in Recirculating Aquaculture System to Reduce Organic  
Film Formation. Advisor: Assoc. Prof. WIBOONLUK PUNGRASMI, Ph.D. Co-  
advisor: Sorawit Powtongsook, Ph.D.

Suspended solid filter in recirculating aquaculture system (RAS) was modified using nanomaterial to reduce biofilm formation. Nanomaterial was used to filter surface modification. The results showed that the single layer of silica nanoparticle spray-coating (SNP) can improve surface filter property to be super-hydrophobicity, which evaluated by the contact angle that was more than  $150^\circ$  and increasing from the regular filter by  $30^\circ$ . However, the contact angle has measured on stearate-intercalated layered double hydroxide (LDH/SA) deposited filter has increased by  $16^\circ$ . These surface modifications effect on water flow area decreased by about 5% and 6%, respectively. The filters, SNP and LDH/SA, can be used for 15 and 10 days, respectively, by condition of water flow rate 750 L/h. which estimated by the duration of the nanomaterials maintain on the surface. Then, the modified surface filters were applied to solid separation unit with in wastewater from aquaculture system. The results showed that filters that including regular, LDH/SA, and SNP, can provide solid removal efficiency of 59% 52% and 65%, respectively. Moreover, the SNP filter can prevent biofilm formation and sediment accumulation on the filter longer than regular for 7-10 days. Therefore, super-hydrophobic filter surface was effective to reduce biofilm formation and increasing operating duration.

Field of Study: Environmental Engineering Student's Signature .....

Academic Year: 2019

Advisor's Signature .....

Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จอย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความช่วยเหลือและคำแนะนำจากบุคคลหลายท่านรวมไปถึงหน่วยงานที่ให้การสนับสนุนดังรายนามต่อไปนี้

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณ์ ฟังรัมย์ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก) ดร.สรวิศ เผ่าทองสุข (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม) และ ดร.กฤตภาส เลหาสุรโยธิน (ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกมหาวิทยาลัย) ที่กรุณาให้คำปรึกษาและองค์ความรู้ที่เป็นประโยชน์ และยังช่วยชี้แนะแนวทางและการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานวิจัย อีกทั้งยังให้กำลังใจและคอยสนับสนุนตลอดระยะเวลาการทำวิจัยจนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎวงศ์ (ประธานกรรมการ) อาจารย์ ดร.เจนยุกต์ โล่หวัชรินทร์ (กรรมการ) ที่กรุณาให้แนวคิดในการออกแบบงานวิจัย อีกทั้งยังให้คำปรึกษาในด้านที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยจนสามารถดำเนินการจนเสร็จสมบูรณ์ นอกจากนี้ต้องขอขอบคุณคณาจารย์ ตลอดจนบุคลากรที่เกี่ยวข้องทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยส่งเสริมและสนับสนุนให้การทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ด้วยความตั้งใจ

ขอขอบคุณ ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ในการทำงานวิจัย โดยมี คุณปวีณา ตปนียรวงศ์ คุณเพ็ญพิชา สาทันวัตร และคุณเสรี ดอนเหนือ ตลอดจนนักวิจัยและบุคลากรทุกท่านที่กรุณาให้คำปรึกษาและให้การช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือทางด้านวิทยาศาสตร์

ขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการโครงสร้างนาโนไฮบริดและนาโนคอมพอสิต ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีในการดำเนินงานวิจัย โดยมี ดร.กฤตภาส เลหาสุรโยธิน ดร.ณัฐพร พิมพะ คุณภัทร์ศยา อนุกุลวิทยา คุณกรรณิกา สิทธิสุวรรณกุล และคุณพรปวีณ์ นนทะสร รวมทั้งนักวิจัยและบุคลากรทุกท่านที่ได้ให้การช่วยเหลือและคำปรึกษาในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ทางด้านวิทยาศาสตร์

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนเพื่อการศึกษาและงานวิจัย ตลอดจนการช่วยสร้างเครือข่ายและการมีส่วนร่วมของผู้มีความรู้และประสบการณ์ด้านวิทยาศาสตร์ ซึ่งทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความรู้และสามารถนำไปปรับใช้กับงานวิจัย จนนำไปสู่ผลงานวิทยานิพนธ์ที่เสร็จสมบูรณ์

เหมือนตะวัน อ่อนน้อม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## สารบัญ

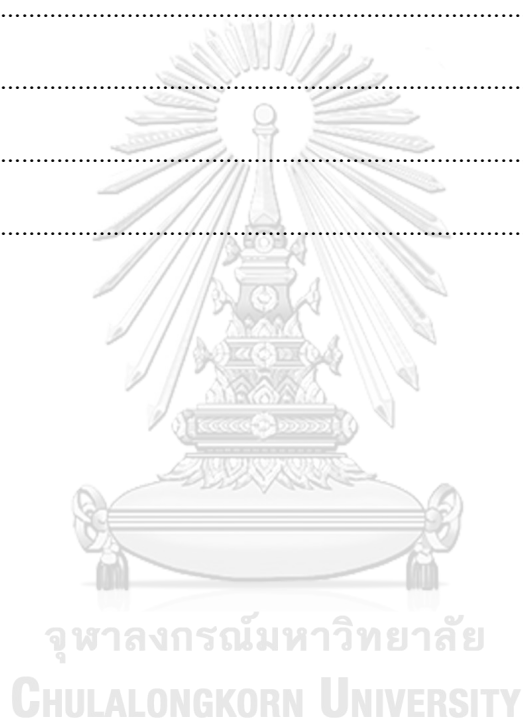
	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	2
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตงานวิจัย .....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 ระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ.....	4
2.1.1 การเลี้ยงสัตว์น้ำระบบเปิด (Open systems).....	4
2.1.2 การเลี้ยงสัตว์น้ำระบบกึ่งปิด (Semi-closed systems).....	4
2.1.3 การเลี้ยงสัตว์น้ำระบบปิด (Closed systems).....	5
2.1.4 การเลี้ยงสัตว์น้ำแบบผสมผสาน (Hybrid systems).....	5
2.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพน้ำสำหรับเลี้ยงสัตว์น้ำ .....	5



2.2.1	พีเอช .....	6
2.2.2	สภาพความเป็นต่าง .....	6
2.2.3	ออกซิเจนละลาย .....	6
2.2.4	แอมโมเนีย .....	6
2.2.5	ไนไตรท์และไนเตรด.....	7
2.2.6	ฟอสฟอรัส .....	7
2.2.7	ตะกอน .....	7
2.2.8	อุณหภูมิจ.....	8
2.3	ระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำ.....	8
2.3.1	การแยกตะกอนแขวนลอยในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำ.....	9
2.3.2	ฟลักซ์การกรอง .....	11
2.4	การปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุ.....	12
2.4.1	สมบัติความไม่ชอบน้ำ.....	12
2.4.2	การสังเคราะห์วัสดุนาโนบนพื้นผิว .....	13
2.5	ประเภทของวัสดุนาโน .....	14
2.5.1	ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes).....	14
2.5.2	หมุดควอนตัม (Quantum dots).....	14
2.5.3	นาโนคอมโพสิต (Nanocomposite).....	14
2.5.4	อนุภาคนาโน (Nanoparticle).....	14
2.6	เทคนิคการปรับปรุงพื้นผิววัสดุด้วยอนุภาคนาโน .....	15
2.6.1	เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (Layered double hydroxides).....	15
2.6.2	กระบวนการโซล-เจล (Sol-Gel).....	16
2.7	ความเป็นพิษของสาร .....	17
2.8	ฟิล์มชีวภาพ (Biofilm).....	18

2.8.1 การวิเคราะห์ฟิล์มชีวภาพ .....	19
2.8.2 การวิเคราะห์ปริมาณสารโพลีเมอร์ในฟิล์มชีวภาพ.....	21
2.9 ทบทวนเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	21
2.9.1 การจัดการตะกอนในระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำ .....	21
2.9.2 การปรับปรุงพื้นผิววัสดุเพื่อป้องกันการยึดเกาะของฟิล์มชีวภาพ .....	22
2.9.3 การวิเคราะห์ฟิล์มชีวภาพ .....	24
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย .....	26
3.1 แผนการทดลอง .....	26
3.2 การดำเนินการทดลอง.....	32
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง .....	51
4.1 การปรับปรุงพื้นผิวตะแกรง .....	51
4.1.1 การสังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ .....	51
4.1.2 การสังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่แทรกด้วยสเต็มเรตไอออน.....	53
4.1.3 การสังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่แทรกด้วยซิเตรทไอออน .....	57
4.1.4 การพ่นเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโน.....	59
4.2. การประเมินประสิทธิภาพการใช้งานของตะแกรงต้นแบบ .....	62
4.2.1 การศึกษาพื้นที่การกรอง.....	62
4.2.2 การทดสอบอัตราการไหลของน้ำ .....	64
4.2.3 ความเป็นพิษของสารที่ใช้ปรับปรุงพื้นผิว .....	68
4.3 การประยุกต์ใช้หน่วยแยกตะกอนกับน้ำเสียจากการเลี้ยงสัตว์น้ำ.....	69
4.3.1 การติดตั้งหน่วยแยกตะกอน.....	69
4.3.2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์น้ำเสีย .....	70
4.3.3 ฟลักซ์การกรอง .....	77
4.3.4 การป้องกันการเกาะติดของฟิล์มอินทรีย์.....	79

บทที่ 5 สรุปลงการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	86
5.1 สรุปลงการทดลอง.....	86
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	88
บรรณานุกรม.....	90
ประวัติผู้เขียน.....	98
ภาคผนวก.....	100
ภาคผนวก ก.....	101
ภาคผนวก ข.....	107
ภาคผนวก ค.....	110
ภาคผนวก ง.....	111



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ปริมาณของสารเคมีที่เป็นพิษเฉียบพลันกับสัตว์ทดลอง .....	18
ตารางที่ 3.1 ตัวแปรในการทดลองช่วงที่ 1 .....	37
ตารางที่ 3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลองช่วงที่ 1 .....	38
ตารางที่ 3.3 ตะแกรงที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว 4 ชนิด ที่มีขนาดช่องกรองแตกต่างกัน .....	39
ตารางที่ 3.4 ตัวแปรในการทดสอบตะแกรงที่ติดตั้งบนหน่วยแยกตะกอน .....	44
ตารางที่ 3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองช่วงที่ 2 .....	44
ตารางที่ 3.6 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ในการทดลองช่วงที่ 3.1 .....	47
ตารางที่ 3.7 ตัวแปรในการศึกษาประสิทธิภาพการกรองของหน่วยแยกตะกอน .....	49
ตารางที่ 3.8 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของหน่วยแยกตะกอน .	50
ตารางที่ 4.1 ปริมาณของสารเคมีที่เป็นพิษเฉียบพลันกับสัตว์ทดลองและที่ตรวจวัดได้ .....	68

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 การวัดมุมสัมผัสเพื่อแสดงสมบัติความไม่ชอบน้ำ.....	13
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ .....	16
รูปที่ 3.1 แผนการทดลองรวมของงานวิจัย .....	28
รูปที่ 3.2 แผนการทดลองช่วงที่ 1.....	29
รูปที่ 3.3 แผนการทดลองช่วงที่ 2.....	30
รูปที่ 3.4 แผนการทดลองช่วงที่ 3.....	31
รูปที่ 3.5 การประกอบตะแกรงเข้ากับท่อน้ำเพื่อทดสอบการไหลผ่านของน้ำ.....	40
รูปที่ 3.6 การทดสอบการไหลของน้ำผ่านตะแกรง.....	40
รูปที่ 3.7 การติดตั้งตะแกรงที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวกับหน่วยแยกตะกอน.....	42
รูปที่ 3.8 การทดสอบระยะเวลาการใช้งานของตะแกรง .....	43
รูปที่ 3.9 การทำงานของหน่วยแยกตะกอน.....	45
รูปที่ 3.10 การทดสอบประสิทธิภาพการกรองของหน่วยแยกตะกอน.....	47
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายพื้นผิวตะแกรงเริ่มต้นและตะแกรงที่สังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่ระยะเวลา 6 และ 24 ชม. ....	52
รูปที่ 4.2 มุมสัมผัสของหยดน้ำบนตะแกรงที่สังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และแทรกด้วยสเต็มเรตไอออนโดยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนที่อุณหภูมิต่างๆ.....	54
รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายตะแกรงที่ผ่านการสังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และแทรกด้วยสเต็มเรตไอออนโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	56
รูปที่ 4.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy.....	57
รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายตะแกรงที่ผ่านการสังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และแทรกด้วยซิเตรทไอออน (LDH/CA) โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	58
รูปที่ 4.6 การวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำบนตะแกรงที่พ่นเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโน (SNP). 60	60
รูปที่ 4.7 แผนภูมิแสดงค่ามุมสัมผัสบนพื้นผิวตะแกรงที่พ่นเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโน.....	60

รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายตะแกรงที่พันเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโน 1-4 ชั้นโดยกล้องจุลทรรศน์ ..	61
รูปที่ 4.9 แผนภูมิแสดงการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของพื้นที่การไหลของน้ำผ่านตะแกรงที่สังเคราะห์ชั้น เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และแทรกด้วยสเตียเรตไอออน .....	63
รูปที่ 4.10 แผนภูมิแสดงการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนพื้นที่การไหลของน้ำผ่านตะแกรง ที่พันเคลือบด้วย อนุภาคซิลิกาขนาดนาโนจำนวนการเคลือบ 1-4 ชั้น .....	64
รูปที่ 4.11 ค่ามุมสัมผัสนบนพื้นผิวตะแกรงที่สังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ และแทรกด้วยส เตียเรตไอออนหลังการทดสอบอัตราการไหลของน้ำที่ 500 750 และ 1000 ล./ชม. ....	65
รูปที่ 4.12 ค่ามุมสัมผัสนบนพื้นผิวตะแกรงที่พันเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโนหลังการทดสอบ อัตราการไหลของน้ำที่ 500 750 และ 1000 ล./ชม. ....	66
รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายตะแกรงที่สังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และแทรกด้วยสเตียเรตไอออน ที่ระยะเวลาต่างๆ หลังการทดสอบการกรองน้ำ .....	67
รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายตะแกรงที่พันเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโนที่ระยะเวลาต่างๆ หลังการ ทดสอบการกรองน้ำ .....	68
รูปที่ 4.15 (A) ตัวกรองที่ติดตั้งตะแกรงที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว, (B) การติดตั้งหน่วยแยกตะกอนเข้า กับระบบแยกตะกอนในน้ำเสียจากการเลี้ยงสัตว์น้ำ .....	70
รูปที่ 4.16 ลักษณะทางกายภาพของน้ำเสียจากการเลี้ยงสัตว์น้ำ ได้แก่ ออกซิเจนละลาย พีเอช ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด และการนำไฟฟ้า (เส้นประแสดงค่าเริ่มต้นในแต่ละพารามิเตอร์) 73	
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงการกระจายตัวของขนาดตะกอนในน้ำเสียก่อนและหลังการกรอง .....	74
รูปที่ 4.18 ปริมาณตะกอนแขวนลอยในน้ำเสียจากการเลี้ยงสัตว์น้ำและน้ำที่ผ่านการกรองโดยหน่วย แยกตะกอนทั้งสามชุดการทดลองที่ระยะเวลาต่างๆ.....	75
รูปที่ 4.19 ปริมาณธาตุอาหารระหว่างการทดลองแยกตะกอนในน้ำเสียจากการเลี้ยงสัตว์น้ำ ซึ่ง ประกอบด้วยฟอสเฟตและสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำ .....	76
รูปที่ 4.20 อัตราการไหลของน้ำขาเข้าและขาออกจากหน่วยแยกตะกอน .....	78
รูปที่ 4.21 ค่าพลาซิกการกรองของหน่วยแยกตะกอนที่ติดตั้งตะแกรงชนิดต่างๆ ได้แก่ ตะแกรงที่ไม่ ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (Bare mesh) ตะแกรงที่สังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และแทรก ด้วยสเตียเรตไอออน (LDH/SA) และตะแกรงที่พันเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโน (SNP).....	79

รูปที่ 4.22 ปริมาณการสะสมของตะกอนบนตะแกรงชนิดต่างๆ ได้แก่ ตะแกรงที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (Bare mesh) ตะแกรงที่สังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และแทรกด้วยสเต็มเรตไอออน (LDH/SA) และตะแกรงที่พันเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโน (SNP).....	81
รูปที่ 4.23 สัดส่วนปริมาณของแข็งระเหยได้ (TVS) ต่อปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ที่สะสมบนพื้นผิวตะแกรงชนิดต่างๆ .....	82
รูปที่ 4.24 ปริมาณสารพอลิเมอร์บนพื้นผิวตะแกรงชนิดต่างๆ ได้แก่ ตะแกรงที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (Bare mesh) ตะแกรงที่สังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และแทรกด้วย สเต็มเรตไอออน (LDH/SA) และตะแกรงที่พันเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโน (SNP).....	83
รูปที่ 4.25 ปริมาณองค์ประกอบต่างๆ ในสารพอลิเมอร์ (EPS) ที่สกัดมาจากฟิล์มชีวภาพที่เกาะติดบนพื้นผิวตะแกรงชนิดต่างๆ .....	84
รูปที่ 4.26 สัดส่วนขององค์ประกอบต่างๆ ในสารพอลิเมอร์ (EPS) ที่สกัดมาจากฟิล์มชีวภาพที่เกาะติดบนพื้นผิวตะแกรงชนิดต่างๆ .....	85

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเลี้ยงสัตว์น้ำระบบน้ำหมุนเวียน (Recirculation Aquaculture System) จัดเป็นรูปแบบการเลี้ยงสัตว์น้ำที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบันจากเหตุผลหลายประการ โดยนอกจากจะลดการปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติแล้ว ยังสามารถเลี้ยงสัตว์น้ำได้ในระดับความหนาแน่นที่สูงขึ้น แต่ปัญหาของการเลี้ยงสัตว์น้ำลักษณะนี้มักมีการสะสมของตะกอนในระบบมาก ซึ่งส่งผลกระทบต่อสุขภาพสัตว์น้ำและส่งผลเสียต่ออุปกรณ์อื่นๆ ภายในระบบ ดังนั้นการแยกตะกอนจึงเป็นหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญและถูกใช้เป็นแนวทางในการบำบัดน้ำเสียขั้นต้น

ในปัจจุบันตะแกรงโลหะเหล็กกล้า (Stainless steel) ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุกรองเพื่อลดปัญหาการสะสมของเสียจากการเลี้ยงสัตว์น้ำ แต่มีข้อจำกัดคือมีช่วงระยะเวลาในการใช้งานที่ต้องทำความสะอาดทุกวัน โดยผิวหน้าตะแกรงกรองส่วนที่สัมผัสกับน้ำเสียและตะกอนเมื่อใช้งานไประยะเวลาหนึ่ง จะเกิดการยึดเกาะของสารโพลีเมอร์หรือฟิล์มชีวภาพ (Biofilm) ที่เกิดขึ้นจากกลไกการป้องกันตัวของจุลชีพในน้ำเสียและตะกอนอินทรีย์เหล่านั้น จนเกิดการอุดตันของช่องกรองทำให้ต้องหยุดการเดินระบบเพื่อทำความสะอาดเป็นครั้งคราว ทั้งนี้ในการทำมาความสะอาดจะไม่สามารถล้างน้ำแบบปกติเพียงอย่างเดียว ต้องอาศัยการฉีดน้ำแรงดันสูงและการขัดทำความสะอาดอย่างสม่ำเสมอ และอาจต้องเปลี่ยนชุดตะแกรงกรองเพื่อให้ระบบแยกตะกอนกลับมาทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและรักษาคุณภาพน้ำให้เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำ

ทั้งนี้การปรับปรุงพื้นผิวของตะแกรงโลหะด้วยวัสดุเคลือบขนาดนาโน (Nanoparticles, NPs) บางชนิดเป็นการปรับปรุงพื้นผิวให้วัสดุมีความไม่ชอบน้ำยิ่งยวด (Superhydrophobic) ซึ่งช่วยลดการยึดเกาะของผิวน้ำที่มีส่วนให้เกิดการสะสมของจุลชีพและนำไปสู่การสร้างฟิล์มชีวภาพได้ งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวตะแกรงโลหะด้วยวิธีการตามแนวทางนาโนเทคโนโลยี เช่น การพ่นเคลือบวัสดุขนาดนาโน (Nanoparticles Coating) ลงบนพื้นผิว หรือการปรับให้มีชั้นเลเยอร์ดับเบิล



ไฮดรอกไซด์ (Layered Double Hydroxides, LDHs) อยู่บนพื้นผิวตะแกรง ซึ่งสามารถดัดแปลงต่อไปให้ลดโอกาสเกิดการยึดตัวของฟิล์มชีวภาพได้ด้วยการแทรกไอออนที่เหมาะสมเข้าไประหว่างชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ ทั้งนี้หากแนวทางดังกล่าวได้ผลดีจะช่วยยืดอายุการใช้งานตะแกรงและเพิ่มประสิทธิภาพการกรองตะกอน ทำให้สามารถเพิ่มปริมาณการผลิตของระบบเลี้ยงสัตว์น้ำได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพของตะแกรงโลหะที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยวัสดุเคลือบขนาดนาโน
- 1.2.2 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการกรองของตะแกรงโลหะที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเทคโนโลยีระดับนาโนในการกรองตะกอนที่เกิดขึ้นจากการเลี้ยงสัตว์น้ำ

## 1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

- 1.3.1 การปรับปรุงพื้นผิวตะแกรงโลหะด้วยวัสดุขนาดนาโนทำให้สมบัติและลักษณะของพื้นผิวเปลี่ยนแปลงไป ได้แก่ มีสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวด และมีสารเคมีที่ออกฤทธิ์ยับยั้งการเกิดฟิล์มชีวภาพ
- 1.3.2 การปรับปรุงพื้นผิวตะแกรงโลหะด้วยวัสดุขนาดนาโนไม่ส่งผลต่อค่าพลาซมิกการกรองของตะแกรงเมื่อเปรียบเทียบกับตะแกรงที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิว
- 1.3.3 ตะแกรงโลหะที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยวัสดุขนาดนาโนสามารถป้องกันหรือลดการเกิดฟิล์มอินทรีย์และเพิ่มประสิทธิภาพการกรอง

## 1.4 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.4.1 วัสดุกรองที่ใช้ในงานวิจัยเป็นตะแกรงโลหะทำจากเหล็กกล้าสแตนเลสชนิด T-304 โดยมีขนาดช่องกรองในช่วง 100 – 250 ไมโครเมตร

- 1.4.2 ทำการปรับปรุงพื้นผิวตะแกรง 2 วิธีได้แก่ การสังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และการพ่นเคลือบด้วยวัสดุขนาดนาโน
- 1.4.3 ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ปริมาณสารแขวนลอย ปริมาณตะกอนและสารประกอบอินทรีย์ เป็นต้น ตามวิธีมาตรฐานที่ระบุใน Standard Method for the Examination of Water and Wastewater (Rice และ Public Health Association, 2012)

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 เป็นการพัฒนาวัสดุแยกตะกอนสำหรับระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำที่สามารถยืดระยะเวลาการใช้งาน และเพิ่มประสิทธิภาพการกรองตะกอนของเสียซึ่งเป็นการลดต้นทุนระยะยาวที่เกิดจากการซ่อมบำรุง
- 1.5.2 เป็นการพัฒนาแนวทางการปรับปรุงพื้นผิวโลหะด้วยความรู้ด้านนาโนเทคโนโลยี ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านอื่นๆ ที่มีเป้าหมายในลักษณะใกล้เคียงกัน

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ

การเลี้ยงสัตว์น้ำจำเป็นต้องวางแผนและออกแบบระบบการจัดการให้เหมาะสมขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการเลี้ยง เช่น การเลี้ยงสัตว์น้ำในเชิงพาณิชย์ การเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อความสวยงาม เป็นต้น ซึ่งโดยทั่วไประบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบ่งเป็น 4 รูปแบบดังนี้ (Tidwell, 2012)

##### 2.1.1 การเลี้ยงสัตว์น้ำระบบเปิด (Open systems)

การเลี้ยงสัตว์น้ำระบบเปิดคือการเลี้ยงสัตว์น้ำในแหล่งน้ำธรรมชาติ อาจใช้อุปกรณ์ช่วยแบ่งกั้นขอบเขตการเลี้ยง ข้อดีของการเลี้ยงสัตว์น้ำลักษณะนี้คือไม่ต้องมีระบบในการจัดการกับคุณภาพน้ำ เนื่องจากน้ำในธรรมชาติมีการไหลอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดการเปลี่ยนถ่ายน้ำเข้าออกจากระบบตลอดเวลา รวมทั้งความสามารถในการฟื้นฟูตัวเองของธรรมชาติที่ช่วยรักษาสภาวะแวดล้อมให้คงที่ เช่น การรักษาปริมาณออกซิเจนละลายโดยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงหรือการละลายของออกซิเจนในอากาศ การย่อยสลายของเสียที่เกิดขึ้นในระบบโดยจุลชีพ (แบคทีเรียหรือรา) ทั้งนี้ลักษณะของแหล่งน้ำที่ใช้เป็นระบบเลี้ยงสัตว์น้ำก็มีผลต่อปัจจัยในการรักษาคุณภาพของน้ำ ส่วนข้อเสียคือไม่สามารถควบคุมลักษณะของน้ำได้ เนื่องจากจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพภูมิอากาศหรือฤดูกาลส่งผลให้ผลผลิตหรือสัตว์เลี้ยงไม่ได้คุณภาพตามที่ต้องการ นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดของปริมาณสัตว์น้ำที่เลี้ยงซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่และลักษณะทางกายภาพต่างๆ ของแหล่งน้ำ

##### 2.1.2 การเลี้ยงสัตว์น้ำระบบกึ่งปิด (Semi-closed systems)

การเลี้ยงสัตว์น้ำระบบกึ่งปิดมีความใกล้เคียงกับการเลี้ยงสัตว์น้ำระบบเปิด คือการใช้ประโยชน์จากคุณลักษณะของแหล่งน้ำในธรรมชาติ ทั้งการรักษาปริมาณออกซิเจนละลาย สมดุลของอุณหภูมิ และการกำจัดของเสีย แต่สิ่งที่เพิ่มเติมมาคือการสร้างแหล่งสำหรับเลี้ยงสัตว์น้ำขึ้นมาใหม่และทำการ

เปลี่ยนถ่ายน้ำด้วยอุปกรณ์ใดๆ โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือเพิ่มปริมาณการผลิตให้สูงกว่าการเลี้ยงสัตว์น้ำระบบเปิดได้ 2-3 เท่าเมื่อเทียบกับพื้นที่ที่เท่ากัน และยังมีข้อดีคือการป้องกันสิ่งมีชีวิตที่เป็นผู้ล่า อีกทั้งยังสามารถควบคุมคุณภาพน้ำได้ในระดับหนึ่ง แต่ทั้งนี้ก็มีค่าใช้จ่ายสูงในการจัดเตรียมสถานที่และการดำเนินระบบโดยเฉพาะการเปลี่ยนถ่ายน้ำต้องใช้พลังงานสูง

### 2.1.3 การเลี้ยงสัตว์น้ำระบบปิด (Closed systems)

การเลี้ยงสัตว์น้ำระบบปิดเป็นการเดินระบบโดยมนุษย์ทั้งหมด ทั้งการควบคุมคุณภาพน้ำ การจัดการของเสียหรือตะกอน ปริมาณสารอาหาร มีระบบในการบำบัดน้ำเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ (Reuse water) ข้อดีของระบบเลี้ยงสัตว์น้ำรูปแบบนี้คือ สามารถเลี้ยงสัตว์น้ำได้ในระดับความหนาแน่นสูง ยิ่งกว่านั้นยังสามารถเลี้ยงสัตว์น้ำได้ทุกช่วงเวลาเนื่องจากมีระบบควบคุมคุณภาพและลักษณะของน้ำได้ตามต้องการ จึงเหมาะกับการเลี้ยงสัตว์น้ำต่างถิ่นหรือสัตว์น้ำที่มีความจำเพาะในด้านของลักษณะน้ำ อีกทั้งยังลดปัญหาการติดโรคของสัตว์น้ำและการปนเปื้อนสารพิษในแหล่งน้ำได้ แต่ก็มีข้อเสียคือมีค่าใช้จ่ายสูงทั้งการออกแบบก่อสร้าง การดำเนินการ และการซ่อมบำรุง

### 2.1.4 การเลี้ยงสัตว์น้ำแบบผสมผสาน (Hybrid systems)

เป็นการรวมระบบเลี้ยงสัตว์น้ำทั้งระบบเปิดและระบบปิดเข้าด้วยกัน เป็นการประยุกต์โดยนำข้อดีของการเลี้ยงสัตว์น้ำแต่ละรูปแบบมาหักล้างข้อเสีย เพื่อลดขั้นตอนการจัดการกับปัญหาที่เกิดขึ้น แต่รูปแบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบนี้ยังเป็นระบบใหม่ที่ต้องศึกษาการทำงานและต้องพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

## 2.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพน้ำสำหรับเลี้ยงสัตว์น้ำ

น้ำเป็นปัจจัยหลักต่อการดำรงชีพของสัตว์น้ำ การรักษาคุณภาพให้อยู่ในสถานะที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำจึงมีความสำคัญและต้องดำเนินการอย่างต่อเนื่อง โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพ ได้แก่

### 2.2.1 พีเอช

ค่าพีเอชเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความเป็นกรด-เบสของสารละลายในน้ำ โดยขึ้นกับค่าพารามิเตอร์อื่นๆ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ สภาพความเป็นด่าง (Alkalinity) และความกระด้าง (Hardness) เป็นต้น ค่าพีเอชมีความเป็นพิษในตัวเองและอาจช่วยส่งเสริมให้สารบางชนิดที่อยู่ในน้ำมีความเป็นพิษสูงขึ้นได้ สัตว์น้ำแต่ละชนิดมีความสามารถในการทนทานต่อระดับพีเอชที่แตกต่างกัน เช่น สัตว์น้ำจืดทั่วไปสามารถเจริญเติบโตได้ในช่วงพีเอชตั้งแต่ 6.5-9 ส่วนสัตว์น้ำเค็มส่วนใหญ่ทนต่อค่าพีเอชในช่วง 7.5-8.5 (Boyd และ Tucker, 1998)

### 2.2.2 สภาพความเป็นด่าง

สภาพความเป็นด่างหรืออัลคาไลน์ตีเป็นตัวบ่งบอกถึงความสามารถของน้ำที่ทำให้กรดเป็นกลาง โดยค่าอัลคาไลน์ตีรวมขึ้นกับปริมาณคาร์บอนเนตไอออน ไบคาร์บอนเนตไอออน และไฮดรอกไซด์ไอออน ซึ่งในการเลี้ยงสัตว์น้ำต้องควบคุมให้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 20 มก./ล. (Lawson, 1995)

### 2.2.3 ออกซิเจนละลาย

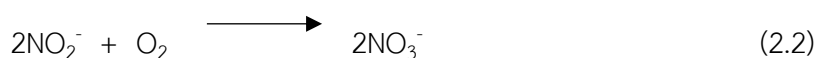
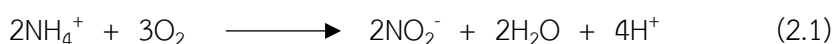
ค่าออกซิเจนละลายมีความสำคัญอย่างมากเพราะถูกใช้ในกระบวนการหายใจของสัตว์น้ำ นอกจากนี้ยังถูกนำไปใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำ ปริมาณออกซิเจนละลายที่มีค่าต่ำเกินไปอาจเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ แต่ในทางตรงกันข้ามปริมาณออกซิเจนละลายที่สูงขึ้นทำให้ได้ปริมาณผลผลิตที่มากขึ้น โดยปริมาณออกซิเจนต่ำสุดที่ยอมรับได้สำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำจืดต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 5 มก./ล. (Lawson, 1995)

### 2.2.4 แอมโมเนีย

แอมโมเนียเป็นผลมาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น อาหารที่เหลือจากการบริโภคของสัตว์น้ำหรือของเสียที่เกิดจากการขับถ่าย ดังนั้นปริมาณแอมโมเนียจึงขึ้นกับปริมาณของเสียในน้ำและปริมาณสัตว์น้ำ นอกจากนี้ความเข้มข้นของแอมโมเนียจะสูงขึ้นที่ค่าพีเอชและอุณหภูมิที่สูงขึ้น ซึ่งเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำโดยไปทำให้ความสามารถในการละลายของออกซิเจนในเลือดลดลง ทั้งนี้ระบบเลี้ยงสัตว์น้ำทั่วไปควรรักษาปริมาณแอมโมเนียให้มีความเข้มข้นต่ำกว่า 0.02 มก./ล. (Lawson, 1995)

### 2.2.5 ไนไตรท์และไนเตรต

ไนไตรท์ ( $\text{NO}_2^-$ ) เป็นผลมาจากกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) ในสมการที่ 2.1 และ 2.2 โดยที่แอมโมเนียถูกออกซิไดซ์เป็นไนไตรท์และไนไตรท์จะถูกออกซิไดซ์ต่อไปเป็นไนเตรต ( $\text{NO}_3^-$ ) ซึ่งกระบวนการนี้เกิดขึ้นเร็วมากทำให้ปริมาณไนไตรท์มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับไนเตรต



อย่างไรก็ตามกระบวนการไนตริฟิเคชันส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนละลายลดลงซึ่งกระทบต่อระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ นอกจากนี้ไนไตรท์ยังทำปฏิกิริยากับไอออนบางชนิด เช่น คลอไรด์ ไอโอดิด และไบคาร์บอเนต ทำให้สมบัติเปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้การลดลงของคลอไรด์ทำให้ความต้านทานต่อเชื้อโรคในน้ำลดน้อยลง และการลดลงของไบคาร์บอเนตไอออนยังทำให้สภาพความเป็นด่างลดลงด้วย

เมื่อเปรียบเทียบกับแล้วไนเตรตมีความเป็นพิษต่ำกว่าไนไตรท์ (Wickins, 1976) และสามารถเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) โดยแบคทีเรีย เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนรูปจากไนเตรตเป็นก๊าซไนโตรเจนซึ่งเป็นสารอาหารที่พืชสามารถนำไปใช้ได้

### 2.2.6 ฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสเป็นสารอาหารที่จำเป็นต่อระบบนิเวศ ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญสำหรับสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำพบมากในรูปสารประกอบในตะกอนและสารละลายฟอสฟอรัส ทั้งนี้ฟอสฟอรัสที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 0.01 มก./ล. อาจส่งผลให้ขาดความสมบูรณ์ในระบบนิเวศ ที่ความเข้มข้น 0.01-0.02 มก./ล. เป็นระดับที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิต แต่ความเข้มข้นที่สูงกว่าค่าดังกล่าวอาจก่อให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ซึ่งนำไปสู่สภาวะขาดออกซิเจน (Hypoxia) และไร้ออกซิเจน (Anoxia) ตามลำดับ

### 2.2.7 ตะกอน

ของแข็งหรือตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำมาจากอาหารที่เหลือจากการบริโภค การขับถ่ายของเสียของสัตว์น้ำ อนุภาคตะกอนจากภายนอกในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ และเซลล์สิ่งมีชีวิตขนาด

เล็ก เช่น สาหร่ายหรือแบคทีเรีย เป็นต้น ตะกอนเหล่านี้ประกอบด้วยหลายช่วงขนาดและหลายองค์ประกอบซึ่งสามารถจำแนกได้เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ ตะกอนจมตัว (Settling solid) ตะกอนแขวนลอย (Suspended solid) และตะกอนละลายน้ำ (Dissolved solid) โดยทั่วไปพบว่าการจัดการกับตะกอนเหล่านี้เป็นหนึ่งในกระบวนการบำบัดน้ำสำหรับระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำ เนื่องจากตะกอนทำให้เกิดความเสียหายทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อระบบ เช่น ส่งผลกระทบต่อสุขภาพสัตว์น้ำ เกิดการย่อยสลายโดยใช้ออกซิเจนเป็นสาเหตุให้ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำลดลง เป็นที่อยู่ให้กับเซลล์ก่อโรค (Pathogenic organism) เพิ่มปริมาณสารอาหารในระบบทำให้เกิดการเจริญเติบโตของกลุ่มสิ่งมีชีวิตที่เป็นผู้บริโภคน้ำที่หนึ่ง (สาหร่ายและแพลงก์ตอน) หรือขัดขวางการทำงานของกระบวนการบำบัดน้ำอื่นๆ เป็นต้น โดยปริมาณตะกอนในระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำควรมีค่าความเข้มข้นน้อยกว่า 80 มก./ล. (Pillay และ Kutty, 2005) ทั้งนี้เครื่องมือสำหรับระบบแยกตะกอนที่นิยมใช้กันในปัจจุบันมีหลากหลายรูปแบบ ขึ้นกับความเหมาะสมและความต้องการของผู้ดำเนินงาน

### 2.2.8 อุณหภูมิ

น้ำเป็นสิ่งที่สัมผัสกับสัตว์น้ำตลอดเวลา อุณหภูมิของน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปจึงมีผลกระทบโดยตรงต่อสุขภาพสัตว์น้ำ ทั้งนี้สัตว์น้ำต่างชนิดกันสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในช่วงที่แตกต่างกัน เมื่ออุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นหรือลดลงจะทำให้ระบบเผาผลาญของสัตว์น้ำทำงานไม่ปกติรวมทั้งส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมอื่นๆ เช่น การกินอาหาร การผสมพันธุ์ หรือการขับถ่าย เป็นต้น นอกจากนี้ในธรรมชาติอาจพบปรากฏการณ์การอพยพย้ายถิ่นฐานของสัตว์น้ำบางชนิดที่ไม่สามารถปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำ

## 2.3 ระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำ

ระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำ (Recirculating Aquaculture System) เป็นระบบที่สามารถเพิ่มกำลังการผลิตสัตว์น้ำเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการของตลาด และยังคงพัฒนาให้ระบบการทำงานมีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยข้อดีสำคัญของระบบเลี้ยงสัตว์น้ำรูปแบบนี้คือ การเลี้ยงสัตว์น้ำที่ระดับความหนาแน่นสูง แต่นั่นหมายถึงปริมาณอาหารที่เข้าสู่ระบบ อาหารที่เหลือจากการ

บริโภคของสัตว์น้ำ รวมทั้งของเสียที่เกิดจากการขับถ่ายย่อมมีปริมาณสูงตามกันไป อย่างไรก็ตาม ลักษณะที่สำคัญซึ่งเป็นข้อดีอีกประการหนึ่งของระบบหมุนเวียนน้ำคือ การจัดการของเสียอย่างเป็นระบบและสามารถเวียนน้ำกลับไปใช้ใหม่ได้

ระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำประกอบด้วย 2 กระบวนการหลักตามลักษณะการทำงาน ได้แก่ กระบวนการเลี้ยงสัตว์น้ำและกระบวนการบำบัดน้ำ ทั้งนี้เป้าหมายในการเดินระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อรักษาคุณภาพน้ำให้เหมาะสมกับการเลี้ยงสัตว์น้ำขึ้นกับ 4 ปัจจัย ได้แก่ การกำจัดตะกอนของแข็ง การควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายให้เพียงพอต่อความต้องการของสัตว์น้ำ การกำจัดแอมโมเนียและคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากระบบ (Timmons และ Ebeling, 2010) สำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำระบบหมุนเวียนหรือระบบปิดซึ่งโดยปกติมักมีการเติมอากาศ เพื่อให้เกิดการกวนผสมตะกอนจึงอยู่ในลักษณะแขวนลอยในมวลน้ำ ซึ่งช่วยลดการสะสมตัวของตะกอนที่ก้นบ่อที่อาจนำไปสู่การเกิดภาวะขาดออกซิเจนและยากต่อการดูแลระบบ ทั้งนี้ตะกอนในระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำมีขนาดอยู่ในช่วง 1-200 ไมโครเมตร (Timmons และคณะ, 2002) ทำให้กระบวนการแยกตะกอนในระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำเบื้องต้นใช้ตะแกรงกรองที่มีขนาดช่องกรองอยู่ในช่วง 60-200 ไมโครเมตร (Cripps และ Bergheim, 2000)

