

ผลของภาวะบรรทุกระหว่างอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพของถังกรองไร้อากาศและ
ผลของความลึกชั้นทรายต่อประสิทธิภาพของถังกรองทรายชีวภาพ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Effect of organic loading rates to efficiencies of anaerobic filter and
effect of sand depth to efficiencies of biological sand filter



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	ผลของภาวะบรรทุกสารอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพของถังกรองไร้อากาศและ ผลของความลึกชั้นทรายต่อประสิทธิภาพของถังกรองทรายชีวภาพ
โดย	น.ส.พัชราภรณ์ เทียงทอง
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธีกุล)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพร สุวรรณศิลป์)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาโรช บุญยกิจสมบัติ)	

พัชรารณณ์ เพ็ญทอง : ผลของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพของถังกรองไร้อากาศ และ ผลของความลึกชั้นทรายต่อประสิทธิภาพของถังกรองทรายชีวภาพ. (Effect of organic loading rates to efficiencies of anaerobic filter and effect of sand depth to efficiencies of biological sand filter) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.ศรัณย์ เตชะเสน

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของภาระบรรทุกสารอินทรีย์และระยะเวลาเก็บกักต่ออัตราการบำบัดและประสิทธิภาพถังกรองไร้อากาศและผลของความลึกชั้นทรายต่อประสิทธิภาพของถังกรองทรายชีวภาพ โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากน้ำตาลทรายซึ่งมีความเข้มข้นเริ่มต้น 1,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ตลอดทั้งการทดลอง ปรับอัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย 4 ค่า ได้แก่ 24 , 48 , 96 และ 192 ลิตรต่อวัน คิดเป็นภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.5 , 1 , 2 และ 4 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ตามลำดับ และใช้ถังกรองไร้อากาศออกเป็น 4 ถังต่อแบบอนุกรมโดยให้ไหลแบบตามกัน (Plug Flow) เพื่อให้มีระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียตั้งแต่ 0.0625-2 วัน เติกระบบแบบไหลต่อเนื่องและควบคุมค่าพีเอชระหว่าง 7.0-7.5 ผลการทดลองพบว่าที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.5 , 1 , 2 และ 4 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียรวม 2 , 1 , 0.5 และ 0.25 วัน ตามลำดับ สามารถบำบัดสารอินทรีย์ได้ถึงร้อยละ 84.76 , 93.06 , 91.90 และ 88.58 ตามลำดับ มีค่าซีโอดีที่สามารถย่อยสลายได้เท่ากับ 861.0 ± 30.6 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าสัมประสิทธิ์ของปฏิกิริยาลำดับที่ 1 (k_1) อยู่ที่ 18.8 ± 2.40 วัน⁻¹ และมีค่าซีโอดีที่ไม่สามารถบำบัดได้เท่ากับ 128.2 ± 16.3 มิลลิกรัมต่อลิตร และพบว่าเมื่อเติกระบบร่วมกับถังกรองทรายชีวภาพที่ความลึกชั้นทราย 80 , 60 , 40 , 20 และ 0 เซนติเมตร ระบบมีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีอยู่ที่ร้อยละ 92-94 โดยถังกรองทรายชีวภาพช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีร้อยละ 1-5 ปริมาณซัลไฟด์ในน้ำทิ้งจากถังกรองทรายชีวภาพที่ความลึกชั้นทรายต่างๆลดลงอยู่ในช่วง 16-18 มิลลิกรัมซัลไฟด์ต่อลิตร โดยที่ความลึกชั้นทราย 80 , 60 , 40 และ 20 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีถึงร้อยละ 90 นอกจากนี้ที่ความลึกชั้นทราย 80 60 และ 40 เซนติเมตร สามารถเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (Nitrification) ได้แสดงให้เห็นถึงการกำจัดซีโอดีที่สมบูรณ์ และพบว่าน้ำทิ้งจากถังกรองทรายชีวภาพมีค่าของแข็งแขวนลอยต่ำอยู่ที่ 24.00 ± 10.2 มิลลิกรัมต่อลิตร

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6070464721 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORD: Anaerobic filter, Biological sand filter, Biofilm, Biological wastewater treatment

Patcharaporn Tiengtong : Effect of organic loading rates to efficiencies of anaerobic filter and effect of sand depth to efficiencies of biological sand filter.

Advisor: Asst. Prof. SARUN TEJASEN, Ph.D.

This research studied effect of organic loading rates and hydraulic retention times to removal rates and efficiencies of anaerobic filter, and effect of sand depth to efficiencies of biological sand filter. Synthetic wastewater was prepared from sucrose at 1,000 mg-COD/l and flowed constantly to 4 up-flow anaerobic filters connected in series at 24, 48, 96, and 192 l/d, resulting in organic loading rate of 0.5, 1, 2, and 4 kg-COD/m³/day, respectively. This system operated by continuous plug flow and controlled pH between 7.0-7.5. The results showed that organic loading rate of 0.5, 1, 2, and 4 kg-COD/m³/day with hydraulic retention times of 2, 1, 0.5, and 0.25 days resulted in COD removal of 84.76%, 93.06%, 91.90%, and 88.58%, respectively. Kinetic studies showed that the biodegradable COD was 861.0±30.6 mg/l, the first order reaction (k_1) was 18.8±2.40 day⁻¹, and the non-biodegradable COD was 128.2±16.3 mg/l. When operated with biological sand filter, the efficiencies of combination system were 92-94%, which 1-5% came from biological sand filter. Sulfide in effluent of the biological sand filter was reduced to 16-18 mg-S²/L. Color removal efficiencies of the system at the depth of 80, 60, 40, and 20 cm were around 90%. Moreover, nitrification was occurred at the depth of 80, 60, and 40 cm indicating a complete biodegradable COD removal. And the effluent total suspended solid was only 24.00±10.2 mg/L.

Field of Study: Environmental Engineering Student's Signature

Academic Year: 2019 Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบ
ขอบพระคุณผู้ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศรัณย์ เตชะเสน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้
คำปรึกษา ช่วยแก้ไขปัญหา ถ่ายทอดวิชาความรู้ที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ รวมไปถึง
ข้อเสนอแนะ ตลอดการทำงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริมา ปัญญาเมธีกุล ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบ
วิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. เบญจพร สุวรรณศิลป์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วย
ศาสตราจารย์ ดร. สาโรช บุญยกิจสมบัติ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่า
เพื่อให้คำแนะนำ ทิชม และแก้ไขใ้งานวิจัยนี้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ธุรการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือแก่ผู้วิจัยเป็น
อย่างดี

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่
ให้ความเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกคนในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือผู้ทำการวิจัยในทุกๆ ด้าน

ขอขอบคุณบริษัทอควา นิชิฮาระ คอร์ปอเรชั่น จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวกลางพลาสติก
สำหรับการนำมาใช้ในงานวิจัย

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัวของผู้วิจัย ที่ให้การสนับสนุนอย่างเต็มที่ ในการศึกษาและทำ
วิจัยระดับปริญญาโทมาบัดนี้ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้

พัชราภรณ์ เทียงทอง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 น้ำเสียชุมชน	4
2.2 ค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภทและบางขนาด	8
2.3 กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ.....	9
2.3.1 ความหมายของการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ.....	9
2.3.2 กลไกการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ.....	11
2.3.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ.....	16
2.4 ถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter).....	23
2.4.1 หลักการทำงานของถังกรองไร้อากาศ	23
2.4.2 ชนิดของถังกรองไร้อากาศ	26

2.4.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการทำงานของระบบ.....	29
2.5 ถังกรองทรายชีวภาพ (Biological sand filter, BSF).....	31
2.6 สมการชีวภาพ (Stoichiometry).....	32
2.6.1 การเขียนสมการชีวภาพของถังกรองไร้อากาศ.....	33
2.6.2 การเขียนสมการชีวภาพของถังกรองทรายชีวภาพ.....	33
2.7 รูปแบบของค่าจลนพลศาสตร์	34
2.7.1 จลนพลศาสตร์แบบโมนอด (Monod kinetics).....	34
2.7.2 จลนพลศาสตร์อันดับศูนย์ (Zero order kinetics).....	35
2.7.3 จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง (First order kinetics).....	36
2.8 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	37
บทที่ 3 แผนการทดลองและวิธีดำเนินงานวิจัย	40
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย	40
3.2 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	41
3.2.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ	41
3.2.2 ถังปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัย.....	43
3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	44
3.3.1 น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	44
3.3.2 การเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียก่อนเดินระบบ	45
3.3.3 การทดลองช่วงที่ 1 ศึกษาผลของค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพการบำบัด ของระบบถังกรองไร้อากาศ.....	45
3.3.4 การทดลองช่วงที่ 2 ศึกษาผลของระดับความลึกชั้นทรายต่อประสิทธิภาพการบำบัดของ ระบบถังกรองทรายชีวภาพและระบบบำบัดโดยรวม	48
3.4 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ผล	51
3.5 ระยะเวลาในการดำเนินงาน	52

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....	53
4.1 การทดลองช่วงที่ 1 ศึกษาผลของค่าการระบรทุกสารอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย ของระบบถังกรองไร้อากาศ	53
4.1.1 การระบรทุกสารอินทรีย์ 0.5 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน.....	53
4.1.2 การระบรทุกสารอินทรีย์ 1 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน.....	56
4.1.3 การระบรทุกสารอินทรีย์ 2 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน.....	58
4.1.4 การระบรทุกสารอินทรีย์ 4 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน.....	60
4.1.5 ประสิทธิภาพของการบำบัดซีโอดีด้วยถังกรองไร้อากาศ.....	62
4.1.6 ค่าจลนพลศาสตร์ของถังกรองไร้อากาศ.....	63
4.2 การทดลองช่วงที่ 2 ศึกษาผลของระดับความลึกชั้นทรายต่อประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ ถังกรองทรายชีวภาพและระบบบำบัดโดยรวม.....	66
4.2.1 ซีโอดี.....	66
4.2.2 ซีลไฟต์.....	68
4.2.3 สี.....	69
4.2.4 แอมโมเนีย ไนเตรท และไนไตรท์.....	71
4.2.5 ของแข็งแขวนลอย.....	75
4.2.6 พีเอช ไออาร์พี และออกซิเจนละลาย.....	77
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	79
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	79
5.1.1 การทดลองช่วงที่ 1 ศึกษาผลของค่าการระบรทุกสารอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพการบำบัด น้ำเสียของระบบถังกรองไร้อากาศ.....	79
5.1.2 ศึกษาผลของระดับความลึกชั้นทรายต่อประสิทธิภาพการบำบัดของระบบถังกรองทราย ชีวภาพและระบบบำบัดโดยรวม.....	79
5.1.3 ข้อดีและข้อจำกัดของการนำไปใช้ในอนาคต	80
5.2 ข้อเสนอแนะ	80

ภาคผนวก.....	81
ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำ.....	81
ภาคผนวก ข ข้อมูลผลการทดลอง.....	87
บรรณานุกรม.....	109
ประวัติผู้เขียน.....	113



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2-1 อัตราการเกิดน้ำเสียต่อคนต่อวัน.....	6
ตารางที่ 2-2 ปริมาณน้ำเสียจากอาคารประเภทต่างๆ.....	6
ตารางที่ 2-3 ลักษณะน้ำเสียชุมชน	7
ตารางที่ 2-4 ค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภทและบางขนาด	8
ตารางที่ 2-5 ระดับออกซิเจนละลาย (DO) และระดับโออาร์พี (ORP) ของปฏิริยาการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ.....	10
ตารางที่ 2-6 ความเข้มข้นของอ็อกซิเจนที่กระตุ้นและยับยั้งปฏิริยา	18
ตารางที่ 2-7 การลดความเป็นพิษของอ็อกซิเจนแต่ละชนิด	18
ตารางที่ 2-8 การเพิ่มความเป็นพิษของอ็อกซิเจนแต่ละชนิด	18
ตารางที่ 2-9 โลหะหนักที่พบในระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ	19
ตารางที่ 2-10 ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ยับยั้งการทำงานของระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ.....	20
ตารางที่ 2-11 ระดับความเป็นพิษของแอมโมเนียอ็อกซิเจน.....	21
ตารางที่ 2-12 รายละเอียดทางกายภาพของตัวกลางแต่ละชนิด	25
ตารางที่ 3-1 องค์ประกอบของธาตุอาหารที่ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์.....	44
ตารางที่ 3-2 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงที่ 1	45
ตารางที่ 3-3 ลักษณะการเดินระบบในการทดลองช่วงที่ 1	48
ตารางที่ 3-4 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงที่ 2	48
ตารางที่ 3-5 ลักษณะการเดินระบบในการทดลองช่วงที่ 2.....	51
ตารางที่ 3-6 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์.....	51
ตารางที่ 3-7 ระยะเวลาในการดำเนินงาน.....	52
ตารางที่ 4-1 ค่าจลนพลศาสตร์ของถังกรองไร้อากาศต่างๆ.....	64
ตารางที่ 4-2 ปริมาณซีโอดีที่ความลึกชั้นทราย 80 , 60 , 40 , 20 และ 0 เซนติเมตร.....	67
ตารางที่ 4-3 ปริมาณซัลไฟด์ที่ความลึกชั้นทราย 80 , 60 , 40 , 20 และ 0 เซนติเมตร.....	68

ตารางที่ 4-4 ค่าสีที่ความลึกชั้นทราย 80 , 60 , 40 , 20 และ 0 เซนติเมตร..... 70

ตารางที่ 4-5 ปริมาณแอมโมเนีย ไนเตรท และไนไตรท์ ที่ความลึกชั้นทราย 80 , 60 , 40 , 20 และ 0
 73

ตารางที่ 4-6 ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่ความลึกชั้นทราย 80 , 60 , 40 , 20 และ 0 เซนติเมตร 76



สารบัญรูปลูกภาพ

รูปที่ 2-1 สมดุลมวลของถังปฏิกริยาแบบใช้อากาศ (ซ่าย) และถังปฏิกริยาแบบไร้อากาศ (ขวา).....	10
รูปที่ 2-2 ปฏิกริยารีดอกซ์ในการบำบัดน้ำเสีย.....	11
รูปที่ 2-3 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศ.....	13
รูปที่ 2-4 ตัวกลางพลาสติกที่นิยมใช้ในถังกรองไร้อากาศ	24
รูปที่ 2-5 ถังกรองไร้อากาศแบบไหลขึ้น (Upflow Anaerobic Filter)	27
รูปที่ 2-6 ถังกรองไร้อากาศแบบไหลลง (Downflow Anaerobic Filter).....	28
รูปที่ 2-7 ถังกรองไม่ใช้อากาศแบบไหลลง-ไหลขึ้น (Downflow-Upflow Anaerobic Filter).....	29
รูปที่ 2-8 ลักษณะการวางตัวกลางในถังกรองไม่ใช้อากาศแบบไหลขึ้น	30
รูปที่ 2-9 ถังกรองทรายชีวภาพ (Biological sand filter, BSF).....	31
รูปที่ 2-10 จลนพลศาสตร์แบบโมนอด (Monod kinetics)	35
รูปที่ 2-11 จลนพลศาสตร์อันดับศูนย์ (Zero order kinetics).....	36
รูปที่ 2-12 จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง (First order kinetics).....	36
รูปที่ 3-1 ระบบถังกรองไร้อากาศและถังกรองทรายชีวภาพ.....	43
รูปที่ 3-2 ตัวกลางพลาสติกของบริษัท อาควา นิซิวารา คอร์ปอเรชั่น จำกัด.....	44
รูปที่ 3-3 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองช่วงที่ 1.....	47
รูปที่ 3-4 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองช่วงที่ 2.....	50
รูปที่ 4-1 ปริมาณซีโอดี แอมโมเนีย ไนเตรท และไนไตรท์ ที่ภาวะบรรทุทุกสารอินทรีย์.....	55
รูปที่ 4-2 ปริมาณซีโอดี แอมโมเนีย ไนเตรท และไนไตรท์ ที่ภาวะบรรทุทุกสารอินทรีย์.....	57
รูปที่ 4-3 ปริมาณซีโอดี แอมโมเนีย ไนเตรท และไนไตรท์ ที่ภาวะบรรทุทุกสารอินทรีย์.....	59
รูปที่ 4-4 ปริมาณซีโอดี แอมโมเนีย ไนเตรท และไนไตรท์ ที่ภาวะบรรทุทุกสารอินทรีย์.....	61
รูปที่ 4-5 ประสิทธิภาพของการบำบัดซีโอดีด้วยถังกรองไร้อากาศ.....	62

รูปที่ 4-6	ค่าจลนพลศาสตร์ของถังกรองไร้อากาศ	65
รูปที่ 4-7	ปริมาณซีโอไลท์ที่ความลึกชั้นทราย 80 , 60 , 40 , 20 และ 0 เซนติเมตร	67
รูปที่ 4-8	ปริมาณซัลไฟด์ที่ความลึกชั้นทราย 80 , 60 , 40 , 20 และ 0 เซนติเมตร.....	69
รูปที่ 4-9	ค่าสีที่ความลึกชั้นทราย 80 , 60 , 40 , 20 และ 0 เซนติเมตร	71
รูปที่ 4-10	ปริมาณแอมโมเนีย ไนเตรท และไนไตรท์	74
รูปที่ 4-11	ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่ความลึกชั้นทราย 80 , 60 , 40 , 20 และ 0 เซนติเมตร....	76
รูปที่ 4-12	ค่าพีเอชในการทดลองช่วงที่ 2.....	77
รูปที่ 4-13	ค่าโออาร์พีในการทดลองช่วงที่ 2	78
รูปที่ 4- 14	ค่าออกซิเจนละลายในการทดลองช่วงที่ 2	78
รูปที่ ก-1	กราฟมาตรฐานของน้ำเสียสังเคราะห์.....	82
รูปที่ ก-2	กราฟมาตรฐานของการวิเคราะห์แอมโมเนีย.....	83
รูปที่ ก-3	กราฟมาตรฐานของการวิเคราะห์ไนไตรท์.....	84
รูปที่ ก-4	กราฟมาตรฐานของการวิเคราะห์ไนเตรต.....	85

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

น้ำทิ้งจากบ่อเกรอะและบ่อกรองไร้อากาศมักจะมีตะกอน สี และกลิ่นเป็นที่น่ารังเกียจของคนทั่วไป เมื่อปล่อยน้ำทิ้งประเภทนี้ลงสู่ระบบระบายน้ำสาธารณะจึงทำให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมตามมา โดยเฉพาะการขยายตัวของชุมชนไปสู่พื้นที่นอกเขตการรวบรวมน้ำเสีย ยิ่งทำให้การบำบัดน้ำทิ้งประเภทนี้ยุ่งยากมากยิ่งขึ้น น้ำทิ้งประเภทนี้จึงมีความจำเป็นที่ต้องผ่านระบบบำบัดขั้นต่อไปเพื่อลดค่าบีโอดีลง ซึ่งระบบบำบัดน้ำเสียส่วนใหญ่ที่นิยมนำมาใช้บำบัดต่อเป็นระบบบำบัดแบบใช้อากาศ ต้องมีการเติมอากาศอยู่ตลอดเวลาทำให้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียของอาคารขนาดเล็กที่มีค่าใช้จ่ายต่ำและน้ำทิ้งไม่เป็นที่น่ารังเกียจจึงเป็นเป้าหมายหลักของการศึกษานี้

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบถังกรองไร้อากาศ เป็นระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน เช่นเดียวกับบ่อเกรอะ มีประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดีและของแข็งแขวนลอยอยู่ที่ร้อยละ 50-80 ภายในบรรจุตัวกลางเพื่อเป็นวัสดุให้จุลินทรีย์ยึดเกาะและทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เข้ามาในระบบ แต่มักเกิดปัญหาการอุดตันของตัวกลาง ดังนั้นจึงต้องมีการกำจัดสารแขวนลอยหรือไขมันออกก่อน ซึ่งในกรณีที่ใช้บำบัดน้ำเสียจากส้วมจึงควรผ่านเข้าบ่อเกรอะก่อน ทั้งนี้ น้ำทิ้งจากบ่อกรองไร้อากาศมักมีสีดำและมีกลิ่นเหม็น จึงจำเป็นต้องมีการกำจัดสีและกลิ่นด้วยกระบวนการบำบัดขั้นต่อไป

ถังกรองทรายชีวภาพ มีกลไกการบำบัดอยู่ 2 ประเภท คือ การกรองที่ชั้นผิวหน้าทรายเพื่อลดตะกอนหรือของแข็งต่างๆ และการเติมอากาศในชั้นทรายเพื่อลดสีและกลิ่นของน้ำ สำหรับประสิทธิภาพการบำบัดพบว่าน้ำทิ้งที่ออกจากถังกรองทรายชีวภาพมีค่าของแข็งแขวนลอยไม่เกิน 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง ทั้งนี้ประสิทธิภาพนั้นขึ้นอยู่กับอัตราการอุดตันของทรายหลังจากผ่านการใช้งานไปสักระยะแล้วด้วย ดังนั้นระบบบำบัดขั้นแรกก่อนที่จะบำบัดด้วยถังกรองทรายชีวภาพจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง

ในงานวิจัยนี้สนใจที่จะศึกษาการบำบัดน้ำเสียด้วยถังกรองไร้อากาศเป็นระบบบำบัดแรกเพื่อบำบัดสารอินทรีย์ละลายน้ำ เนื่องจากเป็นระบบที่ใช้พลังงานน้อยและเกิดตะกอนในระบบน้อย และเลือกใช้ถังกรองทรายชีวภาพเป็นระบบบำบัดที่สองเพื่อบำบัดตะกอน สี และกลิ่น เนื่องจากเป็นระบบที่ไม่ซับซ้อนและไม่ใช้พลังงาน โดยจะทำการศึกษาค่าการะบรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสมต่อถังกรองไร้อากาศ จากนั้นนำค่าที่เหมาะสมมาศึกษาร่วมกับค่าความลึกชั้นทรายที่ระดับต่างๆในถังกรองทรายชีวภาพ ซึ่งคาดว่าจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียโดยรวมของระบบ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาผลของภาวะบรรทุกระบบอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพของระบบถังกรองไร้อากาศ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลของระดับความลึกชั้นทรายในถังกรองทรายชีวภาพต่อประสิทธิภาพของถังกรองทรายชีวภาพ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ โดยดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีขอบเขตของงานวิจัยดังนี้

- 1.3.1 ใช้ถังกรองไร้อากาศ มีลักษณะเป็นทรงกระบอก แบ่งออกเป็น 4 ถัง ภายในบรรจุตัวกลางพลาสติกเต็มถัง
- 1.3.2 ใช้ถังกรองทรายชีวภาพ มีลักษณะเป็นทรงกระบอก ภายในบรรจุทรายเป็นวัสดุกรองเพียงอย่างเดียว
- 1.3.3 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากน้ำตาลทรายเพื่อเป็นตัวแทนของน้ำเสียชุมชน โดยมีความเข้มข้นเท่ากับ 1,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ตลอดทั้งการทดลอง
- 1.3.4 เติกระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous flow)
- 1.3.5 ทดลองเปลี่ยนค่าภาวะบรรทุกระบบอินทรีย์ที่ 0.5 , 1 , 2 และ 4 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้อัตราการไหล 24 , 48 , 96 และ 192 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ
- 1.3.6 ทดลองเปลี่ยนค่าความลึกชั้นทรายที่ 0 , 20 , 40 , 60 และ 80 เซนติเมตร
- 1.3.7 พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด ได้แก่ พีเอช (pH) , ซีโอดี (COD) , ของแข็งแขวนลอย (TSS) , แอมโมเนีย (NH_3) , ไนเตรท (NO_3^-) , ไนไตรท์ (NO_2^-) , ซัลไฟด์ (S^{2-}) , ออกซิเจนละลาย (DO) , โออาร์พี (ORP) และสี (color)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ค่าภาระบรรทุทุกสารอินทรีย์ต่อขนาดถังกรองไร้อากาศที่เหมาะสม
- 1.4.2 ค่าความลึกชั้นทรายต่อประสิทธิภาพของถังกรองทรายชีวภาพ
- 1.4.3 ทราบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียโดยรวม ของระบบถังกรองไร้อากาศและถังกรองทรายชีวภาพ
- 1.4.4 สามารถนำข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปใช้ในการออกแบบถังกรองทรายชีวภาพสำหรับน้ำเสียชุมชนขนาดเล็กหรือน้ำเสียที่ออกมาจากส่วนกรองไร้อากาศในถังเกราะได้
- 1.4.5 สามารถนำข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปต่อยอดหรือเป็นแนวทางในการศึกษาต่อไป



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำเสียชุมชน

น้ำเสียชุมชน หมายถึง น้ำที่ผ่านการใช้งานแล้วก่อให้เกิดการเจือปนของสิ่งต่างๆลงไปในน้ำเหล่านั้น อันเกิดจากการประกอบกิจกรรมประจำวันและการประกอบอาชีพของประชาชนทั้งหลายในชุมชน เช่น การประกอบอาหาร การอาบน้ำ การชำระล้างสิ่งปฏิกูลและน้ำล้างจากส้วม รวมไปถึงการซักล้างสิ่งสกปรกต่างๆภายในบ้านเรือนหรืออาคารประเภทต่างๆ เป็นต้น ซึ่งเราไม่สามารถนำน้ำเหล่านั้นมาใช้ประโยชน์ต่อได้อีก เนื่องจากมีลักษณะเป็นที่น่ารังเกียจและไม่เป็นที่ต้องการของคนทั่วไป หรือถ้าปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจะก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำตามมาอีกมากมาย น้ำเสียชุมชนส่วนใหญ่จะมีปริมาณสารอินทรีย์ (Organic Matter) ที่ย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางธรรมชาติปนเปื้อนในปริมาณสูง นอกจากนี้ยังปนเปื้อนไปด้วยฟอสเฟต (Phosphate) จากการใช้สารซักฟอก รวมทั้งแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม และองค์ประกอบอื่นๆอีกมากมาย ดังนี้

1. **สารอินทรีย์** ได้แก่ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน เช่น เศษอาหาร เศษพืชผัก เป็นต้น ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ โดยจุลินทรีย์จะใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายจึงทำให้ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen) ลดลงจนทำให้เกิดการเน่าเหม็นได้ การวัดปริมาณของสารอินทรีย์ในน้ำนิยมวัดด้วยค่าบีโอดี (BOD) เมื่อในน้ำมีค่าบีโอดีสูง แสดงว่าน้ำเสียมีสารอินทรีย์อยู่มากและเกิดการเน่าเสียได้ง่าย

2. **สารอนินทรีย์** ได้แก่ แร่ธาตุต่างๆที่อาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต เช่น คลอไรด์ ซัลเฟต เป็นต้น แต่อาจไม่สามารถทำให้เกิดปัญหาน้ำเน่าเหม็น

3. **โลหะหนักและสารพิษ** เช่น ปรอท โครเมียม ทองแดง โดยอาจอยู่ในรูปของสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์และสามารถสะสมอยู่ในวงจรอาหาร ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้ โดยในเขตชุมชนอาจมาจากอุตสาหกรรมในครัวเรือนบางประเภท เช่น อู่ซ่อมรถ ร้านรับชุบโลหะ และโรงพยาบาล เป็นต้น และอาจมาจากสารเคมีที่ปนมากับน้ำทิ้งในการทำเกษตรกรรม

4. **น้ำมันและสารลอยน้ำต่างๆ** เป็นตัวกีดขวางการสังเคราะห์แสงและการละลายของออกซิเจนลงสู่แหล่งน้ำ ทำให้แหล่งน้ำไม่น่ามองและส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำเสียชีวิต

5. **ของแข็ง** เมื่อจมตัวและทับถมลงไปในแหล่งน้ำ ทำให้เกิดสภาพไร้อากาศบริเวณท้องน้ำ ทำให้แหล่งน้ำตื้นและขุ่น ส่งผลต่อการดำรงชีพของสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ

6. **สารก่อให้เกิดฟองหรือสารซักฟอก** ได้แก่ สบู่ ผงซักฟอก โดยฟองที่เกิดขึ้นจะกีดขวางการละลายของออกซิเจนลงสู่แหล่งน้ำและอาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ

7. **จุลินทรีย์** โดยปกติจุลินทรีย์ใช้ออกซิเจนในการดำรงชีวิต เมื่อในแหล่งน้ำมีจุลินทรีย์เป็นจำนวนมากจึงทำให้ระดับของออกซิเจนละลายน้ำในแหล่งน้ำลดลง ทำให้เกิดการเน่าเหม็น โดยน้ำเสียจากโรงงานอาหาร โรงฆ่าสัตว์ และโรงงานฟอกหนังจะมีจุลินทรีย์จำพวกนี้เป็นจำนวนมาก นอกจากนี้จุลินทรีย์บางชนิดอาจเป็นเชื้อโรคที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ เช่น จุลินทรีย์จากน้ำเสียโรงพยาบาล เป็นต้น

8. **ธาตุอาหาร** การเจริญเติบโตและเพิ่มปริมาณอย่างรวดเร็วของสาหร่ายและวัชพืชในแหล่งน้ำ มีสาเหตุมาจากการมีปริมาณธาตุอาหารในแหล่งน้ำที่มากเกินไป เช่น ไนโตรเจน และ ฟอสฟอรัส ซึ่งทำให้ระดับออกซิเจนในน้ำลดลงมาก อีกทั้งยังกีดขวางการสัญจรทางน้ำอีกด้วย

9. **กลิ่น** เกิดจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ ทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และอาจปะปนกับกลิ่นอื่นๆจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โรงฆ่าสัตว์ โรงงานทำปลาป่น เป็นต้น

ปริมาณน้ำเสียที่ปล่อยทิ้งจากบ้านเรือน อาคาร มีประมาณร้อยละ 80 ของปริมาณน้ำใช้หรืออาจประเมินได้จากจำนวนประชากร หรือพื้นที่ใช้สอยของอาคารแต่ละประเภท ดังแสดงในตารางที่ 2-1 และตารางที่ 2-2 และลักษณะน้ำเสียชุมชนแสดงในตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-1 อัตราการเกิดน้ำเสียต่อคนต่อวัน

ภาค	อัตราการเกิดน้ำเสีย (ลิตร/คน-วัน)					
	2536	2540	2545	2550	2555	2560
กลาง	160 - 214	165 - 242	170-342	176 - 342	183 - 406	189 - 482
เหนือ	183	200	225	252	282	315
ตะวันออกเฉียงเหนือ	200 - 253	216-263	239 - 277	264 - 291	291 - 306	318 - 322
ใต้	171	195	204	226	249	275

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ, 2545

ตารางที่ 2-2 ปริมาณน้ำเสียจากอาคารประเภทต่างๆ

ประเภทอาคาร	หน่วย	ลิตร/วัน-หน่วย
อาคารชุด/บ้านพัก	ยูนิต	500
โรงแรม	ห้อง	1000
หอพัก	ห้อง	80
สถานบริการ	ห้อง	400
หมู่บ้านจัดสรร	คน	180
โรงพยาบาล	เตียง	800
ภัตตาคาร	ตารางเมตร	25
ตลาด	ตารางเมตร	70
ห้างสรรพสินค้า	ตารางเมตร	50
สำนักงาน	ตารางเมตร	30

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ, 2545

ตารางที่ 2-3 ลักษณะน้ำเสียชุมชน

พารามิเตอร์	ความเข้มข้น			
	หน่วย	น้อย	ปานกลาง	มาก
1. ของแข็งทั้งหมด (Total Solids)	มก./ล.	350	720	1200
- ของแข็งละลายน้ำ (Dissolved Solids)	มก./ล.	250	500	580
- ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids)	มก./ล.	100	220	350
2. ปริมาณตะกอนหนัก (Settleable Solids)	มก./ล.	5	10	20
3. ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand; BOD)	มก./ล.	110	220	400
4. ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand; COD)	มก./ล.	250	500	1000
5. ไนโตรเจนทั้งหมด (Total as N)	มก./ล.	20	40	85
- อินทรีย์ไนโตรเจน (Organic)	มก./ล.	8	15	35
- แอมโมเนีย (Free ammonia)	มก./ล.	12	25	50
- ไนไตรท์ (Nitrites)	มก./ล.	0	0	0
- ไนเตรท (Nitrate)	มก./ล.	0	0	0
6. ฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total as P)	มก./ล.	4	8	15
- สารอินทรีย์ (Organic)	มก./ล.	1	3	5
- สารอนินทรีย์ (Inorganic)	มก./ล.	3	5	10
7. คลอไรด์ (Chloride) ⁽¹⁾	มก./ล.	30	50	100
8. ซัลเฟต (Sulfate) ⁽¹⁾	มก./ล.	20	30	50
9. สภาพด่าง (Alkalinity as CaCO ₃)	มก./ล.	50	100	200
10. ไขมัน (Grease)	มก./ล.	50	100	150
11. โคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมด (Total Coliform)	MPN/100ml	10 ⁶ -10 ⁷	10 ⁷ -10 ⁸	10 ⁷ -10 ⁹

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ, 2545

2.2 ค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภทและบางขนาด

น้ำทิ้งจากอาคารจะถูกควบคุมคุณภาพน้ำให้ได้ตามมาตรฐานก่อนการปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือสู่สิ่งแวดล้อม ดังแสดงในตารางที่ 2-4 ดังนั้นการเลือกใช้ระบบบำบัดน้ำเสียให้เหมาะสมจึงมีความสำคัญ ซึ่งต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพการบำบัดและความเหมาะสมในด้านต่างๆ เช่น ต้นทุนและความยากง่ายในการเดินระบบ เป็นต้น

ตารางที่ 2-4 ค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภทและบางขนาด

ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	เกณฑ์กำหนดสูงสุดตามประเภทมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้ง					วิธีวิเคราะห์
		ก	ข	ค	ง	จ	
1. ค่าความเป็นกรดต่าง (pH)	-	5-9	5-9	5-9	5-9	5-9	ใช้เครื่องวัดความเป็นกรดและต่างของน้ำ (pH Meter)
2. บีโอดี (BOD)	มก./ล.	ไม่เกิน 20	ไม่เกิน 30	ไม่เกิน 40	ไม่เกิน 50	ไม่เกิน 200	ใช้วิธีการ Azide Modification ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน ติดต่อกัน หรือวิธีการอื่นที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษให้ความเห็นชอบ
3. ปริมาณของแข็ง - ค่าสารแขวนลอย (Suspended Solids)	มก./ล.	ไม่เกิน 30	ไม่เกิน 40	ไม่เกิน 50	ไม่เกิน 50	ไม่เกิน 60	กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fibre Filter Disc)
- ค่าตะกอนหนัก (Settleable Solids)	มก./ล.	ไม่เกิน 0.5	ไม่เกิน 0.5	ไม่เกิน 0.5	ไม่เกิน 0.5	-	วิธีการกรวยอิมhoff (Imhoff cone) ขนาดบรรจุ 1,000 ลบ. ซม. ในเวลา 1 ชั่วโมง
- ค่าสารที่ละลายได้ทั้งหมด (Total Dissolved Solids)	มก./ล.	ไม่เกิน 500*	ไม่เกิน 500*	ไม่เกิน 500*	ไม่เกิน 500*	-	ระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส ในเวลา 1 ชั่วโมง
4. ค่าซัลไฟด์ (Sulfide)	มก./ล.	ไม่เกิน 1.0	ไม่เกิน 1.0	ไม่เกิน 3.0	ไม่เกิน 4.0	-	วิธีการไตเตรต (Titrate)
5. ไนโตรเจน (Nitrogen) ในรูป ทีเคเอ็น (TKN)	มก./ล.	ไม่เกิน 35	ไม่เกิน 35	ไม่เกิน 40	ไม่เกิน 40	-	วิธีการเจลดาร์ล (kjeldahl)
6. น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease)	มก./ล.	ไม่เกิน 20	ไม่เกิน 20	ไม่เกิน 20	ไม่เกิน 20	ไม่เกิน 100	วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย แล้วแยกหาน้ำหนักของน้ำมันและไขมัน

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ, 2548

2.3 กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

2.3.1 ความหมายของการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพที่ใช้แบคทีเรียชนิดที่ไม่ใช้ออกภาคในการหายใจเป็นตัวย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย โดยแบคทีเรียอาจใช้คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน ซัลเฟต หรือสารอื่นๆ ในการหายใจแทนอากาศเพื่อให้สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ สามารถเขียนแทนได้ด้วยสมการดังนี้



