การเปลี่ยนรูปซัลเฟตและไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นซัลเฟอร์ด้วย
ระบบกรองไร้อากาศและระบบโปรยกรอง

นางสาวปิยะวรรณ เอี่ยมสอาด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Transformation of Sulfate and Hydrogen Sulfide to Sulfur by Anaerobic Filter and Trickling Filter

Miss Piyawan Aiemsaard

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering
Department of Environmental Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเปลี่ยนรูปซัลเฟตและไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นซัลเฟอร์ด้วยระบบกรองไร้อากาศและระบบโปรยกรอง
โดย	นางสาวปิยะวรรณ เอี่ยมสอาด
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ตะวัน ลิมปิยากร)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เบญจพร สุวรรณศิลป์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.กิตติคุณ ตรุยานนท์)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ปิยะวรรณ เอี่ยมสอาด : การเปลี่ยนรูปซัลเฟตและไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นซัลเฟอร์ด้วยระบบกรองไร้อากาศและระบบโปรยกรอง (Transformation of Sulfate and Hydrogen Sulfide to Sulfur by Anaerobic Filter and Trickling Filter) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.ศรัณย์ เตชะเสน, 126 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของความเข้มข้นของซัลเฟตต่ออัตราการและประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตในถังกรองไร้อากาศ และอัตราและประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์ในถังโปรยกรอง โดยทำการทดลองในระบบแบทช์และแบบไหลต่อเนื่อง ในระบบแบทช์ใช้ความเข้มข้นโดยใช้ซัลเฟต 100 200 500 1,000 และ 1,500 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร รวมทั้งศึกษาอัตราการเวียนน้ำและค่าออกซิเจนละลาย (DO) ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนรูปจากซัลไฟด์เป็นซัลเฟอร์ ส่วนการทดลองแบบไหลต่อเนื่องทำการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟต ประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์ และประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ในถังโปรยกรองที่มีปริมาณตัวกลางแตกต่างกันในถังโปรยกรอง ผลการทดลองพบว่าถังกรองไร้อากาศที่ควบคุมพีเอช 8.0-8.5 มีอัตราการบำบัดซัลเฟตเป็นไปตามสมการโมนอด (Monod's Kinetic) ซึ่งมีค่า k_m เท่ากับ 139±19 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตรต่อวัน และมีค่า K_s เท่ากับ 190±97 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร และถังโปรยกรองที่ควบคุมพีเอช 8.5-9.5 ค่า DO อยู่ที่ 0.07-0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถบำบัดซัลไฟด์ที่มีความเข้มข้น 55-375 มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตร เป็นไปตามสมการโมนอดซึ่งมีค่า k_m เท่ากับ 145±34 มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตรต่อวัน และมีค่า K_s เท่ากับ 79±49 มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตร ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตและซัลไฟด์ เท่ากับ 15.09% และ100% ตามลำดับ โดยใช้อัตราการเวียนน้ำ 130 ลิตรต่อชั่วโมง และ 30 ลิตรต่อชั่วโมง มีประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตและ เท่ากับ 36.66% และ 100% ตามลำดับ ส่วนที่ใช้อัตราการเวียนน้ำ 2.7 ลิตรต่อชั่วโมง มีค่า k_m เท่ากับ 97±54 มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตรต่อวัน และมีค่า K_s เท่ากับ 266±341 มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตร มีประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตและซัลไฟด์ 61.09% และ 94.97% ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าการใช้อัตราการเวียนน้ำของถังโปรยกรองให้ต่ำทำให้ซัลไฟด์สามารถเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ได้มากกว่าการใช้อัตราการเวียนน้ำสูง ผลการทดลองแบบไหลต่อเนื่องในการบำบัดซัลเฟตที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร ของถังกรองไร้อากาศที่ควบคุมพีเอชอยู่ในช่วง 8.0-8.5 มีอัตราการไหล 9.5 ลิตรต่อวัน และถังโปรยกรองที่ควบคุมอัตราการเวียนน้ำ 2.7 ลิตรต่อชั่วโมง ที่มีปริมาณตัวกลาง 0-100 200 และ 350 ชิ้น มีประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์ เท่ากับ 61.37% 79.71% และ 83.26% ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าปริมาณตัวกลางหรือพื้นผิวในถังโปรยกรองไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟต แต่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดการบำบัดซัลไฟด์และการเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2558

5670287221 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING
KEYWORDS:

PIYAWAN AIEMSAARD: Transformation of Sulfate and Hydrogen Sulfide to Sulfur by Anaerobic Filter and Trickling Filter. ADVISOR: ASST. PROF.SARUN TEJASEN, Ph.D., 126 pp.

This research studied the effect of sulfate concentrations on sulfate reduction rates and efficiencies in anaerobic filter reactor, and sulfide reduction rates and efficiencies in trickling filter. Experiments were performed using both batch and continuous flow reactors. Initial sulfate concentrations in batch reactor were 100, 200, 500, 1000, and 1500 mgSO_4^{2-}-S/L. The effects of recirculation rates and dissolved oxygens on sulfide to sulfur were also studied. Continuous flow reactor was experimented to determine the effects of filter media amounts to the sulfide-sulfur transformation efficiencies. Results showed that anaerobic filter at pH 8.0-8.5 removed sulfate according to monod's kinetic reaction rates with k_m of 139±19 mgSO_4^{2-}-S/L/d and K_s of 190±97 mgSO_4^{2-}-S/L. And trickling filter at pH 8.5-9.5 when controlled DO at 0.07-0.10 mg/L removed sulfide concentrations 55-375 mgS^{2-}-S/L according to monod's kinetic reaction rates with k_m of 145±44 mgS^{2-}-S/L/d and K_s of 79±44 mgS^{2-}-S/L. The removal efficiencies of sulfate and sulfide were 15.09% and 100% respectively from recirculation rate 130 and 30 L/hr removal efficiencies of sulfate and sulfide were 36.66% and 100% respectively. The recirculation rate 2.7 L/hr were k_m of 97 ± 54 mgS^{2-}-S/L/d and K_s of 266 ± 341mgS^{2-}-S/L.The removal efficiencies of sulfate and sulfide were 61.09% and 94.97% respectively. Conclude that sulfur transformation was inverse variation to recirculation rate. Results of Continuous flow reactor showed that anaerobic filter has flow rate 9.5 L/d removed concentration sulfate 500 mgSO_4^{2-}-S/L at pH range 8.0-8.5, recirculation rate 2.7 L/hr, amount of media 0-100, 200 and 350 pieces The removal efficiencies of sulfide 61.37%, 79.71% and 83.26% respectively in trickling filter. which refer to amount of media in trickling filter did not relative to removal efficiencies of sulfate but effect to removal efficiencies of sulfide and sulfur transformation.

CHULALONGKORN UNIVERSITY

Department:	Environmental Engineering	Student's Signature	.....
Field of Study:	Environmental Engineering	Advisor's Signature	.....
Academic Year:	2015		

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำปรึกษาและแก้ไขปัญหา รวมไปถึงข้อบกพร่องตลอดการดำเนินงานวิจัย จนทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ตลอดจน รองศาตราจารย์ ดร.ตะวัน ลิมปิยากร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เบญจพร สุวรรณศิลป์ กรรมการ และ ดร. กิตติคุณ ตรุยานนท์ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัยที่ได้กรุณาชี้แนะแก้ไขจนวิทยานิพนธ์สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้

ขอขอบพระคุณภาควิชาสิ่งแวดล้อม คณะวิศววกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้สนับสนุนทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณบริษัท อควา นิชิฮาร่า ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวกลางพลาสติก เพื่อใช้ในการทดลอง

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ธุรการ ครูห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยให้คำชี้แนะ ให้ความช่วยเหลืองานด้านเอกสารและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ

ขอขอบพระคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษาและดูแลกันในระหว่างการทำวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา-มารดา และทุกคนในครอบครัว ซึ่งสนับสนุน ส่งเสริมและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญรูป ..... ฎ

สารบัญตาราง ..... ฐ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 วัฏจักรซัลเฟอร์ 4

2.1.1 แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต 6

2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต 6

2.1.3 การควบคุมระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันด้วยการเติมซัลเฟต 8

2.1.4 ส่วนประกอบของซัลไฟด์ในน้ำ 9

2.1.5 สมดุลมวลซัลเฟอร์ 9

2.2 การบำบัดซัลเฟต 10

2.2.1 การบำบัดทางกายภาพ 10

2.2.2 การบำบัดทางเคมี 11

2.2.3 การบำบัดทางชีวภาพ 12

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

2.3 ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 21
2.3.1 ลักษณะโดยทั่วไป 21
2.3.2 การบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 23
2.4 สมการปริมาณสารสัมพันธ์ต่อสารอินทรีย์ต่างๆในน้ำเสีย 40
2.5 ธาตุอาหาร (Nutrient) 42
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 44
บทที่ 3 แผนการทดลองและวิธีการดำเนินการวิจัย 51
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย 51
3.1.1 วัสดุอุปกรณ์ 51
3.1.2 สารเคมี 52
3.2 แผนการทดลอง 52
3.2.1 น้ำเสียสังเคราะห์ 54
3.2.2 หัวเชื้อจุลินทรีย์ 54
3.2.3 วัสดุตัวกลาง 54
3.2.4 ถังปฏิกิริยา 55
3.2.5 ตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษา 58
3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย 60
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ 64
4.1 การเริ่มต้นเดินระบบ 65
4.2 น้ำเสียสังเคราะห์ 66
4.3 การบำบัดพารามิเตอร์ต่างๆ ในระบบแบบแบทช์ 66
4.3.1 ซัลเฟต 67
4.3.2 ซัลไฟด์ 69

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

4.3.3 ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 70
4.1.4 พีเอช 71
4.1.5 ซีโอดี 72
4.4 อัตราการบำบัด 73
4.4.1 อัตราการบำบัดซัลเฟต 73
4.4.2 อัตราการบำบัดซัลไฟด์ 76
4.5 สมดุลมวลซัลเฟอร์ของการทดลองแบบแบทช์ 79
4.6 ประสิทธิภาพการบำบัดของถังกรองไร้อากาศและตามด้วยถังโปรยกรองแบบแบทช์ 80
4.6.1 ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตและซัลไฟด์ 80
4.6.2 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี 83
4.7 การบำบัดพารามิเตอร์ต่างๆ ในระบบแบบไหลต่อเนื่อง 84
4.7.1 ซัลเฟต 84
4.7.2 ซัลไฟด์ 85
4.7.3 ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 86
4.7.4 พีเอช 87
4.7.5 ซีโอดี 88
4.8 สมดุลมวลซัลเฟอร์ของการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง 90
4.9 ประสิทธิภาพการบำบัดของถังกรองไร้อากาศและตามด้วยถังโปรยกรองแบบการไหลต่อเนื่อง 90
4.9.1 ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟต 91
4.9.2 ประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์ 91
4.9.3 ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 92
4.9.4 ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ 92

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

4.9.5 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี 93
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 94
5.1 สรุปผลการทดลอง 94
5.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย 95
5.3 ข้อเสนอแนะ 95
5.4 ข้อเสนอแนะเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ 96
รายการอ้างอิง 97
ภาคผนวก 103
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 126

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 วัฏจักรซัลเฟอร์ 5

รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยารีดอกซ์ในการบำบัดน้ำเสีย 13

รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน 14

รูปที่ 2.4 สัดส่วนของ H_2S S^{2-} และ HS^- ที่ระดับพีเอช 16

รูปที่ 2.5 van Niel curve 32

รูปที่ 3.1 ตัวกลางพลาสติกรุ่น R-190 Random Flow Media 54

รูปที่ 3.2 ถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรอง สำหรับการทดลองแบบแบทช์ 56

รูปที่ 3.3 ถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรอง สำหรับการทดลองแบบน้ำไหลต่อเนื่อง 57

รูปที่ 3.4 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการทดลองที่ 1 61

รูปที่ 3.5 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการทดลองที่ 2 63

รูปที่ 4.1 ซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆกับระยะเวลาบำบัด 68

รูปที่ 4.2 ผลของอัตราการเวียน้ำในถังโปรยกรอง 69

รูปที่ 4.3 ซัลไฟด์ที่ความเข้มข้นต่างๆกับระยะเวลาบำบัด 70

รูปที่ 4.4 ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์กับระยะเวลาบำบัด 71

รูปที่ 4.5 พีเอชของถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองต่อระยะเวลาบำบัด 72

รูปที่ 4.6 ซีโอดีของถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองต่อระยะเวลาบำบัด 73

รูปที่ 4.7 ตัวอย่างการหาอัตราการบำบัดซัลเฟตที่ความเข้มข้น 508 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร 75

รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นซัลเฟตและอัตราการบำบัดซัลเฟต 75

รูปที่ 4.9 ตัวอย่างการหาอัตราการบำบัดซัลไฟด์ที่ความเข้มข้น 233 มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตร 77

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นซัลไฟด์และอัตราการบำบัดซัลไฟด์ 78

รูปที่ 4.11 น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากถังกรองไร้อากาศและและถังโปรยกรอง 82

รูปที่ 4.12 น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากถังกรองไร้อากาศและและถังโปรยกรอง 82

รูปที่ 4.13 การบำบัดซัลไฟด์ที่ปริมาณตัวกลางต่างๆระยะเวลา 60 วัน 85

รูปที่ 4.14 การบำบัดซัลไฟด์ที่ปริมาณตัวกลางต่างๆระยะเวลา 60 วัน 86

รูปที่ 4.15 การบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ปริมาณตัวกลางต่างๆระยะเวลา 60 วัน 87

รูปที่ 4.16 พีเอชของถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองระยะเวลา 60 วัน..... 88

รูปที่ 4.17 การบำบัดก๊าซซีโอดีของถังกรองไร้อากาศและถังโปรยที่ปริมาณตัวกลางต่างๆ..... 89

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 เลขออกซิเดชันของซัลเฟอร์และสารประกอบซัลเฟอร์ 5

ตารางที่ 2.2 การออกแบบระบบบำบัดแบบ Upflow Attached Growth Reactor 18

ตารางที่ 2.3 สมบัติของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 22

ตารางที่ 2.4 ลักษณะความเป็นพิษของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 23

ตารางที่ 2.5 ความแตกต่างของแต่ละระบบ 27

ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบกระบวนการบำบัดก๊าซมลพิษ 29

ตารางที่ 2.7 กลุ่มของจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 30

ตารางที่ 2.8 การออกแบบระบบบำบัดแบบโปรยกรอง 36

ตารางที่ 2.9 ธาตุอาหารเสริมสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ 43

ตารางที่ 2.10 ธาตุอาหารเสริมสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบเติมอากาศ 43

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ทำการศึกษา 58

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ วิธีวิเคราะห์แต่ละพารามิเตอร์ และความถี่การเก็บตัวอย่าง 59

ตารางที่ 4.1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นซัลเฟตต่างๆ 66

ตารางที่ 4.2 ความเข้มข้นซัลเฟตที่ผ่านการบำบัดจากถังกรองไร้อากาศและโปรยกรอง 68

ตารางที่ 4.3 ค่า k_m K_s และ K_1 จากงานวิจัยของ Ramirez และคณะ (2009) 78

ตารางที่ 4.4 ค่า k_m K_s และ K_1 ที่อัตราการเวียนน้ำ 130 30 และ 2.7 ลิตรต่อชั่วโมง 78

ตารางที่ 4.5 สมดุลมวลซัลเฟอร์ของการทดลองแบบแบทช์ 80

ตารางที่ 4.6 อัตราการเวียนน้ำและค่า DO ต่อประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตและซัลไฟด์ 81

ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 5:1 83

ตารางที่ 4.8 สมดุลมวลซัลเฟอร์ของการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง 90

ตารางที่ 4.9 ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟต ซัลไฟด์ และการเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ 92

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมประเภทการผลิตแอลกอฮอล์และสุรา การผลิตน้ำยางข้น การผลิตสแตนเลส การกลั่นน้ำมันเชื้อเพลิง การแปรรูปอาหาร และการผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษ มักมีความเข้มข้นซัลเฟตสูงจึงจำเป็นที่จะต้องบำบัดก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ โดยทั่วไปการบำบัดซัลเฟตมีกระบวนการทางกายภาพและเคมี เช่น การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion Exchange) การตกตะกอนด้วยเหล็ก (Iron Precipitation) กระบวนการเหล่านี้มีค่าใช้จ่ายสูง ซึ่งในปัจจุบันได้มุ่งเน้นนำกระบวนการทางชีวภาพมาใช้ เนื่องจากเป็นกระบวนการบำบัดที่มีประสิทธิภาพสูง มีการใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการน้อย จึงนับว่าเป็นกระบวนการบำบัดเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าและมีศักยภาพต่อการนำมาประยุกต์ใช้งานจริง ในการบำบัดซัลเฟตด้วยกระบวนการทางชีวภาพในสภาวะไร้อากาศจะเปลี่ยนรูปให้เป็นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) หรือก๊าซไข่เน่าที่มีกลิ่นเหม็นและเป็นก๊าซพิษ เมื่อนำไฮโดรเจนซัลไฟด์นี้ไปบำบัดด้วยระบบ Wet Scrubber ก็จะเปลี่ยนรูปกลับมาเป็นซัลเฟตอีกทำให้เกิดปัญหาไม่มีที่สิ้นสุด งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการนำระบบถังกรองไร้อากาศมาบำบัดซัลเฟตทำให้เกิดการปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชัน (Sulfate Reduction) โดยซัลเฟตจะถูกรีดิวซ์เป็นซัลไฟด์และทำการควบคุมพีเอชอยู่ในช่วง 8.0–8.5 ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ แล้วบำบัดซัลไฟด์ต่อโดยใช้ถังโปรยกรองที่คุมค่าออกซิเจนละลายน้ำให้ต่ำเพื่อให้ซัลไฟด์ถูกออกซิไดซ์เป็นซัลเฟอร์ (S^0) ที่เรียกว่าปฏิกิริยา ซัลไฟด์ออกซิเดชัน (Sulfide Oxidation) ซึ่งจะได้ธาตุกัมมะถัน (S^o) เป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายอยู่ในรูปของแข็งที่ไม่ละลายน้ำสามารถตกตะกอนได้ง่ายทำให้แยกออกจากน้ำทิ้งได้ถาวร (Liu และคณะ, 2013)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆต่ออัตราการบำบัดซัลเฟต และอัตราการบำบัดซัลไฟด์ ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตและซัลไฟด์ในถังโปรยกรอง รวมทั้งศึกษาอัตราการเวียนน้ำและค่าออกซิเจนละลาย (DO) ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนรูปจากซัลเฟตและไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นซัลเฟอร์ ซึ่งข้อมูลที่ได้สามารถ

นำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของซัลเฟตและซัลไฟด์เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานจริง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของซัลเฟตต่ออัตราการบำบัดซัลเฟตและประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตในถังกรองไร้อากาศ ในการทดลองแบบแบทช์

1.2.2 เพื่อศึกษาอัตราการบำบัดและประสิทธิภาพของถังโปรยกรองในการซัลไฟด์ ในทดลองแบบแบทช์

1.2.3 เพื่อศึกษาอัตราการเวียนน้ำและค่าออกซิเจนละลายน้ำที่มีต่อประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปจากซัลเฟตและซัลไฟด์เป็นซัลเฟอร์ ในการทดลองแบบแบทช์

1.2.4 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตและซัลไฟด์ต่อปริมาณตัวกลางในถังโปรยกรอง และประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปจากซัลเฟตและซัลไฟด์เป็นซัลเฟอร์ ในการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ทำการทดลองในระดับทดลอง (Bench Scale) ที่อุณหภูมิห้อง ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3.2 ถังปฏิกิริยาที่ใช้คือ ถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตร สูง 1.3 เมตร มีปริมาตรถัง 40 ลิตร และถังโปรยกรอง (Trickling Filter) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตร สูง 1.3 เมตร มีปริมาตรถัง 40 ลิตร

1.3.3 น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นซัลเฟต 5 ความเข้มข้น ได้แก่ 100 200 500 1,000 และ 1,500 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร ใช้น้ำตาลทรายขาวเป็นแหล่งพลังงานและใช้โซเดียมซัลเฟตเป็นแหล่งซัลเฟตเติมสารอาหารที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 5:1

1.3.4 หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองของถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรอง นำมาจากระบบไร้อากาศที่ห้องปฏิบัติการวิจัยและบัณฑิตภาควิชาสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3.5 ปริมาณตัวกลางที่ใช้ในการทดลองในถังโปรยกรอง ได้แก่ 0 20 50 100 200 และ 350 ชิ้น ซึ่งคิดเป็นพื้นที่ผิว เท่ากับ 0 0.30 0.75 1.50 3.00 และ 5.25 ตารางเมตร ตามลำดับ โดยใช้

ตัวกลางเป็นพลาสติกของบริษัท AQUA รุ่น R-190 Random Flow Media เส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร สูง 2 เซนติเมตร มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 190 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร

1.3.6 พารามิเตอร์ที่ตรวจวัดคือ ซีโอดี พีเอช ดีโอ ซัลเฟต ซัลไฟด์ และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบผลของความเข้มข้นซัลเฟตต่ออัตราการบำบัดและประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตในถังกรองไร้อากาศ

1.4.2 ทราบผลของปริมาณตัวกลางต่ออัตราการบำบัดและประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์ด้วยระบบโปรยกรอง

1.4.3 ทราบผลของอัตราการเวียนน้ำและค่าออกซิเจนละลายน้ำที่มีต่อประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปจากซัลเฟตและซัลไฟด์เป็นซัลเฟอร์

1.4.4 เพื่อเป็นแนวทางการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียสำหรับใช้งานจริงในการบำบัดซัลเฟตและไฮโดรเจนซัลไฟด์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

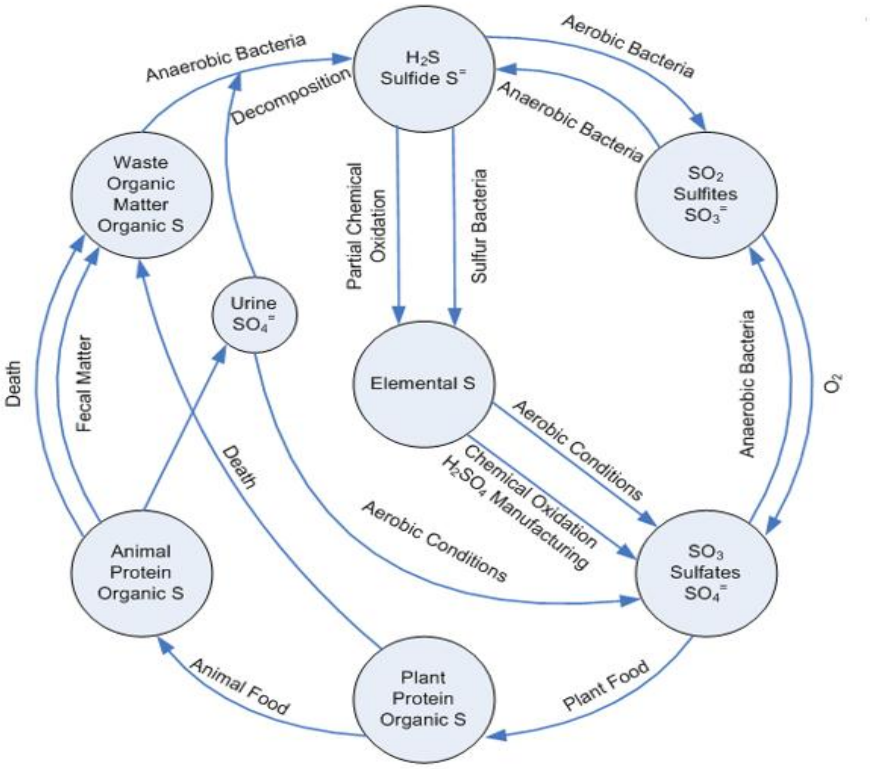
2.1 วัฏจักรซัลเฟอร์

กิจกรรมของมนุษย์และปรากฏการณ์ธรรมชาติเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายและเปลี่ยนรูปของสารประกอบของธาตุซัลเฟอร์ต่างๆอยู่ตลอดเวลา ในทางชีวภาพซัลเฟอร์เป็นธาตุที่สำคัญกับสิ่งมีชีวิต เช่น เป็นองค์ประกอบของเซลล์ เอนไซม์ และโปรตีนต่างๆ สารประกอบของซัลเฟอร์ในรูปออกซิไดซ์หลายชนิดทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายในกระบวนการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนของจุลชีพบางกลุ่ม และในทางกลับกันสารประกอบซัลเฟอร์ในรูปรีดิวซ์บางรูปก็จะใช้เป็นสารให้อิเล็กตรอนสำหรับการดำรงชีพของจุลชีพบางกลุ่มได้เช่นเดียวกัน

วัฏจักรของซัลเฟอร์มีลักษณะคล้ายวัฏจักรไนโตรเจน เนื่องจากเกี่ยวกับปฏิกิริยาหรือกิจกรรมทางชีวภาพเป็นอย่างมาก ซัลเฟอร์ที่อยู่ในสารประกอบอินทรีย์มักอยู่ในรูปของโปรตีนแบคทีเรียสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ซัลเฟอร์สร้างเป็นเนื้อเยื่อ และสร้างพลังงานในการดำรงชีวิต ซัลเฟอร์ถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปซัลเฟตภายใต้สภาวะแอโรบิก ส่วนภายใต้สภาวะไม่ใช้อากาศซัลเฟอร์จะถูกเปลี่ยนเป็นซัลไฟด์หรือไฮโดรเจนซัลไฟด์ สัตว์จะกินอินทรีย์ซัลเฟอร์ในพืชและใช้ในการเจริญเติบโต เมื่อพืชและสัตว์ตายก็จะเน่าเปื่อยและสลายตัวกลายเป็นสารอินทรีย์ซัลเฟอร์ในดินหรือในน้ำ แสดงดังรูปที่ 2.1

ซัลเฟอร์ เป็นธาตุที่อยู่ในหมู่ 6 ของระบบตารางธาตุ เมื่ออยู่ในรูปสารประกอบจะมีเลขออกซิเดชันอยู่ระหว่าง -2 ถึง +6 และค่าที่สำคัญคือ -2 0 +2 +4 และ +6 ในทางเคมีซัลเฟตและซัลไฟด์จัดเป็นสารประกอบซัลเฟอร์มีความคงตัวมากที่สุด เนื่องจากมีเลขออกซิเดชันสูงสุดและต่ำที่สุดเท่ากับ +6 และ -2 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 2.1

โดยซัลเฟอร์จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปซัลเฟตภายใต้สภาวะแอโรบิก ส่วนภายใต้สภาวะไร้อากาศซัลเฟอร์จะถูกเปลี่ยนเป็นซัลไฟด์หรือไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซัลไฟด์ไอออนเป็นไอออนที่สามารถเกิดเป็นสารประกอบกับโลหะได้โดยตรงในน้ำได้ง่าย เช่น การเกิดปฏิกิริยาระหว่างเหล็กและซัลไฟด์ได้เป็นเฟอริกซัลไฟด์ในน้ำเสีย ($FeCl_3$) ซึ่งสามารถพบได้บ่อย เนื่องจากในน้ำจะมีปริมาณเหล็กค่อนข้างสูง จึงเกิดเป็นเฟอริกซัลไฟด์ในปริมาณสูงด้วย และเนื่องจากเฟอริกซัลไฟด์เป็นตะกอนสีดำ ดังนั้นเมื่อมีเฟอริกซัลไฟด์ในน้ำมากพอจะทำให้น้ำเสียมีสีดำ



รูปที่ 2.1 วัฏจักรซัลเฟอร์

(Sawyer และ McCarty, 1978)

ตารางที่ 2.1 เลขออกซิเดชันของซัลเฟอร์และสารประกอบซัลเฟอร์

(มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และมั่นรักษ์ ตัณฑุลเวศม์, 2545)

รูปของธาตุหรือสารประกอบซัลเฟอร์	เลขออกซิเดชัน
สารอินทรีย์ซัลเฟอร์ (R-SH)	-2
ซัลไฟด์ (H_2S)	-2
ธาตุซัลเฟอร์ (S^0)	0
ไธโอซัลเฟต ($S_2O_3^{2-}$)	+2 (เฉลี่ยต่อ S)
เททระไธโอเนต ($S_4O_6^{2}$)	+2.5 (เฉลี่ยต่อ S)
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2)	+4
ซัลไฟต์ (SO_3^{2-})	+4
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	+6
ซัลเฟต (SO_4^{2-})	+6

2.1.1 แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต

สิ่งมีชีวิตในธรรมชาติทั่วไปตั้งแต่พืชชั้นสูงจนถึงสาหร่าย รา และเซลล์โปรคาริโอตหลายชนิด ในการสร้างเซลล์จะใช้ซัลเฟตเป็นแหล่งซัลเฟอร์ แต่ข้อจำกัดในการใช้ซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนต้องเป็นแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเท่านั้น ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่ไม่ต้องการออกซิเจน เช่น *Desulfovibrio sp.* ค่อนข้างทนต่อการขาดออกซิเจนและบางสปีชีส์สามารถรีดิวซ์ไนเตรทให้เป็นแอมโมเนียได้ด้วย ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่ม Chemoheterotroph จะได้รับพลังงานมาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยแบคทีเรียกลุ่มนี้มีความสามารถในการรีดิวซ์ซัลเฟตให้อยู่ในรูปของซัลไฟด์ เนื่องจากแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจะใช้ซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในการออกซิไดซ์โมเลกุลสารอินทรีย์ ดังนั้นในกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่มีซัลเฟตมักจะพบแบคทีเรียดิวซ์ซัลเฟตอยู่ร่วมกับแบคทีเรียสร้างกรดและแบคทีเรียสร้างมีเทน

แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตหลายชนิดสามารถเจริญเติบโตได้ด้วยการรีดิวซ์ไนเตรทเป็นแอมโมเนีย หรือสามารถใช้ไธโอซัลเฟต ($S_2O_3^{2-}$) และซัลเฟอร์ (S^0) ได้ด้วย นอกจากนี้แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตยังสามารถใช้สารอินทรีย์บางตัวเป็นแหล่งพลังงานโดยการเกิดกระบวนการหมัก (Fermentation) ได้ในกรณีที่ไม่มีซัลเฟตหรือตัวรับอิเล็กตรอนตัวอื่น เมื่อไม่มีซัลเฟตแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจะสามารถหมักไพรูเวตได้อะซิเตท คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน แต่ไม่สามารถหมักแลกเตทหรือเอทานอลได้ เนื่องจากพลังงานที่ได้จากการหมักไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโต ดังนั้นในกระบวนการหมัก ถ้าไม่มีซัลเฟตแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตบางส่วนก็สามารถอยู่รอดได้ แต่พลังงานจากกระบวนการหมักมีค่าน้อยกว่าพลังงานที่ได้จากการรีดิวซ์ซัลเฟต ดังนั้นแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจะใช้ซัลเฟตให้หมดก่อนจึงจะหันไปใช้กระบวนการหมัก (ปริญา รัตนา, 2549)

2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต

1) อุณหภูมิ

โดยทั่วไปแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตที่ได้จากการเลี้ยงเชื้อบริสุทธิ์จะมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตในช่วง 30-40°C การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีผลต่อแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตค่อนข้างมาก การเกิดซัลเฟตรีดักชันแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตในดินตะกอนน้ำค็มลดลง 2-3.9 เท่า เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปจากช่วงที่เหมาะสม 10°C

2) ความต้องการเกลือและความทนต่อเกลือ

ความต้องการเกลือของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของแบคทีเรีย เช่น จากน้ำเค็ม หรือน้ำกร่อย และจากน้ำจืด แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตที่ได้จากแหล่งน้ำเค็มหรือน้ำกร่อยจะสามารถเจริญเติบโตได้ดี เมื่อมีปริมาณเกลืออยู่ในระดับที่ค่อนข้างสูง แต่ถ้านำมาเลี้ยงในสภาพที่มีความเค็มต่ำอัตราการเจริญเติบโตก็จะลดลง ชนิดและปริมาณของเกลือสำหรับแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจากแหล่งน้ำเค็มที่เหมาะสมคือ NaCl 20 กรัมต่อลิตร $MgCl_2$ 1.5 กรัมต่อลิตร นอกจากเกลือทั้งสองชนิดนี้แล้ว บางสปีชีส์ต้องการ $CaCl_2$ ที่ความเข้มข้นต่ำ 0.5 กรัมต่อลิตร ส่วนแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตที่มาจากน้ำจืดอัตราการเจริญเติบโตจะถูกยับยั้ง ถ้ามีปริมาณความเข้มข้น NaCl เท่ากับความเข้มข้นของน้ำทะเลอยู่ที่ประมาณ 27 กรัมต่อลิตร

3) พีเอช

พีเอชที่เหมาะสมต่อแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตอยู่ที่ประมาณ 7 และจะถูกยับยั้งที่พีเอชต่ำกว่า 6 หรือสูงกว่า 9 ในปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอาหารของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตพบว่า เป็นปฏิกิริยาที่ใช้ไฮโดรเจนอิออนทำให้เกิดไบคาร์บอนเนตที่สภาพเป็นด่าง แต่ในกรณีการเกิดซัลเฟตรีดักชันของสารอาหารที่มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนมาก ผลของปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอาหารจะใช้ไฮโดรเจนอิออนขึ้นมาทำให้ค่าพีเอชของระบบลดลงได้ เมื่อพิจารณาได้ว่าถ้าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือไฮโดรเจนซัลไฟด์หนีออกจากตัวกลางจะทำให้ปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันมีค่าพีเอชสูงขึ้น

4) ความมีชีวิตรอดในสภาวะที่มีออกซิเจน

แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจัดเป็นแบคทีเรียชนิดทนต่อออกซิเจนไม่ได้ แม้ว่าจะมีปริมาณเพียงเล็กน้อยก็ตาม แต่ก็พบว่ายังสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีออกซิเจนอิสระชั่วคราว และสามารถฟื้นตัวได้เมื่อกลับสู่สภาวะไร้ออกซิเจน นอกจากนี้ยังพบว่าซัลไฟด์ที่อยู่ในตัวกลางมีบทบาทต่อผลกระทบของออกซิเจนที่มีผลต่อแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตบางสปีชีส์ในลักษณะที่แตกต่างกัน ในกรณีที่มีซัลไฟด์พร้อมกับออกซิเจนมีผลกระทบทางลบมากกว่ากรณีที่มีออกซิเจนเพียงอย่างเดียว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5) การเปลี่ยนรูปร่างลักษณะหรือการจับกลุ่มของเซลล์และเซลล์ชนิดเส้นใย

การรวมกลุ่มของเซลล์แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตอาจเกิดจาการปรับตัวในสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีพ เช่น อุณหภูมิ พีเอช การมีออกซิเจนในตัวกลาง การมีสารให้อิเล็กตรอนหรือเกลืออยู่ในช่วงที่ไม่เหมาะสม จึงทำให้แบคทีเรียแสดงลักษณะที่ผิดปกติ (Morbid) เช่น เซลล์มีขนาดใหญ่ขึ้นมาจากการบวมหรือหยุดการเคลื่อนที่ อย่างไรก็ตามพบว่าการรวมกลุ่มหรือการเกาะติดผนังจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดึงอาหารที่เป็นตัวจำกัดการเจริญเตอบโตได้ดีกว่าเซลล์ที่แขวนลอยอยู่ในตัวกลาง

2.1.3 การควบคุมระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันด้วยการเติมซัลเฟต

กระบวนการบำบัดน้ำเสียที่มีซัลเฟตแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะเกิดปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชัน ซึ่งสารอินทรีย์จะถูกแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตใช้เป็นแหล่งอาหารและพลังงาน โดยการใช้สารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสียเป็นตัวให้อิเล็กตรอน และใช้ซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนได้ผลิตภัณฑ์คือ ซัลไฟด์ ปัจจัยที่ส่งผลต่อระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันคือ ปัจจัยที่ส่งผลต่อแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตในระบบ เนื่องจากการทำงานของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุด ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชัน การวัดระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันสามารถวัดได้จากปริมาณซัลเฟตที่ลดลง

ในสภาวะไร้ออกซิเจนแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตต้องแข่งขันกับแบคทีเรียกลุ่มอื่นๆ เพื่อแย่งการใช้สารอาหารและต้องแข่งขันกันเอง เพื่อแย่งการใช้ซัลเฟตในกรณีมีซัลเฟตอยู่อย่างจำกัด ถ้าแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตมีการดึงสารอาหารมาใช้ได้มาก ระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันก็จะเกิดสูงขึ้น แต่การดึงสารอาหารมาใช้ได้มากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมและปัจจัยต่างๆ เช่น ความเข้มข้นของสารอาหาร แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตต้องมีตัวให้อิเล็กตรอน คือ ซีโอดี และตัวรับอิเล็กตรอน คือ ซัลเฟต จึงจะเกิดกระบวนการซัลเฟตรีดักชันได้ ถ้าในสภาวะที่มีซัลเฟตมากเกินพอ ซีโอดีจะเป็นตัวจำกัดระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชัน แต่ถ้าในระบบมีซีโอดีมากเกินพอซัลเฟตจะกลายเป็นตัวจำกัดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต และเป็นตัวแปรสำคัญในการกำหนดระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชัน ดังนั้นจึงต้องมีการคำนวณอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตให้เพียงพอต่อการเกิดซัลเฟตรีดักชัน คือ 5:1 (อุรชา เศรษฐ์ธีรกิจ, 2542)

2.1.4 ส่วนประกอบของซัลไฟด์ในน้ำ

ซัลไฟด์ในน้ำและน้ำเสียสามารถจำแนกได้ 3 ประเภท (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และมั่นรักษ์ ตัณฑุลเวศม์, 2545)

1) ซัลไฟด์ทั้งหมด (Total sulfide)

ซัลไฟด์ทั้งหมด ได้แก่ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลาย (Dissolved H_2S) อิออนซัลไฟด์ (S^{2-}) และอิออนไบซัลไฟด์ (HS^-) รวมทั้งสารประกอบซัลไฟด์ที่ปนกับตะกอนแขวนลอย ปริมาณซัลไฟด์ขึ้นอยู่กับพีเอชของน้ำ กล่าวคือ ที่พีเอช 11 และ 12 จะมีซัลไฟด์ละลาย (S^{2-}) น้อยกว่า 0.05%

2) ซัลไฟด์ละลาย (Dissolved sulfide)

ซัลไฟด์ละลาย คือ อิออนซัลไฟด์ (S^{2-}) และอิออนไบซัลไฟด์ (HS^-) ที่เหลืออยู่หลังจากการกำจัดตะกอนแขวนลอยออกจากน้ำด้วยวิธีฟล็อกคูเลชันและตกตะกอน

3) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์อิสระ (Unionized hydrogen sulfide)

ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ได้แก่ สารประกอบซัลไฟด์ที่อยู่ในรูปก๊าซซึ่งไม่แตกตัวเป็นอิออน

2.1.5 สมดุลมวลซัลเฟอร์

เมื่อแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตใช้ซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ซัลเฟตจะถูกรีดิวซ์และเปลี่ยนไปอยู่ในรูปซัลไฟด์ โดยซัลเฟอร์ที่เกิดขึ้นมีอยู่หลายรูปแบบ ได้แก่ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในเฟสก๊าซ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายน้ำที่ไม่แตกตัว HS^- และ S^{2-} ในเฟสของเหลว รวมถึงซัลไฟด์ที่ตกตะกอนผลึกกับโลหะเป็นตะกอนผลึกของโลหะซัลไฟด์ โดยสภาวะสมดุลระหว่างก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายน้ำที่ไม่แตกตัวสามารถอธิบายได้โดยใช้กฎของเฮนรี สัดส่วนระหว่างไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายน้ำที่ไม่แตกตัว HS^- และ S^{2-} สามารถดูได้จากพีเอชของระบบบำบัด สมดุลมวลซัลเฟอร์หาได้จาก (อุรชา เศรษฐ์ธีรกิจ, 2542)

$$SO_4^{2-}{}_{in} = SO_4^{2-}{}_{eff} + S^{2-} + HS^- + H_2S_{(aq)} + H_2S_{(gas)}$$

เมื่อ $SO_4^{2-}{}_{in}$ = ซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปซัลเฟตในน้ำเข้า

$SO_4^{2-}{}_{eff}$ = ซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปซัลเฟตในน้ำออก

S^{2-} = ซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปซัลไฟด์อิออน

HS^- = ซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายน้ำที่แตกตัว

$H_2S_{(aq)}$ = ซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปซัลไฟด์ละลายน้ำไม่แตกตัว

$H_2S_{(gas)}$ = ซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปไฮโดรเจนซัลไฟด์ในสถานะก๊าซ

และ % sulfur recovery = $[(SO_4^{2-}{}_{eff} + S^{2-} + HS^- + H_2S_{(aq)} + H_2S_{(gas)})/ SO_4^{2-}{}_{in}] \times 100$