### 2.3.1 การแยกตะกอนแขวนลอยในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำ

การแยกตะกอนซึ่งอยู่ในลักษณะแขวนลอยในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำสามารถทำได้ 4 วิธี โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 2.3.1.1 การแยกด้วยแรงโน้มถ่วง (Gravity Separation)

การแยกอนุภาคของแข็งแขวนลอยออกจากน้ำด้วยแรงโน้มถ่วง ใช้หลักการตกตะกอน (Sedimentation) ของของแข็งซึ่งมีความหนาแน่น (Density) สูงกว่าน้ำ อย่างไรก็ตาม การแยกอนุภาคด้วยแรงโน้มถ่วงเหมาะกับอนุภาคที่มีอัตราการตกตะกอนหรือความเร็วในการตกตะกอนสูง โดยที่ความเร็วในการตกตะกอนจะแปรผันตรงกับเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคตะกอนและผลต่างความหนาแน่นระหว่างอนุภาคตะกอนกับน้ำ กล่าวคืออนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะตกตะกอนได้เร็วกว่าอนุภาคชนิดเดียวกันที่มีขนาดเล็กกว่า หรืออนุภาคที่มีความหนาแน่นสูงกว่าน้ำมากจะตกตะกอน



ได้เร็วกว่าอนุภาคที่มีความหนาแน่นสูงกว่าน้ำน้อยกว่า ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ด้วยกฎของ Stokes (สมการที่ 2.3)

$$v = \frac{g\Delta\rho(d)^2}{18\mu} \quad (2.3)$$

เมื่อ	$v$	คือ ความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาค (ชม./วินาที)
	$g$	คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (ชม./วินาที <sup>2</sup> )
	$\Delta\rho$	คือ ผลต่างความหนาแน่นระหว่างอนุภาคกับน้ำ (ก./ลบ.ชม.)
	$d$	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (ชม.)
	$\mu$	คือ ความหนืดของน้ำ (ก./ชม./วินาที)

#### 2.3.1.2 การแยกด้วยกระบวนการลอยตัว (Flotation)

การลอยตัวเป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้แยกอนุภาคในน้ำ โดยใช้หลักการการลดความหนาแน่นของอนุภาคให้มีค่าต่ำกว่าน้ำด้วยการสร้างฟองอากาศขนาดเล็กขึ้น เมื่อฟองอากาศไปชนกับอนุภาคจึงเกิดการลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำ ทั้งนี้กระบวนการลอยตัวจะใช้ได้ดีกับอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 500 ไมโครเมตร และมีประสิทธิภาพในการแยกเซลล์สิ่งมีชีวิต เช่น สาหร่ายหรือแบคทีเรียได้ดีกว่าการตกตะกอน

#### 2.3.1.3 การแยกด้วยกระบวนการกรอง (Filtration)

การกรองเป็นการแยกอนุภาคโดยใช้ตัวกลางเป็นตัวดักจับอนุภาคออกจากน้ำ โดยแบ่งการกรองเป็น 2 ลักษณะ ดังนี้

##### 1) การกรองที่ผิวตัวกลางกรอง (Surface Filtration)

การกรองลักษณะนี้เป็นการยอมให้น้ำหรืออนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าช่องกรองผ่านไป ได้ ส่วนอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าจะถูกดักอยู่ที่ผิวของตัวกลางกรอง โดยทั่วไปตัวกลางจึงมีลักษณะเป็นแผ่นบางและวัสดุที่นิยมใช้เป็นตัวกลางกรอง ได้แก่ โลหะ ผ้า โพลีเมอร์ กระดาษกรอง และเยื่อกรอง (Membrane) ทั้งนี้ลักษณะการไหลของน้ำจะส่งผลต่อความสามารถในการกรองและการอุดตัน

(Fouling) ของตัวกรอง โดยการไหลแบบอัดตัว (Dead-end) เป็นการส่งน้ำให้ไหลเข้าหาในทิศทางตั้งฉากกับตัวกรอง ซึ่งการกรองในลักษณะนี้อาจทำให้เกิดการอุดตันที่ผิวหน้าตัวกรองเร็วกว่าการกรองในลักษณะไหลขวาง (Cross flow) ซึ่งเป็นลักษณะที่น้ำไหลในทิศทางขนานกับผิวหน้าตัวกรอง นอกจากนี้ความเร็วในการไหลของน้ำยังมีผลกับการกรองโดยทำให้เกิดแรงเฉือน (Shear force) กระทำกับอนุภาคที่ติดอยู่บนผิวหน้าตัวกรองเป็นการช่วยลดอัตราการอุดตันของตัวกรองได้

## 2) การกรองแบบชั้นความลึก (Depth Filtration)

การกรองแบบชั้นความลึกเป็นการดักอนุภาคไว้ที่ช่องว่างของชั้นตัวกลางกรองตามความลึก โดยวัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางกรอง ได้แก่ เส้นใย ทราย หิน เป็นต้น การกรองในลักษณะนี้ทำให้เกิดกลไกในการดักอนุภาคซึ่งประกอบด้วย การกระทบเนื่องจากความเฉื่อย (Inertial Impaction) การแพร่ (Diffusion) และการสกัดกั้นโดยตรง (Interception)

### 2.3.2 ฟลักซ์การกรอง

ค่าฟลักซ์การกรองคือปริมาตรน้ำที่ไหลผ่านต่อหน่วยพื้นที่การกรองต่อเวลาหรืออัตราการไหลผ่านของน้ำต่อพื้นที่วัสดุกรองต่อเวลา สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ได้ดังสมการที่ 2.4 ทั้งนี้สามารถใช้ค่าอัตราการไหลผ่านของน้ำต่อพื้นที่วัสดุกรองต่อเวลาสำหรับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกรองของหน่วยแยกตะกอนได้ โดยที่ค่าฟลักซ์ที่ลดลงจะแปรผันตรงกับอัตราการไหลของน้ำผ่านวัสดุกรองดังนี้

$$J = \frac{Q}{A} \quad (2.4)$$

เมื่อ	J	คือ ฟลักซ์การกรอง (ล./ตร.ม./ชม.)
	Q	คือ อัตราการไหลของน้ำ (ล./ชม.)
	A	คือ พื้นที่การกรองหรือพื้นที่รับน้ำทั้งหมด (ตร.ม.)

## 2.4 การปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุ

การปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุมีวัตถุประสงค์เพื่อเปลี่ยนแปลงลักษณะทั้งทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพของพื้นผิวให้มีสมบัติตามต้องการเหมาะสมกับการใช้งานหรือยืดอายุการใช้งานของวัสดุเหล่านั้น แต่การปรับปรุงพื้นผิวมีหลายวิธีขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นผิวที่ต้องการและวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้ เช่น การปรับปรุงพื้นผิวเพื่อเพิ่มความขรุขระเหมาะสมกับอุปกรณ์ที่ใช้ในงานขัดซึ่งช่วยให้ง่ายต่อการทำความสะอาดบนพื้นผิววัสดุได้ดี นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสให้กับวัสดุที่ใช้ในการดูดซับได้เช่นกัน (Lapshin และคณะ, 2010)

การปรับปรุงบนพื้นผิวให้มีการจัดเรียงประจุรูปแบบใหม่ เช่น การเพิ่มความเป็นประจุบนพื้นผิวจะเป็นการเพิ่มสมบัติความชอบน้ำให้กับวัสดุ นอกจากนี้ยังทำให้วัสดุมีความทนทานต่อสภาพความเป็นกรด-เบสได้มากขึ้น (Bertazzo และ Rezwan, 2009)

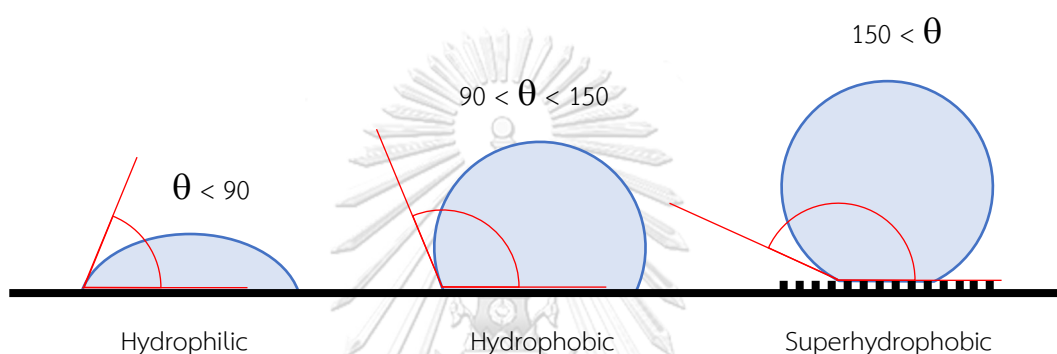
การปรับสมบัติทางเคมีกายภาพเป็นการทำให้พื้นผิวมีลักษณะโครงสร้าง องค์ประกอบทางเคมี หรือความสามารถในการทำปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงไป (London และคณะ, 2013) โดยการปรับปรุงพื้นผิวลักษณะนี้ สามารถดำเนินการได้หลายแนวทาง เช่น การสร้างพื้นผิวที่ชอบน้ำ (Alekhin และคณะ, 2010) การสร้างพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ (Guo และคณะ, 2010) หรือการสร้างพื้นผิวที่มีองค์ประกอบเฉพาะ เป็นต้น

อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้สนใจวิธีการปรับปรุงพื้นผิวให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำแบบยิ่งยวดและการปรับสมบัติทางเคมีของพื้นผิวเพื่อป้องกันการเกิดฟิล์มชีวภาพ มีรายละเอียดดังนี้

### 2.4.1 สมบัติความไม่ชอบน้ำ

ความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) เป็นสมบัติของสารที่บ่งบอกถึงความสามารถในการยึดเกาะด้วยโมเลกุลของน้ำ ในทางเคมีสารที่มีความไม่ชอบน้ำคือสารไม่มีขั้ว จึงไม่สามารถสร้างพันธะร่วมกับโมเลกุลน้ำได้ เช่น น้ำมัน ไขมัน สารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดอิ่มตัว (Alkane) เป็นต้น วัสดุบางชนิดมีพื้นผิวที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic surface) เพื่อป้องกันการเกิดภาวะการเปียก (Wetting) เช่น ผิวด้านบนของใบบัว เป็นต้น สำหรับการบ่งชี้ถึงความไม่ชอบน้ำทำได้โดยการวัดค่ามุมสัมผัส (Contact angle;  $\theta$ ) คือมุมที่เกิดการสัมผัสกันระหว่างของเหลวหรือก๊าซกับระนาบของของแข็ง (รูปที่ 2.1) ค่ามุมสัมผัส 0-90 องศา จัดเป็นพื้นผิวที่ชอบน้ำ (Hydrophilic

surface) ในขณะที่ค่ามุมสัมผัสที่มากกว่า 90 องศา แต่ไม่เกิน 150 องศา จัดเป็นพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ ส่วนมุมสัมผัสที่มีค่ามากกว่า 150 องศา จัดเป็นพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด (Superhydrophobic surface) โดยพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดจะมีความขรุขระสูง กล่าวคืออนุภาคที่เกาะบนพื้นผิวมีการกระจายตัวไม่ตัวอย่างยิ่งยวด ส่งผลให้พื้นผิวส่วนที่สัมผัสกับของเหลวหรือก๊าซมีน้อยกว่าพื้นผิวที่อนุภาคมีการกระจายตัวดี (Yang และคณะ, 2006) สำหรับการปรับปรุงพื้นผิวให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดในงานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์วัสดุขนาดนาโนลงบนพื้นผิวตะแกรงโลหะ



รูปที่ 2.1 การวัดมุมสัมผัสเพื่อแสดงสมบัติความไม่ชอบน้ำ

#### 2.4.2 การสังเคราะห์วัสดุขนาดนาโนบนพื้นผิว

วัสดุขนาดนาโนเป็นวัสดุสังเคราะห์โดยการเรียงตัวของอะตอมหรือโมเลกุลขนาดตั้งแต่ 1-1000 นาโนเมตร อย่างเป็นระเบียบ และจากการสังเคราะห์วัสดุขนาดนาโนจะทำให้สมบัติหรือพฤติกรรมของวัสดุ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติเชิงแม่เหล็ก หรือสมบัติทางไฟฟ้า เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเมื่อเทียบกับวัสดุที่ไม่มีการปรับสภาพพื้นผิว โดยวัตถุประสงค์หลักของการสังเคราะห์วัสดุขนาดนาโนคือการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับวัสดุดังกล่าว เนื่องจากเมื่อวัสดุมีขนาดเล็กจะทำให้มีพื้นที่สัมผัสสูงขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้สัดส่วนของจำนวนอะตอมหรือโมเลกุลมีการกระจายตัวมากขึ้น ส่งผลต่อความว่องไวในการทำปฏิกิริยา ดังนั้นด้วยสมบัติของวัสดุขนาดนาโนจึงทำให้เกิดนวัตกรรมและการสร้างวัสดุที่มีสมบัติใหม่ๆ ได้หลายชนิดสำหรับประโยชน์ในการใช้งานด้านต่างๆ

## 2.5 ประเภทของวัสดุนาโน

กระบวนการสังเคราะห์วัสดุนาโนสามารถดำเนินการได้หลากหลายวิธี ทำให้ได้วัสดุที่มีสมบัติและลักษณะเฉพาะตัวที่แตกต่างกันออกไป ทั้งนี้สามารถแบ่งประเภทของวัสดุนาโนที่นำมาใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวันและอุตสาหกรรมได้ 4 กลุ่ม ดังนี้

### 2.5.1 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes)

ท่อนาโนคาร์บอน คือ โครงสร้างของอะตอมคาร์บอนมีลักษณะเป็นท่อกลวง แข็งแรง นำความร้อนสูงและนำกระแสไฟฟ้าได้ดี ปัจจุบันมีการนำไปใช้ในงานด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

### 2.5.2 อนุภาคนาโนควอนตัม (Quantum dots)

อนุภาคนาโนควอนตัม คือ มีสมบัติทางกายภาพและเคมีเหมือนของแข็ง แต่ด้วยความที่มีขนาดเล็กอยู่ในช่วง 1-100 นาโนเมตร จึงมีพฤติกรรมอยู่ระหว่างของแข็งกับของเหลว ลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโนควอนตัมคือสามารถดูดซับและปลดปล่อยแสงได้ ทั้งนี้ขนาดอนุภาคที่ต่างกันจะมีการปล่อยแสงสีต่างกันออกไป ด้วยเหตุนี้อนุภาคนาโนควอนตัมจึงถูกนำไปใช้ประโยชน์ในงานด้านต่างๆ เช่น ใช้สำหรับการย้อมสีฉลากสินค้าหรือเซลล์สิ่งมีชีวิต ใช้เป็นไดโอดเปล่งแสง ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และรวมไปถึงการใช้ในทางการแพทย์ เป็นต้น

### 2.5.3 นาโนคอมโพสิต (Nanocomposite)

นาโนคอมโพสิต คือ ลักษณะของการเติมวัสดุนาโนเข้าไปในวัสดุใดๆ เพื่อปรับปรุงวัสดุดั้งเดิมให้มีสมบัติตามที่ต้องการ เช่น เพิ่มความแข็งแรงหรือเพิ่มความยืดหยุ่น เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการใช้วัสดุนาโนสำหรับเคลือบผิววัสดุให้มีสมบัติเฉพาะ เช่น ฟิล์มเรืองแสงหรือพื้นผิวป้องกันการซึมผ่าน เป็นต้น

### 2.5.4 อนุภาคนาโน (Nanoparticle)

อนุภาคนาโน คือ อนุภาคที่มีขนาดอยู่ในช่วง 1-100 นาโนเมตร กำหนดโดยองค์การระหว่างประเทศว่าด้วยการมาตรฐาน (International Organization for Standardization; ISO, 2008)

โดยอนุภาคนาโนประกอบด้วยลักษณะที่เป็นอะตอมและเป็นโมเลกุลจำนวนมาก การใช้ประโยชน์สามารถทำได้หลายด้านขึ้นอยู่กับชนิดของอนุภาค เช่น อนุภาคนาโนของทองใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี อนุภาคโพโตคะตะลิสต์ซึ่งผสมอยู่ในครีมกันแดด และอนุภาคนาโนของโลหะ เป็นต้น

## 2.6 เทคนิคการปรับปรุงพื้นผิววัสดุด้วยอนุภาคนาโน

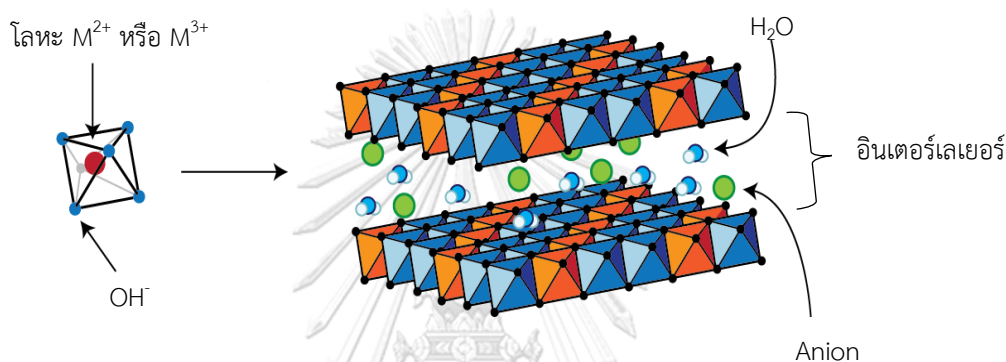
การปรับปรุงพื้นผิวด้วยวัสดุขนาดนาโนสามารถดำเนินการได้หลายแนวทาง อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้สนใจการปรับปรุงพื้นผิวโดยการสังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และการเคลือบพื้นผิวด้วยอนุภาคนาโน โดยมีรายละเอียดดังนี้

### 2.6.1 เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (Layered double hydroxides)

เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์เป็นชั้นของสารประกอบโลหะไฮดรอกไซด์ที่มีประจุบวกเรียงซ้อนกันและมีช่องว่างระหว่างชั้นกว้างในระดับนาโนเมตร โดยทั่วไปไอออนประจุลบและโมเลกุลของน้ำจะแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้น สามารถพบได้ทั้งในธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ โดยที่เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์มีโครงสร้างพื้นผิวเป็นประจุบวกและมีสมบัติในการกักเก็บไอออนประจุลบ และสามารถแลกเปลี่ยนไอออนเพื่อปรับปรุงลักษณะได้ทั้งภายในและภายนอกโครงสร้าง (Sajid และ Basheer, 2016) นอกจากนี้ยังจัดเป็นสารที่ไม่เป็นพิษ ราคาถูกและสังเคราะห์ได้ง่ายจึงได้รับความนิยมและถูกนำไปใช้ประโยชน์ได้ในหลายด้าน เช่น ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี (He, 2013) ใช้เป็นฉนวนกันไฟ (Kalali, 2015) ใช้เป็นสารดูดซับ (Li, 2014) และใช้ในทางการแพทย์ เป็นต้น

สำหรับการสังเคราะห์เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์มีหลักการเบื้องต้นคือการสร้างผลึกโลหะจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโลหะกับเบสด้วยวิธีการต่างๆ ได้แก่ การตกตะกอน (Precipitation) การตกตะกอนร่วม (Co-precipitation) การคืนน้ำ (Rehydration) และการทำปฏิกิริยาภายใต้ความร้อน (Hydrothermal reaction) เป็นต้น ทั้งนี้เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์จัดเป็นหนึ่งในสารประกอบแบบชั้น (Layered compounds) ซึ่งแบ่งตามลักษณะการแทรกตัวของไอออนระหว่างชั้นได้ 3 กลุ่ม ได้แก่ (1) สารประกอบแบบชั้นที่ไม่มีประจุแทรก เนื่องจากชั้นโลหะผสมมีสภาพประจุเป็นกลางทำให้ไม่มีการดุลประจุระหว่างชั้นโครงสร้าง เช่น แกรไฟต์ (Graphite) เป็นต้น (2) สารประกอบแบบชั้นที่แทรกด้วยไอออนประจุบวก เนื่องจากชั้นโลหะผสมมีประจุรวมเป็นลบทำให้มี

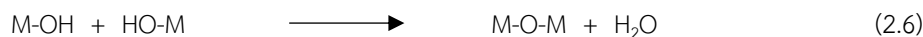
การแทรกไอออนประจุบวกเพื่อให้เกิดการดุลให้สภาพประจุในโครงสร้างเป็นกลาง เช่น แร่ดินเหนียว (Clay mineral) หรือแร่มอนต์มอริลโลไนท์ (Montmorillonite) เป็นต้น และ (3) สารประกอบแบบชั้นที่แทรกด้วยไอออนประจุลบเนื่องจากชั้นโลหะมีประจุรวมเป็นบวกทำให้ไอออนประจุลบไปแทรกระหว่างชั้นด้วยพันธะไฮโดรเจนเพื่อดุลประจุรวมให้เป็นกลาง เช่น เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นชั้นโครงสร้างของสารประกอบโลหะ  $M^{2+}$  เช่น แมกนีเซียม แคลเซียม หรือสังกะสี เป็นต้น กับโลหะ  $M^{3+}$  ที่พบมาก ได้แก่ อะลูมิเนียม เชื่อมต่อกันด้วยพันธะโลหะ ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์

### 2.6.2 กระบวนการโซล-เจล (Sol-Gel)

กระบวนการโซล-เจลเป็นการผลิตวัสดุที่ต้องการความบริสุทธิ์สูง หลักการทั่วไปของกระบวนการนี้คือการเปลี่ยนสถานะจากสารละลาย (Solution) เป็นสารแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาคไม่เกิน 1 ไมโครเมตร หรือเรียกว่าเจล (Gel) โดยปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการโซล-เจล มี 3 ขั้นตอน ได้แก่ ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) การควบแน่นของน้ำ (Water condensation) และการควบแน่นของแอลกอฮอล์ (Alcohol condensation) ดังสมการที่ 2.5, 2.6 และ 2.7 ตามลำดับ ทั้งนี้สมบัติและลักษณะของโซล-เจลที่ได้จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับการควบคุมปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยา ได้แก่ พีเอช อุณหภูมิ สัดส่วนโดยมวลของน้ำและโลหะ และตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น



เมื่อ M คือ อนุภาคโลหะ ได้แก่ Si, Zr, Ti, Al, Sn และ Ce

O-R แทนหมู่แอลคอกซิล (Alkoxyl group)

## 2.7 ความเป็นพิษของสาร

การปรับปรุงพื้นผิวตะแกรงโลหะในงานวิจัยนี้ด้วยแนวทางต่างๆ ด้านนาโนเทคโนโลยี ได้แก่ การพ่นเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโน การสังเคราะห์เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่แทรกด้วยสเตียเรทไอออน และการสังเคราะห์เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่แทรกด้วยซีเตรทไอออน เป็นการปรับปรุงให้พื้นผิวตะแกรงโลหะเหล็กกล้ามีองค์ประกอบทางเคมีเปลี่ยนแปลงไป โดยตะแกรงที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวจะถูกนำไปใช้ในกระบวนการกรองน้ำซึ่งอาจเกิดการกักกรองบนพื้นผิวของตะแกรงทำให้สารเคมีที่ใช้ปรับปรุงพื้นผิวหลุดออกปนเปื้อนกับน้ำ เช่น สารประกอบโลหะแมกนีเซียม สารประกอบโลหะอะลูมิเนียม และสารประกอบซิลิกา เป็นต้น นอกจากนี้สารเคมีบางชนิดอาจละลายไปกับน้ำได้ เช่น สารประกอบสเตียเรทไอออนและสารประกอบซีเตรทไอออน เป็นต้น สารเคมีที่เกิดจากการปรับปรุงพื้นผิวดังกล่าวหากปนเปื้อนอยู่ในน้ำอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ หรือเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้สารบางชนิดอาจสะสมในสิ่งมีชีวิตและถูกส่งต่อไปตามห่วงโซ่อาหารจนถึงระดับที่เป็นพิษได้และอาจมีผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ อย่างไรก็ตามสารเคมีดังกล่าวจะมีอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในปริมาณที่แตกต่างกัน จากข้อมูลของ Thermo Fisher Scientific ดังตารางที่ 2.1 แสดงค่าปริมาณสารเคมีที่ทำให้สัตว์ทดลองที่ได้รับสารนั้นเพียงครั้งเดียว ตายไปเป็นจำนวนครึ่งหนึ่งของจำนวนเริ่มต้น ( $LD_{50}$ ) และค่าความเข้มข้นของสารเคมีในน้ำที่เป็นสาเหตุทำให้กลุ่มของสัตว์ทดลองร้อยละ 50 ตาย ( $LC_{50}$ )



ตารางที่ 2.1 ปริมาณของสารเคมีที่เป็นพิษเฉียบพลันกับสัตว์ทดลอง

สารเคมี	LD <sub>50</sub>	LC <sub>50</sub>
Stearic Acid	4,600 มก./กก.	ไม่มีรายงาน
Magnesium Stearate	10,000 มก./กก.	ไม่มีรายงาน
Calcium Stearate	10,000 มก./กก.	ไม่มีรายงาน
Citric Acid	11,700 มก./กก.	440-760 มก./ล./96 ชม.
Sodium Citrate	5,400 มก./กก.	18,000 – 32,000 มก./ล./96 ชม.
Silica	5,000 มก./กก.	5,000 มก./ล./96 ชม.

## 2.8 ฟิล์มชีวภาพ (Biofilm)

ฟิล์มชีวภาพคือโครงสร้างของกลุ่มประชากรสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก (Microorganism) ได้แก่ แบคทีเรีย รา สาหร่าย และโพรโตซัว (Protozoa) โดยมีสารประกอบโพลีเมอร์หรือ Extracellular Polymeric Substance (EPS) ซึ่งถูกขับออกมาด้วยกลไกการป้องกันตัวของจุลชีพเป็นตัวกลางที่ช่วยยึดเซลล์ให้อยู่รวมกันเป็นกลุ่ม และทำหน้าที่ป้องกันเซลล์สิ่งมีชีวิตเหล่านี้จากแรงกระทำทั้งทางกายภาพและเคมี (Madigan และ Martinko, 2006) รวมทั้งช่วยดักจับสารอาหารให้กับจุลชีพ องค์ประกอบหลักของฟิล์มชีวภาพได้แก่ เซลล์จุลชีพ คิดเป็นร้อยละ 2-5 ดีเอ็นเอและอาร์เอ็นเอร้อยละ 1-2 พอลิแซ็กคาไรด์ร้อยละ 1-2 และโปรตีนร้อยละ 1-2 นอกจากนี้คือโมเลกุลของน้ำทั้งหมด (Lu และ Collins, 2007) เนื่องจากฟิล์มชีวภาพสามารถพบได้ในทุกสภาพแวดล้อมที่มีความชื้น ทั้งในลักษณะแขวนลอยหรือก่อตัวอยู่บนพื้นผิววัสดุประเภทต่างๆ เช่น โลหะ พลาสติก ไม้ หิน และเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต ทำให้ฟิล์มชีวภาพกลายเป็นต้นเหตุของปัญหาในด้านต่างๆ เช่น การปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรียหรือสิ่งมีชีวิตก่อโรคในอุปกรณ์ทางการแพทย์ (Hall-Stoodley และคณะ, 2012) หรือการเกิดฟิล์มชีวภาพในระบบผลิตของอุตสาหกรรมซึ่งนำไปสู่การสูญเสียเครื่องมือผลิต ปริมาณผลผลิต และคุณภาพของผลผลิตที่เกิดขึ้น (Flemming, 2011) รวมทั้งการอุดตันในระบบกรองน้ำ เช่น เทคโนโลยีเมมเบรน (Mansouri และคณะ, 2009) ด้วยเหตุนี้ทำให้เกิดงานวิจัยที่พยายามหาวิธีป้องกันปัญหาที่เกิดจากฟิล์มชีวภาพ เช่น การปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุเพื่อลดการยึดเกาะของฟิล์มชีวภาพ (Türetgen, 2015) หรือการใช้สารเคมีที่ออกฤทธิ์ยับยั้งการเกิดฟิล์มชีวภาพ (Shanks และ

คณะ, 2006) อย่างไรก็ตามฟิล์มชีวภาพยังมีความสำคัญต่อห่วงโซ่อาหารในระบบนิเวศ นอกจากนี้พบว่ามีการวิจัยที่นำเสนอการใช้ประโยชน์จากฟิล์มชีวภาพในการฟื้นฟูดินเสื่อมสภาพ การบำบัดน้ำเสีย และการจัดการกับสารที่เป็นพิษ (Edwards และ Kjellerup, 2013; Ateia และ Yoshimura, 2015)

### 2.8.1 การวิเคราะห์ฟิล์มชีวภาพ

จากที่กล่าวมาข้างต้นทำให้ทราบว่าฟิล์มชีวภาพมีความหลากหลายทั้งด้านลักษณะสัณฐาน องค์ประกอบ และแหล่งที่อยู่อาศัย ดังนั้นเทคนิคการวิเคราะห์จึงมีความแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของงาน ทั้งนี้สามารถจำแนกเทคนิคการวิเคราะห์ฟิล์มชีวภาพออกเป็น 2 วิธีการดังนี้

#### 2.8.1.1 การวิเคราะห์ฟิล์มชีวภาพเชิงปริมาณ

การวิเคราะห์เชิงปริมาณยังสามารถแบ่งย่อยได้เป็น 2 วิธี คือ 1) การวิเคราะห์ทางตรงและ 2) การวิเคราะห์ทางอ้อม

##### 1) การวิเคราะห์ฟิล์มชีวภาพเชิงปริมาณทางตรง

เทคนิคการวิเคราะห์ฟิล์มชีวภาพเชิงปริมาณทางตรง ได้แก่ การนับจำนวนเซลล์จุลชีพ (Cell counting) ซึ่งวิธีนี้เป็นที่ยอมรับและถูกอ้างอิงในหลายงานวิจัย โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะได้ปริมาณฟิล์มชีวภาพออกมาในหน่วยจำนวนเซลล์ต่อปริมาตร (Colony Forming Unit per Milliliter, CFU/ml) ซึ่งถูกใช้เป็นหน่วยมาตรฐาน (Adetunji และ Odetokun, 2012) อย่างไรก็ตามการนับจำนวนเซลล์ซึ่งมีขนาดเล็กเป็นเรื่องที่ยากในทางปฏิบัติ ในบางครั้งจึงมีการย้อมสีเซลล์เพื่อให้ง่ายต่อการนับ นอกจากนี้ปัจจุบันยังมีการใช้โปรแกรมในการนับจำนวนเซลล์จากภาพถ่าย (Vyas และ คณะ, 2016) เช่น โปรแกรมอิมเมจเจ (ImageJ) ยิ่งไปกว่านั้นการนับจำนวนเซลล์ยังสามารถใช้เทคนิคโฟลว์ไซโตเมทรี (Flow cytometry) ด้วยเครื่องมืออัตโนมัติโดยใช้หลักการวัดความยาวคลื่นแสงที่เซลล์ปล่อยและกระจายออกมาหลังจากได้รับแสงกระตุ้นจากภายนอก (Berney และ คณะ, 2007) นอกจากนี้การวิเคราะห์ฟิล์มชีวภาพเชิงปริมาณโดยตรงยังสามารถวัดเป็นปริมาตรของฟิล์มชีวภาพทั้งหมดได้โดยใช้เทคโนโลยีภาพถ่ายสามมิติ เช่น กล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอลชนิดที่ใช้เลเซอร์ใน

การสแกน (Confocal laser scanning microscope ; Confocal laser scanning microscopy ; CLSM ; LSCM) (Nwaneshiudu และคณะ, 2012) เป็นต้น

## 2) การวิเคราะห์ฟิล์มชีวภาพเชิงปริมาณทางอ้อม

เทคนิคการวิเคราะห์ฟิล์มชีวภาพเชิงปริมาณทางอ้อม คือ การวิเคราะห์จากองค์ประกอบที่สามารถใช้เป็นตัวแทนหรือเทียบเคียงกับปริมาณฟิล์มชีวภาพได้ ได้แก่ การชั่งน้ำหนักแห้ง (Dry mass) โดยวิธีนี้นิยมใช้กันมากสำหรับการวิเคราะห์ที่ไม่ต้องการความละเอียดสูง (Trulear และ Characklis, 1982) แต่ข้อจำกัดคือใช้ได้กับฟิล์มชีวภาพที่ยึดเกาะอยู่บนวัสดุที่สามารถทนความร้อนสูงจากการอบเพื่อหาน้ำหนักแห้งได้เท่านั้น อีกวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้คือการวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total Organic Carbon; TOC) เนื่องจากองค์ประกอบของฟิล์มชีวภาพนอกเหนือจากน้ำล้วนเป็นสารอินทรีย์ทั้งหมด ดังนั้นจึงสามารถใช้สัดส่วนของสารอินทรีย์คาร์บอนต่อมวลรวมในการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบเป็นปริมาณฟิล์มชีวภาพได้เช่นกัน (Schumacher, 2002) นอกจากนี้ยังสามารถใช้วิธีการวิเคราะห์โดยการย้อมสีแกรม (Gram Staining) ด้วยสีคริสตัล ไวโอเล็ต (Crystal Violet) ซึ่งย้อมติดกับผนังเซลล์ของแบคทีเรีย และใช้หลักการการดูดกลืนแสงในการวิเคราะห์เป็นปริมาณฟิล์มชีวภาพต่อไป (Popescu และ Doyle, 1996) สำหรับวิธีอื่นๆ เช่น การวิเคราะห์ปริมาณฟิล์มชีวภาพจากปริมาณ EPS ที่มีองค์ประกอบหลักคือโปรตีนและ (Flemming และคณะ, 1996) ก็สามารถทำได้เช่นกัน

### 2.8.1.2 การวิเคราะห์ฟิล์มชีวภาพเชิงคุณภาพ

โดยปกติการวิเคราะห์ฟิล์มชีวภาพเชิงปริมาณจะดำเนินการควบคู่ไปกับการวิเคราะห์เชิงคุณภาพเพื่อพิจารณาถึงลักษณะการเกิดฟิล์มชีวภาพ เช่น การใช้ภาพถ่ายสองมิติหรือสามมิติ โดยเครื่องมือที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) (Adetunji และ Odetokun, 2012) ด้วยเทคโนโลยีนี้ทำให้สามารถสังเกตเห็นถึงลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างฟิล์มชีวภาพและการกระจายตัวของฟิล์มชีวภาพบนพื้นผิววัสดุในกำลังขยายตั้งแต่ 10-500,000 เท่า ได้อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามเนื่องจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสร้างภาพจากการปล่อยคลื่นอิเล็กตรอนที่มีพลังงานค่อนข้างสูง จึงอาจส่งผลให้เกิดความเสียหายหรือเปลี่ยนรูปร่างไปของโครงสร้างสารต่างๆ ที่มีความทนทานต่ำ

นอกจากนี้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดยังมีฟังก์ชันเสริมสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (Energy-Dispersive X-ray spectroscopy; EDX) ทำให้ทราบถึงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ ซึ่งสามารถใช้เทคนิคนี้ในการวิเคราะห์สัดส่วนองค์ประกอบของธาตุที่แตกต่างของวัสดุที่มีการยึดเกาะด้วยฟิล์มชีวภาพกับวัสดุที่ไม่มีการยึดเกาะด้วยฟิล์มชีวภาพ เป็นต้น

## 2.8.2 การวิเคราะห์ปริมาณสารโพลีเมอร์ในฟิล์มชีวภาพ

การวิเคราะห์ปริมาณสารโพลีเมอร์หรือ EPS อาจได้ผลแตกต่างกันขึ้นกับวิธีการสกัดสาร EPS จากฟิล์มภาพ (Wingender และคณะ, 1999) แบ่งออกเป็น 2 วิธี ได้แก่ การสกัดทางเคมีและการสกัดทางกายภาพ

การสกัดทางเคมีเป็นการใช้สารเคมีที่ทำหน้าเป็นตัวทำละลายในการแยก EPS ออกจากสสารอื่น เช่น อัลคาไลน์ ฟอรัมาลดีไฮด์ กรดเอทิลีนไดอามีนเตตราอะเซติก (EDTA) เป็นต้น โดยที่การใช้สารเคมีในการสกัดที่แตกต่างก็ทำให้ได้ผลออกมาไม่เท่ากัน นอกจากนี้ยังใช้วิธีการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยเรซิน (Ion Exchange Resin) ในการสกัด EPS ได้เช่นกัน (Frolund และคณะ, 1996) ส่วนการสกัดทางกายภาพเป็นการให้แรงกระทำต่อสารตั้งต้นเพื่อสกัด EPS เช่น การให้ความร้อน การหมุนเหวี่ยง และการใช้คลื่นเสียง (Sonication) เป็นต้น

ทั้งนี้การสกัด EPS อาจทำได้โดยการใช้วิธีทางกายภาพร่วมกับทางเคมี (Frolund และคณะ, 1996) เพื่อลดระยะเวลาและส่งเสริมให้การสกัดมีประสิทธิภาพสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการสกัดดังกล่าวเป็นเพียงการแยกส่วนของ EPS ออกจากมวลรวมของสสาร ซึ่งต้องทำการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบของ EPS ได้แก่ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต สสารฮิวมิก (Humic Substance) ดีเอ็นเอ และอาร์เอ็นเอ (Morgan และคณะ, 1991) ร่วมด้วย

## 2.9 ทบทวนเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.9.1 การจัดการตะกอนในระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำ

ระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำจะต้องมีการควบคุมคุณภาพน้ำให้คงที่และเหมาะสมกับสัตว์น้ำตลอดเวลา ซึ่งตะกอนแขวนลอยก็เป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพน้ำ จากงานวิจัย

ของ Cripps และ Bergheim (2000) พบว่าปริมาณตะกอนแขวนลอยในน้ำจากระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำที่ยังไม่ผ่านการบำบัดจะอยู่ในช่วง 5-50 มก./ล. ทั้งนี้ในการเลี้ยงสัตว์น้ำโดยทั่วไปในปัจจุบันนิยมแยกตะกอนแขวนลอยออกจากน้ำด้วยกระบวนการกรอง เช่น การใช้ Drum filter เป็นต้น จากงานวิจัยของ Couturier และคณะ (2009) ทำการศึกษาประสิทธิภาพการแยกตะกอนแขวนลอยในระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำโดยใช้ Swirl Separator ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำงานลักษณะเดียวกันกับไฮโดรไซโคลนถูกใช้เป็นหน่วยแยกตะกอนขั้นต้น และใช้ Drum filter เป็นหน่วยแยกตะกอนขั้นที่สอง จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า Swirl Separator สามารถแยกตะกอนได้ร้อยละ 63 ของปริมาณตะกอนทั้งหมดในบ่อเลี้ยง และร้อยละ 22 ถูกแยกตะกอนต่อด้วย Drum filter อย่างไรก็ตามการเพิ่มหน่วยแยกตะกอนขั้นต้นเป็นการลดอัตราการอุดตันและลดปริมาณน้ำล้างย้อนของ Drum filter (Davidson และ Summerfelt, 2004) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาความเป็นไปได้สำหรับการทำให้ตะกอนลอย (Flotation) สำหรับการแยกตะกอน เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวอาจทำให้ตะกอนมีขนาดใหญ่ขึ้น จึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกรองในกระบวนการแยกตะกอนขั้นที่สองได้ดี (Schumann และคณะ, 2016)