หรืออีกหนึ่งความหมายคือ ระบบบำบัดน้ำเสียทุกรูปแบบที่ไม่ใช้ออกซิเจนเป็นสารรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย โดยสารรับอิเล็กตรอนแต่ละตัวจะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมีที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้

1. เฟอร์เมนเตชัน (Fermentation)
2. ดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification)
3. ซัลเฟตรีดักชัน (Sulfate Reduction)
4. เมทาโนเจเนซิส (Methanogenesis)

ปกติระบบบำบัดแบบใช้อากาศมักมีการเติมอากาศอยู่เสมอ ทำให้ระบบที่ไม่มีการเติมอากาศถูกมองว่าเป็นระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศด้วย เนื่องจากช่วงที่ไม่มีการเติมอากาศนั้นจะไม่มีออกซิเจนอิสระในน้ำ หรือมีน้อยมากจนแบคทีเรียชนิดที่ใช้อากาศไม่มีบทบาทเด่นมากพอ

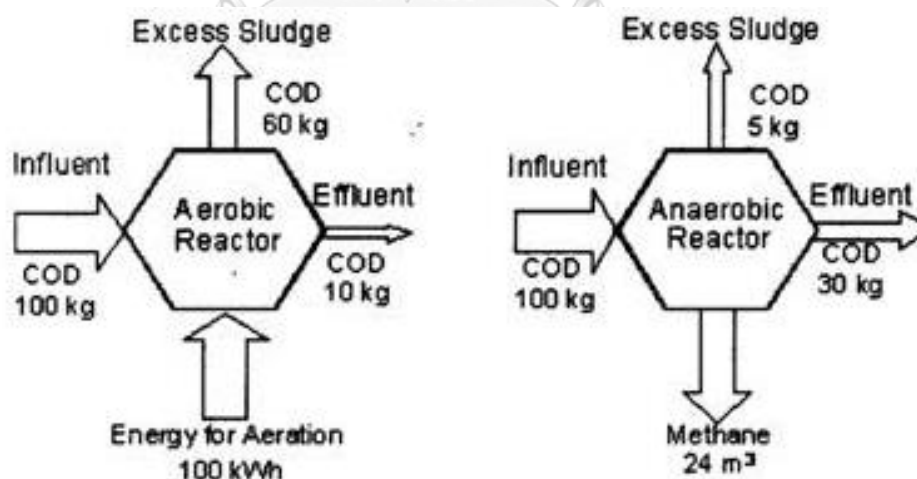
การจำแนกปฏิกิริยาการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศประเภทต่างๆ สามารถบอกได้จากระดับออกซิเจนละลาย (DO) และระดับโออาร์พี (ORP) ดังแสดงในตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-5 ระดับออกซิเจนละลาย (DO) และระดับโออาร์พี (ORP) ของปฏิกิริยาการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

ปฏิกิริยาการบำบัดน้ำเสีย แบบไร้อากาศ	ออกซิเจนละลาย (มก./ล.)	โออาร์พี (มิลลิโวลต์)
ดีไนตริฟิเคชัน	0-0.5	0 ถึง +100
เฟอร์เมนเตชัน	0	0 ถึง -100
การสร้างกรดอินทรีย์ละลาย	0	-100 ถึง -200
ซัลเฟตรีดักชัน	0	น้อยกว่า -200
เมทาโนเจเนซิส	0	น้อยกว่า -200

ที่มา : มั่นสิน ตันกุลเวศม์, 2546

โดยทั่วไปน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศมักมีตะกอนส่วนเกิน (Excess sludge) ในปริมาณน้อย (ประมาณร้อยละ 5 ของสารอินทรีย์ตั้งต้น) เมื่อเทียบกับระบบบำบัดแบบใช้อากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2-1 ทำให้ไม่มีปัญหาในเรื่องของการจัดการกากตะกอน อีกทั้งยังให้ผลพลอยได้เป็นก๊าซมีเทนซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทางเลือกได้

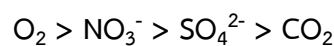


รูปที่ 2-1 สมดุลมวลของถังปฏิกิริยาแบบใช้อากาศ (ซ้าย) และถังปฏิกิริยาแบบไร้อากาศ (ขวา)

ที่มา : Journey และ McNiven, 1996

2.3.2 กลไกการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ คือปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างสารให้อิเล็กตรอนหรือสารอินทรีย์ที่มีพลังงานสูงในน้ำเสีย กับสารรับอิเล็กตรอนหรือสารชนิดอื่นในน้ำเสีย เรียกปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นนี้ว่าเป็นปฏิกิริยารีดอกซ์ หรือออกซิเดชัน-รีดักชัน ซึ่งสารรับอิเล็กตรอนทั่วไปมีหลายตัวขึ้นอยู่กับพลังงานที่แบคทีเรียจะได้รับจากการใช้สารเหล่านั้น โดยสามารถเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้



ออกซิเจนอิสระเป็นสารรับอิเล็กตรอนในปฏิกิริยาแบบใช้อากาศหรือแอโรบิก แต่ไนเตรท ซัลเฟต และคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารรับอิเล็กตรอนในปฏิกิริยาแบบไม่ใช้อากาศหรือแอนแอโรบิก ดังนั้นความแตกต่างระหว่างปฏิกิริยาแบบใช้อากาศและไม่ใช้อากาศขึ้นอยู่กับประเภทของสารรับอิเล็กตรอน ดังรูปที่ 2-2



รูปที่ 2-2 ปฏิกิริยารีดอกซ์ในการบำบัดน้ำเสีย

ที่มา : มั่นสิน ตันกุลเวศม์, 2542

การถ่ายเทอิเล็กตรอนจะก่อให้เกิดพลังงานขึ้นและพลังงานส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปในรูปของความร้อน อีกส่วนหนึ่งจะถูกนำไปใช้ในกระบวนการสร้างเซลล์ใหม่และการดำรงชีวิตของแบคทีเรีย ดังนั้นสารอินทรีย์ในน้ำเสียจึงเป็นทั้งแหล่งพลังงานและแหล่งคาร์บอนให้แก่แบคทีเรีย

แบคทีเรียที่ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศมีหลายกลุ่มโดยดำรงชีวิตอยู่แบบพึ่งพาอาศัยกันและแบบแข่งขันกัน สารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่และสลับซับซ้อน เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน จะถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียกลุ่มหนึ่ง แล้วผลิตภัณฑ์ที่ได้ก็จะถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียอีกกลุ่มหนึ่งต่อไปเป็นทอดๆ เกิดผลพลอยได้เป็นก๊าซชีวภาพหรือไบโอแก๊ส (Biogas)

กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศมีความสลับซับซ้อนค่อนข้างมาก และยังต้องอาศัยเอนไซม์จากแบคทีเรียหลายๆกลุ่มในการเกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมี โดยขั้นตอนการย่อยสลายแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2-3 และมีรายละเอียดดังนี้

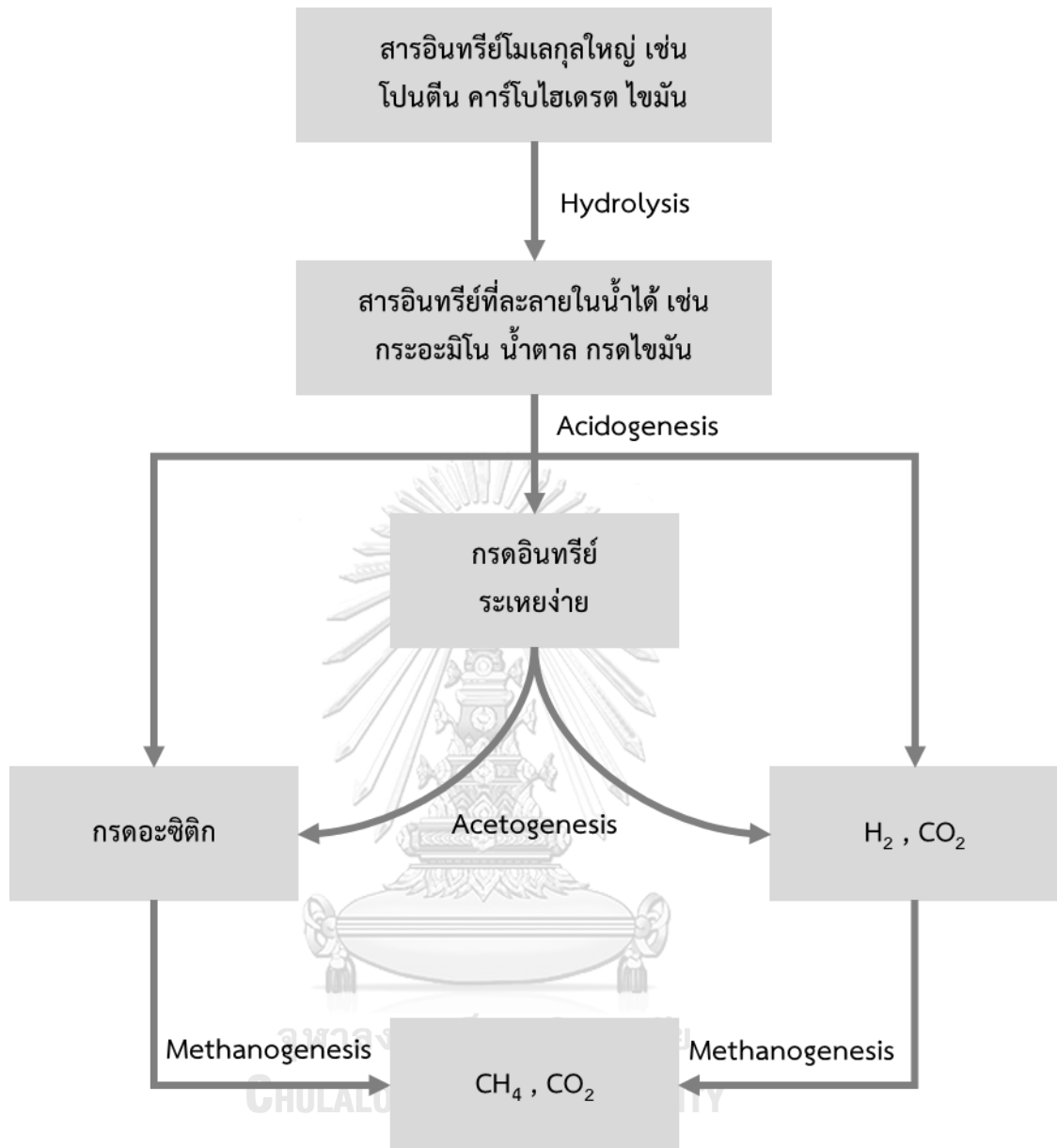
ขั้นตอนที่ 1 : Solubilisation หรือ Hydrolysis

ขั้นตอนที่ 2 : Acidogenesis

ขั้นตอนที่ 3 : Acetogenesis

ขั้นตอนที่ 4 : Methanogenesis





รูปที่ 2-3 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน
ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2549

ขั้นตอนที่ 1 : Solubilisation หรือ Hydrolysis

เนื่องจากแบคทีเรียใช้สารอินทรีย์ในน้ำเสียเป็นแหล่งพลังงานและแหล่งคาร์บอนในการเจริญเติบโตและการดำรงชีวิต สารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่ เช่น ไขมัน โปรตีน และคาร์โบไฮเดรต จะถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์ที่แบคทีเรียปล่อยออกมาภายนอกเซลล์ให้กลายเป็นสารประกอบเชิงเดี่ยว (Monomer) เพื่อใช้ในกระบวนการสร้างกรด แบคทีเรียที่ทำหน้าที่ในการย่อยสลายคือ

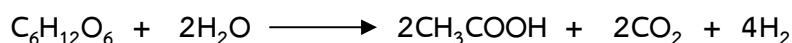
แบคทีเรียจำพวก Facultative Anaerobic Bacteria ขึ้นตอนไฮโดรไลซิสเป็นขั้นตอนที่ค่อนข้างช้า โดยความเร็วของกระบวนการย่อยสลายจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เป็นสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาเคมี ความเข้มข้นของเอนไซม์ ฟิเอน อุมหภูมิ และพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสารอินทรีย์และ เอนไซม์ เป็นต้น ทั้งนี้ทั้งนั้นชนิดของเอนไซม์ที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยามีความเฉพาะเจาะจงขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์ในน้ำเสียด้วยเช่นกัน เช่น ต้องใช้เอนไซม์ไลเปส (Lipase) และเอสเตอเรส (Esterases) ในการย่อยสลายไขมัน หรือต้องใช้เอนไซม์โปรตีเอส (Protease) ย่อยสลายโปรตีน หรือต้องใช้เอนไซม์อะไมเลส (Amylase) ย่อยสลายแป้งและไกลโคเจน เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 2 : Acidogenesis

แบคทีเรียที่ทำหน้าที่สร้างกรดในขั้นตอนนี้ คือแบคทีเรียในกลุ่มของ Fermentative Bacteria หรือ Acidogens ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ด้วย โดยแบคทีเรียกลุ่มนี้จะเปลี่ยนสารที่ได้จากการย่อยสลายในขั้นตอนไฮโดรไลซิสให้เป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ที่มีคาร์บอนอะตอมไม่เกิน 5 ตัว เช่น กรดอะซิติก (Acetic acid) กรดโพรไพโอนิก (Propionic acid) กรดวาเลอริก (Valeric acid) และกรดแลคติก (Lactic acid) โดยในกรดที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะมีสัดส่วนของกรดอะซิติกมากที่สุดและมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้ ในกรณีที่เกิดการสร้างกรดมากเกินไปจะทำให้ค่าพีเอชในระบบลดลงซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำงานของแบคทีเรียสร้างมีเทนได้

ผลผลิตที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารตั้งต้นที่ได้จากขั้นตอนไฮโดรไลซิส และค่าความดันย่อยของก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen Partial Pressure) ดังแสดงในตัวอย่างปฏิกิริยาต่อไปนี้

สภาวะความดันย่อยของก๊าซไฮโดรเจนมีค่าต่ำ



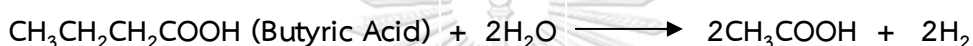
สภาวะความดันย่อยของก๊าซไฮโดรเจนมีค่าต่ำ



จากปฏิกิริยาการย่อยสลายกลูโคสด้านบน จะเห็นว่าในสภาวะที่ความดันย่อยของก๊าซไฮโดรเจนมีค่าต่ำ (Low Hydrogen Partial Pressure) ผลผลิตที่ได้คือ กรดอะซิติก ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ถ้าในสภาวะที่ความดันย่อยของก๊าซไฮโดรเจนมีค่าสูง (High Hydrogen Partial Pressure) ผลผลิตที่ได้ จะอยู่ในรูปของกรดอะซิติก กรดโพรไพโอนิก คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน

ขั้นตอนที่ 3 : Acetogenesis

สารอาหารที่แบคทีเรียสร้างมีเทนสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยตรงประกอบไปด้วย กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ไฮโดรเจน เมทานอล และเมธิลามีน แต่ยังมีสารอาหารจำพวกกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid) ที่มีคาร์บอนอะตอมมากกว่า 2 อะตอม เช่น กรดโพรพิโอนิกและกรดบิวทริก ที่จำเป็นต้องผ่านการย่อยสลายเพื่อให้มีอะตอมของคาร์บอนที่ลดลง แบคทีเรียที่สามารถย่อยสลายกรดไขมันระเหยง่ายที่มีคาร์บอนอะตอมมากกว่า 2 อะตอมให้เป็นกรดอะซิติกได้คือแบคทีเรียสร้างไฮโดรเจน (Hydrogen Producing Acetogenic Bacteria) โดยในสภาวะที่ความดันย่อยของก๊าซไฮโดรเจนมีค่าต่ำจะสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดี ดังสมการ

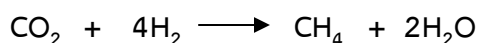
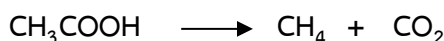


นอกจากนี้ยังมีการค้นพบว่าแบคทีเรียชนิดอื่นอีก ที่สามารถสร้างกรดอะซิติกจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนได้ ดังสมการ



ขั้นตอนที่ 4 : Methanogenesis

ในขั้นตอนนี้เป็นการสร้างก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากขั้นตอนที่ 3 คือ กรดอินทรีย์โมเลกุลเล็ก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน โดยใช้แบคทีเรีย 2 กลุ่ม ได้แก่ แบคทีเรียสร้างมีเทน (Methane Forming Bacteria) ทำหน้าที่เปลี่ยนกรดอินทรีย์โมเลกุลเล็กให้เป็นก๊าซมีเทน และแบคทีเรียประเภท Hydrogen-Utilizing Methane Bacteria ทำหน้าที่รีดิวซ์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนให้กลายเป็นก๊าซมีเทน มีสมการดังต่อไปนี้



แบคทีเรียสร้างมีเทนเจริญเติบโตได้ช้าและสภาพแวดล้อมส่งผลต่อการเจริญเติบโตค่อนข้างมาก ช่วงพีเอชที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตค่อนข้างแคบ ประมาณ 6.8-7.2 จึงจะสามารถเจริญเติบโตได้ดี เมื่อพิจารณากลุ่มแบคทีเรียที่ทำงานร่วมกันในระบบไมโครไบโอม แบคทีเรียสร้าง

มีเทนจะเป็นกลุ่มหลักในการควบคุมความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด เนื่องจากเติบโตช้าที่สุดและมีข้อจำกัดด้านสภาพแวดล้อมค่อนข้างมาก

2.3.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

สามารถจำแนกได้เป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ ปัจจัยด้านสภาพแวดล้อม คือ อุณหภูมิ พีเอช ความเป็นด่าง สารพิษ สารยับยั้งปฏิกิริยา และลักษณะของของเสีย กับปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเดินระบบ ได้แก่ การกวนผสม อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ และเวลากักเก็บ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

อุณหภูมิ

กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ การทำงานของแบคทีเรียจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 2 ช่วง คือ ช่วงมีโซฟิลิก (Mesophilic) จะมีอุณหภูมิประมาณ 20-45 องศาเซลเซียส เรียกแบคทีเรียที่ทำงานในช่วงอุณหภูมินี้ว่า Mesophilic Bacteria และช่วงเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) จะมีอุณหภูมิประมาณ 50-65 องศาเซลเซียส เรียกแบคทีเรียที่ทำงานในช่วงอุณหภูมินี้ว่า Thermophilic Bacteria

สำหรับประเทศที่อยู่ในเขตที่มีอุณหภูมิต่ำหรือช่วงไซโครฟิลิก (Psychrophilic) จะมีอุณหภูมิประมาณ 5-15 องศาเซลเซียส จำเป็นที่จะต้องมีการเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำทิ้ง ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นมาในส่วนนี้ ในส่วนของประเทศไทยสามารถเดินระบบได้ดีโดยไม่ต้องมีการเพิ่มอุณหภูมิ เพราะอยู่ในช่วงมีโซฟิลิก แม้จะมีประสิทธิภาพไม่มากเท่าช่วงเทอร์โมฟิลิก แต่เป็นที่นิยมมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายที่ต้องใช้ในการติดตั้งระบบทำความร้อนเพิ่มเติม กล่าวได้ว่าในประเทศไทยนั้นการรักษารูทอุณหภูมิในระบบให้มีความสม่ำเสมอมีความสำคัญมากกว่าการทำให้ระบบมีอุณหภูมิสูง เพราะหากเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียง 2-3 องศาเซลเซียส ย่อมส่งผลต่อแบคทีเรียสร้างมีเทนได้เช่นกัน

พีเอช

ในขั้นตอนการผลิตก๊าซชีวภาพ (Methanogenesis) จะเกิดได้ดีเมื่อพีเอชในระบบอยู่ระหว่าง 6.6-7.2 เนื่องจากแบคทีเรียสร้างมีเทน (Methanogens) มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชค่อนข้างมาก และระบบจะมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อพีเอชต่ำกว่า 6.2 (Speece, 1996) ในขณะที่แบคทีเรียสร้างกรด (Acidogens) สามารถเจริญเติบโตได้ดีที่พีเอชระหว่าง 5.0-8.0 นอกจากนั้นค่าพีเอชยังส่งผลต่อความเข้มข้นของสารต่างๆ เช่น กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile Fatty

Acid) แอมโมเนีย (NH_3) และ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ซึ่งเป็นสารที่มีความเป็นพิษต่อแบคทีเรียต่างกันอีกด้วย

ความเป็นด่าง (Alkalinity) และความเป็นกรด (Acidity)

ความเป็นกรดในระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศเกิดจากกรดไขมันระเหยง่ายเป็นส่วนใหญ่ โดยปกติปริมาณกรดอะซิติกในระบบควรอยู่ระหว่าง 50-500 มิลลิกรัมต่อลิตร ถ้าหากในระบบมีกรดอะซิติกมากกว่า 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายลดน้อยลง และถ้าหากมีมากจนถึง 8,000-10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จะส่งผลทำให้เกิดความเป็นพิษต่อระบบโดยตรง

เมื่อมีการสร้างกรดไขมันระเหยง่ายมากเกินไป ส่งผลให้ค่าพีเอชในระบบต่ำจนเกิดการยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียสร้างมีเทน ซึ่งเป็นปัญหาที่พบได้บ่อยในระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ ดังนั้นการปรับระบบให้มีบัฟเฟอร์ที่เพียงพอจึงจำเป็นอย่างยิ่ง โดยสารเคมีที่นิยมเติมลงไปในระบบเพื่อเพิ่มความเป็นด่าง ได้แก่ โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) ซึ่งเป็นสารเคมีที่ดีที่สุดในการควบคุมพีเอช เพราะสามารถละลายน้ำได้ดี และให้ค่าความเป็นด่างแก่ระบบโดยตรง

สารพิษและสารยับยั้งปฏิกิริยา

การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางชีวภาพเป็นการใช้จุลชีพซึ่งเป็นสิ่งมีชีวิตมาบำบัดน้ำเสียจึงไม่ควรมีสารที่เป็นพิษอยู่ ซึ่งสารที่เป็นพิษอาจอยู่ในรูปของสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ และมีทั้งชนิดที่เป็นพิษโดยตรงหรือเพียงแค่อับยั้ง (Inhibited) การทำงานของแบคทีเรีย แต่ในบางกรณีถ้าหากสารเหล่านั้นมีความเข้มข้นที่เหมาะสมก็อาจช่วยกระตุ้นการทำงานของแบคทีเรียให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นได้ขึ้นได้ สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มได้ดังนี้

1) อีออนบวก

อีออนบวกที่เป็นพิษต่อแบคทีเรียในระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ ได้แก่ โซเดียม (Na^+) โพแทสเซียม (K^+) แมกนีเซียม (Mg^{2+}) และแคลเซียม (Ca^{2+}) ซึ่งหากมีความเข้มข้นที่พอเหมาะจะเป็นประโยชน์ต่อแบคทีเรีย แต่ถ้าหากมีมากเกินไปอาจเป็นพิษต่อแบคทีเรียในระบบได้ โดยมีระดับความเป็นพิษดังแสดงในตารางที่ 2-6 ทั้งนี้ ความเป็นพิษของอีออนสามารถลดลงได้ (Antagonism) จากการอยู่ร่วมกับธาตุอื่น ๆ ในปริมาณที่เหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 2-7 และในทางตรงกันข้ามอีออนบวกสามารถเพิ่มความเป็นพิษได้จากการอยู่ร่วมกัน (Synergism) ดังแสดงในตารางที่ 2-8

ตารางที่ 2-6 ความเข้มข้นของไอออนบวกที่กระตุ้นและยับยั้งปฏิกิริยา

ชนิดของไอออนบวก	ความเข้มข้น (มก./ล.)		
	กระตุ้น	ยับยั้งปานกลาง	ยับยั้งมาก
Na ⁺	100 - 200	3,500 - 5,500	> 8,000
K ⁺	200 - 400	2,500 - 4,500	> 12,000
Ca ²⁺	100 - 200	2,500 - 4,500	> 8,000
Mg ²⁺	75 - 150	1,000 - 1,500	> 3,000

ที่มา : McCarty, 1964

ตารางที่ 2-7 การลดความเป็นพิษของไอออนแต่ละชนิด

ไอออนที่เป็นพิษ	ไอออนลดความเป็นพิษ
Ammonium (NH ₄ ⁺)	Sodium
Calcium (Ca ²⁺)	Sodium, Potassium
Magnesium (Mg ²⁺)	Sodium, Potassium
Potassium (K ⁺)	Ammonium, Calcium, Magnesium, Sodium
Sodium (Na ⁺)	Potassium

ที่มา : Kugelman และ Chin, 1971

ตารางที่ 2-8 การเพิ่มความเข้มข้นของไอออนแต่ละชนิด

ไอออนที่เป็นพิษ	ไอออนเสริมความเป็นพิษ
Ammonium (NH ₄ ⁺)	Calcium, Magnesium, Potassium
Calcium (Ca ²⁺)	Ammonium, Magnesium
Magnesium (Mg ²⁺)	Ammonium, Calcium
Potassium (K ⁺)	None
Sodium (Na ⁺)	Ammonium, Calcium, Magnesium

ที่มา : Kugelman และ Chin, 1971

2) โลหะหนัก

โลหะหนักมีความเป็นพิษต่อแบคทีเรียในระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศแตกต่างกันไป ดังแสดงในตารางที่ 2-9 โดยทองแดงส่งผลต่อแบคทีเรียมากที่สุด แต่แบคทีเรียเองยังมีความจำเป็นต้องใช้โลหะหนักบางชนิดในการเจริญเติบโต ซึ่งต้องการในปริมาณที่น้อย เช่น นิกเกิลและโคบอลต์ เป็นต้น

ตารางที่ 2-9 โลหะหนักที่พบในระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ

พบมาก	พบบ่อย	ไม่ค่อยพบ
Cadmium (Cd^{2+})	Arsenic (As)	Aluminum (Al)
Chromium(Cr^{6+})	Iron (Fe)	Cobalt (Co)
Copper (Cu^{2+})	Manganese (Mn)	Molybdenum (Mo)
Lead (Pb^{2+})	Mercury (Hg)	Selenium (Se)
Nickel (Ni^{2+})	Silver (Ag)	Tin (Sn)
Zinc (Zn^{2+})		

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2549

ความเป็นพิษของโลหะหนักสามารถลดลงได้ เมื่อโลหะหนักรวมตัวกับซัลไฟด์ที่มีอยู่ในน้ำเสียและกลายเป็นเกลือของโลหะหนักที่ไม่ละลายน้ำ ทั้งนี้ความเป็นพิษของโลหะหนักขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ระดับพลังศักย์ทางไฟฟ้า พีเอช และ Ionic Strength ของระบบ โดยค่าความเป็นพิษของโลหะหนักบางชนิดสามารถดูได้ในตารางที่ 2-10

ตารางที่ 2-10 ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ยับยั้งการทำงานของระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ

โลหะหนัก	ความเข้มข้น (มก./ล.)
Arsenic (As)	0.5 - 1.0
Cadmium (Cd)	0.01 - 0.02
Chromium (Cr ⁶⁺)	1.0 - 1.5
Copper (Cu)	0.5 - 1.0
Nickel (Ni)	1.0 - 2.0
Zinc (Zn)	0.5 - 1.0

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2549

3) แอมโมเนีย

แอมโมเนียในระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนรวมอยู่ด้วย ได้ผลผลิตในรูปของแอมโมเนียมไอออน (NH₄⁺) และแอมโมเนีย (NH₃) ดังสมการ



แอมโมเนียมไอออน (NH₄⁺) มีความเป็นพิษต่อระบบน้อยกว่าแอมโมเนีย (NH₃) ซึ่งแอมโมเนียในระบบจะมีความเข้มข้นมากขึ้นเมื่อพีเอชในระบบสูงขึ้นมากกว่า 7.0 ดังนั้นจึงควรรักษาพีเอชในระบบให้อยู่ที่ 7.0 หรือต่ำกว่า เพื่อให้แอมโมเนียในระบบอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออน โดยปกติแบคทีเรียทนต่อความเข้มข้นของแอมโมเนียได้ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร และทนต่อความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนได้ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถดูระดับความเป็นพิษของแอมโมเนียมไอออนได้ในตารางที่ 2-11

ตารางที่ 2-11 ระดับความเป็นพิษของแอมโมเนียมไอออน

แอมโมเนียมไนโตรเจน, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ (มก./ล.)	ผลกระทบต่อระบบ
50 - 200	ปริมาณพอเหมาะ
200 - 1,000	ยังไม่เกิดผลชัด
1,500 - 3,000	เริ่มยับยั้งเมื่อมีค่าพีเอชสูงกว่า 7.0
> 3,000	เป็นพิษโดยตรง

ที่มา : McCarty, 1964

4) ซัลเฟต

ซัลเฟตในน้ำเสีย มีทั้งที่อยู่ในรูปของสารที่ละลายน้ำและสารที่ไม่ละลายน้ำ ขึ้นอยู่กับอิออนของประจุบวกที่ซัลเฟตรวมอยู่ ปริมาณของซัลเฟตที่มากเกินไปจะทำให้เกิดปฏิกิริยารีดิวซ์ซัลเฟตได้ง่ายขึ้น เนื่องจากแบคทีเรียประเภท Sulfate-Reducing Bacteria หรือ SRB สามารถเจริญเติบโตได้ดี ส่งผลให้แบคทีเรียสร้างมีเทนทำงานได้น้อยลงจนมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนลดลง และเกิดกลิ่นเหม็นจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แทน แต่ทั้งนี้มิได้ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีในระบบแต่อย่างใด เพราะว่าการรีดิวซ์ซัลเฟตที่เกิดขึ้นสามารถลดการสะสมของกรดไพรูอิกในระบบได้

ในสภาวะที่ระบบมีค่าพีเอชเท่ากับ 6.4-7.2 ไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถยับยั้งการทำงานของระบบได้ร้อยละ 50 เช่นเดียวกับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีความเข้มข้น 90 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถยับยั้งการทำงานของระบบได้ร้อยละ 50 เหมือนกัน เมื่อในระบบมีค่าพีเอช 7.8-8.0

5) สารอาหาร

แบคทีเรียในระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศมีความต้องการสารอาหารไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับระบบแบบใช้อากาศ หากน้ำเสียนี้อาจมีปริมาณสารอาหารที่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียอยู่แล้วก็ไม่จำเป็นต้องมีการเติมสารอาหารเพิ่ม เช่น น้ำทิ้งจากโรงงานผลิตน้ำอัดลม เป็นต้น

อัตราส่วนของสารอาหารที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ หรืออัตราส่วน BOD:N:P โดยทั่วไปเท่ากับ 100:1.1:0.2 โดยแบคทีเรียมีความต้องการปริมาณไนโตรเจนต่อน้ำหนักเซลล์เท่ากับ 9.4 (Cell Weight/N = 9.4) กล่าวคือถ้าหากมีปริมาณเซลล์ที่เกิดขึ้นในระบบ 0.1 กิโลกรัม ต่อ 1 กิโลกรัมซีโอดีที่ถูกย่อยสลายไป จะต้องมีไนโตรเจนปริมาณ 1.1 กิโลกรัม และฟอสฟอรัสปริมาณ 0.2 กิโลกรัม ตามอัตราส่วน

6) สารอินทรีย์

สารอินทรีย์จำพวกเมทานอล (Methanol) กรดไขมันที่มีโมเลกุลยาว (Long Chain Fatty Acid) และแอลกอฮอล์ (Alcohol) มีความสามารถในการยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียชนิดไม่ใช้ออกซิเจน ความเป็นพิษจะลดน้อยลงเมื่อจุลินทรีย์สามารถปรับตัวให้คุ้นชินได้ โดยการที่ค่อยๆ ได้รับความเข้มข้นของน้ำเสียจากน้อยไปมาก และทำการป้อนน้ำเสียอย่างต่อเนื่อง (Continuous Feed)

7) การกวนผสม

การย่อยสลายจะมีประสิทธิภาพที่ดีมากขึ้น เมื่อของเหลวและของผสมในระบบมีการผสมและการกระจายตัวกันอย่างทั่วถึง ของเสียที่เข้ามาใหม่แทนที่ของเสียเก่าที่ถูกย่อยสลายไป ทำให้ระบบมีความต่อเนื่องอยู่เสมอ อีกทั้งการกวนยังช่วยป้องกันการเกิดการแยกชั้นของของเสีย โดยตะกอนลอย (Scum) ที่อยู่ด้านบนจะทำให้การสร้างก๊าซมีเทนและการเปลี่ยนรูปของสารอินทรีย์มีประสิทธิภาพลดน้อยลง ในกรณีที่ในระบบมีของแข็งแขวนลอยหรือตะกอนลอยสูง อาจใช้เป็นเครื่องมือทางกล เช่น ใบกวน เข้ามาช่วย

8) อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์

ปริมาณสารอินทรีย์ในระบบต้องมีความพอดีกับความเข้มข้นของแบคทีเรียจึงจะทำให้ระบบมีการย่อยสลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ การป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบในปริมาณที่มากเกินไป จะทำให้มีการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้น้อยลง เพราะแบคทีเรียบางส่วนถูกทำลายไปเนื่องจากสภาวะที่ไม่สมดุล แต่ถ้าหากมีการป้อนสารอินทรีย์น้อยเกินไป แบคทีเรียในระบบจะปรับตัวให้คุ้นเคยกับปริมาณสารอินทรีย์ที่น้อยลงและทำให้ระบบล้นเหลวได้ ทั้งนี้ค่าของอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์จะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับธรรมชาติและชนิดของน้ำเสียนั้นๆ ซึ่งค่าที่เหมาะสมสามารถหาได้จากการทดลองเดินระบบในระดับห้องปฏิบัติการ หรือระบบที่เคยมีผู้ทำสำเร็จไว้แล้ว

9) เวลาพักเก็บ

โดยทั่วไปเวลาพักเก็บมี 2 ความหมาย ได้แก่ Solid Retention Time หรือ SRT หรือเวลาพักเก็บแบคทีเรีย และ Hydraulic Retention Time หรือ HRT หรือเวลาพักเก็บของเหลว ซึ่งในการควบคุมระบบนิยมใช้ค่าเวลาพักเก็บของเหลวหรือ HRT มากกว่า เนื่องจากคำนวณและควบคุมได้ง่ายกว่า

การควบคุมเวลาในการพักเก็บของเหลวในระบบมีความสำคัญมาก เนื่องจากในระบบที่มีการคำนวณค่าเวลาการพักเก็บของเหลวให้นานจนเกินไป จะสังเกตได้ว่ามีขนาดถังหมักที่ใหญ่กว่าปกติ ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างตรงส่วนนี้มากกว่าระบบที่คำนวณเวลาพักเก็บได้น้อย

กว่า แต่ถ้าหากในระบบที่มีเวลาการกักเก็บน้อยเกินไป จะส่งผลให้แบคทีเรียเจริญเติบโตไม่ทันและหลุดออกจากระบบเป็นจำนวนมากทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง ดังนั้นควรควบคุมเวลาการกักเก็บให้เหมาะสมเพื่อช่วยให้แบคทีเรียมีปริมาณที่คงที่หรือเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ระยะเวลาที่เหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมภายในระบบและชนิดของของเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบ รวมไปถึงชนิดของแบคทีเรียในระบบเป็นสำคัญ

10) โลหะบางชนิด

ในระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ แบคทีเรียสร้างมีเทนยังมีความต้องการธาตุอาหารประเภทโลหะนอกจากธาตุอาหารหลักอีก เช่น นิเกิลและโคบอลต์ ซึ่งพบว่าหากในระบบมีธาตุโลหะเหล่านี้อยู่ในปริมาณที่น้อยเกินไปจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดน้อยลง โดยปริมาณของนิเกิลและโคบอลต์ที่ควรมีอยู่ในระบบจะอยู่ที่ประมาณ 50 มิลลิกรัม ในรูปของโลหะนั้นๆ ต่อปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร ของถังปฏิกรณ์

2.4 ถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter)