2.2 การบำบัดซัลเฟต

การเลือกกระบวนการบำบัดซัลเฟตขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น ความเข้มข้นของซัลเฟต ระดับของการบำบัด และความยากง่ายของการควบคุมดูแลระบบ ซึ่งขึ้นอยู่กับความสามารถที่จะนำไปปรับใช้ แบ่งออกเป็น 3 วิธี ได้แก่ การบำบัดทางกายภาพ การบำบัดทางเคมี และการบำบัดทางชีวภาพ

2.2.1 การบำบัดทางกายภาพ

1) การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion Exchange)

การแลกเปลี่ยนประจุ คือ การที่ประจุของสารมลพิษในน้ำไปแลกเปลี่ยนกับประจุอิสระของสารตัวกลาง เช่น ในปฏิกิริยากำจัดซัลเฟต ซัลเฟตอิออน (SO_4^{2-}) จะแลกเปลี่ยนกับไฮดรอกไซด์อิออน (OH^-) ของสารตัวกลาง (R) เกิดเป็น SO_4R

$$ROH + SO_4^{2-} \longrightarrow SO_4R + 2\ OH^-$$

โดยทั่วไปแล้วสารตัวกลาง (Media) จะมีลักษณะเป็นรูพรุนและยอมให้น้ำผ่านได้มีรูปร่างกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4-0.8 มิลลิเมตร ปัจจุบันสารดังกล่าวที่นิยมใช้ คือ เรซิน ซึ่งมี 2 ประเภท คือ เรซินแบบที่มีประจุอิสระเป็นประจุบวก (Cationic resin) ซึ่งใช้กำจัดสารมลพิษที่มีประจุบวก เช่น แคลเซียม (Ca^{2+}) แมกนีเซียม (Mg^{2+}) และเรซินแบบมีประจุลบ (Anionic resin) ซึ่งใช้กำจัดสารมลพิษที่มีประจุลบ เช่น ซัลเฟต (SO_4^{2-}) ไนเตรท (NO_3^-) เมื่อใช้งานเรซินไประยะหนึ่งแล้วประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนประจุของเรซินจะน้อยลง เนื่องจากประจุอิสระถูกแลกเปลี่ยนไปหมด จึงต้องมีการทำรีเจอเนอเรชัน (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2547)

2) วิธีการออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse Osmosis)

ถูกนำมาใช้ในการบำบัดอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นตัวทำละลายที่ดีและมีขนาดโมเลกุลเล็กมาก จึงสามารถแพร่กระจายผ่านเมมเบรนได้ง่าย แต่ข้อจำกัดของการบำบัดน้ำแบบ RO จะให้ผลผลิตน้ำที่มีอัตราการไหลต่ำ ดังนั้นจึงต้องการพื้นที่ผิวของเมมเบรนสูง เพื่อให้ได้ปริมาณมากภายใน

เวลาที่เหมาะสม นอกจากนั้นการบำบัดน้ำแบบ RO ซึ่งเกิดปัญหาของการอุดตันและการเสียหายของเมมเบรน หากน้ำที่นำมาบำบัดมีการปนเปื้อนสูงจำเป็นต้องนำน้ำไปผ่าน Pre-filter เพื่อขจัดสารแขวนลอยที่มีโมเลกุลใหญ่และขจัดสารประกอบคลอไรด์ และหากต้องการนำน้ำจากการบำบัดแบบ RO ไปใช้อุปโภคบริโภคต้องนำน้ำที่ผ่านเมมเบรมมาแล้วไปผ่าน Post-filter อีกครั้งหนึ่ง เพื่อเป็นการขจัดกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์

การบำบัดน้ำแบบ RO เกี่ยวข้องกับการแยกอิออนโดยเทคนิค Ion Exclusion เนื่องด้วยคุณสมบัติจะผ่าน Semipermeable RO Membrane ได้ แต่พวกโมเลกุลของตัวถูกละลายได้ เช่น เกลือ น้ำตาล จะถูกดักไว้ Semipermeable Membrane จะขจัดโมเลกุลเกลือโดยใช้หลักการของประจุ ถ้ายิ่งมีประจุมากจะยิ่งถูกขจัดได้ง่าย ระบบ RO จะสามารถกำจัดสารอินทรีย์ละลายได้ดี และสามารถกำจัดสารได้มากกว่าระบบอื่นๆ แต่จะมีราคาค่าลงทุนและค่าดำเนินการสูงกว่าระบบอื่นๆ

ในกรณีที่น้ำเค็มมีความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร ความดันออสโมติก 25 บาร์ ขณะที่น้ำมีความเข้มข้นแคลเซียมต่ำกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และซัลเฟตต่ำกว่า 700 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถใช้การออสโมซิสแบบเดิมได้ แต่เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจึงได้มีการปรับปรุงการออสโมซิสแบบเดิมให้เป็นการออสโมซิสแบบใหม่ที่เรียกว่า Seeds Reverse Osmosis (SRO) ที่พัฒนามาเพื่อบำบัดน้ำจากเหมืองแร่ของแอฟริกาใต้ (Harries, 1985)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2.2 การบำบัดทางเคมี

1) การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical Precipitation)

กระบวนการตกตะกอนทางเคมีเป็นกระบวนการทางฟิสิกส์-เคมีที่เปลี่ยนสารที่อยู่ในรูปของสารละลายให้อยู่ในรูปของตะกอน ซึ่งจะแยกออกจากสารละลายน้ำนั้นได้ การตกตะกอนทางเคมีขึ้นอยู่กับสภาวะสมดุลทางเคมีที่มีผลต่อการละลายในน้ำของสารนั้นๆ ซึ่งการตกตะกอนทางเคมีเกิดขึ้นได้หลายวิธี โดยมีกระบวนการเป็นไปตามขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่งหรือหลายขั้นตอนรวมกันดังต่อไปนี้ (อุบลวรรณ กมลศิริประเสริฐ., 2536)

1) ใส่สารเคมีที่สามารถทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสารที่ละลายในน้ำ เพื่อเปลี่ยนเป็นสารประกอบใหม่ให้มีคุณสมบัติละลายน้ำได้น้อยลง

2) ใส่สารเคมีที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาวะสมดุลการละลายน้ำให้เลื่อนมาถึงจุดที่สารละลายในน้ำไม่สามารถละลายได้อีกต่อไป จึงเกิดการรวมตัวแล้วตกตะกอน

3) เปลี่ยนอุณหภูมิของสารละลายอิ่มตัวหรือเกือบอิ่มตัวไปในทิศทางที่ให้ค่าการละลายลดลง จนเปลี่ยนไปอยู่ในสภาวะของแข็ง เนื่องจากค่าการละลายน้ำขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

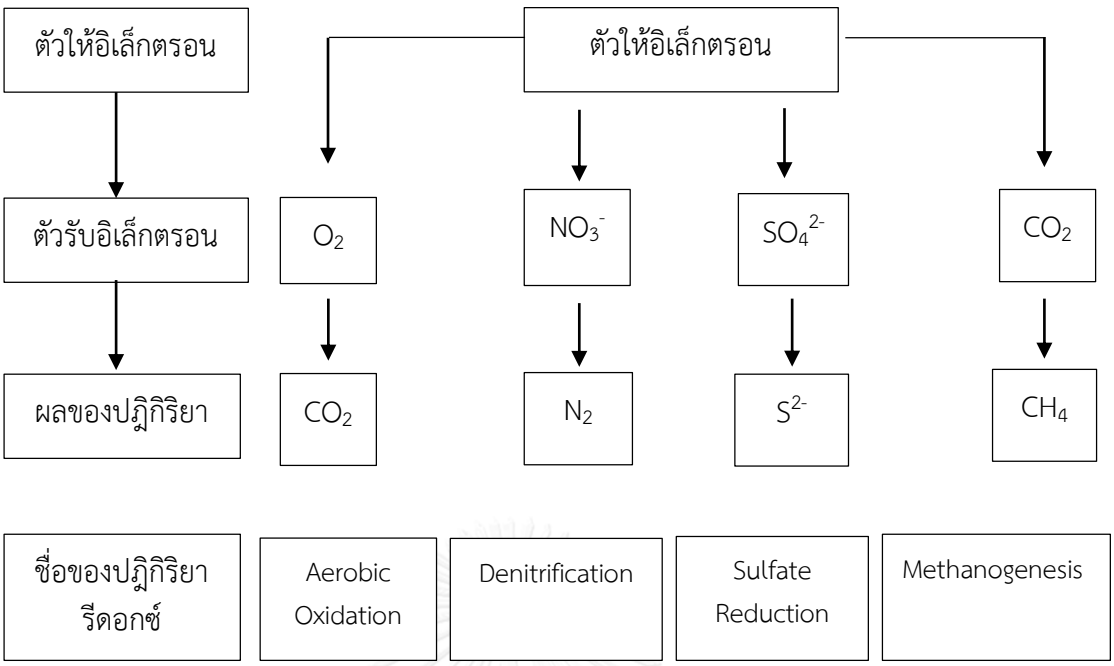
กระบวนการตกตะกอนทางเคมีเป็นกระบวนการที่แตกต่างจากกระบวนการโคแอกกูเลชัน เพราะการตกตะกอนทางเคมีเป็นการเติมสารลงไปในน้ำเพื่อให้ทำปฏิกิริยากับสารที่ละลายน้ำเกิดเป็นสารประกอบใหม่ซึ่งตกตะกอนที่ใหญ่และหนักจมตัวได้ ส่วนใหญ่โคแอกกูเลชันเป็นการเติมสารเคมีเพื่อช่วยให้สิ่งสกปรกที่เป็นตะกอนขนาดเล็กรวมตัวกันเป็นก้อนใหญ่

การตกตะกอนด้วยอนุมูลซัลเฟตเป็นการตกตะกอนอนุภาคบวกหรือโลหะหนักออกจากน้ำเสียในรูปโลหะหนักซัลเฟต ตัวอย่างเช่น การกำจัดซัลเฟตออกจากน้ำเสียด้วยแบเรียมคาร์บอนเนต (Kun, 1972)

$$BaCO_{3(s)} + SO_4^{2-} \longrightarrow BaSO_{4(s)} + CO_3^{2-}$$

2.2.3 การบำบัดทางชีวภาพ

กลไกพื้นฐานในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียด้วยกระบวนการทางชีวภาพไม่ว่าจะเป็นกระบวนการบำบัดแบบใช้ออกซิเจนหรือไม่ใช้ออกซิเจนมีพื้นฐานเดียวกัน คือ ปฏิกิริยาเคมีออกซิเดชัน-รีดักชัน หรือที่เรียกว่า ปฏิกิริยารีดอกซ์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่มีการถ่ายทอดอิเล็กตรอนระหว่างตัวให้อิเล็กตรอน (Electron donor) ตัวรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) โดยตัวให้อิเล็กตรอนในน้ำเสียจะเป็นสารอินทรีย์หรือมลสารในน้ำเสีย ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานคาร์บอน ส่วนตัวรับอิเล็กตรอนในน้ำเสียจะมีหลายชนิดและมักจะเป็นสารอย่างอื่นที่ไม่ใช่สารอินทรีย์ เช่น ออกซิเจน ไนเตรท ซัลเฟต เป็นต้น เมื่อเกิดการถ่ายทอดอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์จะทำให้เกิดพลังงาน โดยพลังงานส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปในรูปพลังงานความร้อน และอีกส่วนหนึ่งจะถูกนำไปในใช้ในการดำรงชีวิตและสร้างเซลล์ใหม่ ดังนั้นเมื่อพิจารณาที่ตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายจะสามารถจำแนกกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยารีดอกซ์ในการบำบัดน้ำเสีย
(มั่นสิน, ตัณฑุลเวศม์, 2536)

จากรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่ากระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนต่างจากกระบวนการบำบัดแบบใช้ออกซิเจน ตรงที่ตัวรับอิเล็กตรอนไม่ใช่ออกซิเจน แต่เป็นสารอื่นๆในน้ำเสีย เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ไนเตรท ซัลเฟต เป็นต้น ปฏิกิริยาจะแตกต่างไปตามตัวรับอิเล็กตรอน โดยที่ชนิดของตัวให้และรับอิเล็กตรอนในน้ำเสียเป็นสิ่งที่จะกำหนดว่าปฏิกิริยาชนิดใดจะเกิดขึ้นก่อนหรือหลัง

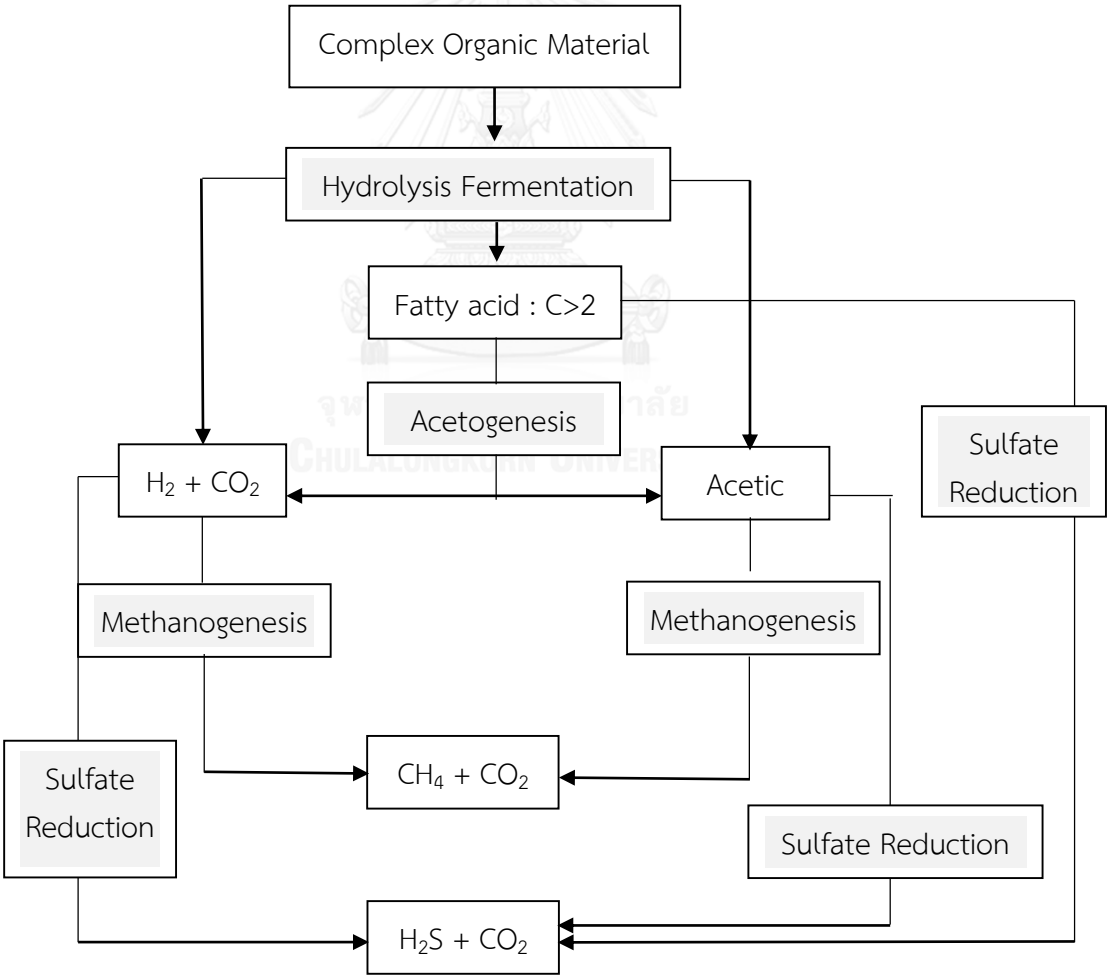
ในกรณีที่น้ำเสียมีตัวรับอิเล็กตรอนหลายชนิดจะพิจารณาจากปัจจัยทางเทอร์โมไดนามิกส์ โดยจะเรียงลำดับปฏิกิริยาตามปริมาณพลังงานที่ได้รับจากมากไปน้อยตามชนิดของตัวรับอิเล็กตรอน ได้แก่ ออกซิเจน ไนเตรท ซัลเฟต และคาร์บอนไดออกไซด์ ในกรณีย่อยสารอินทรีย์ในน้ำเสียเดียวกัน นอกจากนี้ต้องพิจารณาปัจจัยอื่นๆ เช่น ปัจจัยทางไคเนติก และปัจจัยทางสภาวะแวดล้อมต่างๆ เช่น อุณหภูมิ พีเอชที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

ข้อดีของกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน ได้แก่

- ได้ก๊าซมีเทนเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยา
- เกิดตะกอนสลัดจ์น้อย
- ต้องการไนโตรเจนและฟอสฟอรัสต่ำ
- สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีบีโอดีหรือซีโอดีสูงๆได้

2.2.3.1 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน

หลักการของการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน คือ ทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ในของเสียที่มีโมเลกุลใหญ่ ๆ ไปเป็นสารที่มีโมเลกุลเล็กลงเรื่อย ๆ ดังรูปที่ 2.3 โดยอาศัยปฏิกิริยาชีวเคมีของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียในสภาพไร้ออกซิเจน



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน (Speece, 1996)

ขั้นตอนที่ 1 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ขั้นตอนนี้สารอินทรีย์ยังอยู่ในรูปโมเลกุลใหญ่ ไม่สามารถจะย่อยสลายได้ทันทีจำเป็นที่จะต้องมีการทำให้เกิดการแตกตัวเป็นโมเลกุลเล็กเสียก่อนโดยมีแบคทีเรียกลุ่มแรกปล่อยเอนไซม์มาช่วยเร่งการแตกตัวของโมเลกุล แบคทีเรียกลุ่มนี้จะได้รับสารอาหารบางชนิดจากสารอินทรีย์ผ่านการดูดซึมเข้าสู่เซลล์ได้โดยตรง

ขั้นตอนที่ 2 ปฏิกิริยาสร้างกรดไขมันระเหย (Acidogenesis) แบคทีเรียอีกกลุ่มจะทำการย่อยสลายโมเลกุลที่แตกตัวแล้วจากขั้นตอนแรกให้เป็นกรดอินทรีย์ ซึ่งได้แก่ กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก กรดบิวทิริก เป็นต้น แบคทีเรียทีกลุ่มนี้เรียกว่า Acid Forming Bacteria เป็นแบคทีเรียที่อยู่ได้ทั้งในสภาพที่มีออกซิเจนหรือไม่มีออกซิเจน

ขั้นตอนที่ 3 ปฏิกิริยาการสร้างกรดอะซิติก (Acetogenesis) แบคทีเรียสร้างกรดอะซิติก (Acetogenic) มีบทบาทสำคัญในการเป็นตัวเชื่อมระหว่างขั้นตอนการสร้างกรดไขมันระเหยและขั้นตอนการสร้างมีเทน คือ กรดไขมันระเหยที่ผลิตขึ้นจากขั้นตอนที่ 2 จะเป็นสารอาหารให้แบคทีเรียสร้างมีเทน แต่แบคทีเรียสร้างมีเทนไม่สามารถใช้กรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม เช่น กรดบิวทิริก กรดโพรไพโอนิกเป็นสารอาหาร จึงต้องอาศัยแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกย่อยสลายกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมให้กลายเป็นกรดอะซิติก คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน เพื่อให้แบคทีเรียสร้างมีเทนนำไปใช้ต่อไป

ขั้นตอนที่ 4 ปฏิกิริยาการสร้างมีเทน (Methanogenesis) ขั้นตอนนี้แบคทีเรียอีกกลุ่มหนึ่งซึ่งเรียกว่า Methanogens หรือ Methane Forming Bacteria จะทำการเปลี่ยนกรดอะซิติกและไฮโดรเจนเป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แบคทีเรียพวกนี้เป็นชนิดที่ต้องอยู่ในสภาพที่ไร้ออกซิเจน ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณของสารอาหารที่ Methanogens ต้องการ เช่น กรดอะซิติก จากปฏิกิริยาก่อนหน้านี้ ในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน ถ้าสารอินทรีย์มีซัลเฟต ซัลไฟต์ ไธโอซัลเฟต หรือสารประกอบซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปออกซิไดซ์เป็นส่วนประกอบ ปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้นจะมี 2 อย่างคือ ปฏิกิริยาสร้างมีเทน (Methanogenesis) และปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชัน ซึ่งอาศัยแบคทีเรียรีดิวซิงซัลเฟต (SRB) ทำหน้าที่ย่อยสลายไฮโดรเจนหรือสารประกอบอะซิเตท หรือสารอินทรีย์อื่น (ใช้เป็นสารให้อิเล็กตรอน) และมีซัลเฟต ซัลไฟต์หรือไธโอซัลเฟตเป็นสารรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย ผลสุดท้ายของปฏิกิริยาจะสร้างซัลไฟด์จากการทำซัลเฟตรีดักชัน

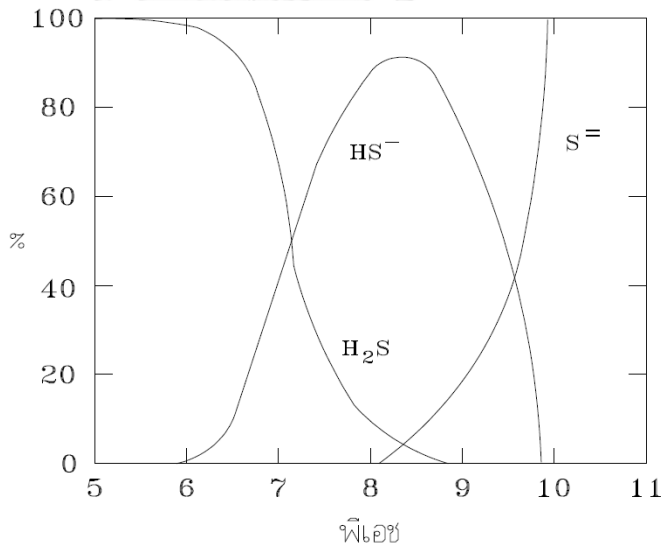
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

$4H_2 + HSO_4^- \longrightarrow HS^- + 4H_2O$ ΔG° = -38.0 kJ/mol

$CH_3COO^- + SO_4^- \longrightarrow HS^- + 2HCO_3^-$ ΔG° = -39.5 kJ/mol

ปฏิกิริยา Sulfate Reduction มีค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบบ์ที่สภาวะมาตรฐาน (ΔG°) เป็นลบแสดงว่าเป็นปฏิกิริยาที่เกิดได้เองหรือเกิดได้ง่ายในสภาวะปกติ และ ΔG° มีค่าต่ำกว่าปฏิกิริยาแบบเดียวกันใน Acetoclastic Methanogenesis (ΔG° = -31.0 kJ/mol) รวมทั้ง SRB มีอัตราการเจริญเติบโตสูงกว่า Methanogens ดังนั้น Sulfate Reduction จะเกิดก่อน Methanogenesis แต่ในทางปฏิบัติปฏิกิริยาทั้งสองจะเกิดควบคู่กันไป ในกรณีสัดส่วน COD/SO_4^{2-} มากกว่า 20 โอกาสจะเกิดปฏิกิริยาน้อยมาก แต่ถ้าสัดส่วน COD/SO_4^{2-} น้อยกว่า 2 จะเกิด Sulfate Reduction เป็นปฏิกิริยาหลัก (นันทวัน สังข์ทอง, 2552) ทั้งนี้ซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นจะละลายน้ำแตกตัวขึ้นกับพีเอชแสดงดังรูปที่ 2.4 น้ำที่มีพีเอชต่ำ จะพบไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) มากที่สุด ส่วนน้ำที่มีพีเอชเป็นกลางจะพบอิออนไบซัลไฟด์ (HS^-) และอิออนซัลไฟด์ (S^{2-}) ที่พีเอช 11-12 จะมีน้อยกว่า 0.05%

$$H_2S \longleftrightarrow HS^- + H^+ \longleftrightarrow S^{2-} + 2H^+$$



รูปที่ 2.4 สัดส่วนของ H_2S S^{2-} และ HS^- ที่ระดับพีเอช
(มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2545)

2.2.3.2 จุลินทรีย์ที่ใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน

สารอินทรีย์ในน้ำเสียเมื่อเข้าสู่ระบบจะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นถูกจุลินทรีย์เพียงกลุ่มเดียวนำไปใช้ต่อจะเกิดเป็นความสัมพันธ์แบบพึ่งพาอาศัยกัน แต่ถ้าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นถูกใช้โดยจุลินทรีย์หลายกลุ่มจะเกิดเป็นความสัมพันธ์แบบแข่งขันกัน ซึ่งในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะมีจุลินทรีย์อยู่ 2 กลุ่ม ได้แก่ แบคทีเรียสร้างกรดและสร้างมีเทนทำงานร่วมกัน โดยมีผลิตภัณฑ์หลักเป็นก๊าซมีเทน

1) กลุ่มแบคทีเรียสร้างกรด (Acid Forming Bacteria)

แบคทีเรียสร้างกรดจัดอยู่ในประเภท Facultative Anaerobic Bacteria เป็นแบคทีเรียที่ไม่ต้องการออกซิเจนอิสระ แต่สามารถทนได้ถ้ามีปริมาณน้อยๆ ส่วนใหญ่จะพบแบคทีเรียกลุ่มนี้ในน้ำเสีย เช่น Clostridium และ Coliform Bacteria ซึ่งในการย่อยสลายแบคทีเรียจะปล่อยเอนไซม์ออกมาย่อยให้เป็นโมเลกุลเล็กๆ แล้วดูดซึมเข้าสู่เซลล์ของแบคทีเรีย จากนั้นก็ย่อยให้เป็นกรดไขมันระเหยและก็สร้างเซลล์ใหม่ขึ้นด้วย กรดไขมันที่เกิดขึ้นได้แก่ กรดฟอร์มิก กรดอะซิติก และกรดโพรไพโนอิกเป็นส่วนใหญ่ ปริมาณกรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้นจะทำให้ค่าพีเอชลดต่ำลง หากสภาพเป็นด่างไม่เพียงพอจะทำให้ค่าพีเอชต่ำกว่า 6.4 ส่งผลให้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนมีประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง

2) กลุ่มจุลินทรีย์สร้างมีเทน (Methanogens)

จุลินทรีย์สร้างมีเทนจัดอยู่ในประเภท Obligate Anaerobic Bacteria เป็นจุลินทรีย์ที่ไม่ต้องการออกซิเจนในการเจริญเติบโต ถ้ามีออกซิเจนเพียงเล็กน้อยก็จะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์กลุ่มนี้ จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนล้มเหลว เนื่องจากไม่มีการสร้างก๊าซมีเทนจากกรดไขมันระเหย โดยทั่วไปจะพบจุลินทรีย์กลุ่มนี้ได้ในกระเพาะของสัตว์เคี้ยวเอื้อง หรือที่อับอากาศ เช่น Methanobacterium Methanosarcina และ Methanococus จะทำหน้าที่ย่อยกรดไขมันระเหยและแอลกอฮอล์จากการย่อยในขั้นแรก เพื่อเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จุลินทรีย์สร้างมีเทนเจริญเติบโตได้ดีที่พีเอช 6.8-7.2 ซึ่งจุลินทรีย์ชนิดนี้มีอัตราการเจริญเติบโตค่อนข้างช้าจึงเป็นขั้นตอนในการกำจัดอัตราการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

2.2.3.3 ถังกรองไร้อากาศ

ถังกรองไร้อากาศแบบมีตัวกลางมีรูปแบบถังทั้งทรงกระบอกและทรงสี่เหลี่ยม มีเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกว้างประมาณ 2-8 เมตร และมีความสูง 3-13 เมตร ตัวกลางติดตั้งไว้ตรงกลางของถังโดยมีความสูงร้อยละ 50-70 ของความสูงถัง วัสดุตัวกลางมีหลายชนิด เช่น หิน เซรามิก พลาสติก เป็นต้น พื้นที่ผิวของตัวกลางอยู่ประมาณ 100 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร

ระบบบำบัดแบบ Upflow Attached Growth Reactor มีค่า HRT ประมาณ 0.5-3 วัน และระบบสามารถรองรับอัตราภาระสารอินทรีย์อยู่ในช่วง 0.1-15 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การออกแบบระบบบำบัดแบบ Upflow Attached Growth Reactor (Metcalf และ Eddy, 2003)

Wastewater	Packing	Temp (°C)	COD loading ($kg/m^3/d$)	HRT (d)	Recycle ratio R/Q	COD removal (%)
Guar gum	Pall ring	37	7.7	1.2	5.0	61
Chemical process	Pall ring Pall ring	37 15-25	12-15 0.1-0.2	0.9-1.3 0.5-0.75	5.0 0	80-90 50-70
Domestic	Tublar	37	0.2-0.7	25-37	0	90-96
Landfill leachate	Cross-flow	35	1.5-2.5	2-3	0.25	89
Food canning	Cross-flow	30	4-6	1.8-2.5	0	90

Borja และ Banks (1994) ได้ออกแบบถังกรองไร้อากาศแบบไหลขึ้นบน (Upflow Anaerobic Filter) เพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มได้ทำการเดินระบบอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 215 วัน โดยถังกรองไร้อากาศมีปริมาตร 23 ลิตร อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate) 1.2-11.4 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน และระยะเวลาในการกัก

เก็บน้ำเสีย 1.5-6 วัน พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีมากกว่า 90% และสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ 20-165 ลิตรต่อวัน หรือประมาณ 60%

2.2.3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของถังกรองไร้อากาศ

1) ตัวกลาง จะใช้เป็นที่ยึดเกาะของจุลินทรีย์ โดยจุลินทรีย์จะยึดเกาะอยู่บริเวณผิวหน้าของตัวกลาง ดังนั้นในการออกแบบถังกรองไร้อากาศให้มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงต้องคำนึงถึงการเลือกใช้วัสดุตัวกลาง ดังนี้

- พื้นที่ผิววัสดุ ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบควรใช้ตัวกลางที่มีผิวหยาบ เพราะจะทำให้จุลินทรีย์ยึดเกาะได้ดีกว่าแบบผิวเรียบทำให้เกิดแผ่นฟิล์มชีวภาพหนา ปริมาณการผลิตก๊าซสูงขึ้น

- พื้นที่ผิวต่อปริมาตร ถ้ามีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงทำให้จุลินทรีย์มีพื้นที่ที่จะยึดเกาะมากขึ้น ส่งผลให้เพิ่มความเข้มข้นของจุลินทรีย์และเพิ่มอัตราภาระอินทรีย์ได้มากขึ้น

- ปริมาตรช่องว่าง มีจุลินทรีย์บางส่วนจะเกาะอยู่ระหว่างช่องว่างของตัวกลาง การที่มีช่องว่างระหว่างตัวกลางต่อปริมาตรสูงจะมีผลเช่นเดียวกับการที่ตัวกลางมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง แต่ถ้าจุลินทรีย์เกาะตามช่องว่างของตัวกลางมากเกินไปอาจทำให้เกิดการอุดตันได้ และเกิดการไหลลัดวงจร ทำให้ปริมาตรของถังที่ใช้งานได้จริงลดลง

- ลักษณะรูปร่างและการเรียงตัวของตัวกลาง มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด และยังเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมการไหลและการผสมภายในถังกรองรวมถึงการเกิดแผ่นฟิล์มชีวภาพ

2) ความลึกของชั้นตัวกลาง ประสิทธิภาพของถังกรองไร้อากาศจะเพิ่มขึ้น เมื่อความลึกของชั้นตัวสูงขึ้น แต่ในทางตรงกันถ้าชั้นตัวกลางลึกมากๆก็จะทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย ดูแลทำความสะอาดยาก รวมทั้งเพิ่มแรงดันสูญเสียภายในตัวกลาง

3) ทิศทางการไหล มีผลต่อการกระจายตัวของสารอาหารและการกระจายตัวของจุลินทรีย์ภายในถัง ทิศทางการไหลในถังกรองไร้อากาศได้แก่ ทางด้านล่างขึ้นบน (Upflow) ทางด้านบนลงล่าง (Downflow)

4) ระยะเวลากักเก็บน้ำเสีย (Hydraulic Retention Time) ถ้าระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสียมากก็จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด โดยทั่วไประยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสียในถังกรองไร้อากาศประมาณ 1-10 วัน

5) อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate) ถ้าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นก็จะสามารถบำบัดได้เร็วขึ้นลดปริมาตรของถังได้ด้วยซึ่งก็จะประหยัดค่าใช้จ่าย แต่ประสิทธิภาพในการบำบัดอาจลดลง

2.2.3.5 ข้อดีและข้อเสียของถังกรองไร้อากาศ

ข้อดี

1) ปริมาณสลัดจ์ที่หลุดไปกับน้ำทิ้งค่อนข้างน้อยเนื่องจากมีตัวกรองช่วยทำหน้าที่ในการกรองสารแขวนลอย

2) มีปริมาณความต้องการสารอาหารต่ำ (BOD : N : P = 100 : 1.1 : 1.2 เมื่อเทียบกับการบำบัดแบบใช้อากาศ BOD : N : P = 100 : 5 : 1) ทำให้มีปริมาณเซลล์ที่เกิดขึ้นใหม่น้อย

3) สามารถรองรับการเกิด Shock Load ได้ ซึ่งจะไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด

4) ใช้พลังงานในการเดินระบบน้อย

5) ใช้พื้นที่ในการก่อสร้างน้อย ดูแลรักษาระบบได้ง่าย

6) ได้ก๊าซมีเทนสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อได้

ข้อเสีย

1) ใช้ระยะเวลาในการเริ่มต้นเดินระบบ (Start-up) นานกว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้อากาศ

2) อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ค่อนข้างต่ำ ทำให้การตอบรับการเปลี่ยนแปลงระบบช้ามากและต้องออกแบบระบบให้มีระยะเวลาเก็บกักจุลินทรีย์ค่อนข้างนานแม้ที่อุณหภูมิสูงๆ

3) อาจเกิดการอุดตันได้ ถ้าใช้ถังกรองไร้อากาศเป็นเวลานาน หรือมีปริมาณสารแขวนลอยมากและขนาดใหญ่ แก้ไข้โดยล้างตัวกลางปล่อยน้ำออกจากถัง แล้วฉีดน้ำเข้าทางด้านบนของถัง

4) อาจเกิดการไหลลัดวงจรของน้ำเสียได้ เนื่องจากมีก๊าซเกิดขึ้นจากการหมักภายในถังกรองไร้อากาศ ทำให้ลดพื้นที่ในการสัมผัสของน้ำเสียกับจุลินทรีย์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง

5) ไม่สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีความเป็นพิษสูงได้ เนื่องจากจุลินทรีย์บางชนิดไม่สามารถทนต่อความเป็นพิษได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2.3.6 การคำนวณอัตราการบำบัดซีโอดี ซัลเฟตและซัลไฟด์ในถังกรองไร้อากาศ

$$\text{อัตราการบำบัดซีโอดี} = \frac{(\text{ซีโอดีเข้า} - \text{ซีโอดีออก})}{\text{ระยะเวลาการกักเก็บน้ำ}}$$

$$\text{อัตราการบำบัดซัลเฟต} = \frac{(\text{ซัลเฟตเข้า} - \text{ซัลเฟตออก})}{\text{ระยะเวลาการกักเก็บน้ำ}}$$

2.2.3.7 การคำนวณหาประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี ซัลเฟตและซัลไฟด์ในถังกรองไร้อากาศ

$$\text{ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี} = \frac{(\text{ซีโอดีเข้า} - \text{ซีโอดีออก}) \times 100}{\text{ซีโอดีเข้า}}$$

$$\text{ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟต} = \frac{(\text{ซัลเฟตเข้า} - \text{ซัลเฟตออก}) \times 100}{\text{ซัลเฟตเข้า}}$$

2.3 ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

ไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นก๊าซที่พบได้ทั่วไปในธรรมชาติ เนื่องจากมีกลิ่นเหมือนไข่เน่าจึงทำให้เป็นก๊าซที่รู้จักกันอย่างกว้างขวาง ก๊าซนี้เกิดขึ้นจากการเน่าเปื่อยและย่อยสลายของอินทรีย์สารจากปฏิกิริยาชีวเคมีที่เรียกว่า ซัลเฟตรีดักชัน (Sulfate Reduction) แบคทีเรียไร้อากาศหรือ Obligate Anaerobic Bacteria ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยใช้ซัลเฟตเป็นสารรับอิเล็กตรอนและเปลี่ยนเป็นซัลไฟด์

2.3.1 ลักษณะโดยทั่วไป

ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นก๊าซที่ไม่มีสี แต่มีกลิ่นคล้ายกลิ่นของไข่เน่าที่ความเข้มข้นต่ำ ส่วนที่ความเข้มข้นสูงๆจะมีกลิ่นหวาน (Sweetish odor)

1. ลักษณะทางกายภาพและเคมี

สมบัติทางกายภาพและเคมีของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

(U.S. Environmental Protection Agency, 2004) อ้างถึงใน (ณัฐพล รัตนมุขย์**,** 2549)

Characteristic	Information
Chemical formula	H_2S
CAS registry no.	7783-06-4
Molecular weight	34.08
Physical state	Gas
Vapor pressure at 25°C	20 mmHg
Malting point	-85.49°C
Boiling point	-60.33°C
Solubility in water at 20°C	4.1 g/L
Log K_{ow}	Not applicable
Henry's law constant at 20°C	1150 x 10^{-4} mol/L-atm
Conversion factors in air	1 ppm = 1.39 mg/m^3
Odor threshold in air (absolute)	0.2 ppm
Threshold limit value	TWA : 10 ppm
	STEL : 15 ppm (15 minutes)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2. ลักษณะความเป็นพิษ

ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นสารพิษที่มีฤทธิ์รุนแรงและเป็นก๊าซที่ทำให้เกิดการระคายเคืองตาและระบบทางเดินหายใจ ซึ่งเป็นอันตรายต่อมนุษย์ก่อให้เกิดอาการปวดหัว คลื่นไส้ ปวดบริเวณโพรงจมูกและลำคอ ในกรณีได้รับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ความเข้มข้นสูงๆอาจทำให้ขบวนการหายใจหยุดชะงัก หมดสติ และอาจเสียชีวิตได้ เนื่องจากก๊าซจะไปทำการยับยั้งกระบวนการสร้างออกซิเจนของเซลล์เนื้อเยื่อและลดปริมาณการถ่ายเทออกซิเจนของเลือด ทั้งยังไปกดทับเส้นประสาท เป็นผลทำให้เกิดอาการอัมพาตและระบบทางเดินหายใจล้มเหลวจนเสียชีวิตในที่สุด แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ลักษณะความเป็นพิษของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

(OSHA, 1995) อ้างถึงใน (ณัฐพล รัตนมุขย์**,** 2549)

ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ส่วนในล้านส่วน)	อาการที่ปรากฏ
10	เริ่มมีอาการระคายเคืองตา
50 - 100	ระบบทางเดินหายใจเกิดอาการระคายเคืองเล็กน้อย หลังสัมผัส 1 ชั่วโมง
100	เกิดอาการระคายเคืองตา ไอ สูญเสียประสาทสัมผัสการรับกลิ่น หลังสัมผัสเป็นเวลา 2 – 15 นาที จากนั้นจะปวดบริเวณตา ลำคอ เมื่อสัมผัสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง กรณีถ้าสัมผัสก๊าซมากกว่านี้จะทำให้อาการต่างๆรุนแรงขึ้นและอาจทำให้เสียชีวิตได้ในเวลา 48 ชั่วโมง
200 - 300	เกิดอาการระคายเคืองระบบทางเดินหายใจมากขึ้น โดยเฉพาะบริเวณลำคอ เมื่อสัมผัสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
500 - 700	หมดสติและอาจเสียชีวิตได้ หลังสัมผัสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
700 - 1000	ระบบทางเดินหายใจหยุดทำงาน หมดสติ และเสียชีวิตเฉียบพลัน หลังสัมผัสการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.3.2 การบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นก๊าซมลพิษที่เกิดจากกระบวนการในสภาวะไร้อากาศพบมากในบ่อพักน้ำเสียหรือในท่อระบายน้ำเสีย น้ำเสียที่มีซัลไฟด์มากเป็นน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่เกิดจากกระบวนการทางอุตสาหกรรม เช่น การกลั่นน้ำมันเชื้อเพลิง การแปรรูปอาหาร การผลิตแอลกอฮอล์และสุรา การผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษ เป็นต้น ทำให้เกิดการกัดกร่อนต่อท่อและวาล์ว กลิ่นเหม็นไข่เน่า และการเลือกกระบวนการในการบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มีด้วยกัน 3 วิธี ได้แก่ การบำบัดทางกายภาพ การบำบัดทางเคมี และการบำบัดทางชีวภาพ

2.3.2.1 การบำบัดทางกายภาพ

1. การดูดซับ (Adsorption)

กระบวนการดูดซับก๊าซมลพิษจะถูกดูดซับออกจากอากาศที่ระบายออกจากกระบวนการผลิตโดยการจับติดผิวของวัสดุของแข็งที่เรียกว่า ตัวดูดซับ ซึ่งมีลักษณะเป็นรูพรุน ส่วนก๊าซมลพิษที่ถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ กระบวนการดูดซับเมื่อดำเนินไประยะหนึ่งผิวของตัวดูดซับจะอิ่มตัวด้วยตัวถูกดูดซับ ดังนั้นเพื่อให้กระบวนการดูดซับดำเนินต่อไปได้จะต้องไล่ตัวถูกดูดซับออกจากตัวดูดซับ เรียกว่า กระบวนการฟื้นสภาพ (Regeneration) ขั้นตอนการฟื้นสภาพเริ่มจากการเพิ่มอุณหภูมิที่ชั้นของตัวดูดซับซึ่งทำให้ตัวถูกดูดซับระเหยและหลุดออกจากตัวดูดซับ จากนั้นจึงส่งผ่านตัวถูกดูดซับที่มีความเข้มข้นสูงเข้าไปในกระบวนการควบแน่น ในขั้นตอนนี้จะลดอุณหภูมิจนถึงจุดกลั่นตัวของตัวถูกดูดซับและทำให้ตัวถูกดูดซับกลายเป็นของเหลว ซึ่งสามารถนำตัวถูกดูดซับไปกำจัดด้วยวิธีที่เหมาะสมทำให้เสียค่าใช้จ่ายต่ำกว่าการกำจัดมลพิษโดยใช้กระบวนการควบแน่นโดยตรง