### 2.9.2 การปรับปรุงพื้นผิววัสดุเพื่อป้องกันการยึดเกาะของฟิล์มชีวภาพ

ฟิล์มชีวภาพเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลให้เกิดการอุดตันทางชีวภาพ (Biofouling) บนพื้นผิว (Flemming, 2003) เมื่อวัสดุรองรับมีการสะสมของฟิล์มชีวภาพจะส่งผลให้ช่องกรองมีขนาดเล็กลง จึงทำให้อุณหภูมิของแข็งเข้าไปอุดตันได้ง่าย การแก้ปัญหาจากการยึดเกาะ (Adhesion) ของฟิล์มชีวภาพต้องใช้กลไกทางกายภาพต่างๆ เช่น การขัดหรือใช้แรงดันน้ำเพื่อทำความสะอาด หรือกลไกทางเคมี เช่น การใช้สารเคมีเพื่อยับยั้งหรือกำจัดฟิล์มชีวภาพ ทั้งนี้กลไกดังกล่าวทำให้ต้องหยุดการเดินระบบกรองน้ำซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำ ดังนั้นการป้องกันการเกิดฟิล์มชีวภาพจึงเป็นตัวเลือกที่ได้รับความนิยมมากขึ้นในปัจจุบัน อย่างไรก็ตามการป้องกันการเกิดฟิล์มชีวภาพก็มีหลายแนวทางที่ต้องพิจารณาเลือกใช้ตามความเหมาะสม เนื่องจากการเกิดฟิล์มชีวภาพขึ้นกับปัจจัยหลายด้าน จากงานวิจัยของ Schaer และคณะ (2012) พบว่าการเคลือบพื้นผิววัสดุให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำช่วยยับยั้งการยึดเกาะของฟิล์มชีวภาพได้ รวมทั้งงานวิจัยของ Türetgen (2014) ที่ทำการศึกษาการเคลือบพื้นผิวของผนังหอหล่อเย็น (Cooling tower) ด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโนเพื่อปรับปรุงให้พื้นผิวมีสมบัติความไม่ชอบน้ำ เมื่อเดินระบบน้ำหล่อเย็นเป็นเวลา 6 เดือน พบว่าหอหล่อเย็นที่มีการ

เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโนมีปริมาณฟิล์มชีวภาพโดยคิดจากจำนวนเซลล์แบคทีเรียลดลงถึง 10,000 เท่า อีกทั้งยังมีรายงานที่ระบุว่า การปรับปรุงพื้นผิวให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดจะส่งเสริมความสามารถในการลดการยึดเกาะของฟิล์มชีวภาพมากขึ้น โดยที่การปรับปรุงพื้นผิววัสดุให้มีสมบัติดังกล่าวก็สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การสร้างพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำยิ่งยวดด้วยกระบวนการโซล-เจล จัดเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในปัจจุบันเนื่องจากทำได้ง่ายและต้นทุนต่ำ (Hench และ West, 1990) นอกจากนี้ยังมีวิธีการสังเคราะห์เชิงเคมี (Chemical Deposition) โดยงานวิจัยของ Gao และคณะ (2013) สามารถปรับปรุงพื้นผิวให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดโดยมีค่ามุมสัมผัสเท่ากับ  $163.7 \pm 2.9$  องศา และงานวิจัยของ Zhang และคณะ (2013) ศึกษาการสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$  Nanotube) ลงบนพื้นผิวเพื่อปรับปรุงให้พื้นผิวมีสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวด ซึ่งสามารถวัดค่ามุมสัมผัสได้ 156 องศา ส่งผลให้แรงยึดเกาะระหว่างแบคทีเรียและพื้นผิววัสดุลดลง (Genzer และ Efimenko, 2006) ในทางตรงกันข้ามงานวิจัยของ Zhong และคณะ (2013) และ Oliveira และคณะ (2001) พบว่าฟิล์มชีวภาพสามารถยึดเกาะบนพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำได้ดีกว่าพื้นผิวที่ชอบน้ำ

นอกจากกลไกทางกายภาพที่ช่วยป้องกันการยึดเกาะของฟิล์มชีวภาพได้แล้ว ยังมีกลไกทางเคมีที่สามารถยับยั้งการเกิดฟิล์มชีวภาพได้เช่นกัน โดยจากงานวิจัยของ Shanks และคณะ (2006) ได้ศึกษาผลของไซเตียมซีเตรทต่อการเกิดฟิล์มชีวภาพ พบว่าไซเตียมซีเตรทเข้มข้นอย่างน้อยร้อยละ 0.5 สามารถยับยั้งการเกิดฟิล์มชีวภาพได้ จากสมบัติดังกล่าวทำให้เกิดงานวิจัยที่พยายามนำไซเตียมซีเตรทมาประยุกต์ใช้เพื่อป้องกันและลดปริมาณการเกิดฟิล์มชีวภาพ เช่นงานวิจัยของ Zhang และคณะ (2004) ที่ทำการแทรกไซเตรทไอออนระหว่างชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์โดยวิธีการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation) จากการวิเคราะห์ชั้นอินเทอร์เลเยอร์ซึ่งมีการแทรกตัวของไซเตรทไอออนด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์พบว่าชั้นดังกล่าวมีความกว้าง 11.8 อังสตรอม ซึ่งใกล้เคียงกันกับงานวิจัยของ Meyn และคณะ (1990) และงานวิจัยของ Tronto และคณะ (2004) ได้ทำการวิเคราะห์ความกว้างของชั้นอินเทอร์เลเยอร์ที่มีการแทรกตัวของไซเตรทไอออนได้ 12.2 และ 12.0 อังสตรอม ตามลำดับ ทั้งนี้เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์สามารถสังเคราะห์ลงบนวัสดุที่เป็นโลหะได้ (Hibino และ Ohya, 2009) งานวิจัยนี้จึงได้อาศัยหลักการข้างต้นมาประยุกต์ใช้โดยการสังเคราะห์

ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่แทรกด้วยซิเตรทไอออนลงบนพื้นผิวตะแกรงสำหรับกรองน้ำเสียจากระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อป้องกันการก่อตัวของฟิล์มชีวภาพ

### 2.9.3 การวิเคราะห์ฟิล์มชีวภาพ

ฟิล์มชีวภาพมีทั้งที่อยู่ในลักษณะแขวนลอยและที่ยึดเกาะอยู่กับพื้นผิววัสดุ ทั้งนี้การวิเคราะห์การเกิดฟิล์มชีวภาพจึงมีวิธีที่แตกต่างกันออกไป จากงานวิจัยของ Ryu และคณะ (2004) และงานวิจัยของ Kim และคณะ (2006) ได้ศึกษาการเกิดฟิล์มชีวภาพบนพื้นผิวสแตนเลส จากนั้นได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณฟิล์มชีวภาพโดยการสกัดกลุ่มเซลล์จุลชีพที่ยึดเกาะอยู่บนพื้นผิวสแตนเลสด้วยสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ซาลีน (Phosphate Buffer Saline) และนับเซลล์ใต้กล้องจุลทรรศน์โดยคิดเป็นจำนวนเซลล์ต่อพื้นผิวทั้งหมดของวัสดุ ซึ่งวิธีนี้นิยมใช้กันมากสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณฟิล์มชีวภาพที่ยึดเกาะบนพื้นผิวที่เป็นโลหะ ในบางครั้งอาจพบว่ามีการใช้เทคนิคการถ่ายภาพที่กำลังขยายสูงควบคู่กับการนับจำนวนเซลล์ เพื่อให้ข้อมูลมีความเชื่อถือมากขึ้น เช่น งานวิจัยของ Arnold และ Bailey (2001) ซึ่งศึกษาการเกิดฟิล์มชีวภาพบนพื้นผิวสแตนเลส และพบว่าปริมาณฟิล์มชีวภาพที่วิเคราะห์โดยการนับจำนวนเซลล์มีความสอดคล้องกันกับภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด นอกจากนี้ยังมีการเทคนิคการถ่ายภาพ 3 มิติด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอลเพื่อใช้วิเคราะห์ลักษณะการเกิดฟิล์มชีวภาพรวมกันกับภาพถ่าย 2 มิติจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ด้วยเทคนิคนี้ทำให้ทราบถึงความหนาของชั้นฟิล์มชีวภาพซึ่งใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวและความหนาแน่นในการเกิดฟิล์มชีวภาพแต่ละบริเวณบนพื้นผิววัสดุได้ (Lattif และคณะ, 2009) ทั้งนี้ยังมีวิธีการวิเคราะห์ฟิล์มชีวภาพทางอ้อม เช่น การวิเคราะห์โดยเทียบจากปริมาณสารโพลีเมอร์ที่เกิดจากฟิล์มชีวภาพหรือ EPS ซึ่งในการสกัดสาร EPS ก็ทำได้หลายวิธี เช่น จากงานวิจัยของ Liang และคณะ (2010) ทำการเปรียบเทียบวิธีการสกัดสาร EPS จากฟิล์มชีวภาพในตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสีย โดยประกอบด้วยวิธีการต่างๆ ได้แก่ การสกัดโดยใช้สาร EDTA การสกัดโดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เทคนิคการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยเรซิน และการสกัดด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง และจากผลการทดลองพบว่า การสกัดโดยใช้สารละลาย EDTA และการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงสามารถสกัดได้ปริมาณฟิล์มชีวภาพสูงกว่าวิธีอื่น แต่จากงานวิจัยของ Jachlewski และคณะ (2015) ซึ่งศึกษาการสกัดสาร EPS จากฟิล์มชีวภาพโดยใช้วิธีการต่างๆ ได้แก่ การสกัดด้วยการกวนในสารเคมี (EDTA, โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ Crown ether) การเขย่าโดยใช้สารละลายฟอสเฟต

บัพเฟอร์ชาลิน และการใช้เรซินเพื่อแลกเปลี่ยนไอออน โดยผลการทดลองพบว่าการใช้เรซินในการแลกเปลี่ยนไอออนในการสกัดสาร EPS เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกว่าวิธีอื่น ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่าชนิดของจุลชีพ แหล่งที่อยู่หรือลักษณะตัวอย่างมีผลต่อการเลือกใช้เทคนิคในการสกัดสาร EPS (Aguilera และคณะ, 2008) (Aguilera และคณะ, 2008) เพื่อวิเคราะห์ปริมาณฟิล์มชีวภาพ และควรวเคราะห์ด้วยวิธีที่หลากหลายสำหรับการเปรียบเทียบและพิจารณาเพื่อผลการทดลองที่น่าเชื่อถือ





## บทที่ 3

### การดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 แผนการทดลอง

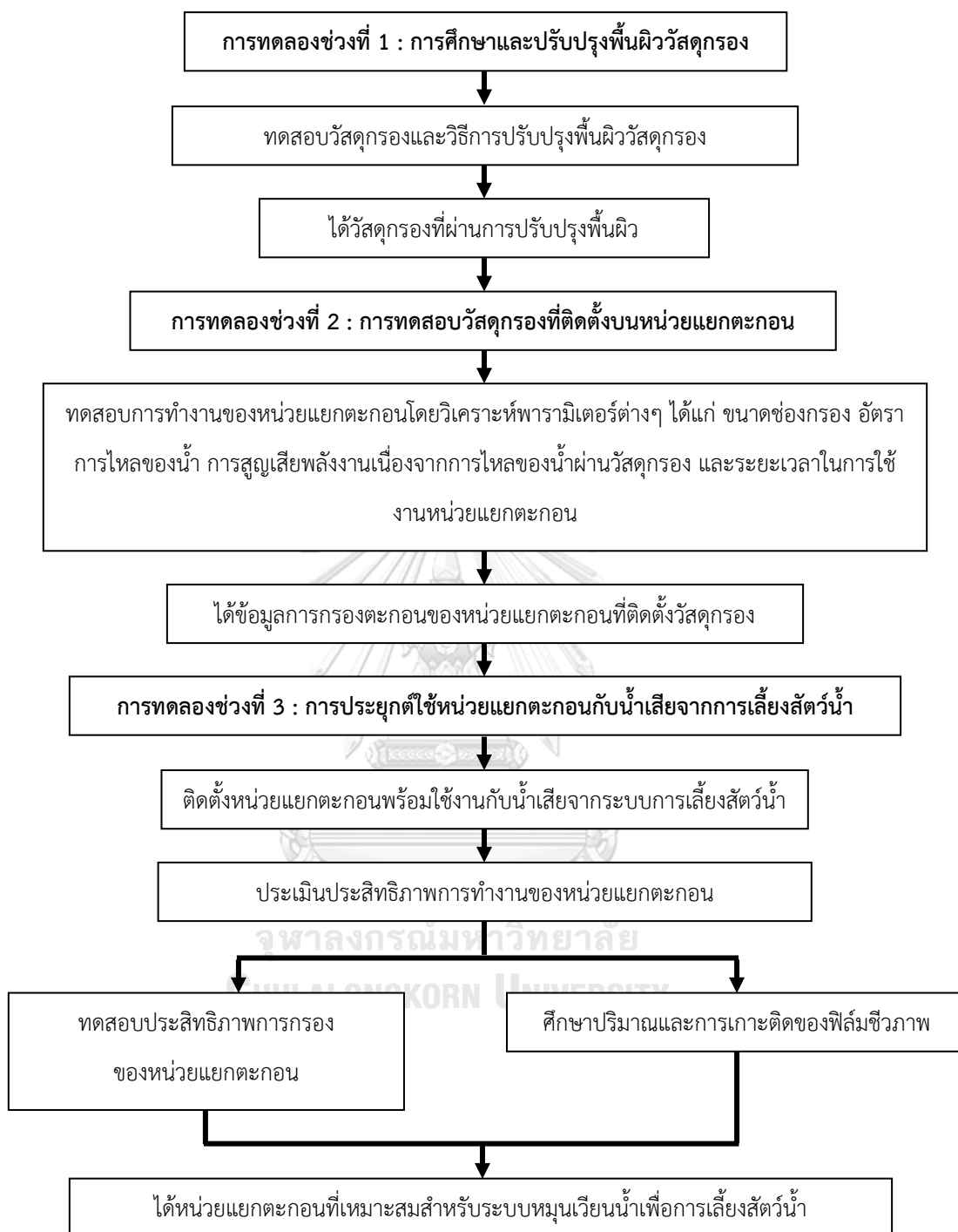
งานวิจัยนี้เป็นการทดลองระดับปฏิบัติการ ดำเนินการ ณ อุณหภูมิ 25 °ซ ที่ห้องปฏิบัติการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และห้องปฏิบัติการโครงสร้างนาโนไฮบริดและนาโนคอมพอสิต ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (นาโนเทค) โดยมีเป้าหมายเพื่อการพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของหน่วยแยกตะกอน ด้วยการปรับปรุงพื้นผิววัสดุกรองด้วยนาโนเทคโนโลยีให้มีสมบัติที่ป้องกันการยึดเกาะเพื่อสร้างฟิล์มชีวภาพของจุลชีพในระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยดำเนินการ 2 แนวทาง ได้แก่ การปรับปรุงพื้นผิวตะแกรงโลหะให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวด และการเคลือบพื้นผิวตะแกรงโลหะด้วยสารเคมีที่ออกฤทธิ์ยับยั้งการเกิดฟิล์มชีวภาพ แบ่งงานวิจัยออกเป็น 3 ช่วงการทดลองดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 3.1 มีรายละเอียดดังนี้

การทดลองช่วงที่ 1 ทำการปรับปรุงพื้นผิวตะแกรงโลหะด้วยวิธีสังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และการพ่นเคลือบด้วยวัสดุขนาดนาโน เปรียบเทียบกันระหว่างชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่แทรกด้วยสเต็มไฮดรอกไซด์ เพื่อเพิ่มความไม่ชอบน้ำให้กับพื้นผิวตะแกรง (Zhang และคณะ, 2008) และชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่แทรกด้วยซิเตรทไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นสารเคมีที่ออกฤทธิ์ยับยั้งการเกิดฟิล์มชีวภาพ (Shanks และคณะ, 2006) ส่วนวิธีการพ่นเคลือบพื้นผิวตะแกรงด้วยวัสดุขนาดนาโนเป็นการพ่นเคลือบด้วยสารละลาย Silica Nanoparticles เพื่อเพิ่มความไม่ชอบน้ำให้กับพื้นผิวตะแกรง (Türetgen, 2015) ดังแผนภาพรูปที่ 3.2

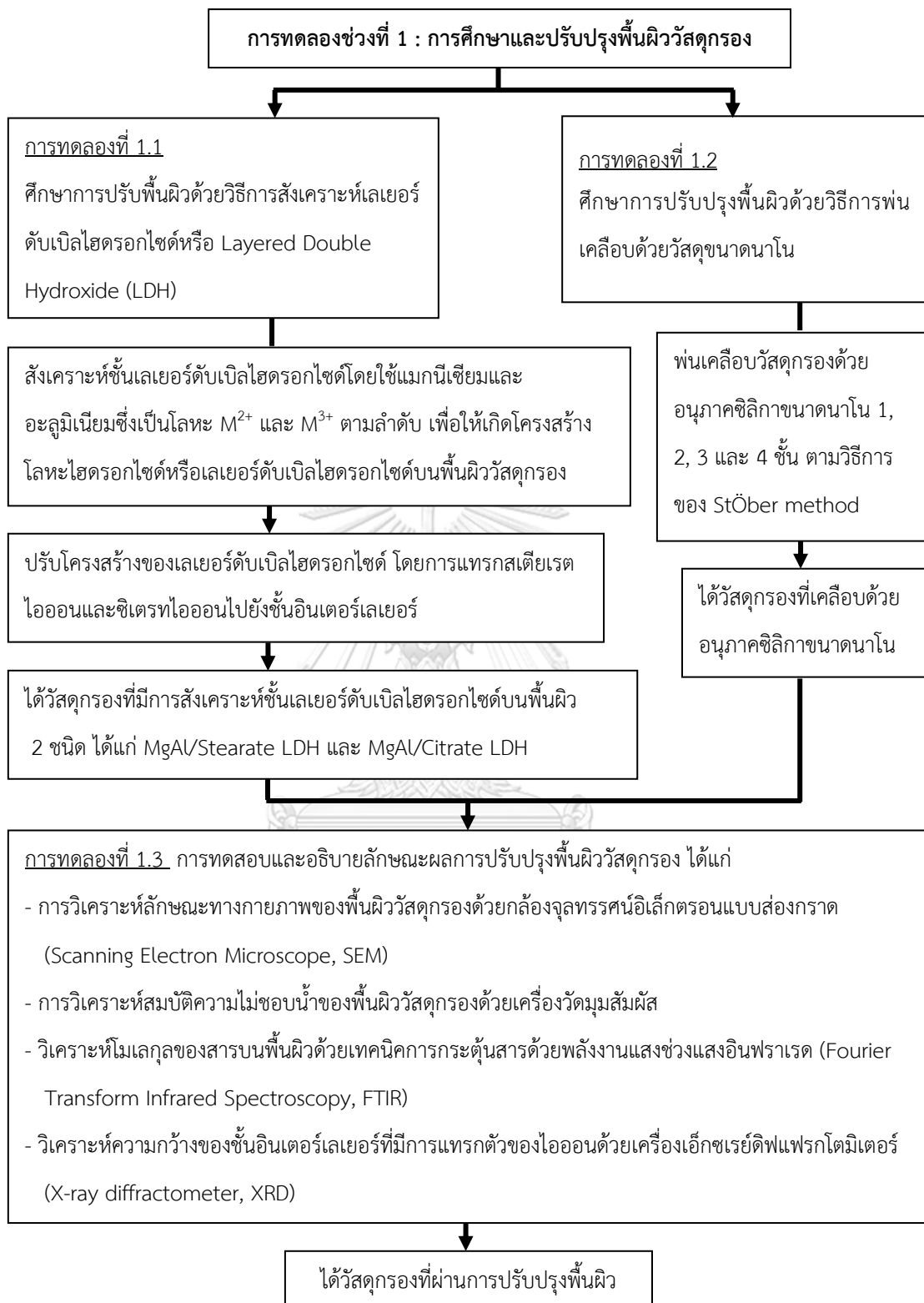
การทดลองช่วงที่ 2 ติดตั้งตะแกรงโลหะที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวเข้าหน่วยแยกตะกอน และทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของหน่วยแยกตะกอนดังกล่าว เพื่อหาขนาดช่องกรอง พลังงานสูญเสียที่เกิดจากวัสดุกรอง และระยะเวลาในการใช้งานหน่วยแยกตะกอนที่เหมาะสม ดังแผนภาพรูปที่ 3.3

การทดลองช่วงที่ 3 การประยุกต์ใช้หน่วยแยกตะกอนที่ติดตั้งตะแกรงโลหะที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว  
กับน้ำเสียจากการเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยแบ่งออกเป็น 2 การทดลองย่อยได้แก่ การทดสอบประสิทธิภาพ  
ของหน่วยแยกตะกอน และศึกษาผลจากการปรับปรุงพื้นผิวตะแกรงกรองต่อปริมาณการเกาะติดของ  
ฟิล์มอินทรีย์ ดังแผนภาพรูปที่ 3.4

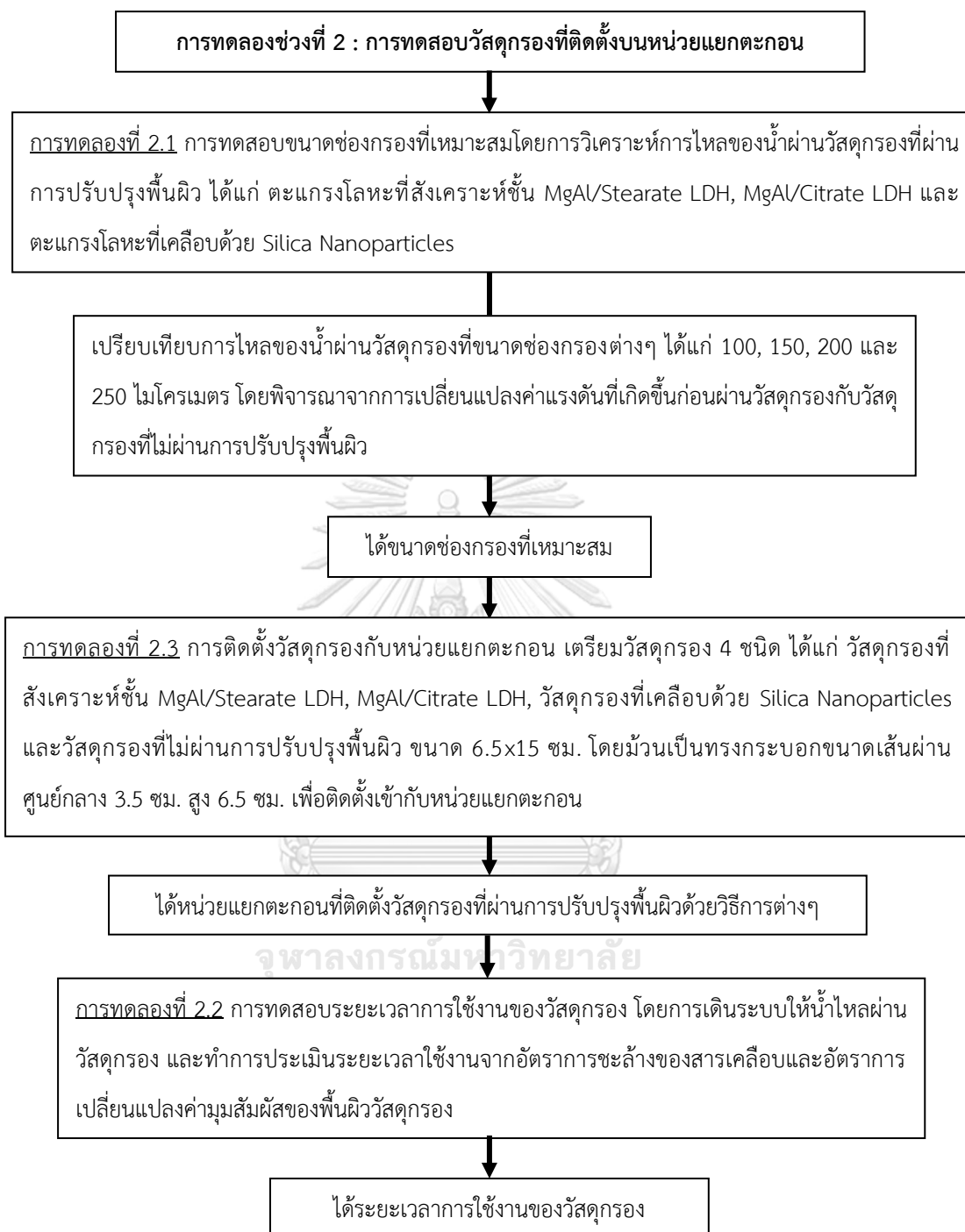




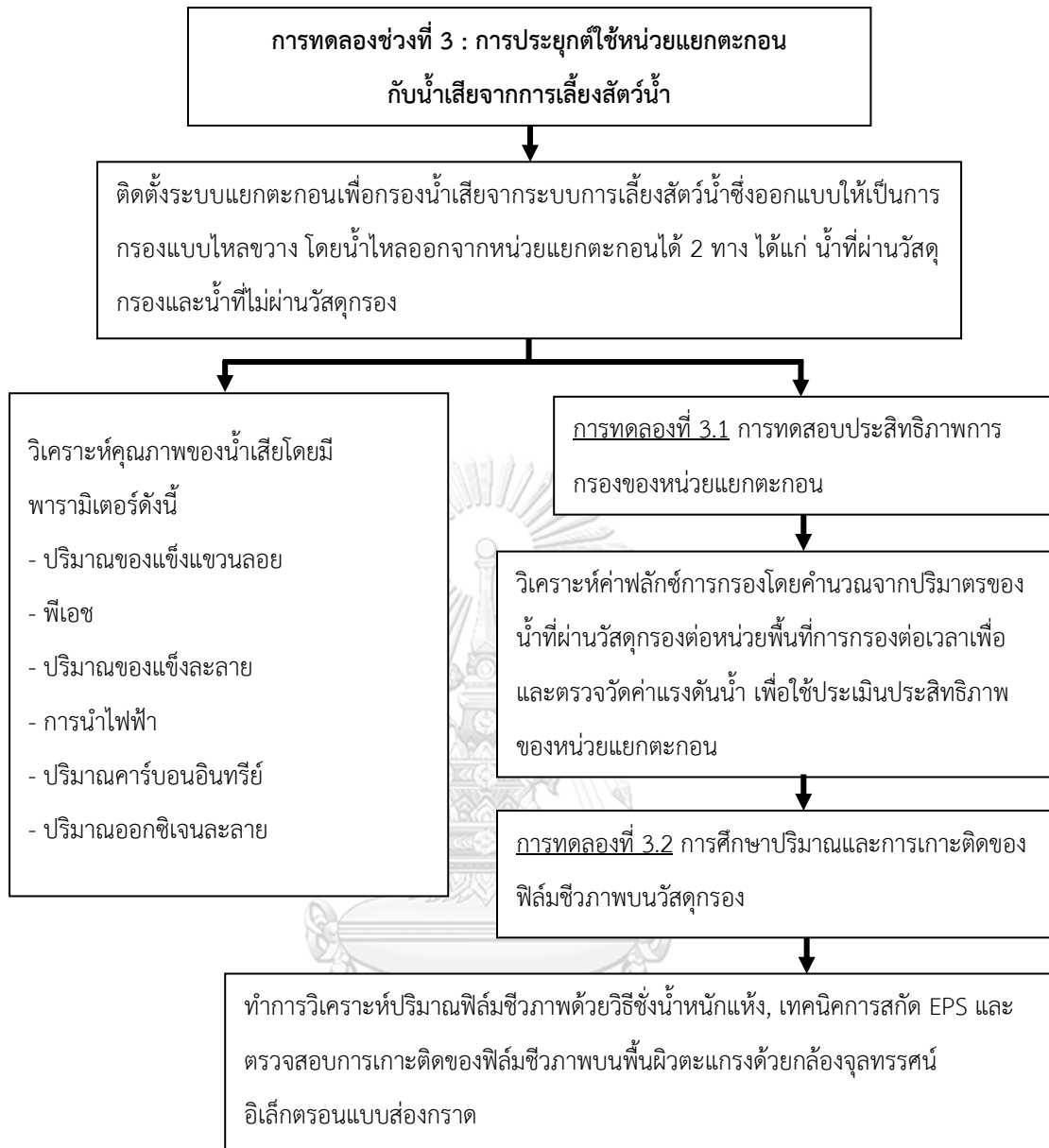
รูปที่ 3.1 แผนการทดลองรวมของงานวิจัย



รูปที่ 3.2 แผนการทดลองช่วงที่ 1



รูปที่ 3.3 แผนการทดลองช่วงที่ 2



รูปที่ 3.4 แผนการทดลองช่วงที่ 3

### 3.2 การดำเนินการทดลอง

#### การทดลองช่วงที่ 1 ศึกษาและปรับปรุงพื้นผิววัสดุกรอง

ทำการปรับปรุงพื้นผิววัสดุกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องกรองต่างกัน 4 ขนาด ได้แก่ 100, 150, 200 และ 250 ไมโครเมตร (Mesh number: 150, 100, 80 และ 60 ตามลำดับ) ทั้งนี้การปรับปรุงพื้นผิวดำเนินการ 2 วิธี ได้แก่ การเกาะติดด้วยชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ และการพ่นเคลือบด้วยวัสดุขนาดนาโน โดยแบ่งเป็น 3 การทดลองย่อยดังนี้

##### การทดลองที่ 1.1 การสังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์

ทำการสังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์โดยใช้แมกนีเซียมและอะลูมิเนียมซึ่งเป็นโลหะ  $M^{2+}$  และ  $M^{3+}$  ตามลำดับ เพื่อทำปฏิกิริยาให้ได้โครงสร้างของชั้นโลหะไฮดรอกไซด์ ( $MgAl$  LDH) บนตะแกรงสแตนเลส จากนั้นทำการแทรก (Intercalation) ด้วยไอออนที่แตกต่างกัน 2 ชนิดระหว่างชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์หรืออินเตอร์เลเยอร์ (Interlayer) ได้แก่ สเตียเรตไอออน (Stearate ion) ซึ่งสามารถปรับปรุงพื้นผิวตะแกรงให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ (Zhang และคณะ, 2008) และซิเตรตไอออน (Citrate ion) ซึ่งเป็นสารเคมีที่ออกฤทธิ์ยับยั้งการเกิดฟิล์มชีวภาพ (Shanks และคณะ, 2006) โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

- 1) แช่ตะแกรงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดเหล็กออกไซด์บนพื้นผิวตะแกรงและทิ้งไว้ให้แห้ง
- 2) แช่ตะแกรงในสารละลายอะลูมิเนียมคลอไรด์เข้มข้น 1 โมลาร์ เป็นเวลา 4-6 ชม. เพื่อให้เกิดสภาวะอิ่มตัวด้วยอะลูมิเนียมไอออนในระบบ
- 3) เตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ซึ่งเป็นสารผสมระหว่างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ และโซเดียมคาร์บอเนตเข้มข้น 1 โมลาร์ ที่อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร เพื่อปรับพีเอชให้เท่ากับ 10 ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาให้เกิดโครงสร้างเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์

4) เติมสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์เข้มข้น 1 โมลาร์ โดยควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 1.5 มล./นาที่ ขณะเดียวกันก็เติมสารละลายบัฟเฟอร์ที่อัตราการไหล 3 มล./นาที่ ทั้งนี้ต้องควบคุมปริมาณสารละลายอะลูมิเนียมคลอไรด์ สารละลายบัฟเฟอร์ และสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ที่ใช้ในการทดลองให้มีอัตราส่วนเท่ากับ 1 ต่อ 8 ต่อ 3 โดยปริมาตร

5) เมื่อเติมสารละลายจนครบปริมาณที่กำหนดแล้ว จึงนำไปกวนผสมเป็นเวลา 24 ชม. จากนั้นล้างตะแกรงด้วยน้ำกลั่นจนพีเอชมีค่าอยู่ในช่วง 5.5-6 และล้างอีกครั้งด้วยเอทานอล ทิ้งไว้ให้แห้งและหลีกเลี่ยงการปนเปื้อนจากฝุ่นละอองในอากาศอย่างน้อย 1 วัน จะได้ตะแกรงที่มีการสังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์หรือ MgAl LDH บนพื้นผิว

6) กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) ประกอบด้วย 2 แนวทาง ได้แก่ การแลกเปลี่ยนไอออนด้วยสเตรตและการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยซิเตรทไอออน เข้าไประหว่างชั้น MgAl LDH ที่สังเคราะห์อยู่บนตะแกรง ทั้งนี้กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนจะทำการทดลอง 3 วิธี เพื่อให้ได้วิธีการที่มีประสิทธิภาพและมีความคุ้มค่ากับการปรับปรุงพื้นผิวมากที่สุด ดังนี้

6.1) กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน ณ อุณหภูมิห้อง โดยแบ่งตะแกรงที่สังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ออกเป็นสองส่วน ส่วนที่หนึ่งแช่ในสารละลายกรดสเตริกเข้มข้น 0.01 โมลาร์ และส่วนที่สองแช่ในสารละลายกรดซิเตริกเข้มข้น 2.25 โมลาร์ โดยควบคุมให้อยู่ในระบบปิดทั้งสองการทดลอง ปล่อยให้ทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 24 ชม. จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นและทิ้งไว้ให้แห้งจะได้ตะแกรงที่สังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์โดยแทรกด้วยสเตรตไอออน (MgAl/Stearate LDH) และตะแกรงที่สังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์โดยแทรกด้วยซิเตรทไอออน (MgAl/Citrate LDH) บนพื้นผิว

6.2) กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนที่อุณหภูมิ 60 °ซ โดยแบ่งตะแกรงที่สังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ออกเป็นสองส่วน ส่วนที่หนึ่งแช่ในสารละลายกรดสเตริกเข้มข้น 0.01 โมลาร์ และส่วนที่สองแช่ในสารละลายกรดซิเตริกเข้มข้น 2.25 โมลาร์ ทำการควบคุมอุณหภูมิของสารละลายที่ 60 °ซ ด้วยเครื่องกวนสารให้ความร้อน ปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 24 ชม. จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นและทิ้งไว้ให้แห้ง



6.3) กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนในสถานะแรงดันสูง โดยแบ่งตะแกรงที่สังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ออกเป็นสองส่วน ส่วนที่หนึ่งแช่ในสารละลายกรดสแตียริกเข้มข้น 0.01 โมลาร์ และส่วนที่สองแช่ในสารละลายกรดซिटริกเข้มข้น 2.25 โมลาร์ ซึ่งสารละลายทั้งสองชนิดบรรจุอยู่ในภาชนะรับแรงดันไอ (Hydrothermal Synthesis Autoclave Reactor) เพื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °ซ เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้อุณหภูมิลดลงถึงอุณหภูมิห้อง ล้างด้วยน้ำกลั่นและทิ้งไว้ให้แห้ง

7) ทำการวิเคราะห์ปริมาณสแตียเรตและซิทริกจากสารละลายที่เหลือจากกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนและน้ำกลั่นที่ผ่านการล้างตะแกรง ด้วยเครื่อง HPLC (High Performance Liquid Chromatography) สำหรับใช้ในการคำนวณหาปริมาณไอออนที่แทรกในชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์

#### การทดลองที่ 1.2 การพ่นเคลือบด้วยวัสดุขนาดนาโนหรือ Nanoparticles Spray Coating

การทดลองนี้เป็นการพ่นเคลือบโดยใช้สารละลายซิลิกาหรือ Silica Nanoparticles เป็นสารตั้งต้น เพื่อเพิ่มสมบัติความไม่ชอบน้ำให้กับพื้นผิวตะแกรง (Türetgen, 2015) โดยอ้างอิงหลักการและวิธีการทดลองจาก StÖber method (Stober และ Fink, 1967) มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1) พ่นสารละลายซิลิกาความเข้มข้น 0.1–0.3 โมลาร์ด้วยเครื่องพ่นเคลือบที่ติดตั้งหัวพ่นรูปใบพัด (Flat fan nozzle) โดยกำหนดระยะห่างจากเครื่องพ่นเคลือบถึงตะแกรงในแนวตั้ง 20 ซม. และควบคุมอัตราการพ่นที่ 2 มล./วินาที

2) อบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 110 °ซ เป็นเวลา 30 นาที ทิ้งไว้ให้อุณหภูมิลดลงถึงอุณหภูมิห้องและหลีกเลี่ยงการปนเปื้อนจากฝุ่นละอองในอากาศ

3) ทำการทดลองในข้อที่ 1) และ 2) ซ้ำเพื่อให้ได้จำนวนชั้นที่ 1, 2, 3 และ 4 ชั้น ของการเคลือบที่ต้องการ

### การทดลองที่ 1.3 การทดสอบและอธิบายลักษณะผลการปรับปรุงพื้นผิวตะแกรง

ทำการทดสอบและอธิบายลักษณะตะแกรงที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีการต่างๆ ได้แก่ การสังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่แทรกด้วยสเต็มเรตไอออน การสังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่แทรกด้วยซิเตรทไอออน และการพ่นเคลือบด้วยวัสดุขนาดนาโน โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### - การวิเคราะห์สมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวตะแกรง

วัดมุมสัมผัสด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัสของพื้นผิวตะแกรงโลหะที่ถูกปรับปรุงให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำสูงขึ้นด้วยวิธีการต่างๆ ได้แก่ การพ่นเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโน และการสังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่แทรกด้วยสเต็มเรตไอออน ทั้งนี้หากการปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีการดังกล่าวได้ผล มุมสัมผัสของตะแกรงที่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิวควรมีค่าสูงกว่าที่วัดได้จากตะแกรงที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว

#### - การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวตะแกรงจากภาพถ่าย

ถ่ายภาพลักษณะพื้นผิวตะแกรงที่กำลังขยายระดับสูงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เพื่อเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวตะแกรงก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีการต่างๆ ได้แก่ การพ่นเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโน การสังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่แทรกด้วยสเต็มเรตไอออน และการสังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่แทรกซิเตรทไอออน ทั้งนี้จากภาพถ่ายจะแสดงให้เห็นโครงสร้างของชั้นเคลือบของอนุภาคซิลิกาขนาดนาโนหรือชั้นของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่อยู่บนพื้นผิวของตะแกรง

#### - การวิเคราะห์โมเลกุลของสารบนพื้นผิวตะแกรงโลหะ

วิเคราะห์โมเลกุลของสารบนตะแกรงโลหะที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยการสังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่แทรกด้วยสเต็มเรตไอออนและการสังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่แทรกซิเตรทไอออน ด้วยเทคนิคการกระตุ้นสารด้วยพลังงานแสงช่วงแสงอินฟราเรด (Fourier

Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) ด้วยเทคนิคนี้จะแสดงให้เห็นหมู่ฟังก์ชันหรือโมเลกุลของสารที่ใช้สังเคราะห์ลงบนพื้นผิวตะแกรง ได้แก่ หมู่ฟังก์ชันของกรดสเตียริก หมู่ฟังก์ชันของกรดซิตริก และสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะแมกนีเซียมและอะลูมิเนียม

- การวิเคราะห์ไอออนที่แทรกตัวระหว่างชั้นของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์

ทำการวิเคราะห์การแทรกตัวของไอออนระหว่างชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์โดยใช้หลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer, XRD) โดยเทคนิคนี้สามารถวิเคราะห์โครงสร้างของชั้นวัสดุที่ใช้ปรับปรุงพื้นผิวและแสดงผลเป็นค่าความกว้างของอินเตอร์เลเยอร์ซึ่งเป็นชั้นที่มีการแทรกตัวของไอออน ซึ่งความกว้างของชั้นดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับชนิดของไอออน ทำให้ทราบค่าความกว้างของชั้นอินเตอร์เลเยอร์ซึ่งใช้วิเคราะห์การแทรกตัวของไอออนต่างๆ ได้แก่ สเตียเรตไอออน และซิเตรทไอออน ในชั้นอินเตอร์เลเยอร์ของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรในการทดลองช่วงที่ 1

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ขนาดช่องกรอง	- 100, 150, 200 และ 250 ไมโครเมตร
รูปแบบการปรับปรุงพื้นผิวตะแกรง	- การสังเคราะห์เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และการพ่นเคลือบด้วยอนุภาคขนาดนาโน
ชนิดของไอออนที่แทรกตัวระหว่างเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์	- สเตียเรตไอออนและซิเตรทไอออน
จำนวนชั้นการพ่นเคลือบด้วย Silica nanoparticles	- 1, 2, 3 และ 4 ชั้น
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ชนิดของวัสดุกรอง	- สเตนเลส T-304
ความเข้มข้นของแมกนีเซียมคลอไรด์	- 1 โมลาร์
ความเข้มข้นของกรดสเตียริก	- 0.01 โมลาร์
ความเข้มข้นของกรดซิตริก	- 2.25 โมลาร์
ความเข้มข้นของสารละลายซิลิกา	- 0.1–0.3 โมลาร์
อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล	- 100 °ซ
ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล	- 30 นาที
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์
ลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวตะแกรง	- มุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับพื้นผิวตะแกรง - ลักษณะพื้นผิวตะแกรงจากการส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด - องค์ประกอบของพื้นผิวตะแกรง