2.4.1 หลักการทำงานของถังกรองไร้อากาศ

ถังกรองไร้อากาศมีลักษณะเป็นถังทรงกระบอกหรือถังสี่เหลี่ยม มีความสูงของถังตั้งแต่ 0.45 เมตร จนถึง 6 เมตร ซึ่งถังกรองไร้อากาศที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากบ้านเรือนจะมีขนาดเล็กและไม่มีการนำก๊าซที่ได้มาใช้เนื่องจากมีปริมาณน้อยมาก มีการบรรจุตัวกลางไว้ภายในถังซึ่งมีทั้งแบบสุ่มไม่เป็นระเบียบ (Random Pack) และแบบใช้ตัวกลางเป็นชุด (Module) เพื่อให้แบคทีเรียที่เจริญเติบโตได้ยึดเกาะที่พื้นผิวหรืออาศัยอยู่ตามช่องว่างของตัวกลาง (Carlos, 2007) ถังกรองไร้อากาศสามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่แขวนลอยและสารละลายที่มีอยู่ในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการดั่งสารอินทรีย์เข้ามาใกล้แบคทีเรียที่เกาะติดอยู่กับผิวของตัวกลางหรือแบคทีเรียที่เกาะติดอยู่กับพื้นผิวของถังปฏิกรณ์

ตัวกลางที่นิยมใช้ในระบบถังกรองไร้อากาศต้องมีพื้นที่ผิวสูง เพราะทำให้แบคทีเรียมีพื้นที่อาศัยได้มาก โดยตัวกลางควรมีพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface Area) อยู่ในช่วง 90-300 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตรต่อปริมาตรตัวกลาง โดยในช่วงแรกของการเดินระบบแบคทีเรียที่เกิดขึ้นจะเป็นชนิดที่อาศัยอยู่บนผิวของตัวกลางอย่างเดียว แต่เมื่อเดินระบบไปได้ซักระยะหนึ่งจะมีแบคทีเรียที่หลุดลอกออกมาจากผิวของตัวกลางและเติบโตอยู่ในช่องว่างระหว่างตัวกลางในลักษณะแขวนลอย ตัวกลางที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีหลากหลาย ได้แก่ พลาสติก หิน กรวด โฟม เป็นต้น ในรูปที่ 2-4 แสดง

ลักษณะของตัวกลางพลาสติกบางส่วนที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง และตารางที่ 2-12 แสดงรายละเอียดทางกายภาพของตัวกลางที่สำคัญ



รูปที่ 2-4 ตัวกลางพลาสติกที่นิยมใช้ในถังกรองไร้อากาศ
ที่มา : <http://www.aqua.co.th/product/plastic-media>

ตารางที่ 2-12 รายละเอียดทางกายภาพของตัวกลางแต่ละชนิด

ชนิดของตัวกลาง	ขนาด (ซม.)	น้ำหนัก/ปริมาตร (กก./ม. ³)	พื้นที่ผิว (ม. ² /ม. ³)	ปริมาตรช่องว่าง (%)
หิน				
ขนาดเล็ก	2.5-6.25	1,250-1,440	55-70	40-50
ขนาดใหญ่	10-12.5	800-990	40-50	50-60
Blast Furnace Slag				
ขนาดเล็ก	5-7.5	900-1,200	55-70	40-50
ขนาดใหญ่	7.5-12.5	800-990	46-60	50-60
พลาสติก				
Conventional	60 x 60 x 120	32-96	80-98	94-97
High-Specific Surface	60 x 60 x 120	32-96	98-196	94-97
Redwood	120 x 120 x 50	144-176	40-50	70-80
Random Pack	2.5-8.75	48-96	125-280	90-95

ที่มา : Metcalf และ Eddy, 2003

หลักการการทำงานของถังกรองไร้อากาศ คือให้น้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ไหลผ่านตัวกลางที่มีแบคทีเรียเกาะอยู่ที่พื้นผิว ทิศทางการไหลของน้ำเสียมักมีทั้งแบบไหลขึ้นและแบบไหลลง แต่แบบไหลขึ้นเป็นที่นิยมมากกว่าเนื่องจากสามารถป้องกันตะกอนจุลินทรีย์หลุดออกจากระบบได้ เมื่อฟิล์มชีวภาพที่เกาะอยู่บนผิวของตัวกลางมีมากเกินไป จะเกิดการหลุดลอกออกมาและจับตัวกันเป็นตะกอนฟล็อกอยู่ตามช่องว่างของตัวกลางและมีการเคลื่อนไหวตามการเคลื่อนที่ของน้ำเสีย และถ้าขยู่ตลอดเวลา ปัญหาที่สำคัญคือตัวกลางสามารถเกิดการอุดตันได้ เมื่อตัวกลางอุดตันจะก่อให้เกิดปัญหาการไหลลัดวงจรของน้ำเสียมามากและทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง

ฟิล์มชีวภาพที่เกาะอยู่ที่ผิวของตัวกลางประกอบไปด้วยกลุ่มแบคทีเรียและผลิตภัณฑ์ที่แบคทีเรียสร้างขึ้น ซึ่งแบคทีเรียจะสร้างสารที่เป็นโพลีเมอร์ออกมาหุ้มเซลล์และโพลีเมอร์เหล่านี้ช่วยให้แบคทีเรียสามารถเกาะอยู่บนผิวของตัวกลางและเจริญเติบโตต่อไปได้ ประสิทธิภาพของระบบถังกรองไร้อากาศนั้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของฟิล์มชีวภาพเหล่านี้และปริมาณของแบคทีเรียที่เกาะอยู่ที่

ตัวกลาง โดยระบบสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้ร้อยละ 70-95 ที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 5-15 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ทั้งนี้ระบบถังกรองไร้อากาศมีข้อดีและข้อจำกัดดังต่อไปนี้

ข้อดีของระบบถังกรองไร้อากาศ

- ประหยัดพลังงาน เนื่องจากการไม่มีการเติมอากาศ
- เหมาะกับประเทศเขตร้อน เพราะไม่ต้องใช้พลังงานในการเพิ่มอุณหภูมิ
- มีความต้องการสารอาหารต่ำกว่าระบบแบบใช้อากาศ
- มีเวลากักเก็บตะกอนสูง ทำให้ระบบสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้สูงตามไปด้วย
- ไม่ต้องมีระบบหมุนเวียนตะกอน เพราะมีตัวกลางที่ทำหน้าที่ดักตะกอนอยู่แล้ว
- เกิดตะกอนน้อย ประมาณร้อยละ 5-10 จึงไม่จำเป็นต้องมีการกำจัดตะกอน
- ยังสามารถทำงานได้ดี แม้มีการหยุดระบบไป 15 วัน
- มีผลพลอยได้เป็นก๊าซมีเทน

ข้อจำกัดของระบบถังกรองไร้อากาศ

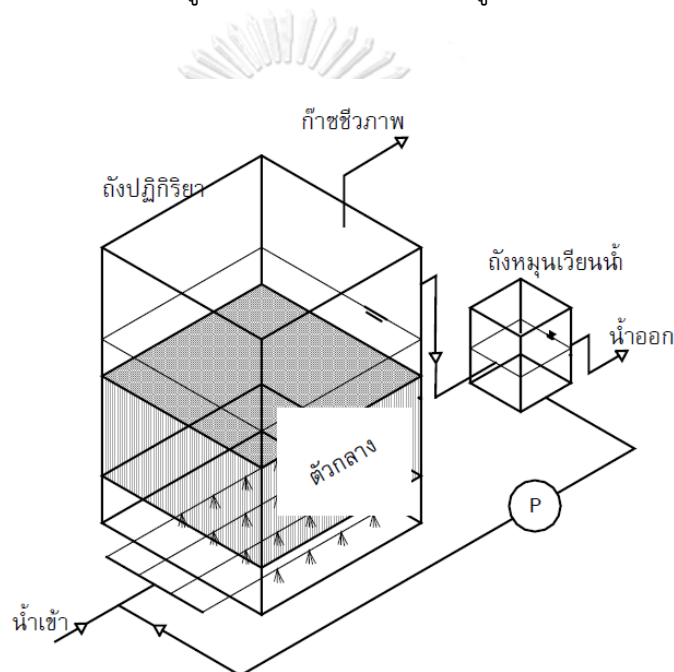
- ใช้เวลาในการเริ่มต้นเลี้ยงแบคทีเรียนาน
- ระบบมีความไวต่อสภาพแวดล้อมค่อนข้างมาก
- น้ำทิ้งมีกลิ่นเหม็นและมีสีดำเนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์
- วัสดุตัวกลางมีราคาค่อนข้างสูง
- ไม่เหมาะกับน้ำเสียที่มีสารแขวนลอยสูง เพราะจะทำให้เกิดการอุดตันได้
- เมื่อใช้งานไปนานๆจะเกิดตะกอนแบคทีเรียสะสมอยู่ในปริมาณสูง ซึ่งเป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ทำให้เกิดการอุดตัน

2.4.2 ชนิดของถังกรองไร้อากาศ

ถังกรองไร้อากาศแบบไหลขึ้น (Upflow Anaerobic Filter) เป็นถังกรองที่มีลักษณะการไหลของน้ำเสียแบบไหลขึ้นตามกันจากด้านล่างถึง ผ่านระบบการกระจายน้ำเสียและชั้นตัวกลางขึ้นสู่ด้านบนของถัง ก่อนที่จะไหลออกจากตัวถัง ดังแสดงในรูปที่ 2-5 โดยจะเกิดการสูญเสียแรงดัน หรือ Head Loss ประมาณ 2.5-7.6 เซนติเมตร ต่อความสูงของชั้นตัวกลาง 0.6 เมตร แบคทีเรียที่หลุดลอกออกมาจากผิวของตัวกลางและลอยอยู่ในช่องว่างของตัวกลางจะมีการเคลื่อนไหวสู่ด้านบน

ตามการไหลของน้ำเสียและการเคลื่อนที่ของก๊าซ เมื่อลอยขึ้นไปชนกับตัวกลางที่ขวางอยู่จะเกิดการแยกตัวกันระหว่างฟองก๊าซและตะกอน โดยตะกอนจะตกลงสู่ด้านล่างของถังตามน้ำหนักของตัวเอง และฟองก๊าซจะลอยขึ้นไปด้านบน แต่ตะกอนบางส่วนที่มีขนาดเล็กและมีน้ำหนักเบาจะไหลออกมากับน้ำออก

กระบวนการบำบัดสารอินทรีย์ในถังกรองไร้อากาศประกอบด้วยกระบวนการหลายกระบวนการ เช่น กระบวนการดูดซับ กระบวนการกรอง และกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ ทั้งนี้ระบบถังกรองไร้อากาศจะใช้เวลาดักเก็บน้ำเสียประมาณ 1-10 วัน โดยมีอัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ 4-16 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำเสียและพื้นที่ผิวของตัวกลาง



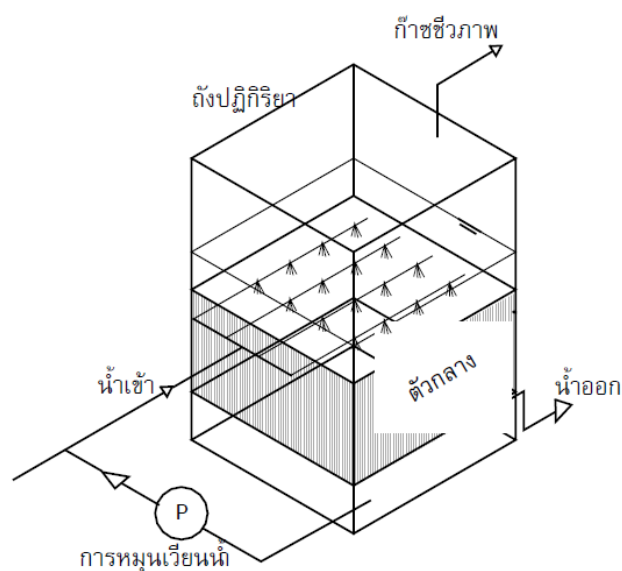
รูปที่ 2-5 ถังกรองไร้อากาศแบบไหลขึ้น (Upflow Anaerobic Filter)

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2549

ถังกรองไร้อากาศแบบไหลลง (Downflow Anaerobic Filter) เป็นถังกรองที่มีลักษณะการไหลของน้ำเสียมาจากด้านบนของถัง ซึ่งน้ำเสียต้องท่วมชั้นตัวกลางอยู่ตลอดเพื่อให้เกิดสภาพไร้อากาศ มีท่อจ่ายน้ำเสียเข้าสู่ระบบอยู่ใต้ผิวน้ำ จากนั้นน้ำเสียไหลผ่านตัวกลางลงสู่ด้านล่างของถัง ซึ่งโดยปกติจะใช้การสูบน้ำออกเพื่อควบคุมระดับน้ำในถังให้ท่วมตัวกลางอยู่ตลอด และมีการหมุนเวียนน้ำที่บางส่วนกลับเข้าสู่ระบบเพื่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่ดียิ่งขึ้น ลักษณะของถังกรองไร้อากาศแบบไหลลงสามารถดูได้ที่รูปที่ 2-6

ถังกรองไร้อากาศแบบไหลลงสามารถรับน้ำเสียที่มีของแข็งแขวนลอยได้สูงกว่าถังกรองไร้อากาศแบบไหลขึ้น เนื่องจากของแข็งแขวนลอยเมื่อเข้าสู่ระบบจะไหลผ่านชั้นตัวกลางลงมาด้านล่างของถังและไหลออกไปจากระบบกับน้ำเสีย ทำให้ตัวกลางมีโอกาสอุดตันน้อย แต่น้ำที่ไหลออกมาจะมีของแข็งแขวนลอยมากกว่าระบบถังกรองไร้อากาศแบบไหลขึ้น เนื่องจากทิศทางการไหลของน้ำเสียที่ชะเอาผิวของฟิล์มชีวภาพหรือแบคทีเรียที่ตายแล้วออกมาด้วย

ชั้นตัวกลางควรมีช่องว่างให้น้ำไหลผ่านประมาณ 1-2.5 เซนติเมตร มีขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 100-150 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร และมีปริมาตรช่องว่างประมาณร้อยละ 60-90 ของปริมาตรถังกรองไม่ใช้อากาศแบบไหลลง

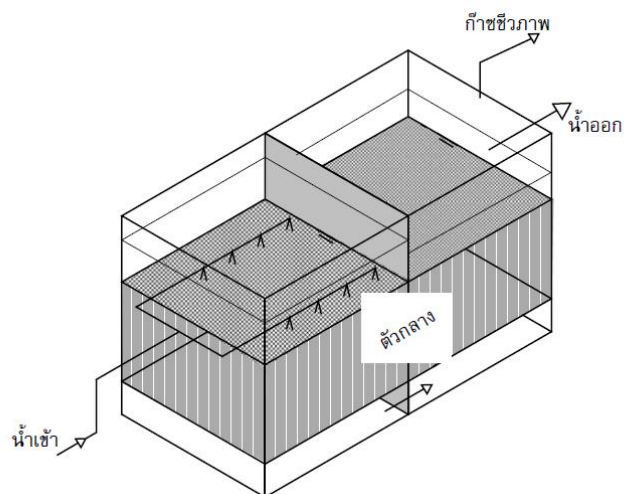


รูปที่ 2-6 ถังกรองไร้อากาศแบบไหลลง (Downflow Anaerobic Filter)

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2549

ถังกรองไม่ใช้อากาศแบบไหลลง-ไหลขึ้น (Downflow-Upflow Anaerobic Filter)

ถังกรองไร้อากาศประเภทนี้มักใช้กับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นและปริมาณสารอินทรีย์ต่ำ เช่น น้ำเสียในครัวเรือน เป็นต้น โดยการทำงานเริ่มต้นจากระบบกระจายน้ำเสียที่ต้องสามารถกระจายน้ำเสียได้อย่างทั่วบริเวณ เมื่อน้ำเสียไหลจากด้านบนของถังลงมายังด้านล่างของถังจะนำพาตะกอนบางส่วนลงมาด้วย ในส่วนนี้เมื่อมีการสะสมมากขึ้นเรื่อยๆ จำเป็นต้องมีการระบายตะกอนออกเพื่อป้องกันการอุดตัน จากนั้นน้ำเสียจากด้านล่างถังจะไหลผ่านตัวกลางขึ้นไปยังด้านบนของถังและไหลออก โดยลักษณะของถังกรองไม่ใช้อากาศแบบไหลลง-ไหลขึ้นแสดงในรูปที่ 2-7



รูปที่ 2-7 ถังกรองไม่ใช้ออกซิเจนแบบไหลลง-ไหลขึ้น (Downflow-Upflow Anaerobic Filter)

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2549

2.4.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการทำงานของระบบ

วัสดุตัวกลาง

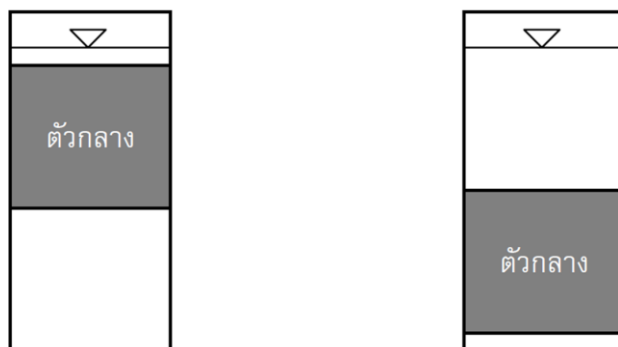
เพื่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ที่ดี ต้องมีการพิจารณาเลือกใช้วัสดุตัวกลางที่แบคทีเรียสามารถยึดเกาะได้ในปริมาณมากและไม่ก่อให้เกิดปัญหาการอุดตันหรือการไหลลัดวงจรของน้ำเสีย ปัจจุบันวัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุสังเคราะห์ เพราะมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง น้ำหนักเบา และหาได้ง่าย ทั้งนี้คุณสมบัติของวัสดุตัวกลางที่เหมาะสมสามารถพิจารณาได้จาก

- พื้นผิวของวัสดุตัวกลางควรมีความหยาบเพื่อช่วยให้แบคทีเรียยึดเกาะได้ดีและสม่ำเสมอ
- วัสดุตัวกลางควรมีขนาดรูพรุนประมาณ 1-5 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแบคทีเรีย
- วัสดุตัวกลางที่ดีต้องมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง เพื่อให้แบคทีเรียยึดเกาะได้ในปริมาณมาก
- รูปทรงของตัวกลางที่ส่งผลต่อการจัดเรียงตัวภายในถัง ที่ควรมีพื้นที่ผิวและช่องว่างมากพอโดยที่ไม่ทำให้สูญเสียปริมาตรภายในถัง

ลักษณะการวางตัวกลาง

เนื่องจากวัสดุตัวกลางมีราคาสูง จึงมีผู้ศึกษาเพื่อลดปริมาตรของตัวกลางลง โดยทำการลดปริมาตรของตัวกลางในถังกรองไร้ออกซิเจนแบบไหลขึ้นลงครั้งหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2-8 พบว่าการติดตั้งตัวกลางบริเวณครึ่งถึงด้านบน จะได้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีสูงกว่าการติดตั้งตัวกลางบริเวณครึ่งถึงด้านล่าง และการติดตั้งตัวกลางที่ครึ่งถึงด้านบนมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงกว่า

การบรรจุตัวกลางเต็มถึง แต่การบรรจุตัวกลางเต็มถึงนั้นจะทำให้ระบบสามารถรับการเพิ่มอย่างกะทันหันของอัตราการบรรทุกาธารสารอินทรีย์ได้ดีกว่า



รูปที่ 2-8 ลักษณะการวางตัวกลางในถังกรองไม่ใช้อากาศแบบไหลขึ้น

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2549

ทิศทางการจ่ายน้ำเสีย

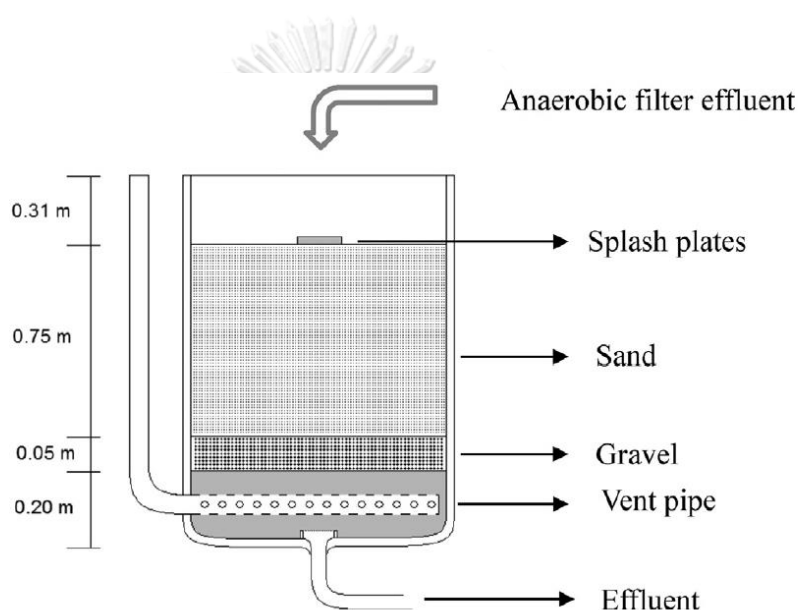
ทิศทางการจ่ายน้ำเสียมีผลต่อการกระจายตัวของน้ำเสียและแบคทีเรียในถัง ซึ่งการจ่ายน้ำเสียแบบไหลจากด้านบนลงด้านล่าง พบว่าสารอินทรีย์ในน้ำเสียและแบคทีเรียจะมีปริมาณมากในบริเวณที่กระจายและลดน้อยลงตามความลึกภายในถัง ส่วนการจ่ายน้ำเสียแบบไหลจากด้านล่างขึ้นด้านบนพบว่าน้ำเสียมีการกระจายตัวอย่างทั่วถึง ทำให้แบคทีเรียมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และสามารถเจริญเติบโตได้ดี ด้วยเหตุนี้จึงสามารถเริ่มต้นระบบได้เร็วกว่าการจ่ายน้ำเสียจากด้านบนลงด้านล่าง แต่การเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่มากขึ้นเมื่อเดินระบบไปซักรักอาจส่งผลให้เกิดการอุดตันในช่องว่างของชั้นตัวกลางและเกิดการไหลลัดวงจรในที่สุด นอกจากนี้ยังมีผู้ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการกระจายน้ำเสียหลายจุด พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าการกระจายเพียงจุดเดียว เนื่องจากแบคทีเรียสามารถเจริญเติบโตได้อย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอ

อัตราการไหลของน้ำเสีย

ระบบบำบัดที่ดีควรมีอัตราการบรรทุกาธารสารอินทรีย์ เวลาพักเก็บน้ำ และเวลาพักเก็บแบคทีเรียที่เหมาะสม ซึ่งตัวแปรที่สามารถควบคุมได้คืออัตราการไหลของน้ำเสีย ถ้าหากระบบมีอัตราการไหลของน้ำเสียมากเกินไป จะทำให้เวลาพักเก็บน้ำเสียสั้นลง แบคทีเรียที่แขวนลอยอยู่ในถังยังไม่ยึดเกาะพื้นผิวของตัวกลางจะไหลออกไปกับน้ำเสีย ทำให้ระยะเวลาพักเก็บแบคทีเรียสั้นลงเช่นกัน

2.5 ถังกรองทรายชีวภาพ (Biological sand filter, BSF)

ลักษณะทั่วไปของถังกรองทรายชีวภาพเป็นถังคอนกรีตหรือถังพลาสติก ภายในถังบรรจุทรายเพื่อเป็นวัสดุกรองเพียงอย่างเดียว ดังแสดงในรูปที่ 2-9 ด้านบนมีระบบกระจายน้ำเสียและด้านล่างมีท่ออากาศเพื่อช่วยในการระบายอากาศให้กับระบบ ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับลักษณะของระบบโปรยกรอง (Trickling Filter) น้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบไม่ควรมีสารแขวนลอยปริมาณสูงเพราะจะทำให้ชั้นกรองทรายอุดตันได้อย่างรวดเร็ว หรืออาจมีระบบบำบัดก่อนหน้าถังกรองทรายชีวภาพเพื่อลดปริมาณสารแขวนลอยในน้ำเสียออกเสียก่อน ข้อดีของถังกรองทรายชีวภาพคือเป็นระบบที่สามารถควบคุมการทำงานได้ง่ายและใช้พลังงานในการเดินระบบต่ำ



รูปที่ 2-9 ถังกรองทรายชีวภาพ (Biological sand filter, BSF)

ที่มา : Tonon และคณะ, 2015

หลักการทำงานของถังกรองทรายชีวภาพ คือ น้ำเสียจะถูกปล่อยให้ไหลผ่านชั้นกรองทรายตามแรงโน้มถ่วงผ่านออกซิเจนในชั้นทรายที่เข้ามาจากท่ออากาศ โดยเป็นการเติมอากาศตามธรรมชาติ ไม่มีการใช้เครื่องเติมอากาศแต่อย่างใด สารแขวนลอยต่างๆในน้ำเสียจะถูกกรองไว้ที่ผิวหน้าและภายในชั้นทราย ทำให้น้ำที่ออกมาจากถังมีความใสและสะอาดมากขึ้น เมื่อใช้งานถังกรองทรายชีวภาพไปได้ซักระยะหนึ่งจะเกิดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียบนผิวหน้าของชั้นทรายกลายเป็นแผ่นฟิล์มชีวภาพ (Schmutzdecke) ที่มีลักษณะเป็นเมือก ซึ่งแผ่นฟิล์มชีวภาพสามารถช่วยกรองความขุ่น แบคทีเรีย และไวรัสที่ปนมากับน้ำเสียได้บางส่วน แต่ถ้าหากมีแผ่นฟิล์มชีวภาพหรือมีสาร

แขวนลอยที่ถูกกรองไว้ที่ผิวหน้าชั้นทรายมากเกินไปจะส่งผลให้เกิดการอุดตันและน้ำล้นออกจากถังได้ จึงต้องมีทำความสะอาดโดยการลอกผิวหน้าชั้นทรายออกประมาณ 2-3 นิ้ว นำไปล้างน้ำและนำกลับมาบรรจุคืนในถัง

ถังกรองทรายชีวภาพมีประสิทธิภาพที่สูงมากในการกำจัดสารแขวนลอยและคอลลอยด์ที่อยู่ในน้ำเสีย ความสกปรกหลายประเภทถูกกำจัดออกไป เช่น สี ความขุ่น สาหร่าย แบคทีเรียหรือจุลินทรีย์อื่นๆ เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้เมื่อสารอินทรีย์ในน้ำเสียถูกบำบัดจนหมดไปและมีออกซิเจนที่เพียงพอ ทำให้น้ำทิ้งที่ออกมาจากถังกรองทรายชีวภาพไม่มีกลิ่นเหม็น (พิมพ์สุทธิ หงษ์ขยางกูร, 2561) ซึ่งกลิ่นเหม็นในน้ำเสียที่สภาวะไร้อากาศเกิดจากก๊าซไข่เน่าหรือก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เมื่อก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ถูกออกซิไดส์ด้วยออกซิเจนจากท่อระบายอากาศจะเกิดเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับน้ำ ทำให้กลิ่นเหม็นลดลงได้ ทั้งนี้เมื่อก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในน้ำเสียลดลงยังส่งผลให้น้ำเสียมีสีที่ดีขึ้นได้ เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มักทำปฏิกิริยากับโลหะหลายชนิดเกิดเป็นเกลือซัลไฟด์ที่มักมีสีดำและไม่ละลายน้ำ ดังนั้นกล่าวได้ว่ายิ่งในน้ำเสียมีก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์น้อยลงมากเท่าไรยิ่งส่งผลให้น้ำทิ้งมีสีและกลิ่นที่ดีมากขึ้นเท่านั้น

2.6 สมการชีวภาพ (Stoichiometry)

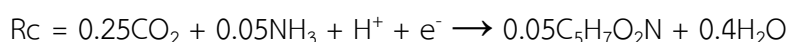
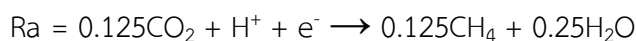
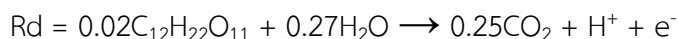
การเขียนสมการชีวภาพ หรือ สมการ Stoichiometry ของระบบสามารถแสดงให้เห็นว่าภายในระบบนั้นมีการใช้สารตั้งต้นไปเท่าใดและได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารชนิดใดปริมาณเท่าใด โดยสามารถเขียนสมการได้จากครึ่งปฏิกิริยาของการย่อยสลาย 3 สมการ (ชลธิพร สุทธิธรรม, 2549) ได้แก่ ครึ่งปฏิกิริยาของการให้อิเล็กตรอน (Rd) ครึ่งปฏิกิริยาของการรับอิเล็กตรอน (Ra) และครึ่งปฏิกิริยาของการสร้างเซลล์จุลินทรีย์ (Rc) โดยสมการทั้ง 3 สมการ จะถูกทำให้อยู่ในรูปของสมการสมดุลมวลรวม (R) ดังนี้

$$R = R_d - f_e R_a - f_s R_c$$

โดย	R	=	สมดุลมวลรวม
	R _d	=	ครึ่งปฏิกิริยาของการให้อิเล็กตรอน
	f _e	=	ตัวให้อิเล็กตรอนที่ใช้ในการสร้างพลังงาน
	R _a	=	ครึ่งปฏิกิริยาของการรับอิเล็กตรอน
	f _s	=	ตัวให้อิเล็กตรอนที่ใช้ในการสร้างเซลล์
	R _c	=	ครึ่งปฏิกิริยาของการสร้างเซลล์จุลินทรีย์
และ	f _e + f _s	=	1

2.6.1 การเขียนสมการชีวภาพของถังกรองไร้อากาศ

- เลือกครึ่งปฏิกิริยาทั้ง 3 สมการ โดยมีสารอินทรีย์เป็นสารให้อิเล็กตรอน มีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารรับอิเล็กตรอน และมีแอมโมเนียเป็นแหล่งไนโตรเจน จะได้ดังนี้



- หาค่า f_e และค่า f_s จากสมการ $f_e + f_s = 1$

โดย $f_s = 1.42Y$ ซึ่งค่า Y คือค่ายิลด์ (Growth Yield; Y) ของกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ มีค่าเท่ากับ 0.03 ก.VSS/ก.COD (Samir, 2008) จะได้ว่า

$$\text{จาก } f_s = 1.42Y$$

$$f_s = (1.42)(0.03)$$

$$f_s = 0.04$$

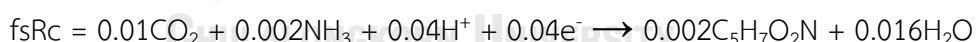
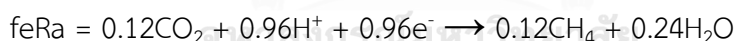
$$\text{แทนค่า } f_e + f_s = 1$$

$$f_e = 1 - 0.04$$

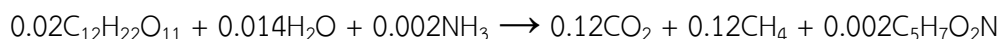
$$f_e = 0.96$$

ดังนั้นจะได้ว่า ค่า $f_s = 0.04$ และค่า $f_e = 0.96$

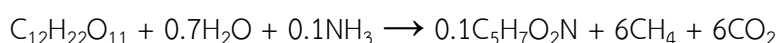
- แทนค่า f_e และ f_s ลงในสมการและหาค่าสมดุลรวม (R) จะได้ดังนี้



นำค่าที่ได้ทั้งหมดไปแทนค่าในสมการ $R = R_d - f_e R_a - f_s R_c$ จะได้เป็น

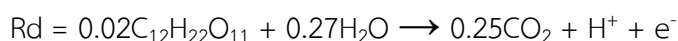


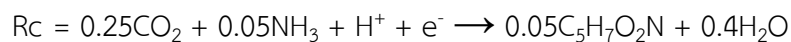
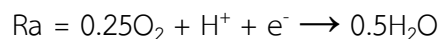
ดังนั้นสมการชีวภาพของถังกรองไร้อากาศ คือ



2.6.2 การเขียนสมการชีวภาพของถังกรองทรายชีวภาพ

- เลือกครึ่งปฏิกิริยาทั้ง 3 สมการ โดยมีสารอินทรีย์เป็นสารให้อิเล็กตรอน มีออกซิเจนเป็นสารรับอิเล็กตรอน และมีแอมโมเนียเป็นแหล่งไนโตรเจน จะได้ดังนี้





- หาค่า f_e และค่า f_s จากสมการ $f_e + f_s = 1$

โดย $f_s = 1.42Y$ ซึ่งค่า Y คือค่ายิลด์ (Growth Yield; Y) ของกระบวนการบำบัดแบบใช้อากาศ มีค่าเท่ากับ 0.4 ก.VSS/ก.COD (Metcalf และ Eddy, 2003) จะได้ว่า

$$\text{จาก } f_s = 1.42Y$$

$$f_s = (1.42)(0.4)$$

$$f_s = 0.57$$

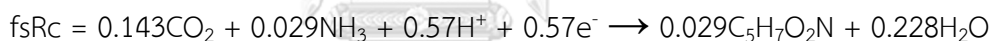
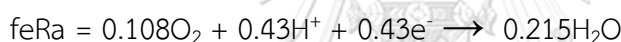
$$\text{แทนค่า } f_e + f_s = 1$$

$$f_e = 1 - 0.57$$

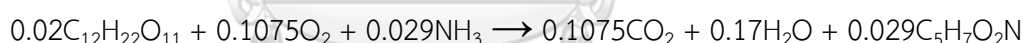
$$f_e = 0.43$$

ดังนั้นจะได้ว่า ค่า $f_s = 0.57$ และค่า $f_e = 0.43$

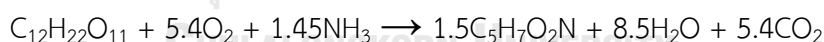
- แทนค่า f_e และ f_s ลงในสมการและหาค่าสมดุลมวลรวม (R) จะได้ดังนี้



นำค่าที่ได้ทั้งหมดไปแทนค่าในสมการ $R = R_d - f_e R_a - f_s R_c$ จะได้เป็น



ดังนั้นสมการชีวภาพของถังกรองทรายชีวภาพ คือ



2.7 รูปแบบของค่าจลนพลศาสตร์

รูปแบบค่าจลนพลศาสตร์ของระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพที่เกี่ยวข้อง มีดังนี้

2.7.1 จลนพลศาสตร์แบบโมนอด (Monod kinetics)

เป็นสมการพื้นฐานในการวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้รับการยอมรับและนิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง มีลักษณะกราฟดังแสดงในรูปที่ 2-10 โดยค่าที่นำมาเขียนเป็นกราฟโมนอดของถังกรองไร้อากาศ คือ ค่าอัตราการบำบัดจำเพาะและค่าความเข้มข้นซีโอดีภายในถังซึ่งประมาณเท่ากับค่าซีโอดีขาออก ที่ได้จากค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ของน้ำเสียขาเข้าที่แตกต่างกันทั้ง 4 ค่า ทั้งนี้ถังกรองไร้อากาศเป็นระบบการบำบัดที่จุลินทรีย์ยึดเกาะกับตัวกลาง (Attached growth) เมื่อระบบเข้า

สู่สภาวะคงที่ หรือ Steady state จึงสมมติได้ว่าบนผิวของตัวกลางนั้นเต็มไปด้วยจุลินทรีย์ ดังนั้นตัวแปร X ที่หมายถึงค่าจุลินทรีย์ในระบบเลี้ยงเชื้อแบบแขวนลอย (Suspended growth) จะแทนค่าด้วยพื้นที่ผิวทั้งหมดของตัวกลางในถังกรองไร้อากาศ (พิมพิสุทธิ หงส์ขยางกูร, 2561) ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สมการอยู่ในรูปแบบของอัตราจำเพาะในการกำจัดสารตั้งต้น โดยมีสมการดังนี้

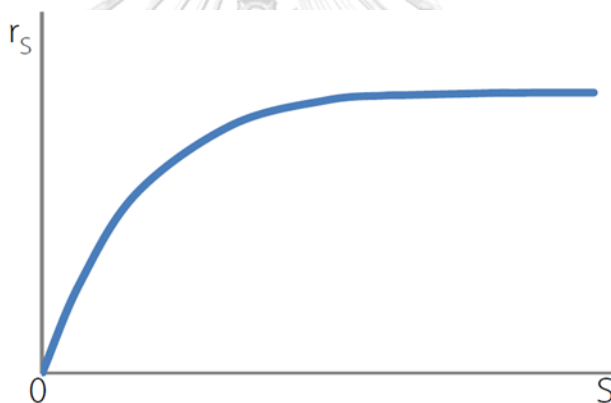
$$r_s = k_m \frac{S}{K_s + S}$$

โดย r_s = อัตราการบำบัดจำเพาะ (อัตราการบำบัดต่อพื้นที่ผิวของตัวกลาง) = $\frac{1}{x} \frac{ds}{dt}$

k_m = อัตราการบำบัดจำเพาะสูงสุด

S = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้น

K_s = ความเข้มข้นของสารตั้งต้นเมื่ออัตราการบำบัดจำเพาะมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของอัตราการบำบัดจำเพาะสูงสุด