ตัวดูดซับส่วนใหญ่ที่ใช้ในอุตสาหกรรม ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ ซิลิกาเจล อะลูมินากัมมันต์ และซีโอไลต์ ตัวดูดซับที่มีคุณสมบัติในการดูดซับขึ้นกับธรรมชาติของสารที่นำมาผลิตและขั้นตอนการผลิต คุณสมบัตินี้รวมถึงพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ รูปร่างและขนาดช่องว่าง ปริมาตรของช่องว่าง คุณสมบัติที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งที่สำคัญคือ ประจุไฟฟ้าที่ผิวสัมผัส ถ้าตัวดูดซับมีประจุไฟฟ้าจะทำให้ไอน้ำสามารถเกาะติดและรบกวนการดูดซับสารอินทรีย์ระเหย เนื่องด้วยความชื้นพบได้ทั่วไปในอากาศ ดังนั้นการใช้ตัวดูดซับที่มีประจุที่ผิวจึงมักไม่ค่อยได้ผลสำหรับระบบควบคุมมลพิษอากาศ วัสดุดูดซับแต่ละชนิดก็มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันไปเป็นตัวบ่งบอกถึงความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการกำจัดก๊าซได้แตกต่างกัน

2.3.2.2 การบำบัดทางเคมี

1. การดูดซึม (Absorption)

การดูดซึมเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการกำจัดก๊าซ โดยอาศัยความเข้มข้นที่แตกต่างกันระหว่างก๊าซและของเหลวเป็นตัวทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของก๊าซมลพิษที่มีความเข้มข้นสูงไปยังของเหลว การเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซึมจะใช้สารละลายเคมีเติมลงไปเพื่อทำปฏิกิริยากับ

ก๊าซที่ละลายในของเหลว ประสิทธิภาพของการดูดซึมขึ้นอยู่กับชนิดของของเหลว ระยะเวลาในการสัมผัส พื้นที่ของผิวสัมผัส ความปั่นป่วนภายในหอสัมผัส และประสิทธิ์ของการแพร่กระจาย

1) Aqueous amine process เป็นการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้สารประเภทเอมีนเป็นตัวดูดซึม เช่น Monoethanolamine (MEA), Diethanolamine (DEA), Triethanolamine (TEA) และMethyl-ethanolamine (MDEA) ในรูปสารละลาย

2) Sea-board process เป็นการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต

3) Hot potassium carbonate process เป็นการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้สารละลายโปแตสเซียมคาร์บอเนต

4) Thylox process เป็นการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้สารเคมีประเภท aqueous sodium or ammonium thioarsenate solution เป็นวิธีการที่ใช้เฉพาะเนื่องจากสารเคมีราคาแพง

5) Shell process เป็นการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้สารเคมีประเภท aqueous tripotassium phosphate solution

6) Phenolase process เป็นการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้สารเคมีประเภท aqueous sodium phenolate solution วิธีนี้ประสิทธิภาพต่ำจึงไม่นิยมใช้

7) Stretford process เป็นการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้สารเคมีประเภท quinine solution ภายหลังทำปฏิกิริยาจะได้ hydroquinone และซัลเฟอร์

Horikawa และคณะ (2004) ได้ศึกษาการทำให้ก๊าซชีวภาพสะอาดขึ้นโดยการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ด้วยวิธีการดูดซึมทางเคมีในสารละลาย iron-chelated มีตัวเร่งปฏิกิริยา คือ Fe/EDTA ซึ่งจะเปลี่ยนก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้กลายเป็นธาตุกำมะถัน การเตรียมสารละลายที่ใช้เป็นตัวเร่งและผลของการดูดซึมทางฟิสิกส์ภายในน้ำบริสุทธิ์ภายใต้สภาวะเดียวกัน ผลการทดลองที่แสดงให้เห็น คือ ภายใต้สภาวะเดียวกันร้อยละของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่สูงสามารถกำจัดได้ในสารละลายที่ใช้เป็นตัวเร่งมากกว่าในน้ำบริสุทธิ์

2.3.2.3 การบำบัดทางชีวภาพ

กระบวนการบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ทางชีวภาพเป็นกระบวนการบำบัดที่มีประสิทธิภาพดีและไม่ด้อยไปกว่ากระบวนการบำบัดอื่นๆ พบว่าเป็นกระบวนการบำบัดที่ก่อให้เกิดของเสียจากการบำบัดมีการใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการน้อยกว่ากระบวนการอื่นๆจึงนับว่าเป็นกระบวนการบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่าและมีศักยภาพเพียงพอต่อการนำมาประยุกต์ใช้จริง หลักการสำคัญการบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยกระบวนการทางชีวภาพนั้น ได้แก่

1) การถ่ายโอนสภาวะของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จากสภาวะที่เป็นก๊าซไปสู่สภาวะที่เป็นของเหลว

2) การดูดซึมหรือขนส่งสารมลพิษในรูปของเหลวเข้าสู่เซลล์จุลินทรีย์

3) การเปลี่ยนรูปทางชีวภาพหรือการย่อยสลายสารมลพิษโดยจุลินทรีย์

ลักษณะของการบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ถูกจำแนกโดยรูปแบบทั่วไปเป็น 2 แบบ คือ การแพร่ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ผ่านจุลินทรีย์แขวนลอย ซึ่งการบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในรูปแบบนี้ส่วนใหญ่จะดำเนินการร่วมกับการให้อากาศในระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ (Activated sludge) ในระบบนี้ก๊าซจะถูกดูดซึมและใช้โดยจุลินทรีย์บำบัด สำหรับลักษณะของการบำบัดก๊าซในแบบที่สองคือ การแพร่ของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ผ่านชั้นบรรจุตัวกลาง (Packed bed) ในอดีตระบบนี้เป็นระบบที่ถูกออกแบบทางวิศวกรรมเพื่อใช้ในการบำบัดก๊าซที่มีกลิ่นเหม็นออกจากระบบบำบัดน้ำเสีย วัสดุที่ใช้ในระบบชั้นตัวกลางเริ่มต้นคือ ดิน เรียกว่า Soil filter ในระบบนี้ก๊าซที่มีกลิ่นจะถูกดูดซึมและใช้โดยจุลินทรีย์ในดินในระบบชั้นบรรจุตัวกลาง ต่อมามีการประยุกต์ใช้วัสดุอื่นในการนำมาเป็นวัสดุตรึงเซลล์ แต่ยังคงใช้หลักการเดิมในการบำบัดก๊าซในระบบบรรจุชั้นตัวกลาง

ปัจจุบันการแพร่ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ผ่านชั้นตัวกลางเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าสามารถจำแนกได้เป็น 3 ระบบหลัก ได้แก่ ระบบกรองชีวภาพ (Biofilter) ระบบโปรยกรองทางชีวภาพ (Biotrickling filter) ระบบดักจับทางชีวภาพ (Bioscrubber) แสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ความแตกต่างของแต่ละระบบ

(Devinny และคณะ, 1999)

ระบบ	จุลินทรีย์	การให้ความชื้น
กรองชีวภาพ	เกาะติด	ไม่เวียนกลับ/เวียนน้ำ
โปรยกรองทางชีวภาพ	เกาะติด	เวียนน้ำกลับ
ดักจับทางชีวภาพ	แขวนลอย	เวียนน้ำกลับ

โดยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะผ่านเข้ามาในระบบโดยการเป่าเข้าหรือดูดออก โดยมีทิศทางแบบผ่านขึ้นหรือลงในระบบจะบรรจุด้วยวัสดุตัวกลางที่มีแบคทีเรียเจริญอยู่ในรูปของฟิล์มชีวภาพ (Biofilm) บนผิวของวัสดุตัวกลาง ความชื้นหรือปริมาณน้ำในระบบเป็นปัจจัยสำคัญเนื่องจากแบคทีเรียในระบบจะสามารถดูดซึมสารอาหารที่อยู่ในสภาวะของเหลวเท่านั้น ดังนั้นการควบคุมปริมาณน้ำหรือความชื้นให้มีระดับที่เหมาะสมจะทำให้การโอนถ่ายก๊าไฮโดรเจนัลไฟด์จากสภาวะที่เป็นก๊าซไปสู่สภาวะที่เป็นของเหลวได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากนั้นจุลินทรีย์ในระบบจะสามารถดูดซึมเข้าสู่เซลล์เพื่อเป็นสารอาหารในการเจริญเติบโต จากที่กล่าวมาข้างต้นพบว่าแต่ละกระบวนการบำบัดมีทั้งข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไปซึ่งสรุปได้ดังตารางที่ 2.6

Nishimura และ Yoda (1997) ได้ศึกษาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากก๊าซชีวภาพที่มาจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ โดยใช้ Bioscrubber แบบ multiple bubble-tray air-tight contact tower ในการไล่ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ใช้ระบบปฏิกรณ์ 2 ถัง โดยถังแรกจะให้ก๊าซสัมผัสกับน้ำ ส่วนถังที่สองเป็นถังเติมอากาศซึ่งจะเป็นการแยกกระบวนการออกซิเดชันออกจากกระบวนการดูดซึม เพื่อป้องกันไม่ให้อากาศเข้าไปสัมผัสกับก๊าซชีวภาพ ส่วนน้ำที่มาจากตะกอนสลัดจ์จะถูกป้อนออกจาก contact tower อย่างต่อเนื่อง ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อยู่ในก๊าซชีวภาพจะถูกดูดซึมด้วยน้ำและถูกออกซิไดซ์เป็นซัลเฟตด้วย Sulfur Oxidizing Bacteria (SOB) หลังจากนั้นจะเวียนน้ำกลับไปยังถังเติมอากาศและผลการทดลองที่ได้นำไปใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานมันฝรั่งที่สามารถบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ 2,000 ส่วนในล้านส่วน ที่อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 40 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง มีประสิทธิภาพการบำบัดมากกว่า 90%

Margan-Sagastume และคณะ (2003) ได้ศึกษาการบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยถังกรองชีวภาพ (Biofilter) ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยภายในถังบรรจุตัวกลางที่เป็นปุ๋ยคอกมีองค์ประกอบจากเศษอาหาร ใบไม้ หญ้า และมูลม้า ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ลดลงจาก 100-90% ภายในระยะเวลาเดินระบบ 206 วัน และสามารถสรุปได้ว่าสาเหตุการลดลงของประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความชื้นและพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลาง นอกจากนี้การสะสมของซัลเฟตยังทำให้ pH ลดลงจาก 7.5 เป็น 4.5 ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมระบบหลังจากนั้นจึงทำการผสมตัวกลางจากปุ๋ยคอกใหม่ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดกลับมาใกล้เคียง 100 %

Clark และคณะ (2004) ทำการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อลดกลิ่นที่เกิดจากการหมักมูลสุกรด้วยถังกรองชีวภาพ (Biofilter) ภายในบรรจุตัวกลางที่ทำจากอนุภาคโพลิสไตรีนและ peat mass ในอัตราส่วน 3:1 โดยปริมาตรซึ่งตัวกลางมีปริมาตร 1.89 ลูกบาศก์เมตร อัตราการไหลของก๊าซ 100 ลิตรต่อวินาที ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 2-60 ส่วนในล้านส่วน และแอมโมเนีย 2-30 ส่วนในล้านส่วน โดยที่ไม่มีการเติมสารอาหารให้ระบบ จากการทดลองพบว่าสามารถลดกลิ่นได้ประมาณ 38% ที่ไม่มีการเติมสารอาหารถ้ามีการเติมสารอาหารลดกลิ่นได้ประมาณ 45% นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิมีผลดีต่อการปรับตัว (Acclimatisation phase) เท่านั้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบกระบวนการบำบัดก๊าซมลพิษ
(อลิสา วังใน, 2550)

กระบวนการ บำบัดก๊าซมลพิษ	ค่าใช้จ่าย ด้านพลังงาน	ลักษณะด้านอื่นๆ
กระบวนการทางกายภาพ		
- การดูดซับ	ปานกลาง	มีข้อจำกัดต่อก๊าซมลพิษที่มีความเข้มข้นต่ำถึงปานกลางและสำหรับก๊าซมลพิษที่มีน้ำหนักโมเลกุล 45-130
- การดูดซึม	ปานกลาง	มีข้อกำจัดต่อก๊าซที่ละลายน้ำได้ดี เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ อะซิโตน เมทานอล
กระบวนการทางเคมี		
- การตกตะกอนทางเคมี	ปานกลาง-สูง	อาจก่อให้เกิดสารพิษอื่นๆ เช่น กรดไฮโดรคลอริก ซึ่งอาจทำลายตัวเร่งปฏิกิริยา
กระบวนการทางชีวภาพ		
- การกรองชีวภาพ	ต่ำ	เป็นกระบวนการที่เหมาะสมต่อการบำบัดก๊าซมลพิษที่มีความเข้มข้นต่ำถึงปานกลาง และใช้ได้กับก๊าซมลพิษที่ถูกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเท่านั้น
- โปรยกรองทางชีวภาพ	ต่ำ-ปานกลาง	เป็นกระบวนการที่เหมาะสมต่อการบำบัดก๊าซมลพิษที่มีความเข้มข้นต่ำถึงสูง และใช้ได้กับก๊าซมลพิษที่ถูกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเท่านั้น
- ดักจับทางชีวภาพ	สูง	เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูงเหมาะสมต่อการบำบัดก๊าซมลพิษที่มีความเข้มข้นสูง เนื่องจากกระบวนการบำบัดเกิดจากการดูดซึมและปฏิกิริยาทางชีวเคมี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1. <u>จุลินทรีย์ที่ใช้บำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์</u>

จุลินทรีย์เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของกระบวนการบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยวิธีทางชีวภาพ กระบวนการนี้อาศัยเอนไซม์ในจุลินทรีย์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชีวภาพ (Biocatalyst) ในการย่อยสลายก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ประสิทธิภาพของการบำบัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยวิธีทางชีวภาพนั้นขึ้นกับชนิดของจุลินทรีย์ เนื่องจากจุลินทรีย์ที่แตกต่างชนิดกันจะมีการสร้างเอนไซม์ที่มีลักษณะแตกต่างกัน ซึ่งกลุ่มจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เรียกว่า Sulfur Oxidizing Bacteria (SOB) แบ่งออกเป็น 2 ประเภทดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 2.7 กลุ่มของจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Brock และคณะ, 2006)

กลุ่มจุลินทรีย์	แหล่งพลังงาน	ตัวให้อิเล็กตรอน	แหล่งคาร์บอน	ชนิดจุลินทรีย์
Photoautotrophs	Light	H_2S	CO_2	*Chlorobium, Chromatium, Allocromatium, Thiocapsa, Halochromatium, Rubrivivax, Rhodobacter, Chloroflexus*
Chemoautotrophs	Chemical	H_2S	CO_2	*Paracoccus, Starkeya, Beggiatoa, Thiobacillus, Thiomagaritha, Thioploca, Thiomicrospira, Sulfolobus, Acidianus*
Chemoheterotrophs	Chemical	H_2S	Organic carbon	*Beggiatoa, Thiothrix, Leucothrix*

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1) Photoautotrophs

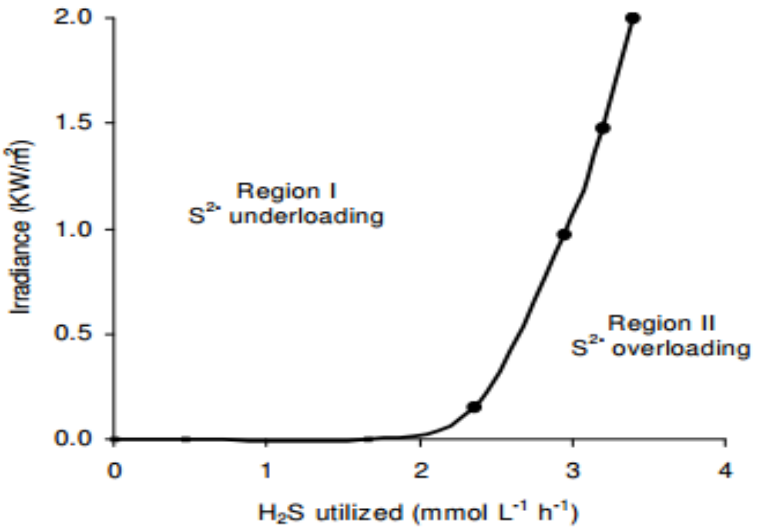
เป็นแบคทีเรียที่ใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอนและใช้แหล่งพลังงานจากแสงทำให้โมเลกุลของไฮโดรเจนซัลไฟด์ภายในแตกตัวเป็นไฮโดรเจนและซัลเฟอร์ ซึ่งไฮโดรเจนที่ได้จะรวมกับคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์จำพวกคาร์โบไฮเดรตและซัลเฟอร์เป็นผลพลอยได้

แบคทีเรียกลุ่ม Green sulfur bacteria (GSB) เช่น *Chlorobium limicola* มีความสามารถในการออกซิไดซ์ซัลไฟด์ให้เป็นซัลเฟอร์หรือกำมะถัน แบคทีเรียในกลุ่มนี้ต้องการแสง คาร์บอนไดออกไซด์ และสารอนินทรีย์ในการเจริญเติบโตภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน แบคทีเรียกลุ่ม GSB ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้เองและจะไม่สะสมซัลเฟอร์ไว้ในเซลล์ จุดเด่นของแบคทีเรียกลุ่ม GSB สามารถนำซัลเฟอร์ที่ได้จากการออกซิไดซ์มาใช้ประโยชน์ใหม่ได้อีก ปฏิกิริยา Photochemical ของแบคทีเรียกลุ่ม GSB แสดงดังสมการด้านล่าง

$$2nH_2S + nCO_2 \xrightarrow{\text{Light energy}} 2nS^0 + n(CH_2O) + nH_2O$$

Cork และคณะ (1985) ได้นำหลักการของ “ van Niel curve ” เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเข้าถังปฏิกรณ์ของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์กับปริมาณพลังงานแสงที่กระทบต่อหน่วยพื้นที่ภายในถังปฏิกรณ์แบบ Batch-fed ดังรูปที่ 2.5 จากกราฟจะพบว่าอัตราภาระบรรทุกซัลไฟด์ต่ำซัลไฟด์จะถูกออกซิไดซ์ไปเป็นซัลเฟอร์อย่างสมบูรณ์ไม่มีการเปลี่ยนรูปไปเป็นซัลเฟต แต่เมื่ออัตราภาระบรรทุกซัลไฟด์สูงต้องใช้พลังงานแสงมาก แต่ถ้าพลังงานแสงไม่เพียงพอจะทำให้ซัลไฟด์สะสมอยู่ในถังปฏิกรณ์และเมื่อภายใต้สภาวะปกติพลังงานแสงที่มากเกินไปจะทำให้ซัลไฟด์สะสมอยู่ในถังปฏิกรณ์เปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟต แสดงดังสมการด้านล่าง

$$nH_2S + 2nCO_2 + 2nH_2O \xrightarrow{\text{Light energy}} nSO_4^{2-} + 2nH^+ + 2n(CH_2O)$$



รูปที่ 2.5 van Niel curve
ปรับปรุงจาก (Cork และคณะ, 1985)

ดังนั้นการใช้แบคทีเรียในกลุ่ม Photoautotroph ในระบบบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ จะต้องปรับเปลี่ยนพลังงานแสงให้เพียงพอกับอัตราภาระบรรทุกซัลไฟด์ จึงจะมีการบำบัดซัลไฟด์ได้อย่างสมบูรณ์และจะได้มีปริมาณซัลเฟอร์จำนวนมาก

2) Chemoautotrophs

เป็นแบคทีเรียที่ใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอนและใช้แหล่งพลังงานจากการออกซิไดซ์สารประกอบอนินทรีย์ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ การย่อยสลายทางชีวภาพของไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยแบคทีเรียกลุ่มนี้จะเกิดภายใต้สภาวะแอโรบิก ซึ่งใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนหรือภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนอาจใช้ไนเตรทเป็นตัวรับอิเล็ก chemoautotrophs ำนล่าง

$$H_2S + CO_2 + \text{nutrients} + O_2 \longrightarrow \text{cell} + S \text{ and/or } SO_4^{2-} + H_2O$$

แบคทีเรียกลุ่มนี้มีหลายสปีชีส์ที่ศึกษากันอย่างแพร่หลายสำหรับการออกซิไดซ์สารประกอบอนินทรีย์ เช่น ซัลเฟอร์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ไธโอซัลเฟต เป็นต้น ตัวอย่างแบคทีเรียที่ใช้ เช่น *Thiobacillus Thermothrix Thiothrix* และ *Beggiatoa* เป็นต้น แบคทีเรียสปีชีส์ *Thiobacillus*

sp. ถูกศึกษาอย่างกว้างขวางในการเปลี่ยนไฮโดรเจนซัลไฟด์และสารประกอบซัลเฟอร์อื่นๆโดยกระบวนการทางชีวภาพ แบคทีเรียเหล่านี้สามารถเจริญเติบโตได้หลายสภาวะ เช่น สภาวะเป็นกรด สภาวะกึ่งไร้อากาศ เป็นต้น

2. ถังโปรยกรอง

ระบบโปรยกรองเป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่มีจุลินทรีย์เจริญเติบโตอยู่บนวัสดุตัวกลางไม่มีการเคลื่อนที่ ทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตติดอยู่บนตำแหน่งเดิมเสมอเป็นที่มาของ Fixed Film ลักษณะเช่นนี้ทำให้จุลินทรีย์อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่ไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากกักเก็บน้ำในระบบโปรยกรองมักจะสั้นเกินไปจนทำให้จุลินทรีย์ประเภทที่ว่ายน้ำอิสระไม่สามารถรักษาปริมาณหรือดำรงอยู่ได้ จุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตอยู่ในระบบจึงเป็นพวกที่ชอบเกาะบนผิววัสดุต่างๆ ระบบโปรยกรองประกอบด้วย 4 ส่วน ได้แก่ ถังใส่ตัวกลาง ระบบจ่ายน้ำเสีย ระบบระบายน้ำและอากาศ และถังตกตะกอนขั้นที่สอง (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2547)

1) ถังใส่ตัวกลาง

เป็นรูปทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางขนาดต่างๆ มีตัวกลางบรรจุในถัง แต่เดิมใช้หิน ปัจจุบันมีการใช้ตัวกลางอื่นๆ เช่น พลาสติก ไม้เนื้อแข็ง เป็นต้น เพื่อให้ใช้งานได้คงทนถาวรพอสมควร ทำเป็นรูปต่างๆเพื่อให้มีพื้นที่ผิวและมีช่องว่างระหว่างตัวกลางมาก ช่องว่างระหว่างตัวกลางที่มีมากจะถูกใช้เป็นทางสำหรับให้ออกซิเจนผ่านให้เกิดสภาพแอโรบิกด้วย

2) ระบบจ่ายน้ำเสีย

จะติดตั้งเหนือตัวกลางเป็นท่อยาวและเจาะรูด้านล่าง ท่อนี้จะหมุนช้าๆตามแนวรัศมีของถัง ทำให้น้ำเสียถูกโปรยลงบนผิวบนสุดของตัวกลางได้เต็มพื้นที่ของถัง ในการนี้น้ำเสียจะได้รับออกซิเจนในอากาศไปด้วยและไหลผ่านพื้นที่ผิวของตัวกลางไปลงสู่ชั้นล่าง

3) ระบบระบายน้ำและอากาศ

ระบบระบายน้ำทำหน้าที่รับน้ำเสียที่ผ่านผิวของตัวกลางลงมาแล้วและส่งต่อไปยังถังตกตะกอน การระบายอากาศมักจะทำโดยผ่านทางระบบระบายน้ำทิศทางการไหลของอากาศขึ้นกับอุณหภูมิสัมพัทธ์ระหว่างอากาศและน้ำเสีย ถ้าอุณหภูมิของอากาศข้างเคียงสูงกว่าน้ำของน้ำเสีย อากาศจะไหลจากข้างบนผ่านถังใส่ตัวกลางลงข้างล่าง แต่ถ้าในฤดูหนาวที่น้ำเสียอุณหภูมิสูงกว่าอากาศ อากาศจะไหลจากข้างล่างขึ้นข้างบน (Metcalf และ Eddy, 2003) ได้แนะนำว่าควรมี

ปริมาณอากาศไหลเข้าสู่ระบบอย่างต่ำที่สุดประมาณ 0.3 ลูกบาศก์เมตรต่อนาทีต่อตารางเมตร ของพื้นที่ถัง หรือถ้าอุณหภูมิของน้ำเสียใกล้เคียงกับอากาศควรมีการเติมอากาศในอัตราเดียวกันเพื่อให้มีปริมาณออกซิเจนเพียงพอ

4) ถังตกตะกอนขั้นที่สอง

ถังตกตะกอนขั้นที่สองสำหรับถังโปรยกรองจะมีลักษณะและการออกแบบคล้ายคลึงกับถังตกตะกอนขั้นที่สองในระบบเอเอส ซึ่งมีหน้าที่หลักเพื่อแยกตะกอนแขวนลอยออกจากน้ำทิ้งให้ได้น้ำทิ้งที่ออกจากถังตกตะกอนขั้นที่สองมีความใสปราศจากตะกอนแขวนลอย แต่จะไม่มีการเวียนตะกอนเหมือนระบบเอเอส

3. กลไกในการบำบัดน้ำเสียของระบบโปรยกรอง

ระบบโปรยกรองเป็นระบบที่อาศัยฟิล์มชีวภาพบนตัวกลางในการกำจัดบีโอดีซึ่งมาจากสารอินทรีย์ในน้ำเสียและได้รับออกซิเจนจากอากาศภายนอกฟิล์ม ซึ่งเป็นความสำคัญของมวลจุลินทรีย์ในฟิล์มชีวภาพและผลกระทบของอัตราเร็วของน้ำไหลหรือปัจจัยที่มีผลต่อระบบโปรยกรองดังนี้

1) ความสำคัญของมวลจุลินทรีย์ในฟิล์มชีวภาพ

ภายในฟิล์มชีวภาพของระบบโปรยกรองมีจุลินทรีย์แทบทุกชนิดนับตั้งแต่แบคทีเรียจนถึงแมลง สิ่งมีชีวิตเหล่านี้รวมกันอยู่เป็นกลุ่มจุลินทรีย์ที่มีนิเวศวิทยาอย่างซับซ้อนเป็นผลทำให้เกิดความสัมพันธ์ซึ่งต้องอาศัยซึ่งกันและกัน จุลินทรีย์ที่รับผิดชอบต่อการบำบัดน้ำเสีย คือ จุลินทรีย์ที่มีชีวิตภายในฟิล์มชีวภาพเป็นปัจจัยสำคัญของระบบโปรยกรอง มวลชีวภาพนี้มีลักษณะเป็นฟิล์มคล้ายเมือกเกาะอยู่บนวัสดุตัวกลาง สารอินทรีย์จะเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มชีวภาพโดยการแพร่ไปยังจุลินทรีย์ที่เกาะอยู่ภายในเพื่อเป็นอาหาร ผลจากปฏิกิริยาที่เป็นของเสียและผลผลิตอื่นๆของกระบวนการเมตาบอลิซึมจะถูกส่งออกไปจากฟิล์มชีวภาพ ผลผลิตได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ สารพอลิเมอร์ต่างๆ เอนไซม์ ออกซิเจนจะถูกขนส่งจากบรรยากาศภายนอกเข้าไปในน้ำและส่งต่อเข้าไปในฟิล์มชีวภาพเพื่อให้จุลินทรีย์ใช้ในกระบวนการหายใจ การบริโภคสับสเตรตและการเติบโตเกิดขึ้นได้ดีที่สุดที่ผิวนอกสุดของแผ่นฟิล์มชีวภาพ เพราะความเข้มข้นของสับสเตรตและออกซิเจนซึ่งซึมเข้าไปในฟิล์มจะมีน้อยหลังจากฟิล์มก่อตัวขึ้นจนได้หนาถึงระดับหนึ่งฟิล์มส่วนที่อยู่ด้านในจะขาดออกซิเจนทำให้จุลินทรีย์ตายและหลุดออกมา อัตราเร็วของการกำจัดสับสเตรตจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความหนาของ

ฟิล์มจนกระทั่งได้ความเร็วสูงสุด ซึ่งถูกกำจัดโดยการแพร่ของสารอาหารและออกซิเจน ดังนั้นจึงไม่มีเหตุผลที่จะทำให้ฟิล์มชีวภาพมีความหนาเกินความจำเป็น เนื่องจากมีตะกอนจุลินทรีย์ที่หลุดออกจากแผ่นฟิล์มอยู่เสมอและการเกิดโคแอกกูเลชันของสารคอลลอยด์จึงต้องมีถังตกตะกอนตามหลังระบบ ด้วยเหตุนี้ระบบโปรยกรองจึงเป็นระบบที่เกิดจากการรวมตะกอนของถังปฏิกิริยาแบบฟิล์มชีวภาพตรึงแน่นกับถังตกตะกอน ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อมวลจุลินทรีย์ในระบบโปรยกรองคือ พื้นที่ผิวของวัสดุตัวกลางยิ่งมีพื้นที่สำหรับการเติบโตยิ่งมากมวลของจุลินทรีย์ก็ยิ่งสูง ดังนั้นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและทำงานได้ดีจะต้องมีลักษณะที่สนับสนุนให้เกิดฟิล์มชีวภาพบางๆและให้น้ำและอากาศเคลื่อนที่ผ่านได้สะดวก วัสดุตัวกลางแบบพลาสติกมีข้อดีคือ สามารถสร้างฟิล์มชีวภาพอย่างบางได้และอุดตันได้ยากทำให้มีการให้กันอย่างแพร่หลาย

2) ผลกระทบของอัตราของน้ำไหล

ความเร็วของการไหลของน้ำที่ผ่านฟิล์มชีวภาพเป็นอีกตัวแปรหนึ่งซึ่งเป็นอิทธิพลต่อการกำจัดสับสเตรตในระบบโปรยกรอง แสดงว่าสับสเตรตและออกซิเจนต้องเคลื่อนที่เข้าไปในฟิล์มชีวภาพโดยการแพร่ เนื่องจาดอัตราเร็วของการแพร่ขึ้นอยู่กับความปั่นป่วนของน้ำที่ผ่านถังใส่ตัวกลาง แม้ว่าการเพิ่มความเร็วของน้ำสามารถเพิ่มอัตราเร็วของการกำจัดสับสเตรต แต่ก็ลดเวลาในการสัมผัสด้วย ดังนั้นประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อความเร็วของน้ำเพิ่มขึ้น รูปแบบของระบบโปรยกรองจะอธิบายตวามเร็วของน้ำที่ไหลผ่านระบบอยู่ในรูปของภาระชลศาสตร์ซึ่งเป็นอัตราไหลของน้ำต่อหน่วยพื้นที่ตัดขวางของถังใส่ตัวกลาง นอกจากนี้ความเร็วของน้ำยังมีอิทธิพลต่อความหนาทั้งหมดของฟิล์มชีวภาพอีกด้วย การควบคุมความเร็วของน้ำจึงเป็นวิธีหนึ่งในการควบคุมหรือป้องกันการอุดตันภายในระบบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4. ประเภทของระบบโปรยกรอง

ระบบโปรยกรองสามารถแบ่งได้ 4 ประเภท ตามค่าภาระชลศาสตร์ (Hydraulic Loading) และค่าภาระอินทรีย์ (Organic Loading) ดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 การออกแบบระบบบำบัดแบบโปรยกรอง

(Metcalf และ Eddy, 2003)

Design Characteristics	Low or standard Rate	Intermediate rate	High rate	High rate	Roughing
Type of packing	Rock	Rock	Rock	Plastic	Rock/ Plastic
Hydraulic loading ($m^3/m^2 \cdot d$)	1-4	4-10	10-40	10-75	40-200
Organic loading ($kgBOD/m^3 \cdot d$)	0.07-0.22	0.24-0.48	0.4-2.4	0.6-3.2	>1.5
Recirculation ratio	0	0-1	1-2	1-2	0-2
Filter flies	Many	Varies	Few	Few	Few
Sloughing	Intermittent	Intermittent	Continuous	Continuous	Continuous
Depth (m)	1.8-2.4	1.8-2.4	1.8-2.4	3.0-12.2	0.9-6
BOD removal efficiency (%)	80-90	50-80	50-90	60-90	40-70
Effluent quality	Well nitrified	Some nitrification	No nitrification	No nitrification	No nitrification
Power ($kw/10^3m^3$)	2-4	2-8	6-10	6-10	10-20

5. การออกแบบระบบโปรยกรอง

การออกแบบระบบโปรยกรองสามารถทำได้ 2 วิธี ดังนี้

1) ออกแบบตามภาระชลศาสตร์และภาระอินทรีย์ (Metcalf และ Eddy, 2003) จะเป็นการออกแบบโดยทำการเลือกประเภทของระบบโปรยกรองจากตารางที่ 2.8 จะทำให้ได้ค่าภาระชลศาสตร์และภาระอินทรีย์ตามประเภทของระบบโปรยกรองที่ได้คัดเลือกไว้ จากนั้นเมื่อทราบมวลของบีโอดีที่เข้าระบบต่อหนึ่งวัน (กิโลกรัมบีโอดีต่อวัน) ก็จะสามารถหาปริมาตรของตัวกลางได้จากค่าภาระอินทรีย์ ดังนั้นเมื่อทราบปริมาตรของตัวกลางแล้วก็จะสามารถหาพื้นที่หน้าตัดของถังโปรยกรองได้จากค่าภาระชลศาสตร์ ซึ่งการออกแบบโดยวิธีนี้จะไม่มีการหมุนเวียนน้ำรวมอยู่ด้วย

2) ออกแบบตาม WEF (Water Environment Federation, 2000) อ้างถึงใน (Metcalf และ Eddy, 2003)

การออกแบบตาม WEF นั้น สามารถออกแบบได้จากสูตรดังนี้

$S_e/S_0 = \exp(-K_{20}D/q^n)$

โดยที่ S_e = บีโอดีของน้ำทิ้ง (มิลลิกรัมต่อลิตร)

S_0 = บีโอดีของน้ำเสีย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

K_{20} = ค่าคงที่ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ค่านี้ได้จากการทดสอบ Pilot Plant ที่ตัวกลางพลาสติกมีความสูง 20 ฟุต ในกรณีที่อุณหภูมิห้องไม่เท่ากับ 20 องศาเซลเซียส ต้องหาค่า K จากสูตร $K_T = K_{20}(1.035)^{T-20}$

D = ความสูงของตัวกลาง (เมตร)

q = อัตราน้ำล้นผิวตัวกลาง (ลิตรต่อตารางเมตรต่อวินาที)

n = ค่าคงที่ 0.5

ในกรณีที่อุณหภูมิห้องไม่เท่ากับ 20 องศาเซลเซียส ต้องหาค่า K จากสูตร $K_T = K_{20}(1.035)^{T-20}$ และเมื่อนำไปใช้กับถังที่มีตัวกลางพลาสติกสูงไม่เท่ากับ 20 ฟุต และน้ำเสียมีบีโอดีไม่เท่ากับ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร จะต้องคำนวณค่า K ใหม่ ดังนี้

Depth & Organic Loading Correction: $K_2 = K_1(D_1/D_2)^{0.5}(S_1/S_2)^{0.5}$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

โดยที่ S_1 = 150 มิลลิกรัมบีโอดีต่อลิตร

S_2 = บีโอดีของน้ำเสีย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

D_1 = 20 ฟุต

D_2 = ความสูงของตัวกลาง

6. การหมุนเวียนน้ำ

การหมุนเวียนน้ำคือ การนำน้ำทิ้งที่ทางออกมาหมุนเวียนรวมกับน้ำเสียเข้าใหม่ การหมุนเวียนน้ำนั้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสูงขึ้นหรืออัตราเร็วในการบำบัดน้ำเสียสูงขึ้นและช่วยทำให้ผิวตัวกลางเปียกอย่างทั่วถึง

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์ (2547) ได้กล่าวถึงสาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพของระบบโปรยกรองดีขึ้น ดังนี้

1) การหมุนเวียนน้ำทำให้สารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำทิ้งนำกลับมาสัมผัสจุลชีพที่เกาะอยู่ภายในถังโปรยกรองอีก ซึ่งช่วยเพิ่มการสัมผัสระหว่างน้ำเสียกับจุลชีพ

2) การหมุนเวียนน้ำจะช่วยรักษาภาระชลศาสตร์ของระบบโปรยกรอง เมื่อมีปริมาณน้ำเสียไหลเข้ามากหรือน้อยกว่าปกติทำให้ชั้นกรองอยู่ในสภาพเปียกตลอดเวลา

3) การหมุนเวียนน้ำทำให้น้ำเสียในระบบบำบัดไม่ส่งกลิ่นเหม็นมาก เพราะน้ำป้อนกลับได้ช่วยเจือจางความสกปรกของน้ำเสียได้ในระดับหนึ่ง และยังช่วยควบคุมความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำของระบบโปรยกรอง

4) การหมุนเวียนน้ำช่วยให้เพิ่มปริมาณน้ำในถังโปรยกรองทำให้ช่วยกระจายน้ำเข้าถังโปรยกรองได้สม่ำเสมอต่อเนื่องตลอดเวลา ช่วยลดปัญหาอุดตันภายในถังโปรยกรองและยังช่วยลดปัญหาแมลงต่างๆที่มาตอมผิวตัวกลางที่ไม่มีน้ำโปรยเข้ามาตลอดเวลา

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ (2542) กล่าวถึงเหตุผลสำคัญที่จำเป็นต้องมีการหมุนเวียนน้ำ คือ การรักษาระดับภาระชลศาสตร์ให้คงที่ในอัตราที่เหมาะสม สำหรับระบบโปรยกรองที่มีหินเป็นตัวกลางและใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง ปริมาตรของถังที่คำนวณได้อาจมีขนาดใหญ่มากจนกระทั่งทำให้ระดับของภาระชลศาสตร์ต่ำมาก ในกรณีเช่นนี้การหมุนเวียนน้ำมีความจำเป็น เพราะจะช่วยให้ภาระชลศาสตร์สูงพอที่จะรักษาให้มีฟิล์มชีวภาพบางๆเกิดขึ้น และการหมุนเวียนน้ำอาจเป็นสิ่งจำเป็นที่หลีกเลี่ยงไม่ได้สำหรับสถานการณ์พิเศษบางอย่าง เช่น ความเป็นพิษของน้ำเสียเมื่อมีความเข้มข้นสูง หรือในกรณีที่มีสารพิษอยู่ในน้ำเสีย เป็นต้น กรณีแรกต้องการน้ำหมุนเวียนเป็นจำนวนมากเพื่อเจือจางความเข้มข้นของน้ำเสียจนความเป็นพิษน้อยลง การหมุนเวียนน้ำในอัตราสูงมากทำให้รูปแบบการไหลในถังเปลี่ยนจากแบบ Plug flow เป็นแบบการกวนสมบูรณ์ทำให้ลดความเข้มข้นของสารพิษได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

7. ข้อดีและข้อเสียของระบบโปรยกรอง

ข้อดี

1) พลังงานต่ำ โดยระบบโปรยกรองจะใช้พลังงานประมาณ 10 กิโลวัตต์ต่อ 10 ลูกบาศก์เมตร เมื่อนำไปเทียบกับระบบเอเอสที่ใช้พลังงานประมาณ 20-40 กิโลวัตต์ต่อ 10 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งประหยัดกว่า 2-4 เท่า

2) ควบคุมการทำงานได้ง่าย ระบบไม่ซับซ้อนยุ่งยากไม่จำเป็นต้องใช้คนที่มีความรู้มากในการดูแลระบบ

3) ตะกอนที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อย เพราะตะกอนมีความหนาแน่นที่สูงทำให้ลดปัญหาในการนำตะกอนไปกำจัด

4) เนื่องจากเป็นระบบบำบัดที่จุลินทรีย์เกาะติดตัวกลาง ไม่ได้แขวนลอยอยู่ในน้ำเสีย ดังนั้นระบบจมไม่มีปัญหาเรื่องสลัดจ์ไม่จมตัว

5) ระบบก่อสร้างได้ง่ายมีส่วนประกอบหรืออุปกรณ์ที่ใช้น้อย

6) ระบบโปรยกรองสามารถรับภาวะที่น้ำเสียเป็นพิษได้ดี

ข้อเสีย

1) ไม่สามารถบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้ เนื่องจากระบบมีออกซิเจนตลอดทั้งระบบทำให้ไม่สามารถสร้างแอนแอโรบิก หรือแอน็อกซิกโซนได้ สามารถแก้ไขโดยการสร้างถังบำบัดแบบไร้ออกซิเจนไว้ก่อนถังโปรยกรอง