ตารางที่ 3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลองช่วงที่ 1

กระบวนการ	เครื่องมือและอุปกรณ์	สารเคมี
การสังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ ดับเบิลไฮดรอกไซด์	- ตะแกรงสแตนเลส - กรวยแยกสาร - เครื่องกวนสาร - เครื่องวัดพีเอช - ภาชนะรับแรงดันไอ - ตู้อบความร้อน	- โซเดียมไฮดรอกไซด์ - อะลูมิเนียมคลอไรด์ - โซเดียมคาร์บอเนต - แมกนีเซียมคลอไรด์ - เอทานอล - ไดมethylฟอร์มมาไมด์ - กรดสตีริก - กรดซิตริก
การพ่นเคลือบด้วยวัสดุ ขนาดนาโน	- ตะแกรงสแตนเลส - เครื่องพ่นเคลือบ - ตู้อบความร้อน	- ซิลิกอนไดออกไซด์
การทดสอบผลการ ปรับปรุงพื้นผิวตะแกรง	- เทปคาร์บอนไฟเบอร์ - กระจกสไลด์ - เครื่องวัดมุมสัมผัส - กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด - เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ - High Performance Liquid Chromatography	-

การทดลองช่วงที่ 2 การทดสอบตะแกรงที่ติดตั้งบนหน่วยแยกตะกอน

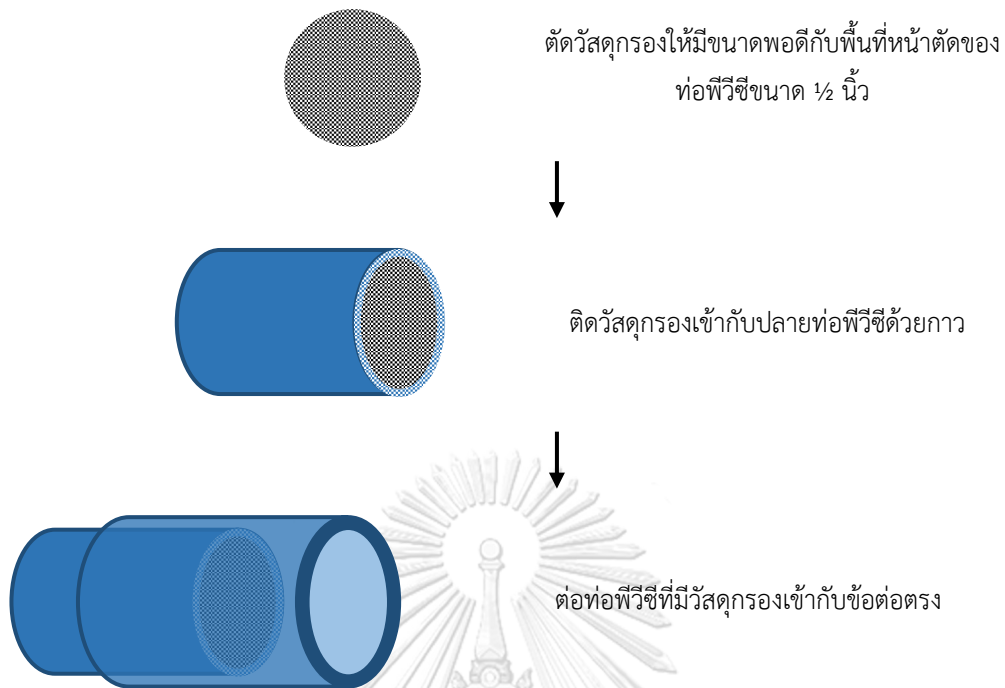
การทดลองนี้เป็นการทดสอบตะแกรงที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวจากการทดลองช่วงที่ 1 เพื่อหาขนาดช่องกรองที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน รวมทั้งทำการทดสอบสมบัติการยึดตัวของสารที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวเพื่อประเมินระยะเวลาการใช้งานของตะแกรง จากนั้นจึงทำการติดตั้งตะแกรงดังกล่าวเข้ากับหน่วยแยกตะกอน โดยแบ่งเป็น 3 การทดลองย่อยดังนี้

## การทดลองที่ 2.1 การทดสอบตะแกรงเพื่อหาขนาดช่องกรองที่เหมาะสมกับการใช้งาน

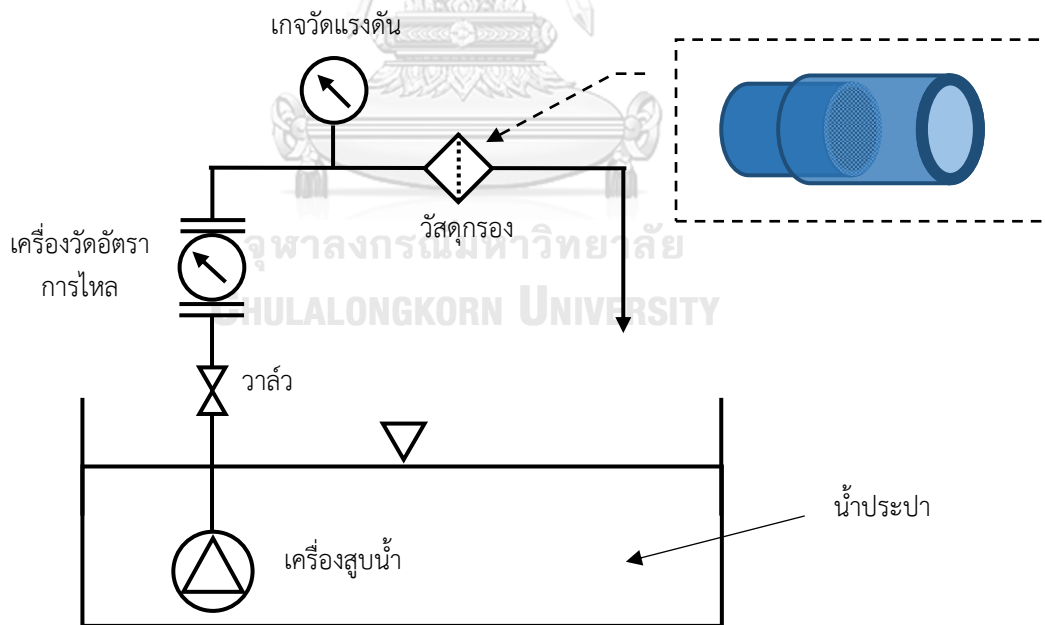
เตรียมตะแกรงที่มีขนาดช่องกรองแตกต่างกันซึ่งผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยแนวทางต่างๆ 4 ชนิด (ดังตารางที่ 3.3) มาทดสอบการไหลผ่านของน้ำ โดยตัดตะแกรงให้มีขนาดพอดีกับพื้นที่หน้าตัดของท่อพีวีซีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $\frac{1}{2}$  นิ้ว จากนั้นติดตั้งตะแกรงเข้ากับหน้าตัดท่อพีวีซีด้วยกาว และต่อเข้ากับข้อต่อตรงเพื่อทดสอบการไหลของน้ำดังรูปที่ 3.5 เดินระบบด้วยเครื่องสูบน้ำเพื่อเวียนน้ำผ่านตะแกรง ในสภาวะที่ควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วและเครื่องวัดอัตราการไหล (Flow meter) ของน้ำคั่งที่ จึงทำการตรวจวัดแรงดันน้ำก่อนผ่านตะแกรงด้วยเกจวัดแรงดัน (รูปที่ 3.6) เปรียบเทียบกับค่าแรงดันน้ำที่ทดสอบกับตะแกรงที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวที่ขนาดช่องกรองเดียวกัน (ทำซ้ำจำนวน 3 รอบต่อตะแกรง) ใช้ค่าที่ได้จากการทดลองในการวิเคราะห์ขนาดช่องกรองที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากขนาดช่องกรองที่เล็กที่สุดที่มีผลต่างของค่าแรงดันน้ำระหว่างตะแกรงที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยแนวทางต่างๆ กับตะแกรงที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวน้อยที่สุด

ตารางที่ 3.3 ตะแกรงที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว 4 ชนิด ที่มีขนาดช่องกรองแตกต่างกัน

วัสดุที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว	ขนาดช่องกรอง (ไมโครเมตร)			
	100	150	200	250
MgAl/Stearate LDH	ST-100	ST-150	ST-200	ST-250
MgAl/Citrate LDH	CT-100	CT-150	CT-200	CT-250
Silica Nanoparticles	SNP-100	SNP-150	SNP-200	SNP-250
ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิว	Control-100	Control-150	Control-200	Control-250



รูปที่ 3.5 การประกอบตะแกรงเข้ากับท่อน้ำเพื่อทดสอบการไหลผ่านของน้ำ



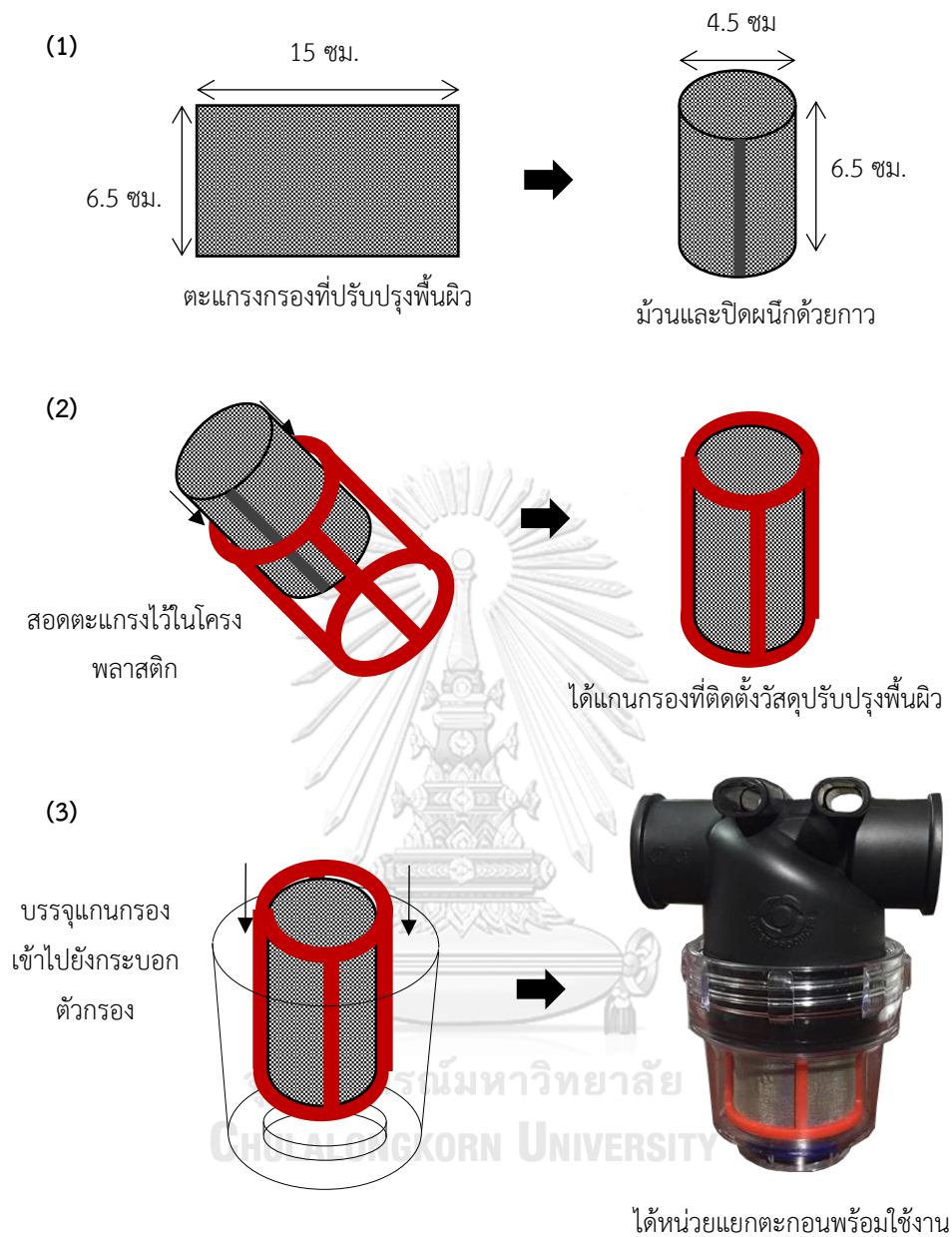
รูปที่ 3.6 การทดสอบการไหลของน้ำผ่านตะแกรง

## การทดลองที่ 2.2 การติดตั้งตะแกรงที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวกับหน่วยแยกตะกอน

เตรียมตะแกรงทั้ง 4 ชนิดที่ได้จากการทดลองช่วงที่ 2.1 ได้แก่ ตะแกรงที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ตะแกรงที่ปรับปรุงให้มีชั้น MgAl/Stearate LDH บนพื้นผิว ตะแกรงที่ปรับปรุงให้มีชั้น MgAl/Citrate LDH บนพื้นผิว และตะแกรงที่เคลือบด้วย Silica Nanoparticles ประกอบเข้ากับหน่วยแยกตะกอนที่ประยุกต์มาจากเครื่องกรองน้ำยี่ห้อ Super Product รุ่น MF-C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางน้ำเข้า ½ นิ้ว ตัวกรองดังกล่าวทำจากอะคริลิกใสทนแรงดันสูงสุด 3 บาร์ โดยมีขั้นตอนการติดตั้งตะแกรงกับหน่วยแยกตะกอนดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยทำการตัดวัสดุที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 6.5×15 ซม. ม้วนเป็นทรงกระบอกให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4.5 ซม. ปิดผนึกด้วยกาว จากนั้นสอดตะแกรงที่ม้วนเป็นทรงกระบอกเข้ากับโครงพลาสติก และนำตะแกรงที่สอดไว้ในโครงพลาสติกนั้นติดตั้งเข้ากับเครื่องกรองน้ำ จะได้หน่วยแยกตะกอนพร้อมใช้งาน





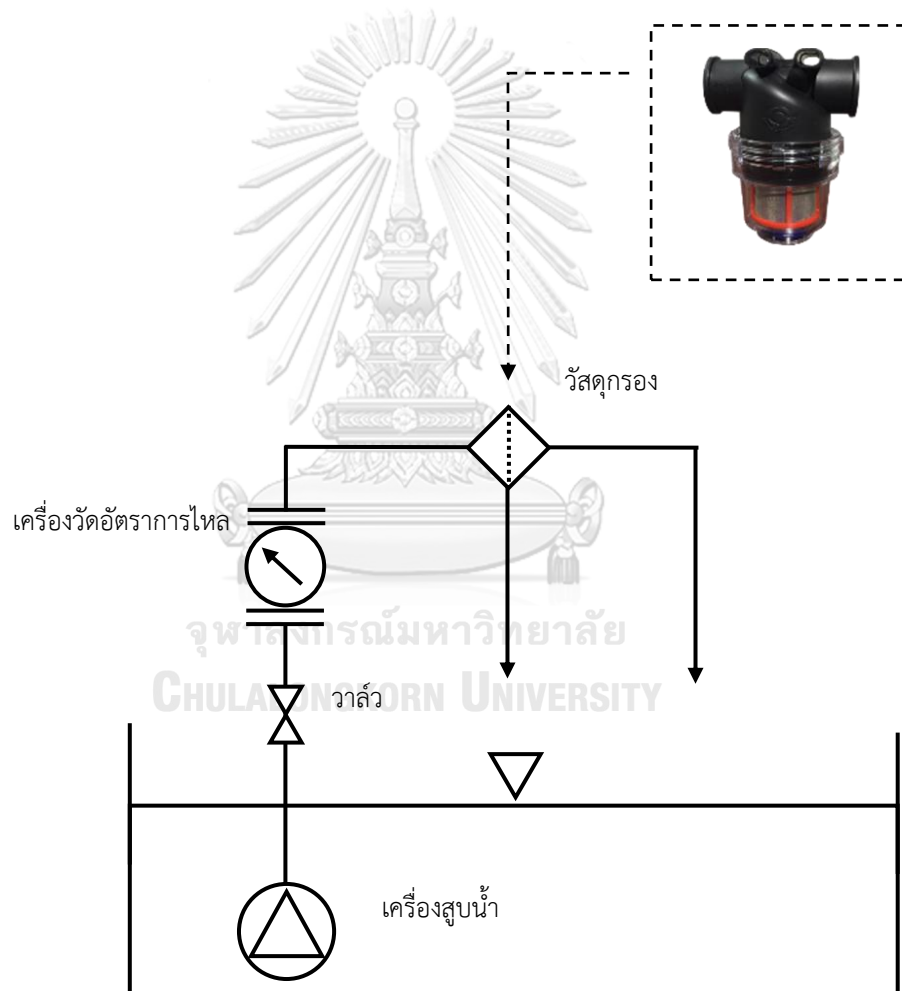


รูปที่ 3.7 การติดตั้งตะแกรงที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวกับหน่วยแยกตะกอน

### การทดลองที่ 2.3 การทดสอบตะแกรงเพื่อหาระยะเวลาการใช้งาน

การทดสอบตะแกรงเพื่อหาระยะเวลาในการใช้งานโดยการวิเคราะห์จากอัตราการชะล้างสารเคลือบและอัตราการเปลี่ยนแปลงค่ามัมสัมพัทธ์ของพื้นผิว ซึ่งจะทำให้การทดสอบด้วยตะแกรงที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวตามขนาดช่องกรองที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 1 โดยเดินระบบด้วยน้ำประปาตั้ง

รูปที่ 3.8 ด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 500 750 และ 1,000 ล./ชม. จากนั้นสู่มเก็บน้ำตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ปริมาณสเตียเรตและซีเตรทด้วยเครื่อง HPLC และวัดค่ามุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับพื้นผิวตะแกรงเพื่อทดสอบสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว จากนั้นพล็อตกราฟระหว่างความเข้มข้นของสารและค่ามุมสัมผัสต่อเวลาเพื่อคำนวณอัตราการชะล้างสารเคลือบบนพื้นผิวตะแกรงและอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่ามุมสัมผัสบนพื้นผิวตะแกรง เพื่อวิเคราะห์ระยะเวลาการใช้งานของตะแกรง นอกจากนี้ยังทำการตรวจวัดคุณภาพน้ำเพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ค่าการนำไฟฟ้า พีเอช และปริมาณของแข็งละลายน้ำ เป็นต้น เพื่อใช้สังเกตการเปลี่ยนแปลงในระบบระหว่างทำการทดลอง



รูปที่ 3.8 การทดสอบระยะเวลาการใช้งานของตะแกรง

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรในการทดสอบตะแกรงที่ติดตั้งบนหน่วยแยกตะกอน

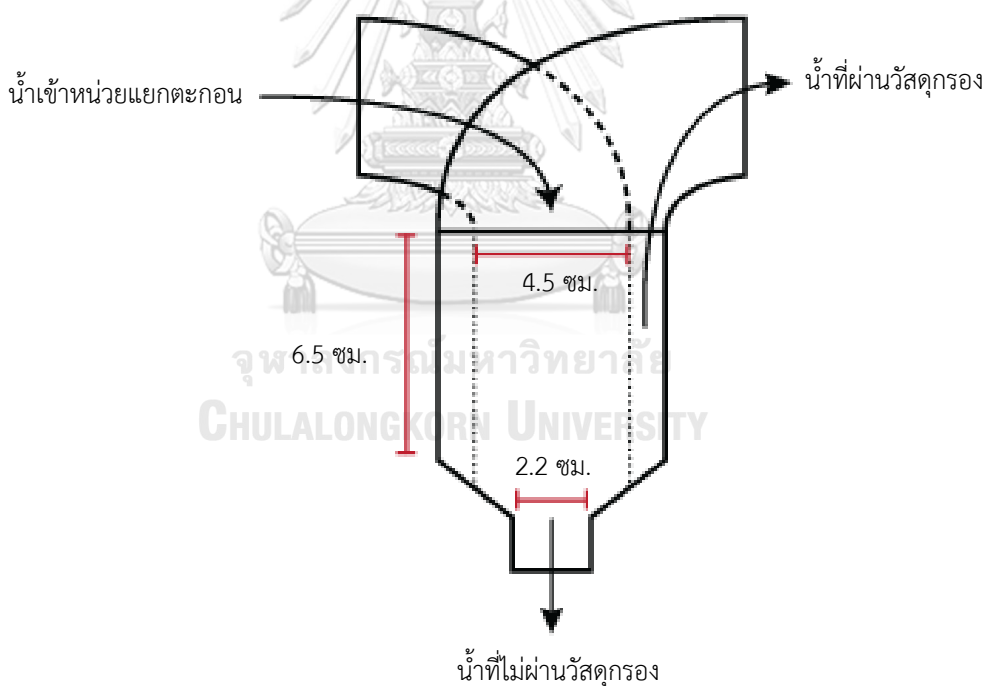
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตะแกรงสำหรับการทดลองที่ 2.1	- ตะแกรงที่ได้จากการทดลองช่วงที่ 1
ตะแกรงสำหรับการทดลองที่ 2.2	- ตะแกรงที่ได้จากการทดลองช่วงที่ 2.1
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
รูปแบบการกรอง	- กรองอัดตัว
อัตราการไหลของน้ำ	- 500, 750 และ 1,000 ล./ชม.
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ต้องการวิเคราะห์
ผลต่างของแรงดันน้ำ	- แรงดันน้ำ
ระยะเวลาการใช้งานตะแกรง	- ค่ามุมสัมผัส
คุณภาพน้ำ	- ปริมาณของแข็งละลาย - พีเอช - การนำไฟฟ้า - ปริมาณไอออน - ปริมาณสารประกอบอินทรีย์

ตารางที่ 3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองช่วงที่ 2

กระบวนการ	เครื่องมือและอุปกรณ์
การทดสอบตะแกรงเพื่อหาขนาดช่องกรอง	- ท่อพีวีซีขนาด ½ นิ้ว - เกจวัดความดัน
การทดสอบตะแกรงเพื่อหาระยะเวลาการใช้งาน	- เทปคาร์บอนไฟเบอร์ - กระจกสไลด์ - เครื่องวัดมุมสัมผัส - กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด - ท่อพีวีซีขนาด ½ นิ้ว
การวิเคราะห์คุณภาพน้ำ	- มัลติมิเตอร์ - High Performance Liquid Chromatography - Ion Chromatography
การติดตั้งหน่วยแยกตะกอน	- เครื่องกรองรูน MF-C - กาวทาสแตนเลส

### การทดลองช่วงที่ 3 การประยุกต์ใช้หน่วยแยกตะกอนกับน้ำเสียจากการเลี้ยงสัตว์น้ำ

นำหน่วยแยกตะกอนที่ติดตั้งตะแกรงซึ่งผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยแนวทางต่างๆ จากการทดลองช่วงที่ 2 จากการดัดแปลงเครื่องกรองน้ำยี่ห้อ Super Product รุ่น MF-C เพื่อใช้เป็นหน่วยแยกตะกอน โดยทำการเจาะรูเปิดด้านล่างของเครื่องกรองน้ำและเชื่อมต่อด้วยท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $\frac{1}{2}$  นิ้ว เพื่อควบคุมให้กลไกการกรองเป็นแบบไหลตามขวาง (Crossflow Filtration) ดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยน้ำเสียจากระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำจะไหลเข้าสู่หน่วยแยกตะกอนทางช่องน้ำเข้าด้านบน น้ำบางส่วนจะถูกกรองผ่านตะแกรงกรองที่ติดตั้งอยู่ภายในและไหลออกทางช่องระบายน้ำด้านบนในทิศทางตรงข้ามกับช่องน้ำเข้า ส่วนน้ำที่ไม่ผ่านการกรองจะถูกระบายออกทางด้านล่าง ทำการทดสอบประสิทธิภาพการกรองของหน่วยแยกตะกอนและวิเคราะห์ผลการปรับปรุงพื้นผิวตะแกรงที่ติดตั้งอยู่ในหน่วยแยกตะกอนตามแนวทางต่างๆ ดังนี้

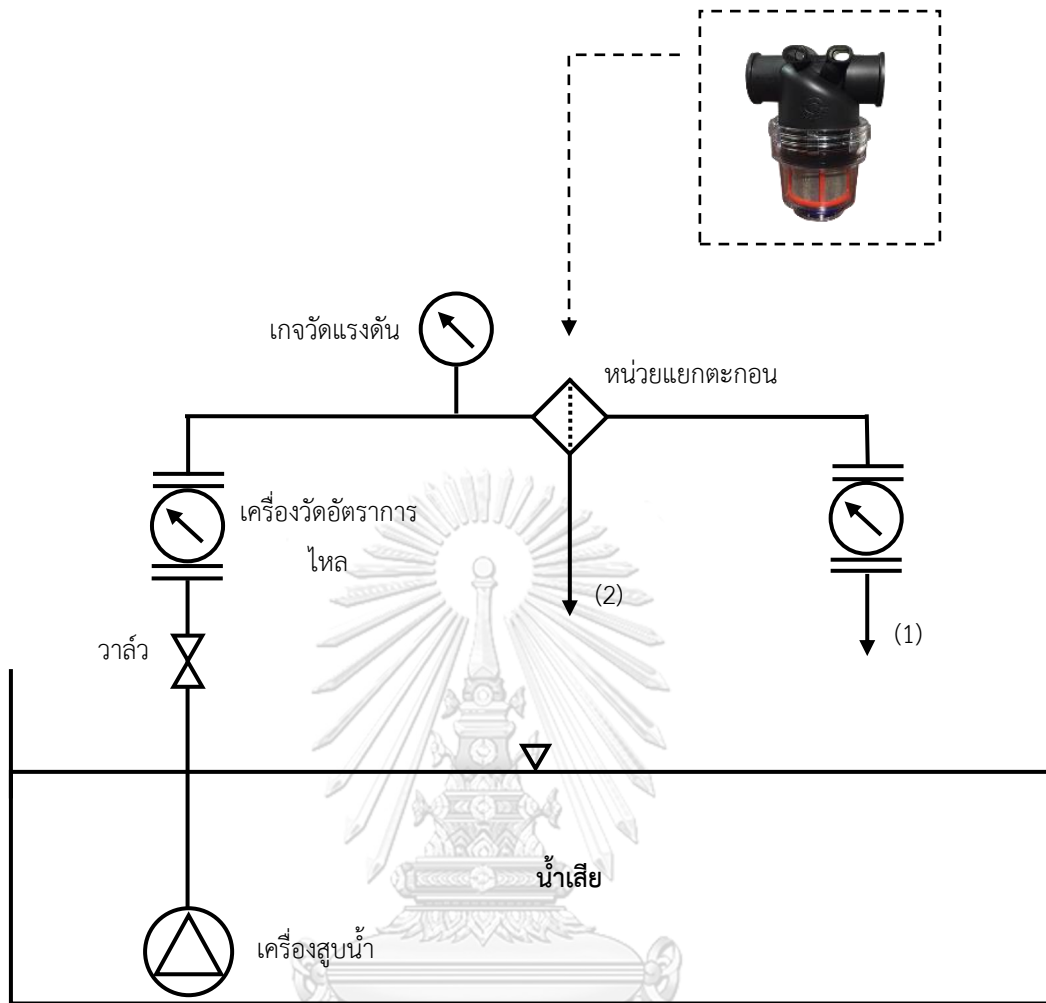


รูปที่ 3.9 การทำงานของหน่วยแยกตะกอน

### การทดลองที่ 3.1 การทดสอบประสิทธิภาพการกรองของหน่วยแยกตะกอน

ติดตั้งชุดอุปกรณ์การทดลองดังแผนภาพรูปที่ 3.10 โดยใช้ถังรองรับน้ำเสียจากระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำขนาดความจุ 250 ล. เดินระบบให้ทำงานต่อเนื่องเป็นเวลา 20-30 วัน โดยใช้เครื่องสูบน้ำสูบน้ำไปยังหน่วยแยกตะกอนซึ่งควบคุมอัตราการไหลตามที่ได้จากการทดลองที่ 2 ด้วยวาล์วและเครื่องวัดอัตราการไหล และติดตั้งเกจวัดความดันน้ำก่อนผ่านหน่วยแยกตะกอน ทั้งนี้การติดตั้งหน่วยแยกตะกอนจะถูกออกแบบให้สามารถถอดประกอบตะแกรงได้สะดวก เพื่อทำการทดสอบตะแกรงตัวอย่าง 4 ชนิด ได้แก่ ตะแกรงที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ตะแกรงที่ปรับปรุงให้มีชั้น MgAl/Stearate LDH อยู่บนพื้นผิว ตะแกรงที่ปรับปรุงให้มีชั้น MgAl/Citrate LDH อยู่บนพื้นผิว และตะแกรงที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโน โดยรูปแบบการกรองดังกล่าวถูกควบคุมให้เป็น การกรองแบบไหลขวาง น้ำเสียสามารถไหลออกจากหน่วยแยกตะกอนได้ 2 ทาง ได้แก่ (1) น้ำที่ไหลผ่านตะแกรงและ (2) น้ำที่ไม่ผ่านตะแกรง ก่อนจะไหลกลับมารวมกันในถังเริ่มต้นเพื่อเวียนน้ำกลับเข้าสู่หน่วยแยกตะกอนต่อไป ทั้งนี้การทดสอบประสิทธิภาพการกรองของหน่วยแยกตะกอนทำโดยการวัดค่าฟลักซ์การกรองเป็นระยะ ซึ่งคำนวณได้จากปริมาตรน้ำที่ไหลผ่านต่อหน่วยพื้นที่การกรองต่อเวลา (สมการที่ 2.4) รวมทั้งติดตามตรวจวัดค่าแรงดันน้ำตลอดระยะเวลาใช้งานหน่วยแยกตะกอน นอกจากนี้จะทำการตรวจวัดคุณภาพน้ำโดยมีพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ พีเอช ปริมาณของแข็งละลาย การนำไฟฟ้า ปริมาณออกซิเจนละลาย ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ ปริมาณสารเมือกที่เกิดจากจุลชีพ หรือ EPS และปริมาณของแข็งแขวนลอย เป็นต้น

ในขณะเดียวกันจะทำการติดตั้งระบบชุดควบคุมซึ่งทำงานเหมือนกันกับการทดลองข้างต้น โดยใช้น้ำประปาเพื่อเปรียบเทียบการทำงานของหน่วยแยกตะกอน



รูปที่ 3.10 การทดสอบประสิทธิภาพการกรองของหน่วยแยกตะกอน

ตารางที่ 3.6 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ในการทดลองช่วงที่ 3.1

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์/ เครื่องมือวิเคราะห์	จุดเก็บตัวอย่าง	ความถี่ในการวิเคราะห์
ฟลักซ์การกรอง	วัดปริมาตรการกรองต่อพื้นที่ตะแกรงต่อเวลาด้วยเครื่องวัดอัตราการไหล	ทางน้ำออก (1)	เมื่อเริ่มต้นการทดลองและตามช่วงเวลาที่กำหนด
	วัดปริมาณของแข็งแขวนลอยโดยการกรองและชั่งน้ำหนักแห้ง	ทางน้ำออก (1) และถึงน้ำเสีย	

### การทดลองที่ 3.2 การศึกษาปริมาณและการเกาะติดของฟิล์มอินทรีย์บนพื้นผิวตะแกรง

ทำการวิเคราะห์ปริมาณการเกิดฟิล์มอินทรีย์บนตะแกรงตัวอย่างหลังจากสิ้นสุดการทดลองที่ 3.1 โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 1) การวิเคราะห์น้ำหนักแห้ง

อบตะแกรงที่ 100-105 °ซ เพื่อระเหยน้ำออกและนำไปชั่งน้ำหนัก จากนั้นล้างตะแกรงเพื่อกำจัดฟิล์มอินทรีย์ที่ยึดเกาะอยู่บนพื้นผิวด้วยวิธีการล้างด้วยเบส-กรด (Base and Acid Cleaning, BAC) โดยการแช่ในสารละลาย 2% โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 75 °ซ เป็นเวลา 30 นาที และแช่ต่อในน้ำดีไอ (De-ionization Water) 15 นาที ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นแช่ในสารละลาย 2% กรดไนตริกที่อุณหภูมิ 75 °ซ เป็นเวลา 30 นาที และแช่ต่อในน้ำดีไอ (De-ionization Water) 15 นาทีที่อุณหภูมิห้อง ทิ้งไว้ให้แห้งแล้วชั่งน้ำหนักอีกครั้ง ผลต่างของน้ำหนักที่ชั่งก่อนและหลังการล้างใช้เทียบเป็นปริมาณฟิล์มอินทรีย์ที่ยึดเกาะบนตะแกรง (Huttenlochner และคณะ, 2017)

#### 2) การวิเคราะห์ปริมาณสารโพลีเมอร์หรือ Extracellular Polymeric Substances (EPS)

นำตะแกรงที่ผ่านการกรองน้ำเสียจากระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำใส่ลงในภาชนะที่บรรจุสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ซาลิน (Phosphate Buffer Saline; PBS) จากนั้นเขย่าด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเพื่อให้ฟิล์มอินทรีย์หลุดออกจากพื้นผิวตะแกรงลงไปในสารละลายบัฟเฟอร์ ทำการสกัดสารโพลีเมอร์ที่ต้องการโดยใช้สารกรองเรซิน (Cation Exchange Resin) โดยสารดังกล่าวจะอยู่ในรูปของผสมระหว่างโปรตีน กรดฮิวมิก (Humic) และคาร์โบไฮเดรต (Jahn และ Nielsen, 1995) โดยใช้ Modified Lowry method (Lowry และคณะ, 1951) ในการวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนและกรดฮิวมิก และใช้ Anthrone method (Ludwig และ Goldberg, 1956) เพื่อวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรต จากนั้นทำการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ (Total Organic Carbon, TOC) เพื่อใช้ในการคำนวณปริมาณฟิล์มอินทรีย์ ทั้งนี้ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์คิดเป็นร้อยละ 90 ของปริมาณฟิล์มอินทรีย์ (Donlan, 2002)

ตารางที่ 3.7 ตัวแปรในการศึกษาประสิทธิภาพการกรองของหน่วยแยกตะกอน

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตะแกรง	- ตะแกรงจากการทดลองช่วงที่ 2
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ขนาดช่องตะแกรง	- จากการทดลองช่วงที่ 2
พื้นที่ตะแกรง	- 92 ตร.ซม.
รูปแบบการกรอง	- กรองไหลตามขวาง
อัตราการไหลของน้ำเข้าหน่วยแยกตะกอน	- จากการทดลองช่วงที่ 2
ชนิดของตะแกรง	- ตะแกรงสแตนเลส
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ต้องการวิเคราะห์
ประสิทธิภาพการกรอง	- ฟลักซ์การกรอง - แรงดันน้ำ
ปริมาณการเกิดฟิล์มอินทรีย์	- ปริมาณฟิล์มอินทรีย์



ตารางที่ 3.8 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของหน่วยแยกตะกอน

กระบวนการ	เครื่องมือและอุปกรณ์	สารเคมี
การวิเคราะห์ปริมาณ ของแข็งแขวนลอย	- กรวยกรอง - กระดาษกรองขนาด 0.45 ไมโครเมตร - เครื่องชั่งน้ำหนัก - ตู้อบความร้อน - โถดูดความชื้น	-
การตรวจวัดคุณภาพ	- เครื่องวัดพีเอช - เครื่องวัดการนำไฟฟ้า - เครื่องวัดปริมาณของแข็งละลาย - เครื่องวัดออกซิเจน	
การวิเคราะห์ฟลักซ์การ กรอง	- นาฬิกาจับเวลา - กระบอกตวง	-
การวิเคราะห์ปริมาณ ฟิล์มอินทรีย์	- เครื่องอัลตราโซนิก - เครื่องหมุนเหวี่ยง - เครื่องกวนสาร - ตะแกรงกรอง 300 – 900 ไมโครเมตร - เครื่องเขย่าสาร	- โซเดียมไฮดรอกไซด์ - กรดไนตริก - สารละลายบัฟเฟอร์ PBS - เรซิน DOWEX

## บทที่ 4

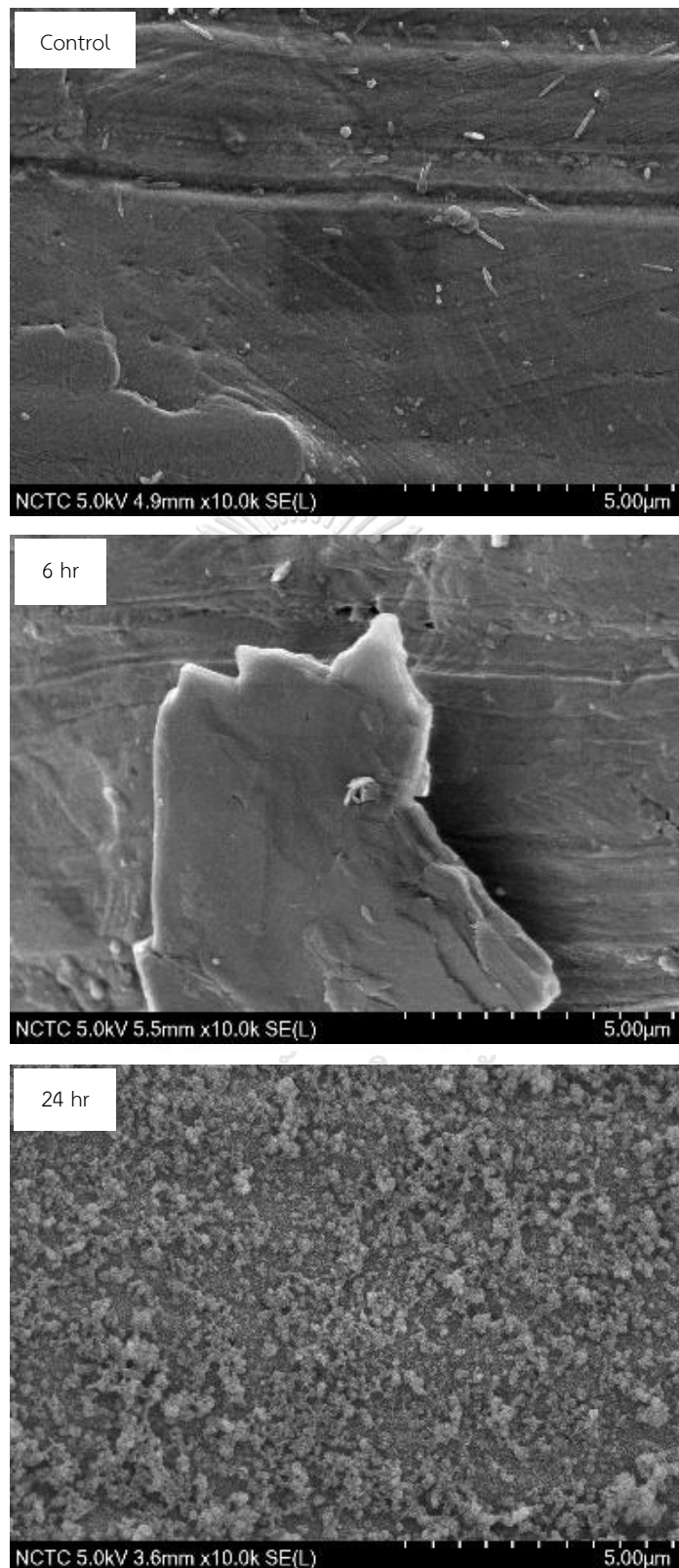
### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 การปรับปรุงพื้นผิวตะแกรง

การทดลองนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวตะแกรงเพื่อป้องกันการเกาะติดของฟิล์มอินทรีย์ด้วยแนวทางต่างๆ ได้แก่ การปรับปรุงพื้นผิวตะแกรงให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดและการใช้สารเคมีที่ออกฤทธิ์ยับยั้งการเกิดฟิล์มชีวภาพ โดยผลการทดลองมีดังนี้

##### 4.1.1 การสังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์

การทดลองนี้เป็นการสังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ลงบนพื้นผิวตะแกรงโดยมีแมกนีเซียมและอะลูมิเนียมเป็นสารประกอบโลหะที่อัตราส่วน 3 ต่อ 1 ในการทดลองมีการควบคุมปริมาณสารละลายอะลูมิเนียมคลอไรด์เข้มข้น 1 โมลาร์ต่อสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์เข้มข้น 1 โมลาร์ที่อัตราส่วน 1 ต่อ 3 โดยปริมาตร ทำการเติมสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ลงในสารละลายอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่มีตะแกรงแช่อยู่ด้วยอัตราการใช้ประมาณ 1.5 มล./นาที่ ในขณะที่ทำการทดลองต้องควบคุมค่าพีเอชให้อยู่ในช่วง 9.5-11 ด้วยการเติมสารละลายบัฟเฟอร์ซึ่งเป็นสารละลายผสมระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ และโซเดียมคาร์บอเนตเข้มข้น 1 โมลาร์ ที่อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตรด้วยอัตราการใช้ประมาณ 3 มล./นาที่ เมื่อเติมสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์จนหมด จึงทำการกวนต่อด้วยเครื่องกวนผสมและตั้งทิ้งไว้ 6 – 24 ชม. รอให้เกิดปฏิกิริยาการตกตะกอนร่วมของโลหะ ก่อนนำไปวิเคราะห์การเกิดโครงสร้างของชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์โดยใช้ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (รูปที่ 4.1) ผลการทดลองพบว่าลักษณะพื้นผิวของตะแกรงที่ผ่านการทำปฏิกิริยาเพื่อสร้างชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่ระยะเวลา 6 ชม. ไม่มีความแตกต่างกับพื้นผิวตะแกรงชุดควบคุม ในขณะที่เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาอย่างน้อย 24 ชม. จะสังเกตเห็นลักษณะพื้นผิวตะแกรงเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

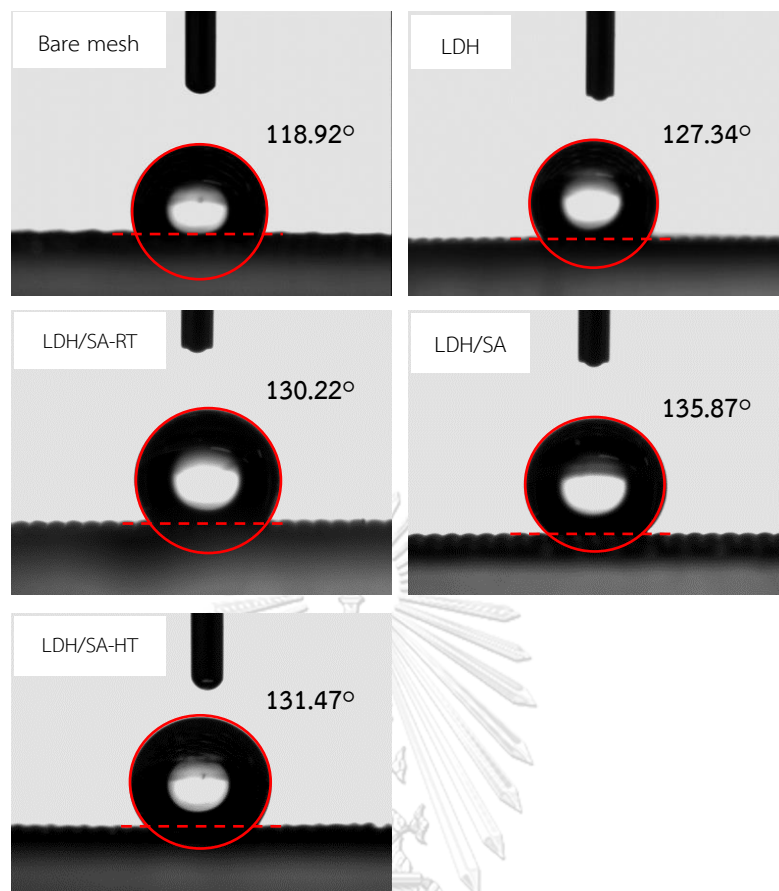


รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายพื้นผิวตะแกรงเริ่มต้นและตะแกรงที่สังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่  
ระยะเวลา 6 และ 24 ชม.