รูปที่ 2-10 จลนพลศาสตร์แบบโมนอด (Monod kinetics)

2.7.2 จลนพลศาสตร์อันดับศูนย์ (Zero order kinetics)

คือ ปฏิกิริยาที่มีอัตราการบำบัดจำเพาะคงที่ ไม่แปรผันตามความเข้มข้นเริ่มต้นของสารใดๆ มีลักษณะกราฟอัตราการบำบัดจำเพาะคงที่เป็นเส้นตรงเมื่อเทียบกับสารตั้งต้น ดังแสดงในรูปที่ 2-11 และมีสมการดังนี้

$$r_s = k_0 S_0$$

โดย r_s = อัตราการบำบัดจำเพาะ (อัตราการบำบัดต่อพื้นที่ผิวหรือปริมาตรของตัวกลาง)

k = อัตราการบำบัดจำเพาะ

S = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้น



รูปที่ 2-11 จลนพลศาสตร์อันดับศูนย์ (Zero order kinetics)

2.7.3 จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง (First order kinetics)

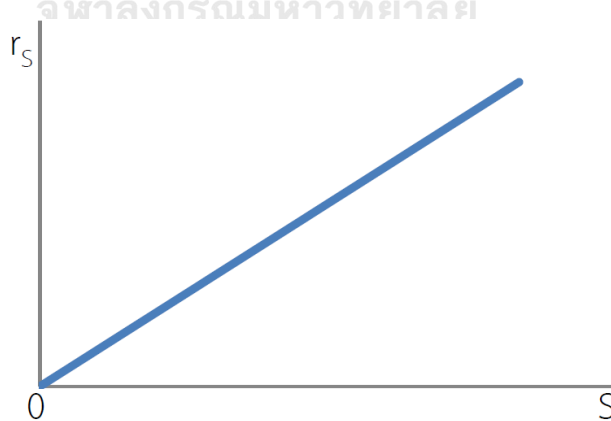
คือ ปฏิกิริยาที่มีอัตราการบำบัดจำเพาะแปรผันตามความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้นมีลักษณะของกราฟอัตราการบำบัดจำเพาะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงเมื่อเทียบกับสารตั้งต้น ดังแสดงในรูปที่ 2-12 และมีสมการดังนี้

$$r_s = k_1 S_1$$

โดย r_s = อัตราการบำบัดจำเพาะ (อัตราการบำบัดต่อพื้นที่ผิวหรือปริมาตรของตัวกลาง)

k = อัตราการบำบัดจำเพาะ

S = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้น



รูปที่ 2-12 จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง (First order kinetics)

2.8 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ถังกรองไร้อากาศมักถูกใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นซีโอดีในช่วงสูง ประมาณ 10,000-20,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 24-48 ชั่วโมง สามารถรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้ 0.97-4.85 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีอยู่ที่ร้อยละ 75-85 (Metcalf และ Eddy, 2003) แต่ความเข้มข้นซีโอดีของน้ำเสียชุมชนในประเทศไทยอยู่ในช่วงต่ำ ประมาณ 250-1,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2545) ซึ่งในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้ความเข้มข้นซีโอดีเท่ากับ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และทำการทดลองโดยเปลี่ยนค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 0.5 , 1 , 2 และ 4 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้อัตราการไหล 24 , 48 , 96 และ 192 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ และมีระยะกักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 2 , 1 , 0.5 และ 0.25 วัน ตามลำดับ โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ถังกรองไร้อากาศในการบำบัดน้ำเสียที่มีค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์และระยะกักพักทางชลศาสตร์ต่างๆ มีดังนี้

รศ. หงส์สาระนันท์กุล (2540) ศึกษาความสามารถของการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงด้วยระบบถังกรองไร้อากาศแบบไหลขึ้นที่ใช้ตัวกลางเป็นเม็ดพลาสติก โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้นซีโอดีเท่ากับ 825, 1650, 3300, 3850 และ 5500 มิลลิกรัมต่อลิตร และระยะกักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 9 ชั่วโมง คิดเป็นภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 2.2, 4.4, 8.8, 10.26, และ 14.67 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าสามารถกำจัดซีโอดีได้ร้อยละ 89, 77, 71, 47, และ 33 ตามลำดับ และมีร้อยละของก๊าซมีเทนที่ผลิตได้เท่ากับ 82, 59, 50, 48 และ 44 ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพการบำบัดของถังกรองไร้อากาศจะลดต่ำลงเมื่อมีค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่สูงขึ้น

สบสุข ลีละบุตร (2549) ศึกษาผลของระยะกักพักทางชลศาสตร์ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจริงของระบบถังกรองไร้อากาศแบบทีละเท (Batch) โดยใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์จากระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการทดลองที่ระยะกักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 2, 4, 6, 8 และ 10 วัน จากการศึกษาพบว่าค่าบีโอดีของน้ำเสียมีแนวโน้มลดลงตามระยะกักพักทางชลศาสตร์ โดยมีค่าเท่ากับ 21, 12, 14, 11, 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

สิรินภา สิทธิธรรม (2555) ศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยระบบถังกรองไร้อากาศที่มีตัวกลางเป็นตัวกลางพลาสติก โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้นซีโอดีเท่ากับ 100-5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เทียบเป็นภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.1-5 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีระยะกักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 24 ชั่วโมงและเดินระบบแบบต่อเนื่อง จากการศึกษาพบว่าที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2 และ 5 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อ

วัน มีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอทีได้ร้อยละ 90, 91, 95, 97, 98 และ 98 ตามลำดับ โดยมีการควบคุมค่าพีเอชของระบบตลอดทั้งการทดลองให้อยู่ในช่วง 6.8-7.2 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

ในการใช้ถังกรองทรายปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นมาแล้ว เป็นวิธีเก่าแก่ที่มักใช้ในการบำบัดน้ำเสีย โดยพบว่าน้ำทิ้งจากถังกรองทรายมีค่าบีโอดีเหลืออยู่ไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร (USEPA, 1999) และยังสามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทั่วไปมักใช้ระบบการกรองแบบนี้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านบ่อเกรอะหรือระบบบำบัดแบบไร้อากาศมาแล้ว

ในกรณีที่อยู่ในถังกรองทรายอยู่ในสภาวะแอโรบิกหรือมีออกซิเจนเพียงพอ และสารอินทรีย์ในน้ำเสียถูกบำบัดจนหมดแล้ว ไนโตรเจนจะถูกเปลี่ยนไปเป็นไนเตรทได้อย่างสมบูรณ์ เรียกว่า ปฏิกริยาไนตริฟิเคชัน ส่วนการเกิดปฏิกริยาดีไนตริฟิเคชันในถังกรองจะเกิดขึ้นน้อยมากหรือไม่เกิดขึ้นเลย โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ถังกรองทรายปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งต่อจากถังกรองไร้อากาศ ดังนี้

Sabbah และคณะ (2004) ศึกษาประสิทธิภาพของระบบถังกรองทรายแบบไม่ต่อเนื่องในการบำบัดน้ำเสียจากบ่อแผลคัลเทพิทที่มีค่าความเข้มข้นบีโอดีเฉลี่ยอยู่ที่ 200–400 มิลลิกรัมต่อลิตร และเดินระบบที่อัตราการไหลเท่ากับ 500–1,000 ลิตรต่อวัน จากการศึกษาพบว่าสามารถบำบัดบีโอดีได้ร้อยละ 90–95 และสามารถกำจัดซีโอทีกับสารแขวนลอยได้ร้อยละ 75–90 อย่างต่อเนื่องตลอดทั้งการทดลอง

Assayed และคณะ (2010) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากบ้านหลังหนึ่งในประเทศจอร์แดนด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบติดกับที่ชนิดถังกรองไร้อากาศและถังกรองทรายแบบไม่ต่อเนื่อง โดยน้ำเสียก่อนป้อนเข้าระบบมีค่าบีโอดี 1,149 มิลลิกรัมต่อลิตร, ของแข็งแขวนลอย 606 มิลลิกรัมต่อลิตร, ซีโอดี 1,952 มิลลิกรัมต่อลิตร และเชื้อแบคทีเรียอีโคไล 9,400 เอ็มพีเอ็นต่อ 100 มิลลิตร จากการศึกษาพบว่าระบบบำบัดทั้งสองชนิดสามารถบำบัดบีโอดี, ของแข็งแขวนลอย, ซีโอดี และเชื้อแบคทีเรียอีโคไลได้ร้อยละ 95, 93, 95 และ 90 ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่าการอุดตันในถังกรองทรายเป็นปัญหาสำคัญต่อระบบ โดยระบบมีความลึกชั้นทราย 60 เซนติเมตร แต่อุดตันถึง 50 เซนติเมตร ดังนั้นจึงไม่ควรใช้ความลึกชั้นทรายที่ต่ำกว่า 60 เซนติเมตร

Tonon และคณะ (2015) ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจริงในมหาวิทยาลัยแห่งหนึ่ง ด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบถังกรองไร้อากาศและถังกรองทราย โดยมุ่งเน้นไปที่การกำจัดของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ตัวกลางที่ใช้ในถังกรองไร้อากาศคือเปลือกมะพร้าวและความลึกของชั้นทรายในถังกรองทรายเท่ากับ 0.75 เมตร มีระยะกักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 9 ชั่วโมง ทำการทดลองที่ภาระปริมาณน้ำระหว่าง 100-800 ลิตรต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน จาก

การศึกษาพบว่าในทุกๆภาวระปริมาณน้ำสามารถกำจัดบีโอดีและซีโอดีได้ประมาณร้อยละ 80-95 และสามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยได้ประมาณร้อยละ 63-81 ส่วนฟอสฟอรัสนั้นพบว่าแทบไม่สามารถบำบัดได้เลย แต่กลับพบว่าที่ภาวระปริมาณน้ำเท่ากับ 700 ลิตรต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันขึ้นไป มีปริมาณไนโตรเจนในน้ำขาออกสูงชันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าระบบมีการสูญเสียประสิทธิภาพในกระบวนการไนตริฟิเคชัน

พิมพ์พิสุทธิ หงส์ขยางกูร (2561) ศึกษาผลของความเข้มข้นซีโอดีต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ของระบบถังกรองไร้อากาศและถังกรองทรายชีวภาพ โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากน้ำตาลทราย มีความเข้มข้นซีโอดีเท่ากับ 1500, 1000, 500 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ถังกรองไร้อากาศ 4 ถัง แต่ละถังมีระยะกักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.5 วัน ภายในถังกรองทรายชีวภาพบรรจุชั้นทรายความสูง 60 เซนติเมตร และมีอัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย 31.2 ลิตรต่อวัน โดยจากการศึกษาพบว่าถังกรองไร้อากาศสามารถบำบัดซีโอดีในน้ำเสียได้ร้อยละ 92-98 โดยประสิทธิภาพการบำบัดเกือบทั้งหมดเกิดขึ้นในถังกรองไร้อากาศถังที่หนึ่ง ซึ่งหมายความว่าระยะกักพักทางชลศาสตร์เพียง 0.5 วัน ก็สามารถบำบัดซีโอดีได้เกือบหมด ในส่วนของถังกรองทรายชีวภาพพบว่าน้ำทิ้งที่ได้มีของแข็งแขวนลอยต่ำกว่า 30 มิลลิกรัมต่อลิตร และยังตรวจพบไนเตรทในน้ำทิ้งจากถังกรองทรายชีวภาพด้วย แสดงให้เห็นว่ามีการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันขึ้นภายใน นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ศึกษาเกี่ยวกับพื้นที่ผิวตัวกลางภายในถังกรองไร้อากาศ ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าแม้จะไม่มีตัวกลางภายในถังกรองไร้อากาศ ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของถังกรองไร้อากาศก็ยังคงสูงอยู่ และเมื่อมีพื้นที่ผิวตัวกลางมากขึ้นก็ยิ่งทำให้สามารถบำบัดซีโอดีได้มากยิ่งขึ้นด้วย

บทที่ 3

แผนการทดลองและวิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาระดับห้องปฏิบัติการ ณ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยศึกษาผลของภาวะบรรทุksารอินทรีย์และความลึกชั้นทรายต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบถังกรองไร้อากาศและถังกรองทรายชีวภาพ ซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดทางชีวภาพร่วมกับกระบวนการบำบัดทางกายภาพ สามารถแบ่งขั้นตอนการทดลองออกเป็น 2 ช่วง ดังนี้

การทดลองช่วงที่ 1 ศึกษาผลของค่าภาวะบรรทุksารอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของระบบถังกรองไร้อากาศ

เป็นการศึกษาเพื่อหาค่าภาวะบรรทุksารอินทรีย์ที่เหมาะสมต่อระบบถังกรองไร้อากาศ โดยกำหนดความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ตลอดทั้งการทดลองเท่ากับ 1,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นซีโอดีสูงสุดของลักษณะน้ำเสียชุมชน (กรมควบคุมมลพิษ, 2545) และทดลองปรับอัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย 4 ค่า ได้แก่ 24 , 48 , 96 และ 192 ลิตรต่อวัน เพื่อให้ได้ค่าภาวะบรรทุksารอินทรีย์ที่แตกต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 0.5 , 1 , 2 และ 4 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน และมีระยะกักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 2 , 1 , 0.5 และ 0.25 วัน ตามลำดับ เตินระบบแบบไหลต่อเนื่อง จากนั้นวิเคราะห์ผลโดยการเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากถังกรองไร้อากาศแต่ละถัง เพื่อนำมาตรวจวัดคุณภาพน้ำตามพารามิเตอร์ที่กำหนด จากนั้นนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับน้ำเสียที่ไม่ผ่านการบำบัดและเลือกค่าภาวะบรรทุksารอินทรีย์ที่เหมาะสมที่สุด เพื่อนำมาทำการทดลองในลำดับถัดไป

การทดลองช่วงที่ 2 ศึกษาผลของระดับความลึกชั้นทรายต่อประสิทธิภาพการบำบัดของระบบถังกรองทรายชีวภาพและระบบบำบัดโดยรวม

เป็นการศึกษาระดับความลึกชั้นทรายว่าส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากถังกรองไร้อากาศอย่างไร โดยถังกรองทรายจะรับน้ำเสียต่อจากถังกรองไร้อากาศที่บำบัดน้ำเสียที่มีภาวะบรรทุksารอินทรีย์ที่ได้จากการทดลองที่ 1 ตลอดทั้งการทดลอง และทดลองเปลี่ยนความลึกชั้นทรายที่แตกต่างกัน 5 ระดับ ได้แก่ 0 , 20 , 40 , 60 และ 80 เซนติเมตร วิเคราะห์ผลด้วยการเก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดจากถังกรองทรายในแต่ละความลึก เพื่อนำมาตรวจวัดคุณภาพน้ำตาม

พารามิเตอร์ที่กำหนด จากนั้นนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดของระบบถังกรองทรายชีวภาพและระบบบำบัดโดยรวม

3.2 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

3.2.1.1 การวัดค่าพีเอช

- เครื่องวัดพีเอช

3.2.1.2 การวิเคราะห์ซีไอดี (COD)

- หลอดย่อยสลาย (Digestion Vessels)
- ตู้อบ ควบคุมอุณหภูมิที่ 150 ± 2 องศาเซลเซียส
- สารละลายมาตรฐานโปตัสเซียมไดโครเมต 0.1 นอร์มัล
- สารละลายกรดซัลฟูริก
- สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.05 นอร์มัล
- สารละลายเฟอร์โรอิน อินดิเคเตอร์
- สารละลายมาตรฐานโปตัสเซียมไฮโดรเจนพธาลเตต

3.2.1.3 การวิเคราะห์ของแข็งแขวนลอย (TSS)

- กระดาษกรองที่มีรูพรุนขนาด 0.45 ไมครอน
- กรวยกรองบุคเนอร์ ความจุ 100 มิลลิลิตร
- เครื่องดูดสุญญากาศ (Suction) พร้อมขวดดูดสุญญากาศ

3.2.1.4 การวิเคราะห์แอมโมเนีย (NH₃)

- สเปคโตรโฟโตมิเตอร์
- ฟีนอล
- 95% เอทิลแอลกอฮอล์
- โซเดียมไนโตรปริไซด์
- ไตรโซเดียมซีเตรต
- โซเดียมไฮดรอกไซด์
- ไฮโปคลอไรต์

3.2.1.5 การวิเคราะห์ไนเตรท (NO₃-)

- อินฟारेดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
- น้ำปราศจากไนเตรท
- โปตัสเซียมไนเตรท

3.2.1.6 การวิเคราะห์ไนไตรท์ (NO₂-)

- สเปกโตรโฟโตมิเตอร์
- น้ำปราศจากไนไตรท์
- กรดฟอสฟอริก
- ซัลฟานิลไมด์
- เอ็น-(1-แนปทิล)เอทีลีนไดอะมีน ไดไฮโดรคลอไรด์
- โซเดียมออกซาลेट
- เพอร์รัสแอมโมเนียซัลเฟต
- โซเดียมไนไตรท์

3.2.1.7 ซัลไฟต์ (S²⁻)

- ขวดบีโอดี
- ขวดรูปกรวย
- กรดไฮโดรคลอริก
- สารละลายมาตรฐานไอโอดีน
- สารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟต
- น้ำแข็ง
- สารละลายสังกะสีอะซีเตต
- สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

3.2.1.8 ออกซิเจนละลาย (DO)

- เครื่องวัดออกซิเจนละลาย

3.2.1.9 โออาร์พี (ORP)

- เครื่องวัดโออาร์พี

3.2.1.10 การวัดสี (Color)

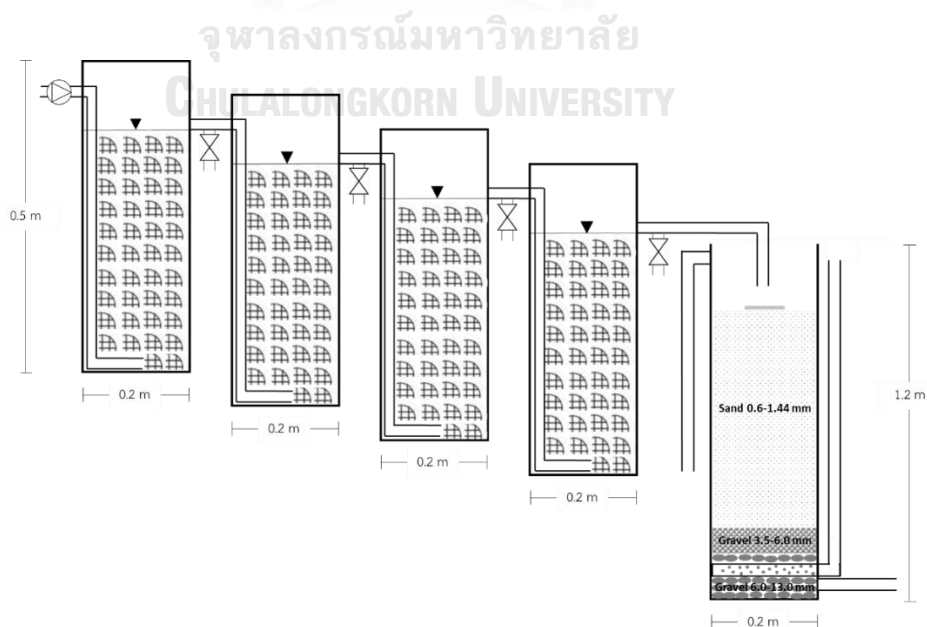
- สเปคโตรโฟโตมิเตอร์

3.2.2 ถังปฏิกริยาที่ใช้ในงานวิจัย

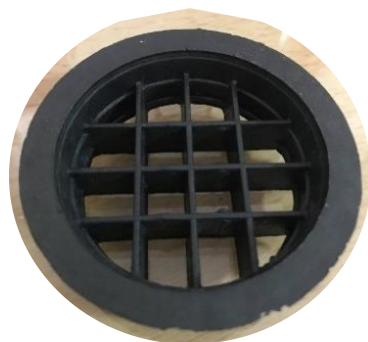
งานวิจัยนี้ใช้ถังปฏิกริยา 2 ชนิด ได้แก่ ถังกรองไร้อากาศ จำนวน 4 ถัง และถังกรองทราย จำนวน 1 ถัง ดังแสดงในรูปที่ 3-1 โดยมีรายละเอียดของแต่ละถังดังนี้

ถังกรองไร้อากาศ ทำจากพีวีซี มีลักษณะเป็นทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 เมตร ความสูง 0.50 เมตร ท่อน้ำเข้าและท่อน้ำออกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.025 เมตร มีปริมาตรรองรับน้ำเสียทั้งหมดเท่ากับ 48 ลิตร แบ่งออกเป็น 4 ถัง ดังแสดงในรูปที่ 3-2 ภายในถังใส่ตัวกลางพลาสติกของบริษัท อาควา นิซิฮาร่า คอร์ปอเรชั่น จำกัด รุ่น Aqua Media R-190 ซึ่งมีขนาด 70x22 มิลลิเมตร มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรเท่ากับ 190 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร โดยใส่ตัวกลางเต็มถังจึงคิดเป็นพื้นที่ผิวตัวกลางทั้งหมดเท่ากับ 9.12 ตารางเมตร และจากค่าอัตราการไหลทั้ง 4 ค่า สามารถคิดเป็นค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 2.63 - 21.05 กิโลกรัมซีโอดีต่อตารางเมตรตัวกลางต่อวัน

ถังกรองทรายชีวภาพ ทำจากพีวีซี มีลักษณะเป็นทรงกระบอก จำนวน 1 ถัง มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 เมตร ความสูง 1.20 เมตร ท่อน้ำเข้าและท่อน้ำออกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.025 เมตร ท่ออากาศและท่อน้ำล้นมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.025 เมตร ระดับสูงสุดของชั้นทรายเท่ากับ 0.8 เมตร และความสูงของชั้นกรวดเท่ากับ 0.2 เมตร ซึ่งจากค่าอัตราการไหลทั้ง 4 ค่า ทำให้ถังกรองทรายมีภาระปริมาณน้ำเท่ากับ 764 - 6,115 ลิตรต่อตารางเมตรต่อวัน



รูปที่ 3-1 ระบบถังกรองไร้อากาศและถังกรองทรายชีวภาพ



รูปที่ 3-2 ตัวกลางพลาสติกของบริษัท อakwa นิชิฮาร่า คอร์ปอเรชั่น จำกัด
รุ่น Aqua Media R-190

3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.3.1 น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัย

เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำตาลทรายซึ่งเป็นแหล่งคาร์บอน โดยมีความเข้มข้นเท่ากับ 1,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร พร้อมทั้งเติมธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ดังตารางที่ 3-1 และควบคุมพีเอชตลอดทั้งการทดลองให้อยู่ในช่วง 6.6–7.2 (speece, 1996) ด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนตและกรดซัลฟิวริก

ตารางที่ 3-1 องค์ประกอบของธาตุอาหารที่ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์
ที่มีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร (COD:N:P = 150:6.56:2.25)

ธาตุอาหาร	ความเข้มข้น	หน่วย
$C_{12}H_{22}O_{11}$	890.63	มก./ล.
NH_4Cl	167.16	มก./ล.
KH_2PO_4	65.90	มก./ล.
$MgSO_4$	128.29	มก./ล.
$CaCl_2$	110.25	มก./ล.
KCl	106.50	มก./ล.
micro nutrient*	1	มล./ล.

ที่มา : ปรับปรุงจาก Martin และคณะ, 2010

หมายเหตุ : micro nutrient เป็นธาตุอาหารรอง ประกอบด้วย $FeCl_3$, $CoCl_2$, $NiCl_2$, $ZnCl_2$, $CuSO_4$, $MnSO_4$, $(NH_4)_6MO_7O_{24}$, H_3BO_3 และ EDTA

3.3.2 การเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียก่อนเดินระบบ

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ไม่ได้ใช้หัวเชื้อแบคทีเรียจากระบบไร้อากาศอื่น จึงจำเป็นต้องมีการเลี้ยงแบคทีเรียในระบบให้เจริญเติบโตและมีความเข้มข้นมากพอที่จะสามารถบำบัดน้ำเสียได้ วิธีการคือสูบน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 2,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร และมีธาตุอาหารครบถ้วนให้ไหลผ่านตัวกลางพลาสติกในถังกรองไร้อากาศ จนแบคทีเรียเจริญเติบโตขึ้นและยึดเกาะที่ตัวกลางพลาสติก โดยเดินระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous flow) เป็นระยะเวลาประมาณ 2 เดือน พร้อมทั้งเก็บตัวอย่างน้ำและวิเคราะห์ค่าซีโอดีที่ลดลง จนได้อัตราการบำบัดที่คงที่ซึ่งจะสามารถเริ่มการทดลองได้ ขั้นตอนนี้จะใช้ระยะเวลาค่อนข้างนานขึ้นอยู่กับสารอาหารและสภาพแวดล้อมที่ต้องเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย

3.3.3 การทดลองช่วงที่ 1 ศึกษาผลของค่าการบรรทุสารอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดของระบบถังกรองไร้อากาศ

3.3.3.1 ตัวแปรที่ทำการศึกษา

ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงที่ 1 แสดงในตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงที่ 1

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรต้น	อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ขาเข้าเท่ากับ 24 , 48 , 96 และ 192 ลิตรต่อวัน (เทียบเป็นค่าการบรรทุสารอินทรีย์เท่ากับ 0.5 , 1 , 2 และ 4 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน)
ตัวแปรควบคุม	ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ขาเข้า 1,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร และค่าพีเอช 6.6-7.2
ตัวแปรตาม	พีเอช (pH) , ซีโอดี (COD) , แอมโมเนีย (NH ₃) , ไนเตรท (NO ₃ ⁻) และ ไนไตรท์ (NO ₂ ⁻)

3.3.3.2 วิธีทำการทดลอง

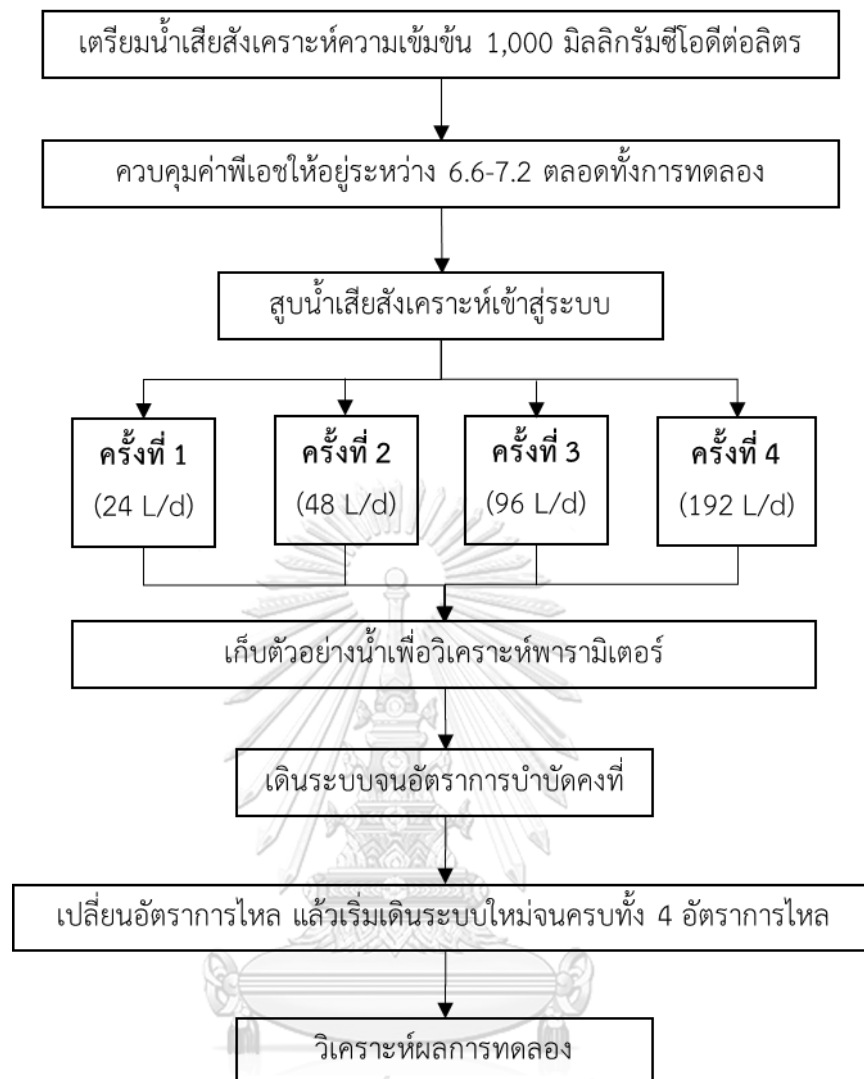
การทดลองช่วงที่ 1 มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าการบรรทุสารอินทรีย์ที่เหมาะสมต่อระบบถังกรองไร้อากาศ โดยเดินระบบแบบต่อเนื่องและยังไม่มี การต่อถังกรองทรายชีวภาพ ตลอดทั้งการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3-3 ขั้นตอนการทดลองมีรายละเอียดดังนี้

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร และเติมธาตุอาหาร ดังตารางที่ 3-1 ในถังเตรียมน้ำ โดยปริมาตรน้ำเสียที่เตรียมต่อวันขึ้นอยู่กับลักษณะการเดินระบบ ดังแสดงในตารางที่ 3-3

2. ควบคุมค่าพีเอชในระบบให้อยู่ระหว่าง 6.6-7.2 (speece, 1996) ตลอดทั้งการทดลองด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3)
3. สูบน้ำเสียเข้าถังกรองไร้อากาศด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 24 ลิตรต่อวัน เป็นอัตราการไหลอันดับแรกและเดินระบบแบบไหลต่อเนื่อง
4. เก็บตัวอย่างน้ำในทุกจุดตามระยะเวลาที่กำหนด นำมาวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการศึกษา และนำมาคำนวณหาอัตราการบำบัดของระบบถังกรองไร้อากาศ
5. เมื่ออัตราการบำบัดคงที่ จึงเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ เป็น 48 , 96 และ 192 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3-3
6. เมื่อทำการทดลองครบทุกอัตราการไหล เลือกอัตราการไหลที่ให้ค่าประสิทธิภาพทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสมที่สุด เพื่อทำการทดลองในระดับถัดไป



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 3-3 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองช่วงที่ 1

ตารางที่ 3-3 ลักษณะการเดินระบบในการทดลองช่วงที่ 1

อัตราการไหลเข้าของ น้ำเสีย (ล./วัน)	ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน)	ระยะกักพักทาง ชลศาสตร์ (วัน)	ภาระปริมาณน้ำ (ล./ตร.ม./วัน)
24	0.50	2	764
48	1.00	1.0	1529
96	2.00	0.5	3057
192	4.00	0.25	6115

3.3.4 การทดลองช่วงที่ 2 ศึกษาผลของระดับความลึกชั้นทรายต่อประสิทธิภาพการบำบัด
ของระบบถังกรองทรายชีวภาพและระบบบำบัดโดยรวม

3.3.4.1 ตัวแปรที่ทำการศึกษา

ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงที่ 2 แสดงในตารางที่ 3-4

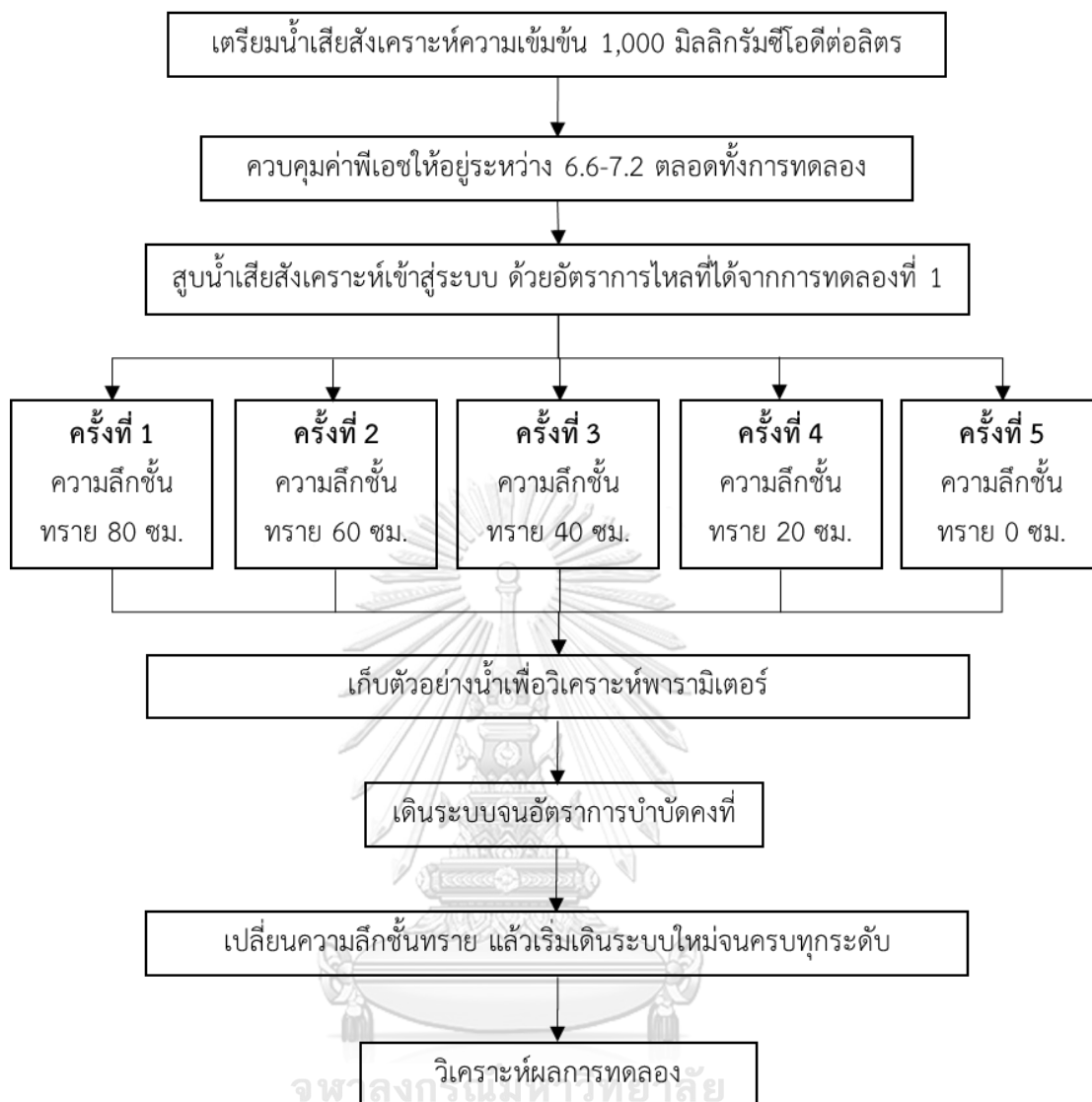
ตารางที่ 3-4 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงที่ 2

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรต้น	ระดับความลึกชั้นทรายเท่ากับ 80 , 60 , 40 , 20 และ 0 เซนติเมตร
ตัวแปรควบคุม	ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ขาเข้า(ถังกรองไร้อากาศ) 1,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร , อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ขาเข้า(ถังกรองไร้อากาศ)จากการทดลองที่ 1 และ ค่าพีเอช 6.6-7.2
ตัวแปรตาม	พีเอช (pH) , ซีโอดี (COD) , ของแข็งแขวนลอย (TSS) , แอมโมเนีย (NH ₃) , ไนเตรท (NO ₃ ⁻) , ไนไตรท์ (NO ₂ ⁻) , ซัลไฟด์ (S ²⁻) , ออกซิเจนละลาย (DO) , โออาร์พี (ORP) และสี (color)