2) น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมีลักษณะขุ่น แก้ไขโดยการเติมอากาศในถังรองรับน้ำทิ้งหรือเพิ่มถังเติมอากาศหลังจากผ่านระบบโปรยกรองแล้ว

3) ในระบบโปรยกรองจะมีกลิ่นและแมลงเกิดขึ้นอาจเป็นที่รังเกียจ แก้ไขโดยทำการต่อท่ออากาศนำกลิ่นไปทิ้งหรือบำบัดที่อื่น หรือเพิ่มอัตราเร็วการหมุนเวียนน้ำของน้ำเสียให้สูงขึ้น

8. การคำนวณอัตราการบำบัดซีโอดี ซัลเฟตและซัลไฟล์ในถังโปรยกรอง

$$\text{อัตราการบำบัดซีโอดี} = \frac{(\text{ซีโอดีเข้า} - \text{ซีโอดีออก}) \times \text{อัตราการไหล}}{\text{ปริมาณตัวกลาง}}$$

$$\text{อัตราการบำบัดซัลไฟด์} = \frac{(S^{2-}_{\text{เข้า}} - S^{2-}_{\text{ออก}}) \times \text{อัตราการไหล}}{}$$

ปริมาณตัวกลาง

9. การคำนวณหาประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี ซัลเฟตและซัลไฟล์ในถังโปรยกรอง

$$\text{ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี} = \frac{(\text{ซีโอดีเข้า} - \text{ซีโอดีออก}) \times 100}{\text{ซีโอดีเข้า}}$$

$$\text{ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟต} = \frac{(\text{ซัลเฟตเข้า} - \text{ซัลเฟตออก}) \times 100}{\text{ซัลเฟตเข้า}}$$

$$\text{ประสิทธิภาพบำบัดซัลไฟด์} = \frac{(S^{2-}_{\text{เข้า}} - S^{2-}_{\text{ออก}}) \times 100}{S^{2-}_{\text{เข้า}}}$$

2.4 สมการปริมาณสารสัมพันธ์ต่อสารอินทรีย์ต่างๆในน้ำเสีย

สมการปริมาณสารสัมพันธ์ (Stoichiometric Equation) เป็นสมการในการคำนวณหาปริมาณสารเคมีและสารอาหารที่ต้องเติมลงในน้ำเสีย เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการของจุลินทรีย์ในระบบ และปริมาณผลิตภัณฑ์ที่จะเกิดขึ้นในระบบ การคำนวณหาสมการปริมาณสารสัมพันธ์อ้างอิงจาก (Grady และคณะ, 1999) มีสูตรดังนี้

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

โดยที่ R = ปฏิกิริยารวมของสมการปริมาณสารสัมพันธ์

R_d = ปฏิกิริยาของการให้อิเล็กตรอนของสารอาหารในน้ำเสีย

R_a = ปฏิกิริยาของการรับอิเล็กตรอน

R_c = ปฏิกิริยาของสารประกอบที่ใช้สร้างเซลล์

f_e = สัดส่วนของอิเล็กตรอนสำหรับการใช้พลังงาน

f_s = สัดส่วนของอิเล็กตรอนสำหรับการสร้างเซลล์

$f_e + f_s = 1$

สภาวะแอนแอโรบิก

ซัลเฟตเปลี่ยนเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์โดย Sulfur Reducing Bacteria

- Yield of Sulfate Reduction = 0.2 gVSS/gCOD

  อ้างอิงจาก (Kleerbezem และ Mendez, 2002)

- f_s = (0.2 gVSS/gCOD) x (1.42 gCOD/gVSS) = 0.284
- f_e = 0.716

R_d : $1/4CH_2O + 1/4H_2O \longrightarrow 1/4\ CO_2 + H^+ + e^-$

R_a : $1/16H_2S + 1/16HS^- + 1/2H_2O \longrightarrow 1/8SO_4^{2-} + 19/16H^+ + e^-$

R_c : $1/20C_5H_7O_2N + 9/20H_2O \longrightarrow 1/5CO_2 + 1/20HCO_3^- + 1/20NH_4^+ + H^+ + e^-$

R : $2.79CH_2O + 1.5H^+ + SO_4^{2-} + 0.16HCO_3^- + 0.16NH_4^+ \longrightarrow 2.63H_2O + 2.16CO_2$

$+ 0.5H_2S + 0.5HS^- + 0.16C_5H_7O_2N$

จากสมการปริมาณสารสัมพันธ์จะสามารถคำนวณปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ที่เกิดจากซัลเฟตได้ โดย 1 โมลของซัลเฟตจะเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.5 โมล เช่น ความเข้มข้นซัลเฟต 1,500 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร จะเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.19 ลิตร โดยในงานวิจัยนี้ควบคุมพีเอชอยู่ที่ 8.5 ซึ่งปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นนี้มีปริมาณน้อยมาก เมื่อเทียบกับปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายน้ำแตกตัว (HS^-) เนื่องจากที่พีเอช 8-8.5 สัดส่วนของไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายน้ำแตกตัว (HS^-) มีปริมาณประมาณ 90% ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงไม่จำเป็นต้องเก็บก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

<u>สภาวะแอโรบิก</u>

ไฮโดรเจนซัลไฟด์เปลี่ยนเป็นซัลเฟอร์โดย Sulfur Bacteria

- Yield of Sulfur Oxidation = 0.69 gcell/gO_2 อ้างอิงจาก (Ceskova และคณะ, 2002)
- f_s = 0.495
- f_e = 0.505

R_d : $1/4H_2S + 1/4HS^- \longrightarrow 1/2S^0 + 3/4H^+ + e^-$

$\mathbf{R_a}$: $1/20H_2O \longrightarrow 1/4O_2 + H^+ + e^-$

$\mathbf{R_c}$: $1/20C_5H_7O_2N + 9/20H_2O \longrightarrow 1/5CO_2 + 1/20HCO_3^- + 1/20NH_4^+ + H^+ + e^-$

$\mathbf{R}$: $0.5H_2S + 0.5HS^- + 0.5H^+ + 0.25O_2 + 0.2CO_2 + 0.05HCO_3^- + 0.05NH_4^+ \longrightarrow$

$S^0 + 0.902H_2O + 0.098C_5H_7O_2N$

ไฮโดรเจนซัลไฟด์เปลี่ยนเป็นซัลเฟตโดย Sulfur Bacteria

- Yield of Sulfur Oxidation = 0.69 gcell/gO_2 อ้างอิงจาก (Ceskova et al., 2002)
- f_s = 0.495
- f_e = 0.505

$\mathbf{R_d}$: $1/16H_2S + 1/16HS^- + 1/2H_2O \longrightarrow 1/8SO_4^{2-} + 19/16H^+ + e^-$

$\mathbf{R_a}$: $1/20H_2O \longrightarrow 1/4O_2 + H^+ + e^-$

$\mathbf{R_c}$: $1/20C_5H_7O_2N + 9/20H_2O \longrightarrow 1/5CO_2 + 1/20HCO_3^- + 1/20NH_4^+ + H^+ + e^-$

$\mathbf{R}$: $0.5H_2S + 0.5HS^- + 0.2H_2O + 1.01O_2 + 0.79CO_2 + 0.2HCO_3^- + 0.2NH_4^+ \longrightarrow$

$SO_4^{2-} + 1.5H^+ + 0.2C_5H_7O_2N$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.5 ธาตุอาหาร (Nutrient)

สำหรับกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพจะต้องคำนึงถึงธาตุอาหารเสริมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และเหล็ก ซึ่งในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมจะขาดสารอาหารดังกล่าว โดยจะต้องควบคุมปริมาณธาตุอาหารเสริมให้เหมาะสมกับจุลินทรีย์ในระบบ แต่ถ้าระบบขาดธาตุอาหารจะทำให้จุลินทรีย์ที่สร้างฟล็อคเจริญเติบโตได้ไม่ดี จุลินทรีย์ที่เป็นเส้นใยจะเจริญเติบโตได้ดีกว่า สำหรับกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบเติมอากาศ โดยทั่วไปจะรักษาอัตราส่วน ซีโอดี: ไนโตรเจน: ฟอสฟอรัส เท่ากับ 150 : 5 : 1 (Metcalf และ Eddy, 2003) เพื่อให้จุลินทรีย์ที่ใช้อากาศใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่ซึ่งจะเกิดขึ้นมากกว่ากระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ นอกจากนี้กระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศยังมีธาตุอาหารอื่นๆที่จุลินทรีย์ต้องการ แต่ต้องการในปริมาณน้อย เช่น เหล็ก นิเกิล โคบอลต์ เป็นต้น หากขาดไปจะส่งผล

ต่อการทำงานของจุลินทรีย์ โดยปริมาณธาตุอาหารเสริมสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศแสดงดังตารางที่ 2.8 และ 2.9

ตารางที่ 2.9 ธาตุอาหารเสริมสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ
(Speece, 1996) อ้างถึงใน (นภาจรีย์ แสงสิงห์**,** 2556)

สารเคมี	**ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)**	**สารเคมี**	**ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)**
NH_4Cl	400	$MnCl_2•4H_2O$	0.5
$MgSO_4•7H_2O$	400	NH_4VO_3	0.5
KCl	400	$CuCl_2•2H_2O$	0.5
$Na_2S•9H_2O$	300	$ZnCl_2$	0.5
$CaCl_2•2H_2O$	50	$AlCl_3•6H_2O$	0.5
$(NH_4)2HPO_4$	80	$NaMoO_4•2H_2O$	0.5
$FeCl_2•4H_2O$	40	H_3BO_3	0.5
$CoCl_2•6H_2O$	10	$NiCl_2•6H_2O$	0.5
KI	10	$NaWO_4•2H_2O$	0.5
$(NaPO_3)_6$	10	Na_2SeO_3	0.5
Cysteine	10	$NaHCO_3$	6000

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 2.10 ธาตุอาหารเสริมสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบเติมอากาศ
(Jefferson และคณะ, 2001)

Nutrient	**Reported requirements (mg/L)**

N	15
P	3
S	1
Ca	0.4 – 1.4
K	0.8 - < 3.0
Fe	0.1 – 0.4
Mg	0.4 - 0.5
Mn	0.01 – 0.5
Cu	0.01 – 0.5
Al	0.01 – 0.5
Zn	0.1 – 0.5
Mo	0.2 – 0.5
Co	0.1 – 5.0

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การบำบัดซัลเฟตด้วยกระบวนการไร้อากาศ

ปริญา รัตนา (2549) ได้ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการกำจัดซัลเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ในระบบถังกรองไร้อากาศ ได้กำหนดอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 3 ชุด คือ 5:1 10:1 และ 15:1 กำหนดให้ความเข้มข้นของซัลเฟตที่ 90 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่ากันทั้ง 3 ถังกรอง ส่วนค่าซีโอดี คือ 450 900 และ 1,350 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 90.48% 94.67% และ 93.97% ตามลำดับ และประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตเฉลี่ยเท่ากับ 65.96% 65.64% และ 70.20% ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 5:1 และ 10:1 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สรุปได้ว่าที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 5:1 เป็นอัตราส่วนที่เพียงพอในการกำจัดน้ำเสียที่มีซัลเฟต

Shakeri และ Vossoughi (2002) ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของซีโอดีและซัลเฟตสูงด้วยระบบ Anaerobic Baffled Reactor (ABR) และระบบ Activated Sludge โดยแบ่งการเดินระบบเป็นสองเฟส ในเฟสแรกน้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นซัลเฟตคงที่ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ความเข้มข้นของซีโอดีเพิ่มขึ้นจาก 3,000-6,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า

ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและซัลเฟตของ ABR เท่ากับ 80% และ 90% ตามลำดับ แต่ก็มีซัลไฟด์บางส่วนที่เกิดขึ้นใน ABR ถูกเปลี่ยนเป็นซัลเฟอร์ด้วยแบคทีเรียชนิด Photosynthetic ซึ่งจะเกาะอยู่ส่วนบนของกรองไร้อากาศ จากนั้นน้ำที่ออกจาก ABR จะเข้าสู่ระบบ Activated Sludge ในขณะที่กำจัดซีโอดีได้ 60% แต่ก็มีซัลไฟด์บางส่วนเป็นไปซัลเฟต ส่วนในเฟสที่สอง ความเข้มข้นของซีโอดีคงที่แต่ความเข้มข้นของซัลเฟตเพิ่มขึ้นจาก 500-1,750 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยความเข้มข้นนี้ไม่มีผลยับยั้งต่อการทำงานของแบคทีเรีย เมื่อนำที่ออกจากเฟสที่สองแล้วจะเข้าสู่ระบบ Activated Sludge อีกครั้ง พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและซัลเฟต เท่ากับ 65-75% และ 95% ตามลำดับ ระบบ ABR และ Activated Sludge ใช้ระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสียเท่ากับ 24 ชั่วโมง และ 15 ชั่วโมง ตามลำดับ

Camiloti และคณะ (2013) ได้ทำการศึกษาระบบ anaerobic bioreactor ร่วมกับ fixed-structured bed (ABFSB) ในการบำบัดน้ำเสียที่มีซีโอดีและซัลเฟตสูง โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 0.72 1.7 3.5 และ 6.1 พีเอชของระบบอยู่ในช่วง 6.9-7.8 พบว่าที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 1.7 มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี 82% และประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟต 89% และยังมีอัตราการบำบัดซัลเฟตของอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 1.7-6.1 มีค่า K_1 เท่ากับ 0.96 ชั่วโมง$^{-1}$ จากนั้นก็นำตะกอนสลัดจ์มาทำการวิเคราะห์พบว่ามีกลุ่มจุลินทรีย์ sulfate reduction bacteria และ metanogenic archaea อยู่ร่วมกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

<u>การบำบัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ</u>

ณัฐพล รัตนมุขย์ (2549) ได้ศึกษาการบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยเครื่องกรองชีวภาพที่ใช้ตัวกลางผสม พบว่าตัวกลางประเภทปุ๋ยหมักใช้ความสูงตัวกลาง 1 เมตร ในการบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ความเข้มข้น 300 ส่วนในล้านส่วน ที่เวลากักพัก 45 วินาที มีประสิทธิภาพการบำบัด 100% ในขณะที่ตัวกลางประเภทดินขุยไผ่ หินภูเขาไฟ และถ่านกัมมันต์ จะต้องใช้ความสูงของตัวกลางมากกว่า 1.25 เมตร ในการบำบัดทั้งนี้ค่าความสามารถในการกำจัดสูงสุดของตัวกลางประเภทดินขุยไผ่ หินภูเขาไฟ ถ่านกัมมันต์ และปุ๋ยหมัก มีค่าเท่ากับ 122 111 72 และ 108 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ โดยมีค่าความดันลดหลังเดินระบบเท่ากับ 20 11 9 และ 25 มิลลิเมตรน้ำต่อความสูงตัวกลาง 1 เมตร ตามลำดับ ดังนั้นปุ๋ยหมักจึงมีความเหมาะสมที่จะใช้เป็น

ตัวกลางของเครื่องกรองชีวภาพในการบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เนื่องจากมีความสามารถในการบำบัดสูงสุด

Chung และคณะ (1996) ได้ศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของระบบกรองชีวภาพ (Biofiltration) แบบไหลขึ้นในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยใช้เชื้อ *Thiobacillus thioparus* CH11 ในการทดลองมีค่าอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 36 72 และ 150 ลิตรต่อชั่วโมง และความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์อยู่ที่ 5-100 ส่วนในล้านส่วน จากการศึกษาพบว่าเมื่อความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เข้าสู่ระบบสูงถึง 100 ส่วนในล้านส่วน ต้องลดอัตราการไหลของก๊าซหรือเพิ่มปริมาตรของตัวกลาง จึงจะทำให้ได้ความสามารถในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงมากกว่า 98%

Elias และคณะ (2002) ได้ศึกษาถึงชนิดตัวกลางในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้กระบวนการทางชีวภาพ วัสดุตัวกลางที่ใช้เป็นสารประเภทอินทรีย์ คือ ปุ๋ยจากขี้หมูและขี้เลื่อย ในการศึกษาใช้ถังกรองชีวภาพ (Biofilter) แบบไหลลงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในเท่ากับ 10 เซนติเมตร สูง 1 เมตร มีปริมาตร 7 ลิตร ทำจากท่อพีวีซี โดยแบ่งความสูงของถังปฏิกรณ์ออกเป็น 3 ระดับ ชั้นตัวกลางมีปริมาตร 5.9 ลิตร อุณหภูมิในถังปฏิกรณ์อยู่ในช่วง 20±22°C โดยเวลาที่ทำการทดลองเป็นแบบต่อเนื่องนาน 2,500 ชั่วโมง อัตราเร็วของก๊าซ คือ 100 และ 200 เมตรต่อชั่วโมง และระยะเวลากักพักก๊าซเท่ากับ 27 และ 13.5 วินาที ตามลำดับ อัตราภาระบรรทุกก๊าซอยู่ในช่วง 10-45 กิโลกรัมไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และจะหยุดระบบเมื่อประสิทธิภาพในการกำจัดลดลงน้อยกว่า 90% พบว่าเมื่ออัตราเร็วก๊าซเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง อัตราเร็วก๊าซมีผลต่อการกำจัด ส่วนตัวกลางที่ใช้เป็นพวกที่เฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี จึงไม่ทำให้สารละลายเกิดการปนเปื้อนทั้งยังไม่เกิดการจับตัวเป็นก้อน ตัวกลางนี้มีคุณสมบัติเหมาะสมในการใช้ในถังกรองชีวภาพ เนื่องจากช่วยกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ลดลงได้ และยังสามารถนำขี้หมูมาใช้ประโยชน์ได้ ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ทั้ง 3 ระดับ พบว่าตัวกลางชั้นล่างสุดพบธาตุกำมะถันน้อยที่สุด พบมากที่สุดในชั้นตัวกลางชั้นที่ 2 แต่จะพบซัลเฟตมากที่สุดในชั้นตัวกลางชั้นที่ 3 ซึ่งอยู่ล่างสุด เมื่อระบบสิ้นสุดจะพบธาตุกำมะถันมากกว่า 82% ส่วนซัลเฟตและไธโอซัลเฟตน้อยกว่า 18% ซึ่งในการทดลองไม่มีการอุดตันของตัวกลางตลอดการทดลอง

Sercu และคณะ (2005) ได้ศึกษาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยถังโปรยกรองชีวภาพ (Biotrickling filter) ปริมาตร 1 ลิตร ภายในบรรจุตัวกลางชนิด Polyethylene rings (73% volume free) ซึ่งมีจุลินทรีย์ คือ *Acidithiobacillus thiooxidans* ATCC-19377 มีความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เท่ากับ 400 และ 200 ส่วนในล้านส่วน และมีอัตราการไหลของก๊าซ เท่ากับ 0.03 และ 0.12 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เท่ากับ 100% และในระหว่างทำการทดลอง pH ของสารละลายสารอาหารลดลง 2-3 แต่ไม่มีผลต่อกระบวนการบำบัด

Cox และ Deshusses (2001) ได้ศึกษาการบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และโทลูอีนด้วยถังโปรยกรองชีวภาพ (Biotrickling filter) ปริมาตร 10 ลิตร ภายในบรรจุตัวกลางชนิด Polypropylene pall rings โดยใช้เชื้อ *Thiobacillus* sp. และใช้หัวเชื้อที่มาจากการบำบัดโทลูอีน การควบคุม pH ในการเดินระบบบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และโทลูอีน เท่ากับ 7.0 และ 4.5 ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 50 ส่วนในล้านส่วน มีประสิทธิภาพการบำบัดเกือบ 100% แต่เมื่อความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เพิ่มขึ้นถึง 170 ส่วนในล้านส่วน ประสิทธิภาพการบำบัดลดลงเหลือ 70-80%

Soreanu และคณะ (2005) ได้ศึกษาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จากหมักก๊าซชีวภาพภายใต้สภาวะแอนแอโรบิก ซึ่งได้ทำการวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการโดยภายในถังโปรยกรองชีวภาพ (Biotrickling filter) บรรจุตัวกลาง Polypropylene balls และใส่หัวเชื้อจากตะกอนสลัดจ์แบบแอนแอโรบิก มีปริมาตรตัวกลาง เท่ากับ 0.0062 ลูกบาศก์เมตร (90% volume free) มีการเติมโซเดียมซัลไฟด์ลงไปในสารละลายสารอาหารและใช้ไนเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในสภาวะไร้ออกซิเจน พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มากกว่า 85% ที่ความเข้มข้นของก๊าซขาเข้า 500 ส่วนในล้านส่วน มีอัตราการไหลของก๊าซ เท่ากับ 0.05 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

Chen และคณะ (2006) ได้ศึกษาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ความเข้มข้นสูงจากระบบบำบัดน้ำเสียด้วยระบบโปรยกรองชีวภาพ (Biotrickling filter) ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้ตัวกลาง คือ Polyurethane (PU) foam มีการเดินระบบอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลามากกว่า 56 วัน พบว่าหลังจาก start-up 8 วัน ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์อยู่ที่ 90-100% ซึ่งมีความเข้มข้นซัลเฟตเท่ากับ 238-250 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะมากกว่า 90% เมื่อระยะเวลากักเก็บก๊าซ (EBRTs) เท่ากับ 9 วินาที และอัตรา

ภาระบรรทุกก๊าซสูงกว่า 187 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง โดยการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะเกิดขึ้นที่ชั้นแรกของคอลัมน์ถังโปรยกรอง เมื่ออัตราส่วน L/G ต่ำกว่า 0.005 และความเข้มข้นซัลเฟตต่ำลงถึง 28 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการทำงานของถังโปรยกรองก็ยังคงเสถียร จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าถังโปรยกรองชีวภาพเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ความเข้มข้นสูง

การเปลี่ยนรูปจากซัลไฟด์เป็นซัลเฟอร์

Liu และคณะ (2013) ได้ศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่างๆต่อการเปลี่ยนรูปจากซัลไฟด์ (S^{2-}) เป็นซัลเฟอร์ (S^0) โดยได้ทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ภายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพบรรจุตัวกลางชนิด Polyethylene semi-soft น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้น้ำประปาผสมกับโซเดียมซัลไฟด์ ซึ่งพารามิเตอร์ที่ได้ทำการศึกษาได้แก่ pH DO HRT ความเค็ม และอุณหภูมิ พบว่าแบคทีเรียทำงานได้ดีที่สุดที่ pH 7.8-8.2 ซึ่งมีอัตราการกำจัดซัลไฟด์สูงสุดเท่ากับ 7.25 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่ความเข้มข้นซัลไฟด์ 322.07 มิลลิกรัมต่อลิตร และสามารถกำจัดซัลไฟด์ให้ลดลงจาก 60.25 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 6.67 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นซัลไฟด์ขาเข้าเท่ากับ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่ง DO อยู่ที่ 0.55-2.55 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ในขณะที่ DO มากกว่า 4.8 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้ค่ายิวส์ของซัลเฟอร์ลดลง เนื่องจากถ้า DO มากเกินซัลเฟอร์จะเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟต ถ้า HRT เพิ่มขึ้นอาจมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดซัลไฟด์เพียงเล็กน้อย ค่ายิลด์ของซัลเฟตเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่ออัตราการกำจัดซัลไฟด์คงที่ ส่วนอุณหภูมิที่เหมาะสมมากที่สุด คือ 33°C และอัตราการกำจัดซัลไฟด์ลดลงจาก 2.85-0.51 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน เมื่อความเค็มเพิ่มขึ้นจาก 0.5-2.5%

Rodriguez และคณะ (2014) ได้ศึกษาการบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยระบบโปรยกรองทางชีวภาพใช้ตัวกลาง คือ polypropylene Pall rings โดยมีความเข้มข้นซัลเฟต 869-3,351 มิลลิกรัมซัลเฟตต่อลิตร และความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1,954-2,556 ส่วนในล้านส่วน ในสภาวะที่เป็นกรดพีเอชอยู่ในช่วง 1.8-2.6 ซึ่งที่เอชในช่วงนี้ไม่มีผลต่อการยับยั้งการทำงานของแบคทีเรีย ควบคุมออกซิเจนละลายน้ำ (DO) เท่ากับ 1.0-1.4 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งได้คำนวณปริมาณออกซิเจนให้เป็นไปตามสมการที่ 1 และ 2 มีประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 75% ประสิทธิภาพการเปลี่ยนเป็นซัลเฟอร์ 40.3% และมีซัลเฟตที่เพิ่มขึ้น 17%

$$HS^- + 0.5O_2\ (aq) \longrightarrow S^0 + OH^- \qquad \Delta G° = -209.4\ KJ \qquad (1)$$

$$HS^- + 2O_2\ (aq) \longrightarrow SO_4^{2-} + H^+ \qquad \Delta G° = -798.2\ KJ \qquad (2)$$

ความเป็นพิษของไฮโดรเจนซัลไฟด์และซัลไฟด์

Reis และคณะ (1992) ได้ศึกษาผลกระทบของไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ต่อการเจริญเติบโตของซัลเฟตรีดิวซ์ซิงแบคทีเรีย (Sulfate Reducing Bacteria; SBR) พบว่าแบคทีเรียชนิดนี้สามารถเจริญเติบโตได้ในอะซิเตทและซัลเฟตที่ช่วง pH 5.8-7.0 ซึ่งมีอัตราการเจริญเติบโตสูงสุดที่ pH 6.7 และความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ 547 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเกิดความเป็นพิษต่อแบคที่เรีย ซึ่งจะไปทำการยับยั้งการเจริญเติบโต

Maillacheruvu และคณะ (1993) ได้ศึกษาความเป็นพิษของไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และซัลไฟด์ละลายน้ำ (HS^-) ต่อแบคทีเรีย SRB และ MPB ในถังกรองไร้อากาศ โดยใช้อะซิเตทและกูลโคสเป็นแหล่งคาร์บอน มีอัตรารับภาระสารอินทรีย์ (OLR) 1.0-5.0 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต-ซัลเฟอร์ 8:1-20:1 ที่พีเอช 7 พบว่าที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ 60-75 มิลลิกรัมซัลเฟอร์ต่อลิตร และความเข้มข้นซัลไฟด์ละลายน้ำ 150-200 มิลลิกรัมซัลเฟอร์ต่อลิตร ไม่มีผลต่อความเป็นพิษของแบคทีเรีย แต่ถ้าความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์เพิ่มขึ้น 100-150 มิลลิกรัมซัลเฟอร์ต่อลิตร และความเข้มข้นซัลไฟด์ละลายน้ำ 200-400 มิลลิกรัมซัลเฟอร์ต่อลิตร ทำให้แบคทีเรียอยู่ในสภาวะเครียดมีผลต่อการยับยั้งการทำงานของแบคทีเรีย นอกจากนี้แบคทีเรียยังทนอยู่ในสภาวะที่มีความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์มากกว่า 125 มิลลิกรัมซัลเฟอร์ต่อลิตร และที่ความเข้มข้นซัลไฟด์ละลายน้ำมากกว่า 400 มิลลิกรัมซัลเฟอร์ต่อลิตร

อัตราการบำบัดซัลเฟตและซัลไฟด์

Xu และคณะ (2013) ได้ทำการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันของ sulfate-reducing bacteria ซัลไฟด์ออกซิเดชันของ sulfide-oxidizing bacteria และซัลเฟอร์ของ sulfur bioreduction bacteria ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทั้งหมดเป็นไปตามสมการโมนอด โดยปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชัน มีค่า μ_{SRB} เท่ากับ 0.061 วัน$^{-1}$ และค่า K_s เท่ากับ 0.02 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ปฏิกิริยาซัลไฟด์ออกซิเดชัน มีค่า μ_{SOB} เท่ากับ 0.028 วัน$^{-1}$ และค่า K_s เท่ากับ 0.011 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และปฏิกิริยาซัลเฟอร์มีค่า μ_{eSRE} เท่ากับ 0.035 วัน$^{-1}$ และค่า K_s เท่ากับ 0.024 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ซึ่งในงานวิจัยนี้ยังได้ควบคุมค่าคงที่ของออกซิเจนที่จะยับยั้งการเกิดซัลเฟอร์รีดักชัน เท่ากับ 0.0016 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3

แผนการทดลองและวิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 วัสดุอุปกรณ์

- ตู้อบความร้อนที่มีเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Drying Oven)
- เครื่องชั่งชนิดละเอียด (Balance)
- กระดาษกรอง GF/C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.7 เซนติเมตร
- โถดูดความชื้น (Desiccator)
- เครื่องดูดสุญญากาศและชุดกรวยกรองบุชเนอร์ (Buchner funnel)
- เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
- เครื่องยูวีสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (UV Spectrophotometer)
- เครื่องวัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์
- ถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter)
- ถังโปรยกรอง (Trickling Filter)
- เครื่องสูบน้ำชนิดรีดสาย (Peristaltic pump) 0.5 และ 60 ลิตรต่อชั่วโมง
- บีกเกอร์ขนาด 50 100 500 และ 1,000 มิลลิลิตร
- กระบอกตวงขนาด 100 และ 1,000 มิลลิลิตร
- ปิเปตขนาด 2 5 และ 10 มิลลิลิตร
- บิวเรตขนาด 50 มิลลิลิตร
- หลอดทดลอง

3.1.2 สารเคมี

- น้ำตาลทรายขาว (CH_2O)
- โซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$)
- ไดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K_2HPO_4)
- โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4)
- สารละลายมาตรฐานเฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS)
- สารละลายเฟอโรอีนอินดิเคเตอร์ (Ferrion Indicator)
- สารละลายกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ผสมซิลเวอร์ซัลเฟต ($AgSO_4$)
- สารละลายมาตรฐานโปตัสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$)
- แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl)
- ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$)
- คอปเปอร์คลอไรด์ ($CuCl_2{\cdot}2H_2O$)
- กรดบอริก (H_3BO_3)
- แอมโมเนียมโมลิบเดท ($(NH_4)_6Mo_7O_{24}{\cdot}4H_2O$)
- แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4{\cdot}7H_2O$)
- โคบอลต์คลอไรด์ ($CoCl_2{\cdot}2H_2O$)
- นิกเกิลคลอไรด์ ($NiCl_2{\cdot}6H_2O$)
- แมงกานีสซัลเฟต ($MnSO_4{\cdot}H_2O$)
- โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4)
- โซเดียมไบคาร์บอนเนต ($NaHCO_3$)

3.2 แผนการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับปฏิบัติการ ดำเนินการที่อุณหภูมิห้อง ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลอง ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1. <u>การทดลองที่ 1</u> ศึกษาอัตราการบำบัดซัลเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นซัลเฟตที่แตกต่างกันในถังกรองไร้อากาศ และอัตราการบำบัดซัลไฟด์ ประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์และซัลเฟตในถังโปรยกรอง รวมทั้งศึกษาอัตราการเวียนน้ำและค่า DO ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปจากซัลเฟตและซัลไฟด์เป็นซัลเฟอร์ ซึ่งทำการทดลองแบบแบทช์

เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นซัลเฟต 100 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร ซีโอดี 500 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้น้ำตาลทรายเป็นแหล่งคาร์บอนและโซเดียมซัลเฟตเป็นแหล่งซัลเฟต คิดเป็นอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 5:1 เข้าสู่ถังกรองไร้อากาศหมักในสภาพไร้อากาศ เก็บตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์ซีโอดี ซัลเฟต ซัลไฟด์ที่ลดลงจนคงที่ และปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้น นำน้ำที่ผ่านการบำบัดจากถังกรองไร้อากาศเข้าถังโปรยกรอง และสูบหมุนเวียนน้ำจนประสิทธิภาพการบำบัดคงที่ โดยใช้อัตราการเวียนน้ำ คือ 130 30 และ 2.7 ลิตรต่อชั่วโมง เก็บตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์ซีโอดี ซัลเฟต ซัลไฟด์ ดีโอ และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ทำอย่างน้อย 3 ซ้ำ จากนั้นก็ทำการทดลองแบบเดียวกัน แต่เปลี่ยนความเข้มข้นซัลเฟตเป็น 200 500 1,000 และ 1,500 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร ที่ซีโอดี เท่ากับ 1,000 2,500 5,000 และ 7,500 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

2. <u>การทดลองที่ 2</u> ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์ต่อปริมาณตัวกลางในถังโปรยกรองและประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปจากซัลเฟตและซัลไฟด์เป็นซัลเฟอร์ ซึ่งทำการทดลองแบบน้ำไหลต่อเนื่อง

เลือกความเข้มข้นซัลเฟตของน้ำเสียสังเคราะห์จากการทดลองที่ 1 มาหนึ่งความเข้มข้น คือ 500 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร ซึ่งเลือกมาจากความเข้มข้นของซัลเฟตที่มีอัตราการบำบัดและประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด โดยใช้น้ำตาลทรายเป็นแหล่งคาร์บอนและโซเดียมซัลเฟตเป็นแหล่งซัลเฟต คิดเป็นอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 5:1 เข้าสู่ถังกรองไร้อากาศ โดยใช้ระยะเวลากักเก็บน้ำ 4 วัน จากผลการทดลองที่ 1 มาคำนวณหาอัตราการไหลได้ 0.4 ลิตรต่อชั่วโมง และนำน้ำที่ผ่านการบำบัดจากถังกรองไร้อากาศ และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้าถังโปรยกรอง ซึ่งภายในถังโปรยกรองจะมีปริมาณตัวกลาง ได้แก่ 0 20 50 100 200 และ 350 ชิ้น ซึ่งคิดเป็นพื้นที่ผิว เท่ากับ 0 0.30 0.75 1.50 3.00 และ 5.25 ตารางเมตร ตามลำดับ โดยใช้ตัวกลางเป็นพลาสติกของบริษัท AQUA รุ่น R-190 Random Flow Mediaเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร สูง 2 เซนติเมตร มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 190 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร และหมุนเวียนน้ำจนประสิทธิภาพการบำบัดคงที่ โดยใช้อัตราการเวียนน้ำ คือ 2.7 ลิตรต่อชั่วโมง เก็บตัวอย่างน้ำทิ้งมาวิเคราะห์ซีโอดี ซัลเฟต ซัลไฟด์ ดีโอ และวัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากถังโปรยกรอง

3.2.1 น้ำเสียสังเคราะห์

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง กำหนดให้มีความเข้มข้นซัลเฟต 100 200 500 1,000 และ 1,500 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร กำหนดให้มีค่าซีโอดีต่อซัลเฟต 5:1 โดยใช้น้ำตาลทรายขาวเป็นแหล่งพลังงานและโซเดียมซัลเฟตเป็นแหล่งซัลเฟต ควบคุมพีเอชภายในถังกรองไร้อากาศ เท่ากับ 8.0-8.5 โดยการเติมโซเดียมไบคาร์บอนเนตเพื่อควบคุมพีเอช เติมธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารเสริมตามข้อที่ 3.5

3.2.2 หัวเชื้อจุลินทรีย์

หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองของของถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรอง นำมาจากระบบไร้อากาศที่ห้องปฏิบัติการวิจัยและบัณฑิตภาควิชาสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยนำหัวเชื้อจุลินทรีย์มาเลี้ยงร่วมกับวัสดุตัวกลาง และใช้น้ำตาลทรายขาวเป็นแหล่งพลังงานและโซเดียมซัลเฟตเป็นแหล่งซัลเฟต มีค่าซีโอดีต่อซัลเฟต 5:1 เพื่อให้เชื้อจุลินทรีย์เกาะอยู่บนพื้นผิวของตัวกลางก่อนใส่เข้าไปในถังปฏิกิริยา

3.2.3 วัสดุตัวกลาง

ตัวกลางที่เลือกใช้ในถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรอง คือ พลาสติกของบริษัท AQUA รุ่น R-190 Random Flow Media เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร สูง 2 เซนติเมตรมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 190 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร ดังรูปที่ 3.1

รูปที่ 3.1 ตัวกลางพลาสติกรุ่น R-190 Random Flow Media

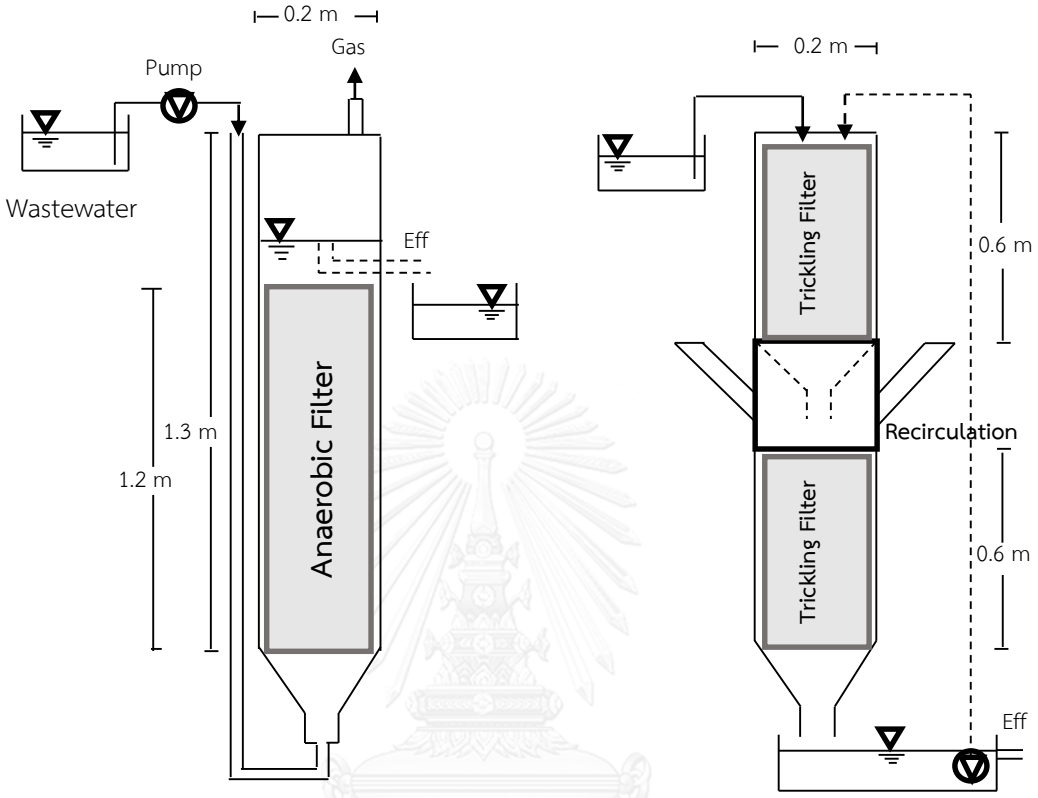
3.2.4 ถังปฏิกิริยา

ถังกรองไร้อากาศ ประกอบขึ้นจากท่อพีวีซีทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตร สูง 1.3 เมตร ปริมาตรถัง 40 ลิตร ขนาดท่อน้ำเข้าและออกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ความสูงของชั้นตัวกลาง 1.2 เมตร คิดเป็นปริมาตรตัวกลาง เท่ากับ 38 ลิตร ซึ่งใส่ในถังกรองไร้อากาศได้ประมาณ 350 ชิ้น โดยป้อนน้ำเสียจากล่างขึ้นบน (Upflow Anaerobic Filter) มีอัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย 0.4 ลิตรต่อชั่วโมง สามารถรับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ระหว่าง 0.5-10 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน (บัญชา บุญอนันต์วงศ์, 2554)

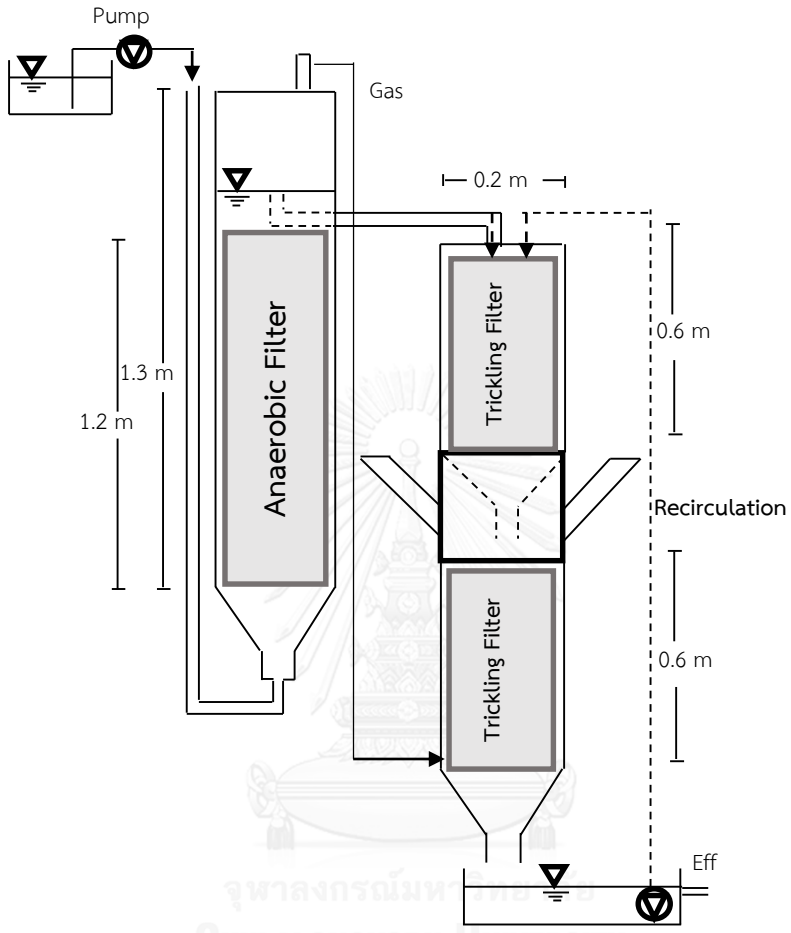
ถังโปรยกรอง ประกอบขึ้นจากท่อพีวีซีทรงกระบอกที่มีส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตร สูง 1.3 เมตร ปริมาตรถัง 40 ลิตร ขนาดท่อน้ำเข้าและออกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ความสูงของชั้นตัวกลาง 1.2 เมตร คิดเป็นปริมาตรตัวกลาง เท่ากับ 38 ลิตร ซึ่งใส่ในถังโปรยกรองได้ประมาณ 350 ชิ้น มีอัตราน้ำไหลเข้าเท่ากับ 0.4 ลิตรต่อชั่วโมง โดยน้ำเสียจากบนลงล่าง และก๊าซจากล่างขึ้นบน มีการเวียนน้ำในถังโปรยกรอง 2.7-130 ลิตรต่อชั่วโมง มีอัตรารับภาระสารอินทรีย์ 0.3–3 กิโลกรัมบีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน (บัญชา บุญอนันต์วงศ์, 2554)