#### 4.1.2 การสังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่แทรกด้วยสเตียเรตไอออน

การทดลองนี้เป็นการนำตะแกรงที่ผ่านการสังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์แล้วมาผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนเพื่อแทรกแทรกสเตียเรตไอออนเข้าไประหว่างชั้นของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ ทั้งนี้กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนถูกดำเนินการด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน 3 วิธี ได้แก่ กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนที่อุณหภูมิห้อง กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนที่อุณหภูมิ 60 °ซ และกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนภายใต้สภาวะความร้อนและแรงดันสูง เมื่อสิ้นสุดกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนแล้วจึงได้ทำการวิเคราะห์ทดสอบเพื่ออธิบายลักษณะของการเกิดโครงสร้างเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ด้วยเทคนิคต่างๆ ได้แก่ การวิเคราะห์มุมสัมผัส การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) และการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทมิเตอร์ ซึ่งได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

การวิเคราะห์มุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิวตะแกรงเป็นการบ่งบอกถึงคุณสมบัติความชอบน้ำของพื้นผิว จากผลการทดสอบ (รูปที่ 4.2) พบว่าตะแกรงที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (Bare mesh) มีค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยเท่ากับ  $118.92^{\circ} \pm 4.08^{\circ}$  ตะแกรงที่ผ่านการสังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (LDH) มีค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยเท่ากับ  $127.34^{\circ} \pm 2.96^{\circ}$  ตะแกรงที่ผ่านการสังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และแทรกด้วยสเตียเรตไอออนด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนที่อุณหภูมิห้อง (LDH/SA-RT) มีค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยเท่ากับ  $130.22^{\circ} \pm 3.38^{\circ}$  ตะแกรงที่ผ่านการสังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และแทรกด้วยสเตียเรตไอออนด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนที่อุณหภูมิ 60 °ซ (LDH/SA-60) มีค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยเท่ากับ  $135.87^{\circ} \pm 3.05^{\circ}$  และตะแกรงที่ผ่านการสังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และแทรกด้วยสเตียเรตไอออนด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนภายใต้สภาวะความร้อนและแรงดันสูง (LDH/SA-HT) มีค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยเท่ากับ  $131.47^{\circ} \pm 2.69^{\circ}$

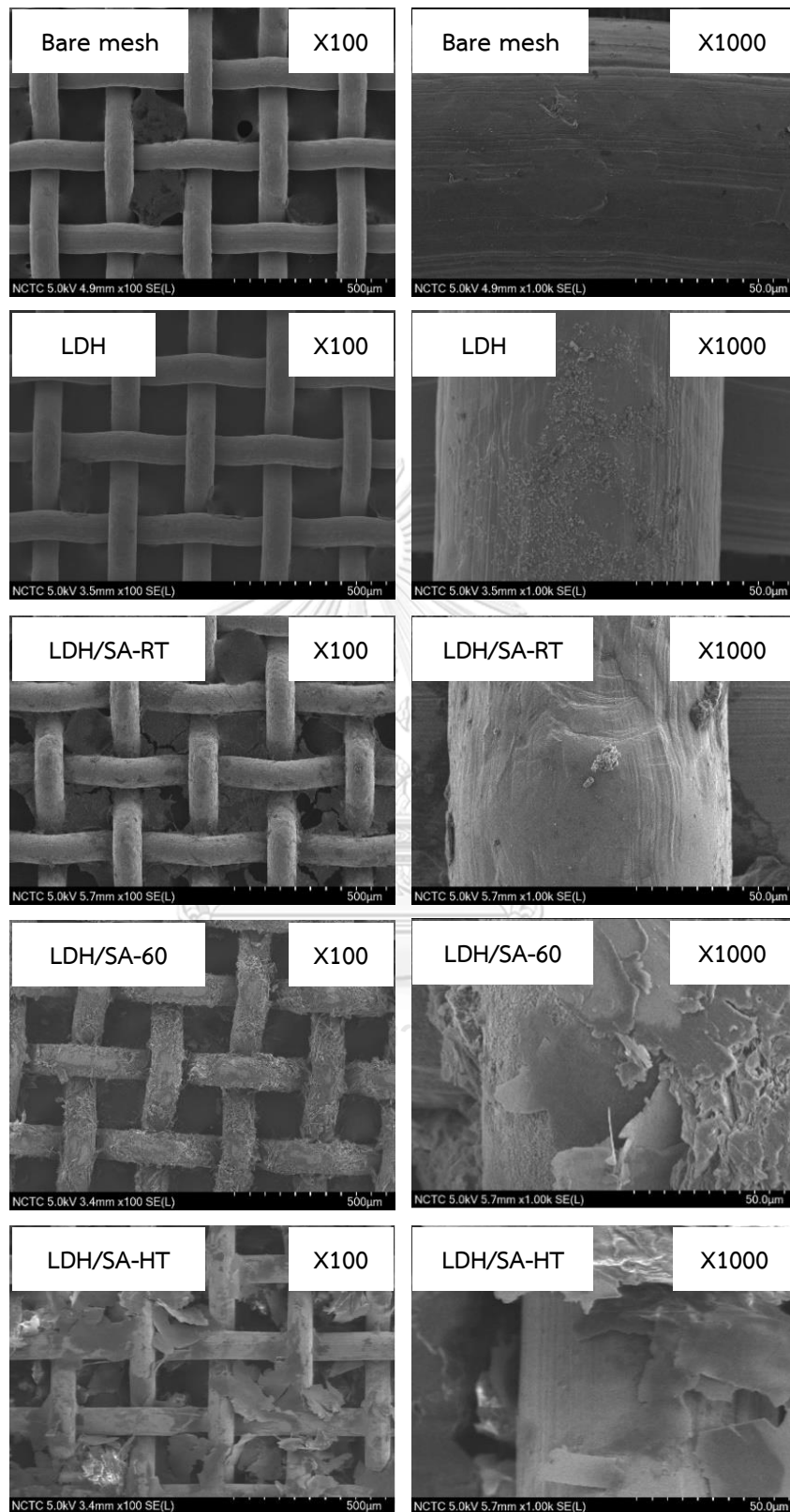


รูปที่ 4.2 มุมสัมผัสของหยดน้ำบนตะแกรงที่สังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และแทรกด้วยสเต็มเรตไอออนโดยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนที่อุณหภูมิต่างๆ

ผลการถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของพื้นผิวตะแกรงที่ผ่านกระบวนการต่างๆ โดยพบว่าพื้นผิวของตะแกรงเริ่มต้นมีลักษณะเรียบสม่ำเสมอทั่วพื้นที่ แต่เมื่อทำการสังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ลงบนพื้นผิวพบว่าพื้นผิวมีลักษณะขรุขระมากขึ้นเล็กน้อย โดยจะสังเกตเห็นโครงสร้างขนาดเล็กบนพื้นผิวโลหะ อย่างไรก็ตามเมื่อทำการทดลองแทรกสเต็มเรตไอออนผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยแนวทางต่างๆ ได้แก่ กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนที่อุณหภูมิห้อง กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนที่อุณหภูมิ 60 °ซ และกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนภายใต้สภาวะความร้อนและแรงดันสูง พบว่ามีผลลัพธ์ที่แตกต่างกัน โดยสังเกตเห็นโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแผ่นเกิดขึ้นบนพื้นผิวตะแกรงที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออนที่อุณหภูมิ 60 °ซ และที่สภาวะความร้อนและแรงดันสูง ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวส่งผลให้เกิดความขรุขระขึ้นบนพื้นผิวตะแกรง

ทั้งนี้อุณหภูมิมีความสำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออน โดยพบว่าการทำปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออนที่อุณหภูมิ 60 °ซ ช่วยให้การแทรกสเต็มเรตไอออนเข้าไปยังชั้นอินเตอร์เลเยอร์ได้ดี ส่งผลให้มุมสัมผัสนพื้นผิวตะแกรงดังกล่าวมีค่าสูงกว่าตะแกรงที่สังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และทำการแทรกสเต็มเรตไอออนด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนที่อุณหภูมิห้อง (25 °ซ) อย่างไรก็ตามจากการทดลองการแลกเปลี่ยนไอออนภายใต้ความร้อนและแรงดันสูง (100 °ซ) กลับพบว่าพื้นผิวของตะแกรงที่ผ่านการปรับปรุงมีค่ามุมสัมผัสน้อยกว่าการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 °ซ ซึ่งอาจเป็นเพราะขณะทำการแลกเปลี่ยนไอออน ตะแกรงถูกวางแนบกับผิวภาชนะและม้วนซ้อนกันหลายชั้นเพื่อบรรจุในภาชนะรับแรงดันไอที่มีขนาดเล็ก จึงส่งผลให้การทำปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างไม่ครอบคลุมและไม่สม่ำเสมอทั่วทุกพื้นที่บนตะแกรง

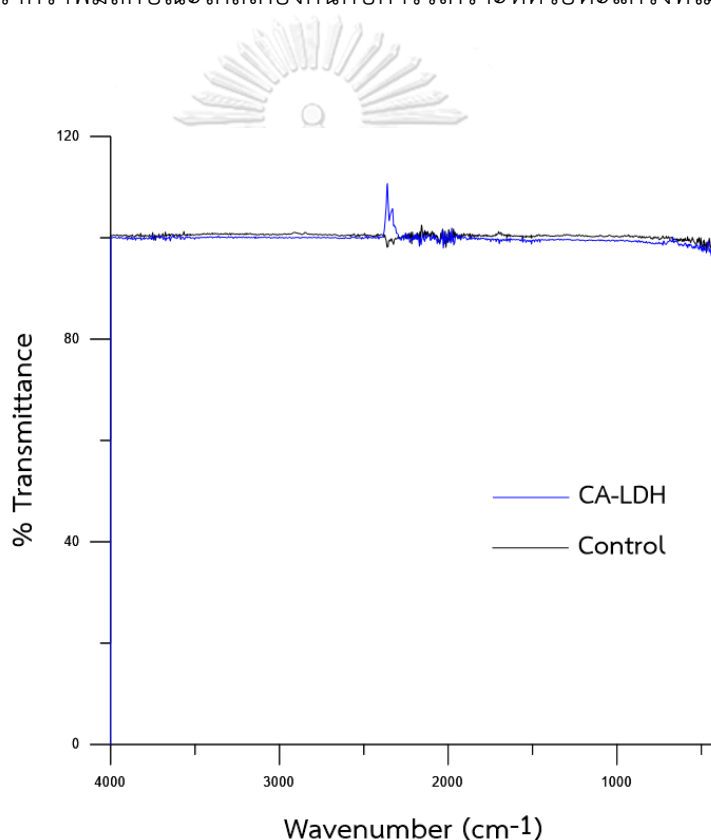




รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายตะแกรงที่ผ่านการสังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และแทรกด้วยสเต็มเรตไอออนโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

#### 4.1.3 การสังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่แทรกด้วยซิเตรทไอออน

การทดลองนี้เป็นการนำตะแกรงที่สังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์มาผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนเพื่อแทรกซิเตรทไอออนเข้าไประหว่างชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ โดยใช้กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนภายใต้สภาวะความร้อนและแรงดันสูง จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) เพื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารที่มีซิเตรทไอออนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบว่ากราฟไม่แสดงค่าการดูดกลืนแสง นอกจากนี้ยังพบว่ากราฟมีลักษณะใกล้เคียงกันกับการวิเคราะห์ด้วยตะแกรงที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (รูปที่ 4.4)

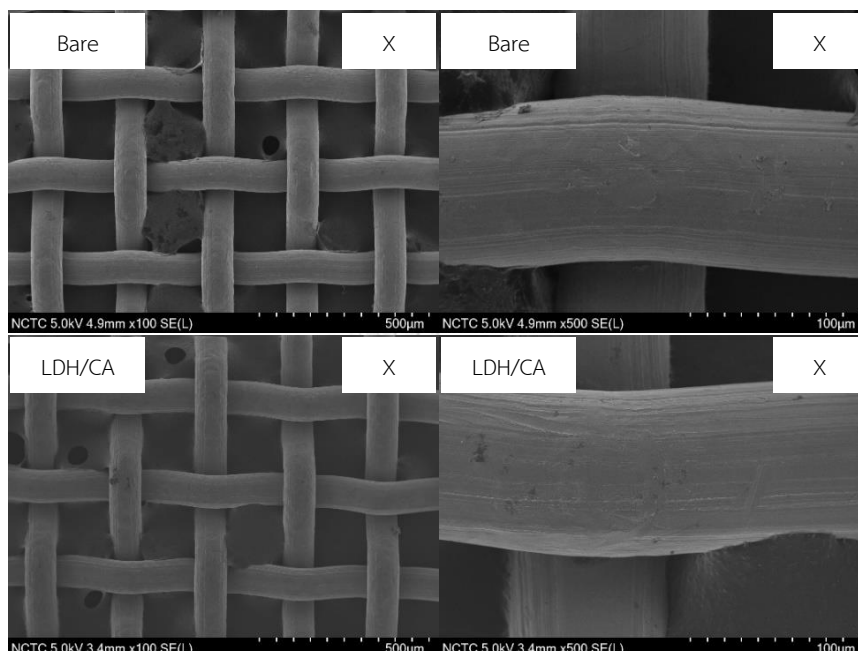


รูปที่ 4.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy

นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์โดยภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าพื้นผิวตะแกรงที่ผ่านการสังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และแทรกด้วยซิเตรทไอออนมีลักษณะใกล้เคียงกันกับพื้นผิวตะแกรงที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (รูปที่ 4.5) แต่ทั้งนี้เนื่องจากการแทรกซิเตรทไอออนเข้าไปยังชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์เป็นการทดลองเพื่อปรับปรุงพื้นผิวตะแกรงให้มีสารเคมีที่ช่วยยับยั้งการเกิดฟิล์มชีวภาพ ซึ่งเป็นวิธีการที่ไม่ส่งผลกระทบต่อลักษณะทางกายภาพ



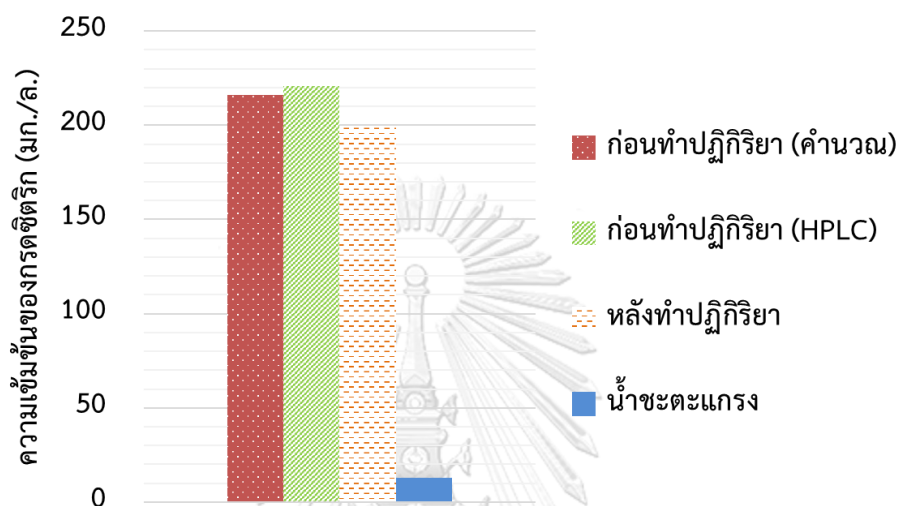
ของพื้นผิว จึงอาจเป็นผลให้ลักษณะโครงสร้างของพื้นผิวตะแกรงไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยจนไม่สามารถสังเกตเห็นได้



รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายตะแกรงที่ผ่านการสังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และแทรกด้วยซีเตรทไอออน (LDH/CA) โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์ปริมาณกรดซิตริกที่สังเคราะห์ลงบนพื้นผิวตะแกรงด้วยเครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC) โดยทำการวิเคราะห์ปริมาณกรดซิตริกในสารละลายก่อนและหลังกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนและปริมาณกรดซิตริกในน้ำที่ใช้ล้างตะแกรง หลังกระบวนการสังเคราะห์พื้นผิว จากผลการทดลองพบว่าสารละลายเริ่มต้นมีปริมาณกรดซิตริกละลายอยู่ 220.90 ก. ในน้ำ 500 มล. (การคำนวณเบื้องต้นจากการเตรียมสารละลายกรดซิตริกเข้มข้น 2.25 โมลาร์ ควรจะมีปริมาณกรดซิตริกเท่ากับ 216.14 ก. ในน้ำ 500 มล.) หลังจากกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนในสารละลายเหลือปริมาณกรดซิตริกละลายอยู่ 199.90 ก. ในขณะที่ปริมาณกรดซิตริกที่ละลายอยู่ในน้ำชะล้างตะแกรงหลังกระบวนการสังเคราะห์พื้นผิวทั้งสองรอบมีค่าเท่ากับ 9.62 และ 3.46 ก. ตามลำดับ (รูปที่ 4.6) ดังนั้นปริมาณกรดซิตริกที่น่าจะหลงเหลืออยู่บนตะแกรงจะมีค่าเท่ากับ 7.91 ก. แต่ทั้งนี้ไม่สามารถพิสูจน์ได้ว่ากรดซิตริกหรือซีเตรทไอออนแทรกอยู่ระหว่างชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์หรือตกค้างอยู่ที่พื้นผิวตะแกรง นอกจากนี้ตะแกรงดังกล่าวจะ

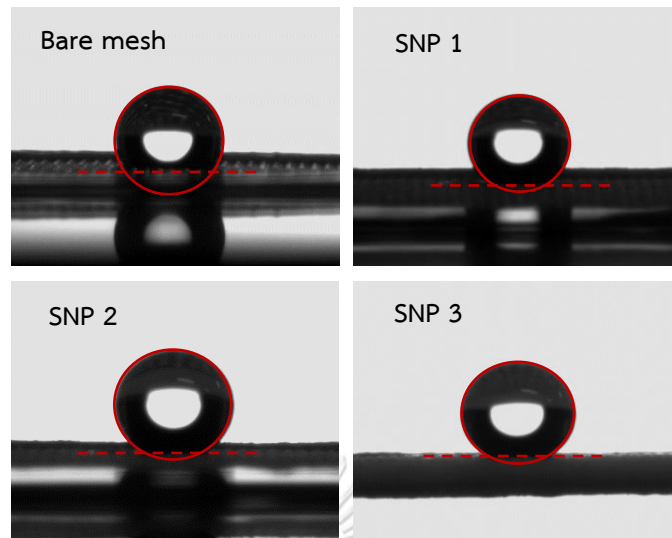
ถูกนำไปใช้ในระบบแยกตะกอนที่มีปริมาตรน้ำไม่น้อยกว่า 200 ล. ดังนั้นกรดซิดริกทั้งหมดในระบบจะสามารถทำปฏิกิริยากับเกลือได้เป็นโซเดียมซิดเรทที่ความเข้มข้นไม่เกิน  $0.04 \times 10^{-3}$  ก./มล. ซึ่งมีค่าน้อยกว่าในงานวิจัยของ Shanks และคณะ (2006) ที่ระบุว่าโซเดียมซิดเรทเข้มข้นอย่างน้อย 0.5 ก./มล. สามารถยับยั้งการเกิดฟิล์มชีวภาพได้



รูปที่ 4.6 แผนภูมิแสดงความเข้มข้นของกรดซิดริกในกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน

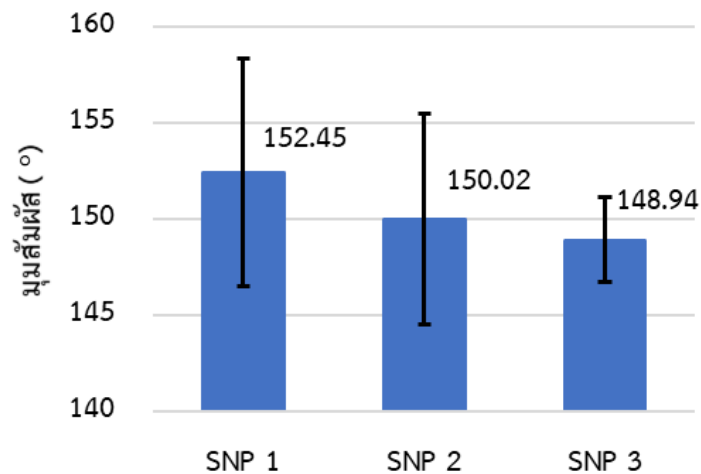
#### 4.1.4 การพ่นเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโน

การปรับปรุงพื้นผิวตะแกรงโดยการพ่นเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโนหรือซิลิกาเจลซึ่งเตรียมได้จากเพื่อปรับปรุงพื้นผิวให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวด โดยได้ทำการทดลองพ่นเคลือบด้วยสารละลายซิลิกาของบนตะแกรงที่จำนวนชั้นตั้งแต่ 1 ถึง 3 ชั้น ทั้งนี้จากการวัดมุมสัมผัสพบว่า ตะแกรงที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวมีค่ามุมสัมผัสเท่ากับ  $119.43^{\circ} \pm 5.92^{\circ}$  ส่วนตะแกรงที่ผ่านการพ่นเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโน 1 2 และ 3 ชั้น พบว่ามีค่ามุมสัมผัสเปลี่ยนแปลงไปโดยวัดค่ามุมสัมผัสได้  $152.45^{\circ} \pm 5.48^{\circ}$   $150.02^{\circ} \pm 2.21^{\circ}$  และ  $148.94^{\circ} \pm 1.66^{\circ}$  ตามลำดับ (รูปที่ 4.7)



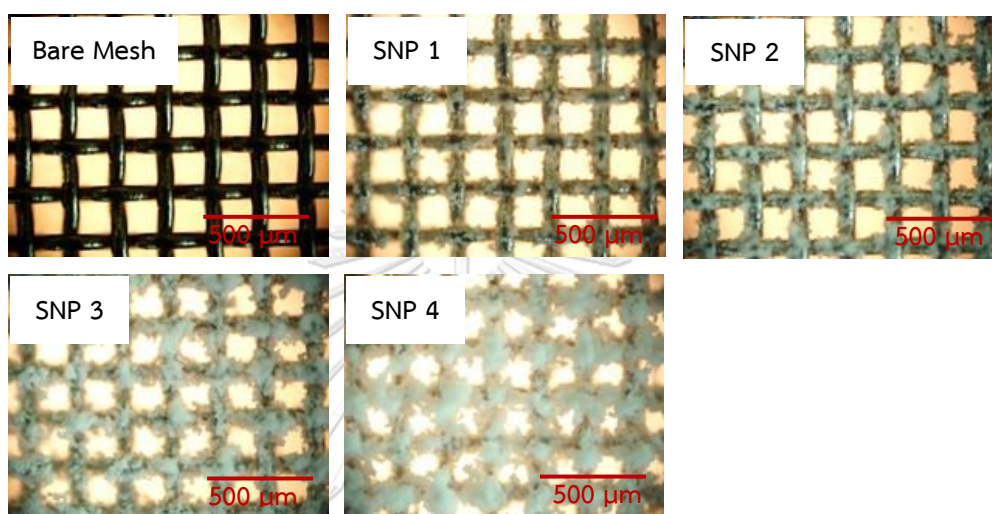
รูปที่ 4.7 การวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำบนตะแกรงที่พันเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโน (SNP)

จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการพันเคลือบที่จำนวนชั้น 1 ถึง 3 ชั้น เป็นผลให้พื้นผิวตะแกรงมีค่ามุมสัมผัสเพิ่มขึ้นจากเดิม อย่างไรก็ตามการพันเคลือบด้วยจำนวนชั้นที่มากขึ้นไม่ส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสของพื้นผิวตะแกรงเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และอาจมีแนวโน้มว่าเมื่อพันเคลือบด้วยจำนวนชั้นที่มากขึ้นจะส่งผลให้มุมสัมผัสมีค่าลดลงดังแสดงในแผนภูมิ (รูปที่ 4.8)



รูปที่ 4.8 แผนภูมิแสดงค่ามุมสัมผัสบนพื้นผิวตะแกรงที่พันเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโน

นอกจากนี้การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพโดยใช้ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ (รูปที่ 4.9) ทำให้สังเกตเห็นอนุภาคซิลิกาขนาดนาโนที่รวมตัวกันเป็นโครงสร้างชั้นเคลือบ โดยมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอบริเวณพื้นผิวของตะแกรง อย่างไรก็ตามเมื่อทำการพ่นเคลือบอนุภาคซิลิกาขนาดนาโนลงบนพื้นผิวจะส่งผลให้ช่องกรองมีขนาดเล็กลง และขนาดของช่องกรองจะยิ่งเล็กลงเมื่อพ่นเคลือบด้วยจำนวนชั้นที่มากขึ้น



รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายตะแกรงที่พ่นเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโน 1-4 ชั้นโดยกล้องจุลทรรศน์

จากผลการปรับปรุงพื้นผิวตะแกรงข้างต้นทำให้ได้ตะแกรงกรองต้นแบบที่จะนำไปสู่การทดลองในส่วนของการทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานและการประยุกต์ใช้ร่วมกับหน่วยแยกตะกอนในน้ำเสียที่ได้จากระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำ ทั้งนี้ในการปรับปรุงพื้นผิวตะแกรงทั้งสองวิธี ได้แก่การสังเคราะห์เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่แทรกด้วยสเต็มเรตไอออน (LDH/SA) และการพ่นเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโน (SNP) สามารถเพิ่มสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวตะแกรงได้ เนื่องจากการปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีการดังกล่าวเป็นการส่งเสริมให้พื้นผิวมีลักษณะขรุขระมากขึ้น อากาศที่แทนที่อยู่ในช่องว่างของพื้นผิวที่ขรุขระจะช่วยลดความสามารถในการยึดเกาะของน้ำบนพื้นผิววัสดุ อย่างไรก็ตามการปรับปรุงพื้นผิวตะแกรงกรองในงานวิจัยนี้เป็นการดำเนินการภายใต้กระบวนการและการใช้สารตั้งต้นหรือวัสดุเคลือบในระบบนาโน โดยในส่วนของการสังเคราะห์เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (LDH) ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ LDH ทั้งที่อยู่แบบอิสระหรือรวมกลุ่มกันมีขนาดอยู่ในช่วง 40 – 200 นาโนเมตร (Xu และคณะ, 2006) ซึ่งสามารถสังเกตได้ในรูปที่ 4.1 และเมื่อทำการแทรกด้วยสเต็มเรต

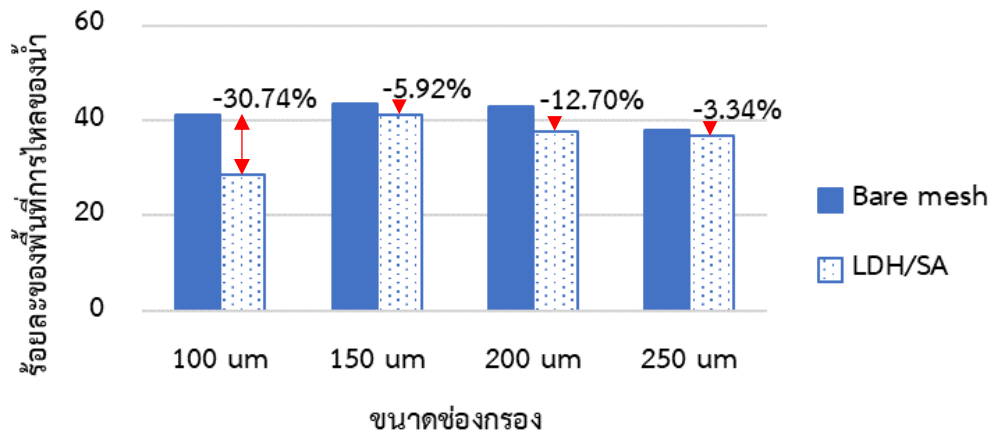
ไอออนได้เป็น LDH/SA พบว่าอนุภาคเกิดเป็นโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 ไมโครเมตร โดยสังเกตได้จากรูปที่ 4.3 ในขณะที่การเตรียม SNP โดยกระบวนการโซล-เจล สารตั้งต้นคือซิลิกาเจลซึ่งโดยทั่วไปจะมีขนาดอยู่ในช่วง 25 – 200 นาโนเมตร (Rahman และ Padavettan, 2012) แต่เมื่อทำการพ่นเคลือบลงบนพื้นผิวตะแกรงโลหะ อนุภาคซิลิกาตั้งกล่าวจะเกิดการรวมตัวกันเป็นโครงสร้างชั้นเคลือบที่มีขนาดใหญ่ขึ้นอยู่ในระดับไมโครเมตรโดยสังเกตได้จากภาพถ่ายในรูปที่ 4.9

## 4.2. การประเมินประสิทธิภาพการใช้งานของตะแกรงต้นแบบ

การทดลองนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานของตะแกรงหลังจากผ่านการปรับปรุงพื้นผิว โดยทำการทดสอบการใช้งานของตะแกรงกรองและวิเคราะห์ผลต่างๆ ดังนี้

### 4.2.1 การศึกษาพื้นที่การกรอง

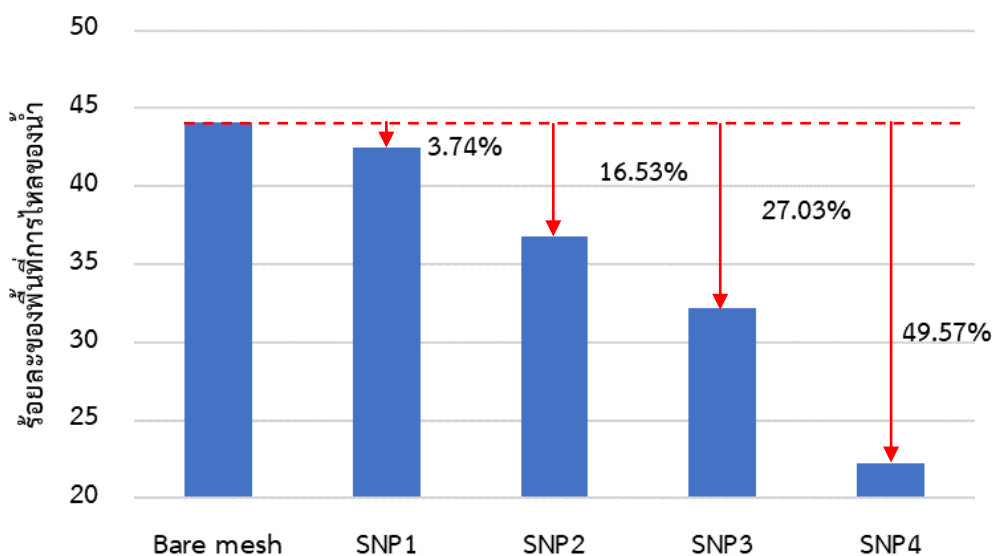
การทดลองนี้เป็นการศึกษาพื้นที่การกรองเพื่อคำนวณหาสัดส่วนพื้นที่ทั้งหมดของช่องกรองหรือพื้นที่ที่น้ำไหลผ่านได้ต่อพื้นที่ทั้งหมดของตะแกรงกรองโดยใช้ภาพถ่ายสองมิติประกอบโปรแกรม ImageJ ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าตะแกรงที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวที่ขนาดช่องกรอง 100 150 200 และ 250 ไมโครเมตร มีสัดส่วนของพื้นที่ทั้งหมดที่น้ำสามารถไหลผ่านได้คิดเป็นร้อยละ 41.08 43.61 42.99 และ 38.03 ตามลำดับ และเมื่อทำการสังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และแทรกด้วยสเตียเรตไอออนลงบนพื้นผิวตะแกรงพบว่า มีสัดส่วนของพื้นที่ทั้งหมดที่น้ำสามารถไหลผ่านได้คิดเป็นร้อยละ 28.45 41.03 37.53 และ 36.76 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อคิดเป็นร้อยละของพื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงไปจะสังเกตได้ว่าการปรับปรุงพื้นผิวด้วยการสังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และแทรกด้วยสเตียเรตไอออน ส่งผลให้พื้นที่การไหลของน้ำลดลงร้อยละ 30.74 5.92 12.70 และ 3.34 ตามลำดับ ดังแสดงในแผนภูมิแท่ง (รูปที่ 4.10)



รูปที่ 4.10 แผนภูมิแสดงการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของพื้นที่การไหลของน้ำผ่านตะแกรงที่สังเคราะห์ชั้น เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และแทรกด้วยสเต็มเรตไอออน

ในขณะเดียวกันผลการวิเคราะห์สัดส่วนของพื้นที่ทั้งหมดที่น้ำสามารถไหลผ่านได้บนตะแกรง ขนาดช่องกรองเท่ากับ 150 ไมโครเมตร ที่พันเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโนจำนวน 1 2 3 และ 4 ชั้น มีสัดส่วนของพื้นที่ทั้งหมดที่น้ำสามารถไหลผ่านได้คิดเป็นร้อยละ 42.45 36.81 32.18 และ 22.24 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อคิดเป็นร้อยละของพื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงไปจะพบว่าการปรับปรุงพื้นผิว โดยการ พันเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโน ส่งผลให้พื้นที่การไหลของน้ำลดลงร้อยละ 3.74 16.53 27.03 และ 49.57 ตามลำดับ ดังแสดงในแผนภูมิแท่ง (รูปที่ 4.11)

#### จพาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

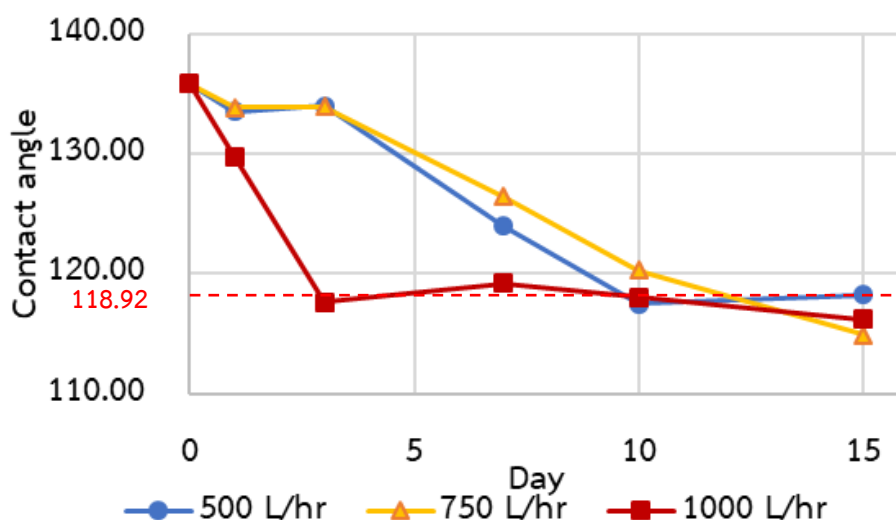


รูปที่ 4.11 แผนภูมิแสดงการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนพื้นที่การไหลของน้ำผ่านตะแกรงที่พื้นเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโนจำนวนการเคลือบ 1-4 ชั้น

#### 4.2.2 การทดสอบอัตราการไหลของน้ำ

การทดลองนี้เป็นการศึกษาการกรองน้ำด้วยตะแกรงที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวเพื่อทดสอบอัตราการไหลของน้ำผ่านตะแกรงกรองโดยควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่ 500 750 และ 1000 ล./ชม. ให้ไหลผ่านตะแกรงที่มีขนาดช่องกรองเท่ากับ 150 ไมโครเมตร รวมทั้งกำหนดให้เป็นการกรองแบบไหลขวาง (Crossflow filtration) และทำการเก็บตัวอย่างตะแกรงกรองที่ผ่านการใช้งานเป็นระยะเวลา 1 3 7 10 และ 15 วัน เพื่อนำไปวิเคราะห์ค่ามุมสัมผัส โดยได้ทำการสุ่มวัดค่ามุมสัมผัสบนพื้นผิวตะแกรง 5-10 จุด และคำนวณค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยของพื้นผิวตะแกรงตัวอย่าง ผลการทดลองพบว่า ชุดทดลองที่ควบคุมน้ำด้วยอัตราการไหล 500 ล./ชม. สามารถวัดมุมสัมผัสบนตะแกรงที่สังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และแทรกด้วยสเตียเรตไอออนได้เท่ากับ  $135.87^{\circ}$   $133.54^{\circ}$   $134.06^{\circ}$   $123.98^{\circ}$   $117.50^{\circ}$  และ  $124.39^{\circ}$  ตามลำดับ ที่อัตราการไหล 750 ล./ชม. สามารถวัดค่ามุมสัมผัสได้  $135.87^{\circ}$   $133.88^{\circ}$   $133.96^{\circ}$   $126.45^{\circ}$   $120.32^{\circ}$  และ  $120.32^{\circ}$  ตามลำดับ และที่อัตราการไหล 1000 ล./ชม. วัดค่ามุมสัมผัสได้  $135.87^{\circ}$   $129.78^{\circ}$   $117.64^{\circ}$   $119.22^{\circ}$   $118.02^{\circ}$  และ  $110.64^{\circ}$  ตามลำดับ ทั้งนี้จากกราฟ (รูปที่ 4.12) แสดงให้เห็นค่ามุมสัมผัสเริ่มต้นหรือมุมสัมผัสบนตะแกรงที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวซึ่งมีค่าเท่ากับ  $118.92^{\circ}$  ทำให้สังเกตได้ว่าการทดลองที่ควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่ 500 และ 750 ล./ชม. ส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสบนพื้นผิวตะแกรงลดลงจนใกล้เคียงกับค่ามุมสัมผัสเริ่มต้นในวันที่ 10 ของการทดลอง ในขณะที่การทดลองที่ควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่ 1000 ล./ชม. จะส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสบนพื้นผิวตะแกรงลดลงจนใกล้เคียงกับค่ามุมสัมผัสเริ่มต้นในวันที่ 3 ของการทดลอง

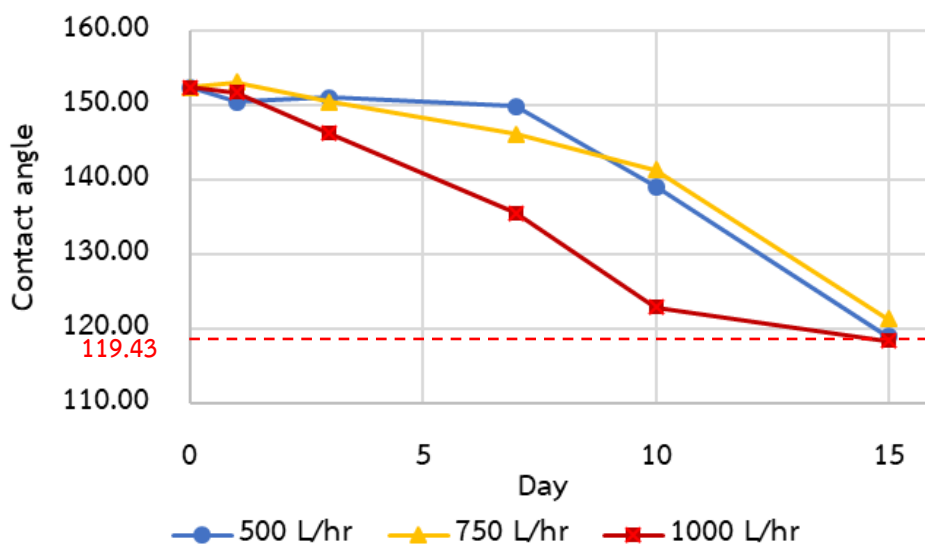
จากผลการทดลองข้างต้นทำให้ได้ข้อสรุปว่าการควบคุมอัตราการไหลของน้ำในการเดินระบบหน่วยแยกตะกอนเพื่อใช้กับน้ำเสียจากการเลี้ยงสัตว์น้ำที่ 750 ล./ชม. เหมาะสมกับการใช้ตะแกรงที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวทั้งสองวิธีมากที่สุด ทั้งนี้ตะแกรงทั้งสองชนิดได้แก่ ตะแกรงที่สังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และแทรกด้วยสเตียเรตไอออน และตะแกรงที่พื้นเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโน มีอายุการใช้งานไม่เกิน 10 และ 15 วันตามลำดับ



รูปที่ 4.12 ค่ามุมสัมผัสบนพื้นผิวตะแกรงที่สังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ และแทรกด้วยสเตรตไอออนหลังการทดสอบอัตราการไหลของน้ำที่ 500 750 และ 1000 ล./ชม.