3.3.4.2 วิธีทำการทดลอง

การทดลองช่วงที่ 2 มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความลึกชั้นทรายในถังกรองทราย
ว่าส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากระบบถังกรองไร้อากาศและถังกรองทรายอย่างไร
โดยควบคุมค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่จะเข้ามาในถังกรองทรายให้เท่ากับค่าที่เลือกมาจากการ
ทดลองที่ 1 ตลอดทั้งการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3-4 และมีขั้นตอนการทดลองมีดังนี้

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร และเติมธาตุอาหาร ดังตารางที่ 3-1 ในถังเตรียมน้ำ โดยปริมาตรน้ำเสียที่เตรียมต่อวันขึ้นอยู่กับค่าภาระ บรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1 ซึ่งในการทดลองนี้จะเป็นการเดิน ระบบร่วมกันระหว่างถังกรองไร้อากาศและต่อดัวยถังกรองทรายชีวภาพ
2. ควบคุมค่าพีเอชในระบบให้อยู่ระหว่าง 6.6-7.2 (speece, 1996) ตลอดทั้งการทดลอง ด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3)
3. สูบน้ำเสียเข้าถังกรองไร้อากาศด้วยอัตราการไหลที่ได้จากการทดลองที่ 1 และเตรียมถัง กรองทรายชีวภาพที่ความลึกชั้นทรายเท่ากับ 80 เซนติเมตร เป็นลำดับแรกและเดิน ระบบแบบไหลต่อเนื่อง
4. เก็บตัวอย่างน้ำในทุกจุดตามระยะเวลาที่กำหนด นำมาวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่ ต้องการศึกษา และนำมาคำนวณหาอัตราการบำบัดของระบบถังกรองทรายและอัตรา การบำบัดของระบบโดยรวม
5. เมื่อครบกำหนดเวลาที่ต้องการศึกษาจึงเปลี่ยนระดับความลึกชั้นทรายในถังกรองทราย ชีวภาพเป็น 60 , 40 , 20 และ 0 เซนติเมตร ดังแสดงในตารางที่ 3-5 ตามลำดับ โดยทำ การลอกชั้นผิวหน้าของทรายออกให้เหลือตามระดับความลึกที่กำหนดไว้ แล้วจึงค่อยเดิน ระบบตามเดิม
6. เมื่อทำการทดลองครบทุกระดับความลึกชั้นทราย สรุปผลการทดลองและอภิปรายผล การทดลอง



รูปที่ 3-4 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองช่วงที่ 2

ตารางที่ 3-5 ลักษณะการเดินระบบในการทดลองช่วงที่ 2

อัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย (ล./วัน)	ความลึกชั้นทราย (เซนติเมตร)
จากการทดลองที่ 1	80
	60
	40
	20
	0

3.4 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ผล

ในงานวิจัยนี้มีการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากถังกรองทุกถังเพื่อตรวจวัดคุณภาพน้ำตามพารามิเตอร์ที่กำหนด รวมทั้งสิ้น 6 จุด ได้แก่ น้ำเสียก่อนเข้าระบบหรือน้ำเสียสังเคราะห์ น้ำเสียจากถังกรองไร้อากาศ 4 ถัง และน้ำเสียจากถังกรองทราย จากนั้นจะนำตัวอย่างน้ำเสียมาวิเคราะห์ด้วยวิธีตามคู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ซึ่งพารามิเตอร์ที่จะตรวจวัดและวิธีการตรวจวัดสามารถดูได้ที่ตารางที่ 3-6 แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบเพื่อดูประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของถังกรองไร้อากาศและถังกรองทรายชีวภาพ

ตารางที่ 3-6 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์

พารามิเตอร์	หน่วย	วิธีวิเคราะห์	ความถี่ในการวิเคราะห์
พีเอช	-	Electrometric Method	-
ซีโอดี	มิลลิกรัมต่อลิตร	Close Reflux Method - Titration	ทุก 1-2 วัน
ของแข็งแขวนลอย	มิลลิกรัมต่อลิตร	ทำให้แห้งที่ 103-105 องศาเซลเซียส	ทุก 1-2 วัน
แอมโมเนีย	มิลลิกรัมต่อลิตร	Salicylate Method	ทุก 1-2 วัน
ไนเตรท	มิลลิกรัมต่อลิตร	Spectrophotometric Method	ทุก 1-2 วัน
ไนไตรท์	มิลลิกรัมต่อลิตร	Spectrophotometric Method	ทุก 1-2 วัน
ซัลไฟด์	มิลลิกรัมต่อลิตร	Iodometric Titration	ทุก 1-2 วัน
ออกซิเจนละลาย	มิลลิกรัมต่อลิตร	Membrane electrode method	ทุก 1-2 วัน
โออาร์พี	มิลลิโวลต์	Electrometric Method	ทุก 1-2 วัน
สี	ADMI	Spectrophotometric Method	ทุก 1-2 วัน

3.5 ระยะเวลาในการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ใช้ระยะเวลาในการดำเนินงานทั้งสิ้นประมาณ 15 เดือน โดยแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 3-7

ตารางที่ 3-7 ระยะเวลาในการดำเนินงาน

ลำดับ	ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลา (เดือน)															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1	ค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	■	■	■													
2	ออกแบบการทดลอง และ ถึงปฏิบัติการ			■	■	■											
3	จัดทำโครงร่างวิทยานิพนธ์				■	■	■										
4	ทำการทดลองให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์					■	■	■	■	■	■	■	■				
5	อภิปรายและสรุปผลการทดลอง															■	
6	จัดทำเล่มวิทยานิพนธ์																■



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 การทดลองช่วงที่ 1 ศึกษาผลของค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของระบบถังกรองไร้อากาศ

ก่อนเริ่มทำการทดลองมีการเดินระบบแบบไหลต่อเนื่องที่ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ 2,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร เป็นระยะเวลาประมาณ 2 เดือน เพื่อให้เกิดฟิล์มชีวภาพหรือเชื้อจุลินทรีย์ขึ้นบริเวณพื้นผิวของตัวกลางพลาสติกที่อยู่ภายในถังกรองไร้อากาศ จากนั้นจึงเริ่มการทดลองจริง

ทำการทดลองโดยใช้ชุดถังกรองไร้อากาศ 4 ถัง ต่อกันแบบอนุกรม แต่ละถังมีความจุอยู่ที่ 12 ลิตร ภายในถังบรรจุตัวกลางพลาสติกเต็มถัง เดินระบบด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งเตรียมจากน้ำตาลทรายที่มีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ควบคุมอัตราการไหลเข้าของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 24 , 48 , 96 และ 192 ลิตรต่อวัน เพื่อให้ได้ค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 0.5 , 1 , 2 และ 4 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ตามลำดับ มีระยะกักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 2 , 1 , 0.5 และ 0.25 วัน ตามลำดับ ทั้งนี้เดินระบบแบบไหลต่อเนื่อง (Continuous flow) และควบคุมค่าพีเอชในถังกรองไร้อากาศให้อยู่ระหว่าง 7-7.5 ตลอดทั้งการทดลอง โดยการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตด้วยอัตราส่วนระหว่างน้ำตาลทรายต่อโซเดียมไบคาร์บอเนตเท่ากับ 1:3.5 (พิมพ์สิทธิ์ หงชยางกูร, 2561) ทำการเก็บน้ำตัวอย่างจากถังกรองไร้อากาศทุกถังเพื่อตรวจวัดค่าซีโอดี แอมโมเนีย ไนเตรท และไนไตรท์ เพื่อศึกษาผลของค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพของถังกรองไร้อากาศ ซึ่งผลการทดลองที่ได้เป็นดังนี้

4.1.1 ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.5 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

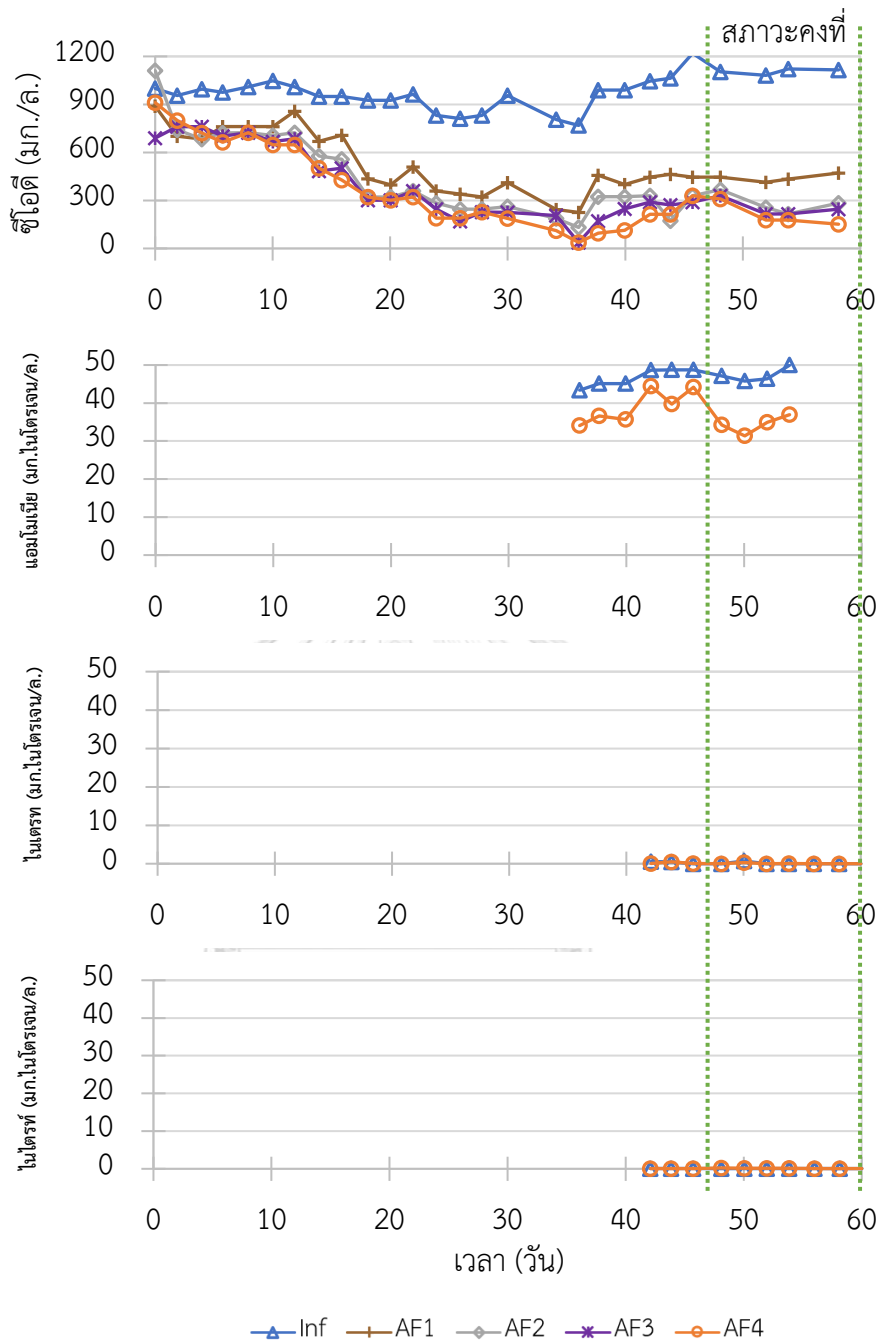
เดินระบบแบบไหลต่อเนื่องด้วยอัตราการไหล 24 ลิตรต่อวัน มีระยะกักพักทางชลศาสตร์โดยรวมเท่ากับ 2 วัน ถังกรองไร้อากาศแต่ละถังจึงมีระยะกักพักทางชลศาสตร์ 0.5 , 1.0 , 1.5 และ 2 วัน ตามลำดับ เดินระบบทั้งสิ้น 58 วัน โดยระบบเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลในวันที่ 48 ซึ่งผลการตรวจวัดพารามิเตอร์ที่เป็นตัวชี้วัดของระบบมีดังนี้

ผลการตรวจวัดปริมาณซีโอดีในระบบจากการเก็บน้ำตัวอย่างทั้งสิ้น 5 ตำแหน่ง ได้แก่ น้ำเสียขาเข้า (Inf) และน้ำทิ้งจากถังกรองไร้อากาศทั้ง 4 ถัง (AF1-AF4) พบว่าในช่วงวันที่ 36-40 มีปริมาณซีโอดีในระบบเพิ่มขึ้นมากกว่าช่วงแรกซึ่งมีสาเหตุมาจากระบบมีค่าพีเอชลดลง ทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถบำบัดสารอินทรีย์ได้ เมื่อทำการปรับพีเอชในระบบแล้วพบว่าระบบใช้เวลาในการปรับตัวทั้งสิ้น 48 วัน จึงเริ่มคงที่ โดยปริมาณซีโอดีในช่วงสภาวะคงที่ของระบบมีค่าเท่ากับ $1,105.37 \pm 17.3$,

440.88±24.8 , 251.87±33.7 , 226.15±16.9 และ 168±14.9 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4-1 เมื่อนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบได้เท่ากับร้อยละ 84.76 ซึ่งหากดูที่ประสิทธิภาพของถังกรองไร้อากาศแต่ละถังที่ต่อกันพบว่าอยู่ที่ร้อยละ 60.11 , 77.21 , 79.54 และ 84.76 ตามลำดับ โดยสามารถสังเกตได้ว่าปริมาณสารอินทรีย์จะถูกบำบัดมากที่สุดในถังกรองไร้อากาศถังแรกและลดลงจนเกือบหมดในถังต่อมา

จากการตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียของน้ำเสียขาเข้าและน้ำทิ้งจากถังกรองไร้อากาศถังที่ 4 ในขณะที่ระบบอยู่ในสภาวะสมดุล พบว่ามีค่า 47.31±1.86 และ 34.38±2.31 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อนำมาคำนวณเทียบกับปริมาณซีโอดีที่ถูกใช้ไปในระบบมีค่าเท่ากับ 2.07 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อ 150 มิลลิกรัมซีโอดี ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีของอัตราส่วนระหว่างซีโอดีต่อไนโตรเจนในระบบบำบัดแบบไร้อากาศที่มีค่าอยู่ที่ 150 ต่อ 1 ทั้งนี้จากการตรวจวัดปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ในระบบพบว่าปริมาณน้อยมากโดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.69 และ 0.23 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ตามลำดับ





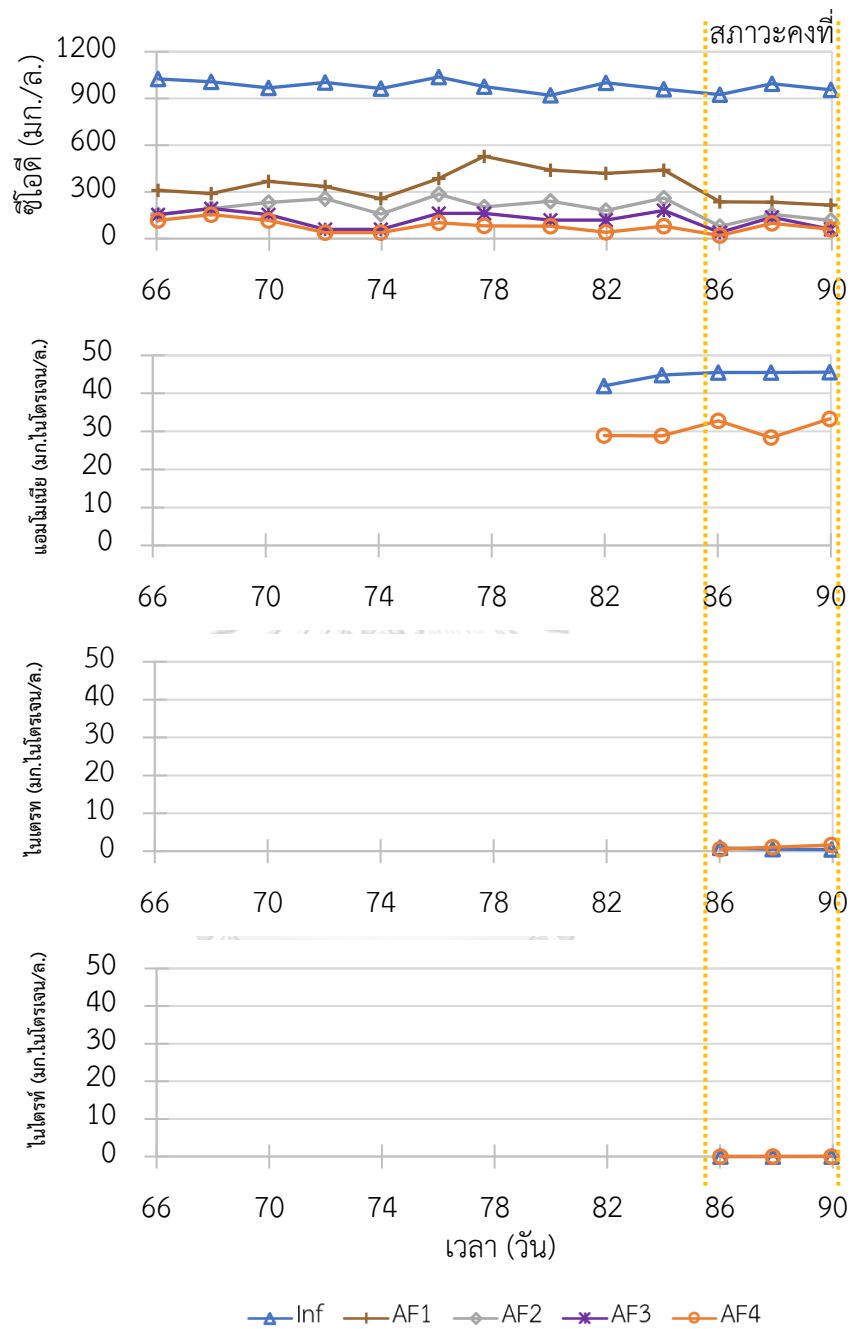
รูปที่ 4-1 ปริมาณซีไอที แอมโมเนีย ไนเตรท และไนไตรท์ ที่ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์ เท่ากับ 0.5 กิโลกรัมซีไอทีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

4.1.2 ภาวะบรรทุกระบบอินทรีย์ 1 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

เดินระบบแบบไหลต่อเนื่องด้วยอัตราการไหล 48 ลิตรต่อวัน มีระยะกักพักทางชลศาสตร์โดยรวมเท่ากับ 1 วัน ถึงกรองไร้อากาศแต่ละถังจึงมีระยะกักพักทางชลศาสตร์ 0.25 , 0.5 , 0.75 และ 1 วัน ตามลำดับ เดินระบบทั้งสิ้น 25 วัน โดยระบบเริ่มเข้าสู่ภาวะสมดุลในวันที่ 20 ซึ่งผลการตรวจวัดพารามิเตอร์ที่เป็นตัวชี้วัดของระบบมีดังนี้

ผลการตรวจวัดปริมาณซีโอดีในระบบจากการเก็บน้ำตัวอย่างทั้งสิ้น 5 ตำแหน่ง ได้แก่ น้ำเสียขาเข้า (Inf) และน้ำทิ้งจากถังกรองไร้อากาศทั้ง 4 ถัง (AF1-AF4) พบว่าระบบใช้เวลาในการปรับตัวทั้งสิ้น 20 วัน จึงเริ่มคงที่ โดยปริมาณซีโอดีในช่วงสภาวะคงที่ของระบบมีค่าเท่ากับ 958.60 ± 35.3 , 228.28 ± 11.9 , 117.29 ± 38.7 , 78.16 ± 51.5 และ 58.59 ± 38.9 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4-2 เมื่อนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบจะได้เท่ากับร้อยละ 93.06 ซึ่งหากดูที่ประสิทธิภาพของถังกรองไร้อากาศแต่ละถังที่ต่อกันพบว่าอยู่ที่ร้อยละ 54.86 , 76.39 , 85.42 และ 93.06 ตามลำดับ โดยสามารถสังเกตได้ว่าปริมาณสารอินทรีย์จะถูกบำบัดมากที่สุดที่ถังกรองไร้อากาศถังแรกและลดลงจนเกือบหมดในถังต่อมาเช่นเดียวกับการทดลองก่อนหน้านี้

จากการตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียของน้ำเสียขาเข้าและน้ำทิ้งจากถังกรองไร้อากาศถังที่ 4 ในขณะที่ระบบอยู่ในสภาวะสมดุล พบว่ามีค่า 45.52 ± 0.07 และ 31.49 ± 2.72 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อนำมาคำนวณเทียบกับปริมาณซีโอดีที่ถูกใช้ไปในระบบมีค่าเท่ากับ 2.36 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อ 150 มิลลิกรัมซีโอดี ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีของอัตราส่วนระหว่างซีโอดีต่อไนโตรเจนในระบบบำบัดแบบไร้อากาศที่มีค่าอยู่ที่ 150 ต่อ 1 ทั้งนี้จากการตรวจวัดปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ในระบบพบว่าปริมาณน้อยมากโดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.64 และ 0.05 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ตามลำดับ



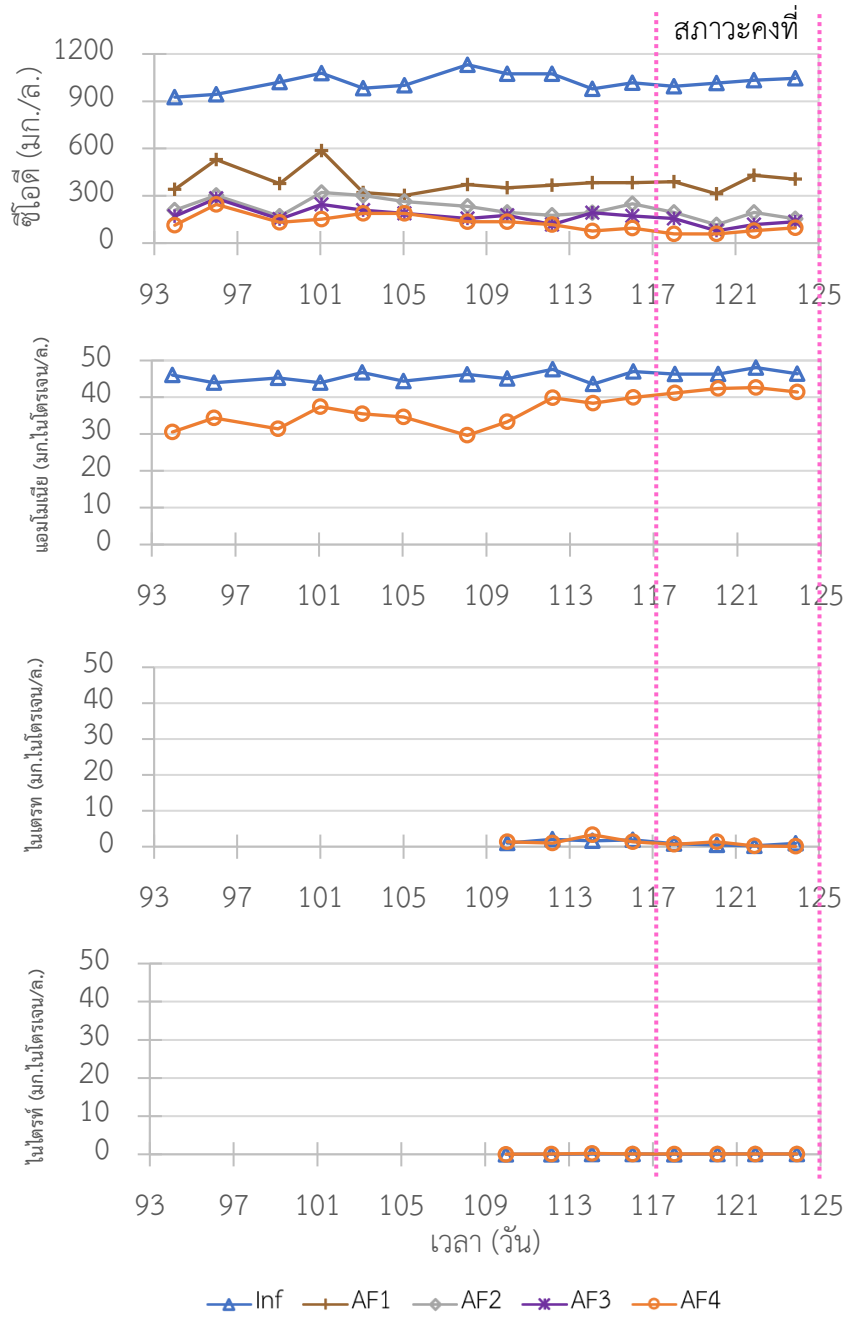
รูปที่ 4-2 ปริมาณซีโอติ แอมโมเนีย ไนเตรท และไนไตรท์ ที่ภาวะบรรทุกระบบอินทรีย์ เท่ากับ 1 กิโลกรัมซีโอติต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

4.1.3 ภาวะบรรทุกระบบอินทรีย์ 2 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

เดินระบบแบบไหลต่อเนื่องด้วยอัตราการไหล 96 ลิตรต่อวัน มีระยะกักพักทางชลศาสตร์โดยรวมเท่ากับ 0.5 วัน ถึงกรองไร้อากาศแต่ละถังจึงมีระยะกักพักทางชลศาสตร์ 0.125 , 0.25 , 0.375 และ 0.5 วัน ตามลำดับ เดินระบบทั้งสิ้น 31 วัน โดยระบบเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลในวันที่ 24 ซึ่งผลการตรวจวัดพารามิเตอร์ที่เป็นตัวชี้วัดของระบบมีดังนี้

ผลการตรวจวัดปริมาณซีโอดีในระบบจากการเก็บน้ำตัวอย่างทั้งสิ้น 5 ตำแหน่ง ได้แก่ น้ำเสียขาเข้า (Inf) และน้ำทิ้งจากถังกรองไร้อากาศทั้ง 4 ถัง (AF1-AF4) พบว่าระบบใช้เวลาในการปรับตัวทั้งสิ้น 24 วัน จึงเริ่มคงที่ โดยปริมาณซีโอดีในช่วงสภาวะคงที่ของระบบมีค่าเท่ากับ $1,024.81 \pm 26.3$, 408.65 ± 19.6 , 181.69 ± 23.3 , 136.22 ± 19.5 และ 77.79 ± 19.1 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4-3 เมื่อนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบจะได้เท่ากับร้อยละ 92.41 ซึ่งหากดูที่ประสิทธิภาพของถังกรองไร้อากาศแต่ละถังที่ต่อกันพบว่าอยู่ที่ร้อยละ 60.12 , 82.27 , 86.71 และ 92.41 ตามลำดับ โดยสามารถสังเกตได้ว่าปริมาณสารอินทรีย์จะถูกบำบัดมากที่สุดที่ถังกรองไร้อากาศถังแรกและลดลงจนเกือบหมดในถังต่อมาเช่นเดียวกับการทดลองก่อนหน้านี้

จากการตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียของน้ำเสียขาเข้าและน้ำทิ้งจากถังกรองไร้อากาศถังที่ 4 ในขณะที่ระบบอยู่ในสภาวะสมดุล พบว่ามีค่า 47.31 ± 1.86 และ 34.38 ± 2.31 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อนำมาคำนวณเทียบกับปริมาณซีโอดีที่ถูกใช้ไปในระบบมีค่าเท่ากับ 0.77 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อ 150 มิลลิกรัมซีโอดี ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีของอัตราส่วนระหว่างซีโอดีต่อไนโตรเจนในระบบบำบัดแบบไร้อากาศที่มีค่าอยู่ที่ 150 ต่อ 1 ทั้งนี้จากการตรวจวัดปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ในระบบพบว่าปริมาณน้อยมากโดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 3.32 และ 0.22 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ตามลำดับ



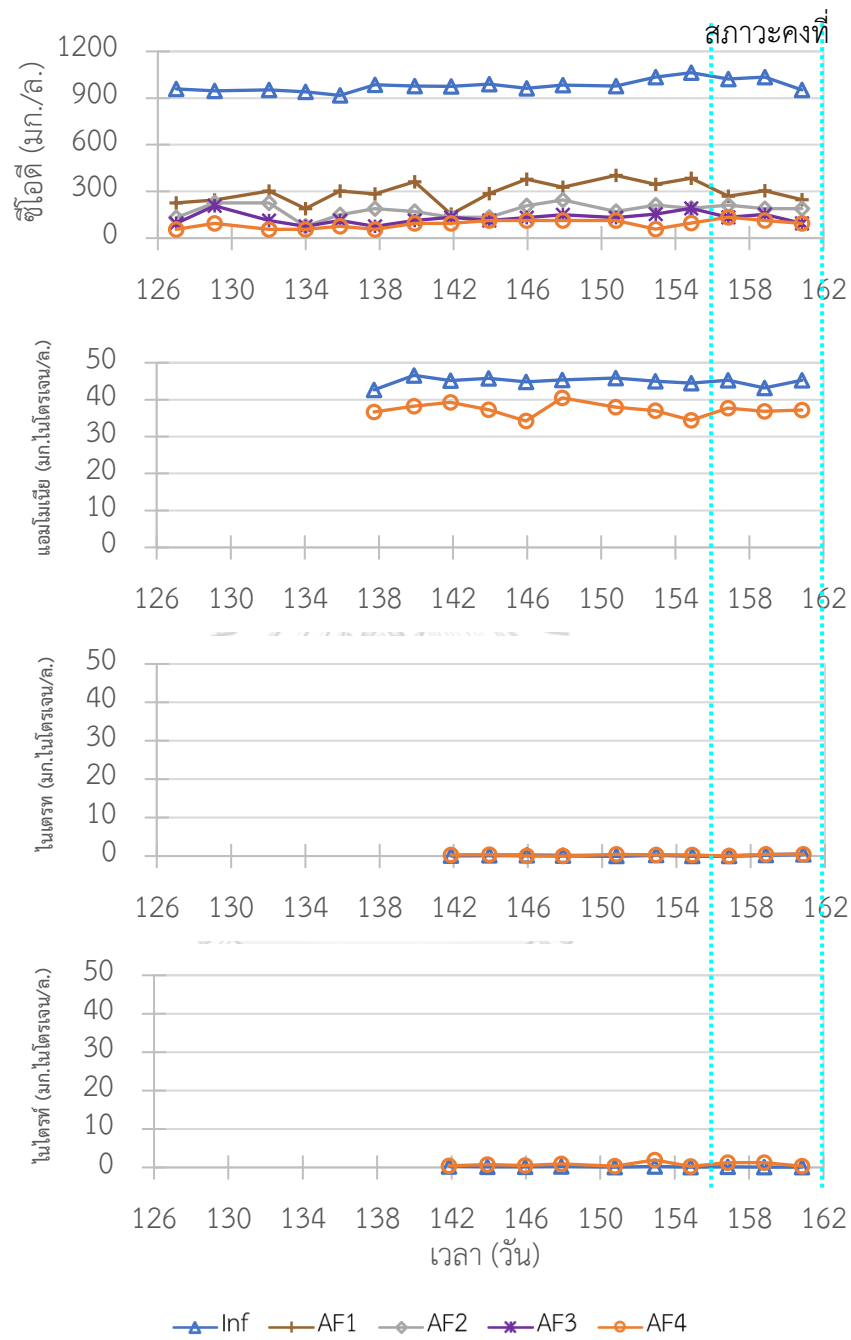
รูปที่ 4-3 ปริมาณซีโอติ แอมโมเนีย ไนเตรท และไนไตรท์ ที่ภาวะบรรทุสารอินทรีย์ เท่ากับ 2 กิโลกรัมซีโอติต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

4.1.4 ภาวะบรรทุกระบบอินทรีย์ 4 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

เดินระบบแบบไหลต่อเนื่องด้วยอัตราการไหล 192 ลิตรต่อวัน มีระยะกักพักทางชลศาสตร์โดยรวมเท่ากับ 0.25 วัน ถึงกรองไร้อากาศแต่ละถังจึงมีระยะกักพักทางชลศาสตร์ 0.0625 , 0.125 , 0.1875 และ 0.25 วัน ตามลำดับ เดินระบบทั้งสิ้น 35 วัน โดยระบบเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลในวันที่ 30 ซึ่งผลการตรวจวัดพารามิเตอร์ที่เป็นตัวชี้วัดของระบบมีดังนี้

ผลการตรวจวัดปริมาณชีโอดีในระบบจากการเก็บน้ำตัวอย่างทั้งสิ้น 5 ตำแหน่ง ได้แก่ น้ำเสียขาเข้า (Inf) และน้ำทิ้งจากถังกรองไร้อากาศทั้ง 4 ถัง (AF1-AF4) พบว่าระบบใช้เวลาในการปรับตัวทั้งสิ้น 30 วัน จึงเริ่มคงที่ โดยปริมาณชีโอดีในช่วงสภาวะคงที่ของระบบมีค่าเท่ากับ $1,103.50 \pm 44.7$, 273.73 ± 28.9 , 197.38 ± 12.0 , 127.34 ± 29.2 และ 114.64 ± 19.6 มิลลิกรัมชีโอดีต่อลิตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4-4 เมื่อนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบจะได้เท่ากับร้อยละ 88.58 ซึ่งหากดูที่ประสิทธิภาพของถังกรองไร้อากาศแต่ละถังที่ต่อกันพบว่าอยู่ที่ร้อยละ 72.72 , 80.33 , 87.31 และ 88.58 ตามลำดับ โดยสามารถสังเกตได้ว่าปริมาณสารอินทรีย์จะถูกบำบัดมากที่สุดที่ถังกรองไร้อากาศถังแรกและลดลงจนเกือบหมดในถังต่อมาเช่นเดียวกับการทดลองก่อนหน้านี้

จากการตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียของน้ำเสียขาเข้าและน้ำทิ้งจากถังกรองไร้อากาศถังที่ 4 ในขณะที่ระบบอยู่ในสภาวะสมดุล พบว่ามีค่า 44.55 ± 1.22 และ 37.23 ± 0.43 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อนำมาคำนวณเทียบกับปริมาณชีโอดีที่ถูกใช้ไปในระบบมีค่าเท่ากับ 1.23 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อ 150 มิลลิกรัมชีโอดี ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีของอัตราส่วนระหว่างชีโอดีต่อไนโตรเจนในระบบบำบัดแบบไร้อากาศที่มีค่าอยู่ที่ 150 ต่อ 1 ทั้งนี้จากการตรวจวัดปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ในระบบพบว่าปริมาณน้อยมากโดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.48 และ 1.94 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ตามลำดับ

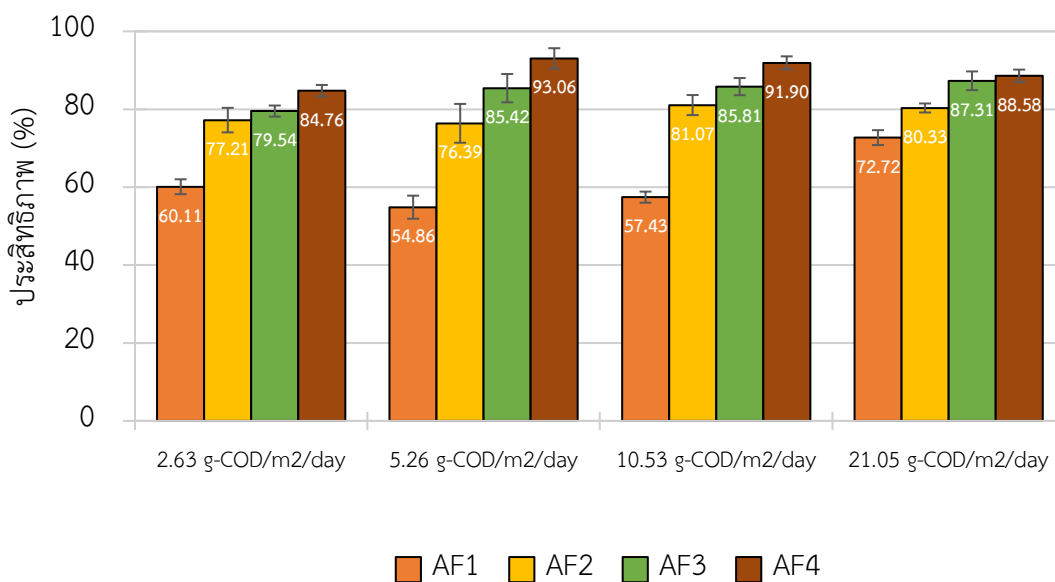


รูปที่ 4-4 ปริมาณซีโอติ แอมโมเนีย ไนเตรท และไนไตรท์ ที่ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์ เท่ากับ 4 กิโลกรัมซีโอติต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