การทำงานของถังปฏิกิริยา การทดลองที่ 1 ทำการทดลองภายในถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรอง โดยทำการทดลองแบบแบทช์แสดงดังรูปที่ 3.2 ส่วนการทดลองที่ 2 จะทำการทดลองภายในถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรอง โดยทำการทดลองแบบน้ำไหลต่อเนื่องแสดงดังรูปที่ 3.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 3.2 ถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรอง สำหรับการทดลองแบบแบทช์
(บัญชา บุญอนันต์วงศ์, 2554)



รูปที่ 3.3 ถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรอง สำหรับการทดลองแบบน้ำไหลต่อเนื่อง (บัญชา บุญอนันต์วงศ์, 2554)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.2.5 ตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษา

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ทำการศึกษา

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรต้น	**การทดลองที่ 1** - ความเข้มข้นซัลเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ 100 200 500 1,000 และ 1,500 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร - ซีโอดี 500 1,000 2,500 5,000 7,500 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 5:1 - อัตราการเวียนน้ำในถังโปรยกรอง 130 30 และ 2.7 ลิตรต่อชั่วโมง มาจากการปรับเปลี่ยนอัตราการเวียนน้ำในขณะที่ได้ทำการทดลอง **การทดลองที่ 2** - ปริมาณตัวกลางในถังโปรยกรอง 0 20 50 100 200 และ 350 ชิ้น คิดเป็นพื้นที่ผิว เท่ากับ 0 0.30 0.75 1.50 3.00 และ 5.25 ตารางเมตร
ตัวแปรควบคุม	**การทดลองที่ 1** - โซเดียมไบคาร์บอเนตควบคุมพีเอชในถังกรองไร้อากาศ 8.0-8.5 และถังโปรยกรอง 8.5-9.5 **การทดลองที่ 2** - เลือกความเข้มข้นซัลเฟตจากการทดลองที่ 1 มาหนึ่งความเข้มข้น คือ 500 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร - อัตราการไหลเข้าถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองที่ 9.5 ลิตรต่อวัน - อัตราการเวียนน้ำในถังโปรยกรอง 2.7 ลิตรต่อชั่วโมง - ระยะเวลากักเก็บน้ำในถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองที่ได้จากการทดลองที่ 1 คือ 4 และ 5 วัน ตามลำดับ - โซเดียมไบคาร์บอเนตควบคุมพีเอชในถังกรองไร้อากาศ 8.0-8.5 และถังโปรยกรอง 8.5-9.5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ทำการศึกษา (ต่อ)

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรตาม	**การทดลองที่ 1 และ 2** - ซัลเฟต - ซัลไฟด์ - ก๊าซโฮโดรเจนซัลไฟด์ - ซีโอดี - พีเอช - ดีโอ

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ วิธีวิเคราะห์แต่ละพารามิเตอร์ และความถี่การเก็บตัวอย่าง

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	ความถี่การเก็บตัวอย่าง
1. ก๊าซแต่ละจุดเก็บตัวอย่าง		
1.1 ความเข้มข้นก๊าซ H_2S (ppm)	เครื่องวัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ รุ่น GasBadge Pro	ทุกวัน
2. น้ำก่อนและหลังชะตัวกลาง		
2.1 พีเอช	pH meter	ทุกวัน
2.2 ซีโอดี	รีฟลักซ์แบบปิด	ทุกวัน
2.3 การทำสมดุลมวลของสารประกอบซัลเฟอร์		
- ซัลไฟด์	Sulfide Ion Selective Electrode	ทุกวัน
- ซัลเฟต	วัดความขุ่นด้วย $BaCl_2$	ทุกวัน

3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

การทดลองที่ 1

ศึกษาอัตราการบำบัดซัลเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นซัลเฟตที่แตกต่างกันในถังกรองไร้อากาศ และอัตราการบำบัดซัลไฟด์ ประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์และซัลเฟตในถังโปรยกรอง รวมทั้งศึกษาอัตราการเวียนน้ำและค่า DO ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปจากซัลเฟตและซัลไฟด์เป็นซัลเฟอร์ ซึ่งทำการทดลองแบบแบทช์ มีขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

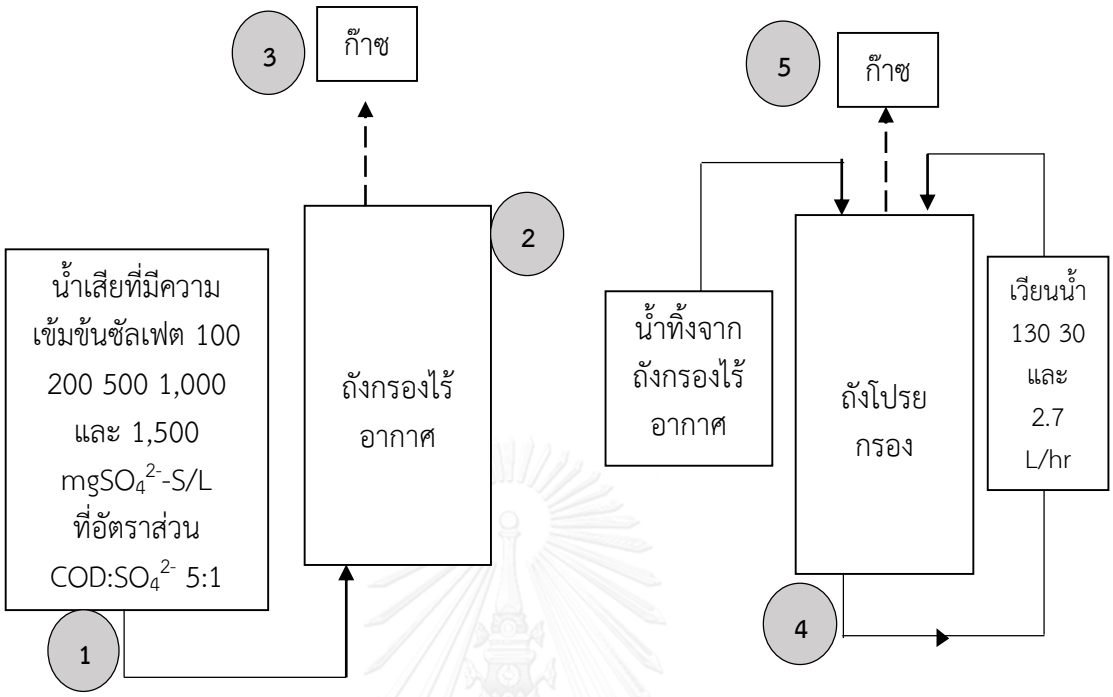
1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นซัลเฟต 100 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร โดยใช้โซเดียมซัลเฟตเป็นแหล่งซัลเฟตที่ซีโอดี 500 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้น้ำตาลทรายเป็นแหล่งคาร์บอนและโซเดียมซัลเฟตเป็นแหล่งซัลเฟต คิดเป็นอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 5:1 เติมธาตุอาหารเสริมตามข้อที่ 2.5 และใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตปรับพีเอชน้ำเสียสังเคราะห์ให้เท่ากับ 8.5 พร้อมเก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์มาวิเคราะห์ ซีโอดีและซัลเฟต

2. เติมน้ำเสียสังเคราะห์เข้าสู่ถังกรองไร้อากาศหมักในสภาวะไร้อากาศ และใช้ไดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟตหรือโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตรควบคุมพีเอชน้ำเสียสังเคราะห์ในถังกรองไร้อากาศเท่ากับ 8.0-8.5 เก็บตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์ ซีโอดี ซัลเฟต ซัลไฟด์ และวัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้น

3. นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านการบำบัดจากถังกรองไร้อากาศที่ความเข้มข้นซัลเฟตลดลงจนคงที่เข้าถังโปรยกรอง ซึ่งภายในถังโปรยกรองต้องควบคุมพีเอชให้เท่ากับ 8.5-9.5 เก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์มาทำการวิเคราะห์ซีโอดี ซัลเฟต ซัลไฟล์ และวัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และสูบหมุนเวียนน้ำจนประสิทธิภาพการบำบัดคงที่ ซึ่งมีอัตราการเวียนภายในถังโปรยกรอง 130 30 และ 2.7 ลิตรต่อชั่วโมง

4. เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่แล้ว จึงเปลี่ยนความเข้มข้นซัลเฟตเป็น 200 500 1,000 และ 1,500 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร ที่ซีโอดี เท่ากับ 1,000 2,500 5,000 และ 7,500 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

5. นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาคำนวณหาอัตราการบำบัดด้วยโปรแกรม sigmaplot และประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตและสรุปผล ซึ่งในการทดลองที่ 1 ทราบระยะเวลากักเก็บน้ำที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตสามารถคำนวณหาอัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์เข้าสู่ถังกรองไร้อากาศได้ในการทดลองที่ 2 สามารถสรุปเป็นแผนผังการทดลองได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการทดลองที่ 1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หมายเหตุ

1 จุดเก็บน้ำตัวอย่างก่อนเข้าถังกรองไร้อากาศ

2 จุดเก็บน้ำตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดจากถังกรองไร้อากาศ

3 จุดวัดความเข้มเข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

4 จุดเก็บน้ำตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดจากถังโปรยกรอง

5 จุดวัดความเข้มเข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

การทดลองที่ 2

ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์ต่อปริมาณตัวกลางในถังโปรยกรอง และประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปจากซัลเฟตและซัลไฟด์เป็นซัลเฟอร์ ซึ่งทำการทดลองแบบน้ำไหลต่อเนื่อง มีขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ โดยเลือกความเข้มข้นซัลเฟตของน้ำเสียสังเคราะห์จากการทดลองที่ 1 มาหนึ่งความเข้มข้น ซึ่งเลือกมาจากความเข้มข้นของซัลเฟตที่มีอัตราการบำบัดและประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด คือ 500 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร โดยใช้น้ำตาลทรายเป็นแหล่งคาร์บอนและโซเดียมซัลเฟตเป็นแหล่งซัลเฟต คิดเป็นอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 5:1 เติมธาตุอาหารเสริมตามข้อที่ 2.5 และใช้ไดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟตหรือโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตปรับพีเอชน้ำเสียสังเคราะห์ให้ เท่ากับ 8.5 พร้อมเก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์มาวิเคราะห์ ซีโอดี และซัลเฟต

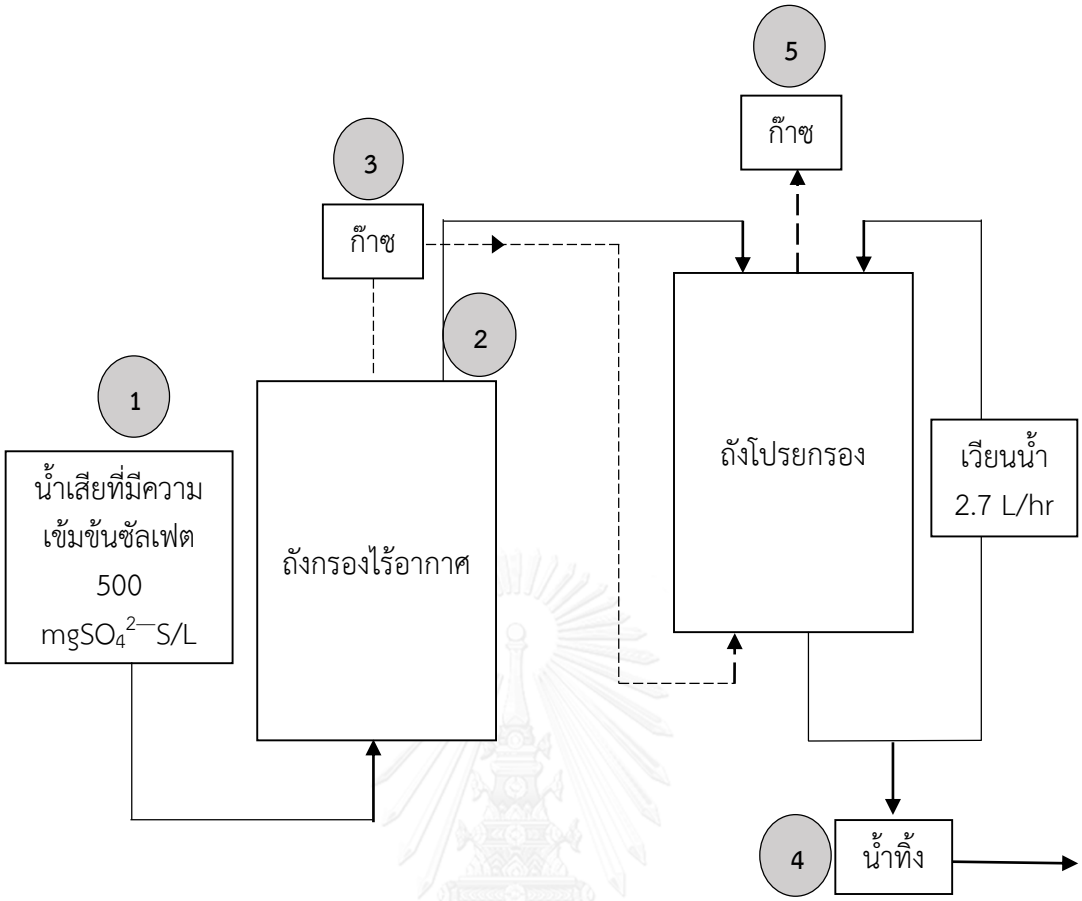
2. ป้อนน้ำเสียสังเคราะห์เข้าสู่ถังกรองไร้อากาศ โดยคำนวณอัตราการไหลมาจากระยะเวลากักเก็บน้ำที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการบำบัดที่ได้มาจากการทดลองที่ 1 ซึ่งได้อัตราการการไหล 0.4 ลิตรต่อชั่วโมง และโซเดียมไบคาร์บอเนตควบคุมพีเอชน้ำเสียสังเคราะห์ในถังกรองไร้อากาศ เท่ากับ 8.0-8.5 เก็บตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์ ซีโอดี ซัลเฟต ซัลไฟด์ และวัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้น

3. สูบน้ำที่ผ่านการบำบัดจากถังกรองไร้อากาศใช้อัตราการไหล 0.4 ลิตรต่อชั่วโมง และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้าถังโปรยกรอง ที่อัตราการไหล 0.4 ลิตรต่อชั่วโมง เข้าสู่ถังโปรยกรอง มีอัตราการเวียนภายในถังโปรยกรอง 2.7 ลิตรต่อชั่วโมง และต้องควบคุมพีเอชในถังโปรยกรอง เท่ากับ 8.5-9.5 ซึ่งภายในถังโปรยกรองจะมีปริมาณตัวกลาง 350 ชิ้น คิดเป็นพื้นที่ผิว เท่ากับ 5.25 ตารางเมตร

4. เก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านการบำบัดจากถังโปรยกรองมาวิเคราะห์ซีโอดี ซัลเฟต ซัลไฟด์ และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

5. เดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงที่ จึงเปลี่ยนปริมาณตัวกลางเป็น 200 100 50 20 และ 0 ชิ้น ตามลำดับ คิดเป็นพื้นที่ผิว เท่ากับ 3.00 1.50 0.75 0.30 และ 0 ตารางเมตร ตามลำดับ

6. นำข้อมูลที่ได้จาการทดลองมาวิเคราะห์และสรุปผล เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์ต่อปริมาณตัวกลาง และประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปจากซัลเฟตและซัลไฟด์เป็นซัลเฟอร์ สามารถสรุปเป็นแผนผังการทดลองได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการทดลองที่ 2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หมายเหตุ

1 จุดเก็บน้ำตัวอย่างก่อนเข้าถังกรองไร้อากาศ

2 จุดเก็บน้ำตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดจากถังกรองไร้อากาศ

3 จุดวัดความเข้มเข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

4 จุดเก็บน้ำตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดจากถังโปรยกรอง

5 จุดวัดความเข้มเข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราการบำบัดและประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นซัลเฟตที่แตกต่างกันในถังกรองไร้อากาศ อัตราการบำบัดซัลไฟด์ และประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์ต่อปริมาณตัวกลางในถังโปรยกรอง รวมทั้งศึกษาอัตราการเวียนน้ำและค่า DO ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปจากซัลเฟตและซัลไฟด์เป็นซัลเฟอร์ ในการทดลองแบบแบทช์และแบบไหลต่อเนื่อง โดยมีผลการทดลองดังนี้

การทดลองที่ 1 ทำการทดลองภายในถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรอง โดยทำการทดลองแบบแบทช์

4.1 การเริ่มต้นเดินระบบ

4.2 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์

4.3 ผลการบำบัดพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ซัลเฟต ซัลไฟด์ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ พีเอช และซีโอดี ต่อระยะเวลา

4.4 ผลของอัตราการบำบัดซัลเฟตและซัลไฟด์

4.5 สมดุลมวลซัลเฟอร์

4.6 ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟต ซัลไฟด์ ซัลเฟอร์ และซีโอดี

การทดลองที่ 2 ทำการทดลองภายในถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรอง โดยทำการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง

4.7 ผลการบำบัดพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ซัลเฟต ซัลไฟด์ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ พีเอช และซีโอดี ต่อระยะเวลา

4.8 สมดุลมวลซัลเฟอร์

4.9 ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟต ซัลไฟด์ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซัลเฟอร์ และซีโอดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.1 การเริ่มต้นเดินระบบ

การเริ่มเดินระบบได้นำหัวเชื้อจุลินทรีย์จากถังกรองไร้อากาศที่ห้องปฏิบัติการวิจัยและบัณฑิตภาควิชาสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยนำหัวเชื้อจุลินทรีย์มาเลี้ยงแบบแบทช์ร่วมกับวัสดุตัวกลาง โดยเริ่มต้นจากน้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นน้ำตาลทรายในช่วง 1,178.03±54.16 มิลลิกรัมต่อลิตร เติมธาตุอาหารหลักและเสริมควบคุมพีเอชของระบบให้อยู่ในช่วง 7.5- 8.5 ด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต พบว่าภายใน 2 สัปดาห์ ค่าซีโอดีที่ผ่านถังกรองไร้อากาศลดเหลือ 741.76±102.13 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อนำน้ำเสียมาบำบัดต่อในถังโปรยกรองใช้ระยะเวลา 1 สัปดาห์ ค่าซีโอดีลดเหลือ 223.45±87.13 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งรวมแล้วในครั้งแรกของการกระตุ้นเชื้อจุลินทรีย์ต้องใช้ระยะเวลาของถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองเกือบ 3 สัปดาห์ จะเห็นได้ว่าถังกรองไร้อากาศใช้ระยะเวลานานกว่าถังโปรยกรอง และค่าซีโอดีของน้ำทิ้งที่ออกจากถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองยังมีค่าซีโอดีสูงและไม่คงที่

การเติมอาหารเป็นครั้งที่สอง ซีโอดีของน้ำเสียที่เริ่มต้นอยู่ในช่วง 1,056±38.74 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าภายในระยะเวลา 5 วัน น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากถังกรองไร้อากาศมีซีโอดีลดเหลือ 523.21±13.08 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นนำน้ำเสียมาบำบัดต่อในถังโปรยกรอง ใช้ระยะเวลาเพียง 3 วัน มีซีโอดีลดเหลือ 88.49±17.13 มิลลิกรัมต่อลิตร รวมแล้วใช้ระยะเวลาในการบำบัดซีโอดีเหลือเพียง 8 วัน และค่าซีโอดีของน้ำทิ้งที่ออกจากถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองมีค่าซีโอดีต่ำและคงที่ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมที่ 120 มิลลิกรัมต่อลิตร

การเติมอาหารครั้งที่สาม โดยซีโอดีของน้ำเสียเริ่มต้นอยู่ในช่วง 1,231±45.31 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าภายในระยะเวลา 3 วัน น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากถังกรองไร้อากาศมีซีโอดีลดเหลือ 543.29±11.06 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นนำน้ำเสียมาบำบัดต่อในถังโปรยกรองมีซีโอดีลดเหลือ 38.07±9.20 มิลลิกรัมต่อลิตร รวมแล้วใช้ระยะเวลาในการบำบัดซีโอดีเหลือเพียง 6 วัน และค่าซีโอดีของน้ำทิ้งที่ออกจากถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองมีค่าซีโอดีต่ำและคงที่ จากนั้นจึงเริ่มต้นทำการทดลองที่ 1

4.2 น้ำเสียสังเคราะห์

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง กำหนดให้มีความเข้มข้นซัลเฟต 100 200 500 1,000 และ 1,500 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร กำหนดให้มีค่าซีโอดีต่อซัลเฟต 5:1 โดยใช้น้ำตาลทรายขาวเป็นแหล่งพลังงานและโซเดียมซัลเฟตเป็นแหล่งซัลเฟต ควบคุมพีเอชภายในถังกรองไร้อากาศเท่ากับ 8.0-8.5 โดยใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตและเติมธาตุอาหารเสริมที่มีความสำคัญต่อจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสีย และลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นซัลเฟตและซีโอดีแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นซัลเฟตต่างๆ

ความเข้มข้นซัลเฟต (มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร)	**ความเข้มข้นซัลเฟตที่วัดได้ (มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร)**	**ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)**	**ซีโอดีที่วัดได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)**
100	122.55±7.08	500	524.12±31.36
200	226.03±6.24	1,000	1,059.27±65.13
500	508.81±33.90	2,500	2,469.12±54.64
1,000	1,050.23±62.91	5,000	4,786.33±204.84
1,500	1,526.42±33.90	7,500	7,708.59±607.34

4.3 การบำบัดพารามิเตอร์ต่างๆ ในระบบแบบแบทช์

การทดลองระบบแบบแบทช์ใช้เวลาทั้งสิ้น 210 วัน ซึ่งแต่ละความเข้มข้นซัลเฟตใช้ระยะเวลาบำบัด 14 วัน และทำการทดลอง 3 ซ้ำในทุกความเข้มข้นซัลเฟต พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ตลอดระยะเวลาทดลอง ได้แก่ ซัลเฟต ซัลไฟด์ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ พีเอช ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (DO) และซีโอดี ในการทดลองแบบแบทช์

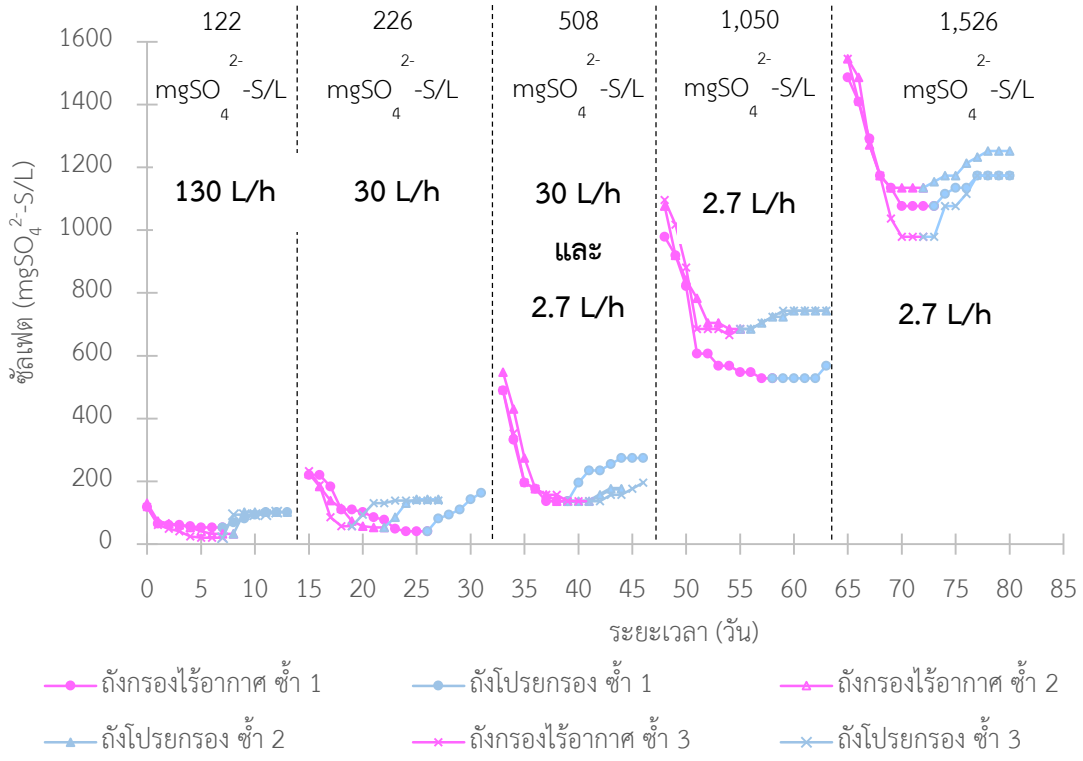
4.3.1 ซัลเฟต

ระยะแรกของการเริ่มต้นระบบด้วยความเข้มข้นซัลเฟตเริ่มต้น 122.55 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร ต้องใช้ระยะเวลา 3-4 วัน ระบบจึงเข้าสู่สภาวะคงที่ พบว่า ความเข้มข้นซัลเฟตในน้ำทิ้งจากระบบบำบัดด้วยถังกรองไร้อากาศมีค่าความเข้มข้นซัลเฟตเหลืออยู่ 35.40±16.51 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 71.06±12.34% แสดงดังรูปที่ 4.1 โดยเปลี่ยนรูปไปเป็นซัลไฟด์และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ความเข้มข้น 55±4.29 มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตร และ 16±3.2 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ

จากนั้นนำซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนรูปของซัลเฟตในถังกรองไร้อากาศมาบำบัดต่อในถังโปรยกรอง พบว่าความเข้มข้นซัลเฟตเพิ่มขึ้นเป็น 102.12±12.75 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร จากนั้นเปลี่ยนความเข้มข้นซัลเฟตเป็น 226 508 1,050 และ 1,526 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร พบว่าค่าความเข้มข้นซัลเฟตในถังกรองไร้อากาศลดลง และเพิ่มขึ้นจนเกือบเท่าเดิมในถังโปรยกรอง แสดงดังตารางที่ 4.2

ผลของการเพิ่มความเข้มข้นซัลเฟตในถังโปรยกรองที่ความเข้มข้นซัลเฟต 122.55 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร เกิดขึ้นจากครั้งแรกของการทดลองใช้อัตราการเวียนน้ำที่สูง คือ 130 ลิตรต่อชั่วโมง ทำให้มีปริมาณออกซิเจนละลาย (DO) ในถังโปรยกรองที่มากเกินไปอยู่ที่ 6.80-7.00 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงทำให้ซัลไฟด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์เปลี่ยนเป็นซัลเฟต ซึ่งพบว่าความเข้มข้นซัลเฟตในถังโปรยกรองสูงถึง 83.51% และซัลไฟด์ไม่สามารถเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ได้ เมื่อใช้ความเข้มข้นซัลเฟต 226 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร จึงลดอัตราการเวียนน้ำเป็น 30 ลิตรต่อชั่วโมง ได้ค่า DO เท่ากับ 5.35-6.48 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ความเข้มข้นซัลเฟตในถังโปรยกรองลดลงเหลือ 65.76% แต่ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ก็ยังน้อย

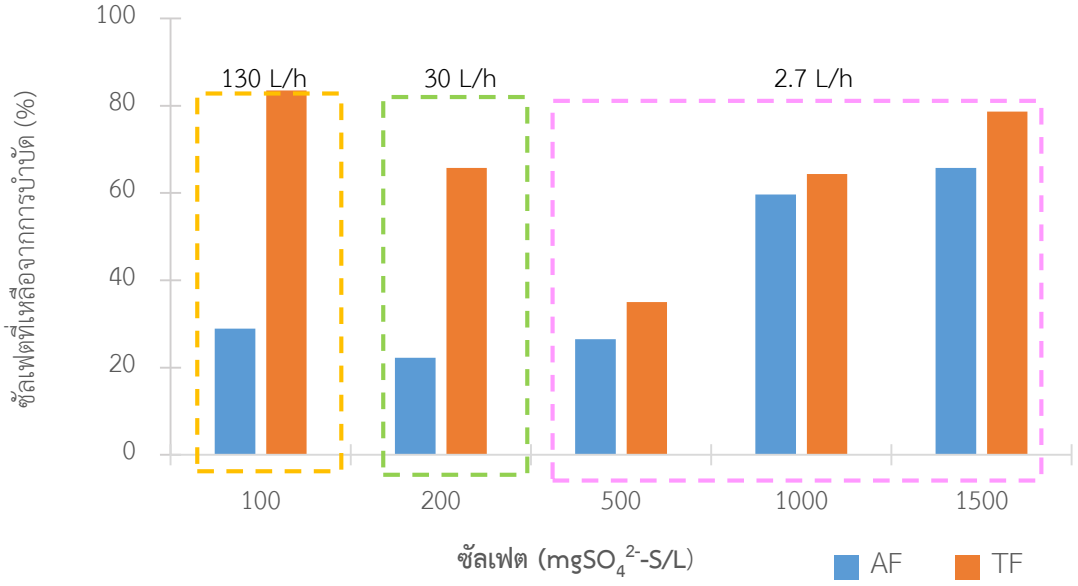
ดังนั้นที่ความเข้มข้นซัลเฟต 508 1,050 และ 1,526 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร จึงลดอัตราการเวียนน้ำลงอีกเหลือ 2.7 ลิตรต่อชั่วโมง ทำให้มีค่า DO เท่ากับ 0.07-0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าซัลไฟด์สามารถเป็นรูปเป็นซัลเฟอร์ได้มากขึ้น และมีความเข้มข้นซัลเฟตที่เหลือจากการบัดในถังโปรยกรองลดลง เท่ากับ 35% 64.33% และ 78.64% ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆกับระยะเวลาบำบัด

ตารางที่ 4.2 ความเข้มข้นซัลเฟตที่ผ่านการบำบัดจากถังกรองไร้อากาศและโปรยกรอง

ควาเข้มข้นซัลเฟตเริ่มต้นก่อนเข้าระบบ (มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร)	ความเข้มข้นซัลเฟตที่ผ่านการบำบัดจากถังกรองไร้อากาศ (มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร)	ความเข้มข้นซัลเฟตที่ผ่านการบำบัดจากถังโปรยกรอง (มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร)
122.55±7.08	35.40±16.51	102.12±12.75
226.03±6.24	50.38±8.50	148.42±13.13
508.81±33.90	136.99±26.12	215.26±51.78
1,050.23±62.91	632.75±90.39	684±101.69
1,526.42±33.90	1,063.27±79.09	1,200.26±45.19



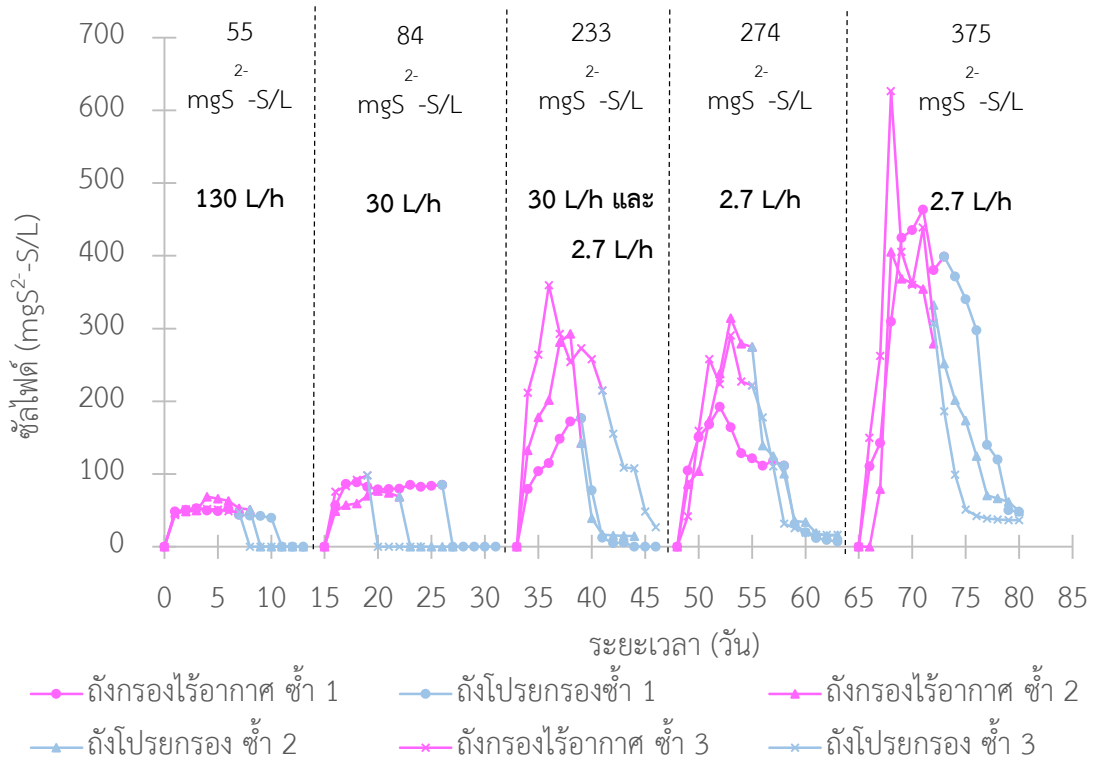
รูปที่ 4.2 ผลของอัตราการเวียนน้ำในถังโปรยกรอง

4.3.2 ซัลไฟด์

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านการบำบัดซัลเฟตจากถังกรองไร้อากาศเกิดเป็นซัลไฟด์ขึ้น จึงต้องนำซัลไฟด์มาบำบัดต่อในถังโปรยกรอง เพื่อที่จะเปลี่ยนรูปจากซัลไฟด์เป็นซัลเฟอร์ในสภาวะเติมอากาศ ซึ่งในถังกรองไร้อากาศที่ความเข้มข้นซัลเฟต 122 226 508 1,050 และ 1,526 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร เกิดเป็นซัลไฟด์ที่ความเข้มข้น 55±4.29 84±14.17 233±36.32 274±27.16 และ 375±47.17 มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตร ตามลำดับ โดยที่ความเข้มข้นซัลไฟด์ 55 84 และ 233 มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตร ใช้อัตราการเวียนน้ำ 130 และ 30 ลิตรต่อชั่วโมง และระยะเวลาในการบำบัดเพียง 1 วัน พบว่าสามารถบำบัดความเข้มข้นซัลไฟด์ได้ทั้งหมด แต่ในขณะเดียวกันการใช้อัตราการเวียนน้ำดังกล่าวนี้ก็สามารถทำให้เพิ่มความเข้มข้นซัลเฟตขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ลดลง

ส่วนที่ความเข้มข้นซัลไฟด์ 233 274 และ 375 มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตร สามารถบำบัดความเข้มข้นซัลไฟด์ให้เหลือเพียง 20.83±8.72 13.07±5.19 และ 44.60±6.80 มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตร ตามลำดับ โดยใช้อัตราการเวียนน้ำ 2.7 ลิตรต่อชั่วโมง และระยะเวลาในการบำบัด 6-7 วัน ซึ่งการใช้อัตราการเวียนน้ำดังกล่าวนี้สามารถลดการเพิ่มขึ้นของความ

เข้มข้นซัลเฟตได้เป็นอย่างมาก และส่งผลให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์เพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.3



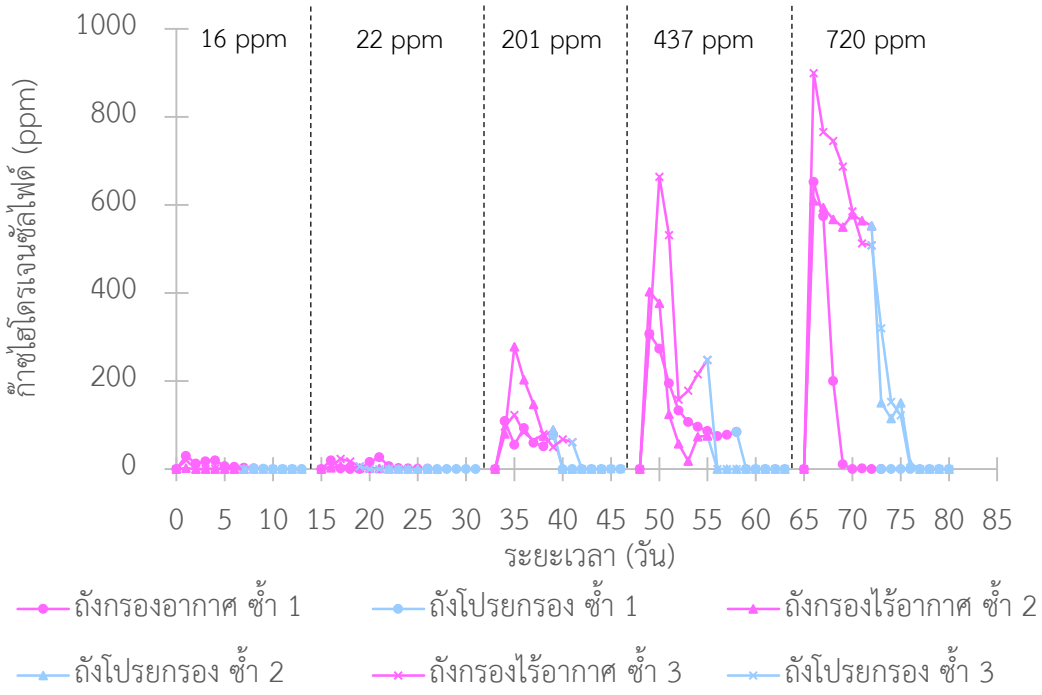
รูปที่ 4.3 ซัลไฟด์ที่ความเข้มข้นต่างๆกับระยะเวลาบำบัด

Chulalongkorn University

4.3.3 ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนรูปของซัลเฟตในสภาวะไร้อากาศ จากการทดลองพบว่า ความเข้มข้นซัลเฟต 122 226 508 1,050 และ 1,526 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร เกิดเป็นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 16.47±3.78 22.37±2.55 201.33±74.43 437.07±83.10 และ 720.40±156.77 ส่วนในล้านส่วน แสดงดังรูปที่ 4.4 ซึ่งเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นซัลเฟตสูงขึ้น ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ก็สูงขึ้นเช่นกัน แต่ถ้าคำนวณในหน่วยมวลแล้ว พบว่าปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยมาก 0.83% ซึ่งจะแสดงในหัวข้อการหาสมดุลมวลซัลเฟอร์

ต่อไป และเป็นไปตามการทดลองที่ต้องการให้เกิดปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์น้อยกว่าปริมาณซัลไฟด์ละลายน้ำมากๆ จึงเลือกควบคุมพีเอชของถังกรองไร้อากาศอยู่ในช่วง 8.0-8.5



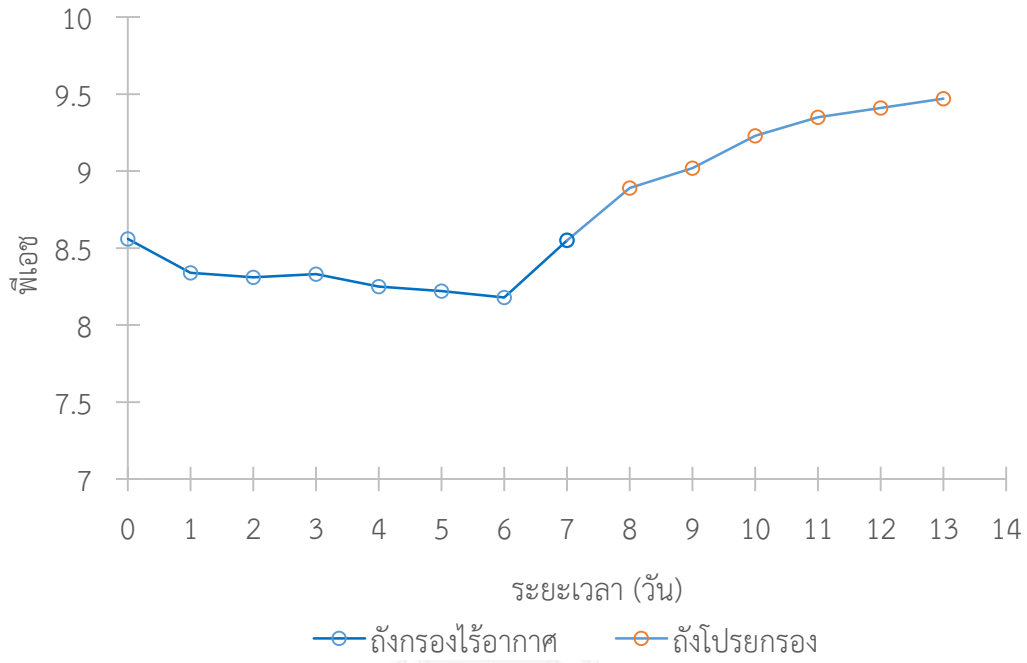
รูปที่ 4.4 ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์กับระยะเวลาบำบัด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.1.4 พีเอช