ในขณะที่การทดสอบกับตะแกรงที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโนโดยควบคุมอัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 500 ล./ชม. สามารถวัดค่ามุมสัมผัสของตะแกรงกรองที่ใช้งานเป็นระยะเวลา 0 1 3 7 10 และ 15 วัน ได้เท่ากับ 152.45° 150.44° 151.09° 149.89° 139.11° และ 146.28° ตามลำดับ ที่อัตราการไหล 750 ล./ชม. วัดค่ามุมสัมผัสได้ 152.45° 153.14° 150.46° 146.12° 141.34° และ 144.05° ตามลำดับ และที่อัตราการไหล 1000 ล./ชม. วัดค่ามุมสัมผัสได้ 152.45° 151.76° 146.28° 135.56° 122.92° และ 125.12° ตามลำดับ ทั้งนี้จากกราฟ (รูปที่ 4.13) แสดงให้เห็นค่ามุมสัมผัสเริ่มต้นหรือมุมสัมผัสบนตะแกรงที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวซึ่งมีค่าเท่ากับ 119.43° ทำให้สังเกตได้ว่าการทดลองที่ควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่ 500 และ 750 ล./ชม. ส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสบนพื้นผิวตะแกรงลดลงจนใกล้เคียงกับค่ามุมสัมผัสเริ่มต้นในวันที่ 15 ของการทดลอง ในขณะที่การทดลองที่ควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่ 1000 ล./ชม. จะส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสบนพื้นผิวตะแกรงลดลงจนใกล้เคียงกับค่ามุมสัมผัสเริ่มต้นในวันที่ 7 - 10 ของการทดลอง

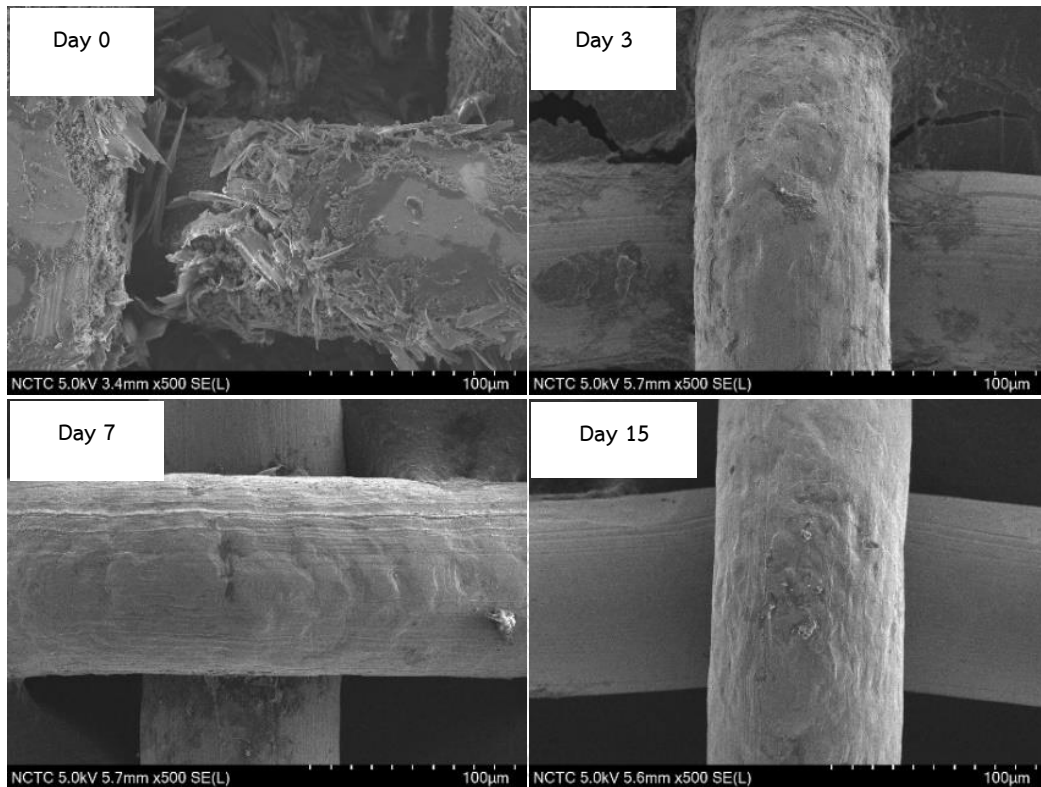




รูปที่ 4.13 ค่ามุมสัมผัสบนพื้นผิวตะแกรงที่พันเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโนหลังการทดสอบ อัตราการไหลของน้ำที่ 500 750 และ 1000 ล./ชม.

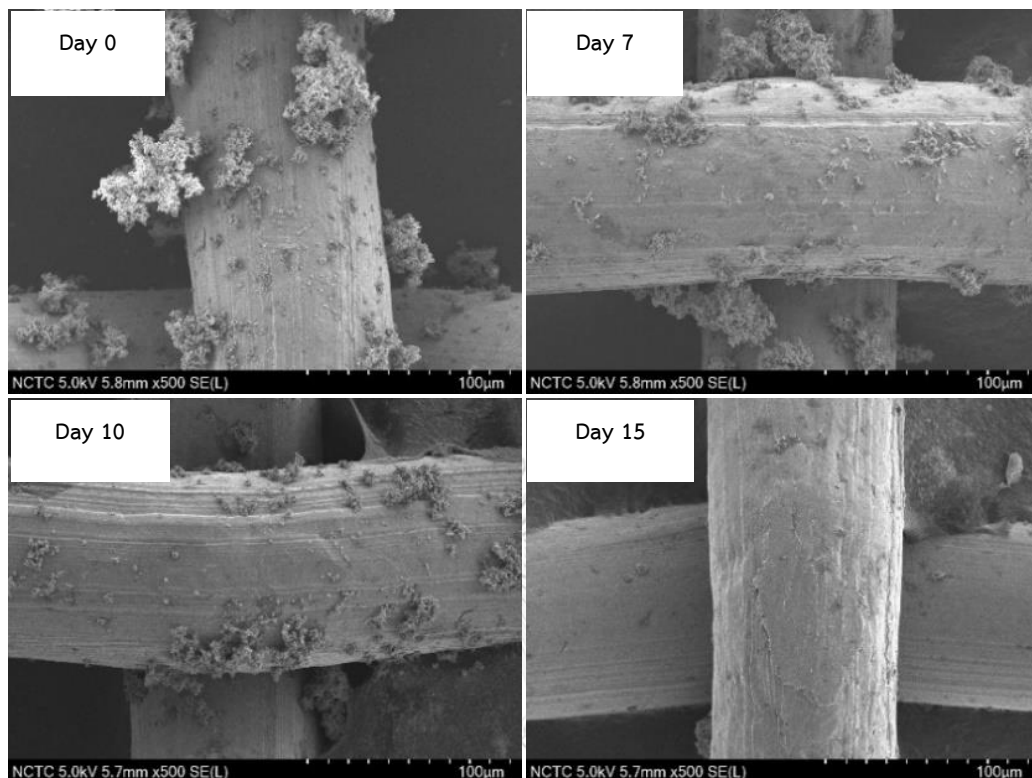
นอกจากนี้ได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะของพื้นผิวตะแกรงที่ถูกใช้ในการทดสอบอัตราการไหลของน้ำด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าตะแกรงที่สังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่แทรกด้วยสเตียเรตไอออน เมื่อกรองน้ำที่อัตราการไหล 750 ล./ชม. เป็นระยะเวลา 3 วัน ส่งผลให้โครงสร้างของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์หลุดออกจากตะแกรงอย่างเห็นได้ชัด และตั้งแต่วันที่ 7 ของการทดลองจะไม่สามารถสังเกตเห็นโครงสร้างดังกล่าวบนพื้นผิวตะแกรง (รูปที่ 4.14)

ในขณะที่ภาพถ่ายของตะแกรงที่พันเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโนที่ถูกใช้ในการทดสอบการไหลของน้ำที่อัตราการไหล 750 ล./ชม. พบว่าสามารถสังเกตเห็นโครงสร้างของสารเคลือบซิลิกาที่ติดอยู่บนพื้นผิวตะแกรงมีปริมาณลดลงเล็กน้อยในวันที่ 10 ของการทดสอบ อย่างไรก็ตามเมื่อทำการทดสอบเป็นระยะเวลา 15 วัน พบว่าไม่สามารถสังเกตเห็นโครงสร้างดังกล่าวได้บนตะแกรง (รูปที่ 4.15)



รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายตะแกรงที่สังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และแทรกด้วยสเตียเรตไอออน  
ที่ระยะเวลาต่างๆ หลังการทดสอบการกรองน้ำ

จากผลการทดสอบข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการเดินระบบกรองน้ำในลักษณะการไหลแบบไหล  
ขวาง เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำมากขึ้นจะทำให้ความเร็วของการไหลในเส้นท่อสูงขึ้น แรงเฉือนที่  
เกิดจากการไหลของน้ำซึ่งแปรผันตรงกับความเร็วน้ำจะส่งผลให้วัสดุเคลือบหลุดออกจากพื้นผิว  
ตะแกรง อย่างไรก็ตามที่ระดับอัตราการไหล 500 750 และ 1000 ล./ชม. ไม่ส่งผลให้ขนาดช่องกรอง  
ของตะแกรงโลหะเกิดการขยายตัวที่ระยะเวลาการเดินระบบ 30 วัน



รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายตะแกรงที่พื้นเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโนที่ระยะเวลาต่างๆ  
หลังการทดสอบการกรองน้ำ

#### 4.2.3 ความเป็นพิษของสารที่ใช้ปรับปรุงพื้นผิว

การวิเคราะห์ปริมาณสารที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวที่อาจสร้างความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม จึงได้ทำการเดินระบบหน่วยแยกตะกอนด้วยน้ำประปาปริมาตร 200 ลิ. เป็นระยะเวลา 30 วัน เพื่อศึกษาการปนเปื้อนของสารเคมีลงสู่แหล่งน้ำ โดยงานวิจัยนี้มีสารเคมีที่ต้องพิจารณาและตรวจสอบความเป็นพิษ ซึ่งจากการวิเคราะห์ปริมาณกรดสเตียริกและสารประกอบสเตียเรตด้วยเครื่อง HPLC และการคำนวณปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิว พบว่าการปรับปรุงพื้นผิวด้วยแนวทางต่างๆ ไม่ทำให้เกิดการปนเปื้อนของสารเคมีลงสู่แหล่งน้ำเกินค่ามาตรฐาน (ตารางที่ 4.1)

ตารางที่ 4.1 ปริมาณของสารเคมีที่เป็นพิษเทียบกับสัตว์ทดลองและที่ตรวจวัดได้

สารเคมี	LD <sub>50</sub>	LC <sub>50</sub>	การปนเปื้อน
Stearic Acid	4,600 มก./กก.	ไม่มีรายงาน	ไม่พบ

Magnesium Stearate	10,000 มก./กก.	ไม่มีรายงาน	ไม่พบ
Calcium Stearate	10,000 มก./กก.	ไม่มีรายงาน	ไม่พบ
Citric Acid	11,700 มก./กก.	440-760 มก./ล./96 ชม.	น้อยกว่า 40 มก./ล.
Sodium Citrate	5,400 มก./กก.	18,000 – 32,000 มก./ล./96 ชม.	น้อยกว่า 40 มก./ล.
Silica	5,000 มก./กก.	5,000 มก./ล./96 ชม.	น้อยกว่า 4 มก./ล.

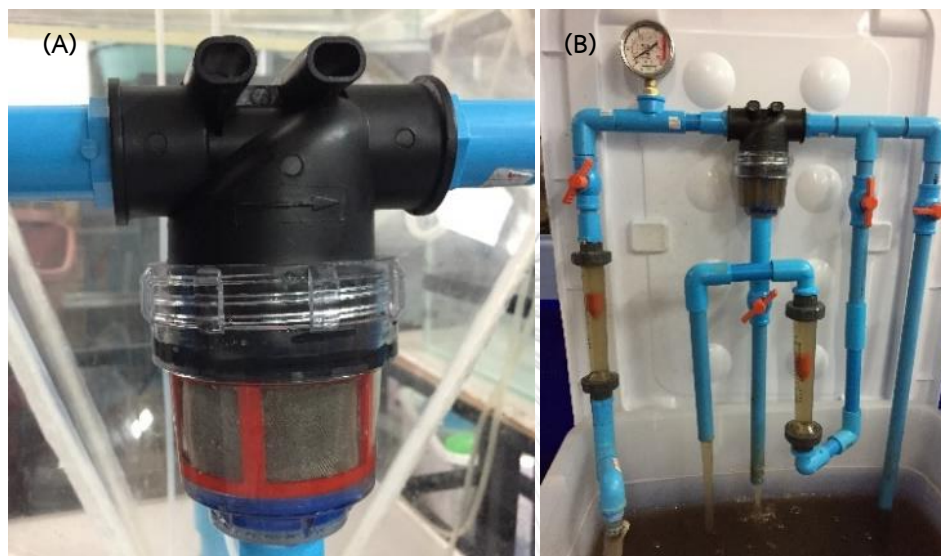
#### 4.3 การประยุกต์ใช้หน่วยแยกตะกอนกับน้ำเสียจากการเลี้ยงสัตว์น้ำ

การทดลองนี้เป็นการทดสอบการทำงานของหน่วยแยกตะกอนซึ่งได้มีการติดตั้งตะแกรงที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวเพื่อช่วยป้องกันหรือลดปริมาณการเกาะติดของฟิล์มอินทรีย์ โดยทำการเดินระบบแยกตะกอนในน้ำเสียที่ได้จากการเลี้ยงสัตว์น้ำให้ไหลเข้าหน่วยแยกตะกอนด้วยอัตราการไหล 750 ล./ชม. และออกแบบระบบให้เป็นการกรองแบบไหลขวาง โดยควบคุมให้น้ำไหลออกจากหน่วยแยกตะกอนได้ 2 ทาง ดังรูปที่ 3.10 ได้แก่ น้ำที่ไหลผ่านช่องกรองและน้ำที่ไม่ไหลผ่านช่องกรอง โดยน้ำที่ไหลผ่านช่องกรองจะถูกควบคุมให้อัตราการไหลเริ่มต้นที่ 700 ล./ชม. จากนั้นเดินระบบด้วยเครื่องสูบน้ำอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 11 ชม. และหยุดการเดินระบบเป็นเวลา 1 ชม. เพื่อพักการทำงานของเครื่องสูบน้ำ โดยแบ่งหน่วยแยกตะกอนออกเป็น 3 ชุดทดลอง ได้แก่ ชุดที่ 1 หน่วยแยกตะกอนที่ติดตั้งตะแกรงโลหะ (Bare mesh) ชุดที่ 2 หน่วยแยกตะกอนที่ติดตั้งตะแกรงโลหะที่สังเคราะห์เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และแทรกด้วยสเต็มเรตไอออน (LDH/SA) และชุดที่ 3 หน่วยแยกตะกอนที่ติดตั้งตะแกรงโลหะที่พันเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโน (SNP) ทั้งนี้ได้ทำการตรวจวัดพารามิเตอร์รวมทั้งรวบรวมผลการทดลองต่างๆ ดังต่อไปนี้

##### 4.3.1 การติดตั้งหน่วยแยกตะกอน

ทำการติดตั้งตะแกรงที่ปรับปรุงพื้นผิวและผ่านการประเมินประสิทธิภาพการใช้งานเข้ากับหน่วยแยกตะกอน ได้แก่ ตะแกรงที่สังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และแทรกด้วยสเต็มเรตไอออนขนาดช่องกรอง 150 ไมโครเมตร และตะแกรงที่พันเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโนความหนา 1 ชั้น (รูปที่ 4.16) โดยตะแกรงตัวอย่างจะถูกติดตั้งอยู่ภายในตัวกรองซึ่งมีพื้นที่การกรองเท่ากับ 92 ตร.ชม. ทั้งนี้ตัวกรองถูกออกแบบมาให้เป็นกรองแบบไหลขวาง นอกจากนี้ยังได้ทำการติดตั้งเครื่องวัดอัตราการไหลไว้ที่ตำแหน่งก่อนและหลังผ่านตัวกรองรวมทั้งเกจวัดแรงดันที่ถูกติดตั้งไว้ที่

ตำแหน่งก่อนผ่านตัวกรองเพื่อใช้ประเมินการอุดตันของตะแกรงในขั้นต้น อย่างไรก็ตามหน่วยแยกตะกอนดังกล่าวถูกออกแบบเพื่อใช้สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพการป้องกันการเกาะติดของฟิล์มอินทรีย์เป็นหลัก ดังนั้นจึงได้ทำการติดตั้งช่องระบายตะกอนออกจากตัวกรองเพื่อให้เกิดการหมุนเวียนของน้ำเสียในระบบตลอดเวลา



รูปที่ 4.16 (A) ตัวกรองที่ติดตั้งตะแกรงที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว, (B) การติดตั้งหน่วยแยกตะกอนเข้ากับระบบแยกตะกอนในน้ำเสียจากการเลี้ยงสัตว์น้ำ

#### 4.3.2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์น้ำเสีย

- คุณภาพน้ำทั่วไป

ทำการตรวจวัดคุณภาพน้ำ (รูปที่ 4.17) พบว่าลักษณะทางกายภาพของน้ำเสียเริ่มต้นมีค่าออกซิเจนละลาย พีเอช ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด การนำไฟฟ้า และปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดเท่ากับ 4.86 มก./ล. 8.18 372 มก./ล. 370 ไมโครซีเมนส์/ซม. และ 23.10 มก./ล. ตามลำดับ และเมื่อทำการเดินระบบแยกตะกอนเป็นระยะเวลา 30 วัน พบว่าค่าออกซิเจนละลายของทั้งสามชุดทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 4.8 – 6.9 มก./ล. ตลอดการทดลองและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $5.73 \pm 0.59$  มก./ล. ทั้งนี้ได้มีการเติมอากาศในระบบตลอดระยะเวลาการทดลองเพื่อจำลองระบบให้มีค่าปริมาณออกซิเจนละลายใกล้เคียงกับระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำทั่วไป นอกจากนี้ทั้งสามชุดการทดลองมีค่าพีเอชใกล้เคียงกันตลอดการทดลองโดยจากการตรวจวัดพีเอชมีค่าอยู่ในช่วง 8.1 – 8.7 และมีค่าเฉลี่ย

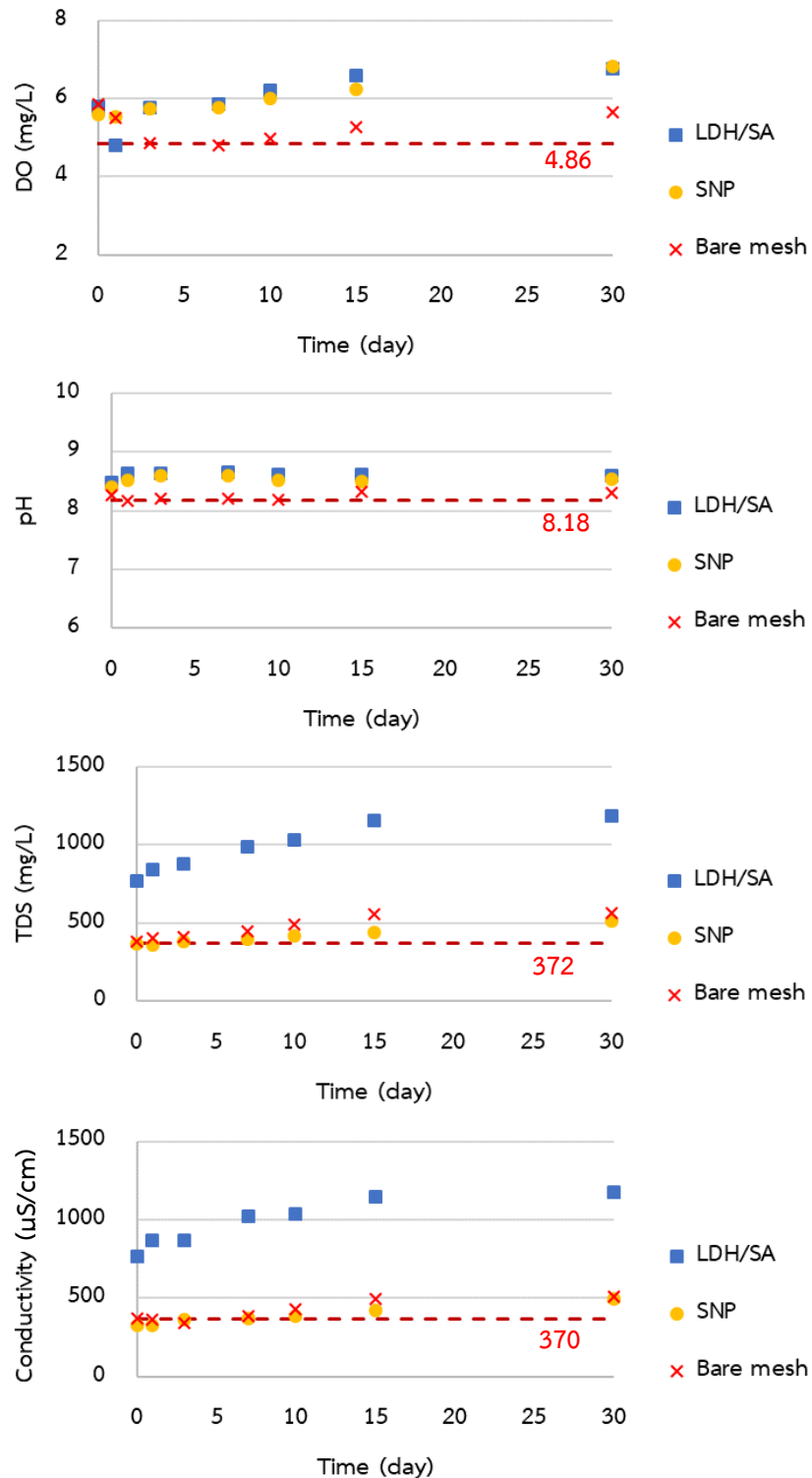
เท่ากับ  $8.46 \pm 0.17$  ในขณะที่เมื่อพิจารณาปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมดและค่าการนำไฟฟ้าพบว่า ทั้งสามชุดการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่วันแรกของการเดินระบบและเริ่มมีค่าคงที่หลังจากวันที่ 15 ของการเดินระบบ แต่จะสังเกตว่าชุดการทดลองที่ 2 ซึ่งหน่วยแยกตะกอนมีการติดตั้งตะแกรงที่สังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์มีค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมดและค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าอีกสองชุดการทดลองอย่างเห็นได้ชัดตั้งแต่วันแรกของการเดินระบบ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากสารที่ใช้ปรับปรุงพื้นผิวเกิดการชะโดยน้ำที่ใช้เดินระบบและสารเคมีบางส่วนได้เกิดการเปลี่ยนรูปไปเป็นสารละลาย เช่น สเตียเรตไอออน ซึ่งส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าและปริมาณของแข็งละลายเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเดินระบบ ทั้งนี้เนื่องจากการออกแบบการทดลองให้น้ำเวียนเข้าอยู่ในระบบทำให้ปริมาณไอออนเกิดการสะสมอยู่ในระบบและเริ่มคงที่ในวันที่ 15 ถึง 30 ของการเดินระบบ ซึ่งอาจเป็นการยืนยันว่าสารที่ใช้ปรับปรุงพื้นผิวตะแกรง (LDH/SA) ถูกชะล้างออกจากพื้นผิวตะแกรงจนหมด ณ เวลาดังกล่าว แต่สำหรับอนุภาคซิลิกาขนาดนาโนที่สังเคราะห์อยู่บนพื้นผิวตะแกรงสามารถถูกชะออกจากพื้นผิวตะแกรงไปอยู่ในรูปของแข็งที่ไม่ละลายน้ำจึงไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าการนำไฟฟ้าและปริมาณของแข็งละลายทั้งหมด และในส่วนของปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดพบว่าตลอดระยะเวลาการเดินระบบของทั้งสามชุดการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 9.8 – 16.5 มก./ล. และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $12.91 \pm 2.73$  มก./ล. ซึ่งการที่ค่าดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากอาจเกิดจากการที่อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์เกิดขึ้นได้น้อยเนื่องจากความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเริ่มต้นในระบบมีค่าค่อนข้างต่ำ อีกทั้งการออกแบบให้เกิดการหมุนเวียนของน้ำเสียตลอดเวลาด้วยเครื่องสูบน้ำอาจส่งผลให้ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเพิ่มขึ้นจากการเปลี่ยนรูปตะกอนอินทรีย์ในเชิงกายภาพ

- ปริมาณตะกอนแขวนลอย

ทำการวิเคราะห์ปริมาณตะกอนแขวนลอยในน้ำเสียเริ่มต้นพบว่ามีความเข้มข้นเท่ากับ  $482.22 \pm 23.41$  มก./ล. จากการวิเคราะห์การกระจายตัวของตะกอนแขวนลอย (รูปที่ 4.18) พบว่าการกระจายตัวที่ร้อยละ 50 โดยปริมาตร (Dv50) อนุภาคตะกอนมีขนาด 60.1 ไมโครเมตร และการกระจายตัวที่ร้อยละ 90 โดยปริมาตร (Dv90) อนุภาคตะกอนมีขนาด 145 ไมโครเมตร อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเดินระบบแยกตะกอนพบว่าตะกอนแขวนลอยในน้ำเสียของการทดลองทั้งสามชุดมีค่าลดลงเนื่องจากเกิดการตกตะกอนกองอยู่บริเวณมุมอับที่กั้นถังและมีตะกอนบางส่วนที่อยู่รวมกับ

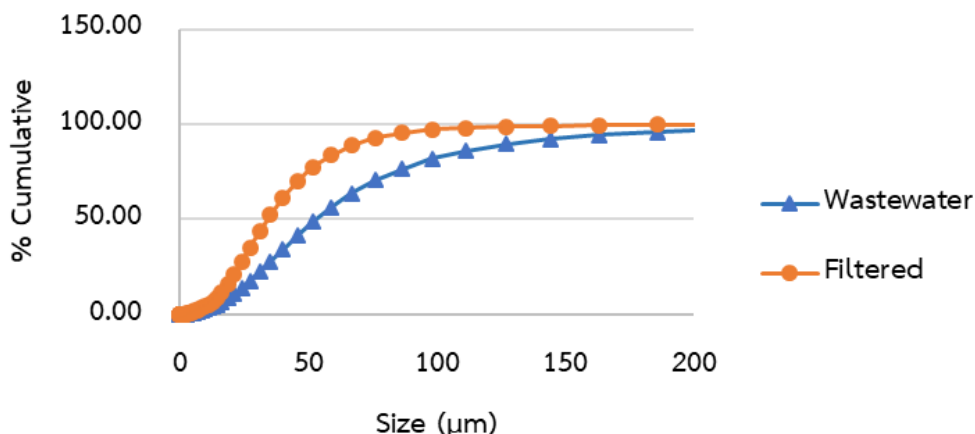
ฟองอากาศที่ผิวน้ำซึ่งเกิดจากระบบการเติมอากาศ (รูปที่ 4.19) ทั้งนี้หน่วยแยกตะกอนชุดที่ 1 สามารถแยกตะกอนได้ร้อยละ 53 – 65 ตลอดระยะเวลาการเดินระบบ หน่วยแยกตะกอนชุดที่ 2 แยกตะกอนได้ร้อยละ 38 – 60 ตลอดระยะเวลาเดินระบบ และหน่วยแยกตะกอนชุดที่ 3 แยกตะกอนได้ร้อยละ 62 – 70 ตลอดระยะเวลาเดินระบบ การกระจายตัวของตะกอนแขวนลอยที่ร้อยละ 50 โดยปริมาตร อนุภาคตะกอนมีขนาดเล็กถึงโดยมีค่าเท่ากับ 38.8 ไมโครเมตร และการกระจายตัวที่ร้อยละ 90 โดยปริมาตร อนุภาคตะกอนมีขนาดเท่ากับ 78.6 ไมโครเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 100 ไมโครเมตร ได้ถูกแยกออกจากน้ำเสียโดยกระบวนการแยกตะกอน ทั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์การกระจายของตะกอนเฉพาะน้ำเสียเริ่มต้นและน้ำเสียที่ผ่านการกรองด้วยหน่วยแยกตะกอนชุดที่ 1 เนื่องจากขนาดช่องกรองของตะแกรงทั้งสามชุดการทดลองมีขนาดเท่ากันรวมทั้งการทดลองทั้งสามชุดการทดลองเป็นการเดินระบบโดยใช้น้ำเสียจากแหล่งเดียวกัน





รูปที่ 4.17 ลักษณะทางกายภาพของน้ำเสียจากการเลี้ยงสัตว์น้ำ ได้แก่ ออกซิเจนละลาย ฟิเอช ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด และการนำไฟฟ้า (เส้นประแสดงค่าเริ่มต้นในแต่ละพารามิเตอร์)

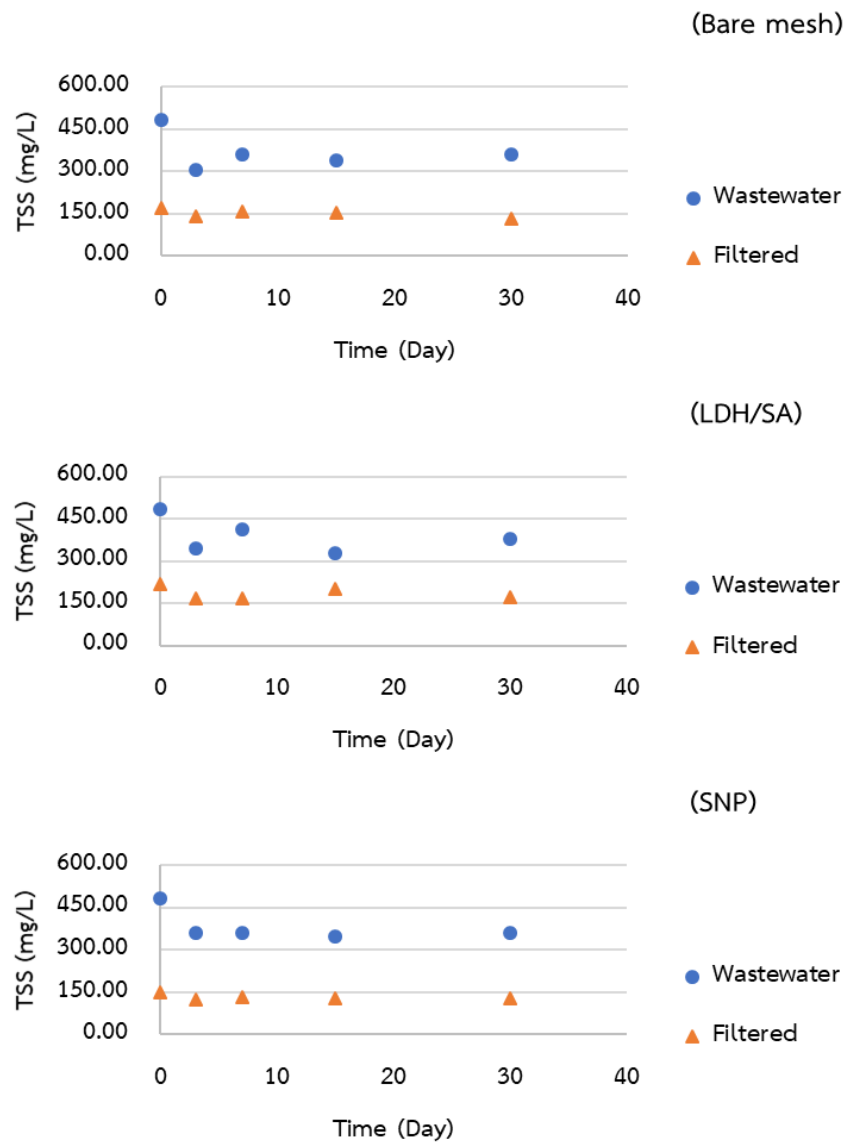




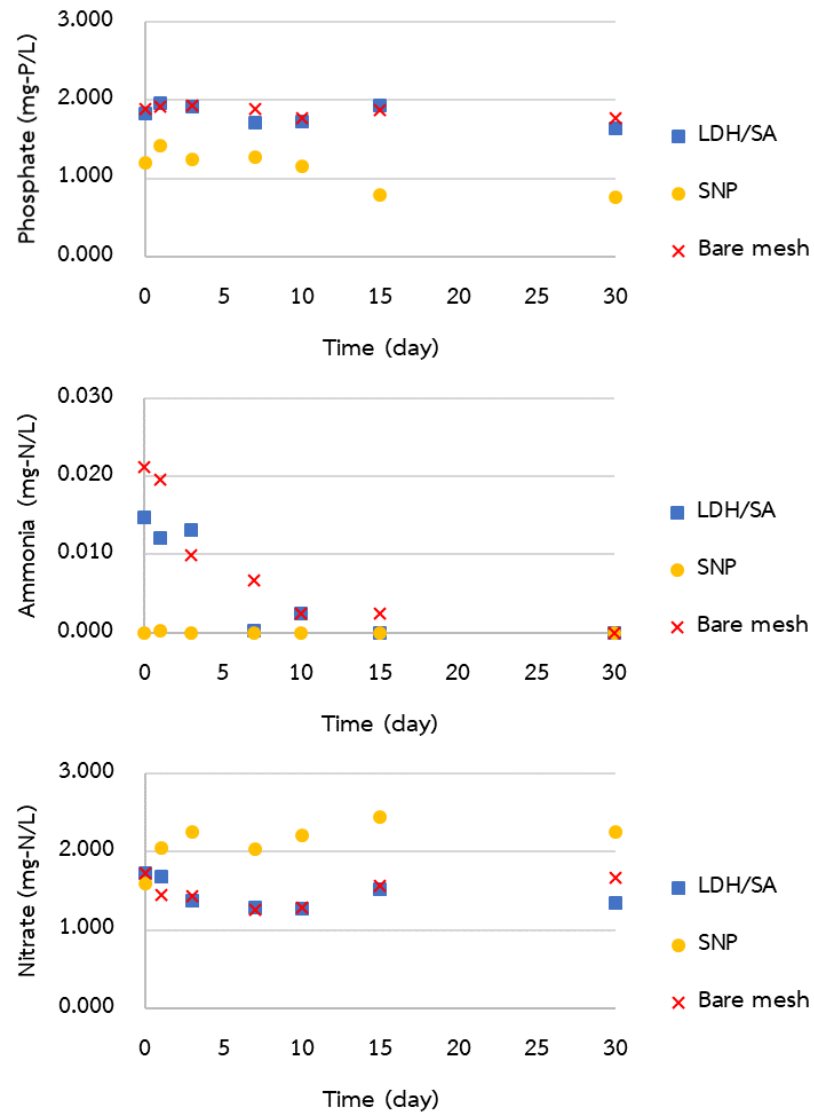
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงการกระจายตัวของขนาดตะกอนในน้ำเสียก่อนและหลังการกรอง

- ปริมาณธาตุอาหาร

ทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารได้แก่ ฟอสเฟตและสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน จากผลการทดลอง (รูปที่ 4.20) พบว่าปริมาณฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปสารประกอบฟอสเฟตมีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 1.63 – 1.96 มก. ฟอสฟอรัส/ล. ที่การทดลองชุดที่ 1 (Bare mesh) และ 2 (LDH/SA) ในขณะที่การทดลองชุดที่ 3 (SNP) มีค่าความเข้มข้นของฟอสเฟตลดลงมาอยู่ในช่วง 0.76 – 1.42 มก. ฟอสฟอรัส/ล. ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการทดลองชุดที่ 3 เริ่มดำเนินการช้ากว่าการทดลองชุดที่ 1 และ 2 ประมาณ 30 วัน โดยใช้น้ำเสียจากการเลี้ยงสัตว์น้ำแหล่งเดียวกัน ซึ่งระยะเวลาดังกล่าวอาจทำให้ฟอสเฟตบางส่วนถูกรวมเป็นสารประกอบกับตะกอนแขวนลอยในน้ำ ส่วนการวิเคราะห์สารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน ได้แก่ แอมโมเนีย ไนเตรต และไนไตรท์พบว่าปริมาณแอมโมเนียในการทดลองชุดที่ 1 และ 2 มีค่าลดลงจากความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 0.02 มก. ไนโตรเจน/ล. ตามระยะเวลาการเดินระบบ ส่วนการทดลองชุดที่ 3 วัดค่าแอมโมเนียได้ 0 มก. ไนโตรเจน/ล. ตลอดการทดลอง ในขณะที่การวิเคราะห์ปริมาณไนเตรตพบว่าการทดลองชุดที่ 1 และ 2 มีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าความเข้มข้นไนเตรตอยู่ในช่วง 1.26 – 1.73 มก. ไนโตรเจน/ล. และพบว่าความเข้มข้นของไนเตรตในการทดลองชุดที่ 3 มีค่าอยู่ในช่วง 1.5 – 2.5 มก. ไนโตรเจน/ล. ซึ่งสูงกว่าในการทดลองชุดที่ 1 และ 2 โดยมีสาเหตุเดียวกันกับผลการวิเคราะห์ฟอสเฟตที่กล่าวมาข้างต้น อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของไนไตรท์พบว่ามีค่าเท่ากับ 0 มก. ไนโตรเจน/ล. ตลอดการเดินระบบทั้งสามชุดการทดลอง