4.1.5 ประสิทธิภาพของการบำบัดซีโอดีด้วยถังกรองไร้อากาศ

จากการนำปริมาณซีโอดีที่ตรวจวัดได้ในถังเตรียมน้ำเสียเข้าและถังกรองไร้อากาศทั้ง 4 ถัง มาคำนวณเป็นค่าประสิทธิภาพการบำบัดของถังกรองไร้อากาศที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.5 , 1 , 2 และ 4 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดที่คำนวณจากถังเตรียมน้ำจนถึงถังกรองไร้อากาศถึงสุดท้าย คิดเป็นร้อยละ 84.76 , 93.06 , 91.90 และ 88.58 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4-5 ซึ่งมีความใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Jung และคณะ (2009) ที่ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีของถังกรองไร้อากาศ โดยมีค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 5.05 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน และมีระยะกักพักทางชลศาสตร์ 50 ชั่วโมง พบว่ามีค่าประสิทธิภาพอยู่ที่ร้อยละ 79 หรือในงานวิจัยของ Han และคณะ (2013) ที่พบว่าค่าประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของถังกรองไร้อากาศอยู่ที่ร้อยละ 76 โดยมีค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 1.33 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน และมีระยะกักพักทางชลศาสตร์ 24 ชั่วโมง ทั้งนี้ปริมาณสารอินทรีย์ส่วนใหญ่จะถูกบำบัดมากที่สุดในถังกรองไร้อากาศถึงแรกคิดเป็นร้อยละ 55-73

ผลการทดลองพบว่าถังกรองไร้อากาศบางถังที่มีระยะเวลาเก็บกักเท่ากันกลับมีประสิทธิภาพในการบำบัดที่แตกต่างกัน ซึ่งจะแสดงผลในรูปที่ 4-6 เมื่อนำข้อมูลเหล่านั้นมาวิเคราะห์หาค่าจลนพลศาสตร์



รูปที่ 4-5 ประสิทธิภาพของการบำบัดซีโอดีด้วยถังกรองไร้อากาศ
ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

4.1.6 ค่าจลนพลศาสตร์ของถังกรองไร้อากาศ

ด้วยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่ต้องการหาแนวทางในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียขนาดเล็กที่เหมาะสมสำหรับบ้านเรือน อาคารขนาดเล็ก หรือชุมชนขนาดเล็ก และมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างที่ไม่สูงนัก ซึ่งถ้าสามารถลดระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียในระบบลงได้ย่อมส่งผลถึงขนาดของระบบและต้นทุนในการสร้างระบบอย่างแน่นอน ดังนั้นชุดถังกรองไร้อากาศที่ใช้ในการทดลองจึงออกแบบให้มีจำนวน 4 ถัง และต่อกันแบบอนุกรม เมื่อทราบระยะเวลาเก็บกักโดยรวมแล้วยังสามารถทราบระยะเวลาเก็บกักย่อยของแต่ละถังได้อีก ดังนั้นในแต่ละการทดลองจึงมีระยะเวลาเก็บกักย่อย 4 ค่า รวมทั้งสิ้น 4 การทดลอง จึงมีค่าซีโอดีที่ระยะเวลาเก็บกักต่างๆ 16 ค่า โดยจะนำค่าเหล่านี้มาใช้ในการหาค่าจลนพลศาสตร์ของถังกรองไร้อากาศ

จากที่กล่าวไว้ข้างต้น ค่าที่นำมาใช้ในการหาค่าจลนพลศาสตร์ของถังกรองไร้อากาศคือค่าซีโอดีในสภาวะคงที่ของทั้ง 4 การทดลอง โดยนำมาเขียนกราฟเทียบกับระยะเวลาเก็บกักในทุกๆ ช่วงเวลา ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ในรูปของจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง ($r_c = k_1 C$) จากนั้นใช้สมการ $TCOD = nbCOD + bCOD^{-k_1 t}$ สร้างแบบจำลองค่าซีโอดีจากการทดลองขึ้นมา โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel และโปรแกรม SPSS (Statistics Package for the Social Sciences) ช่วยในการวิเคราะห์หาค่าดังกล่าว

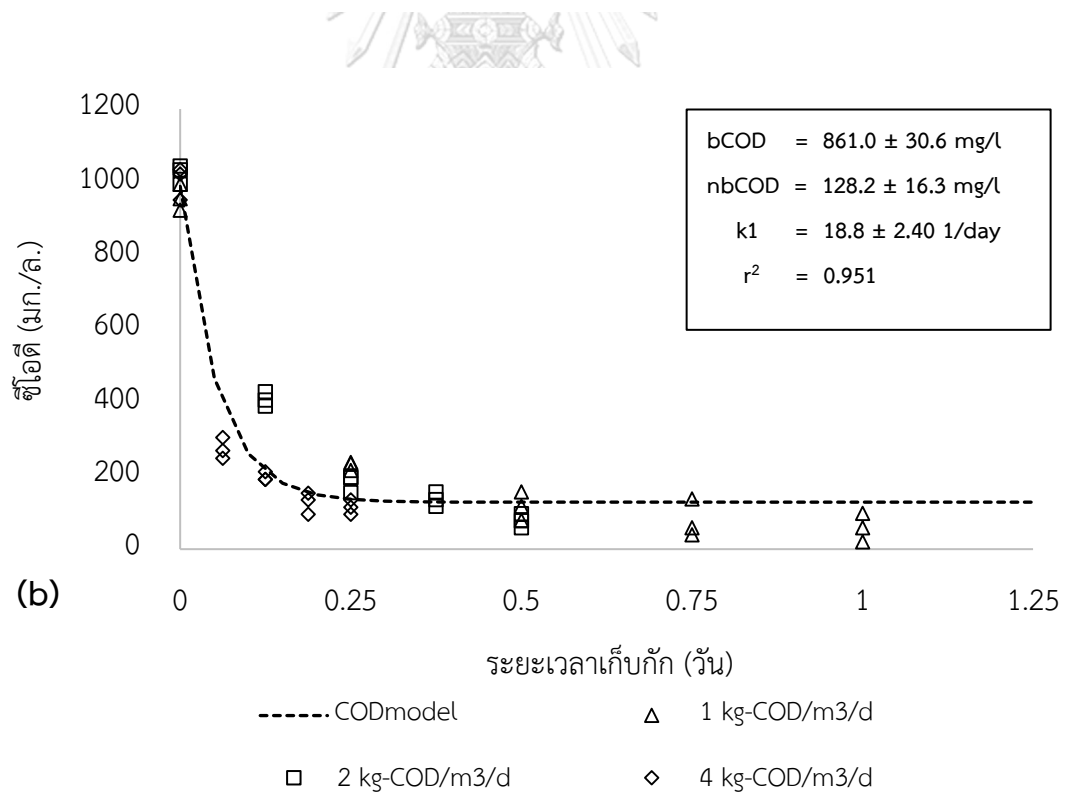
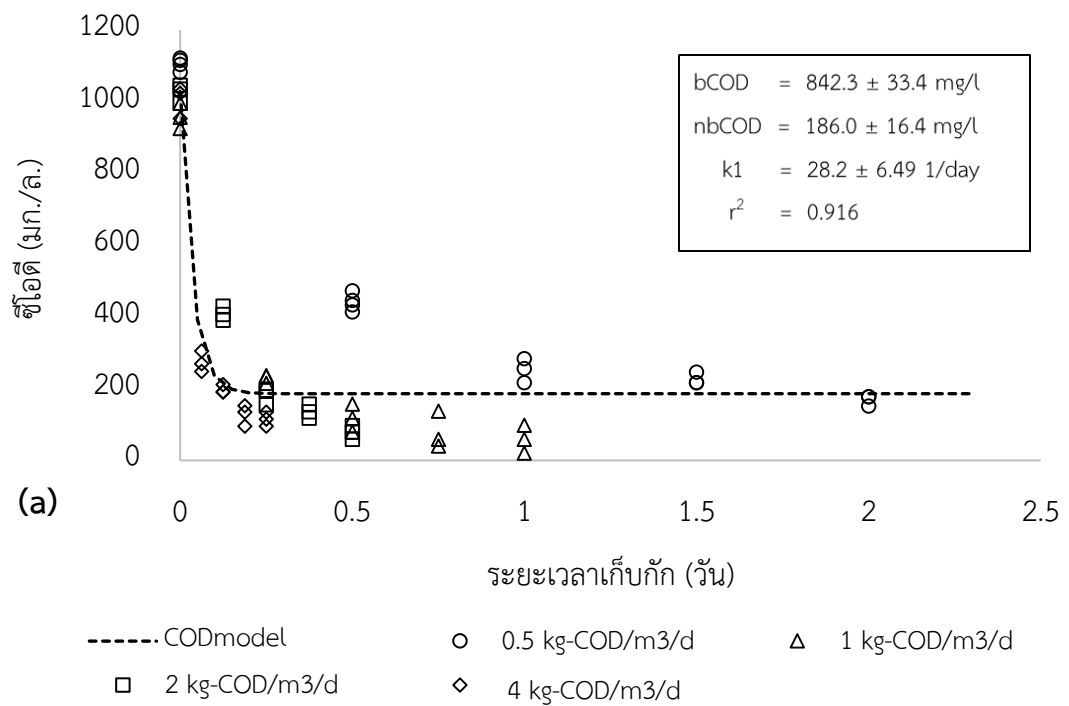
ผลที่ได้พบว่ามีค่าซีโอดีที่สามารถย่อยสลายได้ (bCOD) 842.3 ± 33.4 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของปฏิกิริยาลำดับที่ 1 (k_1) 28.2 ± 6.49 วัน⁻¹ และมีค่าซีโอดีที่ไม่สามารถบำบัดได้ (nbCOD) 186.0 ± 16.4 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4-6 (a) ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าชุดข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.5 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูงจากการควบคุมพีเอชในระบบได้ไม่ดี เป็นสาเหตุที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของปฏิกิริยาลำดับที่ 1 (k_1) สูงตามไปด้วย เมื่อนำข้อมูลชุดนี้ออกพบว่าชุดข้อมูลที่เหลือมีความใกล้เคียงกันมากขึ้น มีค่าสัมประสิทธิ์ของปฏิกิริยาลำดับที่ 1 (k_1) ลดลง โดยมีค่าเท่ากับ 18.8 ± 2.40 วัน⁻¹ มีค่าซีโอดีที่สามารถย่อยสลายได้ (bCOD) 861.0 ± 30.6 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าซีโอดีที่ไม่สามารถบำบัดได้ (nbCOD) 128.2 ± 16.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4-6 (b) โดยสารอินทรีย์ในระบบที่เหลืออยู่นั้นอาจเนื่องจากระบบที่เป็นการบำบัดชนิดไร้อากาศ ซึ่งโดยทั่วไปไม่สามารถบำบัดสารอินทรีย์ได้จนต่ำมากเหมือนระบบบำบัดชนิดเติมอากาศ รวมทั้งอาจมีสาเหตุมาจากความบริสุทธิ์ของน้ำตาลทรายที่ใช้เป็นสารอินทรีย์ในระบบเองด้วย

เมื่อนำค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการทดลองนี้มาเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นพบว่ามีความสูงกว่า ดังแสดงในตารางที่ 4-1 และเมื่อคำนวณหาอัตราการบำบัดจำเพาะพบว่ามีค่าสูงกว่างานวิจัยอื่นเล็กน้อย อาจเป็นเพราะงานวิจัยนี้ใช้น้ำตาลทรายซึ่งถูกย่อยสลายได้ง่าย

ในรูปที่ 4-6 จะเห็นว่าที่ระยะเวลาเก็บกักเพียง 0.25 วัน ระบบสามารถบำบัดสารอินทรีย์ได้ใกล้เคียงกับระยะเวลาเก็บกัก 1 หรือ 2 วัน ซึ่งเป็นระยะเวลาเก็บกักที่นิยมใช้ในการออกแบบระบบประเภทนี้ แต่เพื่อคงความแน่นอนของประสิทธิภาพของระบบไว้ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ระยะเวลาเก็บกัก 0.5 วัน เติระบบในการทดลองที่ 2 ร่วมกับถังกรองทรายชีวภาพ

ตารางที่ 4-1 ค่าจลนพลศาสตร์ของถังกรองไร้อากาศต่างๆ

ชนิดถัง ปฏิกรณ์	ชนิดของ น้ำเสีย	ความ เข้มข้นซีโอ ดีเริ่มต้น	ค่าคงที่อัตรา การ เกิดปฏิกิริยา (k)	อัตราการ บำบัด (r)	อัตราการ บำบัด จำเพาะ (r/x)	อ้างอิง
ถังกรองไร้อากาศแบบเบดนิ่ง	น้ำเสียโรงฆ่าสัตว์	6,500±388 mg/l	1.11 d ⁻¹	1.11 gCOD/l-d	0.16 m ² -d	Romero และคณะ, 2011
ถังย่อยไร้อากาศชนิดไหลขึ้นแบบเบดนิ่ง	โรงงานผลิตปุ๋ยคอก	77±12 g/l	0.28 d ⁻¹	0.28 gCOD/l-d	0.04 m ² -d	Nikolaev และคณะ, 2009
ถังกรองไร้อากาศชนิดไหลขึ้น	น้ำเสียโรงฆ่าสัตว์	6,272±193 ml/l	14.1 d ⁻¹	14.1 gCOD/l-d	0.92 m ² -d	Gasca และ López, 2010
ถังกรองไร้อากาศชนิดไหลขึ้น	น้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำตาลทราย	991±82.8 mg/l	18.8 d ⁻¹	18.8 gCOD/l-d	2.06 m ² -d	งานวิจัยนี้



รูปที่ 4-6 ค่าจลนพลศาสตร์ของถังกรองไร้อากาศ

4.2 การทดลองช่วงที่ 2 ศึกษาผลของระดับความลึกชั้นทรายต่อประสิทธิภาพการบำบัดของระบบถังกรองทรายชีวภาพและระบบบำบัดโดยรวม

จากค่าจลนพลศาสตร์ของถังกรองไร้อากาศในการทดลองช่วงที่ 1 ที่ได้ระยะเวลาเก็บกักที่เหมาะสมเท่ากับ 0.5 วัน มีค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน จึงเป็นสาเหตุให้ในการทดลองนี้ต้องเดินระบบด้วยอัตราการไหล 96 ลิตรต่อวัน ตลอดทั้งการทดลอง โดยในการทดลองนี้เป็นการเดินระบบร่วมกันระหว่างถังกรองไร้อากาศและต่อดั้วถังกรองทรายชีวภาพ ซึ่งทำการทดลองโดยการเปลี่ยนค่าความลึกชั้นทรายที่ 80 , 60 , 40 , 20 และ 0 เซนติเมตร เพื่อศึกษาผลของความลึกชั้นทรายต่อประสิทธิภาพของถังกรองทรายชีวภาพและประสิทธิภาพของระบบโดยรวม ทั้งนี้จุดประสงค์หลักของถังกรองทรายชีวภาพที่รับน้ำเสียต่อจากถังกรองไร้อากาศเพื่อลดตะกอน สี และกลิ่น ซึ่งผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เป็นตัวชี้วัดของระบบมีดังนี้

4.2.1 ซีโอดี

จากการทดลองที่ 1 ที่เดินระบบด้วยอัตราการไหลสุดท้ายเท่ากับ 192 ลิตรต่อวัน เมื่อต้องกลับมาเดินระบบด้วยอัตราการไหล 96 ลิตรต่อวันอีกครั้ง ระบบจึงต้องใช้ระยะเวลาในการปรับตัวเพื่อให้เข้าสู่สภาวะคงที่อีกประมาณ 11 วัน โดยจากการเก็บน้ำตัวอย่างทั้งสิ้น 6 จุด ได้แก่ น้ำเสียเข้า (Inf) น้ำทิ้งจากถังกรองไร้อากาศ 4 ถัง (AF1-AF4) และน้ำทิ้งจากถังกรองทรายชีวภาพ (SF) มาวิเคราะห์ค่าซีโอดี ซึ่งในช่วงสภาวะคงที่ค่าซีโอดีมีค่าเท่ากับ 966.67 ± 56.9 352.38 ± 11.0 180.95 ± 11.0 152.38 ± 0.0 95.24 ± 38.1 และ 52.38 ± 18.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4-7 ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดลองในช่วงที่ 1 ที่ใช้อัตราการไหลเดียวกัน จากนั้นจึงสามารถเริ่มวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เป็นตัวชี้วัดของถังกรองทรายชีวภาพได้

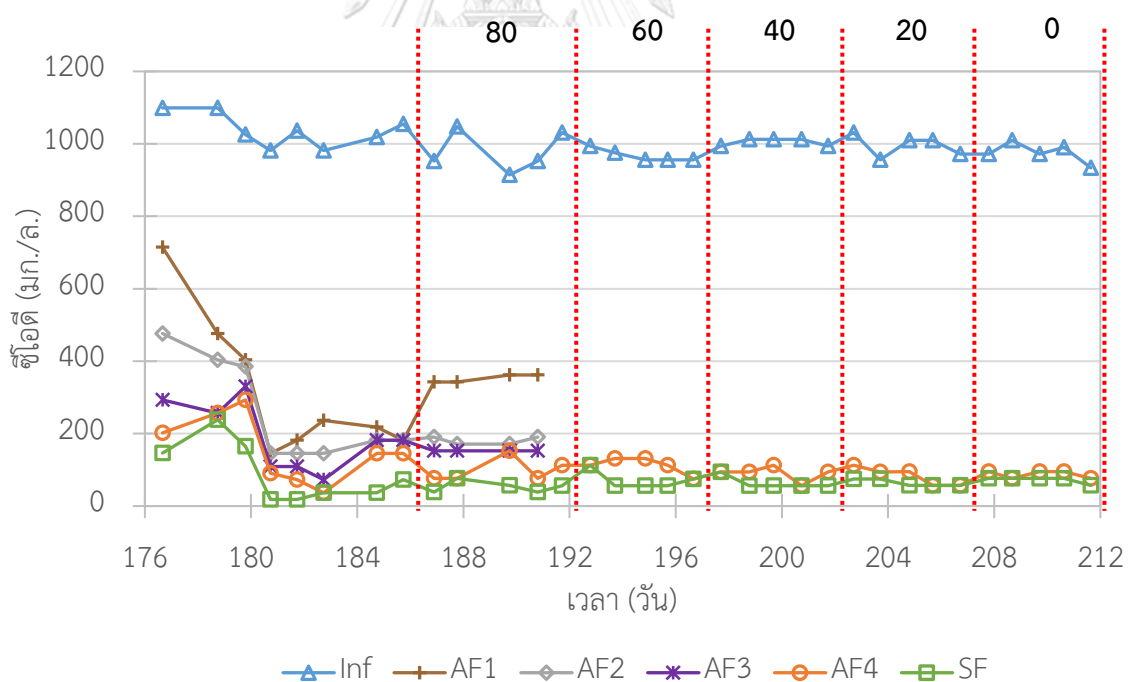
เมื่อประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีในถังกรองไร้อากาศคงที่และเริ่มทำการทดลองที่ถังกรองทรายชีวภาพ จะทำการเก็บน้ำตัวอย่างเพียง 3 จุด ได้แก่ น้ำเสียเข้า (Inf) น้ำทิ้งจากถังกรองไร้อากาศถังสุดท้าย (AF4) และน้ำทิ้งจากถังกรองทรายชีวภาพ (SF) โดยที่ความลึกชั้นทราย 80 , 60 , 40 , 20 และ 0 เซนติเมตร มีค่าซีโอดีที่วิเคราะห์ได้อยู่ที่ร้อยละ 92-94 ดังแสดงในตารางที่ 4-1 โดยถังกรองทรายชีวภาพช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีคิดเป็นร้อยละ 1-5 ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีความใกล้เคียงกับงานวิจัยของ de Oliveira Cruz และคณะ (2019) ซึ่งศึกษาการบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยระบบถังกรอง-ถังกรองไร้อากาศและถังกรองทรายชีวภาพที่มีความลึกชั้นทราย 40 เซนติเมตร โดยปริมาณซีโอดีที่ตรวจพบในน้ำทิ้งจากถังกรองไร้อากาศและถังกรองทรายชีวภาพมีค่าเท่ากับ 194 ± 37 และ 88 ± 36 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ หรือในงานวิจัยของ Tonon และคณะ (2015) ที่ศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียในพื้นที่ชนบทด้วยระบบถังกรองไร้อากาศและถังกรองทรายชีวภาพโดยใช้ความลึกชั้นทราย 75 เซนติเมตร พบว่าสามารถบำบัดซีโอดีได้ถึงร้อยละ 82-89 หรือเมื่อเปรียบเทียบกับระบบบำบัดที่ใช้ถังปฏิกรณ์ชนิดยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge

Blanket) ร่วมกับถังกรองทรายชีวภาพที่มีความลึกชั้นทราย 10 เซนติเมตร พบว่ามีค่าประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีอยู่ที่ร้อยละ 82 ซึ่งถือว่ามีความใกล้เคียงกับผลการทดลอง

ตารางที่ 4-2 ปริมาณซีโอดีที่ความลึกชั้นทราย 80 , 60 , 40 , 20 และ 0 เซนติเมตร

ความลึกชั้น ทราย (ซม.)	ค่าซีโอดี (มก./ล.)				
	Inf	AF4	%removal of AF4	SF	%removal of SF
80	979.58±57.1	98.69±33.9	89.93	53.15±15.9	94.57
60	967.5±16.8	112.5±23.0	88.52	71.25±24.4	92.73
40	1005.0±10.3	90.0±20.5	90.81	63.75±16.8	93.49
20	995.6±30.8	91.51±24.9	91.51	64.29±9.8	93.44
0	975.24±28.3	87.62±10.4	91.06	72.38±8.5	92.61

*ประสิทธิภาพคำนวณจากถังเตรียมน้ำขาเข้าจนถึงถังกรองไร้อากาศและถังกรองทรายชีวภาพ



รูปที่ 4-7 ปริมาณซีโอดีที่ความลึกชั้นทราย 80 , 60 , 40 , 20 และ 0 เซนติเมตร

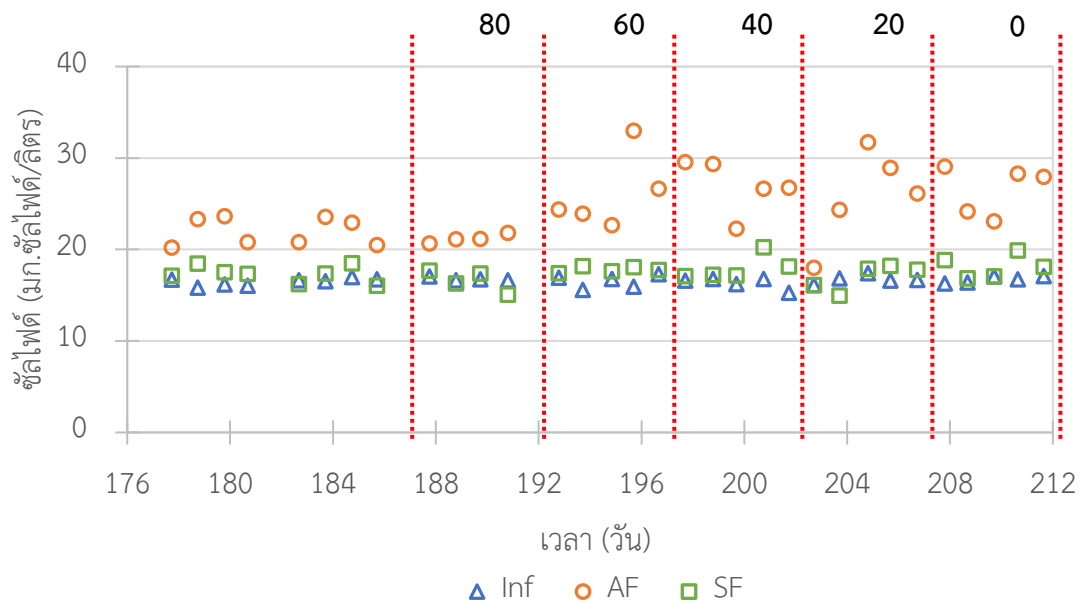
4.2.2 ซัลไฟด์

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองถูกเตรียมขึ้นโดยมีปริมาณซัลเฟตประมาณ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งในสภาวะไร้อากาศจะเกิดปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชัน แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจะใช้อินทรียเป็นแหล่งอาหารและพลังงาน สารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์จะเป็นตัวให้อิเล็กตรอนและซัลเฟตที่มีอยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์จะเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ผลของปฏิกิริยาที่ได้คือซัลไฟด์ ทั้งนี้ซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับพีเอชในระบบ โดยในการทดลองนี้มีจุดประสงค์ให้ปริมาณซัลไฟด์ที่ตรวจวัดได้เป็นตัวแทนของระดับกลิ่นเหม็นที่เกิดขึ้นในน้ำทิ้งจากถังกรองไร้อากาศและน้ำทิ้งจากถังกรองทรายชีวภาพ

ในการทดลองเก็บน้ำตัวอย่าง 3 จุด ได้แก่ น้ำเสียขาเข้า (Inf) น้ำทิ้งจากถังกรองไร้อากาศถังสุดท้าย (AF) และน้ำทิ้งจากถังกรองทรายชีวภาพ (SF) เพื่อนำมาวิเคราะห์หาปริมาณซัลไฟด์ในระบบ โดยปริมาณซัลไฟด์ที่ตรวจพบในถังกรองไร้อากาศมีค่าประมาณ 21-27 มิลลิกรัมซัลไฟด์ต่อลิตร และปริมาณซัลไฟด์ในน้ำทิ้งจากถังกรองทรายชีวภาพที่ระดับความลึกชั้นทรายต่างๆมีค่าอยู่ที่ 16-18 มิลลิกรัมซัลไฟด์ต่อลิตร ดังแสดงในตารางที่ 4-2 และรูปที่ 4-2 ซึ่งผลการทดลองนี้มีแนวโน้มใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Liu และคณะ (2013) ที่ศึกษาผลของพีเอชและค่าออกซิเจนละลายต่อการเปลี่ยนรูปจากซัลไฟด์เป็นซัลเฟอร์ พบว่าที่พีเอช 7.8-8.2 ซัลเฟอร์แบคทีเรียสามารถทำงานได้ดีที่สุดสามารถกำจัดซัลไฟด์ให้ลดลงจาก 60.25 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 6.67 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยที่ค่าออกซิเจนละลายมีค่าเท่ากับ 0.55-2.55 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งในการทดลองนี้ภายในถังกรองทรายชีวภาพมีพีเอชและค่าออกซิเจนละลายอยู่ที่ 7.4-8.0 และ 1-3 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งจะกล่าวถึงในลำดับถัดไป

ตารางที่ 4-3 ปริมาณซัลไฟด์ที่ความลึกชั้นทราย 80 , 60 , 40 , 20 และ 0 เซนติเมตร

ความลึกชั้นทราย (ซม.)	ค่าซัลไฟด์ (มก.ซัลไฟด์/ล.)		
	Inf	AF	SF
80	16.77±0.20	21.20±0.48	16.62±1.19
60	16.52±0.71	26.13±4.09	17.83±0.32
40	16.35±0.63	26.93±2.94	17.98±1.34
20	16.73±0.47	25.83±5.20	17.01±1.40
0	16.73±0.36	26.52±2.69	18.17±1.27



รูปที่ 4-8 ปริมาณคลอโรไฟต์ที่ความลึกชั้นทราย 80 , 60 , 40 , 20 และ 0 เซนติเมตร

4.2.3 สี่

ภายใต้สภาวะไร้อากาศคลอโรเฟอร์จะถูกเปลี่ยนเป็นคลอโรไฟต์หรือไฮโดรเจนคลอโรไฟต์ ซึ่งคลอโรไฟต์ไอออนเป็นไอออนที่สามารถเกิดเป็นสารประกอบกับโลหะในน้ำได้โดยตรงและค่อนข้างง่าย เช่น การเกิดปฏิกิริยาระหว่างเหล็กและคลอโรไฟต์ได้เป็นเฟอร์ริกคลอโรไฟต์ในน้ำเสีย (Fe_2S_3) ที่สามารถพบได้บ่อย เนื่องจากในน้ำเสียมักมีปริมาณเหล็กค่อนข้างสูงจึงเกิดเป็นเฟอร์ริกคลอโรไฟต์ในปริมาณสูงด้วย และด้วยลักษณะของเฟอร์ริกคลอโรไฟต์เป็นตะกอนสีดำ ดังนั้นเมื่อมีเฟอร์ริกคลอโรไฟต์ในน้ำจมนมากเกินพอจะทำให้ น้ำเสียมีสีดำขึ้นมา

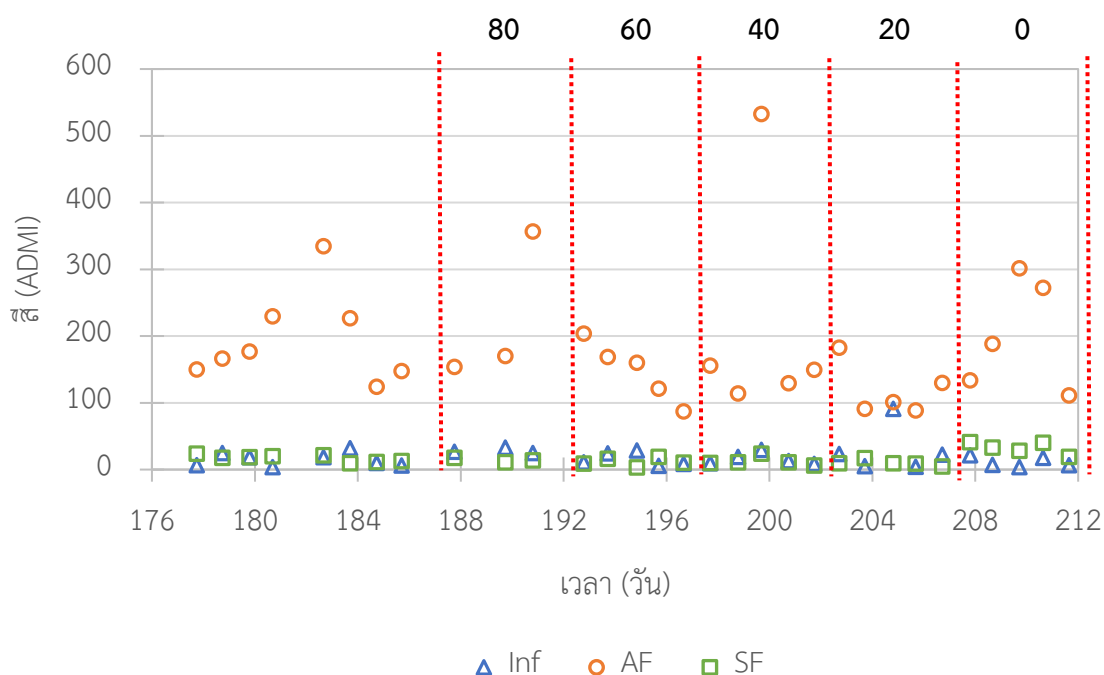
ในการทดลองเก็บน้ำตัวอย่าง 3 จุด ได้แก่ น้ำเสียขาเข้า (Inf) น้ำทิ้งจากถังกรองไร้อากาศถังสุดท้าย (AF) และน้ำทิ้งจากถังกรองทรายชีวภาพ (SF) นำมาวัดค่าสีของน้ำทิ้งในหน่วย ADMI ซึ่งในการวัดค่าสีในน้ำตัวอย่างนั้นจะต้องกระทำทันทีหลังจากเก็บน้ำตัวอย่าง แต่ถ้าไม่สามารถกระทำได้ทันทีให้เก็บไว้ที่อุณหภูมิไม่เกิน 4 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปการวัดค่าสีจะเป็นการวัดค่าสีจริงคือสีที่ได้หลังจากการกำจัดเอาสารแขวนลอยออกแล้วด้วยการกรองผ่านกระดาษกรอง และทำการวิเคราะห์ค่าสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร

ผลการทดลองพบว่าค่าสีของน้ำทิ้งจากถังกรองไร้อากาศมีค่าสูงสุดเท่ากับ 533 ADMI ซึ่งเกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ 300 ADMI โดยถังกรองทรายชีวภาพที่มีความลึกชั้นทราย 80 60 40 และ 20 เซนติเมตร มีค่าสีอยู่ระหว่าง 10-14 ADMI คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดได้ร้อยละ 90 ขึ้น

ไป ในขณะที่ถังกรองทรายชีวภาพที่นำทรายออกจนหมดมีค่าสีมากขึ้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ 33 ADMI คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดได้ร้อยละ 84 ดังแสดงในตารางที่ 4-3 และรูปที่ 4-9 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ายิ่งความลึกชั้นทรายลดลงยิ่งทำให้ค่าสีในน้ำสูงขึ้น เมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Ramadan (2015) ที่ศึกษาการบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยระบบการกรองร่วมระหว่างทรายและวัสดุกรองที่มีชั้นความลึก 20 เซนติเมตร พบว่าน้ำทิ้งที่ออกมาจากถังกรองมีลักษณะใสไร้สีคล้ายคลึงกับผลการทดลองที่ได้ หรือหากนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการกำจัดสีด้วยระบบอื่น เช่น ระบบแอกติเวตเตดสลัดจ์ในงานวิจัยของ Pala และ Tokat (2002) ที่มีค่าประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงสุดใกล้เคียงกับผลการทดลอง โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 86

ตารางที่ 4-4 ค่าสีที่ความลึกชั้นทราย 80 , 60 , 40 , 20 และ 0 เซนติเมตร

ความลึกชั้นทราย (ซม.)	ค่าสี (ADMI)		
	Inf	AF	SF
80	28.33±4.2	227.17±112.7	14.33±3.5
60	15.80±10.3	148.50±45.0	11.80±6.3
40	16.10±8.9	216.40±177.8	12.50±6.7
20	29.4±35.6	118.90±39.4	10.10±4.5
0	11.60±7.7	201.60±83.5	32.60±9.1



รูปที่ 4-9 ค่าสีที่ความลึกชั้นทราย 80 , 60 , 40 , 20 และ 0 เซนติเมตร

4.2.4 แอมโมเนีย ไนเตรท และไนไตรท์

ในการทดลองใช้สารแอมโมเนียมคลอไรด์เป็นแหล่งไนโตรเจนเพื่อการสร้างเซลล์ โดยเตรียมลงไปใต้น้ำเสียสังเคราะห์ให้ได้อัตราส่วน C:N = 10:1 ตามสูตรทางเคมีของน้ำเสียชุมชน $C_{10}H_{19}O_3N$ (David Hendricks, 2010) และจากการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องพบว่าหากสารอินทรีย์ ถูกบำบัดจนหมดและมีค่าออกซิเจนละลายที่เพียงพอ ภายในถังกรองทรายชีวภาพที่มีความลึกชั้น ทราย 60 เซนติเมตร สามารถเกิดปฏิกิริยานิตริฟิเคชัน (Nitrification) ขึ้นได้ (พิมพ์สิทธิ์ หงขยางกูร, 2561) และเนื่องจากปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในสภาวะที่มีออกซิเจน ดังนั้นจึงสามารถ บอกได้ว่าน้ำทิ้งซึ่งผ่านการบำบัดจากถังกรองทรายชีวภาพนั้นจะไม่มีกลิ่นเหม็น เพราะโดยทั่วไปกลิ่น เหม็นซึ่งเกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนมักเป็นกลิ่นเหม็นจากก๊าซไข่เน่า (H_2S) เป็นหลัก ซึ่งเมื่อก๊าซดังกล่าวเจอกับออกซิเจนภายในถังกรองทรายชีวภาพจะถูกออกซิไดส์กลายเป็น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับน้ำ

จากผลการทดลอง พบว่าที่ความลึกชั้นทราย 80 60 และ 40 เซนติเมตร ค่า แอมโมเนียในถังกรองทรายชีวภาพที่ตรวจวัดได้มีค่า 0.91 ± 0.49 0.54 ± 0.67 และ 1.66 ± 1.15 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ตามลำดับ และค่าแอมโมเนียที่ความลึกชั้นทราย 20 และ 0 เซนติเมตร มี