การทดลองควบคุมพีเอชของถังกรองไร้อากาศมีค่าอยู่ในช่วง 8.0-8.5 โดยการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าถังกรองไร้อากาศมีพีเอชเริ่มต้นประมาณ 8.5 ในวันแรกของการทดลองพีเอชลดลงเหลือ 8.34 และเริ่มลดลงเมื่อระยะเวลาบำบัดผ่านไป 5 วัน พีเอชน้ำทิ้งของถังกรองไร้อากาศลดลงเหลือ 8.10 เนื่องจากน้ำเสียในถังกรองไร้อากาศอยู่ในสภาวะการหมักเกิดการสร้างกรดทำให้พีเอชลดต่ำลง ซึ่งเป็นการเปลี่ยนรูปจากซัลเฟต (SO_4^{2-}) เป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ (HS^-) เป็นส่วนใหญ่ และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ค่อนข้างน้อย จากนั้นนำน้ำเสียจากถังกรองไร้อากาศเข้าสู่ถังโปรยกรอง พบว่าภายในระยะเวลา 6 วัน น้ำทิ้งมีค่าพีเอชเพิ่มสูงขึ้นเป็น 9.47แสดงดัง

รูปที่ 4.5 เนื่องจากน้ำเสียที่อยู่ในถังโปรยกรองอยู่ในสภาวะที่พีเอชเกิดความเป็นด่าง ซึ่งเป็นการเปลี่ยนรูปจากไฮโดรเจนซัลไฟด์ (HS^-) เป็นซัลเฟอร์ (S^0) และหรือซัลเฟต (SO_4^{2-})



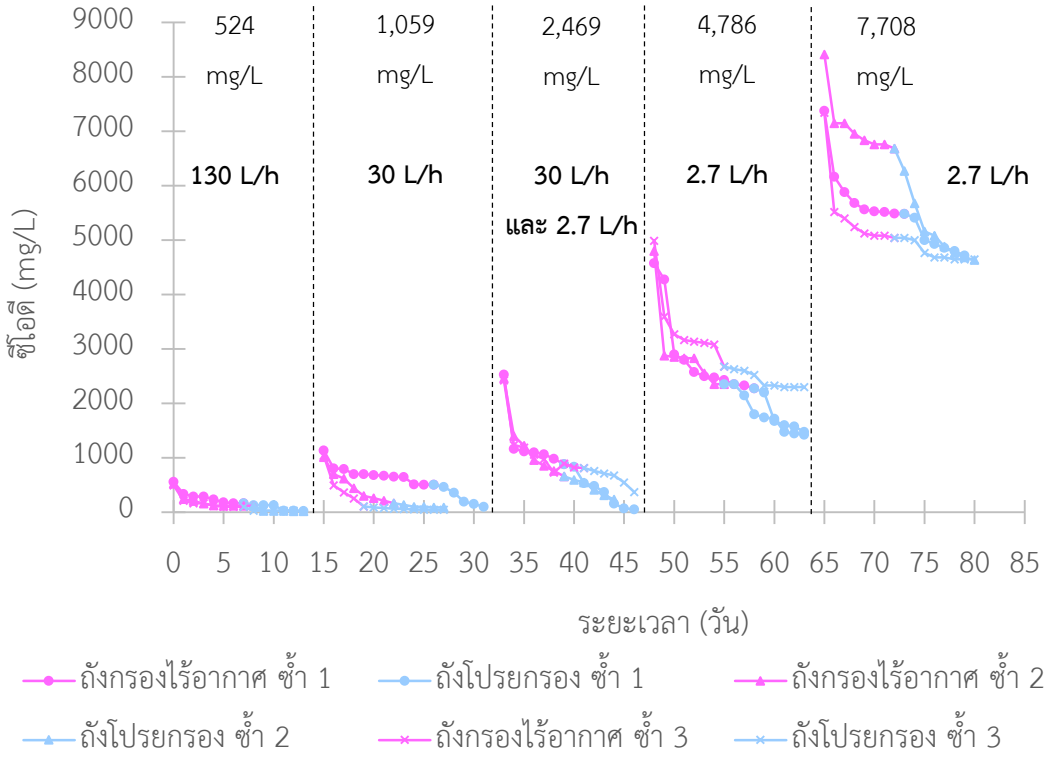
รูปที่ 4.5 พีเอชของถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองต่อระยะเวลาบำบัด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.1.5 ซีโอดี

การทดลองใช้น้ำตาลทรายเป็นแหล่งพลังงานให้แก่จุลินทรีย์ในระบบ โดยเริ่มการทดลองที่ซีโอดี 500 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าถังกรองไร้อากาศสามารถบำบัดซีโอดีในน้ำเสียสังเคราะห์จาก 524±31.36 ลดลงเหลือ 113.55±12.34 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำทิ้งจากถังโปรยกรองมีค่าซีโอดี 22.66±5.30 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเปลี่ยนซีโอดีเป็น 1,059 2,469 4,786 และ 7,708 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากถังกรองไร้อากาศมีค่าซีโอดีเหลือ 257.80±215.67 783.94±113.70 2,433.33±893.27 และ 5,733.65±850.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อน้ำเสียจากถังกรองไร้อากาศผ่านเข้าสู่ถังโปรยกรองค่าซีโอดีของน้ำทิ้งถูกบำบัดให้ลดลงเหลือ 75.13±28.24 216.56±159.29 1,964.00±893.27 และ 4,657±37.06 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.6 ผลของการเปลี่ยนความเข้มข้นซีโอดีและซัลเฟตที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 5:1 พบว่าเมื่อความ

เข้มข้นซีโอดีสูงขึ้น น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองมีค่าซีโอดีคงเหลือในน้ำสูงขึ้นด้วย เนื่องจากความเป็นพิษของซัลไฟด์ที่เกิดจากซัลเฟต ทำให้เกิดการยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ ซึ่งจะอธิบายต่อไปในหัวข้อประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.6 ซีโอดีของถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองต่อระยะเวลาบำบัด

4.4 อัตราการบำบัด

สำหรับหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาการหาอัตราการบำบัดซัลเฟตของแต่ละความเข้มข้นซัลเฟตในถังกรองไร้อากาศ และอัตราการบำบัดซัลไฟด์ของแต่ละความเข้มข้นในถังโปรยกรอง

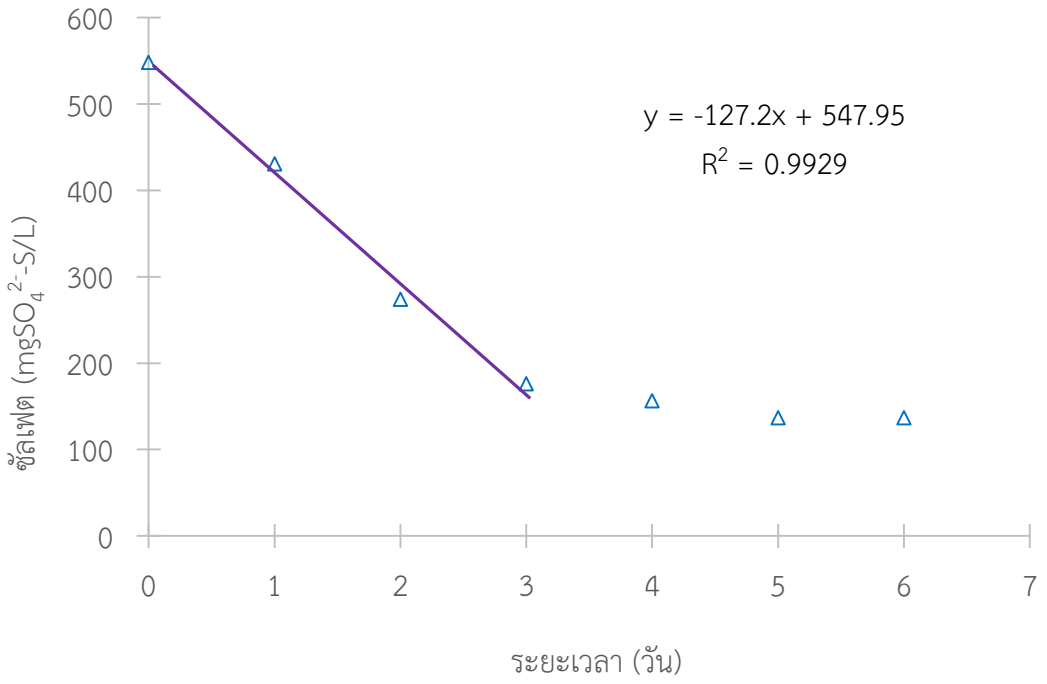
4.4.1 อัตราการบำบัดซัลเฟต

อัตราการบำบัดซัลเฟต คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันเป็นการเปลี่ยนรูปจากซัลเฟต (SO_4^{2-}) ไปเป็นซัลไฟด์ (S^{2-}) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ซัลไฟด์ละลายน้ำ (HS^-) สำหรับใน

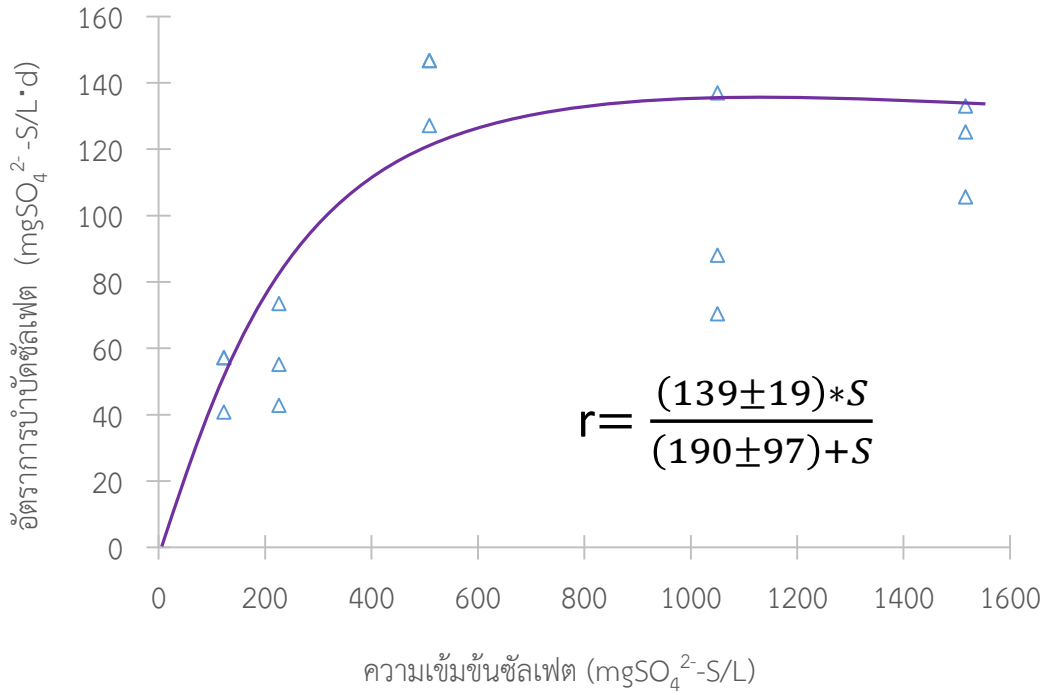
การทดลองนี้วัดซัลไฟด์ในรูป S^{2-} ในการหาอัตราการบำบัดซัลเฟตสามารถหาได้จากค่าความชันเริ่มต้นที่เป็นเส้นตรงระหว่างกราฟความเข้มข้นซัลเฟตและเวลา ซึ่งระยะเวลาที่เป็นเส้นตรงจะอยู่ในช่วงประมาณ 4 วันแรกของการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.7 เป็นตัวอย่างการหาอัตราการบำบัดซัลเฟตที่ความเข้มข้น 508 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร จากความชันในช่วงเริ่มต้นมีอัตราการบำบัดซัลเฟต เท่ากับ 127.20 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตรต่อวัน และความเข้มข้นซัลเฟต 122 226 508 1,050 และ 1,526 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร มีอัตราการบำบัดซัลเฟต คือ 51.74±9.43 57.2±15.41 140.25±11.30 98.5±34.48 และ 119.38±14.11 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตรต่อวัน ตามลำดับ เมื่อนำอัตราการบำบัดซัลเฟตที่ได้มาสร้างกราฟกับความเข้มข้นซัลเฟต แสดงดังรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าอัตราการบำบัดซัลเฟตเพิ่มขึ้นตามค่าความเข้มข้นของซัลเฟตเริ่มต้นและค่อนข้างคงที่เมื่อความเข้มข้นซัลเฟตสูงๆ และได้กราฟเป็นไปตามสมการโมนอด (Monod's Kinetic) โดยมีค่า maximum specific growth rate (k_m) เท่ากับ 139±19 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตรต่อวัน และมีค่า half velocity constant (K_s) เท่ากับ 190±97 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร จากโปรแกรม sigmaplot

ผลการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Hareimana และคณะ) ทำการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นซัลเฟต 257 644 934 1,432 และ 3,255 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันเป็นไปตามสมการโมนอด ซึ่งมีค่า k_m เท่ากับ 128 $mgSO_4^{2-}/gVSS{\cdot}d$ และค่า K_s เท่ากับ 614 มิลลิกรัมต่อลิตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.7 ตัวอย่างการหาอัตราการบำบัดซัลเฟตที่ความเข้มข้น 508 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นซัลเฟตและอัตราการบำบัดซัลเฟต

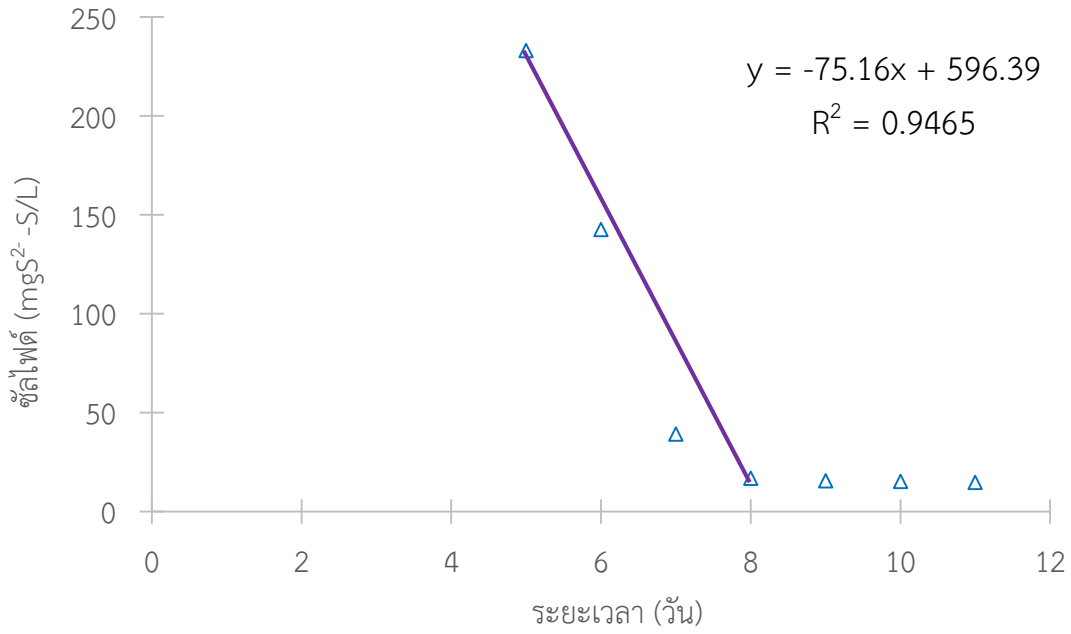
4.4.2 อัตราการบำบัดซัลไฟด์

อัตราการบำบัดซัลไฟด์ คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาซัลไฟด์ออกซิเดชันเป็นการเปลี่ยนรูปจากซัลไฟด์ (S^{2-}) ไปเป็นซัลเฟอร์ S^0 สำหรับในการทดลองนี้วัดซัลไฟด์ในรูป S^{2-} ในการหาอัตราการบำบัดซัลไฟด์สามารถหาได้จากค่าความชันเริ่มต้นที่เป็นเส้นตรงระหว่างกราฟความเข้มข้นซัลไฟด์เริ่มต้นที่เข้าสู่ถังโปรยกรองและเวลาในการบำบัด ซึ่งระยะเวลาที่เป็นเส้นตรงจะอยู่ในช่วงประมาณ 4 วันแรกของการบำบัดในถังโปรยกรอง แสดงดังรูปที่ 4.9 เป็นตัวอย่างการหาอัตราการบำบัดซัลไฟด์ที่ความเข้มข้น 233 มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตร จากความชันในช่วงเริ่มต้นมีอัตราการบำบัดซัลไฟด์ เท่ากับ 75.16 มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตรต่อวัน และความเข้มข้นซัลไฟด์ 55 84 233 274 และ 375 มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตร พบว่าที่อัตราการเวียนน้ำสูง คือ 130 ลิตรต่อชั่วโมง และ 30 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งมีอัตราการบำบัดซัลไฟด์ที่สูงกว่าอัตราการเวียนน้ำต่ำ 2.7 ลิตรต่อชั่วโมง จะเห็นได้ว่ากราฟเส้นทึบที่ความเข้มข้นซัลไฟด์ 55 84 และ 233 มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตร มีอัตราการบำบัดซัลไฟด์เฉลี่ย 46.28±5.88 84.01±14.75 และ 104.46±31.76 มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตรต่อวัน โดยใช้อัตราการเวียนน้ำสูง คือ 130 ลิตรต่อชั่วโมง และ 30 ลิตรต่อชั่วโมง มีผลทำให้ค่าออกซิเจนละลายน้ำสูงขึ้นมีค่า DO อยู่ในช่วง 5.35-7.00 มิลลิกรัมต่อลิตร และอัตราการบำบัดซัลไฟด์ที่สูงไปด้วย แต่ทำให้ซัลไฟด์ไม่เปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ โดยมีค่า k_m เท่ากับ 145±34 มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตรต่อวัน มีค่า K_s เท่ากับ 79±44 มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตร จากโปรแกรม sigmaplot แสดงดังรูปที่ 4.10

ส่วนกราฟเส้นประที่ความเข้มข้นซัลไฟด์ 230 280 และ 380 มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตร มีอัตราการบำบัดซัลไฟด์เฉลี่ย 43.05±0.00 50.67±4.72 และ 56.56±11.44 มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตรต่อวัน โดยใช้อัตราการเวียนน้ำต่ำ 2.7 ลิตรต่อชั่วโมง มีผลทำให้ค่าออกซิเจนละลายน้ำต่ำอยู่ในช่วง 0.07-0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร และอัตราการบำบัดซัลไฟด์ต่ำด้วย จึงทำให้ซัลไฟด์เปลี่ยนเป็นซัลเฟอร์ได้มากกว่าที่จะเปลี่ยนเป็นซัลเฟตที่อัตราการเวียนน้ำสูงๆ ซึ่งมีค่า k_m เท่ากับ 97±54 มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตรต่อวัน มีค่า K_s เท่ากับ 266±341 มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตร และค่า R^2 เท่ากับ 0.31 จากโปรแกรม sigmaplot แสดงดังรูปที่ 4.10

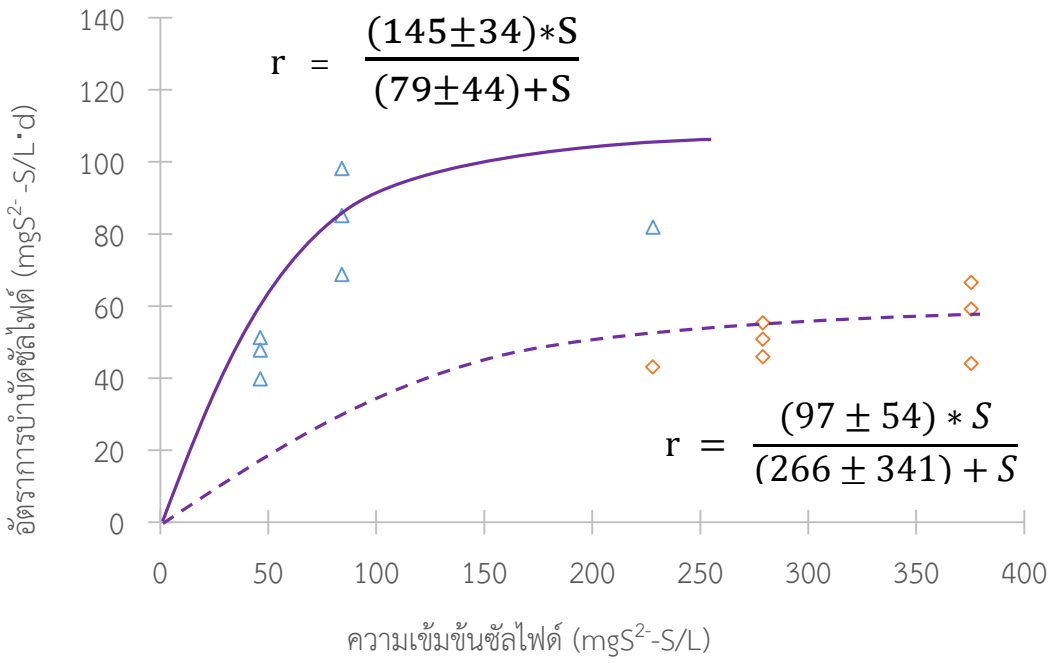
ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Ramirez และคณะ, 2009) ทำการศึกษาอัตราการบำบัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ความเข้มข้น 25-750 ppmv พบว่าอัตราการบำบัด

ไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นไปตามสมการโมนอด ซึ่งมีค่า k_m K_s และ K_1 ซึ่งค่า K_1 สามารถหาได้จาก $\frac{km}{Ks}$ แสดงดังตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าเมื่อค่า EBRT ลดจาก 100 วินาที เหลือ 70 วินาที ค่า k_m K_s และ K_1 ก็มีค่าลดลง ซึ่งจากผลการทดลองการลดอัตราการเวียนน้ำจาก 130 ลิตรต่อชั่วโมง เหลือ 2.7 ลิตรต่อชั่วโมง ค่า k_m K_s และ K_1 ก็มีค่าลดลงเช่นกัน แสดงดังตารางที่ 4.4



Chulalongkorn University

รูปที่ 4.9 ตัวอย่างการหาอัตราการบำบัดซัลไฟด์ที่ความเข้มข้น 233 มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตร



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นซัลไฟด์และอัตราการบำบัดซัลไฟด์ที่อัตราการเวียนน้ำต่างๆ

ตารางที่ 4.3 ค่า k_m K_s และ K_1 จากงานวิจัยของ Ramirez และคณะ (2009)

EBRT (s)	k_m ($gSm^{-3}h^{-1}$)	K_s (ppmv)	K_1 (d^{-1})
100	29.98	101.76	6.96
70	24.67	56.31	10.51

ตารางที่ 4.4 ค่า k_m K_s และ K_1 ที่อัตราการเวียนน้ำ 130 30 และ 2.7 ลิตรต่อชั่วโมง

อัตราการเวียนน้ำ (ลิตรต่อชั่วโมง)	**k_m (มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตรต่อวัน)**	**K_s (มิลลิกรัมซัลไฟด์ต่อลิตร)**	**K_1 ($วัน^{-1}$)**
130 และ 30	145±34	79±44	1.84
2.7	97±54	266±341	0.35

4.5 สมดุลมวลซัลเฟอร์ของการทดลองแบบแบทช์

วิธีการหาปริมาณตะกอนซัลเฟอร์โดยตรงนั้นเป็นวิธีการทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากตะกอนซัลเฟอร์จะเกาะติดอยู่ที่ตัวกลางพลาสติกและบางส่วนก็อาจจะหลุดออกมาจากตัวกลาง ซึ่งจะกลายเป็นของแข็งแขวนลอยอยู่ในน้ำ ดังนั้นในการทำวิจัยได้ใช้การหาปริมาณตะกอนซัลเฟอร์ด้วยวิธีการคำนวณสมดุลมวลซัลเฟอร์ นอกจากนี้การคำนวณสมดุลมวลซัลเฟอร์ยังทำให้ทราบว่ามีปริมาณสารหายไปจากระบบมีมากน้อยเพียงใด และทราบสาเหตุความคลาดเคลื่อนที่ทำให้ปริมาณสารหายไปจากระบบได้

จากตารางที่ 4.5 เป็นการแสดงตัวอย่างการคำนวณสมดุลมวลซัลเฟอร์ของซัลเฟต 500 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร ที่ใช้อัตราการวียนน้ำ 2.7 ลิตรต่อชั่วโมง โดยเริ่มต้นจากปริมาณซัลเฟตก่อนเข้าถังกรองไร้อากาศ เท่ากับ 13,698.63 มิลลิกรัมซัลเฟอร์ เมื่อผ่านการบำบัดจากถังกรองไร้อากาศเหลือซัลเฟต ซัลไฟด์ และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เท่ากับ 3,424.66 3,561.50 และ 0.74 มิลลิกรัมซัลเฟอร์ ตามลำดับ รวมมีปริมาณซัลเฟอร์ทั้งหมดที่ผ่านการบำบัดในถังกรองไร้อากาศแล้วเหลืออยู่ 6,986.90 มิลลิกรัมซัลเฟอร์ ซึ่งมีปริมาณซัลเฟอร์ทั้งหมดที่หายไปจากถังกรองไร้อากาศ 6,711.73 มิลลิกรัมซัลเฟอร์ จากนั้นก็นำน้ำที่บำบัดจากถังกรองไร้อากาศแล้วมาบำบัดต่อในถังโปรยกรอง สุดท้ายแล้วพบว่ามีปริมาณซัลเฟต ซัลไฟด์ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และซัลเฟอร์ เท่ากับ 4,403.13 366.66 0 และ 2,217.11 มิลลิกรัมซัลเฟอร์ ตามลำดับ

สาเหตุของปริมาณซัลเฟอร์ทั้งหมดหายไปเนื่องจากเกิดความคลาดเคลื่อนของวิธีการวัดในแต่ละพารามิเตอร์ที่ใช้วิธีการวัดที่แตกต่างกัน และวิธีการวัดซัลไฟด์น่าจะเกิดความคลาดเคลื่อนมากที่สุด เพราะเกิดจากการเจือจางน้ำตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์และเมื่อนำผลที่ได้มาเทียบกับกราฟมาตรฐานซัลไฟด์ที่เป็นกราฟล็อคการิทึมทำให้ต้องแปลค่าที่ได้ให้อยู่ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรอีกรอบหนึ่ง จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนค่อนข้างมาก

ตารางที่ 4.5 สมดุลมวลซัลเฟอร์ของการทดลองแบบแบทช์

พารามิเตอร์	ถังกรองไร้อากาศ		ถังโปรยกรอง	
	เริ่มต้น (mg-S)	สุดท้าย (mg-S)	เริ่มต้น (mg-S)	สุดท้าย (mg-S)
ซัลเฟต (SO_4^{2-})	13,698.63	3,424.66	3,424.66	4,403.13
ซัลไฟด์ (S^{2-})	0	3,561.50	3,561.50	366.66
ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)	0	0.74	0.74	0
ซัลเฟอร์ (S^0)	0	-	-	2,217.11
ซัลเฟอร์ทั้งหมด	13,698.63	6,986.90	6,986.90	6,986.90

4.6 ประสิทธิภาพการบำบัดของถังกรองไร้อากาศและตามด้วยถังโปรยกรองแบบแบทช์

สำหรับในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบอัตราการเวียนน้ำและค่าออกซิเจนละลาย (DO) ต่อประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟต ซัลไฟด์ ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ และประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี

4.6.1 ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตและซัลไฟด์

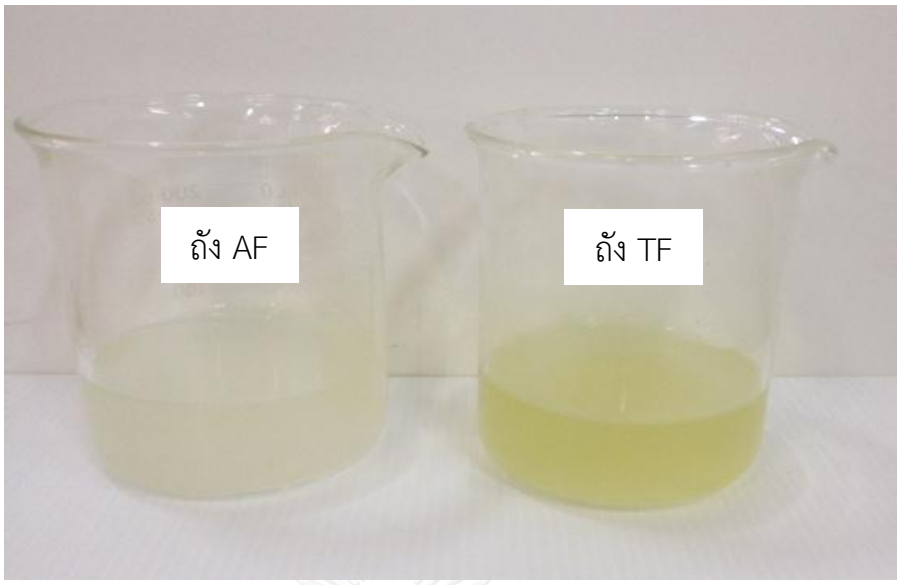
ผลการทดลองพบว่า ที่อัตราการเวียนน้ำในถังโปรยกรองสูงๆที่ 130 และ 30 ลิตรต่อชั่วโมง ทำให้มีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำหรือค่า DO สูงอยู่ในช่วง 6.80-7.00 และ 5.35-6.48 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ มีประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตของถังกรองไร้อากาศแล้วตามด้วยถังโปรยกรอง เท่ากับ 15.09±7.59% และ 36.66±7.45% ตามลำดับ และยังทำให้ซัลไฟด์เปลี่ยนไปเป็นซัลเฟตมากกว่าที่จะเปลี่ยนเป็นซัลเฟอร์ แสดงดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.11 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสีของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากถังโปรยกรองมีสีเหลืองอ่อนและมีปริมาณตะกอนซัลเฟอร์เล็กน้อย และมีประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์ เท่ากับ 100% ส่วนที่อัตราการเวียนน้ำต่ำที่ 2.7 ลิตรต่อชั่วโมง ทำให้มีค่า DO ในน้ำน้อยมากอยู่ที่ 0.07-0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตของถังกรองไร้อากาศแล้วตามด้วยถังโปรยกรองเพิ่มขึ้นเป็น 61.09±17.62% มีประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์ลดลงเล็กน้อยเป็น 94.97±4.12% ซึ่งสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 4.12 โดยสีของน้ำทิ้งที่ผ่าน

การบำบัดจากถังโปรยกรองมีสีเหลืองเข้มและมีปริมาณตะกอนซัลเฟอร์ค่อนข้างมาก ดังนั้นจะเห็นได้ว่าอัตราการเวียนน้ำเป็นพารามิเตอร์หลักที่สำคัญต่อการเปลี่ยนรูปจากซัลไฟด์เป็นซัลเฟอร์ แต่ไม่ได้มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์มาก เนื่องจากการบำบัดซัลไฟด์ทั้ง 5 ความเข้มข้นที่ใช้อัตราการเวียนน้ำต่างกันมีประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์ค่อนข้างคงที่ คือ 95.21%

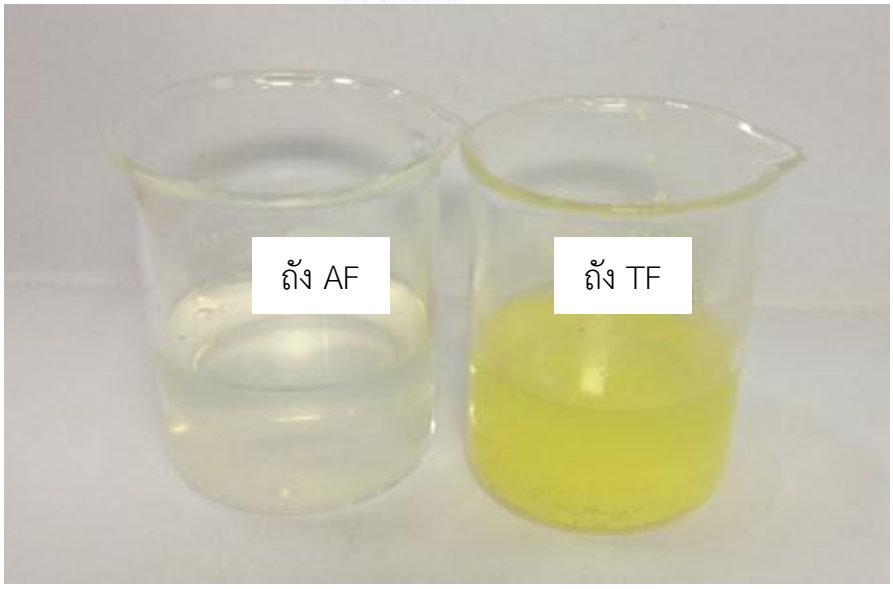
จากผลการทดลองของปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (DO) ต่อประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปจากซัลไฟด์เป็นซัลเฟอร์สอดคล้องกับงานวิจัยของ Liu และคณะ (2013) ค่า DO 0.55-2.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์อยู่ที่ 80-92% แต่ถ้าค่า DO มากกว่า 4.8 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ลดลงจาก 92.20% เหลือ 64.70% และประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตลดลง 17.50% ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ควรควบคุมค่า DO ให้น้อย แต่ในส่วนของผลการทดลองของงานวิจัยนี้ก็ควบคุมค่า DO อยู่ที่ 0.07-0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ก็ยังได้เพียง 44.33±15.56% ทั้งนี้อาจขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นด้วย เช่น อุณหภูมิ ระยะเวลาการบำบัด ชนิดของจุลินทรีย์

ตารางที่ 4.6 อัตราการเวียนน้ำและค่า DO ต่อประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตและซัลไฟด์

อัตราการเวียนน้ำ (ลิตร/ชั่วโมง)	**ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (DO) (mg/L)**	**ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตถัง AF-TF (%)**	**ประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์ถัง TF (%)**
130	6.80-7.00	15.09±7.59	100
30	5.35-6.48	36.66±7.45	100
2.7	0.07-0.10	61.09±17.62	94.97±4.12



รูปที่ 4.11 น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากถังกรองไร้อากาศและและถังโปรยกรอง ที่อัตราการเวียนน้ำ 30 ลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4.12 น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากถังกรองไร้อากาศและและถังโปรยกรอง ที่อัตราการเวียนน้ำ 2.7 ลิตรต่อชั่วโมง

4.6.2 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี

ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของถังกรองไร้อากาศและตามด้วยถังโปรยกรองมีค่าแสดงดังตารางที่ 4.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของถังกรองไร้อากาศและตามด้วยถังโปรยกรองมีประสิทธิภาพการบำบัดลดลงเมื่อความเข้มข้นซัลเฟตสูงขึ้นเป็น 4,786.33 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากความเป็นพิษของซัลไฟด์จึงเกิดการยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ ซึ่งจากงานวิจัยของ Maillacheruvu และคณะ (1993) ได้ศึกษาความเป็นพิษของไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และซัลไฟด์ละลายน้ำ (HS^-) ต่อจุลินทรีย์ SRB และ MPB ในถังกรองไร้อากาศ โดยใช้อะซิเตทและกูลโคสเป็นแหล่งคาร์บอน พบว่าที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ 60-75 มิลลิกรัมซัลเฟอร์ต่อลิตร และความเข้มข้นซัลไฟด์ละลายน้ำ 150-200 มิลลิกรัมซัลเฟอร์ต่อลิตร ไม่มีผลต่อความเป็นพิษของจุลินทรีย์ แต่ถ้าความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์เพิ่มขึ้น 100-150 มิลลิกรัมซัลเฟอร์ต่อลิตร และความเข้มข้นซัลไฟด์ละลายน้ำ 200-400 มิลลิกรัมซัลเฟอร์ต่อลิตร ทำให้จุลินทรีย์อยู่ในสภาวะเครียดมีผลต่อการยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์

จากการทดลองนี้ที่ซีโอดี 4,786.33 มิลลิกรัมต่อลิตร ต่อความเข้มข้นซัลเฟต 1,050.23 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร มีความเข้มข้นซัลไฟด์อยู่ที่ 274 มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตร ซึ่งซัลไฟด์ที่ความเข้มข้น 274 มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตร นี้อยู่ในช่วง 200-400 มิลลิกรัมซัลเฟอร์ต่อลิตร มีผลต่อการยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีลดลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 5:1

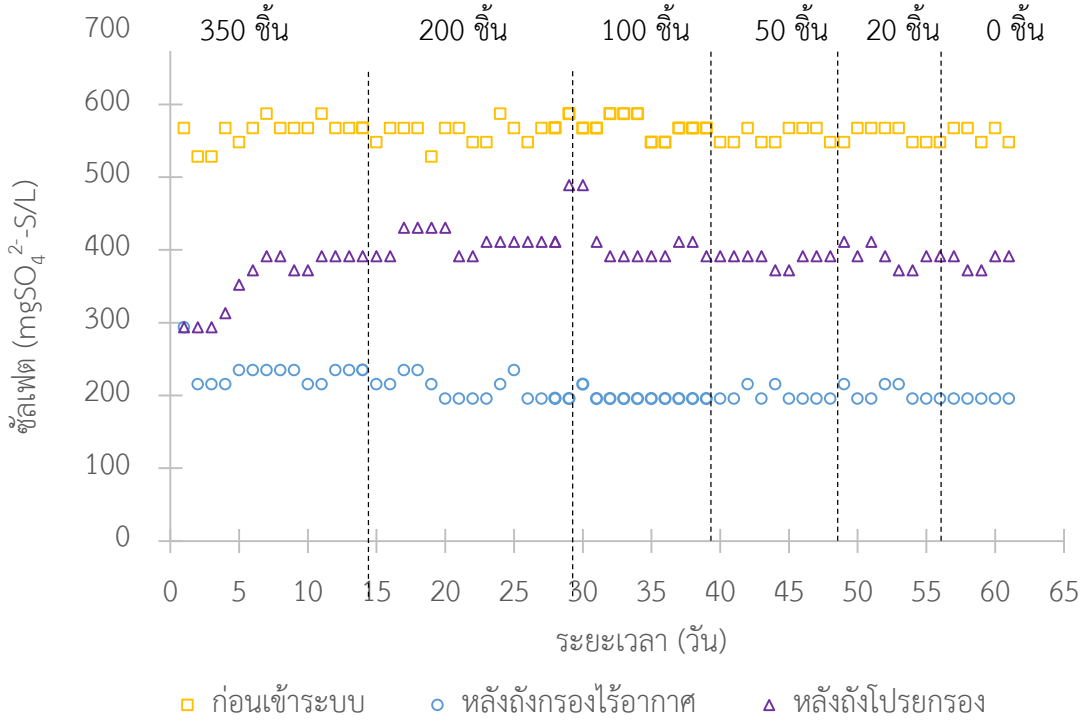
ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	**ซัลเฟต (มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร)**	**ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของถัง AF-TF (%)**
524.12±31.36	122.55±7.08	95.89±1.18%
1,059.27±65.13	226.03±6.24	92.94±2.53%
2,469.12±54.64	508.81±33.90	91.13±3.18%
4,786.33±204.84	1,050.23±62.91	59.35±16.89%
7,708.59±607.34	1,526.42±33.90	39.32±4.87%

4.7 การบำบัดพารามิเตอร์ต่างๆ ในระบบแบบไหลต่อเนื่อง

การทดลองระบบแบบไหลต่อเนื่องใช้เวลาทั้งสิ้น 60 วัน โดยการเดินระบบแบบไหลต่อเนื่อง. ใช้อัตราการไหล 9.5 ลิตรต่อวัน ระยะเวลาเก็บกักของถังกรองไร้อากาศ 4 วัน และถังโปรยกรอง 5 วัน สำหรับในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟต ซัลไฟด์ การเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ ต่อปริมาณต่อตัวกลางในถังโปรยกรองได้แก่ 0 20 50 100 200 และ 350 ชิ้น ซึ่งคิดเป็นพื้นที่ผิวเท่ากับ 0 0.30 0.75 1.50 3.00 และ 5.25 ตารางเมตร ตามลำดับ โดยเลือกใช้ความเข้มข้นซัลเฟต 500 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร และซีโอดี 2,500 มิลลิกรัมต่อลิตร พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ตลอดระยะเวลาทดลอง ได้แก่ ซัลเฟต ซัลไฟด์ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ พีเอช และซีโอดี ในการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง

4.7.1 ซัลเฟต

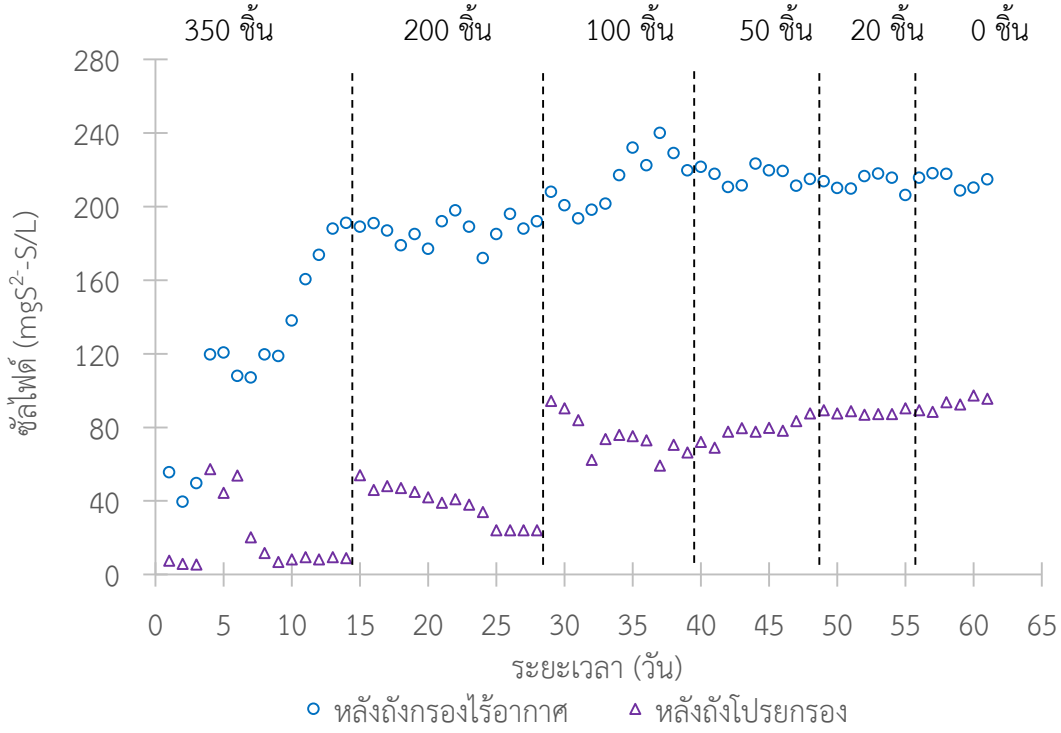
จากการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนเข้าระบบมีความเข้มข้นซัลเฟตอยู่ที่ 562.06±14.35 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร เมื่อผ่านการบำบัดจากถังกรองไร้อากาศมีความเข้มข้นซัลเฟตเหลืออยู่ 209.17±18.75 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร จากนั้นก็นำน้ำเสียที่มีซัลไฟด์เกิดขึ้นมาบำบัดต่อในถังโปรยกรอง พบว่าซัลไฟด์เปลี่ยนรูปกลับไปเป็นซัลเฟตทำให้ความเข้มข้นของซัลเฟตสูงขึ้น แต่จากรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าถังโปรยกรองที่มีปริมาณตัวกลาง 0-350 ชิ้น ไม่มีผลต่อการบำบัดซัลเฟต เนื่องจากซัลเฟตถูกบำบัดตั้งแต่ในถังกรองไร้อากาศและซัลเฟตที่ออกจากถังโปรยกรองก็มีความเข้มข้นคงที่ เท่ากับ 391.39±33.80 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร



รูปที่ 4.13 การบำบัดซัลไฟด์ที่ปริมาณตัวกลางต่างๆระยะเวลา 60 วัน

4.7.2 ซัลไฟด์

ระยะแรกของระบบถังโปรยกรองเริ่มต้นด้วยความเข้มข้นซัลไฟด์ 119.68±9.78 มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตร และปริมาณตัวกลาง 350 ชิ้น ใช้ระยะเวลา 6-7 วัน ระบบจึงเข้าสู่สภาวะคงที่ พบว่าน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากถังโปรยกรองมีความเข้มข้นซัลไฟด์เหลือเพียง 8.49±1.00 มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตร เมื่อความเข้มข้นซัลไฟด์ลดลงอย่างคงที่ จึงลดปริมาณตัวกลางเป็น 200 100 50 20 และ 0 ชิ้น น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วมีความเข้มข้นซัลไฟด์คงเหลือ 75.01±10.97 76.24±4.15 87.24±1.77 และ 92.46±3.28 มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตร แสดงดังรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าปริมาณตัวกลาง 200-350 ชิ้น สามารถบำบัดซัลไฟด์ได้มากกว่าที่ปริมาณตัวกลาง 0-100 ชิ้น เนื่องจาการลดปริมาณตัวกลางก็คือการลดพื้นที่ผิวการยึดเกาะของจุลินทรีย์ ทำให้มีปริมาณจุลินทรีย์ในถังโปรยกรองลดลงประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์ก็ลดลง แต่ในขณะเดียวกันการลดปริมาณตัวกลางก็อาจเกิดช่องว่างภายในถังโปรยกรองเพิ่มขึ้น ทำให้เพิ่มโอกาสที่น้ำเสียสัมผัสกับออกซิเจนได้มากขึ้น ซึ่งอาจส่งผลต่อการลดประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตและการเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์

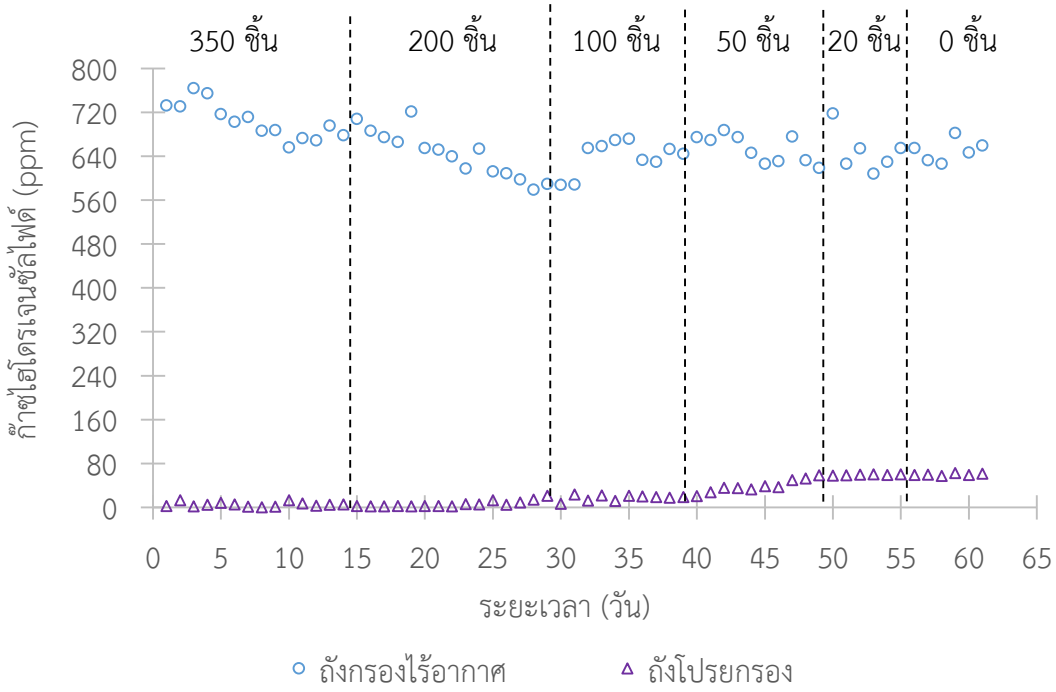


รูปที่ 4.14 การบำบัดซัลไฟด์ที่ปริมาณตัวกลางต่างๆระยะเวลา 60 วัน

4.7.3 ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนรูปของซัลเฟตในสภาวะไร้อากาศ จากการทดลองพบว่า ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดจากความเข้มข้นซัลเฟต 562.06±14.23 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร เกิดเป็นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีความเข้มข้น 659.32±40.87 ส่วนในล้านส่วน นำมาบำบัดต่อในถังโปรยกรองที่มีปริมาณตัวกลางแตกต่างกัน โดยเริ่มจากปริมาณตัวกลาง 350 ชิ้น พบว่าความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เหลือเพียงแค่ 4.96±4.00 ส่วนในล้านส่วน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ จึงลดปริมาณตัวกลางเป็น 200 100 50 20 และ 0 ชิ้น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ผ่านการบำบัดจากถังโปรยกรองมีความเข้มข้นคงเหลือ 4.76±4.21 17.37±5.23 76.24±4.15 56.83±3.73 และ 59.69±1.69 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่า ก๊าซไฮโดรแจนซัลไฟด์ที่ผ่านการบำบัดจากถังโปรยกรองที่มีปริมาณตัวกลาง 200-350 ชิ้น มีความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์คงที่เท่ากับ 4.86±4.06 ส่วนในล้านส่วน ส่วนที่ปริมาณตัวกลาง 0-100 ชิ้น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ผ่านการบำบัดออกจากถังโปรยกรองมีความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้น

เนื่องจากการลดปริมาณตัวกลางก็คือการลดพื้นที่ผิวการยึดเกาะของจุลินทรีย์ ทำให้มีปริมาณจุลินทรีย์ในถังโปรยกรองลดลงประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ก็ลดลง

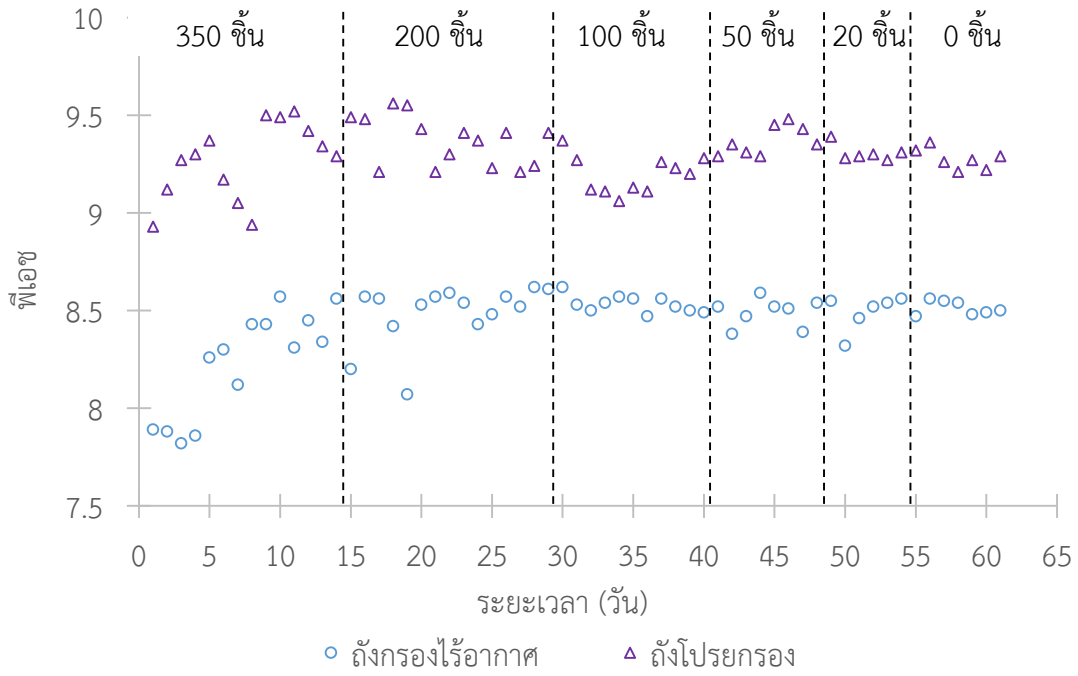


รูปที่ 4.15 การบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ปริมาณตัวกลางต่างๆระยะเวลา 60 วัน

4.7.4 พีเอช

การทดลองแบบไหลต่อเนื่องควบคุมพีเอชของถังกรองไร้อากาศอยู่ในช่วง 8.0-8.5 โดยการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตในน้ำเสียสังเคราะห์เช่นเดียวกับการทดลองแบบแบทช์ ซึ่งในช่วง 4 วันแรกของการเดินระบบพีเอชลดลงเหลือประมาณ 7.8±0.03 ทำให้ทราบว่าควรต้องเตรียมน้ำเสียให้มีพีเอชสูงกว่า 8.5 เล็กน้อย เมื่อน้ำทิ้งผ่านการบำบัดจากถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองมีพีเอชสูงถึง 9.30±0.14 แสดงดังรูปที่4.16 เนื่องจากน้ำเสียในถังกรองไร้อากาศอยู่ในสภาวะการหมักเกิดการสร้างกรดทำให้พีเอชลดต่ำลง ซึ่งเป็นการเปลี่ยนรูปจากซัลเฟต (SO_4^{2-}) เป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ (HS^-) เป็นส่วนใหญ่ และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ค่อนข้างน้อย จากนั้นนำน้ำเสียจากถังกรองไร้อากาศเข้าสู่ถังโปรยกรองน้ำทิ้งมีค่าพีเอชเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากน้ำเสียที่อยู่ในถังโปรยกรองอยู่ในสภาวะที่พีเอชเกิดความเป็นด่าง ซึ่งเป็นการเปลี่ยนรูปจากไฮโดรเจนซัลไฟด์ (HS^-) เป็นซัลเฟอร์ (S^0) และหรือซัลเฟต (SO_4^{2-})

จากงานวิจัยของ Liu และคณะ (2013) รายงานว่า พีเอชที่อยู่ในช่วง 7.8-8.2 เป็นช่วงที่แบคทีเรียสามารถบำบัดซัลไฟด์ได้สูงสุด 95% จากความเข้มข้นซัลไฟด์เริ่มต้น 120-130 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเหลือเพียง 6 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ 87.60% แต่ถ้าพีเอชสูงกว่า 9.0 ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์จะลดลง 20% ซึ่งในการทดลองนี้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ค่อนข้างน้อย อาจมีสาเหตุมาจากพีเอชของถังโปรยกรองสูงถึง 9.5 จึงอาจควรต้องเติมโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตเพื่อควบคุมพีเอชให้ต่ำลง



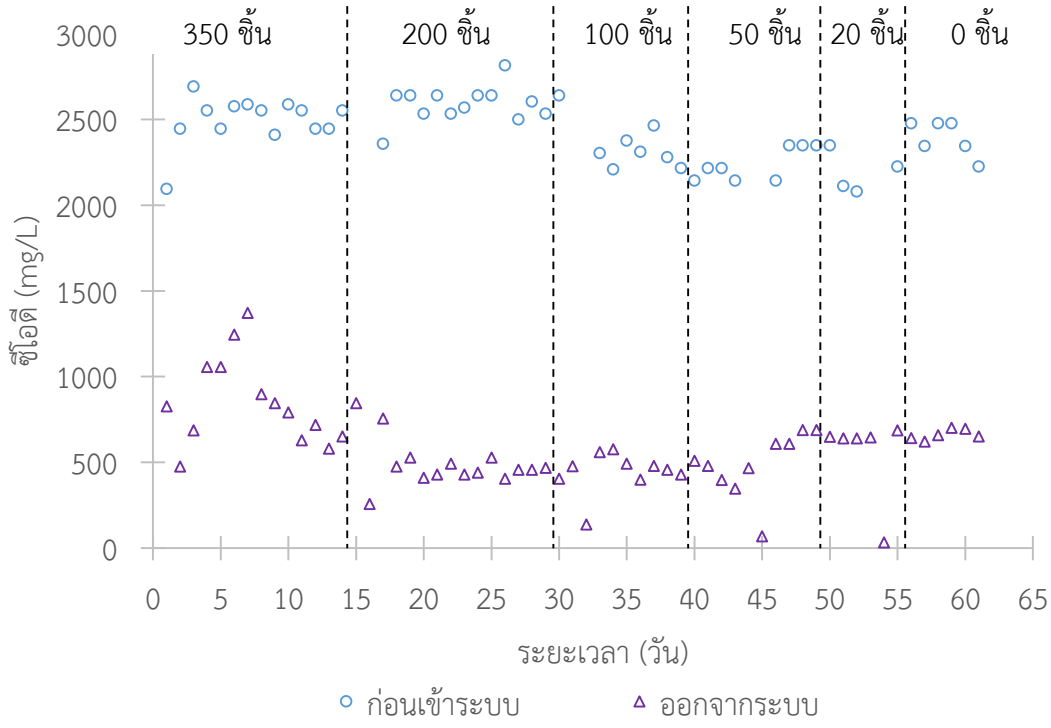
รูปที่ 4.16 พีเอชของถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองระยะเวลา 60 วัน

4.7.5 ซีโอดี

จากการทดลองใช้น้ำตาลทรายเป็นแหล่งพลังงานให้แก่จุลินทรีย์ในระบบ โดยกำหนดให้น้ำเสียสังเคราะห์ตลอดการทดลองแบบไหลต่อเนื่องมีค่าซีโอดี 2,500 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับเริ่มต้นระบบพบว่า ระบบถังกรองไร้อากาศและตามด้วยถังโปรยกรองที่มีปริมาณ 350 ชิ้น สามารถบำบัดซีโอดี 2350.75±349.63 มิลลิกรัมต่อลิตร ลดลงเหลือ 845.29±258.13 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วงแรกของการเริ่มต้นเดินระบบจุลินทรีย์ใช้ระยะเวลา 7-8 วัน ในการปรับตัวเข้ากับน้ำเสีย

ให้เข้าสู่สภาวะคงที่จึงเปลี่ยนปริมาณตัวกลางในถังโปรยกรองเป็น 200 100 50 20 และ 0 ชิ้น ถังกรองไร้อากาศและตามด้วยถังโปรยกรองสามารถบำบัดซีโอดีให้ลดลงเหลือ 477.32±138.42 466.50±69.49 646.39±32.92 667.13±28.25 และ 700.14±14.34 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงดังรูปที่ 4.18

จากผลการวิเคราะห์ซีโอดีของการทดลองแบบไหลต่อเนื่องพบว่า ถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองไม่สามารถบำบัดซีโอดีให้ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งที่ 120 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากใช้อัตราการเวียนน้ำในถังโปรยกรองต่ำ ทำให้มีซีโอดีในน้ำทิ้งคงเหลืออยู่มาก ซึ่งเป็นข้อด้อยของการเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ แต่ถ้าจะบำบัดซีโอดีให้ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งก็ต้องใช้อัตราการเวียนน้ำที่สูงขึ้น



รูปที่ 4.17 การบำบัดก๊าซซีโอดีของถังกรองไร้อากาศและถังโปรยที่ปริมาณตัวกลางต่างๆ ระยะเวลา 60 วัน

4.8 สมดุลมวลซัลเฟอร์ของการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง

การคำนวณสมดุลมวลซัลเฟอร์ของซัลเฟต 500 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร ที่ใช้อัตราการเวียนน้ำ 2.7 ลิตรต่อชั่วโมง และมีปริมาณตัวกลาง 200 ชิ้น แสดงดังตารางที่ 4.8โดยเริ่มต้นจากปริมาณซัลเฟตก่อนเข้าถังกรองไร้อากาศ เท่ากับ 21,299.97 มิลลิกรัมซัลเฟอร์ เมื่อผ่านการบำบัดจากถังกรองไร้อากาศเหลือซัลเฟต ซัลไฟด์ และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เท่ากับ 7,967.57 7,111.43 และ 1.80 มิลลิกรัมซัลเฟอร์ ตามลำดับ รวมมีปริมาณซัลเฟอร์ทั้งหมดที่ผ่านการบำบัดในถังกรองไร้อากาศแล้วเหลืออยู่ 15,080.80 มิลลิกรัมซัลเฟอร์ ซึ่งมีปริมาณซัลเฟอร์ทั้งหมดที่หายไปจาถังกรองไร้อากาศ 6,219.17 มิลลิกรัมซัลเฟอร์ จากนั้นก็นำน้ำที่บำบัดจากถังกรองไร้อากาศแล้วมาบำบัดต่อในถังโปรยกรอง สุดท้ายแล้วพบว่ามีปริมาณซัลเฟต ซัลไฟด์ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และซัลเฟอร์ เท่ากับ 15,669.56 1,438.57 0.01 และ 2,027.43 มิลลิกรัมซัลเฟอร์ ตามลำดับ และสาเหตุของปริมาณซัลเฟอร์ทั้งหมดที่หายไปจากระบบเกิดขึ้นเช่นเดียวกับการทดลองแบบแบทช์

ตารางที่ 4.8 สมดุลมวลซัลเฟอร์ของการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง

พารามิเตอร์	ถังกรองไร้อากาศ		ถังโปรยกรอง	
	เริ่มต้น (mg-S)	สุดท้าย (mg-S)	เริ่มต้น (mg-S)	สุดท้าย (mg-S)
ซัลเฟต (SO_4^{2-})	21,299.97	7,967.57	7,967.57	15,669.56
ซัลไฟด์ (S^{2-})	0	7,111.43	7,111.43	1,438.57
ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)	0	1.80	1.80	0.01
ซัลเฟอร์ (S^0)	0	-	-	2,027.43
ซัลเฟอร์ทั้งหมด	21,299.97	15,080.80	15,080.80	15,080.80

4.9 ประสิทธิภาพการบำบัดของถังกรองไร้อากาศและตามด้วยถังโปรยกรองแบบการไหลต่อเนื่อง

สำหรับในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟต ซัลไฟด์ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ การเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ และซีโอดีต่อปริมาณตัวกลางในถังโปรยกรองในการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง

4.9.1 ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟต

จากการทดลองพบว่าปริมาณตัวกลางในถังโปรยกรองที่เริ่มจากไม่มีตัวกลางจนถึงมีปริมาณตัวกลาง 350 ชิ้นไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตที่ความเข้มข้น 562.06±14.35 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร เนื่องจากการบำบัดซัลเฟตเกิดขึ้นตั้งแต่ในถังกรองไร้อากาศ ดังนั้นสิ่งที่เกิดขึ้นในถังโปรยกรองจะมีแค่การบำบัดซัลไฟด์ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และการเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ แต่ความเข้มข้นซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นในถังโปรยกรองที่มาจากปฏิกิริยา Sulfide oxidation เป็นการเปลี่ยนรูปซัลไฟด์กลับเป็นซัลเฟต จึงทำให้ประสิทธิภาพการการบำบัดซัลเฟตของถังกรองไร้อากาศและตามด้วยถังโปรยกรองลดลง

4.9.2 ประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์

ประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์ต่อปริมาณตัวกลางในถังโปรยกรอง 0 20 50 100 200 และ 350 ชิ้น พบว่า เมื่อมีปริมาณตัวกลางหรือพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นทำให้ประประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์เพิ่มขึ้นด้วย แสดงตารางที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าถังโปรยกรองที่ไม่มีปริมาณตัวกลางจนถึง 100 ชิ้นมีประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์ 61.37±4.16% ส่วนถังโปรยกรองที่มีปริมาณตัวกลาง 200 ชิ้นมีประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์ 79.71±5.63% และถังโปรยกรองที่มีปริมาณตัวกลาง 350 ชิ้นมีประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์ 83.26±16.12%

ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen และคณะ (2006) พบว่าที่ความสูงของชั้นตัวกลางในถังโปรยกรองแบบคอลัมน์ 710 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์ 98.1% แต่เมื่อลดความสูงของชั้นตัวกลางลงครึ่งหนึ่งเหลือ 355 มิลลิเมตร ประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์ลดลงเหลือ 67.6% จึงสรุปได้ว่าการลดปริมาณตัวกลางหรือพื้นที่ผิวในการยึดเกาะของจุลินทรีย์ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์ลดลง

ตารางที่ 4.9 ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟต ซัลไฟด์ และการเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์

ปริมาณตัวกลาง (ชิ้น)	ประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์ (%)	ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (%)	ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ (%)
0-100	61.37±4.16	93.58±3.11	13.88±2.82
200	79.71±5.63	99.23±0.73	19.61±4.33
350	83.26±16.12	99.29±0.58	30.26±6.62

4.9.3 ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

จากการทดลองพบว่าปริมาณตัวกลางในถังโปรยกรองที่เริ่มจากไม่มีตัวกลางจนถึงมีปริมาณตัวกลาง 350 ชิ้น มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของถังโปรยกรอง และจากตารางที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าปริมาณตัวกลางในถังโปรยกรองตั้งแต่ 0-100 ชิ้น มีประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 93.58±3.11% % ส่วนถังโปรยกรองที่มีปริมาณตัวกลาง 200 ชิ้น มีประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 99.23±0.73% และถังโปรยกรองที่มีปริมาณตัวกลาง 350 ชิ้น มีประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 99.29±0.58% จึงสรุปได้ว่าการลดปริมาณตัวกลางหรือพื้นที่ผิวในการยึดเกาะของจุลินทรีย์ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ลดลง

4.9.4 ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์

จากการทดลองพบว่าปริมาณตัวกลางในถังโปรยกรองที่เริ่มจากไม่มีตัวกลางจนถึงมีปริมาณตัวกลาง 350 ชิ้น มีผลต่อประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ของถังโปรยกรอง และจากตารางที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าปริมาณตัวกลางในถังโปรยกรองตั้งแต่ 0-100 ชิ้น มีประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ 13.88±2.82% ส่วนถังโปรยกรองที่มีปริมาณตัวกลาง 200 ชิ้น มีประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ 19.61±4.33% และถังโปรยกรองที่มีปริมาณตัวกลาง 350 ชิ้น

มีประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ 30.26±6.62% จึงสรุปได้ว่าการลดปริมาณตัวกลางหรือพื้นที่ผิวในการยึดเกาะของจุลินทรีย์ทำให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ลดลง

การผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์มีค่าค่อนข้างน้อย อาจมีสาเหตุมาจากพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ พีเอช ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (DO) อุณหภูมิ และความเค็ม เมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Liu และคณะ (2013) ได้ทำการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการเปลี่ยนรูปจากซัลไฟด์เป็นซัลเฟอร์ พบว่า แบคทีเรียมีประสิทธิการบำบัดซัลไฟด์ได้สูงที่สุดที่พีเอช 7.8-8.2 ปริมาณออกซิเจนละลาย (DO) ที่ 0.55-2.55 มิลลิกรัมต่อลิตร และอุณหภูมิ 33˚C ทำให้มีประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ได้สูงถึง 92% และการเพิ่มความเค็มจาก 0.5-2.5% ทำให้อัตราการบำบัดซัลไฟด์ลดลงจาก 2.85 เหลือ 0.51 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

4.9.5 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี

จากการทดลองพบว่าปริมาณตัวกลางในถังโปรยกรองที่เริ่มจากไม่มีตัวกลางจนถึงมีปริมาณตัวกลาง 350 ชิ้น ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของถังกรองไร้อากาศและตามด้วยถังโปรยกรอง เนื่องจากการบำบัดซีโอดีที่ความเข้มข้น 2382.39±214.11 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีคงที่ เท่ากับ 75±4.50%

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การทดลองที่ 1 (แบบแบทช์)

1. ถังกรองไร้อากาศที่ควบคุมพีเอชอยู่ในช่วง 8.0-8.5 สามารถบำบัดซัลเฟตที่ความเข้มข้น 100-500 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร มีประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟต 77.06-71.06% และที่ความเข้มข้นซัลเฟต 1,000-1,500 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร มีประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟต 40.33-34.28%

2. อัตราการบำบัดซัลเฟตในถังกรองไร้อากาศเป็นไปตามสมการโมนอด (Monod's Kinetic) ซึ่งมีค่า k_m เท่ากับ 139 ± 19 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตรต่อวัน และมีค่า K_s เท่ากับ 190 ± 97 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร

3. ถังโปรยกรองมีอัตราการบำบัดซัลไฟด์เป็นไปตามสมการโมนอด (Monod's Kinetic) ซึ่งมีค่า k_m เท่ากับ 145±34 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตรต่อวัน และมีค่า K_s เท่ากับ 79±44 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร เมื่อใช้อัตราการเวียนน้ำ 130 และ 30 ลิตรต่อชั่วโมง และมีค่า k_m เท่ากับ 97 ± 54 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตรต่อวัน มีค่า K_s เท่ากับ 266 ± 341 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร เมื่อใช้อัตราการเวียนน้ำ 2.7 ลิตรต่อชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าการลดอัตราการเวียนน้ำส่งผลให้ค่า k_m ลดลง และค่า K_s เพิ่มขึ้น ซึ่งน่าจะเป็นผลของค่า DO ที่ลดลง

4. ประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์ของถังโปรยกรอง 95-100% ที่อัตราการเวียนน้ำ 2.7 30 และ 130 ลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ

5. การใช้อัตราการเวียนน้ำของถังโปรยกรองให้ต่ำอยู่ที่ 2.7 ลิตรต่อชั่วโมง คิดเป็น 0.087 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร ทำให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ได้มากกว่าการใช้อัตราการเวียนน้ำสูงอยู่ที่ 130 และ 30 ลิตรต่อชั่วโมง คิดเป็น 4.194 และ 0.968 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร

การทดลองที่ 2 (แบบไหลต่อเนื่อง)

1. ถังกรองไร้อากาศที่ควบคุมพีเอชอยู่ในช่วง 8.0-8.5 อัตราการไหล 9.5 ลิตรต่อวัน ใช้ระยะเวลาเก็บกักของถังกรองไร้อากาศ 4 วัน และถังโปรยกรอง 5 วัน สามารถบำบัดซัลเฟตที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟต 63.04% แต่เมื่อนำซัลไฟด์มาบำบัดต่อในถังโปรยกรองทำให้ความเข้มข้นซัลเฟตเพิ่มขึ้น 47.60% จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตลดลงเหลือ 29.46%

2. การลดปริมาณตัวกลางในถังโปรยกรองไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตและ ซีโอดี แต่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และซัลเฟอร์

5.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1. ทราบว่าอัตราการบำบัดและประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆของถังกรองไร้อากาศ

2. ทราบว่าอัตราการบำบัดและประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์ที่ความเข้มข้นต่างๆของถังโปรยกรอง

3. ทราบว่าอัตราการเวียนและค่า DO เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญและมีผลต่อการเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์

4. ทราบว่าปริมาณตัวกลางในถังโปรยกรองมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และซัลเฟอร์

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ควรลดอัตราการเวียนน้ำในถังโปรยกรอง เพื่อให้มีค่า DO ต่ำๆ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟต และการเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์

2. อาจลองใช้วิธีการซัลไฟด์ด้วยวิธีการอื่น เช่น ไอโอโดเมตริก หรือเมทิลีนบูล เพื่อเปรียบความคลาดเลื่อนที่เกิดจากวิธีการวัดด้วยอิเล็กโทรด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.4 ข้อเสนอแนะเพื่อนำไปประยุกต์ใช้

1. เมื่อมีการนำระบบถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองไปประยุกต์ใช้งานจริง ควรมีการคัดเลือกหัวเชื้อจุลินทรีย์ SRB และ SOB ที่จะนำมาใช้กับระบบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์มากยิ่งขึ้น

2. ควรมีการดติดตั้งชุดควบคุมพีเอชตลอดการเดินระบบ เนื่องจากพีเอชเป็นอีกหนึ่งพารามิเตอร์ที่สำคัญในการเปลี่ยนรูปจากซัลเฟตไปเป็นซัลไฟด์ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และซัลเฟอร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รายการอ้างอิง

Brock T. D., Madigan M. T. and Martinko J. M. (2006). Biology of Micoorganisms. Upper Saddle River, Prentice-Hall.

Camiloti P., Gustavo M., Jose Alberto D. R., Marcia Helena R. Z., Eugenio F. and Marcelo Z. (2013). Innovative anaerobic bioreactor with fixed-structured bed (ABFSB) for simultaneous sulfate reduction and organic matter removal. Chem Technol Biotechnol **89**: 1044-1050.

Ceskova P., Mandi M., Helanova S. and Kasparovska J. (2002). Kinetic Studies on Elemental Sulfur Oxidation by Acidithiobacillus ferrooxidans: Sulfur Limitation and Activity of Free and Adsorbed. Biotechnol Bioeng **78(1)**.

Chen J. M., Jiang L. Y. and Sha H. L. (2006). Removal efficiency of high-concentration H_2S in pilot-scale biotrickling filter. Environmental Technology **27**: 759-766.

Chung Y. C., Huang C. and Tseng C. P. (1996). Operation optimization of *Thiobacillus thioparus* CH11 biofilter for hydrogen sulfide removal. Journal of Biotechnology **52**: 31-38.

Clark O. G., Edeogu J., Feddes J., Coleman R. N. and Abolghasemi A. (2004). Effects of operating temperature and supplemental nutrients in a pilot-scale agricultural biofilter. Canadian Biosystems Engineering **46**: 6.7-6.16.

Cork D. J., M. A. and Srnak A. (1985). Control of oxidative sulfur metabolism of *Chlorobium limicola* forma thiosulfatophilum. Applied Environmental Microbiology **49**: 269-272.

Cox H. H. J. and Deshusses A. M. (2001). Co-treatment of H_2S and toluene in a biotrickling filter. Chemical Engineering Journal **3901**: 1-10.

Devinny J. S., M. A. Deshusses and Webster T. S. (1999). Biofiltration for Air Pollution Control, Lewis Publisher.

Elias A., Barona A., Arreguy A., Rios A., Aranguiz I. and Pen˜as J. (2002). Evaluation of a packing material for the biodegradation of H2S and product analysis. Process Biochemistry **37**: 813-820.

Grady L., Daigger G. T. and Lim H. C. (1999). Biological Wastewater Treatment. Revised and Expanded. New York, Marcel Dekker.

Hareimana, C., Ouali A. and Jupsin H. Modelling of bacterial sulphate reduction inanaerobic ponds kinetic investigations. Water Research and Technologies.

Harries R. C (1985). A field trial of Seeded Reverse Osmosis for desalination of a scaling type mine water. Desalination **56**: 227-236.

Horikawa M. S., Rossi F., Gimenes M.L., Costa C.M.M. and Silva M.G.C. da. (2004). Chemical absorption of H2S for biogas purification. Journal of Chemical Engineering **21(03)**: 415-422.

Jefferson B., Burgess J. E., Picon A., Harkness. and Judd S. J. (2001). Nutrient addition to enhance biological treatment of greywater. Water Sciences **35(11)**: 2702-2710.

Kleerbezem R. and Mendez R. (2002). Autotrophic denitrification for combined hydrogen sulfide removal from biogas and post-denitrification. wastewater Science Technology **45(10)**: 349-356.

Kun L. E. (1972). A report on the reduction of the sulfate content of acid mine drainage by precipitation with barium carbonate. Anglo American Research Laboratories: D/3/W/1.

Liu W., Liang C., Chen J. and Zhu L. (2013). Effect of operating parameters on sulfide biotransformation to sulfur. Journal of Environmental Sciences **25(12)**: 2417-2421.

Maillacheruvu Y. K., Parkin F. G., Chen Y. P., Wen-Chien K., Oonge I. Z. and Lebduschka V. (1993). Sulfide toxicity in anaerobic systems fed sulfate and various organics. water Environment Research **65(2)**: 100-109.

Metcalf & Eddy. (2003). Wastewater engineering treatment and reuse. Boston, McGraw-Hill.

Morgan-Sagastume M. J., Noyola S., Revah S. and Ergas J.S. (2003). Changes in phtsical properties of a compost biofilter treating hydrogen sulfilde. Journal of Air & Waste Management Association **53**: 1011-1021.

Nishimura S. and Yoda M. (1997). Removal of hydrogen sulfide from an anaerobic biogas using a bio-scrubber. Water Science and Technology **36(6-7)**: 349-356.

R., B. and Banks J. C. (1994). Treatment of plam oil mill effluent upflow anaerobic filtration. Journal of Chemical Technology and Biotechnology **61(2)**: 103-109.

Ramirez, M., Gómez J M. and Cantero D. (2009). Removal of hydrogen sulphide by immobilized Thiobacillus thioparus in a biofilter packed with polyurethane foam. Environmental Technology: 135-142.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Reis M. A. M., Almeida J. S., Lemos P. C. and Carrondo M. J. T. (1992). Effect of hydrogen sulfide on growth of sulfate reducing bacteria. Biotechnol Bioeng **40(5)**: 539-600.

Rodriguez G., Dorado D. A., Fortuny M., Gabriel D. and Gamisans X. (2014). Biotrickling filters for biogas sweetening: Oxygen transfer improvement for a reliable operation. Process Safety and Environmental Protection **92**: 261-168.

Sawyer C. N. and McCarty P. L. (1978). Chemistry for enviromental engineering. New York, McGraw-Hill.

Sercu B., Nunez D., Langenhove V. H., Aroca G. and Verstraete W. (2005). Operational and microbiology aspects of a bioaugment two-stage biothickling filter removing hydrogen sulfide and dimethyl sulfide Biotechnol Bioeng **90(2)**: 259-269.

Shakeri M. and Vossoughi. (2002). Coupled anaerobic baffled reactor (ABR) activated sludge treatment of synthetic wastewater with high concentration of sulfate and COD. **16(1)**: 11-20.

Soreanu G., Al-Jamal M. and Béland M. (2005). Biogas treatment using an anaerobic biosystem In Proceedings of the 3rd Canadium Organic Residuals and Biosolids Management Conference. Calgary, AB**:** 502-513.

Speece R.E. (1996). Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatment Tennessee, Archae press.

Xu X., chen C., Lee D., A. Wang, Guo W., Zhou X., Guo H., Yuan Y., Ren N. and Chang J. (2013). Sulfate-reduction, sulfide-oxidation and elemental sulfur bioreduction process: Modeling and experimental validation. Bioresource Technology **147**: 202-211.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. (2547). วิศวกรรมการกำจัดน้ำเสีย. นนทบุรี.

ณัฐพล รัตนมุขย์. (2549). การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟล์ด้วยเครื่องกรองชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นภาจรีย์ แสงสิงห์. (2556). ประสิทธิภาพการบำบัดทางชีวภาพโดยระบบไร้อากาศ-เติมอากาศต่อความเข้มข้นและชนิดของสีอะโซ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นันทวัน สังข์ทอง. (2552). การกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยถังกรองชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

บัญชา บุญอนันต์วงศ์. (2554). การส่งเสริมการย่อยของสีรีแอกทีฟไดอะโซ โดยระบบฟิล์มชีวภาพแบบไร้อากาศและเติมอากาศ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ปริญา รัตนา. (2549). ผลของอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตที่มีต่อซัลเฟตรีดักชันในระบบถังกรองไร้อากาศ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มั่นสิน (ตัณฑุลเวศม์, 2536). การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการไร้ออกซิเจน. คณะวิศวกรรมศาสตร์. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และมั่นรักษ์ ตัณฑุลเวศม์. (2545). เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย. กรุงเทพมหานคร , สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มั่นสิน ตุณฑุลเวศม์. (2542). เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อลิสา วังใน. (2550). การบำบัดสารมลพิษทางชีวภาพ. กรุงเทพมหานคร, โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อุบลวรรณ กมลศิริประเสริฐ. (2536). การกำจัดฟอสเฟตในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากระบบแอเรเตทลากูนโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี. สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อุรชา เศรษฐ์ธีรกิจ. (2542). ผลของความเข้มข้นซีโอดีและซัลเฟตต่อระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก

ผลการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1. อัตราและประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตและซัลไฟด์ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นซัลเฟตที่แตกต่างกัน ในระบบแบบแบทช์

ตารางที่ ก-1 พีเอช ซีโอดี ซัลเฟต ซัลไฟด์ และก๊าซไฮโรเจนซัลไฟด์

ช่วงการทดลอง	วันที่ (ว/ด/ป)	ระบบ	พีเอช	ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร)	ซัลไฟด์ (มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตร)	ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ส่วนในล้านส่วน)
100 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร (ซ้ำที่ 1)	9/11/2015	AF	8.53	555.25	118.46	0.00	0.00
	10/11/2015	AF	8.31	331.58	65.36	49.00	12.20
	11/11/2015	AF	8.25	286.72	61.27	50.47	17.80
	12/11/2015	AF	8.13	286.72	61.27	52.93	19.40
	13/11/2015	AF	8.10	232.69	57.19	49.68	6.90
	14/11/2015	AF	8.05	179.2	53.10	48.90	4.90
	15/11/2015	AF	8.03	161.28	53.10	52.10	3.30
	16/11/2015	AF	8.00	161.28	53.10	44.12	1.90
	17/11/2015	TF	8.21	125.44	69.44	42.74	1.00
	18/11/2015	TF	8.45	125.44	81.70	42.40	0.00
	19/11/2015	TF	8.95	125.44	93.95	39.80	0.00
	20/11/2015	TF	8.98	29.04	102.12	0.00	0.00
	20/11/2015	TF	9.24	25.52	102.12	0.00	0.00
100 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร (ซ้ำที่ 2)	21/11/2015	AF	8.46	524.32	130.72	0.00	0.00
	22/11/2015	AF	8.33	237.6	73.53	46.63	2.50
	23/11/2015	AF	8.22	202.4	65.36	48.51	0.00
	24/11/2015	AF	8.25	158.4	61.27	49.68	0.00
	25/11/2015	AF	8.21	123.2	53.10	68.74	0.00
	26/11/2015	AF	8.23	114.4	40.85	66.07	0.00
	27/11/2015	AF	8.32	114.4	32.68	63.01	0.08
	28/11/2015	AF	8.35	114.4	32.68	52.93	0.09
	29/11/2015	AF	8.34	114.4	32.68	51.28	0.00

ตารางที่ ก-1 พีเอช ซีโอดี ซัลเฟต ซัลไฟด์ และก๊าซไฮโรเจนซัลไฟด์ (ต่อ)

ช่วงการทดลอง	วันที่ (ว/ด/ป)	ระบบ	พีเอช	ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร)	ซัลไฟด์ (มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตร)	ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ส่วนในล้านส่วน)
100 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร (ซ้ำที่ 2)	30/11/2015	TF	8.75	20.16	102.12	0.00	0.00
	1/12/2015	TF	8.86	20.16	102.12	0.00	0.00
	2/12/2015	TF	9.13	18.72	102.12	0.00	0.00
	3/12/2015	TF	9.35	15.84	102.12	0.00	0.00
	4/12/2015	TF	9.47	15.84	102.12	0.00	0.00
100 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร (ซ้ำที่ 3)	29/11/2015	AF	8.66	492.80	118.46	0.00	0.00
	30/11/2015	AF	8.47	211.2	61.27	43.77	0.17
	1/12/2015	AF	8.36	165.6	49.02	51.69	0.00
	2/12/2015	AF	8.27	165.6	40.85	52.93	0.00
	3/12/2015	AF	8.18	115.2	24.51	52.10	0.02
	4/12/2015	AF	8.07	100.8	20.42	50.88	0.01
	5/12/2015	AF	8.46	100.8	20.42	48.90	0.00
	6/12/2015	AF	8.56	100.8	20.42	47.75	0.09
	7/12/2015	TF	8.88	29.92	93.95	0.00	0.00
	8/12/2015	TF	9.27	26.4	93.95	0.00	0.00
	9/12/2015	TF	9.36	26.4	93.95	0.00	0.00
	10/12/2015	TF	9.49	26.4	102.12	0.00	0.00
	11/12/2015	TF	9.57	26.4	102.12	0.00	0.00

ตารางที่ ก-1 พีเอช ซีโอดี ซัลเฟต ซัลไฟด์ และก๊าซไฮโรเจนซัลไฟด์ (ต่อ)

ช่วงการทดลอง	วันที่ (ว/ด/ป)	ระบบ	พีเอช	ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร)	ซัลไฟด์ (มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตร)	ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ส่วนในล้านส่วน)
200 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร (ซ้ำที่ 1)	6/12/2015	AF	8.57	1,132.60	220.59	0.00	0.00
	7/12/2015	AF	8.35	801.1	220.59	56.84	19.5
	8/12/2015	AF	8.23	792	183.82	86.49	1.80
	9/12/2015	AF	8.12	695.2	110.29	88.57	0.00
	10/12/2015	AF	8.12	695.2	110.29	82.48	0.07
	11/12/2015	AF	8.48	677.6	102.12	78.65	16.30
	12/12/2015	AF	8.46	668.8	85.78	79.28	27.20
	13/12/2015	AF	8.35	650.5	77.61	79.91	6.90
	14/12/2015	AF	8.27	642.4	49.02	85.13	2.10
	15/12/2015	AF	8.23	510.4	40.85	82.48	1.60
	16/12/2015	AF	8.21	504.6	40.85	83.80	1.00
	17/12/2015	AF	8.04	504.6	40.85	85.13	0.70
	18/12/2015	TF	8.32	460.8	81.70	0.00	0.00
	19/12/2015	TF	8.49	358.6	93.95	0.00	0.00
	20/12/2015	TF	9.12	192	110.29	0.00	0.00
	21/12/2015	TF	9.23	153.6	142.97	0.00	0.00
	22/12/2015	TF	9.36	96	163.40	0.00	0.00
	23/12/2015	TF	9.45	76.8	163.40	0.00	0.00
	24/12/2015	TF	9.51	72.4	163.40	0.00	0.00

ตารางที่ ก-1 พีเอช ซีโอดี ซัลเฟต ซัลไฟด์ และก๊าซไฮโรเจนซัลไฟด์ (ต่อ)

ช่วงการทดลอง	วันที่ (ว/ด/ป)	ระบบ	พีเอช	ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร)	ซัลไฟด์ (มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตร)	ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ส่วนในล้านส่วน)
200 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร (ซ้ำที่ 2)	17/12/2015	AF	8.48	1,008.00	224.67	0.00	0.00
	18/12/2015	AF	7.69	700.8	183.82	48.90	2.80
	19/12/2015	AF	8.44	614.4	138.89	57.29	7.30
	20/12/2015	AF	8.44	441.6	114.38	59.61	5.60
	21/12/2015	AF	8.2	297.6	73.53	69.84	3.10
	22/12/2015	AF	8.56	259.2	57.19	76.80	2.30
	23/12/2015	AF	8.39	211.2	53.10	73.82	1.80
	24/12/2015	AF	8.38	163.2	53.10	68.74	0.90
	25/12/2015	TF	9.18	134.3	85.78	0.00	0.00
	26/12/2015	TF	9.37	96	130.72	0.00	0.00
	27/12/2015	TF	9.43	96	142.97	0.00	0.00
	28/12/2015	TF	9.49	86.4	142.97	0.00	0.00
	29/12/2015	TF	9.52	86.4	142.97	0.00	0.00
200 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร (ซ้ำที่ 3)	25/12/2015	AF	8.60	1,059.27	232.84	0.00	0.00
	26/12/2015	AF	8.43	489.6	187.91	75.60	0.40
	27/12/2015	AF	8.35	364.8	85.78	83.13	5.90
	28/12/2015	AF	8.33	249.6	57.19	92.15	23.60
	29/12/2015	AF	8.27	105.6	57.19	98.18	17.30

ตารางที่ ก-1 พีเอช ซีโอดี ซัลเฟต ซัลไฟด์ และก๊าซไฮโรเจนซัลไฟด์ (ต่อ)

ช่วงการทดลอง	วันที่ (ว/ด/ป)	ระบบ	พีเอช	ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร)	ซัลไฟด์ (มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตร)	ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ส่วนในล้านส่วน)
200 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร (ซ้ำที่ 3)	30/12/2015	TF	9.28	87.30	93.95	0.00	6.20
	31/12/2015	TF	9.39	75.00	130.72	0.00	0.00
	1/1/2016	TF	9.47	62.00	130.72	0.00	0.00
	2/1/2016	TF	9.50	50.00	138.89	0.00	0.00
	3/1/2016	TF	9.53	43.00	138.89	0.00	0.00
500 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร (ซ้ำที่ 1)	5/1/2016	AF	8.48	2,529.28	489.24	0.00	0.00
	6/1/2016	AF	8.29	1,164.8	332.68	79.28	109.00
	7/1/2016	AF	8.21	1,114.88	195.69	103.78	55.00
	8/1/2016	AF	8.05	1,098.24	176.13	115.03	93.00
	9/1/2016	AF	8.63	1,064.96	136.99	148.21	60.00
	10/1/2016	AF	8.58	981.76	136.99	172.29	52.00
	11/1/2016	AF	8.33	881.92	136.99	176.43	78.00
	12/1/2016	TF	8.98	832	195.69	77.41	0.00
	13/1/2016	TF	9.06	532.48	234.83	12.52	0.00
	14/1/2016	TF	9.07	482.56	234.83	5.04	0.00
	15/1/2016	TF	9.26	366.08	254.40	5.95	0.00
	16/1/2016	TF	9.23	158.3	273.97	0.00	0.00
	17/1/2016	TF	9.33	66.59	273.97	0.00	0.00
	18/1/2016	TF	9.38	49.92	273.97	0.00	0.00

ตารางที่ ก-1 พีเอช ซีโอดี ซัลเฟต ซัลไฟด์ และก๊าซไฮโรเจนซัลไฟด์ (ต่อ)

ช่วงการทดลอง	วันที่ (ว/ด/ป)	ระบบ	พีเอช	ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร)	ซัลไฟด์ (มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตร)	ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ส่วนในล้านส่วน)
500 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร (ซ้ำที่ 2)	12/11/2015	AF	8,36	2,455.52	547.95	0.00	0.00
	13/1/2016	AF	8.13	1,400.8	430.53	132.66	80.00
	14/1/2016	AF	7.83	1,219.52	273.97	177.83	278.00
	15/1/2016	AF	8.64	955.84	176.13	201.86	203.00
	16/1/2016	AF	8.62	849.95	156.56	281.53	147.00
	17/1/2016	AF	8.57	758.08	136.99	292.90	75.00
	18/1/2016	AF	8.58	659.2	136.99	142.46	89.00
	19/1/2016	TF	8.77	593.28	136.99	39.17	0.00
	20/1/2016	TF	9.07	543.84	136.99	16.79	0.00
	21/1/2016	TF	9.09	410	156.56	15.51	0.00
	22/1/2016	TF	9.06	308.16	176.13	15.14	0.00
	23/1/2016	TF	9.03	232.46	176.13	14.67	0.00
500 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร (ซ้ำที่ 3)	18/1/2016	AF	8.45	2242.56	489.24	0.00	0.00
	19/1/2015	AF	8.23	1236	352.25	211.68	97.00
	20/1/2015	AF	8,09	1186.56	195.69	264.24	123.00
	21/1/2015	AF	7.89	1054.72	176.13	359.88	84.00
	22/1/2015	AF	8.36	972.32	156.56	292.90	65.00
	23/1/2015	AF	8.24	725.12	156.56	253.98	79.00

ตารางที่ ก-1 พีเอช ซีโอดี ซัลเฟต ซัลไฟด์ และก๊าซไฮโรเจนซัลไฟด์ (ต่อ)

ช่วงการทดลอง	วันที่ (ว/ด/ป)	ระบบ	พีเอช	ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร)	ซัลไฟด์ (มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตร)	ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ส่วนในล้านส่วน)
500 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร (ซ้ำที่ 3)	24/1/2015	AF	8.21	889.92	136.99	272.75	50.00
	25/1/2015	AF	8.32	824	136.99	258.04	68.00
	26/1/2015	AF	9.41	810.7	136.99	215.06	61.00
	27/1/2015	TF	9.22	758.08	136.99	155.43	0.00
	28/1/2015	TF	9.29	708.64	156.56	108.83	0.00
	29/1/2015	TF	9.28	672.7	156.56	107.97	0.00
	30/1/2015	TF	9.37	542.85	176.13	48.51	0.00
	31/1/2015	TF	9.40	367.31	195.69	27.00	0.00
1,000 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร (ซ้ำที่ 1)	1/2/2016	AF	118.46	4575	978.47	0.00	0.00
	2/2/2016	AF	6.58	4275	919.77	104.60	306.7
	3/2/2016	AF	7.32	2900	821.92	150.58	273.1
	4/2/2016	AF	7.99	2800	606.65	168.24	194.8
	5/2/2016	AF	8.76	2575	606.65	192.49	132.9
	6/2/2016	AF	8.59	2500	567.51	164.29	107.2
	7/2/2016	AF	8.65	2475	567.51	128.52	96.4
	8/2/2016	AF	8.6	2425	547.95	121.59	86.7
	9/2/2016	AF	8.64	2350	547.95	111.44	75.2
	10/2/2016	TF	8.62	2325	528.38	117.80	77.6

ตารางที่ ก-1 พีเอช ซีโอดี ซัลเฟต ซัลไฟด์ และก๊าซไฮโรเจนซัลไฟด์ (ต่อ)

ช่วงการทดลอง	วันที่ (ว/ด/ป)	ระบบ	พีเอช	ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร)	ซัลไฟด์ (มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตร)	ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ส่วนในล้านส่วน)
1,000 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร (ซ้ำที่ 1)	11/2/2016	TF	9.11	2275	528.38	111.44	84.3
	12/2/2016	TF	8.9	2200	528.38	31.38	0
	13/2/2016	TF	9	1675	528.38	19.67	0
	14/2/2016	TF	9.07	1600	528.38	11.75	0
	15/2/2016	TF	9.19	1,575	528.38	9.42	0.00
	16/2/2016	TF	9.16	1,475	567.51	7.08	0.00
1,000 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร (ซ้ำที่ 2)	11/2/2016	AF	8.21	4,800	1,076.32	0.00	0.00
	12/2/2016	AF	7.85	2,875	919.77	85.81	402.90
	13/2/2016	AF	7.81	2,850	841.49	103.78	376.50
	14/2/2016	AF	8.59	2,825	782.78	173.66	124.40
	15/2/2016	AF	8.41	2,825	704.50	238.39	57.80
	16/2/2016	AF	8.33	2,550	704.50	314.54	18.30
	17/2/2016	AF	8.96	2,350	684.93	279.31	73.40
	18/2/2016	AF	8.91	2,350	684.93	274.92	75.80
	19/2/2016	TF	9.01	2,350	684.93	139.11	0.00
	20/2/2016	TF	9.14	2,144	704.50	124.51	0.00
	21/2/2016	TF	9.23	1,795.6	724.07	100.54	0.00
	22/2/2016	TF	9.23	1,742	724.07	35.34	0.00
	23/2/2016	TF	9.31	1,715.2	743.64	33.70	0.00
	24/2/2016	TF	9.3	1,473.6	743.64	19.05	0.00
	25/2/2016	TF	9.33	1,447.2	743.64	15.14	0.00
	26/2/2016	TF	9.45	1,422	743.64	16.01	0.00

ตารางที่ ก-1 พีเอช ซีโอดี ซัลเฟต ซัลไฟด์ และก๊าซไฮโรเจนซัลไฟด์ (ต่อ)

ช่วงการทดลอง	วันที่ (ว/ด/ป)	ระบบ	พีเอช	ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร)	ซัลไฟด์ (มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตร)	ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ส่วนในล้านส่วน)
1,000 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร (ซ้ำที่ 3)	18/2/2016	AF	8.56	4,984	1,095.89	0.00	0.00
	19/2/2016	AF	8.42	3,591.2	1017.61	41.74	306.7
	20/2/2016	AF	8.40	3,269.6	880.63	159.17	664.2
	21/2/2016	AF	8.36	3,162.6	684.93	258.04	531.8
	22/2/2016	AF	8.27	3,135.7	684.93	223.75	157.6
	23/2/2016	AF	8.59	3,108.8	684.93	290.59	178.3
	24/2/2016	AF	8.50	3,082.1	665.36	227.32	215.5
	25/2/2016	AF	8.42	2,675	684.93	221.99	248
	26/2/2016	TF	9.08	2,625	684.93	177.83	0.00
	27/2/2016	TF	9.16	2,600	704.50	110.56	0.00
	28/2/2016	TF	9.19	2,519.2	724.07	31.88	0.00
	29/2/2016	TF	9.21	2,325	743.64	25.34	0.00
	1/3/2016	TF	9.31	2,325	743.64	19.51	0.00
	2/3/2016	TF	9.23	2,300	743.64	16.65	0.00
	3/3/2016	TF	9.27	2,300	743.64	16.39	0.00
	4/3/2016	TF	9.29	2,995	743.64	16.13	0.00

ตารางที่ ก-1 พีเอช ซีโอดี ซัลเฟต ซัลไฟด์ และก๊าซไฮโรเจนซัลไฟด์ (ต่อ)

ช่วงการทดลอง	วันที่ (ว/ด/ป)	ระบบ	พีเอช	ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร)	ซัลไฟด์ (มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตร)	ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ส่วนในล้านส่วน)
1,500 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร (ซ้ำที่ 1)	25/2/2016	AF	8.54	7,375.36	1,487.28	0.00	0.00
	26/2/2016	AF	8.25	6,160	1,409.00	110.56	652.3
	27/2/2016	AF	8.38	5,880	1,291.59	142.46	574.6
	28/2/2016	AF	8.53	5,680	1,174.17	309.60	200.3
	29/2/2016	AF	8.54	5,560	1,135.03	425.00	10.7
	1/3/2016	AF	8.58	5,530	1,076.32	435.22	0.05
	2/3/2016	AF	8.49	5,515	1,076.32	463.69	1.50
	3/3/2016	AF	8.51	5,487.5	1,076.32	380.39	0.08
	4/3/2016	AF	8.45	5,480	1,076.32	398.91	0.00
	5/3/2016	TF	9.44	5,410	1,115.46	371.46	0.00
	6/3/2016	TF	9.54	4,999.2	1,135.03	340.47	0.00
	7/3/2016	TF	9.54	4,925	1,135.03	297.58	000
	8/3/2016	TF	9.46	4,857.5	1,174.17	140.22	0.00
	9/3/2016	TF	9.51	4,800	1,174.17	119.68	0.00
	10/3/2016	TF	9.54	4,715	1,174.17	50.08	0.00
	11/3/2016	TF	9.53	4,700	1,174.17	48.13	0.00

ตารางที่ ก-1 พีเอช ซีโอดี ซัลเฟต ซัลไฟด์ และก๊าซไฮโรเจนซัลไฟด์ (ต่อ)

ช่วงการทดลอง	วันที่ (ว/ด/ป)	ระบบ	พีเอช	ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร)	ซัลไฟด์ (มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตร)	ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ส่วนในล้านส่วน)
1,500 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร (ซ้ำที่ 2)	4/3/2015	TF	9.86	8,409.7	1,545.99	0.00	0.00
	5/3/2016	TF	7.37	7142.4	1,487.28	79.28	609.2
	6/3/2016	TF	7.66	7142.6	1,272.02	405.28	594.3
	7/3/2016	TF	8.74	6950.4	1,174.17	368.53	567.2
	8/3/2016	AF	8.74	6,835.2	1,135.03	362.74	549.9
	9/3/2016	AF	8.62	6,758.4	1,135.03	354.22	578.3
	10/3/2016	AF	8.66	6,758.4	1,135.03	279.31	564.1
	11/3/2016	AF	8.61	6,681.6	1,135.03	332.47	552.3
	12/3/2016	TF	8.87	6,269.44	1,154.60	251.98	150.8
	13/3/2016	TF	9.03	5,674.24	1,174.17	201.86	114.7
	14/3/2016	TF	9.15	5,158.4	1,174.17	173.66	150.8
	15/3/2016	TF	9.2	5,079.04	1,213.31	124.51	12.3
	16/3/2016	TF	9.28	4,880.64	1,232.88	70.40	0.16
	17/3/2016	TF	9.23	4,761.6	1,252.45	66.60	0.00
	18/3/2016	TF	9.32	4,682.24	1,252.45	61.53	0.00
	19/3/2016	TF	9.27	4,630.7	1,252.45	48.90	0.00

ตารางที่ ก-1 พีเอช ซีโอดี ซัลเฟต ซัลไฟด์ และก๊าซไฮโรเจนซัลไฟด์ (ต่อ)

ช่วงการทดลอง	วันที่ (ว/ด/ป)	ระบบ	พีเอช	ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร)	ซัลไฟด์ (มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตร)	ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ส่วนในล้านส่วน)
1,500 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร (ซ้ำที่ 3)	14/3/2016	AF	8.64	7,340.8	1,545.99	0.00	0.00
	15/3/2016	AF	8.51	5,515.5	1,409.00	149.37	899.70
	16/3/2016	AF	8.41	5,396.48	1,272.02	262.10	765.80
	17/3/2016	AF	8.26	5,237.76	1,174.17	626.38	745.20
	18/3/2016	AF	8.19	5,118.72	1,037.18	405.19	687.20
	19/3/2016	AF	8.09	5,079.04	978.47	359.80	585.30
	20/3/2016	AF	8.21	5,079.04	978.47	438.58	512.60
	21/3/2016	AF	8.32	5,039.36	978.47	307.09	508.40
	22/3/2016	TF	8.53	5,039.36	978.47	186.45	320.30
	23/3/2016	TF	8.89	4,999.68	1,076.32	98.94	152.60
	24/3/2016	TF	9.03	4,761.6	1,076.32	50.87	122.50
	25/3/2016	TF	9.06	4,682.24	1,115.46	42.40	3.10
	26/3/2016	TF	9.15	4,682.24	1,174.17	38.86	0.00
	27/3/2016	TF	9.15	4,642.56	1,174.17	37.35	0.00
	28/3/2016	TF	9.17	4,642.56	1,174.17	36.76	0.00

1. ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟต ซัลไฟด์ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นซัลเฟต 500 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร ในถังโปรยกรองที่มีปริมาณตัวกลางแตกต่างกันในระบบไหลต่อเนื่อง

ตารางที่ ก-2 ซีโอดี และซัลเฟต

ช่วงการทดลอง	วันที่ (ว/ด/ป)	ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ซัลเฟต (มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร)		
		IN	TF	IN	AF	TF
350 (ชิ้น)	5/4/2016	2,094.4	827.2	567.51	293.54	293.54
	6/4/2016	2,446.4	475.2	528.38	215.26	293.54
	7/4/2016	2,692.8	686.4	528.38	215.26	293.54
	8/4/2016	2,552	1,056	567.51	215.26	313.11
	9/4/2016	2,446.4	1,056	547.95	234.83	352.25
	10/4/2016	2,576	1,246	567.51	234.83	371.82
	11/4/2016	2,587.2	1,372.8	587.08	234.83	391.39
	12/4/2016	2,552	897.6	567.51	234.83	391.39
	13/4/2016	2,411.2	844.8	567.51	234.83	371.82
	14/4/2016	2,587.2	792	567.51	215.26	371.82
	15/4/2016	2,552	629.5	587.08	215.26	391.39
	16/4/2016	2,446.4	719.5	567.51	234.83	391.39
	17/4/2016	2,446.4	580.2	567.51	234.83	391.39
	18/4/2016	2,552	650.9	567.51	234.83	391.39
200 (ชิ้น)	19/4/2016	2,358.4	756.8	547.95	215.26	391.39
	20/4/2016	2,640	475.2	567.51	215.26	430.53
	21/4/2016	2,640	528	567.51	234.83	430.53
	22/4/2016	2,534.4	411.05	567.51	234.83	430.53

ตารางที่ ก-2 ซีโอดี และซัลเฟต (ต่อ)

ช่วงการทดลอง	วันที่ (ว/ด/ป)	ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ซัลเฟต (มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร)		
		IN	TF	IN	AF	TF
200 (ชิ้น)	22/4/2016	2,534.4	411.05	567.51	234.83	430.53
	23/4/2016	2,640	428.8	528.38	215.26	430.53
	24/4/2016	2,534.4	492.5	567.51	195.69	391.39
	25/4/2016	2,569.6	428.8	567.51	195.69	391.39
	26/4/2016	2,640	440	547.95	195.69	410.96
	27/4/2016	2,640	528	547.95	195.69	410.96
	28/4/2016	2,816	404.8	587.08	215.26	410.96
	29/4/2016	2,499.2	457.6	567.51	234.83	410.96
	30/4/2016	2,604.8	457.6	547.95	195.69	410.96
	1/5/2016	2,534.4	468.5	567.51	195.69	410.96
	2/5/2016	2,460	404.8	567.51	195.69	410.96
100 (ชิ้น)	6/5/2016	2,304	560	587.08	195.69	489.24
	7/5/2016	2,208	576	567.51	215.26	489.24
	8/5/2016	2,176	493.5	567.51	195.69	410.96
	9/5/2016	2,112	400	587.08	195.69	391.39
	10/5/2016	2,464	480	587.08	195.69	391.39
	11/5/2016	2,080	457	587.08	195.69	391.39
	12/5/2016	2,016	429.5	547.95	195.69	391.39
	13/5/2016	2,144	509.5	547.95	195.69	391.39
	14/5/2016	2,016	480	567.51	195.69	410.96
	15/5/2016	2,016	398	567.51	195.69	410.96
	16/5/2016	2,144	348	567.51	195.69	391.39

ตารางที่ ก-2 ซีโอดี และซัลเฟต (ต่อ)

ช่วงการทดลอง	วันที่ (ว/ด/ป)	ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ซัลเฟต (มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร)		
		IN	TF	IN	AF	TF
50 (ชิ้น)	17/5/2016	2,144	608	547.95	195.69	391.39
	18/5/2016	2,048	608	547.95	195.69	391.39
	19/5/2016	2,048	688	567.51	215.26	391.39
	20/5/2016	2,048	688	547.95	195.69	391.39
	21/5/2016	2,048	650	547.95	215.26	371.82
	22/5/2016	2,112	640	567.51	195.69	371.82
	23/5/2016	2,080	640	567.51	195.69	391.39
20 (ชิ้น)	24/5/2016	2,225	687	567.51	195.69	391.39
	25/5/2016	2,478	643	547.95	195.69	391.39
	26/5/2016	2,345	621	547.95	215.26	410.96
	27/5/2016	2,478	659	567.51	195.69	391.39
	28/5/2016	2,478	702	567.51	195.69	410.96
	29/5/2016	2,345	697	567.51	215.26	391.39
	30/5/2016	2,225	652	567.51	215.26	371.82
	31/5/2016	2,345	676	547.95	195.69	371.82
0 (ชิ้น)	1/6/2016	2,508	687	547.95	195.69	391.39
	2/6/2016	2,457	712	547.95	195.69	391.39
	3/6/2016	24,57	702	567.51	195.69	391.39
	4/6/2016	2,508	704	567.51	195.69	371.82
	5/6/2016	2,345	685	547.95	195.69	371.82
	6/6/2016	2,345	724	567.51	195.69	391.39
	7/6/2016	2,345	687	547.95	195.69	391.39

ตารางที่ ก-3 พีเอช ซัลไฟด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์

ช่วงการทดลอง	วันที่ (ว/ด/ป)	พีเอช		ซัลไฟด์ (มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตร)			ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ส่วนในล้านส่วน)		
		AF	TF	IN	AF	TF	IN	AF	TF
350 ชิ้น	5/4/2016	7.89	8.93	0	55.51	7.54	0	732.3	2.2
	6/4/2016	7.88	9.12	0	39.49	5.85	0	730.1	12.8
	7/4/2016	7.82	9.27	0	49.68	5.41	0	763.8	1.8
	8/4/2016	7.86	9.3	0	119.68	57.29	0	754.2	4.7
	9/4/2016	8.26	9.37	0	120.63	44.47	0	716.4	8.1
	10/4/2016	8.3	9.17	0	107.97	53.78	0	702.1	5.4
	11/4/2016	8.12	9.05	0	107.12	20.14	0	711.3	1.2
	12/4/2016	8.43	8.94	0	119.68	11.75	0	685.9	0
	13/4/2016	8.43	9.5	0	118.73	6.75	0	687.3	1.3
	14/4/2016	8.57	9.49	0	138.02	8.23	0	655.7	12.5
	15/4/2016	8.31	9.52	0	160.43	9.42	0	672.7	6.8
	16/4/2016	8.45	9.42	0	173.66	8.29	0	668.6	2.6
	17/4/2016	8.34	9.34	0	187.97	9.42	0	695.5	4.8
	18/4/2016	8.56	9.29	0	190.97	8.84	0	678.1	5.3
200 ชิ้น	19/4/2016	8.2	9.49	0	189	54	0	707.7	2.4
	20/4/2016	8.57	9.48	0	191	46	0	686.3	1.8
	21/4/2016	8.56	9.21	0	187	48	0	674.3	1.5
	22/4/2016	8.42	9.56	0	179	47	0	665.4	2.4
	23/4/2016	8.07	9.55	0	185	45	0	721.3	1.5
	24/4/2016	8.53	9.43	0	177	42	0	654.8	2.3
	25/4/2016	8.57	9.21	0	192	39	0	651.5	2.4
	26/4/2016	8.59	9.3	0	198	41	0	639.2	1.7
	27/4/2016	8.54	9.41	0	189	38	0	617.2	5.5

ตารางที่ ก-3 พีเอช ซัลไฟด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ต่อ)

ช่วงการทดลอง	วันที่ (ว/ด/ป)	พีเอช		ซัลไฟด์ (มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตร)			ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ส่วนในล้านส่วน)		
		AF	TF	IN	AF	TF	IN	AF	TF
200 ชิ้น	28/4/2016	8.43	9.37	0	172	34	0	653.2	5
	29/4/2016	8.48	9.23	0	185	24	0	612.2	12.7
	30/4/2016	8.57	9.41	0	196	24	0	608.2	4.4
	1/5/2016	8.52	9.21	0	188	24	0	597.2	8.9
	2/5/2016	8.62	9.24	0	192	24	0	578.6	14.1
100 ชิ้น	6/5/2016	8.61	9.41	0	208	94.4	0	589.3	20.8
	7/5/2016	8.62	9.37	0	200.8	90.4	0	587.6	6.1
	8/5/2016	8.53	9.27	0	193.6	84	0	588.2	23.5
	9/5/2016	8.5	9.12	0	198.3	62.4	0	654.3	12.3
	10/5/2016	8.54	9.11	0	201.6	73.6	0	657.8	21.5
	11/5/2016	8.57	9.06	0	217	76	0	668.9	11.7
	12/5/2016	8.56	9.13	0	232	75.2	0	671.3	21
	13/5/2016	8.47	9.11	0	222.5	73	0	632.8	19.8
	14/5/2016	8.56	9.26	0	240	59.2	0	629.4	18.5
	15/5/2016	8.52	9.23	0	229	70.5	0	652.5	17.3
	16/5/2016	8.5	9.2	0	219.7	66.4	0	643.8	18.6
50 ชิ้น	17/5/2016	8.49	9.28	0	221.6	72	0	674.2	20.5
	18/5/2016	8.52	9.29	0	217.8	68.9	0	669.2	27.4
	19/5/2016	8.38	9.35	0	210.6	77.6	0	687.2	35.8
	12/5/2016	8.47	9.31	0	211.5	79.6	0	674.2	35.1
	21/5/2016	8.59	9.29	0	223.4	77.6	0	645.6	32.4
	22/5/2016	8.52	9.45	0	219.7	79.8	0	625.7	38.3
	23/5/2016	8.51	9.48	0	219.3	78.2	0	630.4	36.7

ตารางที่ ก-3 พีเอช ซัลไฟด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ต่อ)

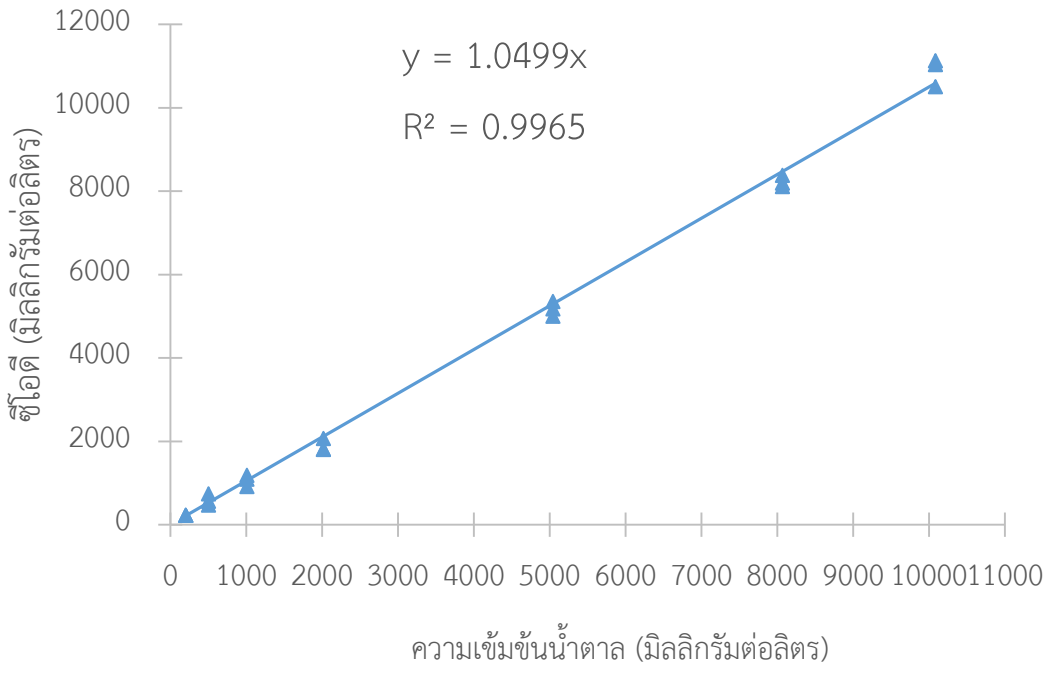
ช่วงการทดลอง	วันที่ (ว/ด/ป)	พีเอช		ซัลไฟด์ (มิลลิกรัมซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ต่อลิตร)			ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ส่วนในล้านส่วน)		
		AF	TF	IN	AF	TF	IN	AF	TF
20 ชิ้น	24/5/2016	8.39	9.43	0	211.4	83.4	0	567.51	49.7
	25/5/2016	8.54	9.35	0	214.9	87.6	0	547.95	52.4
	26/5/2016	8.55	9.39	0	213.7	89.3	0	547.95	58.1
	27/5/2016	8.32	9.28	0	210.1	87.5	0	567.51	57.6
	28/5/2016	8.46	9.29	0	209.8	88.8	0	567.51	58.2
	29/5/2016	8.52	9.3	0	216.5	86.8	0	567.51	59.7
	30/5/2016	8.54	9.27	0	217.9	87.3	0	567.51	60.2
	31/5/2016	8.56	9.31	0	215.6	87.2	0	547.95	58.7
0 ชิ้น	1/6/2016	8.47	9.32	0	206.3	90.4	0	654.7	60.2
	2/6/2016	8.56	9.36	0	215.7	89.3	0	654.3	58.7
	3/6/2016	8.55	9.26	0	218.2	88.5	0	632.1	59.2
	4/6/2016	8.54	9.21	0	217.8	93.7	0	625.8	57.3
	5/6/2016	8.48	9.27	0	208.7	92.4	0	682.1	62.4
	6/6/2016	8.49	9.22	0	210.3	97.3	0	646.3	58.6
	7/6/2016	8.5	9.29	0	214.8	95.6	0	658.9	60.9

ภาคผนวก ข

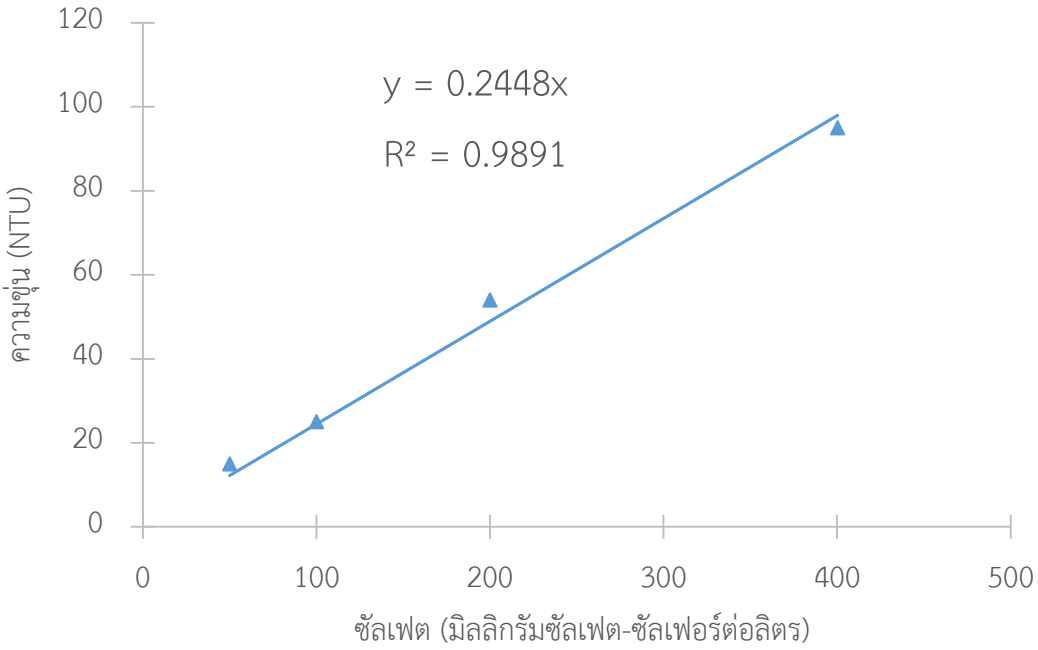
กราฟมาตรฐาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

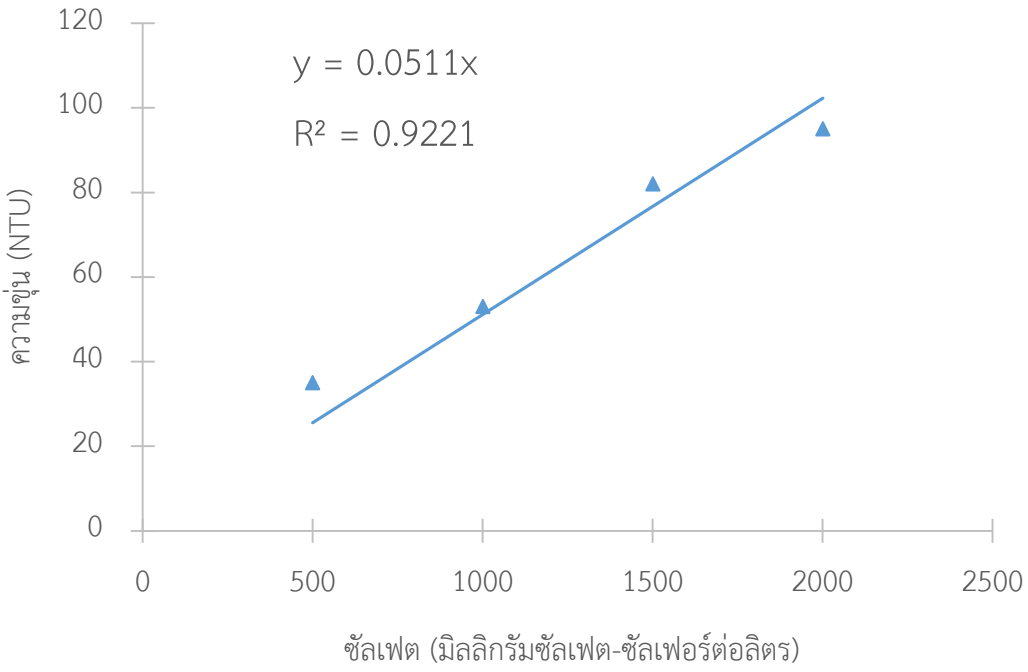
1. กราฟมาตรฐานซีโอดีที่ความเข้มข้นน้ำตาลทราย 200-10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร



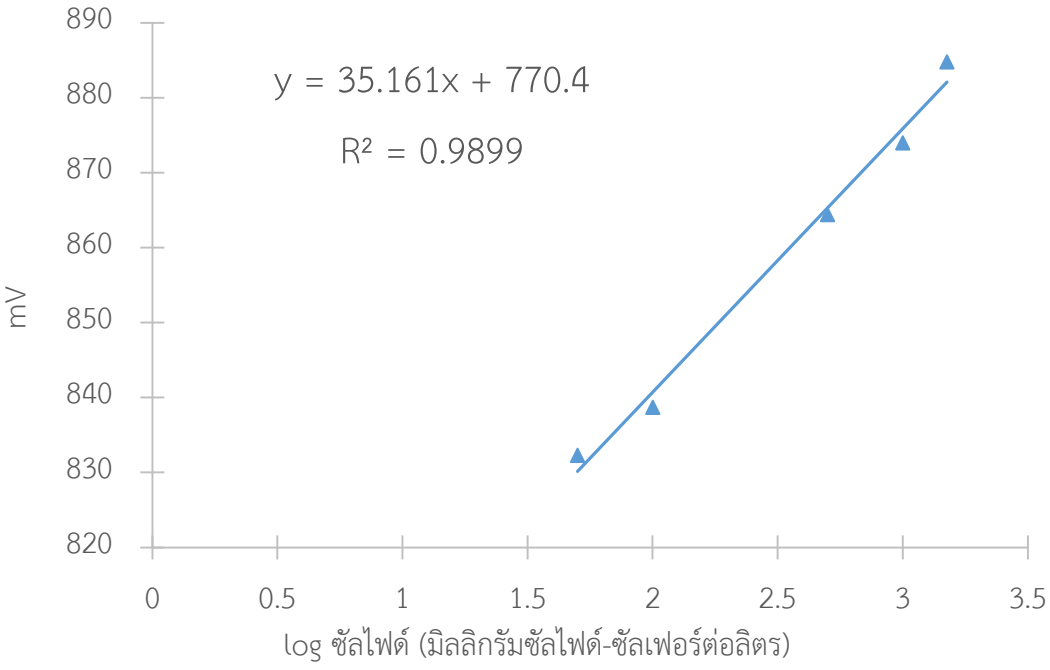
2. กราฟมาตรฐานซัลเฟตที่ความเข้มข้น 50-400 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร



3. กราฟมาตรฐานซัลเฟตที่ความเข้มข้น 500-2,000 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร



4. กราฟมาตรฐานซัลไฟด์ที่ความเข้มข้น 50-1,500 มิลลิกรัมซัลเฟต-ซัลเฟอร์ต่อลิตร



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวปิยะวรรณ เอี่ยมสอาด เกิดเมื่อวันที่ 5 มิถุนายน พ.ศ. 2533 สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศสาตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ปีการศึกษา 2555 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556

การเผยแพร่วิทยานิพนธ์แบบบรรยายในที่ประชุมระดับชาติ

ปิยะวรรณ เอี่ยมสอาด และ ศรัณย์ เตชะเสน "การเปลี่ยนรูปซัลเฟตและไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นซัลเฟอร์ด้วยระบบกรองไร้อากาศและระบบโปรยกรอง" ในการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 15 ระหว่างวันที่ 11-13 พฤษภาคม 2559 ณ โรงแรมเดอะทวิน ทาวเวอร์ รองเมือง กรุงเทพฯ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University