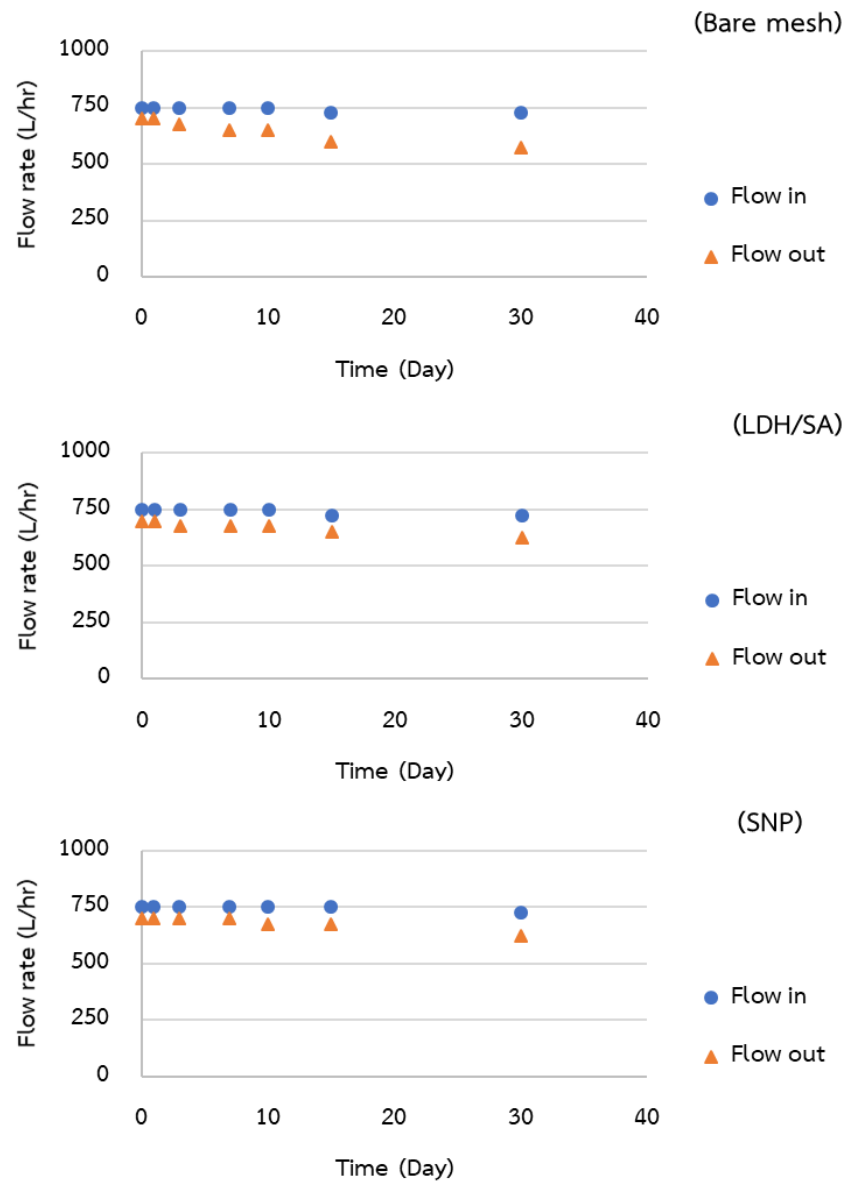
รูปที่ 4.19 ปริมาณตะกอนแขวนลอยในน้ำเสียจากการเลี้ยงสัตว์น้ำและน้ำที่ผ่านการกรอง โดยหน่วยแยกตะกอนทั้งสามชุดการทดลองที่ระยะเวลาต่างๆ



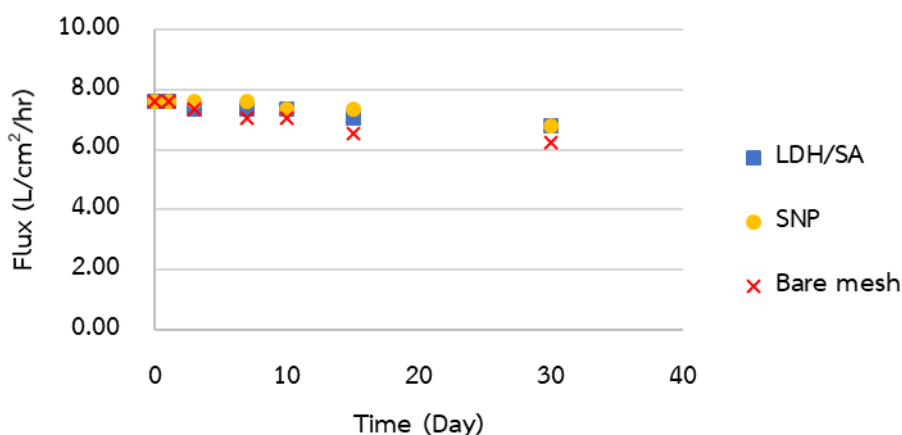
รูปที่ 4.20 ปริมาณธาตุอาหารระหว่างการทดลองแยกตะกอนในน้ำเสียจากการเลี้ยงสัตว์น้ำ ซึ่งประกอบด้วยฟอสเฟตและสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำ

### 4.3.3 ฟลักซ์การกรอง

เดินระบบแยกตะกอนโดยควบคุมให้อัตราการไหลของน้ำขาเข้าที่ 750 ล./ชม. ซึ่งพบว่าช่วงวันที่ 15 – 30 ของการเดินระบบบำบัดการไหลของน้ำขาเข้าของทั้งสามชุดการทดลองมีค่าลดลงอยู่ที่ 725 ล./ชม. ในขณะที่น้ำขาออกจากหน่วยแยกตะกอนเริ่มต้นที่ไหลผ่านช่องกรองวัดค่าอัตราการไหลได้ 700 ล./ชม. จากนั้นได้ทำการติดตามตรวจวัดอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านช่อง กรอง (รูปที่ 4.21) เพื่อคำนวณค่าฟลักซ์การกรองของหน่วยแยกตะกอนที่ติดตั้งตะแกรงชนิดต่างๆ โดยที่ค่าฟลักซ์การกรองคำนวณได้จากอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านตัวกรองต่อพื้นที่รับน้ำทั้งหมดของตะแกรง พบว่าหน่วยแยกตะกอนชุดที่ 1 มีค่าฟลักซ์การกรองลดลงอย่างต่อเนื่องตั้งแต่วันที่ 3 7 15 และ 30 ของการเดินระบบ โดยมีค่าอยู่ที่ร้อยละ 96 93 86 และ 82 ตามลำดับ ในขณะที่หน่วยแยกตะกอนชุดที่ 2 มีค่าฟลักซ์การกรองลดลงในวันที่ 3 15 และ 30 ของการเดินระบบ โดยมีค่าอยู่ที่ร้อยละ 96 93 และ 89 ตามลำดับ และหน่วยแยกตะกอนชุดที่ 3 มีค่าฟลักซ์การกรองลดลงในวันที่ 10 ของการเดินระบบ โดยมีค่าอยู่ที่ร้อยละ 96 และวันที่ 30 ของการทดลองวัดค่าฟลักซ์การกรองได้ร้อยละ 89 (รูปที่ 4.22) ทั้งนี้ค่าฟลักซ์การกรองเริ่มต้นของทั้งสามชุดการทดลองวัดค่าได้ 7.61 ล./ตร.ชม./ชม.



รูปที่ 4.21 อัตราการไหลของน้ำขาเข้าและขาออกจากหน่วยแยกตะกอน



รูปที่ 4.22 ค่าฟลักซ์การกรองของหน่วยแยกตะกอนที่ติดตั้งตะแกรงชนิดต่างๆ ได้แก่ ตะแกรงที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (Bare mesh) ตะแกรงที่สังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และแทรกด้วยสเตรตไอออน (LDH/SA) และตะแกรงที่พันเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโน (SNP)

#### 4.3.4 การป้องกันการเกาะติดของฟิล์มอินทรีย์

การทดลองนี้เป็นการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการป้องกันการเกาะติดของฟิล์มอินทรีย์บนพื้นผิวตะแกรงที่ติดตั้งในหน่วยแยกตะกอนทั้ง 3 ชุดการทดลอง โดยทำการเดินระบบแยกตะกอนในน้ำเสียจากการเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นระยะเวลา 30 วัน และทำการเก็บตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

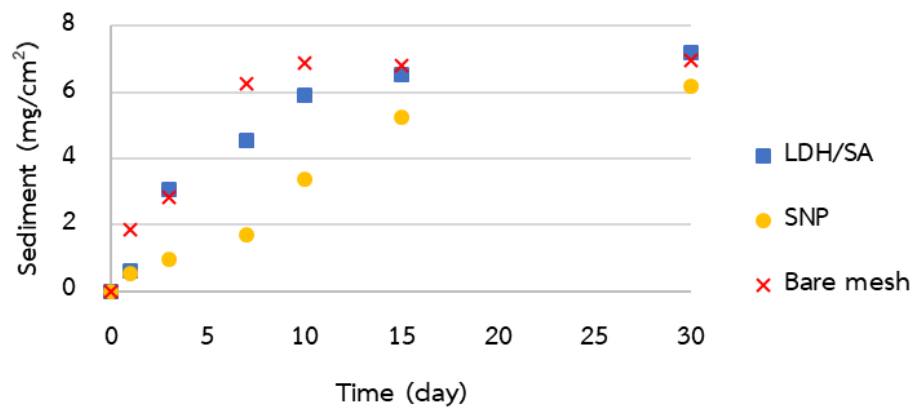
- ปริมาณการสะสมของตะกอนบนตะแกรง

การเกาะติดของฟิล์มอินทรีย์บนพื้นผิวตะแกรงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการสะสมของตะกอน จึงได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณการสะสมของตะกอนบนตะแกรงที่ติดตั้งในหน่วยแยกตะกอนที่ผ่านการเดินระบบกรองน้ำเสียจากการเลี้ยงสัตว์น้ำซึ่งมีระดับความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยอยู่ในช่วง 450 - 500 มก./ล. จากผลการทดลองพบว่า (รูปที่ 4.24) การทดลองชุดที่ 1 หรือหน่วยแยกตะกอนที่ติดตั้งตะแกรงที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวพบว่าการสะสมของตะกอนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงวันที่ 7 ของการเดินระบบ จากนั้นปริมาณตะกอนที่สะสมบนพื้นผิวตะแกรงจะมีค่าคงที่อยู่ในช่วง 5 - 7 มก./ตร.ซม. จนถึงวันที่ 30 ของการเดินระบบ โดยคิดจากปริมาณตะกอนทั้งหมดที่สะสมอยู่บนพื้นผิวตะแกรงต่อพื้นที่รับน้ำทั้งหมดของตะแกรง ในขณะที่การทดลองชุดที่ 2 และ 3

พบว่า การสะสมของตะกอนเริ่มเข้าสู่ระดับคงที่ในช่วง 5 – 7 มก./ตร.ซม. ในวันที่ 10 และ 15 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามจากการติดตามตรวจวัดค่าแรงดันภายในท่อบริเวณด้านหน้าตัวกรองพบว่าแรงดันมีค่าคงที่ในช่วง 0.26-0.30 บาร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณการสะสมของตะกอนบนพื้นผิวตะแกรงไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันภายในท่ออย่างมีนัยสำคัญตลอดการเดินระบบจากการทดลองทั้งสามชุด ทั้งนี้หากสังเกตด้วยตาเปล่าจะเห็นว่าตะกอนมีการสะสมอยู่ทั่วพื้นที่ตะแกรงกรองเมื่อสิ้นสุดการเดินระบบแยกตะกอน (รูปที่ 4.23) ทั้งนี้การปรับปรุงพื้นผิวตะแกรงกรองเป็นการปรับปรุงให้พื้นผิวมีสมบัติความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น โดยที่การเพิ่มขึ้นของสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวส่งผลให้พลังงานที่พื้นผิว (Surface free energy) มีค่าต่ำลง (Wenzel, 1936) น้ำที่ไหลผ่านพื้นผิวที่มีพลังงานต่ำจะทำให้เกิดแรงเฉือนมากกว่าน้ำที่ไหลผ่านพื้นผิวที่มีพลังงานสูง เนื่องจากพื้นผิวที่มีพลังงานสูงจะมีแรงเสียดทานกระทำกับน้ำที่ไหลผ่านพื้นผิว ซึ่งแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะช่วยให้เกิดการชะอนุภาคหรือตะกอนที่ติดบนตะแกรงให้หลุดออกไปจากพื้นผิวตะแกรง ในขณะเดียวกันเมื่อเดินระบบไประยะเวลาหนึ่งวัสดุเคลือบที่รับแรงเฉือนดังกล่าวก็สามารถหลุดออกจากพื้นผิวตะแกรงและส่งผลให้พื้นผิวมีพลังงานสูงขึ้น น้ำจึงไหลผ่านพื้นผิวตะแกรงโดยมีแรงหน่วงทำให้การชะตะกอนที่พื้นผิวทำได้น้อยลง จนกระทั่งเกิดการสะสมตะกอนบนพื้นผิวในที่สุด (Wisdom และคณะ, 2013) นอกจากนี้ข้อมูลในแผนภูมิ (รูปที่ 4.25) ยังแสดงให้เห็นสัดส่วนของปริมาณของแข็งระเหยได้ (Total volatile solid, TVS) ต่อปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solid, TS) ในตะกอนที่สะสมอยู่บนพื้นผิวตะแกรงชนิดต่างๆ ซึ่งพบว่าตะกอนที่สะสมบนตะแกรงทั้งสามชุดการทดลองมีองค์ประกอบเป็นของแข็งระเหยได้ในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกันตลอดระยะเวลาการเดินระบบโดยมีค่าอยู่ที่ร้อยละ 76 – 88 ซึ่งค่าดังกล่าวจะถูกใช้เป็นตัวแทนของค่า MLVSS (Mixed liquor volatile suspended solids) เพื่อคำนวณปริมาณสารพอลิเมอร์ (EPS) และปริมาณฟิล์มอินทรีย์ต่อไป

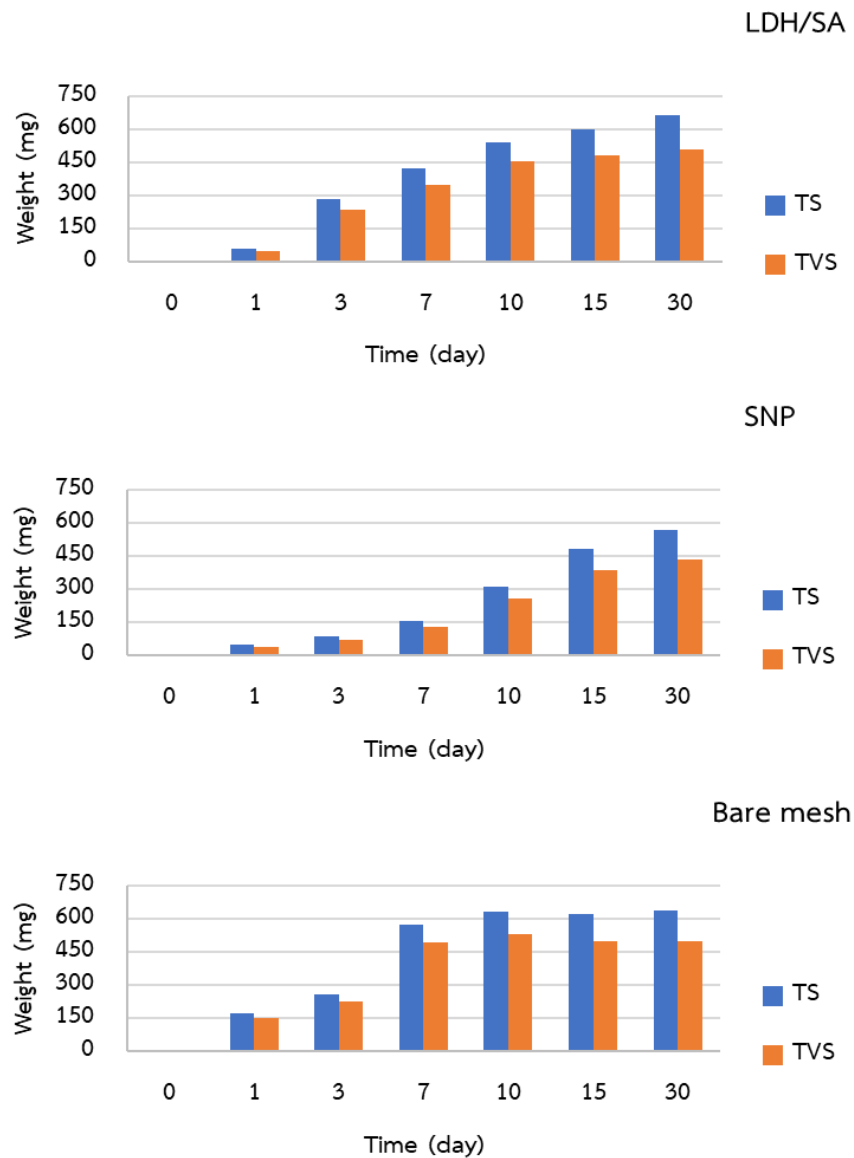


รูปที่ 4.23 การสะสมของตะกอนบนตัวอย่างตะแกรงกรองที่ผ่านการเดินระบบเป็นระยะเวลา 30 วัน



รูปที่ 4.24 ปริมาณการสะสมของตะกอนบนตะแกรงชนิดต่างๆ ได้แก่ ตะแกรงที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (Bare mesh) ตะแกรงที่สังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และแทรกด้วยสเต็มเรตไอออน (LDH/SA) และตะแกรงที่พ่นเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโน (SNP)



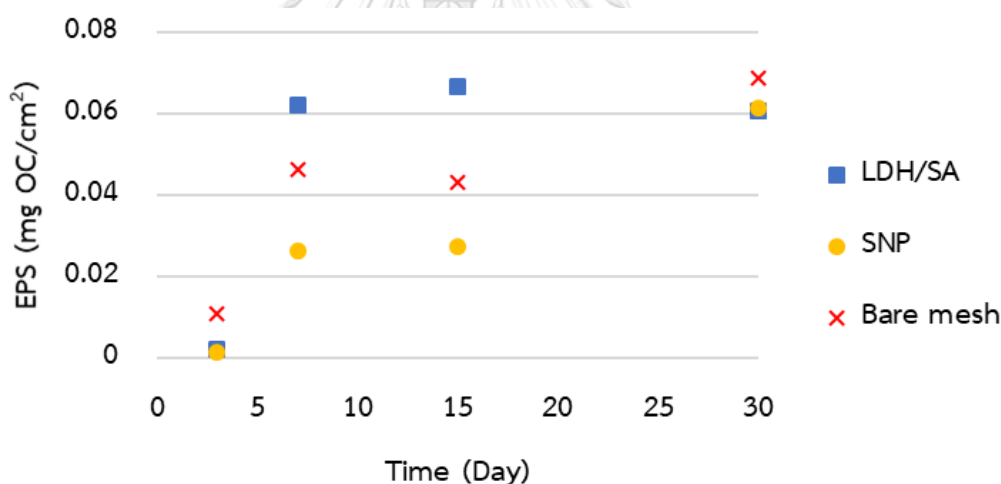


รูปที่ 4.25 สัดส่วนปริมาณของแข็งระเหยได้ (TVS) ต่อปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ที่สะสมบนพื้นผิวตะแกรงกรองชนิดต่างๆ

- การวิเคราะห์ปริมาณฟิล์มอินทรีย์

ในการทดลองนี้เป็นการวิเคราะห์ปริมาณฟิล์มอินทรีย์บนพื้นผิวตะแกรงซึ่งคำนวณจากปริมาณสารพอลิเมอร์หรือ EPS โดยที่ปริมาณ EPS จะรายงานเป็นผลรวมของสารประกอบโปรตีน พอลิแซ็กคาไรด์ และกรดฮิวมิก ในหน่วยมิลลิกรัมคาร์บอนอินทรีย์ต่อพื้นที่รับน้ำทั้งหมดของตะแกรงกรอง ทั้งนี้ได้ทำการเก็บตัวอย่างตะแกรงกรองเพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณฟิล์มอินทรีย์ที่ระยะเวลา 3

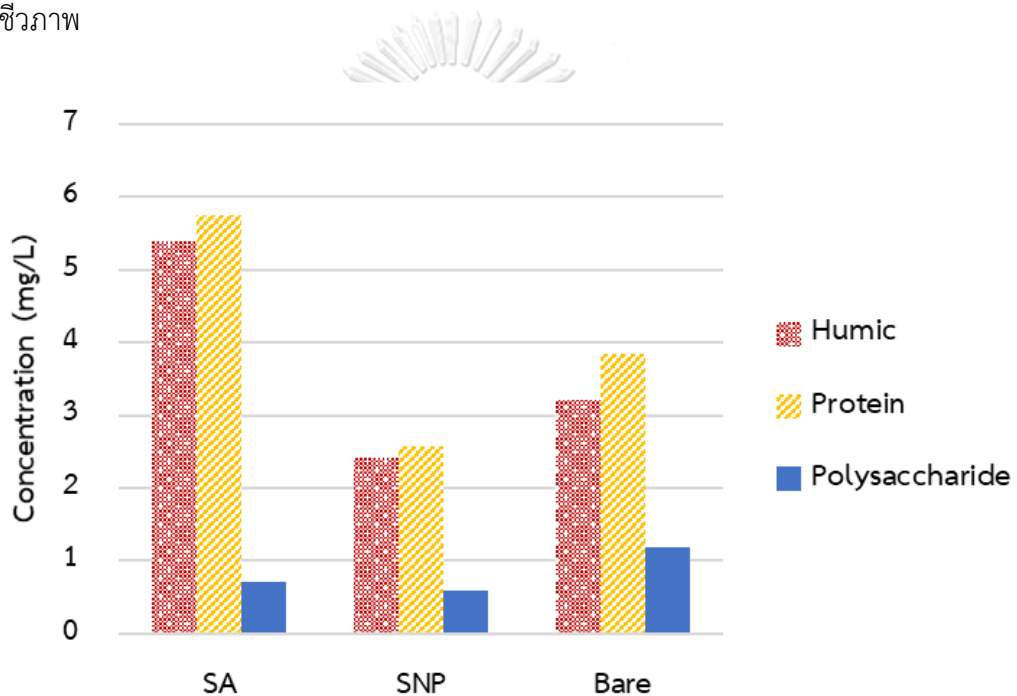
7 15 และ 30 วัน ของการเดินระบบ จากผลการทดสอบ (รูปที่ 4.26) พบว่าในระยะเวลาเดินระบบ 3 วันแรก ปริมาณ EPS บนพื้นผิวของตะแกรงทั้งสามชนิดยังมีค่าไม่เกิน 0.11 มก.คาร์บอนอินทรีย์/ตร.ซม. ในขณะที่การเดินระบบแยกตะกอนช่วง 7 – 15 วันแรก ตะแกรงที่พันเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโนมีปริมาณ EPS อยู่บนพื้นผิวน้อยกว่าตะแกรงที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวและตะแกรงที่สังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และแทรกด้วยสเต็มเรตไอออน โดยมีปริมาณ EPS เฉลี่ยเท่ากับ 0.027 0.045 และ 0.064 มก.คาร์บอนอินทรีย์/ตร.ซม. ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ณ วันที่ 30 ของการเดินระบบปริมาณ EPS บนพื้นผิวของตะแกรงทั้งสามชนิดมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.060 – 0.069 มก.คาร์บอนอินทรีย์/ตร.ซม. โดยเฉพาะอย่างยิ่งในชุดการทดลองที่ 2 ซึ่งติดตั้งตะแกรง LDH/SA พบว่าปริมาณ EPS มีค่าอยู่ในช่วงดังกล่าวและเริ่มคงที่ตั้งแต่ในวันที่ 7 ของการเดินระบบ จึงมีความเป็นไปได้ว่า ณ ค่าดังกล่าวคือขีดความสามารถในการรองรับฟิล์มอินทรีย์ของตะแกรงซึ่งมีพื้นที่รับน้ำคงที่



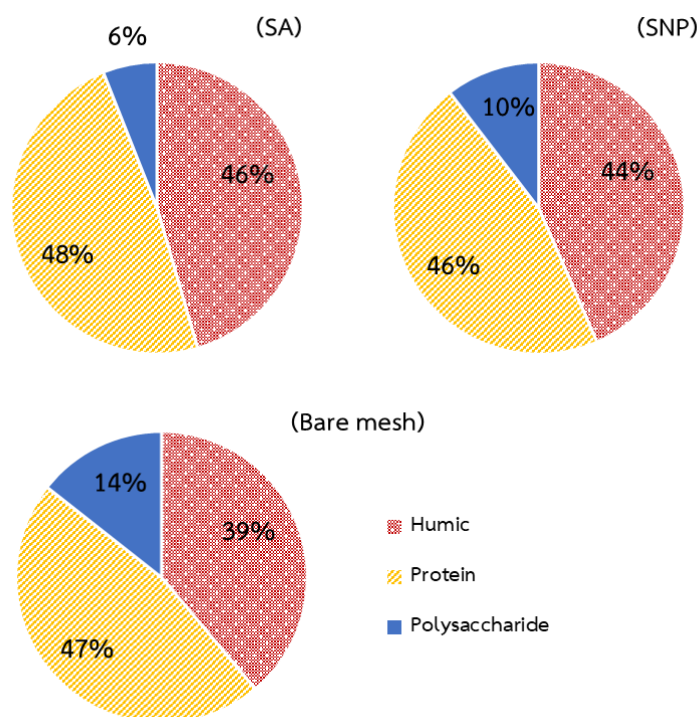
รูปที่ 4.26 ปริมาณสารพอลิเมอร์บนพื้นผิวตะแกรงชนิดต่างๆ ได้แก่ ตะแกรงที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (Bare mesh) ตะแกรงที่สังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และแทรกด้วยสเต็มเรตไอออน (LDH/SA) และตะแกรงที่พันเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโน (SNP)

นอกจากนี้จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของ EPS ซึ่งสกัดได้จากฟิล์มอินทรีย์ที่เกาะติดอยู่บนตะแกรงชนิดต่างๆ (รูปที่ 4.27) แสดงให้เห็นว่าผลการทดลองมีความใกล้เคียงกัน โดยเมื่อพิจารณาที่ตัวอย่างจากตะแกรงที่สังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่แทรกด้วยสเต็มเรตไอออน พบว่าปริมาณกรดฮิวมิก โปรตีน และพอลิแซ็กคาไรด์ มีค่าเท่ากับ 5.39 5.74 และ 0.71 มก./ล.

ในขณะที่ตัวอย่างจากตะแกรงที่พ่นเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโนมีปริมาณกรดฮิวมิก โปรตีน และพอลิแซ็กคาไรด์เท่ากับ 2.42 2.57 และ 0.58 มก./ล. และตัวอย่างจากตะแกรงที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวมีปริมาณกรดฮิวมิก โปรตีน และพอลิแซ็กคาไรด์เท่ากับ 3.20 3.85 และ 1.19 มก./ล. ทั้งนี้จะสังเกตเห็นว่าสัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ ใน EPS ที่วิเคราะห์ได้จากฟิล์มอินทรีย์ที่เกาะติดอยู่บนพื้นผิวตะแกรงทั้งสามชนิดมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยคิดเป็นค่าเฉลี่ยของสัดส่วนของกรดฮิวมิก โปรตีน และพอลิแซ็กคาไรด์ใน EPS ได้ร้อยละ 41.74 47.69 และ 10.57 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Renner และ Weibel (2011) และงานวิจัยของ Heindl และคณะ (2014) ที่รายงานว่าแบคทีเรียจะสร้างโปรตีนขึ้นมาเพื่อใช้ในการยึดเกาะกับพื้นผิวและพัฒนาเป็นกลุ่มฟิล์มชีวภาพ



รูปที่ 4.27 ปริมาณองค์ประกอบต่างๆ ในสารพอลิเมอร์ (EPS) ที่สกัดมาจากฟิล์มอินทรีย์ที่เกาะติดบนพื้นผิวตะแกรงชนิดต่างๆ



รูปที่ 4.28 สัดส่วนขององค์ประกอบต่างๆ ในสารพอลิเมอร์ (EPS) ที่สกัดมาจากฟิล์มอินทรีย์ที่เกาะติดบนพื้นผิวตะแกรงชนิดต่างๆ

จากผลการประยุกต์ใช้หน่วยแยกตะกอนกับน้ำเสียจากระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำ แสดงให้เห็นว่า ตะแกรงที่มีการปรับปรุงพื้นผิวให้มีความขรุขระและสมบัติความไม่ชอบน้ำสูงขึ้นมีส่วนช่วยในการลด การเกาะติดของฟิล์มอินทรีย์และชะลอการสะสมของตะกอนบนพื้นผิวตะแกรง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอายุการ ใช้งานของตะแกรงแต่ละชนิดซึ่งประเมินได้จากความคงทนของวัสดุเคลือบบนพื้นผิวตะแกรง อย่างไรก็ตาม การทดลองนี้เป็นการจำลองระบบแยกตะกอนโดยใช้น้ำเสียหมุนเวียนตลอดระยะเวลาการเดิน ระบบ ซึ่งในการเดินระบบของหน่วยแยกตะกอนในระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำในโรงเรือน จะมีการเติมน้ำเสียเข้าระบบทุกวัน ซึ่งทำให้ปริมาณตะกอนแขวนลอยและสารอินทรีย์ตลอดจนเซลล์ จุลชีพมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา การสะสมของตะกอนและฟิล์มอินทรีย์บนพื้นผิวตะแกรงจะมีการ เพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการเดินระบบจนอาจส่งผลให้เกิดการอุดตันบนตะแกรงได้ง่ายและมีช่วงเวลา การเดินระบบแยกตะกอนจำกัด ดังนั้นตะแกรงที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวจะช่วยชะลอการอุดตันบน พื้นผิวอันเนื่องมาจากการสะสมของฟิล์มอินทรีย์และตะกอนแขวนลอยและสามารถยืดระยะเวลาการ เดินระบบได้ยาวนานยิ่งขึ้น

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ถูกออกแบบมาเพื่อพัฒนาหน่วยแยกตะกอนในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำโดยการปรับปรุงพื้นผิวตะแกรงกรองโลหะเพื่อป้องกันการเกาะติดของฟิล์มอินทรีย์และเพิ่มอายุการใช้งานของหน่วยแยกตะกอน โดยแบ่งการทดลองออกเป็นสามช่วงการทดลอง ทั้งนี้การทดลองในช่วงแรกเป็นการศึกษาแนวทางการปรับปรุงพื้นผิวตะแกรงโลหะ ช่วงที่สองเป็นการทดสอบประสิทธิภาพการแยกตะกอนของตะแกรงที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยแนวทางต่างๆ และการทดลองช่วงที่สามจะเป็นการศึกษาการป้องกันการเกาะติดของฟิล์มอินทรีย์บนพื้นผิวตะแกรงกรอง ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

##### - การปรับปรุงพื้นผิวตะแกรง

ตะแกรงโลหะที่มีความเหมาะสมสำหรับการปรับปรุงพื้นผิวในงานวิจัยนี้พบว่ามีความสูงช่องกรอง 150 ไมโครเมตร เนื่องจากเป็นช่องกรองขนาดเล็กที่สุดที่ผ่านการทดสอบแล้วว่า วัสดุหรือสารที่สังเคราะห์ลงบนพื้นผิวตะแกรงไม่ส่งผลกระทบต่อพื้นที่การไหลของน้ำ ในขณะที่ตะแกรงที่มีความสูงช่องกรองน้อยกว่า 150 ไมโครเมตร เมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวพบว่าสารที่สังเคราะห์ลงบนพื้นผิวตะแกรงมีผลทำให้ขนาดช่องกรองเล็กลงซึ่งจะทำให้ตะแกรงเกิดการอุดตันได้ง่ายและมีอายุการใช้งานต่ำลง ในส่วนของตะแกรงที่สังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์เป็นการสังเคราะห์โครงสร้างสารประกอบโลหะโดยใช้กระบวนการตกตะกอนร่วมของแมกนีเซียมและอะลูมิเนียมที่อัตราส่วน 3 ต่อ 1 เพื่อให้เกิดโครงสร้างเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์บนพื้นผิวตะแกรง และทำการแทรกสเต็มเรตไอออนโดยใช้กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนที่อุณหภูมิ 60 °C จะทำให้พื้นผิวมีสมบัติความไม่ชอบน้ำสูงขึ้นโดยวัดค่ามุมสัมผัสได้ประมาณ 136° จากเดิมที่มุมสัมผัสของตะแกรงโลหะเริ่มต้นมีค่าประมาณ 120° ทั้งนี้ความร้อนและแรงดันมีส่วนช่วยในการเร่งปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออนให้เกิดขึ้นได้เร็วรวมทั้งระยะเวลา ขนาดภาชนะ และความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยาก็เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการสังเคราะห์โครงสร้างเพื่อปรับปรุงพื้นผิวตะแกรงโลหะเช่นกัน ลำดับต่อมาการสังเคราะห์ชั้นเล

เยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่แทรกด้วยซีเตรตไอออน ไม่สามารถใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงพื้นผิวตะแกรงกรองเพื่อใช้กับระบบเลี้ยงสัตว์น้ำได้เนื่องจากซีเตรตที่แทรกตัวอยู่ในชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์มีปริมาณน้อยกว่าค่าที่รายงานว่าสามารถช่วยยับยั้งการเกิดฟิล์มชีวภาพได้ นอกจากนี้การปรับปรุงพื้นผิวตะแกรงด้วยการพ่นเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโนที่ความหนา 1 ชั้น จะทำให้พื้นผิวมีสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดโดยวัดค่ามุมสัมผัสได้ประมาณ  $152^{\circ}$  อย่างไรก็ตามการพ่นเคลือบอนุภาคซิลิกาขนาดนาโนด้วยจำนวนชั้นที่มากกว่า 1 ชั้น จะทำให้พื้นผิวมีค่ามุมสัมผัสลดลงรวมทั้งก่อให้เกิดชั้นเคลือบที่หนาเกินไปจนทำให้ช่องกรองมีขนาดเล็กลง และอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการไหลผ่านของน้ำ ทั้งนี้การปรับปรุงพื้นผิวตะแกรงเพื่อเพิ่มสมบัติความไม่ชอบน้ำทั้งสองแนวทาง ได้แก่ การสังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และแทรกด้วยซีเตรตไอออน และการพ่นเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโนจะส่งผลให้พื้นที่ที่น้ำสามารถไหลผ่านได้ลดลงจากตะแกรงปกติร้อยละ 5.92 และ 3.47 ตามลำดับ

*- การทดสอบการทำงานของตะแกรงที่ปรับปรุงพื้นผิว*

การเดินระบบแยกตะกอนด้วยอัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 750 ล./ชม. จะทำให้ตะแกรงที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ด้วยการสังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และแทรกด้วยซีเตรตไอออน และการพ่นเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโนสามารถรักษาสมบัติความไม่ชอบน้ำได้สูงสุด 10 และ 15 วัน ตามลำดับ ทั้งนี้สารที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นซึ่งถูกชะล้างโดยน้ำที่ใช้เดินระบบมีการปนเปื้อนไม่เกินกำหนดของค่ามาตรฐาน

*- การประยุกต์ใช้หน่วยแยกตะกอนกับน้ำเสียจากการเลี้ยงสัตว์น้ำ*

การประยุกต์ใช้หน่วยแยกตะกอนที่ติดตั้งตะแกรงที่พ่นเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโนส่งผลกระทบต่อการพัฒนากระบวนการแยกตะกอนในเชิงบวก โดยตลอดระยะเวลาการเดินระบบหน่วยแยกตะกอนมีประสิทธิภาพในการแยกตะกอนเฉลี่ยประมาณร้อยละ 65 ซึ่งมีค่าสูงกว่าประสิทธิภาพในการแยกตะกอนของตะแกรงที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวร้อยละ 6 ทั้งนี้ยังสามารถควบคุมความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยให้มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $131.56 \pm 9.35$  มก./ล. ในขณะที่ตะแกรงที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวสามารถควบคุมระดับความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยในน้ำเฉลี่ยเท่ากับ  $150.22 \pm 14.96$  มก./ล. นอกจากนี้การปรับปรุงพื้นผิวด้วยเทคนิคดังกล่าวยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการเกาะติด

ของฟิล์มอินทรีย์และการสะสมของตะกอนที่พื้นผิวตะแกรง ส่งผลให้ตะแกรงมีอายุการใช้งานมากกว่า ตะแกรงที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว 7-10 วัน ในทางตรงกันข้ามตะแกรงที่สังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิล ไฮดรอกไซด์และแทรกด้วยสเตรตไอออนให้ผลลัพธ์ออกมาในเชิงลบโดยพบว่าประสิทธิภาพในการ แยกตะกอนตลอดระยะเวลาการเดินระบบมีค่าเฉลี่ยประมาณร้อยละ 52 ซึ่งต่ำกว่าตะแกรงที่ไม่ได้ ปรับปรุงพื้นผิวร้อยละ 7 และมีความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยในระบบเฉลี่ยเท่ากับ  $185.78 \pm 23.34$  มก./ล. ยิ่งไปกว่านั้นการปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีการดังกล่าวไม่ทำให้อายุการใช้งาน ของตะแกรงเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากไม่สามารถป้องกันการเกาะติดของฟิล์มอินทรีย์และการสะสมของ ตะกอนที่พื้นผิวได้ รวมทั้งยังเป็นการส่งเสริมให้เกิดการสร้างฟิล์มอินทรีย์บนพื้นผิวตะแกรงอีกด้วย

จากที่กล่าวมาข้างต้นจึงสรุปได้ว่าการปรับปรุงพื้นผิวตะแกรงโลหะโดยวิธีการพ่นเคลือบด้วย อนุภาคซิลิกาขนาดนาโนจะทำให้พื้นผิวตะแกรงมีสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดหรือมีค่ามุมสัมผัส มากกว่า  $150^\circ$  สามารถป้องกันการเกาะติดของฟิล์มอินทรีย์ได้มากขึ้น รวมทั้งยังช่วยลดการสะสมของ ตะกอนบนพื้นผิวตะแกรงซึ่งเป็นสาเหตุของการอุดตันในระบบการแยกตะกอนได้ แต่ทั้งนี้ ประสิทธิภาพในการป้องกันการก่อตัวและสะสมของฟิล์มอินทรีย์และตะกอนบนพื้นผิวตะแกรงขึ้นอยู่กับระยะเวลาใช้งานของตะแกรงที่ปรับปรุงพื้นผิวซึ่งมีความสัมพันธ์กับความคงทนของวัสดุเคลือบบน พื้นผิวและสภาพการไหลของน้ำในระบบแยกตะกอน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่แทรกด้วยสเตรตไอออนมีประสิทธิภาพในการยึดเกาะ บนพื้นผิวตะแกรงโลหะได้ต่ำ อีกทั้งตะแกรงที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวยังมีค่ามุมสัมผัสต่ำกว่า  $150^\circ$  จึง ยังไม่จัดเป็นพื้นผิวที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวด อาจส่งผลให้มีความสามารถในการป้องกันการยึด เกาะของฟิล์มอินทรีย์ได้น้อย ดังนั้นจึงควรมีการปรับปรุงวิธีการสังเคราะห์พื้นผิวให้สารเคลือบมี ประสิทธิภาพในการยึดเกาะพื้นผิวตะแกรงที่ดียิ่งขึ้นรวมทั้งควรปรับปรุงพื้นผิวให้มีสมบัติความไม่ชอบ น้ำยิ่งยวด

- นอกจากการปรับปรุงพื้นผิวตะแกรงให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดแล้ว การปรับปรุง พื้นผิวให้มีสารที่ออกฤทธิ์ยับยั้งการเกิดฟิล์มชีวภาพก็เป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับการพัฒนาหน่วย แยกตะกอน โดยในงานวิจัยนี้ได้ทดลองสังเคราะห์ชั้นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่แทรกด้วยซิเตรท

ไอออน แต่กลับพบว่าปริมาณสารเคมีที่สังเคราะห์บนพื้นผิวมีปริมาณน้อยเกินกว่าระดับที่จะสามารถใช้ในการยับยั้งการเกิดฟิล์มชีวภาพได้ ดังนั้นจึงควรศึกษาแนวทางในการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารเคมีที่ช่วยยับยั้งการเกิดฟิล์มชีวภาพได้ เช่น การใช้ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) ซึ่งมีสมบัติในการต่อต้านแบคทีเรีย เป็นต้น

- เนื่องจากการปรับปรุงพื้นผิวยังทำได้เฉพาะในระดับห้องปฏิบัติการ ตัวกรองที่ใช้ในการเดินระบบแยกตะกอนจึงมีขนาดค่อนข้างเล็กโดยมีปริมาตรสำหรับรองรับตะกอนประมาณ 104 ลบ. ซม. ซึ่งอาจไม่เหมาะสำหรับการใช้งานจริงกับหน่วยแยกตะกอนในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อการพาณิชย์ ดังนั้นควรมีการศึกษาวิธีการปรับปรุงพื้นผิววัสดุที่สามารถประยุกต์ใช้กับตะแกรงหรืออุปกรณ์ขนาดใหญ่ได้ อย่างไรก็ตามการเดินระบบแยกตะกอนในงานวิจัยนี้ถูกออกแบบให้ตะกอนที่ถูกกรองโดยตะแกรงไหลกลับไปรวมกับน้ำที่ไหลผ่านตะแกรงได้ตลอดเวลาโดยไม่มีการทิ้งตะกอนออกจากระบบจึงทำให้ขนาดและปริมาตรของตัวกรองไม่มีผลต่อการเดินระบบ

- ในการวิเคราะห์ปริมาณฟิล์มอินทรีย์ในงานวิจัยนี้ใช้ปริมาณ EPS เป็นตัวแทนของฟิล์มอินทรีย์ โดยสาร ESP ที่วิเคราะห์ออกมาจะอยู่ในรูปของโปรตีน พอลิแซ็กคาไรด์ และกรดฮิวมิก ซึ่งสามารถสกัดออกมาได้โดยการเขย่าด้วยเครื่องอัลตราโซนิก แต่วิธีนี้จะทำให้สารที่สังเคราะห์อยู่บนพื้นผิวตะแกรงหลุดออกมาด้วยและยังส่งผลให้การวิเคราะห์ปริมาณฟิล์มอินทรีย์เกิดการคลาดเคลื่อนต่อมาจึงได้ใช้เทคนิคการสกัดโดยการชะด้วยสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ซาลินซึ่งมีข้อจำกัดคือต้องใช้สารละลายปริมาณมากต่อการชะตะแกรง 1 ชั้น ดังนั้นในควรมีการศึกษาเทคนิคหรือวิธีการในการวิเคราะห์ปริมาณฟิล์มอินทรีย์ที่เกาะติดอยู่บนพื้นผิวตะแกรงเพื่อสามารถนำไปใช้ในกรณีที่ตะแกรงกรองถูกพัฒนาให้มีขนาดใหญ่ขึ้น

- ปริมาณตะกอนแขวนลอยในน้ำเสียไม่ได้มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในทุกชุดการทดลอง เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้น้ำเสียที่ได้จากระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำทำให้ไม่มีการสร้างตะกอนใหม่จากการขับถ่ายหรืออาหารที่เหลือจากการบริโภคของสัตว์น้ำ นอกจากนี้ยังส่งผลให้ค่าคุณภาพน้ำมีการเปลี่ยนแปลงอย่างคงที่ ดังนั้นเพื่อเป็นการยืนยันประสิทธิภาพการทำงานของหน่วยแยกตะกอนที่ติดตั้งตะแกรงที่ปรับปรุงพื้นผิว จึงควรมีการศึกษาการแยกตะกอนที่ทำงานร่วมกับระบบเลี้ยงสัตว์น้ำโดยตรง



## บรรณานุกรม

- Aguilera, A., Souza-Egipsy, V., San Martin-Uriz, P., and Amils, R., 2008. Extraction of extracellular polymeric substances from extreme acidic microbial biofilms. *Applied Microbiology and Biotechnology* 78: 1079-1088.
- Arnold, J. W., and Bailey, G. W., 2001. Surface Finishes on Stainless Steel Reduce Bacterial Attachment and Early Biofilm Formation: Scanning Electron and Atomic Force Microscopy Study. *Poultry Science* 79(12):1839-1845.
- Baig, N., and Sajid, M., 2017. Applications of layered double hydroxides based electrochemical sensors for determination of environmental pollutants. *Trends in Environmental Analytical Chemistry* 16: 1-15.
- Bertazzo, S., and Rezwan, K., 2009. Control of Alpha-Alumina Surface Charge with Carboxylic Acids. *Langmuir* 26(5): 3364-3371.
- Boyd, C., and Tucker, C. S., 1998. *Pond Aquaculture Water Quality Management*: Springer Science & Business Media.
- Bruellhoff, K., Fiedler, J., Möller, M., Groll, J., and Brenner, R. E., 2010. Surface Coating Strategies to Prevent Biofilm Formation on Implant Surfaces. *The International journal of artificial organs* 33(9) :646-653.
- Cengiz, U., Atalay Gengec, N., and Erbil, H., 2012. Surface characterization of flat and rough films of perfluoromethacrylate-methylmethacrylate statistical copolymers synthesized in CO<sub>2</sub>-expanded monomers. *Colloid and Polymer Science* 291.
- Chen, S., Timmons, M., Aneshansley, D., and Bisogni, J. J., 1993. Suspended solids characteristics from recirculation aquaculture system and design implications. *Aquaculture* 112: 143-155.
- Coenye, T., and Nelis, H. J., 2010. In Vitro and in Vivo Model Systems to Study Microbial Biofilm Formation. *Journal of microbiological methods* 83(2): 89-105.
- Couturier, M., Trofimencoff, T., Buil, J. U., and Conroy, J., 2009. Solids removal at a recirculating salmon-smolt farm. *Aquacultural Engineering* 41(2): 71-77.
- Cripps, S. J., and Bergheim, A., 2000. Solids management and removal for intensive land-based aquaculture production systems. *Aquacultural Engineering* 22(1): 33-

56.

- Davidson, J., and Summerfelt, S. T., 2005. Solids removal from a coldwater recirculating system—comparison of a swirl separator and a radial-flow settler. *Aquacultural Engineering* 33(1): 47-61.
- Donlan, R. M., 2002. Biofilms: Microbial Life on Surfaces. *Emerging infectious diseases* 8(9): 881-90.
- Ebeling, J., and Timmons, M., 2012. *Aquaculture Production Systems*, John Wiley & Sons pp.245-277.
- Edwards, S., and Kjellerup, B., 2013. Applications of biofilms in bioremediation and biotransformation of persistent organic pollutants, pharmaceuticals/personal care products, and heavy metals. *Applied Microbiology and Biotechnology* 97(23).
- Fernandes, P., Pedersen, L.-F., and Pedersen, P. B., 2015. Microscreen effects on water quality in replicated recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering* 65: 17-26.
- Flemming, H.-C., 2011. Microbial Biofouling: Unsolved Problems, Insufficient Approaches, and Possible Solutions. *Biofilm Highlights*. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg: 81-109.
- Gomes, D. J. C., de Souza, N. C., and Silva, J. R., 2013. Using a monocular optical microscope to assemble a wetting contact angle analyser. *Measurement* 46(9): 3623-3627.
- Guo, Z., Liu, W., and Su, B.-L., 2011. Superhydrophobic surfaces: From natural to biomimetic to functional. *Journal of Colloid and Interface Science* 353(2): 335-355.
- Heindl, J., Wang, Y., Heckel, B., Mohari, B., Feirer, N., and Fuqua, C., 2014. Mechanisms and Regulation of Surface Interactions and Biofilm Formation in *Agrobacterium*. *Frontiers in plant science* 5: 176.
- Huttenlochner, K., Müller-Renno, C., Ziegler, C., Merz, R., Merz, B., Kopnarski, M., Chodorski, J., Schlegel, C., and Ulber, R., 2017. Removing biofilms from stainless steel without changing surface properties relevant for bacterial attachment.

*Biointerphases* 12(2).

- Hwang, T., Lee, H., Kim, H., and Kim, G., 2010. Two layered silica protective film made by a spray-and-dip coating method on 304 stainless steel. *Journal of Sol-Gel Science and Technology* 55(2): 207-212.
- Jamal, M., Tasneem, U., Hussain, T., and Andleeb, S., 2015. Bacterial Biofilm: Its Composition, Formation and Role in Human Infections. *Journal of Microbiology and Biotechnology* 4.
- Kim, H., Ryu, J.-H., and Beuchat, L. R., 2006. Attachment of and biofilm formation by *Enterobacter sakazakii* on stainless steel and enteral feeding tubes. *Applied and Environmental Microbiology* 72(9): 5846-5856.
- Lapshin, R., Alekhin, A. P., Kirilenko, A. G., Odintsov, S. L., and Krotkov, V. A., 2010. Vacuum ultraviolet smoothing of nanometer-scale asperities of Poly(methyl methacrylate) surface. *Journal of Surface Investigation X-ray Synchrotron and Neutron Techniques* 4(1): 1-11.
- Lattif, A. A., Mukherjee, P. K., Chandra, J., Swindell, K., Lockhart, S. R., Diekema, D. J., Pfaller, M. A., and Ghannoum, M. A., 2010. Characterization of biofilms formed by *Candida parapsilosis*, *C. metapsilosis*, and *C. orthopsilosis*. *International Journal of Medical Microbiology* 300(4): 265-270.
- Law, K.-Y., 2014. Definitions for Hydrophilicity, Hydrophobicity, and Superhydrophobicity: Getting the Basics Right. *Journal of Physical Chemistry Letters* 5(4): 686-688.
- Lawson, T. B., 1995. *Fundamentals of Aquacultural Engineering* 1<sup>st</sup> ed, Springer Science & Business Media.
- Lei, X., Lu, W., Peng, Q., Li, H., Chen, T., Xu, S., and Zhang, F., 2011. Activated MgAl-layered double hydroxide as solid base catalysts for the conversion of fatty acid methyl esters to monoethanolamides. *Applied Catalysis A: General* 399(1): 87-92.
- Liang, Z., Li, W., Yang, S., and Du, P., 2010. Extraction and structural characteristics of extracellular polymeric substances (EPS), pellets in autotrophic nitrifying biofilm and activated sludge. *Chemosphere* 81(5): 626-632.
- Liu, H., and Fang, H. H. P., 2002. Extraction of extracellular polymeric substances (EPS)

- of sludges. *Journal of Biotechnology* 95(3): 249-256.
- London, G., Chen, K.-Y., Carroll, G., and L Feringa, B., 2013. Towards Dynamic Control of Wettability by Using Functionalized Altitudinal Molecular Motors on Solid Surfaces. *Chemistry - A European Journal* 19(32).
- Lowry, O. H., Rosebrough, N. J., Farr, A. L., and Randall, R. J., 1951. Protein measurement with the Folin phenol reagent. *The Journal of biological chemistry* 193(1): 265-275.
- Ludwig, T. G., and Goldberg, J. V., 1956. The anthrone method for the determination of carbohydrates in foods and in oral rinsing. *Journal of dental research* 35(1): 90-94.
- Mandakhalikar, K. D., Rahmat, J. N., Chiong, E., Neoh, K. G., Shen, L., and Tambyah, P. A., 2018. Extraction and quantification of biofilm bacteria: Method optimized for urinary catheters. *Scientific Reports* 8(1): 8069.
- Meyn, M., Beneke, K., and Lagaly, G., 1990. Anion-Exchange Reactions of Layered Double Hydroxides. *Inorganic Chemistry* 29(26):5201-5207.
- Naderikalali, E., Wang, X., and Wang, D.-Y., 2015. Functionalized layered double hydroxide-based epoxy nanocomposites with improved flame retardancy and mechanical properties. *Journal of Materials Chemistry A* 3.
- Pillay, T. V. R., and Kutty, M. N., 2005. *Aquaculture: Principles and Practices* (2nd ed.): Blackwell Publishing Ltd.
- Rahman, I. A., and Padavettan, V., 2012. Synthesis of Silica Nanoparticles by Sol-Gel: Size-Dependent Properties, Surface Modification, and Applications in Silica-Polymer Nanocomposites—A Review. *Journal of Nanomaterials* 2012: 132424.
- Renner, L., and Weibel, D., 2011. Physicochemical regulation of biofilm formation. *MRS bulletin / Materials Research Society* 36: 347-355.
- Rice, E. W., and Public Health Association, A., 2012. *Standard methods for the examination of water and wastewater*.
- Ryu, J. H., Kim, H., Frank, J. F., and Beuchat, L. R., 2004. Attachment and biofilm formation on stainless steel by *Escherichia coli* O157:H7 as affected by curli production. *Letters in Applied Microbiology* 39(4): 359-362.
- Sajid, M., and Basheer, C., 2016. Layered double hydroxides: Emerging sorbent materials

- for analytical extractions. *Trends in Analytical Chemistry* 75: 174-182.
- Schaer, T., Stewart, S., Hsu, B., and Klibanov, A., 2011. Hydrophobic polycationic coatings that inhibit biofilms and support bone healing during infection. *Biomaterials* 33: 1245-1254.
- Shanks, R. M. Q., Sargent, J. L., Martinez, R. M., Graber, M. L., and O'Toole, G. A., 2006. Catheter lock solutions influence staphylococcal biofilm formation on abiotic surfaces. *Nephrology Dialysis Transplantation* 21(8): 2247-2255.
- Sindilariu, P.-D., Brinker, A., and Reiter, R., 2009. Waste and particle management in a commercial, partially recirculating trout farm. *Aquacultural Engineering* 41(2): 127-135.
- Stöber, W., Fink, A., and Bohn, E., 1968. Controlled growth of monodisperse silica spheres in the micron size range. *Journal of Colloid and Interface Science* 26(1): 62-69.
- Summerfelt, R. C., and Penne, C. R., 2005. Solids removal in a recirculating aquaculture system where the majority of flow bypasses the microscreen filter. *Aquacultural Engineering* 33(3): 214-224.
- Tidwell, J., 2012. *Aquaculture Production Systems*. 51-63.
- Timmons, M., Ebeling, J., Wheaton, F. W., Summerfelt, S., and Vinci, B., 2002. *Recirculating Aquaculture System*.
- Timmons, M. B., and Ebeling, J. M., 2010. *Recirculating Aquaculture: Cayuga Aqua Ventures*.
- Tronto, J., Reis, M. J. d., Silvério, F., Balbo, V. R., Marchetti, J. M., and Valim, J. B., 2004. In vitro release of citrate anions intercalated in magnesium aluminium layered double hydroxides. *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 65(2): 475-480.
- Türetgen, I., 2015. Reduction of microbial biofilm formation using hydrophobic nano-silica coating on cooling tower fill material. *Water SA* 41(3): 295-299.
- Wang, S., and Jiang, L., 2007. Definition of Superhydrophobic States. *Advanced Materials* 19: 3423-3424.
- Wenzel, R. N., 1936. Resistance of solid surfaces to wetting by water. *Industrial & Engineering Chemistry* 28(8): 988-994.

- Wheaton, F., 2002. Recirculating Aquaculture Systems: An Overview of Waste Management.
- Wickins, J. F., 1976. The tolerance of warm-water prawns to recirculated water. *Aquaculture* 9: 19-37.
- Wilson, C., Lukowicz, R., Merchant, S., Valquier-Flynn, H., Caballero, J., Sandoval, J., Okuom, M., Huber, C., Durham Brooks, T., Wilson, E., Clement, B., Wentworth, C., and Holmes, A. E., 2017. Quantitative and Qualitative Assessment Methods Biofilm Growth: A Mini-review. *Journal of Engineering and Technology*. 6.
- Wisdom, K., Watson, J., Qu, X., Liu, F., Watson, G., and Chen, C.-H., 2013. Self-cleaning of superhydrophobic surfaces by self-propelled jumping condensate. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 110.
- Xu, Z. P., Stevenson, G., Lu, C.-Q., and Lu, G. Q., 2006. Dispersion and Size Control of Layered Double Hydroxide Nanoparticles in Aqueous Solutions. *The Journal of Physical Chemistry B* 110(34): 16923-16929.
- Yang, C., Tartaglino, U., and N J Persson, B., 2006. Influence of Surface Roughness on Superhydrophobicity. *Physical Review Letters* 97: 116103.
- Yeganeh, M., and Mohammadi, N., 2018. Superhydrophobic surface of Mg alloys: A review. *Journal of Magnesium and Alloys* 6(1): 59-70.
- Zhang, J., Zhang, F., Ren, L., Evans, D. G., and Duan, X., 2004. Synthesis of layered double hydroxide anionic clays intercalated by carboxylate anions. *Materials Chemistry and Physics* 85(1): 207-214.
- Zhang, X., Wang, L., and Levänen, E., 2013. Superhydrophobic surfaces for reduction of bacterial adhesion. *RSC Advances* 3(30).
- Zhang, Z., Chen, G., and Xu, K., 2013. One-pot green hydrothermal synthesis of stearate-intercalated MgAl layered double hydroxides. *Applied Clay Science* 72: 206-210.
- Zhang, F., Zhang, C.-L., Song, L., Zeng, R., Cui, L.-Y., and Cui, H.-Z., 2015. Corrosion Resistance of Superhydrophobic Mg–Al Layered Double Hydroxide Coatings on Aluminum Alloys. *Acta Metallurgica Sinica* 28(11).



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	Muentawan Onnom
วัน เดือน ปี เกิด	29 June 1993
สถานที่เกิด	Bangkok Thailand
วุฒิการศึกษา	Chulalongkorn University
ที่อยู่ปัจจุบัน	63 Soi Wachirathamsatit 25, Sukhumvit Rd., Bangjak, Phakhanong, Bangkok, 10260



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ภาคผนวก ก

## วิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

## ก.1 วิธีการวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนีย

การวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำดัดแปลงมาจากวิธีของ Bower และ Holm-Hansen (1980) โดยมีขั้นตอนการเตรียมสารเคมีและการวิเคราะห์ดังนี้

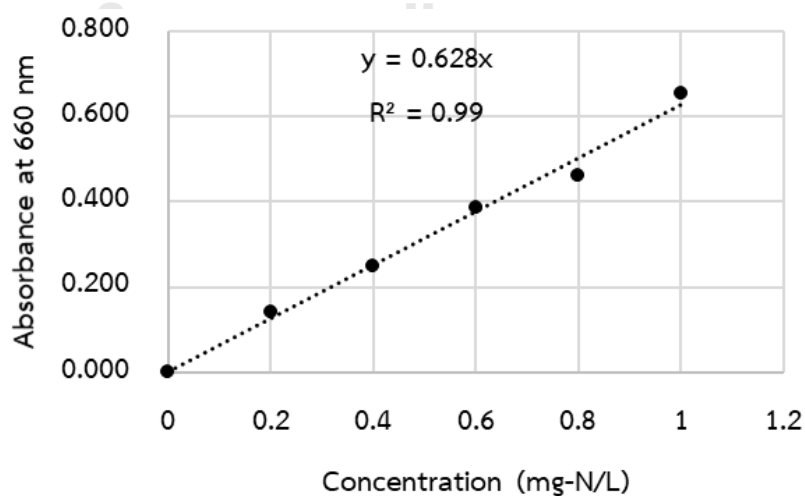
## - การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายซาลิไซเลตอะซีเตต (Salicylate-catalyst Solution) สามารถเตรียมได้โดยการละลายโซเดียมซาลิไซเลต (Sodium salicylate;  $C_6H_4(OH)COONa$ ) ปริมาณ 400 ก. และโซเดียมไนโตรพรัสไซด์ (Sodium nitroprusside dehydrate,  $Na_2Fe(CN)_5NO \cdot 2H_2O$ ) ปริมาณ 0.28 ก. ลงในน้ำที่ปราศจากไอออน (Deionized water) และทำการปรับปริมาตรสารละลายซาลิไซเลตอะซีเตตให้มีปริมาตรเท่ากับ 1 ลิ. ทั้งนี้ควรเก็บสารละลายด้วยการบรรจุในขวดสีชาที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $5^{\circ}C$  และควรเตรียมสารละลายใหม่ทุก 3 เดือน
2. สารละลายอัลคาไลน์ซิเตรต (Alkaline-citrate solution) สามารถเตรียมได้โดยการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide,  $NaOH$ ) ปริมาณ 18.5 ก. และโซเดียมซิเตรต (Sodium citrate dehydrate;  $Na_3C_6H_5O_7 \cdot 2H_2O$ ) ปริมาณ 100 ก. ลงในน้ำที่ปราศจากไอออน และปรับปริมาตรสารละลายอัลคาไลน์ซิเตรตให้มีปริมาตรเท่ากับ 1 ลิ. โดยการเก็บสารละลายควรเก็บในขวดสีชาที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $5^{\circ}C$
3. สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (Sodium hypochlorite solution) สามารถใช้สารละลายไฮโปคลอไรต์ทางการค้าความเข้มข้น 1.5 นอร์มอล
4. สารละลายอัลคาไลน์ไฮโปคลอไรต์ (Alkaline-hypochlorite solution) สามารถเตรียมได้โดยการผสมสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์และสารละลายอัลคาไลน์ซิเตรตในอัตราส่วน 1:9 ซึ่งเมื่อผสมสารละลายทั้งสองเข้าด้วยกันควรใช้สารละลายอัลคาไลน์ไฮโปคลอไรต์ในกระบวนการวิเคราะห์ภายใน 1 ชม.

- ขั้นตอนการวิเคราะห์

เก็บน้ำตัวอย่างใส่ขวดให้ได้ปริมาณอย่างน้อยที่ปริมาตร 30 มล. และทำการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C จากนั้นควรทำการวิเคราะห์ทันที หากไม่สามารถทำได้ควรเก็บน้ำตัวอย่างที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $-15^{\circ}\text{C}$

กระบวนการวิเคราะห์เริ่มต้นจากการปิเปตนำตัวอย่างปริมาตร 5 มล. ใส่ในหลอดทดลองเติมสารละลายซาลิไซเลตอะซิโตนปริมาตร 0.6 มล. และสารละลายอัลคาไลน์ไฮโปคลอไรต์ ปริมาตร 1.0 มล. ตามลำดับ (ทั้งนี้สามารถปรับเพิ่มลดปริมาตรน้ำตัวอย่างและสารละลายที่ใช้ในขั้นตอนการวิเคราะห์ได้โดยคงอัตราส่วนให้มีค่าเท่าเดิม) เขย่าสารให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาในที่มีที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 1 ชม. แต่ไม่ควรเกิน 3 ชม. สำหรับการวิเคราะห์แบลнк (Blank) สามารถทำได้โดยใช้น้ำที่ปราศจากไอออน ที่มีการเติมสารละลาย และใช้กระบวนการวิเคราะห์เช่นเดียวกันกับน้ำตัวอย่าง จากนั้นนำน้ำตัวอย่างไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 660 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายแอมโมเนียมาตรฐาน (Standard ammonia solution) ที่ความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ซึ่งเตรียมจากสารละลายสต็อกแอมโมเนีย (Stock ammonia solution) ความเข้มข้น 100 มก.แอมโมเนียไนโตรเจน/ล. ดังกราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์แอมโมเนียในรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานแอมโมเนีย

## ก.2 วิธีการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจน

การวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของไนโตรเจนในโตรเจนในน้ำดัดแปลงมาจากวิธีมาตรฐานที่อ้างอิงจาก Strickland และ Parsons (1972) โดยมีขั้นตอนการเตรียมสารเคมีและการวิเคราะห์ดังนี้

### - การเตรียมสารเคมี

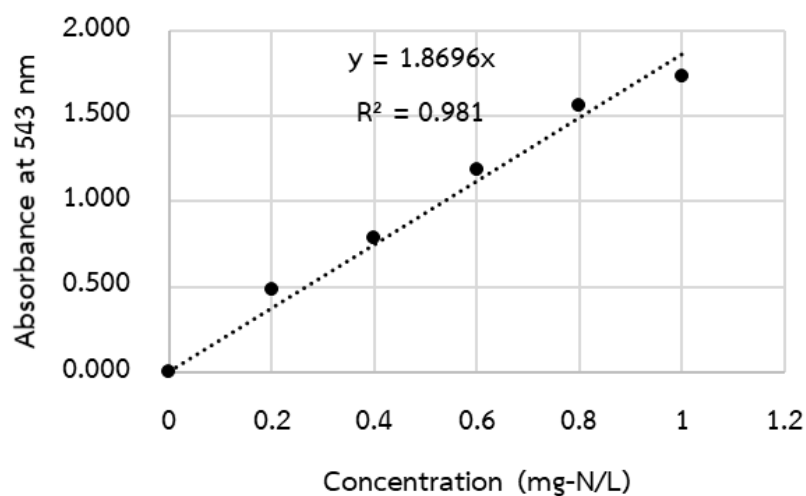
1. สารละลายซัลฟานิลาไมด์ (Sulfanilamide solution) สามารถเตรียมได้โดยการละลายซัลฟานิลาไมด์ (Sulphanilamide;  $C_6H_8N_2O_2S$ ) ปริมาณ 5 ก. ในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (Hydrochloric acid; HCl) ปริมาตร 50 มล. และปรับปริมาตรสารละลายซัลฟานิลาไมด์ให้มีปริมาตรเท่ากับ 1 ล. ทั้งนี้ควรเก็บสารละลายในขวดสีชาที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $5^{\circ}C$
2. สารละลายเอ็นเอ็นอีดี (Naphthylethylenediamine solution) สามารถเตรียมได้โดยการละลายสาวเอ็นเอ็นอีดี (NNED, N-1-Naphthyl Ethylenediamine Dihydrochloride) ปริมาณ 0.5 ก. ในน้ำที่ปราศจากไอออน และปรับปริมาตรสารละลายเอ็นเอ็นอีดีให้มีปริมาตรเท่ากับ 500 มล. ทั้งนี้ควรเก็บสารละลายในขวดสีชาที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $50^{\circ}C$  และควรเตรียมสารละลายใหม่ทุกเดือน

### - ขั้นตอนการวิเคราะห์

เก็บน้ำตัวอย่างใส่ขวดปริมาตรอย่างน้อย 30 มล. ทำการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C จากนั้นควรทำการวิเคราะห์ทันที หากไม่สามารถทำได้ควรเก็บน้ำตัวอย่างโดยการแช่แข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $-15^{\circ}C$

ขั้นตอนการวิเคราะห์เริ่มต้นจากการปิเปตน้ำตัวอย่างปริมาตร 5 มล. ใส่ในหลอดทดลอง เติมสารละลายซัลฟานิลาไมด์ปริมาตร 0.1 มล. เขย่าให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาประมาณ 2 นาที แต่ไม่ควรเกิน 10 นาที จากนั้นเติมสารละลายเอ็นเอ็นอีดีปริมาตร 0.1 มล. เขย่าให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 30 นาที แต่ไม่ควรเกิน 2 ชม. (ทั้งนี้สามารถปรับเพิ่มลดปริมาตรน้ำตัวอย่างและสารละลายที่ใช้ในกระบวนการวิเคราะห์ได้โดยคงอัตราส่วนให้มีค่าเท่าเดิม) สำหรับการวิเคราะห์แบบคลด์สามารถทำได้โดยใช้น้ำที่ปราศจากไอออน ที่มีการเติมสารละลายเช่นเดียวกับน้ำตัวอย่างและใช้กระบวนการวิเคราะห์เช่นเดิม จากนั้นนำน้ำตัวอย่าง

ไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 543 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายไนไตรท์มาตรฐาน (Standard nitrite solution) ที่ความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 มก.ไนไตรท์-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ซึ่งเตรียมจากสารละลายสต็อกไนไตรท์ (Stock nitrite solution) ความเข้มข้น 100 มก.ไนไตรท์-ไนโตรเจน/ล. ดังกราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ไนไตรท์ในรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 กราฟมาตรฐานไนไตรท์

### ก.3 วิธีการวิเคราะห์ปริมาณไนเตรต

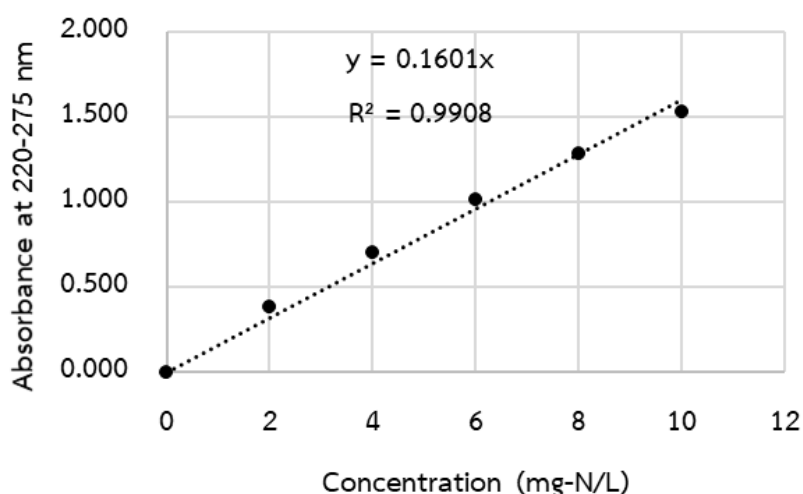
การวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของไนเตรตไนโตรเจนในน้ำตัดแปลงมาจากวิธีมาตรฐานที่อ้างอิงจาก Standard Method (2005) โดยมีวิธีการวิเคราะห์ดังนี้

- ขั้นตอนการวิเคราะห์

เก็บน้ำตัวอย่างใส่ขวดให้ได้ปริมาตรอย่างน้อย 30 มล. ทำการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C จากนั้นควรทำการวิเคราะห์ทันที หากไม่สามารถทำได้ควรเก็บน้ำตัวอย่างโดยการแช่แข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $-15^{\circ}\text{C}$

ขั้นตอนการวิเคราะห์เริ่มต้นจากการปิบน้ำตัวอย่างปริมาตร 5 มล. ใส่ในหลอดทดลองโดยไม่มีการเติมสารเคมีลงไป สำหรับการวิเคราะห์ค่าแบลงค์สามารถทำได้โดยใช้น้ำที่ปราศจากไอออน

โดยเติมสารละลายเช่นเดียวกันกับน้ำตัวอย่าง จากนั้นนำน้ำตัวอย่างไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วย เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 220 และ 275 นาโนเมตร นำผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นทั้งสองมาใช้ในการคำนวณหาปริมาณไนเตรตไนโตรเจนในน้ำโดยค่าที่คำนวณได้จะต้องทำการหักลบกับปริมาณไนเตรตที่วิเคราะห์ได้จากตัวอย่างเดียวกันเนื่องจากวิธีการวิเคราะห์ไนเตรตตาม Standard Method (2005) จะมีปริมาณไนเตรตรวมอยู่ด้วย เปรียบเทียบกับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายไนเตรตมาตรฐาน (Standard nitrate solution) ที่ความเข้มข้น 2, 4, 6, 8 และ 10 มก.ไนเตรต-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ซึ่งเตรียมจากสารละลายสต็อกไนเตรต (Stock nitrate solution) ความเข้มข้น 100 มก.ไนเตรต-ไนโตรเจน/ล. ดังกราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ไนเตรตในรูปที่ ก.3



CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ ก.3 กราฟมาตรฐานไนเตรต

#### ก.4 วิธีการวิเคราะห์ปริมาณตะกอนแขวนลอยทั้งหมด

การวิเคราะห์ปริมาณของตะกอนแขวนลอยทั้งหมดในน้ำอาศัยวิธีมาตรฐานที่อ้างอิงจาก Standard Method (2005) โดยขั้นตอนการวิเคราะห์เริ่มต้นจากการอบกระดาษกรอง (Whatman GF/C) ขนาด 47 มม. ที่อุณหภูมิ 103 - 105 ซ เป็นเวลา 24 ชม. และชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง เพื่อเก็บข้อมูลน้ำหนักแห้งของกระดาษกรอง จากนั้นกรองน้ำตัวอย่างด้วยปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) ทำการอบและชั่งน้ำหนักกระดาษกรองที่ผ่านการกรองน้ำตัวอย่างเช่น



เดิมเพื่อนำผลต่างของน้ำหนักกระดาศกรองที่เพิ่มขึ้นมาคำนวณหาปริมาณของตะกอนแขวนลอยทั้งหมด (ดังสมการที่ ก.1)

$$\text{ตะกอนแขวนลอยทั้งหมด} = \frac{[\text{นน.กระดาศหลังกรอง (ก.)} - \text{นน.กระดาศก่อน (ก.)}] \times 10^6}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (มล.)}} \quad (\text{ก.1})$$

(มก. ของแข็งแขวนลอย/ล.)



## ภาคผนวก ข

## ข้อมูลพารามิเตอร์คุณภาพน้ำ ปริมาณตะกอน และปริมาณธาตุในน้ำระหว่างทำการทดลอง

ตารางที่ ข.1 ค่าพารามิเตอร์คุณภาพน้ำทั่วไประหว่างการเดินระบบแยกตะกอน

พารามิเตอร์	วันที่เดินระบบ	ตัวอย่าง		
		LDH/SA	SNP	Bare mesh
ออกซิเจนละลาย (มก./ล.)	0	5.81	5.6	5.85
	1	4.81	5.54	5.50
	3	5.78	5.74	4.86
	7	5.85	5.78	4.81
	10	6.21	6.01	4.97
	15	6.58	6.24	5.27
	30	6.76	6.82	5.64
พีเอช	0	8.48	8.40	8.27
	1	8.64	8.51	8.17
	3	8.64	8.60	8.20
	7	8.65	8.60	8.21
	10	8.62	8.52	8.18
	15	8.62	8.49	8.33
	30	8.60	8.54	8.30
ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (มก./ล.)	0	769	367	379
	1	841	362	401
	3	877	381	407
	7	989	397	446
	10	1030	416	491
	15	1157	441	553
การนำไฟฟ้า (มล.ซีเมนส์/ซม.)	0	767	330	370
	1	870	325	367
	3	866	360	345
	7	1022	369	385
	10	1039	388	428
	15	1143	420	493
	30	1178	497	511

ตารางที่ ข.2 ความเข้มข้นของปริมาณฟอสเฟตเทียบเท่าฟอสฟอรัสในน้ำเสียระหว่างเดินระบบแยกตะกอน

วันที่เดินระบบ	Sample		
	LDH/SA (mg.P/L)	SNP (mg.P/L)	Bare mesh (mg.P/L)
0	1.834	1.205	1.890
1	1.958	1.421	1.921
3	1.919	1.243	1.935
7	1.715	1.268	1.882
10	1.719	1.154	1.774
15	1.933	0.789	1.867
30	1.634	0.760	1.764

ตารางที่ ข.3 ความเข้มข้นของปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำเสียระหว่างเดินระบบแยกตะกอน

วันที่เดินระบบ	Sample		
	LDH/SA (mg.N/L)	SNP (mg.N/L)	Bare mesh (mg.N/L)
0	0.015	0.000	0.021
1	0.012	0.000	0.020
3	0.013	0.000	0.010
7	0.000	0.000	0.007
10	0.002	0.000	0.002
15	0.000	0.000	0.002
30	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ ข.4 ความเข้มข้นของปริมาณไนโตรเจนไนโตรเจนในน้ำเสียระหว่างเดินระบบแยกตะกอน

วันที่เดินระบบ	Sample		
	LDH/SA (mg.N/L)	SNP (mg.N/L)	Bare mesh (mg.N/L)
0	0.000	0.000	0.000
1	0.000	0.000	0.000
3	0.000	0.000	0.000
7	0.000	0.000	0.000
10	0.000	0.000	0.000
15	0.000	0.000	0.000
30	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ ข.5 ความเข้มข้นของปริมาณไนเตรตไนโตรเจนในน้ำเสียระหว่างเดินระบบแยกตะกอน

วันที่เดินระบบ	Sample		
	LDH/SA (mg.N/L)	SNP (mg.N/L)	Bare mesh (mg.N/L)
0	1.724	1.588	1.719
1	1.677	2.051	1.452
3	1.376	2.251	1.433
7	1.282	2.039	1.262
10	1.269	2.204	1.292
15	1.520	2.439	1.558
30	1.343	2.244	1.663



## ภาคผนวก ค

## ข้อมูลค่าฟลักซ์การกรองและปริมาณตะกอนสะสมบนพื้นผิวตะแกรง

ค่าฟลักซ์การกรองคำนวณได้จากสมการที่ ค.1 (ค.1)

$$\text{ฟลักซ์การกรอง (ล./ตร. ซม./ชม.)} = \frac{\text{ปริมาตรน้ำที่ไหลผ่านตะแกรง (ล./ชม.)}}{\text{พื้นที่ทั้งหมดของตะแกรงกรอง (ตร. ซม.)}}$$

ตารางที่ ค.1 ฟลักซ์การกรองของหน่วยแยกตะกอนทั้งสามชุดการทดลองที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเดินระบบแยกตะกอน

วันที่เดินระบบ	Sample		
	LDH/SA (L/cm <sup>2</sup> /hr)	SNP (L/cm <sup>2</sup> /hr)	Bare mesh (L/cm <sup>2</sup> /hr)
0	7.61	7.61	7.61
1	7.61	7.61	7.61
3	7.34	7.61	7.34
7	7.34	7.61	7.07
10	7.34	7.34	7.07
15	7.07	7.34	6.52
30	6.79	6.79	6.25

ตารางที่ ค.2 ปริมาณตะกอนสะสมบนตะแกรงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเดินระบบแยกตะกอน

วันที่เดินระบบ	Sample		
	LDH/SA (mg/cm <sup>2</sup> )	SNP (mg/cm <sup>2</sup> )	Bare mesh (mg/cm <sup>2</sup> )
0	0	0	0
1	0.60	0.54	1.88
3	3.07	0.95	2.83
7	4.57	1.68	6.25
10	5.90	3.37	6.88
15	6.52	5.26	6.79
30	7.20	6.17	6.96

## ภาคผนวก ง

### วิธีการเตรียมซิลิกาเจล

1. เตรียมตะแกรงโลหะที่ต้องการปรับพื้นผิวโดยการทำความสะอาดในสารเอทิลแอลกอฮอล์ และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลานาน 30 นาทีและพักตะแกรงไว้
2. ผสมสารเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (tetraethyl orthosilicate, TEOS) กับสารละลาย 3-อะมิโนโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน ((3-aminopropyl)trimethoxysilane) ใช้อัตราส่วนของสารประกอบไซเลนต่อ TEOS อยู่ที่ 0.11 ต่อ 0.33 โดยโมลาร์ ในเอทิลแอลกอฮอล์ และสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์
3. นำสารที่ได้ไปพ่นบนตัวตะแกรงที่เตรียมไว้ อัตราการพ่น 2 มิลลิลิตรต่อวินาที จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้อบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

(อนุสิทธิบัตร สารผสมอนุภาคซิลิกาที่มีคุณสมบัติการไม่ชอบน้ำสำหรับเคลือบพื้นผิวโลหะและกรรมวิธีการเตรียมสารผสมอนุภาคซิลิกาที่มีคุณสมบัติการไม่ชอบน้ำดังกล่าว เลขที่คำขอ 2003001694 ผู้ประดิษฐ์ ณีภูธร พิมพะ และ กรรมการ สิทธิสุวรรณกุล)