ค่าค่อนข้างกว้างโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ค่าความลึกชั้นทราย 0 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4-10 เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นซีโอติในช่วงเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 4-7 พบว่าที่ความลึกชั้นทราย 80 60 และ 40 เซนติเมตร มีแนวโน้มในการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันมากกว่าความลึกชั้นทราย 20 และ 0 เซนติเมตร ประกอบกับมีค่าออกซิเจนละลายอยู่ในช่วง 1-3 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4-12 และเมื่อดูผลของค่าความเข้มข้นไนเตรทและไนไตรท์ในช่วงเดียวกันพบว่ามีผลการทดลองที่สอดคล้องกับค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าที่ความลึกชั้นทราย 80 60 และ 40 เซนติเมตร สามารถเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (Nitrification) ขึ้นได้ ทั้งนี้ค่าความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนเตรท และไนไตรท์โดยละเอียดสามารถดูได้ในตารางที่ 4-4

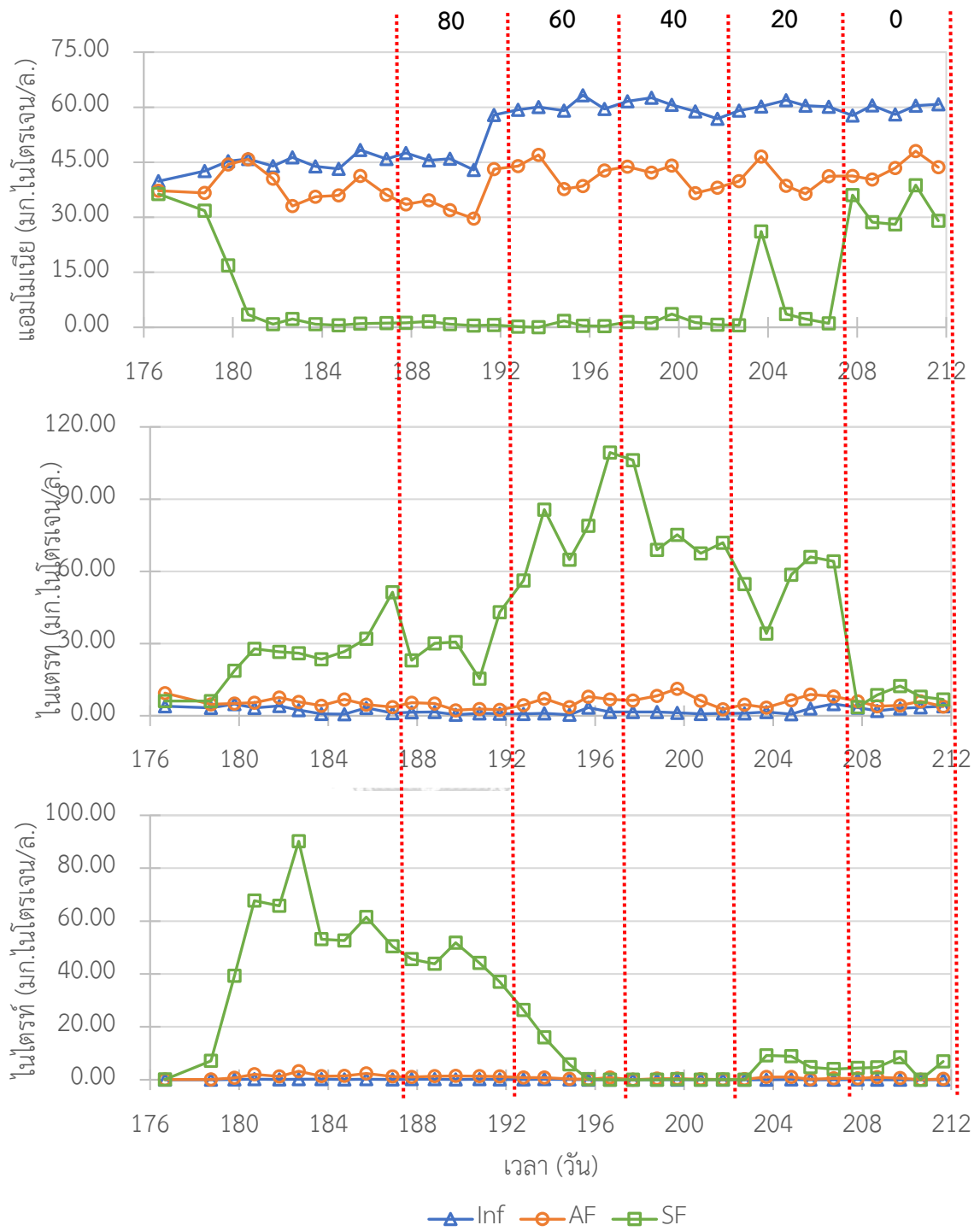


ตารางที่ 4-5 ปริมาณแอมโมเนีย ไนเตรท และไนไตรท์ ที่ความลึกชั้นทราย 80 , 60 , 40 , 20 และ 0 เซนติเมตร

แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)			
ความลึกชั้นทราย (ซม.)	Inf	AF	SF
80	48.06±6.71	34.84±5.89	0.91±0.49
60	60.24±1.73	41.98±3.88	0.54±0.67
40	60.11±2.31	40.93±3.45	1.66±1.15
20	60.36±0.99	40.50±3.80	6.74±10.9
0	59.50±1.48	43.32±2.98	32.13±4.92

ไนเตรท (มก.ไนโตรเจน/ล.)			
ความลึกชั้นทราย (ซม.)	Inf	AF	SF
80	1.08±0.46	3.62±1.53	28.46±10.21
60	1.41±1.16	5.97±1.89	79.00±20.51
40	1.24±0.36	6.95±3.14	77.94±16.07
20	2.22±1.76	6.29±2.33	55.52±12.77
0	3.17±0.71	4.83±1.11	7.87±3.15

ไนไตรท์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)			
ความลึกชั้นทราย (ซม.)	Inf	AF	SF
80	0.14±0.03	1.26±0.16	44.48±5.29
60	0.08±0.07	0.58±0.30	9.68±11.38
40	0.00±0.00	0.21±0.17	0.07±0.09
20	0.03±0.04	0.57±0.39	5.37±3.80
0	0.03±0.03	0.45±0.34	4.89±3.22



รูปที่ 4-10 ปริมาณแอมโมเนีย ไนเตรท และไนไตรท์ ที่ความลึกชั้นทราย 80 , 60 , 40 , 20 และ 0 เซนติเมตร

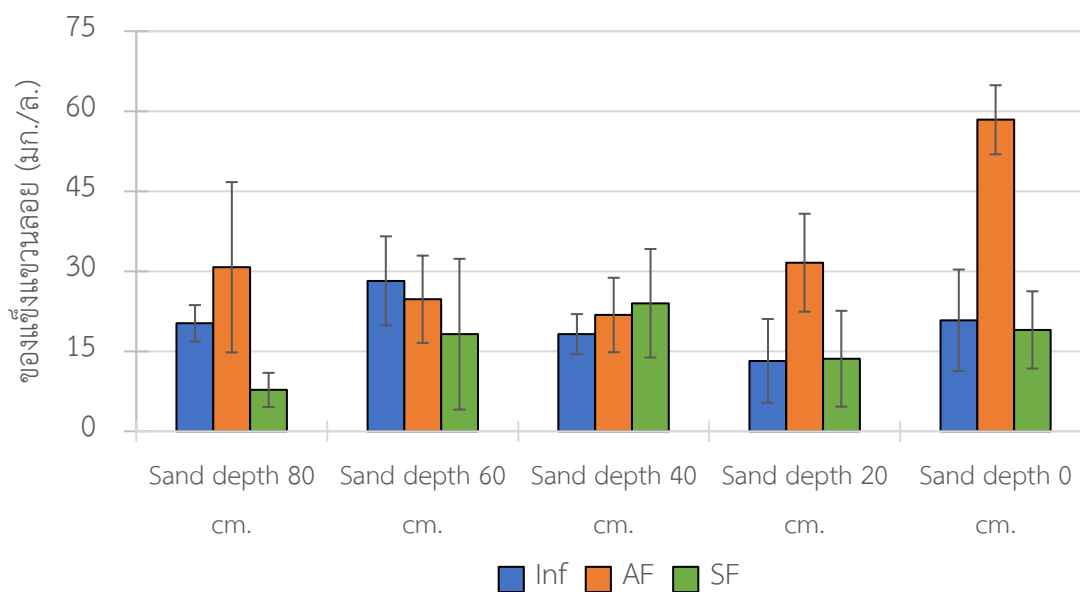
4.2.5 ของแข็งแขวนลอย

เนื่องจากระบบถังกรองไร้อากาศเป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่อาศัยการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์บนพื้นที่ผิวตัวกลางในการบำบัดน้ำเสีย ดังนั้นลักษณะของแข็งแขวนลอยที่หลุดออกมาจากระบบจึงมักเป็นแบบแผ่นฟิล์มชีวภาพ ค่าของแข็งแขวนลอยที่ตรวจวัดได้ในแต่ละครั้งจึงไม่คงที่และมีความแปรปรวนสูง โดยมีค่าดังแสดงในตารางที่ 4-5 และรูปที่ 4-11 ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ พิมพิสุทธิ หงชยางกูร (2561) ที่ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่ความเข้มข้น 200-1500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตรด้วยระบบบำบัดที่คล้ายคลึงกัน พบว่าที่ความเข้มข้นซีโอดี 1000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ถังกรองไร้อากาศมีค่าของแข็งแขวนลอยอยู่ที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมากกว่าผลการทดลองที่ได้ที่มีค่าสูงสุดเพียง 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งนี้ค่ามาตรฐานที่กำหนดโดยกรมควบคุมมลพิษได้กำหนดค่าของแข็งแขวนลอยไว้ที่ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นในการทดลองที่ถังกรองไร้อากาศมีค่าของแข็งแขวนลอยไม่เกิน 30 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงอาจไม่มีความจำเป็นต้องผ่านถังกรองทรายชีวภาพเพื่อลดตะกอน นอกจากนี้จากผลการทดลองพบว่าน้ำทิ้งจากถังกรองทรายชีวภาพมีค่าของแข็งแขวนลอยสูงสุดอยู่ที่ 24.00 ± 10.17 มิลลิกรัมต่อลิตร

ทั้งนี้จากผลการทดลองยังพบว่าที่ความลึกชั้นทราย 0 เซนติเมตร ยังคงสามารถกรองตะกอนจากน้ำทิ้งของถังกรองไร้อากาศได้ ซึ่งอาจเกิดจากลำดับขั้นของการทดลองที่เริ่มการทดลองที่ความลึกชั้นทราย 80 เซนติเมตรก่อน แล้วจึงตักทรายออกจนได้ความลึกที่ต้องการเมื่อเริ่มการทดลองต่อไป จึงทำให้มีทรายเข้าไปอุดตันอยู่ตามช่องว่างของกรวดที่บริเวณด้านล่างถัง และเมื่อทำการทดลองที่ความลึกชั้นทราย 0 เซนติเมตร ไม่สามารถนำทรายเหล่านั้นออกได้ จึงทำให้ตะกอนถูกกรองเอาไว้ได้

ตารางที่ 4-6 ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่ความลึกชั้นทราย 80 , 60 , 40 , 20 และ 0 เซนติเมตร

ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)			
ความลึกชั้นทราย (ซม.)	Inf	AF	SF
80	20.25±3.40	30.75±15.97	7.75±3.20
60	28.20±8.35	24.75±8.18	18.20±14.13
40	18.20±3.77	21.80±6.98	24.00±10.17
20	13.20±7.85	31.60±0.18	13.60±8.99
0	20.80±9.52	58.40±6.48	19.00±7.25



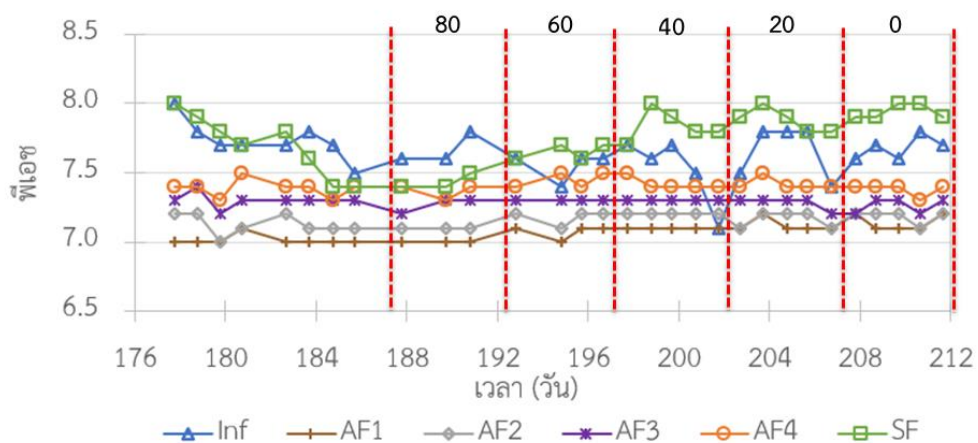
รูปที่ 4-11 ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่ความลึกชั้นทราย 80 , 60 , 40 , 20 และ 0 เซนติเมตร

4.2.6 พีเอช ไออาร์พี และออกซิเจนละลาย

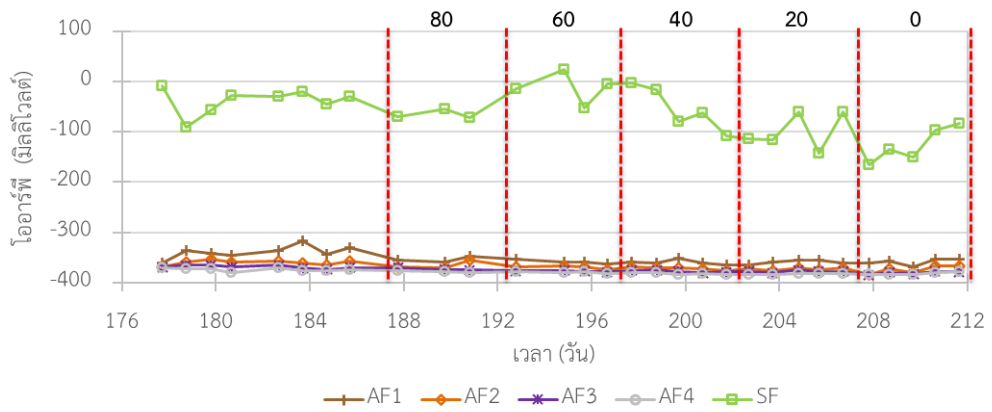
ในการทดลองมีการควบคุมค่าพีเอชของระบบถังกรองไร้อากาศให้อยู่ในช่วง 7-7.4 ด้วยการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตลงไปใต้น้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยอัตราส่วนระหว่างน้ำตาลต่อโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ 1:3.5 (พิมพ์สิทธิ์ หงชยางกูร, 2561) โดยค่าพีเอชในระบบจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเก็บกักของถังกรองไร้อากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4-12 ซึ่งค่าพีเอชเปรียบเสมือนพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมระบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากค่าพีเอชส่งผลต่อการดำเนินกิจกรรมของแบคทีเรียทุกชนิดที่มีในระบบ

ในส่วนของค่าไออาร์พี (ORP) ในถังกรองไร้อากาศ และค่าออกซิเจนละลายในถังกรองทรายชีวภาพ เป็นค่าที่วัดเพื่อตรวจสอบว่าภายในถังหรือภายในระบบบำบัดเกิดปฏิกิริยาประเภทใด เช่น จากรูปที่ 4-13 จะเห็นว่าค่าไออาร์พีในถังกรองไร้อากาศทั้ง 4 ถัง มีค่าอยู่ในช่วง -300 ถึง -400 มิลลิโวลต์ นั้นหมายถึงว่าในระบบเกิดปฏิกิริยาแบบไร้อากาศประเภทซัลเฟตรีดักชันและเมทาโนเจเนนิซิส (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2546) แต่เมื่อพิจารณาที่ค่าไออาร์พีในถังกรองทรายชีวภาพ พบว่ามีค่าไม่สอดคล้องกับค่าออกซิเจนละลายซึ่งค่าที่ควรได้ต้องมีค่าเป็นบวก โดยในกรณีนี้อาจเกิดจากความผิดพลาดของเครื่องวัดซึ่งไม่ได้ทำการสอบเทียบค่าในช่วงค่าบวกไว้ จึงเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น

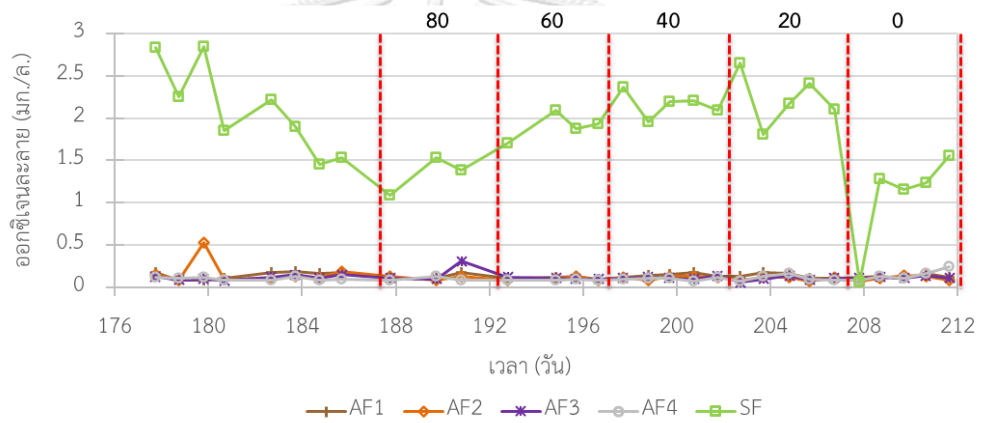
ทั้งนี้ค่าออกซิเจนละลายในถังกรองทรายชีวภาพมีค่าอยู่ในช่วง 1-3 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงถึงการบำบัดในสภาวะแบบใช้อากาศ และค่าออกซิเจนละลายในถังกรองไร้อากาศอยู่ในช่วง 0-0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4-14



รูปที่ 4-12 ค่าพีเอชในการทดลองช่วงที่ 2



รูปที่ 4-13 ค่าไออาร์พีในการทดลองครั้งที่ 2



รูปที่ 4-14 ค่าออกซิเจนละลายในการทดลองครั้งที่ 2

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของภาระบรรทุksารอินทรีย์และระยะเวลาเก็บกักต่อประสิทธิภาพของระบบถังกรองไร้อากาศ และศึกษาผลของความลึกชั้นทรายต่อประสิทธิภาพของถังกรองทรายชีวภาพ ซึ่งมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อลดตะกอน กลิ่น และสีในน้ำทิ้งจากถังกรองไร้อากาศ โดยสามารถสรุปผลการทดลองทั้งหมดได้ดังนี้

5.1.1 การทดลองช่วงที่ 1 ศึกษาผลของค่าภาระบรรทุksารอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของระบบถังกรองไร้อากาศ

- ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีของระบบถังกรองไร้อากาศที่ภาระบรรทุksารอินทรีย์ 0.5 , 1 , 2 และ 4 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 84.76 , 93.06 , 91.90 และ 88.58 ตามลำดับ
- ปริมาณสารอินทรีย์ส่วนใหญ่จะถูกบำบัดมากที่สุดในถังกรองไร้อากาศถังแรกของทุกๆภาระบรรทุksารอินทรีย์ คิดเป็นร้อยละ 55-73 และลดลงจนเกือบหมดในถังต่อมา
- อัตราส่วนระหว่างไนโตรเจนและซีโอดีที่ถูกใช้ไปที่ภาระบรรทุksารอินทรีย์ 0.5 , 1 , 2 และ 4 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน คิดเป็น 2.07 , 2.36 , 0.77 และ 1.23 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อ 150 มิลลิกรัมซีโอดี ตามลำดับ
- ระบบมีค่าซีโอดีที่สามารถย่อยสลายได้เท่ากับ 861.0 ± 30.6 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าสัมประสิทธิ์ของปฏิกิริยาลำดับที่ 1 (k_1) อยู่ที่ 18.8 ± 2.40 วัน⁻¹ และมีค่าซีโอดีที่ไม่สามารถบำบัดได้เท่ากับ 128.2 ± 16.3 มิลลิกรัมต่อลิตร

5.1.2 ศึกษาผลของระดับความลึกชั้นทรายต่อประสิทธิภาพการบำบัดของระบบถังกรองทรายชีวภาพและระบบบำบัดโดยรวม

- ที่ความลึกชั้นทราย 80 , 60 , 40 , 20 และ 0 เซนติเมตร มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีอยู่ที่ร้อยละ 92-94 โดยถังกรองทรายชีวภาพช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีคิดเป็นร้อยละ 1-5

- ปริมาณซัลไฟด์ที่ตรวจพบในถังกรองไร้อากาศมีค่า 21-27 มิลลิกรัมซัลไฟด์ต่อลิตร และปริมาณซัลไฟด์ในน้ำทิ้งจากถังกรองทรายชีวภาพที่ระดับความลึกชั้นทรายต่างๆมีค่าอยู่ระหว่าง 16-18 มิลลิกรัมซัลไฟด์ต่อลิตร
- ถังกรองทรายชีวภาพที่มีความลึกชั้นทราย 80 , 60 , 40 และ 20 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพการบำบัดสิ่งร้อยละ 90 ในขณะที่ถังกรองทรายชีวภาพที่นำทรายออกจนหมดมีประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 84
- ที่ความลึกชั้นทราย 80 , 60 และ 40 เซนติเมตร ภายในถังกรองทรายชีวภาพสามารถเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (Nitrification) ได้
- น้ำทิ้งจากถังกรองทรายชีวภาพมีค่าของแข็งแขวนลอยสูงสุดอยู่ที่ 24.00 ± 10.17 มิลลิกรัมต่อลิตร

5.1.3 ข้อดีและข้อจำกัดของการนำไปใช้ต่อในอนาคต

- สามารถนำค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการทดลองไปใช้ประกอบการออกแบบระบบถังกรองไร้อากาศ เพื่อใช้กับงานระบบบำบัดน้ำเสียขนาดเล็กได้ โดยมีข้อที่ควรคำนึงถึงคือ ลักษณะของน้ำเสียที่นำมาใช้กับระบบ เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำตาลทราย ซึ่งง่ายต่อการย่อยสลายและเจริญเติบโตของจุลินทรีย์
- การควบคุมค่าพีเอชของระบบต้องสม่ำเสมอและคงที่เนื่องจากเป็นระบบบำบัดทางชีวภาพ มิฉะนั้นจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบไม่เสถียรและลดลงอย่างรวดเร็ว
- ระบบนี้ใช้ตัวกลางพลาสติกเป็นตัวกลางในถังกรองไร้อากาศ มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากและคงทน แต่มีราคาสูง
- การนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียจริงอาจมีผลการเดินระบบที่แตกต่าง ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นเพียงแนวทางในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียขนาดเล็กที่มีต้นทุนไม่สูงนัก แต่ยังคงให้ประสิทธิภาพการบำบัดได้ดี

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการทดลองนี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำตาลทรายในการเดินระบบ ซึ่งง่ายต่อการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ จึงทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง ควรลองใช้น้ำเสียสังเคราะห์ชนิดอื่น หรือน้ำเสียชุมชนจริงมาทดลองเดินระบบ

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

ก-1 การวิเคราะห์ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ด้วยวิธีทำให้แห้งที่ 103-105 °C

วิธีวิเคราะห์

1. นำกระดาษกรอง GF/C ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103-105 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถทำแห้ง
2. ชั่งน้ำหนักกระดาษกรอง GF/C สมมติมีน้ำหนัก A กรัม วางบนถ้วยหรือฟอยล์
3. นำกระดาษกรองมาวางไว้บนชุดกรวยกรองบุชเนอร์ เปิดเครื่องดูดสุญญากาศ ล้างกระดาษกรองด้วยน้ำกลั่น เปิดเครื่องดูดสุญญากาศต่อให้ดูดน้ำออกจนแห้ง ทิ้งน้ำล้างไป
4. เทน้ำตัวอย่างลงกระดาษกรองโดยค่อยๆ เทอย่างต่อเนื่องจนหมด ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างภาชนะที่ใช้ตวง เทลงกรองและฉีดน้ำกลั่นที่ด้านข้างของกรวยบุชเนอร์รวมทั้งบนกระดาษกรอง GF/C ปล่อยให้เครื่องดูดสุญญากาศดูดน้ำออกจนแห้ง ปิดเครื่อง
5. นำกระดาษกรองที่ผ่านการกรองแล้ว ไปอบที่อุณหภูมิ 103-105 °C อย่างน้อยเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบ ปล่อยให้เย็นในโถทำแห้ง ชั่งน้ำหนักกระดาษกรอง สมมติได้น้ำหนัก B กรัม

การคำนวณ

$$\text{ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)} = \frac{(B-A) \times 10^6}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง}}$$

โดย A = น้ำหนักกระดาษกรองอย่างเดียว (กรัม)
 B = น้ำหนักกระดาษกรองและของแข็ง (กรัม)

ก-2 การวิเคราะห์ซีไอดี ด้วยวิธีการรีฟลักซ์แบบปิด

วิธีวิเคราะห์

1. เลือกปริมาตรตัวอย่างน้ำเสียให้เหมาะสม จากการทดลองเลือกใช้ตัวอย่างน้ำเสีย 5 มิลลิลิตร

ต่อการเติมโปแทสเซียมไดโครเมต 3 มิลลิลิตร และกรดผสมซิลเวอร์ 7 มิลลิลิตร

2. ใส่ส่วนผสมดังกล่าว ลงในหลอดแก้วที่มีขนาดเหมาะสม ปิดฝาให้แน่น

3. นำไปอบที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบ 2 ชั่วโมงแล้ว นำออกจากตู้อบ ปล่อยให้เย็น

4. เติมเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด แล้วไตเตรทด้วยสารละลายมาตรฐานเอฟเอเอส สีของสารละลายจะค่อยๆ เปลี่ยนจาก เหลือง เป็น เขียว เป็น ฟ้า เป็น น้ำตาลแดง ซึ่งแสดงว่า ถึงจุดยุติ แล้วจดปริมาณเอฟเอเอสที่ใช้ไตเตรท

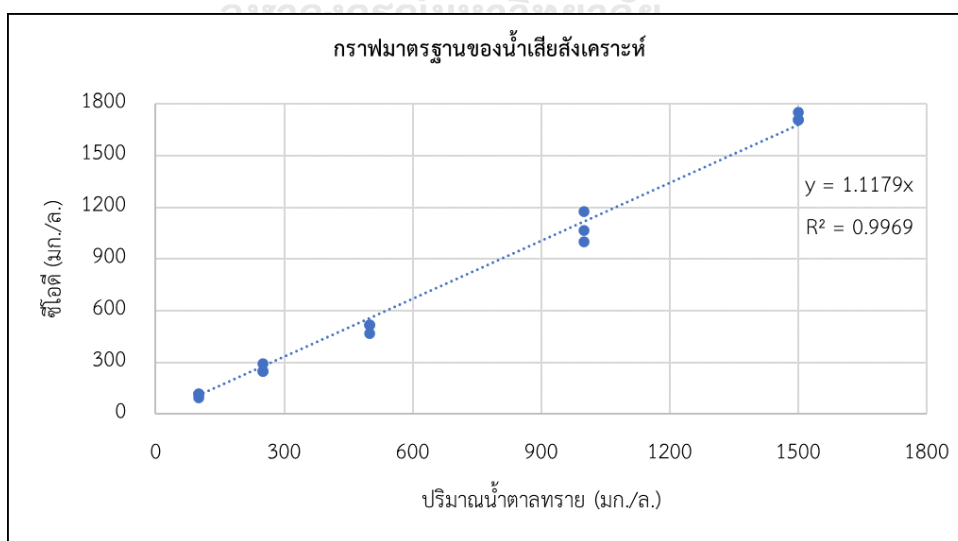
การคำนวณ

$$\text{ซีไอดี (มก./ล.)} = \frac{(A-B) \cdot N \cdot 8000}{\text{มล.ของตัวอย่างน้ำ}}$$

โดย A = มล.ของ FAS ที่ใช้ในการไตเตรทแบลงค์

B = มล.ของ FAS ที่ใช้ในการไตเตรทตัวอย่างน้ำ

N = ความเข้มข้นของ FAS, นอร์มัล

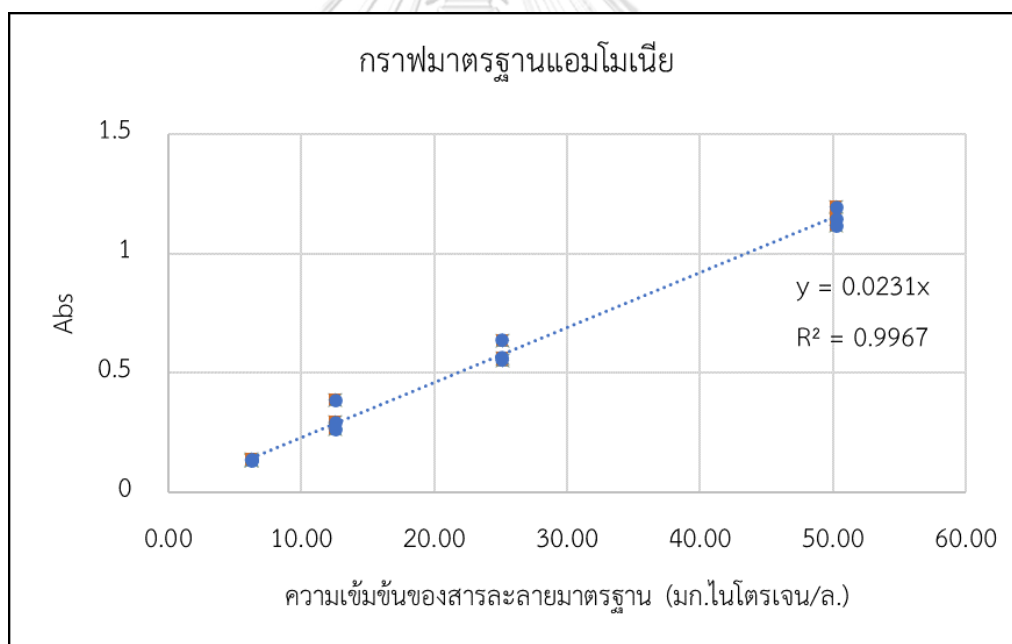


รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐานของน้ำเสียสังเคราะห์

ก-3 การวิเคราะห์แอมโมเนียไนโตรเจน โดยวิธีซาลิไซเลต

วิธีวิเคราะห์

1. กรองน้ำตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง GF/C ปิดเต้าน้ำตัวอย่างปริมาตรเจือจางด้วยอัตราส่วน 1:50 ให้ได้ปริมาตรตัวอย่างรวม 5 มิลลิลิตร
2. ใส่สารละลายซาลิไซเลตปริมาตร 0.6 มิลลิลิตร
3. ใส่สารละลายผสมอัลคาไลน์ซีเตรตกับไฮโปคลอไรต์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร แล้วทิ้งไว้ในที่มืด 1 ชั่วโมง
4. นำไปวัดด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ค่าดูดกลืนแสง 640 นาโนเมตร แล้วนำไปเทียบกับค่าจากกราฟมาตรฐานแอมโมเนีย
5. ทำกราฟมาตรฐานสารละลายแอมโมเนียตามขั้นตอนที่ 1-4 แต่เปลี่ยนจากน้ำตัวอย่างเป็นสารละลายมาตรฐานแอมโมเนีย โดยเตรียมจากแอมโมเนียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0 2.5 5 10 15 20 และ 25 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร



รูปที่ ก-2 กราฟมาตรฐานของการวิเคราะห์แอมโมเนีย

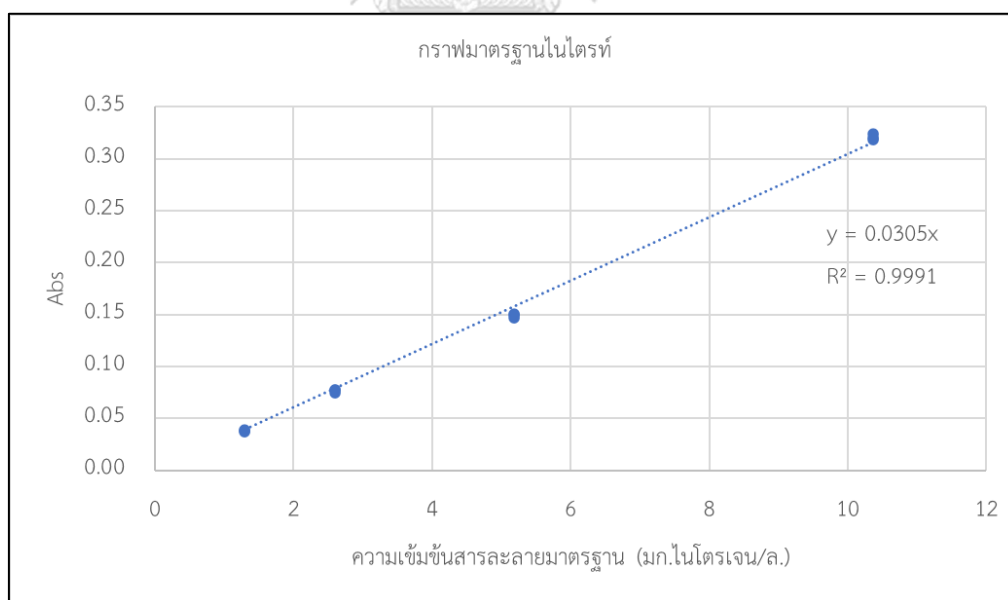
ก-4 การวิเคราะห์ไนโตรเจนในไตรเจน โดยวิธีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

วิธีเตรียมสารเคมี

1. นำยาทำให้เกิดสี เตรียมจาก 85% ของกรดฟอสฟอริก 10 มิลลิลิตร ซัลฟานิลาไมด์ 1 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 80 มิลลิลิตร แล้วเติมเอน -(1-แนพทิล) เอทิลลีนไดอะมีนไฮโดรคลอไรด์ 0.1 กรัม ผสมให้เข้ากัน ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 มิลลิลิตร

วิธีวิเคราะห์

1. กรองน้ำตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง GF/C ปิดเต้าน้ำตัวอย่างปริมาตรเจือจางด้วยอัตราส่วน 1:50 ให้ได้ปริมาตรตัวอย่างรวม 5 มิลลิลิตร
2. ใส่ยาทำให้เกิดสีปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ทิ้งไว้ 10 นาที แล้วนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 543 นาโนเมตร นำไปเทียบกับค่าจากกราฟมาตรฐานไนโตรเจน
3. ทำกราฟมาตรฐานไนโตรเจนตามขั้นตอนที่ 1-2 แต่เปลี่ยนจากน้ำตัวอย่างเป็นสารละลายมาตรฐานไนโตรเจน โดยเตรียมจากโซเดียมไนโตรเจน ความเข้มข้น 0.5 1.5 2.5 3.5 และ 4.5 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร

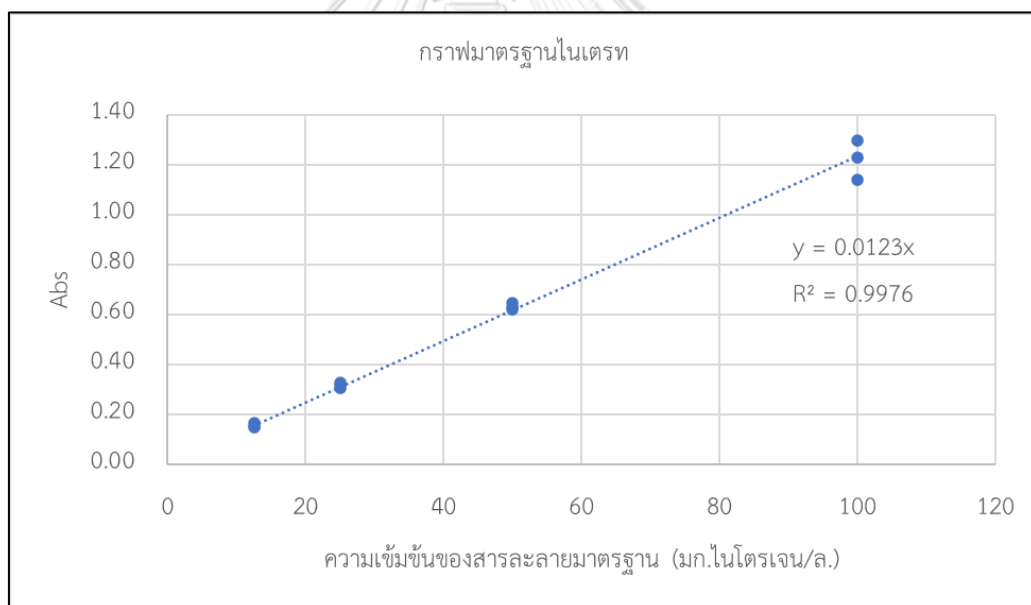


รูปที่ ก-3 กราฟมาตรฐานของการวิเคราะห์ไนโตรเจน

ก-5 การวิเคราะห์ไนเตรตไนโตรเจน โดยวิธีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

วิธีวิเคราะห์

1. กรองน้ำตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง GF/C บีบน้ำตัวอย่างปริมาตรเจือจางด้วยอัตราส่วน 1:10 ให้ได้ปริมาตรตัวอย่างรวม 5 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 N ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันทิ้งไว้ 10 นาที แล้วนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 220 และ 275 นาโนเมตร นำค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 275 ลบด้วยสองเท่าของค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร แล้วนำไปเทียบกับค่าจากกราฟมาตรฐานไนเตรต
3. ทำกราฟมาตรฐานไนเตรตตามขั้นตอนที่ 1-2 แต่เปลี่ยนจากน้ำตัวอย่างเป็นสารละลายมาตรฐานไนเตรต ที่เตรียมจากโพแทสเซียมไนเตรต ความเข้มข้น 0 0.2 1 2 4 10 และ 20 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร



รูปที่ ก-4 กราฟมาตรฐานของการวิเคราะห์ไนเตรต

ก-6 การวิเคราะห์ซัลไฟด์ โดยวิธีไอโอโดเมตริก

วิธีเตรียมสารเคมี

1. สารละลายไอโอดีน 0.025 N เตรียมจากโพแทสเซไอโอไดด์ (KI) 20-25 กรัม กับ ไอโอดีน 3.2 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 1000 มิลลิลิตร
2. สารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโอซัลเฟต 0.025 N เตรียมจากโซเดียมไฮโอซัลเฟต 6.205 กรัม กับ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.4 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 1000 มิลลิลิตร

วิธีวิเคราะห์

1. นำขวดปิโอดีเติมน้ำตัวอย่างและน้ำกลั่นให้ครบ 300 มิลลิลิตร ตกตะกอนด้วยการเติมสารละลายสังกะสีอะซีเตท 2 N 0.45 มิลลิลิตร กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 N 0.3 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที
2. กรองสารละลายที่มีตะกอนด้วยกระดาษกรอง GF/C
3. ใส่กระดาษกรองที่มีตะกอนลงในขวดชมพู เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร กรดไฮโดรคลอริก 6 N 2 มิลลิลิตร สารละลายไอโอดีน 10 มิลลิลิตร
4. ไตเตรทด้วยสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต โดยใช้น้ำแบ่งเป็นอินดิเคเตอร์

การคำนวณ

$$\text{ซัลไฟด์ (มก./ล.)} = \frac{[(A-B)-(C-D)] \cdot 16000}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง}}$$

โดย	A	=	ปริมาณสารละลายไอโอดีนที่ใช้ (ml)
	B	=	ความเข้มข้นสารละลายไอโอดีนที่ใช้ (N)
	C	=	ปริมาณสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟตที่ใช้ (ml)
	D	=	ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟตที่ใช้ (N)

ภาคผนวก ข ข้อมูลผลการทดลอง

ตารางที่ ข-1 ผลซีไอดีของการทดลองที่ 1 และ 2 (มิลลิกรัมซีไอดีต่อลิตร)

วันที่	น้ำเสียขาเข้า	ถัง AF1	ถัง AF2	ถัง AF3	ถัง AF4	ถัง SF
การทดลองที่ 1 ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.5 กิโลกรัมซีไอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน						
0	1000.00	888.89	1111.11	688.89	911.11	
2	956.10	702.44	741.46	760.98	800.00	
4	995.12	682.93	682.93	760.98	721.95	
6	975.61	760.98	721.95	702.44	663.41	
8	1009.52	761.90	723.81	723.81	723.81	
10	1047.62	761.90	704.76	666.67	647.62	
12	1009.52	857.14	723.81	685.71	647.62	
14	948.84	669.77	576.74	483.72	502.33	
16	948.84	706.98	558.14	502.33	427.91	
18	925.98	434.65	321.26	302.36	321.26	
20	925.98	396.85	321.26	302.36	302.36	
22	963.78	510.24	359.06	359.06	321.26	
24	831.50	359.06	283.46	245.67	188.98	
26	812.60	340.16	245.67	170.08	188.98	
28	831.50	321.26	245.67	226.77	226.77	
30	956.25	412.50	262.50	225.00	187.50	
34	806.25	243.75	187.50	206.25	112.50	
36	768.75	225.00	131.25	37.50	37.50	
38	990.48	457.14	323.81	171.43	95.24	
40	990.48	400.00	323.81	247.62	114.29	
42	1045.16	445.161	329.032	290.323	212.903	
44	1064.52	464.516	174.194	270.968	212.903	
46	1219.35	445.161	329.032	290.323	329.032	
48	1103.23	445.161	367.742	329.032	309.677	
52	1081.97	413.115	255.738	216.393	177.049	

วันที่	น้ำเสียเข้า	ถัง AF1	ถัง AF2	ถัง AF3	ถัง AF4	ถัง SF
54	1121.31	432.787	216.393	216.393	177.049	
58	1114.96	472.441	283.465	245.669	151.181	
การทดลองที่ 1 ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน						
66	1025.81	309.68	154.84	154.84	116.13	
68	1006.45	290.32	193.55	193.55	154.84	
70	967.74	367.74	232.26	154.84	116.13	
72	1003.28	334.43	255.74	59.02	39.34	
74	963.93	255.74	157.38	59.02	39.34	
76	1037.29	386.44	284.75	162.71	101.69	
78	976.27	528.81	203.39	162.71	81.36	
80	920.00	440.00	240.00	120.00	80.00	
82	1000.00	420.00	180.00	120.00	40.00	
84	960	440	260	180	80	
86	924.59	236.07	78.69	39.34	19.67	
88	995.12	234.15	156.10	136.59	97.56	
การทดลองที่ 1 ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน						
94	925.98	340.16	207.87	170.08	113.39	
96	944.88	529.13	302.36	283.46	245.67	
99	1020.47	377.95	170.08	151.18	132.28	
101	1077.17	585.83	321.26	245.67	151.18	
103	982.68	321.26	302.36	207.87	188.98	
105	1001.57	302.36	264.57	188.98	188.98	
108	1131.71	370.73	234.15	156.10	136.59	
110	1073.17	351.22	195.12	175.61	136.59	
112	1073.17	367.61	175.61	117.07	117.07	
114	979.20	384.00	192.00	192.00	76.80	
116	1017.60	384.00	249.60	172.80	96.00	
118	995.12	390.24	195.12	156.10	58.54	
120	1014.63	312.20	116.13	78.05	58.06	

วันที่	น้ำเสียขาเข้า	ถัง AF1	ถัง AF2	ถัง AF3	ถัง AF4	ถัง SF
122	1034.15	429.27	195.12	117.07	78.05	
124	1045.16	406.45	154.84	135.48	96.77	
การทดลองที่ 1 ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน						
132	953.54	302.36	226.77	113.39	56.69	
134	939.76	188.98	75.59	75.59	56.69	
136	917.32	302.36	151.18	113.39	75.59	
138	986.22	283.46	188.98	75.59	56.69	
140	976.59	361.90	171.43	114.29	95.24	
142	975.00	153.60	133.33	133.33	95.24	
144	988.89	285.71	133.33	114.29	114.29	
146	962.20	377.95	207.87	132.28	113.39	
148	982.68	326.40	245.67	151.18	113.39	
151	977.56	403.20	170.08	132.28	113.39	
153	1035.20	345.60	211.20	153.60	57.60	
155	1063.20	384.00	192.00	192.00	96.00	
157	1022.80	268.80	211.20	134.40	134.40	
159	1035.32	304.76	190.48	152.38	114.29	
161	952.38	247.62	190.48	95.24	95.24	
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 80 เซนติเมตร						
177	1099.24	714.50	476.34	293.13	201.53	146.56
179	1099.24	476.34	403.05	256.49	256.49	238.17
180	1025.95	403.05	384.73	329.77	293.13	164.89
181	981.82	145.45	145.45	109.09	90.91	18.18
182	1036.36	181.82	145.45	109.09	72.73	18.18
183	981.82	236.36	145.45	72.73	36.36	36.36
185	1018.18	218.18	181.82	181.82	145.45	36.36
186	1054.55	181.82	181.82	181.82	145.45	72.73
187	952.38	342.86	190.48	152.38	76.19	38.10
188	1047.62	342.86	171.43	152.38	76.19	76.19

วันที่	น้ำเสียเข้า	ถัง AF1	ถัง AF2	ถัง AF3	ถัง AF4	ถัง SF
190	914.29	361.90	171.43	152.38	152.38	57.14
191	952.38	361.90	190.48	152.38	76.19	38.10
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 60 เซนติเมตร						
193	993.75				112.50	112.50
194	975.00				131.25	56.25
195	956.25				131.25	56.25
196	956.25				112.50	56.25
197	956.25				75.00	75.00
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 40 เซนติเมตร						
198	993.75				93.75	93.75
199	1012.50				93.75	56.25
200	1012.50				112.50	56.25
201	1012.50				56.25	56.25
202	993.75				93.75	56.25
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 20 เซนติเมตร						
203	1031.25				112.50	75.00
204	956.25				93.75	75.00
205	1009.52				95.24	57.14
206	1009.52				57.14	57.14
207	971.43				57.14	57.14
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 0 เซนติเมตร						
208	971.43				95.24	76.19
209	1009.52				76.19	76.19
210	971.43				95.24	76.19
211	990.48				95.24	76.19
212	933.33				76.19	57.14

ตารางที่ ข-2 ผลแอมโมเนียของการทดลองที่ 1 และ 2 (มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร)

วันที่	น้ำเสียเข้า	ถัง AF1	ถัง AF2	ถัง AF3	ถัง AF4	ถัง SF
การทดลองที่ 1 ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.5 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน						
36	43.38				34.05	
38	45.11				36.58	
40	45.13				35.67	
42	48.64				44.42	
44	48.71				39.71	
46	48.69				44.17	
48	47.16				34.27	
50	45.75				31.36	
52	46.36				34.95	
54	49.95				36.94	
การทดลองที่ 1 ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน						
82	41.99				28.93	
84	44.85				28.82	
86	45.52				32.79	
88	45.46				28.36	
90	45.59				33.32	
การทดลองที่ 1 ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน						
94	46.03				30.55	94
96	44.00				34.41	
99	45.26				31.46	
101	43.95				37.42	
103	46.70				35.50	
105	44.39				34.65	
108	46.20				29.65	
110	45.11				33.36	
112	47.62				39.87	
114	43.58				38.41	

วันที่	น้ำเสียเข้า	ถัง AF1	ถัง AF2	ถัง AF3	ถัง AF4	ถัง SF
116	47.01				39.96	
118	46.33				41.20	
120	46.29				42.42	
122	48.08				42.64	
124	46.35				41.46	
การทดลองที่ 1 ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน						
138	42.65				36.70	
140	46.58				38.28	
142	45.15				39.23	
144	45.75				37.30	
146	44.85				34.21	
148	45.35				40.49	
151	45.87				37.98	
153	44.98				36.98	
155	44.44				34.40	
157	45.26				37.68	
159	43.13				36.83	
161	45.24				37.19	
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 80 เซนติเมตร						
177	39.83				37.26	36.35
179	42.59				36.63	31.80
180	45.30				44.41	16.87
181	45.87				45.78	3.46
182	43.93				40.48	0.83
183	46.33				33.04	2.28
184	43.87				35.63	0.83
185	43.17				35.96	0.57
186	48.30				41.24	0.98
187	45.89				36.15	1.17

วันที่	น้ำเสียเข้า	ถัง AF1	ถัง AF2	ถัง AF3	ถัง AF4	ถัง SF
188	47.50				33.48	1.26
189	45.48				34.63	1.61
190	45.96				31.98	0.87
191	42.89				29.63	0.52
192	57.91				43.13	0.63
177	39.83				37.26	36.35
179	42.59				36.63	31.80
180	45.30				44.41	16.87
181	45.87				45.78	3.46
182	43.93				40.48	0.83
183	46.33				33.04	2.28
184	43.87				35.63	0.83
185	43.17				35.96	0.57
186	48.30				41.24	0.98
187	45.89				36.15	1.17
188	47.50				33.48	1.26
189	45.48				34.63	1.61
190	45.96				31.98	0.87
191	42.89				29.63	0.52
192	57.91				43.13	0.63
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 60 เซนติเมตร						
193	59.26				43.91	0.22
194	60.02				47.00	0.02
195	59.11				37.67	1.72
196	63.28				38.52	0.43
197	59.54				42.78	0.33
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 40 เซนติเมตร						
198	61.61				43.83	1.46
199	62.61				42.17	1.15

วันที่	น้ำเสียเข้า	ถัง AF1	ถัง AF2	ถัง AF3	ถัง AF4	ถัง SF
200	60.67				44.11	3.65
201	58.87				36.54	1.33
202	56.80				38.02	0.72
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 20 เซนติเมตร						
203	59.11				39.85	0.59
204	60.22				46.52	26.13
205	61.87				38.54	3.65
206	60.43				36.41	2.24
207	60.15				41.20	1.11
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 0 เซนติเมตร						
208	57.76				41.24	36.04
209	60.50				40.33	28.70
210	58.02				43.41	28.07
211	60.39				48.02	38.76
212	60.80				43.61	29.07

ตารางที่ ข-3 ผลไนเตรทของการทดลองที่ 1 และ 2 (มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร)

วันที่	น้ำเสียเข้า	ถัง AF1	ถัง AF2	ถัง AF3	ถัง AF4	ถัง SF
การทดลองที่ 1 ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.5 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน						
42	0.57				0.08	
44	0.45				0.49	
46	0.00				0.08	
48	0.00				0.00	
50	0.69				0.28	
52	0.00				0.00	
54	0.00				0.04	
56	0.00				0.00	
58	0.00				0.00	
60	0.00				0.00	

วันที่	น้ำเสียเข้า	ถัง AF1	ถัง AF2	ถัง AF3	ถัง AF4	ถัง SF
การทดลองที่ 1 ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน						
86	0.84				0.56	
88	0.52				1.08	
90	0.44				1.64	
การทดลองที่ 1 ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน						
110	1.04				1.40	
112	2.04				1.04	
114	1.60				3.32	
116	1.88				1.32	
118	0.84				0.68	
120	0.48				1.32	
122	0.24				0.20	
124	0.92				0.08	
การทดลองที่ 1 ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน						
142	0.09				0.24	
144	0.20				0.36	
146	0.17				0.04	
148	0.07				0.00	
151	0.00				0.44	
153	0.27				0.24	
155	0.03				0.24	
157	0.00				0.00	
159	0.31				0.40	
161	0.45				0.48	
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 80 เซนติเมตร						
177	3.97				9.37	6.11
179	3.25				4.76	6.11
180	4.84				5.08	18.73
181	3.25				5.48	27.78

วันที่	น้ำเสียเข้า	ถัง AF1	ถัง AF2	ถัง AF3	ถัง AF4	ถัง SF
182	4.13				7.62	26.59
183	2.38				5.79	26.03
184	0.79				4.21	23.49
185	0.71				6.75	26.67
186	3.25				4.60	31.98
187	1.11				3.57	51.35
188	1.51				5.48	23.10
189	1.59				5.08	30.08
190	0.48				2.30	30.63
191	0.95				2.78	15.48
192	0.87				2.46	43.02
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 60 เซนติเมตร						
193	0.79				4.37	56.27
194	0.95				7.14	85.63
195	0.40				3.57	64.84
196	3.33				7.94	78.89
197	1.59				6.83	109.37
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 40 เซนติเมตร						
198	1.59				6.35	106.19
199	1.59				8.25	68.89
200	1.27				11.27	75.24
201	0.79				6.19	67.46
202	0.95				2.70	71.90
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 20 เซนติเมตร						
203	0.95				4.60	54.76
204	1.59				3.33	34.13
205	0.63				6.51	58.57
206	3.02				8.89	66.03
207	4.92				8.10	64.13

วันที่	น้ำเสียเข้า	ถัง AF1	ถัง AF2	ถัง AF3	ถัง AF4	ถัง SF
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 0 เซนติเมตร						
208	3.33				6.03	3.65
209	2.06				3.97	8.57
210	3.02				4.29	12.38
211	3.49				6.03	7.94
212	3.97				3.81	6.83

ตารางที่ ข-4 ผลไนโตรเจนของการทดลองที่ 1 และ 2 (มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร)

วันที่	น้ำเสียเข้า	ถัง AF1	ถัง AF2	ถัง AF3	ถัง AF4	ถัง SF
การทดลองที่ 1 ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.5 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน						
42	0.08				0.08	
44	0.08				0.08	
46	0.08				0.10	
48	0.05				0.23	
50	0.07				0.18	
52	0.07				0.13	
54	0.07				0.11	
56	0.08				0.10	
58	0.07				0.10	
60	0.07				0.07	
การทดลองที่ 1 ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน						
86	0.00				0.02	
88	0.00				0.03	
90	0.02				0.05	
การทดลองที่ 1 ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน						
110	0.03				0.03	
112	0.03				0.06	
114	0.08				0.22	
116	0.06				0.08	

วันที่	น้ำเสียเข้า	ถัง AF1	ถัง AF2	ถัง AF3	ถัง AF4	ถัง SF
118	0.03				0.08	
120	0.06				0.06	
122	0.06				0.06	
124	0.08				0.11	
การทดลองที่ 1 ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน						
142	0.28				0.38	
144	0.16				0.73	
146	0.14				0.48	
148	0.23				0.92	
151	0.12				0.32	
153	0.23				1.94	
155	0.12				0.25	
157	0.16				1.24	
159	0.09				1.27	
161	0.09				0.35	
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 80 เซนติเมตร						
177	0.00				0.06	0.06
179	0.00				0.06	7.17
180	0.10				0.67	39.24
181	0.22				2.04	67.68
182	0.13				1.27	65.73
183	0.19				3.22	90.19
184	0.22				1.37	53.15
185	0.13				1.40	52.68
186	0.16				2.39	61.56
187	0.13				1.21	50.41
188	0.16				1.02	45.61
189	0.16				1.34	43.82
190	0.10				1.43	51.85

วันที่	น้ำเสียเข้า	ถัง AF1	ถัง AF2	ถัง AF3	ถัง AF4	ถัง SF
191	0.16				1.34	44.11
192	0.13				1.18	37.01
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 60 เซนติเมตร						
193	0.13				0.76	26.40
194	0.16				0.83	15.99
195	0.10				0.32	5.80
196	0.00				0.19	0.19
197	0.00				0.80	0.03
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 40 เซนติเมตร						
198	0.00				0.00	0.03
199	0.00				0.35	0.00
200	0.00				0.41	0.19
201	0.00				0.16	0.00
202	0.00				0.13	0.13
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 20 เซนติเมตร						
203	0.00				0.22	0.00
204	0.00				0.99	9.20
205	0.10				0.99	8.85
206	0.03				0.19	4.78
207	0.00				0.48	4.01
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 0 เซนติเมตร						
208	0.06				0.48	4.39
209	0.03				0.92	4.65
210	0.03				0.57	8.50
211	0.00				0.00	0.00
212	0.00				0.29	6.91

ตารางที่ ข-5 ผลซัลไฟด์ของการทดลองที่ 2 (มิลลิกรัมซัลไฟด์ต่อลิตร)

วันที่	น้ำเสียขาเข้า	ถัง AF1	ถัง AF2	ถัง AF3	ถัง AF4	ถัง SF
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 80 เซนติเมตร						
178	16.72				20.24	17.16
179	15.84				23.32	18.48
180	16.21				23.65	17.52
181	16.06				20.83	17.36
183	16.64				20.80	16.22
184	16.56				23.60	17.39
185	17.02				22.94	18.50
186	16.76				20.52	16.07
188	17.06				20.66	17.71
189	16.64				21.12	16.32
190	16.75				21.17	17.38
191	16.64				21.84	15.08
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 60 เซนติเมตร						
193	16.93				24.40	17.43
194	15.60				23.92	18.20
195	16.80				22.68	17.64
196	15.96				32.98	18.09
197	17.32				26.68	17.78
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 40 เซนติเมตร						
198	16.63				29.57	17.09
199	16.78				29.36	17.24
200	16.24				22.27	17.17
201	16.80				26.68	20.25
202	15.30				26.77	18.16
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 20 เซนติเมตร						
203	16.12				18.01	16.12
204	16.85				24.34	14.98

วันที่	น้ำเสียเข้า	ถัง AF1	ถัง AF2	ถัง AF3	ถัง AF4	ถัง SF
205	17.41				31.74	17.92
206	16.62				28.94	18.22
207	16.68				26.13	17.79
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 0 เซนติเมตร						
208	16.32				29.07	18.87
209	16.42				24.17	16.87
210	17.07				23.09	17.07
211	16.77				28.30	19.91
212	17.09				27.97	18.13

ตารางที่ ข-6 ผลสีของการทดลองที่ 2 (ADMI)

วันที่	น้ำเสียเข้า	ถัง AF1	ถัง AF2	ถัง AF3	ถัง AF4	ถัง SF
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 80 เซนติเมตร						
178	7.00				150.00	24.00
179	25.00				166.50	18.00
180	19.00				177.00	19.00
181	4.00				230.00	20.00
183	19.00				335.00	21.50
184	32.00				227.00	9.50
185	10.00				124.50	11.50
186	6.50				148.00	13.00
188	27.00				154.00	18.00
190	33.00				170.50	11.00
191	25.00				357.00	14.00
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 60 เซนติเมตร						
193	11.00				204.00	9.00
194	24.50				169.00	16.50
195	29.00				160.50	3.50
196	6.00				121.50	19.50

วันที่	น้ำเสียเข้า	ถัง AF1	ถัง AF2	ถัง AF3	ถัง AF4	ถัง SF
197	8.50				87.50	10.50
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 40 เซนติเมตร						
198	9.50				156.00	10.00
199	19.50				114.00	11.00
200	30.00				533.00	24.00
201	13.00				129.50	11.00
202	8.50				149.50	6.50
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 20 เซนติเมตร						
203	23.50				183.00	9.50
204	5.50				91.00	17.50
205	91.00				101.50	9.50
206	4.50				89.00	9.00
207	22.50				130.00	5.00
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 0 เซนติเมตร						
208	21.50				134.00	41.50
209	7.50				188.50	33.00
210	4.00				301.50	28.50
211	18.00				272.50	40.50
212	7.00				111.50	19.50

ตารางที่ ข-7 ผลของแข็งแขวนลอยของการทดลองที่ 2 (มิลลิกรัมต่อลิตร)

วันที่	น้ำเสียเข้า	ถัง AF1	ถัง AF2	ถัง AF3	ถัง AF4	ถัง SF
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 80 เซนติเมตร						
178	3.00				26.00	1.00
179	16.00				33.00	136.00
180	22.00				39.00	15.00
181	28.00				32.00	13.00
183	16.00				23.00	6.00
184	24.00				35.00	6.00
185	21.00				25.00	17.00
186	20.00				12.00	10.00
188	19.00				31.00	5.00
190	25.00				29.00	5.00
191	17.00				51.00	11.00
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 60 เซนติเมตร						
193	23.00				17.00	9.00
194	18.00					36.00
195	31.00				36.00	6.00
196	40.00				25.00	9.00
197	29.00				21.00	31.00
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 40 เซนติเมตร						
198	14.00				22.00	19.00
199	24.00				21.00	22.00
200	16.00				30.00	39.00
201	19.00				11.00	12.00
202	18.00				25.00	28.00
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 20 เซนติเมตร						
203	20.00				39.00	10.00
204	12.00				16.00	2.00
205	9.00				36.00	12.00

วันที่	น้ำเสียเข้า	ถัง AF1	ถัง AF2	ถัง AF3	ถัง AF4	ถัง SF
206	3.00				31.00	18.00
207	22.00				36.00	26.00
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 0 เซนติเมตร						
208	15.00				36.00	26.00
209	35.00				21.00	20.00
210	20.00				27.00	19.00
211	10.00				176.00	23.00
212	24.00				32.00	7.00

ตารางที่ ข-8 ผลพีเอชของการทดลองที่ 2

วันที่	น้ำเสียเข้า	ถัง AF1	ถัง AF2	ถัง AF3	ถัง AF4	ถัง SF
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 80 เซนติเมตร						
178	8.0	7.0	7.2	7.3	7.4	8.0
179	7.8	7.0	7.2	7.4	7.4	7.9
180	7.7	7.0	7.0	7.2	7.3	7.8
181	7.7	7.1	7.1	7.3	7.5	7.7
183	7.7	7.0	7.2	7.3	7.4	7.8
184	7.8	7.0	7.1	7.3	7.4	7.6
185	7.7	7.0	7.1	7.3	7.3	7.4
186	7.5	7.0	7.1	7.3	7.4	7.4
188	7.6	7.0	7.1	7.2	7.4	7.4
190	7.6	7.0	7.1	7.3	7.3	7.4
191	7.8	7.0	7.1	7.3	7.4	7.5
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 60 เซนติเมตร						
193	7.6	7.1	7.2	7.3	7.4	7.6
195	7.4	7.0	7.1	7.3	7.5	7.7
196	7.6	7.1	7.2	7.3	7.4	7.6
197	7.6	7.1	7.2	7.3	7.5	7.7
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 40 เซนติเมตร						

วันที่	น้ำเสียเข้า	ถัง AF1	ถัง AF2	ถัง AF3	ถัง AF4	ถัง SF
198	7.7	7.1	7.2	7.3	7.5	7.7
199	7.6	7.1	7.2	7.3	7.4	8.0
200	7.7	7.1	7.2	7.3	7.4	7.9
201	7.5	7.1	7.2	7.3	7.4	7.8
202	7.1	7.1	7.2	7.3	7.4	7.8
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 20 เซนติเมตร						
203	7.5	7.1	7.1	7.3	7.4	7.9
204	7.8	7.2	7.2	7.3	7.5	8.0
205	7.8	7.1	7.2	7.3	7.4	7.9
206	7.8	7.1	7.2	7.3	7.4	7.8
207	7.4	7.1	7.1	7.2	7.4	7.8
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 0 เซนติเมตร						
208	7.6	7.2	7.2	7.2	7.4	7.9
209	7.7	7.1	7.2	7.3	7.4	7.9
210	7.6	7.1	7.2	7.3	7.4	8.0
211	7.8	7.1	7.1	7.2	7.3	8.0
212	7.7	7.2	7.2	7.3	7.4	7.9

ตารางที่ ข-9 ผลโอร่าพีของการทดลองที่ 2 (มิลลิโวลต์)

วันที่	น้ำเสียเข้า	ถัง AF1	ถัง AF2	ถัง AF3	ถัง AF4	ถัง SF
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 80 เซนติเมตร						
178		-361.9	-369.4	-369.7	-371.5	-8.5
179		-336.3	-360.1	-365.5	-372.4	-90.5
180		-341.9	-352.6	-365.9	-373.3	-56.2
181		-345.4	-359.5	-369.6	-379.6	-27.7
183		-337.0	-357.4	-365.6	-371.1	-30.5
184		-316.6	-360.9	-371.1	-376.3	-20.9
185		-344.8	-365.0	-374.1	-376.7	-45.5
186		-331.5	-357.5	-370.3	-374.0	-29.7
188		-354.6	-368.2	-370.0	-376.7	-70.5
190		-358.4	-370.1	-373.9	-379.3	-55.8
191		-347.9	-356.2	-375.5	-380.5	-73.0
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 60 เซนติเมตร						
193		-352.6	-368.8	-376.9	-378.8	-14.1
195		-360.2	-366.9	-376.2	-379.9	23.5
196		-358.4	-369.7	-377.9	-379.3	-52.3
197		-362.9	-373.9	-378.6	-381.5	-6.1
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 40 เซนติเมตร						
198		-360.1	-369.6	-376.3	-380.4	-4.2
199		-361.5	-370.2	-375.4	-379.6	-17.5
200		-351.0	-370.1	-378.3	-384.5	-79.0
201		-361.9	-371.7	-381.0	-382.0	-62.5
202		-364.5	-376.1	-379.1	-384.8	-109.2
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 20 เซนติเมตร						
203		-365.1	-373.1	-378.3	-383.9	-113.8
204		-359.2	-377.0	-380.6	-383.9	-115.8
205		-355.3	-371.6	-374.7	-381.7	-60.6
206		-355.8	-373.9	-378.1	-381.8	-142.5

วันที่	น้ำเสียขาเข้า	ถัง AF1	ถัง AF2	ถัง AF3	ถัง AF4	ถัง SF
207		-360.7	-371.6	-378.0	-381.3	-60.7
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 0 เซนติเมตร						
208		-361.6	-384.5	-384.8	-384.9	-165.6
209		-358.1	-371.9	-380.0	-383.4	-135.0
210		-368.2	-380.2	-382.3	-384.0	-150.6
211		-354.4	-366.5	-378.2	-379.5	-96.3
212		-354.0	-367.7	-378.4	-378.8	-84.1

ตารางที่ ข-10 ผลออกซิเจนละลายของการทดลองที่ 2 (มิลลิกรัมต่อลิตร)

วันที่	น้ำเสียขาเข้า	ถัง AF1	ถัง AF2	ถัง AF3	ถัง AF4	ถัง SF
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 80 เซนติเมตร						
178	0.18	0.15	0.13	0.12	0.18	2.83
179	0.09	0.09	0.09	0.11	0.09	2.25
180	0.09	0.53	0.1	0.12	0.09	2.84
181	0.11	0.1	0.08	0.09	0.11	1.85
183	0.18	0.11	0.12	0.09	0.18	2.22
184	0.19	0.13	0.15	0.13	0.19	1.90
185	0.17	0.12	0.11	0.08	0.17	1.45
186	0.18	0.19	0.15	0.10	0.18	1.53
188	0.11	0.13	0.11	0.08	0.11	1.09
190	0.11	0.08	0.10	0.13	0.11	1.53
191	0.18	0.13	0.31	0.09	0.18	1.38
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 60 เซนติเมตร						
193	0.11	0.09	0.12	0.09	0.11	1.70
195	0.12	0.11	0.11	0.09	0.12	2.09
196	0.13	0.13	0.10	0.10	0.13	1.88
197	0.10	0.08	0.10	0.08	0.10	1.93
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 40 เซนติเมตร						
198	0.12	0.12	0.11	0.10	0.12	2.36

วันที่	น้ำเสียเข้า	ถัง AF1	ถัง AF2	ถัง AF3	ถัง AF4	ถัง SF
199	0.14	0.09	0.12	0.11	0.14	1.95
200	0.15	0.13	0.11	0.11	0.15	2.19
201	0.18	0.13	0.10	0.07	0.18	2.21
202	0.13	0.12	0.14	0.12	0.13	2.09
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 20 เซนติเมตร						
203	0.13	0.09	0.06	0.07	0.13	2.65
204	0.18	0.12	0.10	0.13	0.18	1.81
205	0.17	0.12	0.14	0.16	0.17	2.17
206	0.11	0.07	0.09	0.10	0.11	2.41
207	0.11	0.12	0.11	0.09	0.11	2.10
การทดลองที่ 2 ที่ความลึกชั้นทราย 0 เซนติเมตร						
208	0.12	0.07	0.11	0.08	0.12	0.06
209	0.13	0.11	0.12	0.13	0.13	1.28
210	0.11	0.14	0.11	0.11	0.11	1.16
211	0.16	0.13	0.14	0.16	0.16	1.24
212	0.12	0.09	0.11	0.25	0.12	1.56

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

- กรมควบคุมมลพิษ. (2545). น้ำเสียชุมชนและระบบบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว.
- กรมควบคุมมลพิษ. (2548). มาตรฐานคุณภาพน้ำ. [ออนไลน์]: http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html [24 ตุลาคม 2562]
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2549). หลักสูตรการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: ห้างหุ้นส่วนจำกัดน็อทเทิร์นอาร์ตแอนด์ปรีนท์.
- ชลธิพร สุทธิธรรม. (2549). การศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนในกรุงเทพมหานคร และการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของโรงบำบัดน้ำเสียดินแดง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธเรศ หงส์สาระนั้นทุกุล. (2540). การบำบัดน้ำเสียด้วยความเข้มข้นสูงด้วยถังกรองไร้อากาศที่มีตัวกลางเม็ดพลาสติกกลอยน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พิมพ์พิสุทธิ์ หงส์ขยางกูร. (2561). ผลของความเข้มข้นซีโอดีและพื้นที่ผิวตัวกลางต่อระบบถังกรองไร้อากาศและถังกรองทรายชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันทุลเวศม์. (2542). เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม. เล่มที่ 1 และ 2. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันทุลเวศม์. (2546). คู่มือวิชาการระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ. เล่มที่ 1. กรุงเทพฯ: ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สบสุข ลีละบุตร. (2549). การเปรียบเทียบค่า BOD กับระยะพักน้ำเสียในถังกรองไร้อากาศ. วารสารโรงเรียนนายเรือ, ปีที่ 6, ฉบับที่ 2.
- สิรินภา สิทธิธรรม. (2555). ผลของความเข้มข้นซีโอดีและพื้นที่ผิวตัวกลางต่อประสิทธิภาพระบบกรองไร้อากาศ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Assayed, A. K., Dalahmeh, S. S., & Suleiman, W. T. (2010). Onsite greywater treatment using septic tank followed by intermittent sand filter-A case study of Abu Al Farth Village in Jordan. *International Journal of Chemical and Environmental Engineering*. (IJCEE)(1).
- Carlos, A., and Lemos, C. (2007). *Biological Wastewater Treatment Series*. Volume 4. 1sted., London,UK: IWA Publishing.
- Journey, W., and McNiven, S.C. (1996). Anaerobic enhanced treatment of wastewater and options for further treatment. (No. 628.3 J86a). AID.
- Kugelman, I. J., & Chin, K. K. (1971). Anaerobic biological treatment processes. *Advances in Chemistry Series*. 105, 55-90.
- Martin, M., De la Rubia, M., Martín, A., Borja, R., Montalvo, S., & Sánchez, E. J. B. t. (2010). Kinetic evaluation of the psychrophilic anaerobic digestion of synthetic domestic sewage using an upflow filter. *101*(1), 131-137.
- McCarty, P. L. (1964). Anaerobic waste treatment fundamentals. *Public works*. 95(9), 107-112.
- Metcalf, L., and Eddy, M.I. (2003). *Wastewater engineering: treatment and reuse*. 4th edition. New York: McGraw-Hill.
- Nikolaeva, S., Sánchez, E., Borja, R., Raposo, F., Colmenarejo, M. F., Montalvo, S., & Jiménez-Rodríguez, A. M. (2009). Kinetics of anaerobic degradation of screened dairy manure by upflow fixed bed digesters: effect of natural zeolite addition. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 44(2), 146-154.
- Padilla-Gasca, E., & López, A. L. (2010). Kinetics of organic matter degradation in an upflow anaerobic filter using slaughterhouse wastewater. *Journal of Bioremediation and Biodegradation*, 1(2).
- Sabbah, I., Ghattas, B., Hayeek, A., Omari, J., Haj, Y., Admon, S., & Green, M. (2004). Intermittent sand filtration for wastewater treatment in rural areas of the Middle East-a pilot study. *Water Science technology*. 48(11-12), 147-152.

- Samir, K. K. (2008). *Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production: Principles and Applications*. USA: Blackwell Publishing.
- Speece, R. E. (1996). *Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewaters*, Archae Press, Nashville, Tennessee.
- Tonon, D., Tonetti, A. L., Coraucci Filho, B., & Bueno, D. A. C. J. E. E. (2015). Wastewater treatment by anaerobic filter and sand filter: Hydraulic loading rates for removing organic matter, phosphorus, pathogens and nitrogen in tropical countries. *82*, 583-589.
- USEPA. (1999). *Wastewater technology fact sheet: Intermittent sand filters*. Office of Water Washington, DC.





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	พัชราภรณ์ เทียงทอง
วัน เดือน ปี เกิด	27 กรกฎาคม 2536
สถานที่เกิด	สระบุรี
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม) คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
ที่อยู่ปัจจุบัน	60/1 หมู่ 5 ตำบลท่าหลวง อำเภอท่าเรือ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 18270



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY