

การยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบยูเอเอสพีโดยโซเดียมโมลิบเดต



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 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Inhibition of hydrogen sulfide in UASB reactor by sodium molybdate

Mr. Witsanu Seehone



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 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบยูเอเอสบีโดย โซเดียมโมลิบเดต
โดย	นายวิชญ์ สีโหน
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ขวาลภาฤทธิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.วรวิทย์ จุฬาลักษณ์านุกูล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พีเชษฐพร เขาวงกตเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ขวาลภาฤทธิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.วรวิทย์ จุฬาลักษณ์านุกูล)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธีกุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.เฉลิมชัย เรืองชัยนิคม)

วิทยุ สี่โหนด : การยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบยูเอเอสบีโดยโซเดียมโมลิบเดต (Inhibition of hydrogen sulfide in UASB reactor by sodium molybdate) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. อรรถชัย ขวาลภาฤทธิ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: รศ. ดร. วรวิทย์ จุฬาลักษณ์านุกุล, 187 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพการยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยโซเดียมโมลิบเดตด้วยน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงจากฟาร์มสุกร งานวิจัยแบ่งเป็น 3 ช่วงการทดลอง ช่วงการทดลองที่ 1 เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของโซเดียมโมลิบเดตต่อการยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบแบบแบดซ์ ด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้นซีโอดี 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเป็น 100 50 20 และ 15 ตามลำดับ ทดสอบด้วยโซเดียมโมลิบเดตความเข้มข้น 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 มิลลิโมลาร์ ทุกๆอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต โดยชุดควบคุมไม่มีการเติมสารดังกล่าว ทำการทดลองเป็นเวลา 7 วัน ช่วงการทดลองที่ 2 เป็นการศึกษาการทดลองในระบบยูเอเอสบีด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นซีโอดี 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร 2 ถึงปฏิกรณ์ โดยกำหนดเป็น ชุดควบคุมและชุดทดลอง ซึ่งชุดควบคุมจะไม่มีการเติมโซเดียมโมลิบเดต แบ่งการทดลองเป็น 5 ระยะ ระยะที่ 1-4 ทดลองเป็นเวลา ระยะละ 10 วัน ปรับอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 100 50 20 และ 15 ตามลำดับ ส่วนระยะที่ 5 ทดลองเป็นเวลา 20 วัน ปรับอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 50 การเติมโซเดียมโมลิบเดตในระยะที่ 1-4 จะเติมแบบต่อเนื่อง พร้อมกับการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ทุกครั้ง ส่วนระยะที่ 5 เติมแบบเป็นรอบ (เติมครั้งแรกพร้อมน้ำเสียสังเคราะห์ และติดตามผลการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์จึงเติมครั้งถัดไป) ในการทดลองช่วงที่ 2 จะเลือกค่าความเข้มข้นโซเดียมโมลิบเดตที่ได้จากการทดลองที่ 1 มาใช้ในการทดลอง ช่วงการทดลองที่ 3 เป็นการศึกษาการทดลองด้วยน้ำเสียจริงจากฟาร์มสุกรในระบบยูเอเอสบี โดยพิจารณาค่าซีโอดีต่อซัลเฟตของน้ำเสียเบื้องต้น และเลือกความเข้มข้นโซเดียมโมลิบเดตที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 2 มาใช้ในการทดลอง ทำการทดลองเป็นเวลา 20 วัน แบ่งเป็นระยะละ 10 วัน เปรียบเทียบการเติมโซเดียมโมลิบเดตแบบต่อเนื่องและแบบเป็นรอบ ผลการทดลองช่วงที่ 1 พบว่า ที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 100 50 20 และ 15 เมื่อเติมโซเดียมโมลิบเดตความเข้มข้น 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ สามารถยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ต่ำกว่า 20 พีพีเอ็ม ผลการทดลองช่วงที่ 2 พบว่า ระยะการทดลองที่ 1-4 ชุดควบคุมเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์เฉลี่ย 555 970 3,870 และ 7,030 พีพีเอ็ม ตามลำดับ ขณะที่ชุดทดลองเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์เฉลี่ย 19 12.1 12 และ 19 พีพีเอ็ม เมื่อเติมโซเดียมโมลิบเดตความเข้มข้น 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ ระยะการทดลองที่ 5 พบว่า ในชุดทดลองหลังจากหยุดเติมโซเดียมโมลิบเดต 5 วัน ไฮโดรเจนซัลไฟด์เพิ่มขึ้นจาก 20 ไปถึง 1,000 พีพีเอ็ม ขณะที่ชุดควบคุมเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์เฉลี่ย 974.28 พีพีเอ็ม ผลการทดลองที่ 3 เลือกเติมโซเดียมโมลิบเดตความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ พบว่า ในชุดทดลองและชุดควบคุมเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์เฉลี่ย 7.67 และ 329 พีพีเอ็ม ตามลำดับ ส่วนการเติมโซเดียมโมลิบเดตแบบเป็นรอบ เมื่อหยุดเติมทำให้ไฮโดรเจนซัลไฟด์เพิ่มขึ้น จาก 5 ไปถึง 350 พีพีเอ็มภายในเวลา 5 วัน

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5670386721 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: HYDROGEN SULFIDE / UPFLOW ANAEROBIC SLUDGE BLANKET / SODIUM MOLYBDATE / SULFATE REDUCING BACTERIA

WITSANU SEEHONE: Inhibition of hydrogen sulfide in UASB reactor by sodium molybdate.

ADVISOR: ASSOC. PROF. ORATHAI CHAVALPARIT, Ph.D., CO-ADVISOR: ASSOC. PROF. WARAWUT CHULALAKSANANUKUL, Ph.D., 187 pp.

This research aims to study effect of hydrogen sulfide (H_2S) inhibition on anaerobic treatment of synthetic wastewater and swine wastewater. Sodium molybdate (Na_2MoO_4) was added, in order to inhibit the production of H_2S . The research was divided into 3 experiments including the test in 1,000 ml of anaerobic serum bottle by synthetic wastewater, the test on UASB reactor with synthetic wastewater and swine wastewater, respectively. Na_2MoO_4 was added into equalization tank on second UASB reactor, the first reactor was set as control. In the first experiment, COD was set as 5,000 mg/l and conducted at 100, 50, 20 and 15 COD/ SO_4^{2-} ratio. Various concentration of Na_2MoO_4 including 0.5, 1.0, 1.5, and 2.0 mM were used. In this study to investigate the H_2S inhibition from the first experiment, the results showed that addition of Na_2MoO_4 0.5, 1.0, 1.5 and 2.0 mM had an effective to control the concentration of H_2S lower than 20 ppm for 100, 50, 20 and 15 COD/ SO_4^{2-} ratio respectively. The second experiment divided to 5 periods with the COD/ SO_4^{2-} ratio of 100, 50, 20, 15 and 50 respectively. Na_2MoO_4 was added every day to synthetic wastewater in period 1-4 (40d). The fifth periods (20d) was added only a single dose (added again when H_2S increase). COD influent was set around 5,000 mg/l with hydraulic retention time (HRT) 0.5 day. The results from the second experiment in periods 1-4 represented that only small concentration of H_2S was observed (not more than 20 ppm) when adding concentration of Na_2MoO_4 0.5, 1.0, 1.5 and 2.0 mM, respectively. In the fifth period, the results showed that H_2S concentration increased from 20 to 1,000 ppm when stop adding Na_2MoO_4 within 5 days. The third experiment was divided into 2 periods of 10 days. Na_2MoO_4 was added by continuous and single dose as mentioned above. In this study, only small amount of H_2S was observed in the range of 7.67 ppm when adding 0.5 mM Na_2MoO_4 and H_2S concentration of the control set was 329 ppm. However, when stop adding Na_2MoO_4 , leading to increasing of H_2S concentrations from 20 to 1,000 ppm within 5 days.

Department: Environmental Engineering

Field of Study: Environmental Engineering

Academic Year: 2016

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่มีส่วนให้ความอนุเคราะห์ ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ขวาลภาฤทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.วรวุฒิ จุฬาลักษณ์านุกูล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ให้คำปรึกษา ช่วยเหลือ ข้อเสนอแนะและถ่ายทอดวิชาความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ทุกขั้นตอน ซึ่งมีส่วนสำคัญยิ่งที่ทำให้งานวิจัยนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ (ประธานกรรมการ) รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธีกุล (กรรมการ) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร ภู่งประเสริฐ (กรรมการ) และ ดร.เฉลิมชัย เรืองชัยนิคม (กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย)

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอน ถ่ายทอดความรู้ ประสบการณ์ และมอบความปรารถนาดี ให้แก่ผู้ทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. โดยเฉพาะ ดร.เฉลิมชัย เรืองชัยนิคม ที่ช่วยให้คำแนะนำ ถ่ายทอดองค์ความรู้ ประสบการณ์ในการทำวิจัย ซึ่งเป็นประโยชน์ และมีส่วนสำคัญยิ่งที่ทำให้งานวิจัยนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณบริษัท เสริมสุข จำกัด (มหาชน) ที่อนุเคราะห์หัวข้อจุลินทรีย์ จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกตลอดมา

ขอขอบคุณพี่ๆ น้องๆ และเพื่อนๆ ห้องปฏิบัติการ ชั้น 1 ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ แนะนำ ให้ความรู้ และเป็นกำลังสำคัญในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และสมาชิกทุกคนในครอบครัว ที่ช่วยสนับสนุน ส่งเสริมและเป็นกำลังใจที่ดีที่สุดแก่ผู้วิจัย จนทำให้การศึกษาวิจัยครั้งนี้ประสบผลสำเร็จได้ดังที่ตั้งใจ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ	ฑ
สารบัญตาราง.....	ด
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ชื่อวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 คำสำคัญ.....	1
1.3 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 การบำบัดน้ำเสีย	5
2.1.1 กระบวนการทางเคมี (Chemical process).....	5
2.1.2 กระบวนการทางกายภาพ (physical process).....	6
2.1.3 กระบวนการทางกายภาพ-เคมี (physical-chemical process).....	6
2.1.4 กระบวนการทางชีวภาพ (Biological Process).....	7
2.1.4.1 กระบวนการบำบัดแบบใช้ออกซิเจน (aerobic treatment).....	7
2.1.4.2 กระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic treatment).....	8
2.2 กลไกทางชีวเคมีและจุลชีววิทยาของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน.....	8

2.2.1	กลไกการสร้างมีเทน	10
2.2.1.1	แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องในกลไกการสร้างมีเทน.....	12
2.2.2	กระบวนการซัลเฟตรีดักชัน.....	14
2.2.2.1	วัฏจักรซัลเฟอร์	14
2.2.2.2	แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต (Sulfate reducing bacteria, SRB).....	16
2.2.2.3	ปัจจัยที่มีผลต่อการปรับตัวของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต.....	19
2.2.2.4	ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดซัลเฟตรีดักชันในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน.....	21
2.3	ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ทางชีวภาพในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน	23
2.4	ก๊าซชีวภาพ	27
2.4.1	องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ.....	27
2.4.2	สมบัติก๊าซชีวภาพ	28
2.4.3	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide ; H ₂ S).....	29
2.5	กระบวนการควบคุมและกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสีย	32
2.5.1	การกำจัดซัลเฟตในน้ำเสีย.....	32
2.5.1.1	วิธีเมมเบรน.....	32
2.5.1.2	วิธีตกตะกอนทางเคมี (chemical precipitation)	33
2.5.2	การกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เจือปนในก๊าซชีวภาพ	33
2.5.2.1	กระบวนการแบบแห้ง (Dry process).....	34
2.5.2.2	กระบวนการแบบเปียก (Wet Process).....	34
2.5.2.3	กระบวนการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยจุลินทรีย์	36
2.6	โซเดียมโมลิบเดต (Sodium molybdate; Na ₂ MoO ₄).....	38
2.6.1	ลักษณะและสมบัติของโซเดียมโมลิบเดต	39

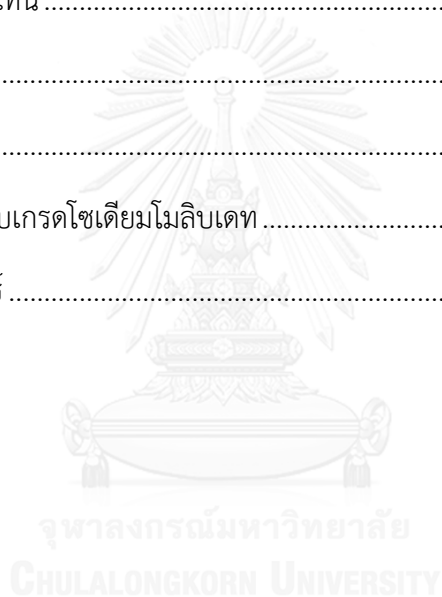
2.6.2 กลไกการยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยโซเดียมโมลิบเดต	39
2.7 ระบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket : UASB).....	40
2.7.1 ลักษณะการทำงานของระบบยูเอเอสบี	41
2.7.2 ข้อดีและข้อจำกัดของระบบยูเอเอสบี.....	43
2.8 สมดุลมวลของซีโอดีและซัลเฟต	44
2.8.1 สมดุลมวลของซีโอดี.....	44
2.8.2 สมดุลมวลของซัลเฟอร์	47
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	49
2.9.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียที่มีซัลเฟตในระบบยูเอเอสบี.....	49
2.9.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยโซเดียมโมลิบ เดต	52
2.9.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ระบบยูเอเอสบีบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร.....	54
2.9.4 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	56
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	57
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย	57
3.1.1 การทดลองช่วงที่ 1	57
3.1.2 การทดลองช่วงที่ 2.....	58
3.1.3 การทดลองช่วงที่ 3.....	59
3.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์และลักษณะน้ำเสีย	59
3.3 ลักษณะเม็ดตะกอนจุลินทรีย์.....	61
3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	61
3.4.1 การทดลองช่วงที่ 1	61
3.4.2 การทดลองช่วงที่ 2 และ 3	62

3.4.2.1	ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี	62
3.4.2.2	เครื่องสูบน้ำ	64
3.4.2.3	อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)	64
3.4.2.4	ถังพักน้ำเสีย	64
3.4.2.5	เครื่องวัดอัตราการไหลและปริมาตรก๊าซ (Gas meter)	65
3.4.2.6	เครื่องวัดคุณภาพน้ำแบบหลายพารามิเตอร์.....	65
3.4.2.7	เครื่องวัดปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS)	66
3.5	วิธีดำเนินงานวิจัย.....	67
3.5.1	การทดลองช่วงที่ 1	67
3.5.2	การทดลองช่วงที่ 2.....	68
3.5.2.1	การเดินระบบ.....	68
3.5.2.2	การเติมโซเดียมโมลิบเดตและการปรับอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต	69
3.5.3	การทดลองช่วงที่ 3.....	70
3.6	การเก็บและวิธีวิเคราะห์ตัวอย่าง	71
บทที่ 4	ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล.....	73
4.1	ผลการทดลองช่วงที่ 1 การยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยโซเดียมโมลิบเดตในระบบ แบบแบตช์.....	73
4.1.1	ผลการทดลองด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 100:1	73
4.1.1.1	ก๊าซชีวภาพ	74
4.1.1.2	ไฮโดรเจนซัลไฟด์.....	75
4.1.2	ผลการทดลองด้วยอัตราส่วนอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 50:1.....	75
4.1.2.1	ก๊าซชีวภาพ	76
4.1.2.2	ไฮโดรเจนซัลไฟด์.....	77

4.1.3 ผลการทดลองด้วยอัตราส่วนอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 20:1	77
4.1.3.1 ก๊าซชีวภาพ	78
4.1.3.2 ไฮโดรเจนซัลไฟด์.....	79
4.1.4 ผลการทดลองด้วยอัตราส่วนอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1	80
4.1.4.1 ก๊าซชีวภาพ.....	81
4.1.4.2 ไฮโดรเจนซัลไฟด์.....	81
4.1.5 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี	82
4.1.6 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม	83
4.2 ผลการทดลองช่วงที่ 2 การยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบยูเอเอสบีด้วยน้ำเสีย สังเคราะห์	85
4.2.1 ผลการทดลองการยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบยูเอเอสบีด้วยน้ำเสีย สังเคราะห์	86
4.2.1.1 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัด	86
4.2.1.2 ซัลเฟตและประสิทธิภาพการกำจัด	88
4.2.1.3 ไฮโดรเจนซัลไฟด์.....	91
4.2.1.4 ก๊าซชีวภาพ	92
4.2.1.5 สัดส่วนมีเทน.....	94
4.2.1.6 ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดและประสิทธิภาพการกำจัด	96
4.2.1.7 โออาร์พี.....	97
4.2.1.8 กรดไขมันระเหย.....	98
4.2.1.9 สภาพต่างทั้งหมด (Alkalinity).....	99
4.2.1.10 พีเอช.....	100
4.2.1.11 ซัลไฟด์.....	101

4.3 ผลการทดลองช่วงที่ 3 การยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบบยูเอเอสบีด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร.....	103
4.3.1.1 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัด	104
4.3.1.2 ซัลเฟตและประสิทธิภาพการกำจัด.....	106
4.3.1.3 ไฮโดรเจนซัลไฟด์.....	108
4.3.1.4 ก๊าซชีวภาพ	110
4.3.1.5 สัตส่วนมีเทน.....	111
4.3.1.6 ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดและประสิทธิภาพการกำจัด.....	113
4.3.1.7 โออาร์พี.....	114
4.3.1.8 กรดไขมันระเหย.....	114
4.3.1.9 สภาพต่างทั้งหมด (Alkalinity).....	115
4.3.1.10 พีเอช.....	116
4.3.1.11 ซัลไฟด์.....	117
4.4 สมดุลมวลสารของระบบ	118
4.4.1 สมดุลมวลของซีโอดี.....	118
4.4.1.1 สมดุลมวลของซีโอดีช่วงการทดลองที่ 2.....	118
4.4.2 สมดุลมวลของซัลเฟอร์	120
4.4.2.1 สมดุลมวลของซัลเฟอร์ตลอดช่วงการทดลองที่ 2.....	120
4.4.2.2 สมดุลมวลของซัลเฟอร์ตลอดช่วงการทดลองที่ 3.....	121
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	122
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	122
5.2 ข้อเสนอแนะ	123
รายการอ้างอิง.....	125

ภาคผนวก ก.....	132
ผลการทดลองช่วงที่ 1	132
ผลการทดลองช่วงที่ 2	142
ผลการทดลองช่วงที่ 3	157
ภาคผนวก ข.....	164
การคำนวณสมมูลมวลในระบบ	164
การวิเคราะห์สัดส่วนมีเทน	167
ภาคผนวก ค.....	175
การเริ่มต้นเดินระบบ.....	175
การทดลองเปรียบเทียบเกรดโซเดียมโพลิบเดท	177
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	187



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน.....	11
ภาพที่ 2.2 วัฏจักรซัลเฟอร์.....	15
ภาพที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง พีเอชกับอ็อกซิไลต์ที่ละลายน้ำ.....	30
ภาพที่ 2.4 จำแนกเทคโนโลยีการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์.....	33
ภาพที่ 2.5 แผนผังการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ใช้สารละลายต่างทั้งแบบมีการฟื้นฟูสภาพตัว ดูดซึมและ ไม่มีการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซึม.....	35
ภาพที่ 2.6 ลักษณะของถังกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบ Biofilter.....	37
ภาพที่ 2.7 ลักษณะของถังกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบ Biotrickling filter.....	37
ภาพที่ 2.8 ลักษณะของถังกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ Bioscrubber.....	38
ภาพที่ 2.9 กลไกการยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยโมลิบดีนัม.....	40
ภาพที่ 2.10 ลักษณะของระบบยูเอเอสบี.....	42
ภาพที่ 3.1 ลักษณะเม็ตตะคอนจูลินทรีย์.....	61
ภาพที่ 3.2 แบบจำลองขนาดถังยูเอเอสบี.....	62
ภาพที่ 3.3 แผนภาพชุดอุปกรณ์ระบบยูเอเอสบี.....	63
ภาพที่ 3.4 เครื่องสูบน้ำเสียแบบดูดจ่ายน้ำแบบรีดสาย (Peristaltic pump).....	64
ภาพที่ 3.5 เครื่องวัดอัตราการไหลและปริมาตรก๊าซ (Gas meter).....	65
ภาพที่ 3.6 เครื่องวัดค่าพีเอช โออาร์พี และอุณหภูมิ.....	66
ภาพที่ 3.7 ลักษณะและการติดตั้งเครื่องวัดปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS).....	66
ภาพที่ 3.8 ระบบยูเอเอสบีที่ใช้ในการทดลอง.....	67
ภาพที่ 3.9 ส่วนประกอบของชุดการทดลองระบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบแบตซ์.....	68
ภาพที่ 3.10 ลักษณะการเวียนน้ำเพิ่มภายนอกระบบ.....	69

ภาพที่ 4.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในชุดการทดลองอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 100:1	74
ภาพที่ 4.2 ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ในชุดการทดลองอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 100:1.....	75
ภาพที่ 4.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในชุดการทดลองอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 50:1.....	76
ภาพที่ 4.4 ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ในชุดการทดลองอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 50:1.....	77
ภาพที่ 4.5 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในชุดการทดลองอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 20:1.....	78
ภาพที่ 4.6 ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ในชุดการทดลองอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 20:1.....	79
ภาพที่ 4.7 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในชุดการทดลองอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1.....	81
ภาพที่ 4.8 ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ในชุดการทดลองอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1.....	82
ภาพที่ 4.9 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีตลอดช่วงการทดลองช่วงที่ 1	82
ภาพที่ 4.10 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมตลอดช่วงการทดลองที่ 1	83
ภาพที่ 4.11 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของช่วงการทดลองที่ 2.....	87
ภาพที่ 4.12 ปริมาณซัลเฟตของชุดทดลองในช่วงการทดลองที่ 2	89
ภาพที่ 4.13 ปริมาณซัลเฟตของชุดควบคุมในช่วงการทดลองที่ 2.....	90
ภาพที่ 4.14 ประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตของการทดลองช่วงที่ 2.....	90
ภาพที่ 4.15 ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ช่วงการทดลองที่ 2.....	92
ภาพที่ 4.16 ปริมาณก๊าซชีวภาพของการทดลองช่วงที่ 2.....	93
ภาพที่ 4.17 อัตราการผลิตมีเทนต่อซีโอดีที่ถูกกำจัด.....	95
ภาพที่ 4.18 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีตลอดการทดลองการใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกร	105
ภาพที่ 4.19 ปริมาณซัลเฟตของชุดควบคุมตลอดการทดลองการใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกร	107
ภาพที่ 4.20 ปริมาณซัลเฟตของชุดทดลองตลอดการทดลองการใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกร.....	107
ภาพที่ 4.21 ประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตตลอดการทดลองใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกร.....	108
ภาพที่ 4.22 ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ตลอดการทดลองใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกร.....	109
ภาพที่ 4.23 ปริมาณก๊าซชีวภาพตลอดการทดลองใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกร	110
ภาพที่ 4.24 อัตราการผลิตมีเทนต่อซีโอดีที่ถูกกำจัด.....	112

ภาพที่ 5.1 กราฟมาตรฐานสำหรับคำนวณความเข้มข้นโซเดียมโมลิบเดตเพื่อการใช้งาน 124



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ปฏิกริยารีดอกซ์ในการบำบัดน้ำเสีย	9
ตารางที่ 2.2 ระดับเลขออกซิเดชันของตัวอย่างชนิดและสารประกอบซัลเฟอร์	14
ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและสารอาหารที่ใช้	17
ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างปฏิกริยาย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต	18
ตารางที่ 2.5 สารให้อิเล็กตรอนสำหรับแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต	19
ตารางที่ 2.6 ความเข้มข้นของอ็อกซิเจนที่มีผลกระตุ้นหรือยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์	26
ตารางที่ 2.7 ความเข้มข้นของโลหะหนักที่มีผลยับยั้งประสิทธิภาพของระบบร้อยละ 50	26
ตารางที่ 2.8 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	27
ตารางที่ 2.9 ลักษณะและสมบัติของก๊าซชีวภาพ	28
ตารางที่ 2.10 ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์	30
ตารางที่ 2.11 ระดับความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์กับผลที่เกิดกับร่างกาย	31
ตารางที่ 2.12 ลักษณะและสมบัติของโซเดียมโมลิบเดต	39
ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์	59
ตารางที่ 3.2 ลักษณะน้ำเสียสังเคราะห์ตลอดการทดลองช่วงที่ 1-2	60
ตารางที่ 3.3 ลักษณะน้ำเสียฟาร์มสุกร	60
ตารางที่ 3.4 แผนการทดลองช่วงที่ 1	67
ตารางที่ 3.5 แผนการทดลองช่วงที่ 2	70
ตารางที่ 3.6 แผนการทดลองช่วงที่ 3	70
ตารางที่ 3.7 พารามิเตอร์ วิธีวิเคราะห์และความถี่ในการเก็บตัวอย่าง	71
ตารางที่ 3.8 พารามิเตอร์ วิธีวิเคราะห์และความถี่ในการเก็บตัวอย่าง	72
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองปรับอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 100:1	73
ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 50:1	75

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 20:1	78
ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1	80
ตารางที่ 4.5 ค่าซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดตลอดช่วงการทดลองที่ 2	86
ตารางที่ 4.6 ค่าซัลเฟตและประสิทธิภาพการกำจัดตลอดการทดลองช่วงที่ 2.....	88
ตารางที่ 4.7 ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ตลอดการทดลองช่วงที่ 2.....	91
ตารางที่ 4.8 ปริมาณก๊าซชีวภาพตลอดการทดลองช่วงที่ 2.....	93
ตารางที่ 4.9 สัดส่วนมีเทนตลอดการทดลองที่ 2.....	94
ตารางที่ 4.10 ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดตลอดการทดลองที่ 2.....	96
ตารางที่ 4.11 ค่าไออาร์พีตลอดการทดลองช่วงที่ 2.....	97
ตารางที่ 4.12 ค่ากรดไขมันระเหยตลอดการทดลองช่วงที่ 2.....	98
ตารางที่ 4.13 สภาพต่างทั้งหมดตลอดการทดลองช่วงที่ 2	99
ตารางที่ 4.14 ค่าพีเอชตลอดการทดลองช่วงที่ 2.....	100
ตารางที่ 4.15 ค่าซัลไฟด์ตลอดการทดลองช่วงที่ 2	101
ตารางที่ 4.16 ค่าซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดตลอดการทดลองด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร	104
ตารางที่ 4.17 ซัลเฟตและประสิทธิภาพการกำจัดตลอดการทดลองด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร	106
ตารางที่ 4.18 ไฮโดรเจนซัลไฟด์ตลอดการทดลองด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร	108
ตารางที่ 4.19 ก๊าซชีวภาพตลอดการทดลองด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร.....	110
ตารางที่ 4.20 สัดส่วนมีเทนตลอดการทดลองด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร	111
ตารางที่ 4.21 ของแข็งแขวนลอยและประสิทธิภาพการกำจัดตลอดการทดลองด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร	113
ตารางที่ 4.22 ค่าไออาร์พีตลอดการทดลองด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร.....	114
ตารางที่ 4.23 ค่ากรดไขมันระเหยตลอดการทดลองด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร.....	114
ตารางที่ 4.24 สภาพต่างทั้งหมดตลอดการทดลองด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร	115
ตารางที่ 4.25 ค่าพีเอชตลอดการทดลองด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร	116

ตารางที่ 4.26 ค่าซัลไฟด์ตลอดการทดลองด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร	117
ตารางที่ 4.27 ค่า % recovery ของสมมูลมวลซีโอดีตลอดช่วงการทดลองที่ 2	118
ตารางที่ 4.28 ค่า % recovery ของสมมูลมวลซีโอดีตลอดช่วงการทดลองที่ 3	119
ตารางที่ 4.29 ค่า % recovery ของสมมูลมวลซัลเฟอร์ตลอดช่วงการทดลองที่ 2.....	120
ตารางที่ 4.30 ค่า % recovery ของสมมูลมวลซัลเฟอร์ตลอดช่วงการทดลองที่ 3.....	121
ตารางที่ ก.1.1 อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 100:1	132
ตารางที่ ก.1.2 อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 50:1	134
ตารางที่ ก.1.3 อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 20:1	137
ตารางที่ ก.1.4 อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1	139
ตารางที่ ก.2.1 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัด (มิลลิกรัมต่อลิตร).....	142
ตารางที่ ก.2.2 ซัลเฟตประสิทธิภาพการกำจัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	143
ตารางที่ ก.2.3 ซัลไฟด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร).....	144
ตารางที่ ก.2.4 ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดและประสิทธิภาพการกำจัด (มิลลิกรัมต่อลิตร).....	146
ตารางที่ ก.2.5 กรดอินทรีย์ระเหย (มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดอะซิติก).....	148
ตารางที่ ก.2.6 สภาพต่างทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต).....	149
ตารางที่ ก.2.7 ปริมาณก๊าซชีวภาพ (ลิตร)	150
ตารางที่ ก.2.8 สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ).....	152
ตารางที่ ก.2.9 ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม).....	153
ตารางที่ ก.2.10 ค่าพีเอช.....	154
ตารางที่ ก.2.11 ค่าไออาร์พี (มิลลิโวลต์).....	155
ตารางที่ ก.3.1 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัด (มิลลิกรัมต่อลิตร).....	157
ตารางที่ ก.3.2 ซัลเฟตประสิทธิภาพการกำจัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	157
ตารางที่ ก.3.3 ซัลไฟด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร).....	158
ตารางที่ ก.3.4 ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดและประสิทธิภาพการกำจัด (มิลลิกรัมต่อลิตร).....	158

ตารางที่ ก.3.5 กรดอินทรีย์ระเหย (มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดอะซิติก).....	159
ตารางที่ ก.3.6 สภาพต่างทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต).....	160
ตารางที่ ก.3.7 ปริมาณก๊าซชีวภาพ (ลิตร).....	160
ตารางที่ ก.3.8 สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ).....	161
ตารางที่ ก.3.9 ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม).....	161
ตารางที่ ก.3.10 ค่าพีเอช.....	162
ตารางที่ ก.3.11 ค่าไออาร์พี (มิลลิโวลต์).....	163
ตารางที่ ข.1 % recovery ของช่วงการทดลองที่ 2 ระยะการทดลองที่ 1	164
ตารางที่ ข.2 % recovery ของสมมูลมวลซัลเฟอร์ของช่วงการทดลองที่ 3 ระยะการทดลองที่ 1..	165
ตารางที่ ค.1 อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 100:1	177
ตารางที่ ค.2 อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 50:1	179
ตารางที่ ค.3 อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 20:1	182
ตารางที่ ค.4 อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1	184

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ชื่อวิทยานิพนธ์

ภาษาไทย : การยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบยูเอเอสบีโดยโซเดียมโมลิบเดต

ภาษาอังกฤษ : Inhibition of hydrogen sulfide in UASB reactor by sodium molybdate

1.2 คำสำคัญ

ไฮโดรเจนซัลไฟด์	(Hydrogen sulfide)
โซเดียมโมลิบเดต	(Sodium molybdate : Na_2MoO_4)
ยูเอเอสบี	(Upflow Anaerobic Sludge Blanket : UASB)
แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต	(Sulfate reducing bacteria : SRB)
ก๊าซชีวภาพ	(Biogas)

1.3 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยมีการพัฒนาด้านการเกษตรและอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดน้ำเสียจากกิจกรรมดังกล่าวในปริมาณมาก น้ำเสียที่เกิดขึ้นจะถูกบำบัดให้ผ่านค่ามาตรฐานตามกฎหมายกำหนดก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ลักษณะของน้ำเสียจะแตกต่างกันตามแหล่งที่มา เช่น โรงงานผลิตยางพารามีการใช้กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ในกระบวนการขึ้นรูปแผ่นยาง หรือฟาร์มสุกรซึ่งมีปริมาณซัลเฟต (SO_4^{2-}) เจือปนจากอาหารที่ให้สุกร จะเห็นได้ว่ากระบวนการข้างต้นมีปริมาณสารประกอบของซัลเฟต (S) เจือปน การบำบัดน้ำเสียจึงต้องใช้วิธีที่แตกต่างกันตามลักษณะน้ำเสียดังกล่าว

การบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic wastewater treatment system) เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย วิธีดังกล่าวอาศัยจุลินทรีย์ในการย่อยสลายและเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์ไปในรูปอื่น เป็นผลทำให้น้ำเสียมีค่าความสกปรกหรือบีโอดี (BOD) ลดลง ปัจจุบันมีการพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนในหลายรูปแบบเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ระบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket : UASB) เป็นระบบหนึ่งที่ได้รับคามนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจาก

ประสิทธิภาพสูง สิ้นเปลืองพลังงานน้อย ไม่ต้องอาศัยตัวกลางสำหรับจุลินทรีย์ รับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic loading rate) ได้สูง ทั้งยังสามารถปรับใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมหรือฟาร์มปศุสัตว์ได้หลายประเภท (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

ประโยชน์ที่สำคัญของการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนอีกประการหนึ่งคือ การเกิดก๊าซชีวภาพ (Biogas) ซึ่งสามารถใช้เป็นพลังงานในรูปแบบต่างๆ ก๊าซชีวภาพ ประกอบด้วย มีเทน (CH_4) ร้อยละ 60-70 คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ร้อยละ 30-40 และก๊าซอื่นๆร้อยละ 1-2 เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ไนโตรเจน (N_2) แอมโมเนีย (NH_3) เป็นต้น ซึ่งปริมาณและสัดส่วนของก๊าซชีวภาพจะขึ้นกับสารตั้งต้น วัตถุดิบหรือสภาวะที่ใช้ โดยทั่วไปก๊าซที่นำไปใช้ประโยชน์คือ มีเทน (CH_4) เนื่องจากเป็นก๊าซที่ให้พลังงานความร้อนสูง ดังนั้น การนำก๊าซชีวภาพไปใช้จำเป็นต้องมีกระบวนการกำจัดหรือลดก๊าซเจือปนอื่นๆ ทั้งนี้ปัญหาสำคัญในระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสีย คือ การเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ เนื่องจากก๊าซดังกล่าวเป็นก๊าซอันตราย เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตเมื่อสูดดมหรือสัมผัส ทั้งยังส่งผลเสียในเรื่องการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆ ไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ทำให้เกิดการกัดกร่อนโลหะหรือเครื่องยนต์ได้ (สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย, 2554)

ไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีซัลเฟอร์ เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่อยู่ในรูปซัลเฟต (SO_4^{2-}) โดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต (Sulfate reducing bacteria; SRB) ภายใต้สภาวะไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic digester) แบคทีเรียดังกล่าวสามารถใช้ซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) และเปลี่ยนเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยอาศัยเอนไซม์หลักคือ เอทีพีซัลฟูไรเลส (ATP sulfurylase) (Postgate, 1984)

ปัจจุบันการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียที่มีปริมาณซัลเฟตสูง ยังเป็นปัญหาสำคัญต่อการนำก๊าซไปใช้ประโยชน์ เนื่องจากจำเป็นต้องมีกระบวนการกำจัดหรือลดไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปกระบวนการดังกล่าวสามารถทำได้ 3 ลักษณะ คือ การกำจัดสารประกอบซัลเฟตก่อนนำเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ การทำก๊าซให้บริสุทธิ์ (Gas purification) และการยับยั้งแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตในขณะที่ผลิตก๊าซชีวภาพ ขณะที่การกำจัดสารประกอบซัลเฟตและการทำก๊าซให้บริสุทธิ์ จำเป็นต้องมีการสร้างระบบและบำรุงรักษา ทำให้สิ้นเปลืองงบประมาณอย่างสูง (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2545; กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

จากงานวิจัยที่ผ่านมา Qiyong และคณะ (2011) ศึกษาการยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์จากหลุมฝังกลบขยะซึ่งมีแผ่นยิปซัม (Ca_2SO_4) เป็นส่วนประกอบหลัก โดยเน้นศึกษาในเรื่องยับยั้งการผลิตไฮโดรเจนซัลไฟด์ของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต ด้วยสาร 3 ชนิด คือ โซเดียมโมลิบเดต (Na_2MoO_4) เพอริคลอไรด์ (FeCl_3) และ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) พบว่า โซเดียมโมลิบเดตความเข้มข้น

2.0 มิลลิโมลาร์ สามารถยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สารดังกล่าวมีความเป็นพิษต่ำและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

การผลิตก๊าซชีวภาพโดยระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนจากน้ำเสียที่มีซัลเฟตเจือปน ยังคงเป็นปัญหา เนื่องจากก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณของไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงตามไปด้วย การกำจัดก๊าซดังกล่าวทำให้สูญเสียงบประมาณในการสร้างระบบและดูแลรักษา งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษา การยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบยูเอเอสบีโดยโซเดียมโมลิบเดต เพื่อเป็นข้อมูลและแนวทางในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวต่อไป

1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1.1 เพื่อศึกษาถึงความเข้มข้นที่เหมาะสมของโซเดียมโมลิบเดตในการยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์และผลต่อการผลิตมีเทน

2.1.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของโซเดียมโมลิบเดต ในการยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบยูเอเอสบีด้วยน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงจากฟาร์มสุกร

2.1.3 เพื่อประยุกต์ใช้โซเดียมโมลิบเดตในการยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบบำบัดน้ำเสียอื่นๆได้

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

2.2.1 งานวิจัยนี้เป็นการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ ดำเนินการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการ ชั้น 1 อาคารพฤษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.2 การทดลองแบ่งเป็น 3 ช่วง โดย

ช่วงที่ 1 เป็นการทดลองแบบแบตช์ ในขวดซีรัมขนาด 1,000 มิลลิลิตร ด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ ใช้น้ำตาลทรายขาวเป็นสารให้ซีโอดี ทำการทดลองเป็นเวลา 7 วัน

ช่วงที่ 2 เป็นการทดลองแบบต่อเนื่องโดยใช้ถังปฏิกรณ์ทรงสูงระบบยูเอเอสบีขนาด 10 ลิตร ป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ ใช้น้ำตาลทรายขาวเป็นสารให้ซีโอดี ทำการทดลองเป็นเวลา 60 วัน

ช่วงที่ 3 เป็นการทดลองแบบต่อเนื่องจากช่วงที่ 2 โดยใช้ น้ำเสียจริงจากฟาร์มสุกร แทนน้ำเสียสังเคราะห์ ทำการทดลองเป็นเวลา 20 วัน

2.2.3 ใช้เม็ดตะกอนจุลินทรีย์จากระบบยูเอเอสบี บริษัท เสริมสุข มหาชน (จำกัด) ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอย (Volatile Suspended Solid ; VSS) เท่ากับ 93,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.2.4 ใช้โซเดียมโมลิบเดตเกรดห้องปฏิบัติการ ยี่ห้อ Univar

2.2.5 พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ในการทดลอง ได้แก่ ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ปริมาณก๊าซชีวภาพ สัดส่วนมีเทน (CH_4) ปริมาณซัลเฟต (SO_4^{2-}) ซัลไฟด์ (S^{2-}) ค่าซีโอดี ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ค่าออกซิเดชัน-รีดักชัน โปเทนเชียล (ORP) ค่ากรดไขมันระเหย (VFA) ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) และ ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS)

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

2.3.1 สามารถใช้โซเดียมโมลิบเดตในการยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบยูเอเอสบีได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.3.2 สามารถนำข้อมูลหรือค่าที่ได้จากการทดลอง ไปปรับใช้ในการยับยั้งไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบบำบัดน้ำเสียยูเอเอสบีจากฟาร์มสุกรและระบบอื่นๆได้



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การบำบัดน้ำเสีย

การบำบัดน้ำเสีย หมายถึง การกำจัดหรือทำลายสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียให้หมดไป หรือเหลือน้อยที่สุดให้ได้มาตรฐานที่กำหนดและไม่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม น้ำเสียจากแหล่งต่างกันจะมีสมบัติไม่เหมือนกันดังนั้นกระบวนการบำบัดน้ำจึงมีหลายวิธี โดยทั่วไประบบบำบัดน้ำเสียมี 4 วิธีคือ

2.1.1 กระบวนการทางเคมี (Chemical process)

เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยการแยกสารต่างๆ หรือสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียที่บำบัด เช่น โลหะหนัก สารพิษ สภาพความเป็นกรด ต่างสูงๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ด้วยการเติมสารเคมีต่าง ๆ ลงไปเพื่อให้เข้าไปทำปฏิกิริยาซึ่งจะมีประโยชน์ในการแยกสาร แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือ เมื่อเติมสารเคมีลงในน้ำเสียแล้วทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและวิธีนี้จะมีความค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีค่อนข้างสูง ดังนั้นกระบวนการทางเคมีจะเลือกใช้ก็ต่อเมื่อน้ำเสียไม่สามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการทางกายภาพหรือชีวภาพ

การทำให้เกิดตะกอน (precipitation) อาศัยหลักการเติมสารเคมีลงไปทำปฏิกิริยาทำให้เกิดกลุ่มตะกอนตกลงมา โดยทั่วไปสารแขวนจะมีประจุลบ ดังนั้นสารเคมีที่เติมลงไปจึงเป็นประจุบวกเพื่อทำให้เป็นกลาง การแยกด้วยวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายสูงแต่ก็มีประสิทธิภาพสูงเช่นกัน ดังนั้นวิธีนี้จะเลือกใช้ต่อเมื่อไม่สามารถแยกได้โดยกระบวนการทางชีวภาพหรือกายภาพ โดยส่วนมากสารเคมีที่ทำให้เกิดตะกอนจะละลายน้ำ เช่น เกลือของสารประกอบต่างๆ เช่น เกลืออะลูมิเนียมซัลเฟต หรือสารส้ม ($Al_2(SO_4)_3$) เกลือเหล็ก ($FeCl_3$, $FeSO_4$) และเกลือของแคลเซียม ($Ca(OH)_2$) ส่วนเกลือที่นำมาช่วยในการเกิดตะกอนได้ดีนี้เป็นสารประกอบของกลุ่ม Activated ของ Silica และ Polyelectrolytes โดยกระบวนการทางเคมีมีหลายวิธี การเกิดออกซิเดชันทางเคมี (chemical oxidation) อาศัยหลักการเสียอิเล็กตรอนของอะตอม ให้แก่สารเคมีที่เติมลงไป ในน้ำเสียโดยสารเคมีนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ (oxidizing agent) ส่วนมากวิธีนี้จะนิยมใช้เปลี่ยนโมเลกุลของโลหะที่เป็นพิษ เช่น การเปลี่ยน Fe^{2+} ซึ่งมีพิษมากไปเป็นสาร Fe^{3+} ซึ่งมีพิษน้อย ด้วยคลอรีน ดังแสดงในสมการที่ 2.1



การเกิดรีดักชันทางเคมี (chemical reduction) เป็นปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอน วิธีการนี้เป็นการเปลี่ยนสภาพของสารพิษไปเป็นสารที่มีอันตรายน้อยลง อะตอมหรือไอออน ของสารพิษจะรับอิเล็กตรอนจากสารเคมีที่เติมลงไปซึ่งมีสมบัติเป็นตัวรีดิวซ์ (reducing agent) เช่น การเปลี่ยน Cr^{6+} ซึ่งมีพิษมากไปเป็น Cr^{3+} ด้วย เฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) ในสภาพที่เป็นกรด ดังแสดงในสมการที่ 2.2



การสะเทิน (neutralization) เป็นการเปลี่ยนค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำเสียให้มีฤทธิ์เป็นกลาง (pH = 7) ถ้าต้องการปรับค่าน้ำเสียที่มีฤทธิ์เป็นกรด (pH < 7 ในน้ำเสียให้สูงขึ้นต้องเติมสารที่มีฤทธิ์เป็นด่าง เช่น แคลเซียมคาร์บอเนตหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่วนกรณีถ้าต้องการปรับน้ำเสียมีฤทธิ์เป็นด่าง (pH > 7) ให้มีค่าพีเอชต่ำลงจะต้องเติมกรด เช่น กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก กรดเกลือและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น

2.1.2 กระบวนการทางกายภาพ (physical process)

เป็นการบำบัดน้ำเสียอย่างง่ายซึ่งจะแยกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำออก วิธีนี้จะแยกตะกอนได้ประมาณ 50-65% ส่วนเรื่องการแยกความสกปรกในรูปของสารอินทรีย์ (BOD_5) ประมาณ 20-30% เท่านั้น วิธีการต่าง ๆ ในกระบวนการนี้มีหลายวิธี เช่น การดักด้วยตะแกรง (screening) เป็นการแยกเศษขยะต่างๆ ที่มากับน้ำเสีย เช่น เศษไม้ ถูพลาสติก กระดาษ ตะแกรงมีหลายขนาด การดักด้วยตะแกรงจึงเป็นการแยกขั้นตอนแรกในการบำบัดน้ำเสีย การตัดย่อย (combination) คือ การใช้เครื่องตัดทำลายเศษขยะขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง การกวาด (skimming) เป็นการกำจัดน้ำมันและไขมันโดยทำการดักหรือกวาดออกจากน้ำเสีย การทำให้ลอย (floating) จะใช้กับตะกอนที่มีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าน้ำ การตกตะกอน (sedimentation) เป็นการแยกตะกอนออกจากน้ำเสียโดยอาศัยหลักการเรื่องแรงโน้มถ่วง ซึ่งจะใช้กับตะกอนที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่าน้ำ

2.1.3 กระบวนการทางกายภาพ-เคมี (physical-chemical process)

เป็นกระบวนการที่ต้องมีอุปกรณ์ช่วยมากกว่ากระบวนการที่กล่าวมา ซึ่งกระบวนการนี้จะใช้ในขั้นตอนสุดท้ายในการบำบัดน้ำเสีย ที่ผ่านกระบวนการในขั้นตอนอื่นแล้ว เช่น กระบวนการดังต่อไปนี้

- การดูดซับด้วยถ่าน (carbon adsorption) วิธีการนี้ใช้ผงถ่านหรือคาร์บอนเป็นตัวดูดซับสารเจือปนที่ละลายอยู่ในน้ำทิ้ง
- การแลกเปลี่ยนประจุ วิธีการนี้อาศัยหลักการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างสารปนเปื้อนในน้ำเสียกับตัวกลางที่บรรจุซึ่งมีทั้งประจุบวกและประจุลบ โดยจะมีการลำเลียงน้ำภายใน

2.1.4 กระบวนการทางชีวภาพ (Biological Process)

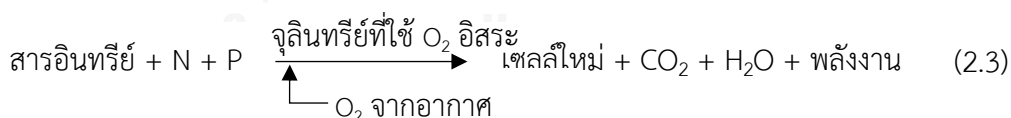
กระบวนการทางชีวภาพ เป็นการอาศัยหลักการใช้จุลินทรีย์ มาทำการย่อยสลายเปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นก๊าซหรือสารอื่นๆ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ แอมโมเนีย เป็นต้น กระบวนการนี้ถือเป็นการบำบัดน้ำเสียที่ดีที่สุดในแง่ของการลดปริมาณสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ แต่ต้องขึ้นกับการเลือกสถานะแวดล้อมให้เหมาะกับการทำงานของจุลินทรีย์ โดยสัมพันธ์กับปริมาณของจุลินทรีย์ และเวลาที่ใช้ในการย่อยสลาย จำแนกได้เป็น 2 ประเภท คือ กระบวนการบำบัดแบบใช้ออกซิเจน (aerobic treatment) และกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic treatment)

2.1.4.1 กระบวนการบำบัดแบบใช้ออกซิเจน (aerobic treatment)

เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยจุลินทรีย์กลุ่มที่ต้องอาศัยออกซิเจนละลายน้ำ (dissolved oxygen) หรือ ออกซิเจนอิสระ ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ปฏิกริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียกลุ่มที่ใช้อากาศ (aerobic bacteria) สามารถจำแนกได้เป็น 2 ขั้นตอนตามลำดับดังนี้ คือ

ขั้นตอนที่ 1 : เป็นกระบวนการนำสารอินทรีย์หรือสารอาหารเข้าไปในเซลล์ โดยจุลินทรีย์จะส่งเอนไซม์ (enzyme) ออกมาย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มาเกาะติดที่ผนังเซลล์เพื่อเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสารโมเลกุลเล็กที่จะสามารถซึมผ่านเข้าไปในเซลล์ของจุลินทรีย์ได้

ขั้นตอนที่ 2 : เป็นกระบวนการทางชีวเคมีภายในเซลล์จุลินทรีย์ เพื่อที่จะผลิตพลังงานไปใช้ในกิจกรรมต่าง ๆ และการสร้างเซลล์ใหม่ โดยเขียนอยู่ในรูปของสมการโดยรวมได้ ดังแสดงในสมการ 2.3



เมื่อสารอินทรีย์ในน้ำเสียถูกเปลี่ยนรูปมาเป็นจุลินทรีย์เซลล์ใหม่ จะรวมตัวกันเป็นฟล็อก (biological flocculation) ก็จะมีน้ำหนักมากขึ้น และแยกออกจากน้ำเสียได้ง่ายด้วยการตกตะกอน

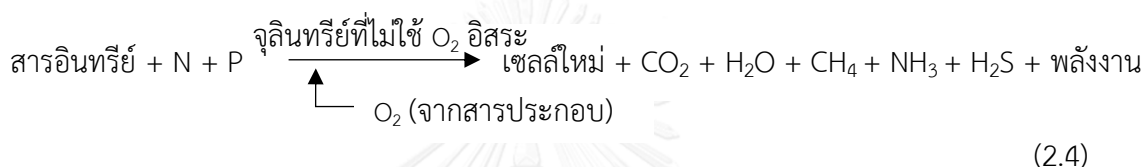
กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจน จำแนกได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ

1. ระบบบำบัดที่จุลินทรีย์แขวนลอยอยู่ในระบบ (suspended system) เช่น บ่อแอโรบิก (Aerobic Pond) ระบบแอกติเวตเต็ดสลัดจ์ (Activated Sludge) บ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon) เป็นต้น

2. ระบบบำบัดที่จุลินทรีย์เกาะติดผิวตัวกลาง หรือ ระบบฟิล์มตรึง (fixed film system) เช่น ระบบโปรยกรอง (Trickling Filter: TF) และระบบแผ่นหมุนชีวภาพ (Rotating Biological Contactor : RBC) เป็นต้น

2.1.4.2 กระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic treatment)

เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน โดยจุลินทรีย์จะอาศัยสารประกอบอื่นเป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจนละลายน้ำ (dissolved oxygen) หรือออกซิเจนอิสระ จากกระบวนการนี้ จะเกิดก๊าซมีเทน (CH_4) ซึ่งใช้เป็นพลังงานได้ สามารถเขียนในรูปสมการได้ ดังแสดงในสมการ 2.4



กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. ระบบบำบัดที่จุลินทรีย์แขวนลอยอยู่ในระบบ (Suspended system) เช่น บ่อแอนแอโรบิก (Anaerobic Pond) ถังย่อยแบบธรรมดา (Anaerobic Digester) ถังย่อยแบบสัมผัส (Anaerobic Contact) ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ (Anaerobic Baffled Reactor, ABR) เป็นต้น
2. ระบบบำบัดที่จุลินทรีย์เกาะติดผิวตัวกลาง หรือ ระบบฟิล์มตรึง (fixed film system) เช่น ถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter) ระบบชั้นลอยตัวไร้ออกซิเจน (Anaerobic Fluidized Bed) ระบบจานหมุนชีวภาพไร้อากาศ (Anaerobic Rotating Biological Contactor, AnRBC) เป็นต้น (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2545; มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

2.2 กลไกทางชีวเคมีและจุลชีววิทยาของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน

กลไกพื้นฐานในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ทั้งแบบใช้อากาศหรือไม่ใช้อากาศ จะมีลักษณะเหมือนกันคือเป็นปฏิกิริยาเคมีแบบออกซิเดชันรีดักชัน (รีดอกซ์) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนเกิดขึ้นระหว่างสารให้และรับอิเล็กตรอน สารอินทรีย์หรือมลสารในน้ำเสียจะเป็นสารให้อิเล็กตรอน (เนื่องจากมีพลังงานอยู่ในตัวสูง) และสารอย่างอื่นที่มีอยู่ในน้ำเป็นสารรับอิเล็กตรอน เช่น ออกซิเจน, ไนเตรทหรือซัลเฟต เป็นต้น การถ่ายเทอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์จะได้พลังงานเกิดขึ้นจำนวนหนึ่ง พลังงานที่เกิดขึ้นนี้ส่วนหนึ่งสูญเสียไปในรูปของพลังงานความร้อน อีกส่วนหนึ่งถูกนำไปใช้ในการดำรงชีวิตและสร้างเซลล์ใหม่ ดังนั้นสารอินทรีย์จึงเป็นทั้งแหล่งพลังงานและ

แหล่งคาร์บอนของจุลชีพ สารรีดิวซ์ในน้ำเสียมีหลายชนิด ผลของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นก็ต่างกันไปตามชนิดของสารรีดิวซ์ เช่น ถ้าสารรีดิวซ์เป็นออกซิเจน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาที่เรียกว่า Aerobic Oxidation ถ้าสารรีดิวซ์เป็นซัลเฟต ก็จะเกิดปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชัน เป็นต้น สามารถแบ่งชนิดของปฏิกิริยารีดอกซ์ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ของแบคทีเรียออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ตามสารรีดิวซ์ คือ

- การหมัก (Fermentation) คือ ปฏิกิริยารีดอกซ์ของสารประกอบอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในภาวะที่ไม่มีสารรีดิวซ์ภายนอก
- การหายใจ (Respiration) คือ ปฏิกิริยารีดอกซ์ที่มีสารรีดิวซ์ภายนอกเป็นสารรีดิวซ์ตัวสุดท้าย ซึ่งสามารถแบ่งย่อยลงไปได้อีก 2 ประเภท
 - Aerobic Respiration เป็นการหายใจที่มีโมเลกุลของออกซิเจนเป็นสารรีดิวซ์ตัวสุดท้าย
 - Anaerobic Respiration เป็นการหายใจที่ไม่ใช้ออกซิเจนเป็นสารรีดิวซ์ตัวสุดท้าย สารรีดิวซ์ที่ใช้ในกรณีนี้ได้แก่ ไนเตรต ซัลเฟตหรือคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ 2.1 ปฏิกิริยารีดอกซ์ในการบำบัดน้ำเสีย

สารให้อิเล็กตรอน	สารอินทรีย์ในน้ำเสีย				
สารรีดิวซ์	O ₂	สารอินทรีย์	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₂
ผลของปฏิกิริยา	CO ₂	สารอินทรีย์ โมลกุลเล็กลง	N ₂	S ²⁻	CH ₄
ชื่อปฏิกิริยารีดอกซ์	Aerobic Oxidation	Fermentation	Denitrification	Sulfate reduction	Methano- genesis

(มันสิน ตันกุลเวศม์, 2542)

2.2.1 กลไกการสร้างมีเทน

กระบวนการสร้างมีเทนเกิดขึ้นเมื่อมีการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจนโดยผ่านกระบวนการ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

เป็นขั้นตอนของการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่ ทั้งที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีนและไขมัน ให้มีขนาดโครงสร้างโมเลกุลที่สามารถละลายน้ำได้ ผลของปฏิกิริยาจะได้สารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลที่เล็กลง เช่น น้ำตาลกลูโคส

กรดอะมิโน กรดไขมัน ขั้นตอนนี้เกิดขึ้นภายนอกเซลล์แบคทีเรียโดยแบคทีเรียจะปล่อยเอนไซม์ออกมาเพื่อย่อยสลายสารดังกล่าว แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องในขั้นตอนนี้คือ แบคทีเรียกลุ่มไฮโดรไลติก (Hydrolytic bacteria) และ กลุ่มเฟอร์เมนเตทีฟ (Fermentative bacteria) อัตราการเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนนี้ขึ้นกับค่าความเป็นกรด-ด่าง ระยะเวลาที่เก็บสารอินทรีย์และองค์ประกอบของสารอินทรีย์

ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการอะซิโดเจเนซิส (Acidogenesis)

สารประกอบอินทรีย์โครงสร้างโมเลกุลเล็กที่ละลายน้ำซึ่งเป็นผลผลิตจากขั้นตอนแรกจะถูกแบคทีเรียกลุ่มที่ดำรงชีพอยู่ได้ทั้งที่มีและไม่มีออกซิเจน (Facultative bacteria) ใช้เป็นแหล่งอาหารและแหล่งพลังงาน ผลของปฏิกิริยาจะได้กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acid) ที่มีอะตอมของคาร์บอนไม่เกิน 5 ตัว เช่น กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทิริก เป็นต้น และสารอื่นๆ เช่น เอทานอล ไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งกระบวนการชีวเคมีที่เกิดขึ้นในระหว่างการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กและชนิดของผลผลิตที่ได้จะขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัย คือ ชนิดของซับสเตรท และความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น เช่น ในสภาวะที่ความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าต่ำกรดไขมันชนิดสายยาวจะถูกย่อยสลายกลายเป็นกรดอะซิติกและก๊าซไฮโดรเจน แต่ถ้าในสภาวะที่มีความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าสูง กรดไขมันชนิดดังกล่าวจะถูกย่อยกลายเป็นกรดโพรพิโอนิกและกรดบิวทิริก แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องในขั้นตอนนี้คือ แบคทีเรียกลุ่มสร้างกรด (Acid forming bacteria) ซึ่งชนิดของแบคทีเรียจะถูกเรียกแตกต่างกันไปตามชนิดของสารอินทรีย์นั้นๆ

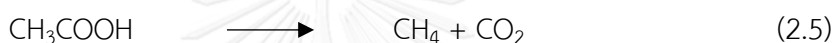
ขั้นตอนที่ 3 กระบวนการอะซิโดเจเนซิส (Acetogenesis)

ขั้นตอนนี้กรดไขมันระเหยง่ายที่เกิดขึ้นจากกระบวนการข้างต้นจะถูกแบคทีเรียกลุ่มอะซิโตเจน (Acetogenic bacteria) เปลี่ยนให้เป็นอะซิเตต (CH_3COO^-) ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซไนโตรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสารประกอบที่สำคัญในการผลิตก๊าซมีเทน ปฏิกิริยานี้ถือเป็นปฏิกิริยาสำคัญในกรณีที่มีการสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายและก๊าซไฮโดรเจนในปริมาณที่สูงเกินไปจะยับยั้ง

กระบวนการผลิตก๊าซมีเทน แบบที่เรียกลูมนี้อาจเรียกว่ากลุ่มผลิตก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen forming bacteria) ในขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นได้เฉพาะในสภาวะที่ค่าความดันพาร์เซียของไฮโดรเจนต่ำเท่านั้น เพราะกรดไขมันระเหยง่ายไม่สามารถกลายเป็นกรดอะซิติกในสภาวะที่ค่าความดันพาร์เซียสูงได้

ขั้นตอนที่ 4 กระบวนการผลิตก๊าซมีเทน (Methanogenesis)

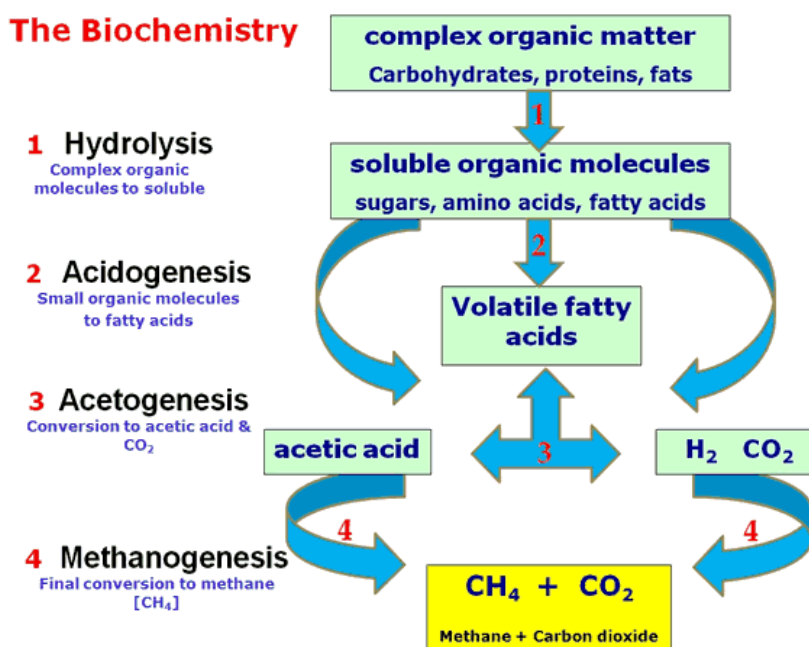
กระบวนการผลิตก๊าซมีเทนเป็นขั้นตอนสุดท้ายของการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไม่ใช้ออกซิเจน ผลผลิตจากกระบวนการนี้คือ ก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และก๊าซอื่นๆ ในปริมาณเล็กน้อย เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ก๊าซแอมโมเนีย สารตั้งต้นของขั้นตอนนี้ที่มีความสำคัญมากคือกรดอะซิติก และก๊าซไฮโดรเจนกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ 2.5 และ 2.6 แบบที่เรียที่เกี่ยวข้อในขั้นตอนนี้มีความจำเพาะสูง คือ แบบที่เรียกลูมนสร้างมีเทน (Methanogenic producing bacteria) ได้แก่ กลุ่ม Acetoclastic methanogenic bacteria และ Hydrogenophilic methanogen



Acetophilic methanogen



Hydrogenophilic methanogen



ภาพที่ 2.1 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน

(Onofre, 2013)

ในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจนนี้ แบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทนมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมมากและมีอัตราการเจริญเติบโตต่ำกว่าแบคทีเรียกลุ่มอื่น ดังนั้นการเจริญเติบโตและปริมาณของแบคทีเรียกลุ่มนี้จึงเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

2.2.1.1 แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องในกลไกการสร้างมีเทน

ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนต้องอาศัยการทำงานของแบคทีเรียหลายชนิดร่วมกัน แบคทีเรียที่มีบทบาทต่อกระบวนการดังกล่าวแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria) และแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน (Methane producing bacteria)

1. แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria)

แบคทีเรียส่วนใหญ่ในกลุ่มนี้คือ Facultative anaerobic bacteria ซึ่งสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ทั้งในสภาวะแวดล้อมที่มีและไม่มีออกซิเจน โดยได้รับพลังงานจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ โครงสร้างโมเลกุลใหญ่ให้เป็นกรดไขมัน กรดอินทรีย์ระเหยง่าย แอลกอฮอล์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซแอมโมเนียและก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เพื่อใช้ในการเจริญเติบโต สภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตคือช่วงค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.0-6.5 สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมได้ดี และมีอัตราการเจริญเติบโตสูง แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรดแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มดังนี้

- อะซิโตเจนิกแบคทีเรีย

แบคทีเรียกลุ่มนี้เป็นแบคทีเรียกลุ่มที่เจริญได้ทั้งที่มีและไม่มีออกซิเจน (Facultative anaerobic bacteria) ซึ่งเป็นแบคทีเรียกลุ่มใหญ่ที่สุดในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน เนื่องจากสามารถใช้อาหารได้หลายชนิดและมีอัตราการเจริญเติบโตสูง แบคทีเรียกลุ่มนี้ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์โครงสร้างโมเลกุลใหญ่ให้เป็นสารโมเลกุลเดี่ยวที่ละลายน้ำได้ ผลผลิตที่ได้จากการย่อยสลายคือกรดไขมันระเหยง่าย ได้แก่ กรดอะซิติก กรดไพรูวอิก กรดบิวทีริก กรดฟอร์มิก เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้สารประกอบพวกแอลกอฮอล์ คีโตน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน

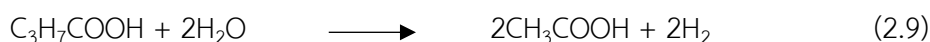
- อะซิโตเจนิกแบคทีเรีย

แบคทีเรียกลุ่มนี้เป็นพวกย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ได้จากการย่อยสลายในกระบวนการไฮโดรไลซิสและอะซิโตเจนิซิสแล้วเปลี่ยนให้เป็นการดอะซิติก แบ่งได้เป็น 2 กลุ่มย่อยคือ

- Hydrogen producing acetogenic bacteria

แบคทีเรียกลุ่มนี้จะทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในกระบวนการไฮโดรไลซิส ได้แก่ แอลกอฮอล์และกรดอินทรีย์ที่มีอะตอมของคาร์บอนเป็นส่วนประกอบ

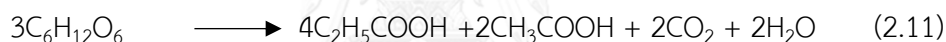
หลายตัวให้กลายเป็นกรดอะซิติกและก๊าซไฮโดรเจนหรือกรดอะซิติก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนเป็นผลผลิต ดังสมการที่ 2.7 2.8 และ 2.9



- Homoacetogenic bacteria แบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ Autotroph ได้แก่ แบคทีเรียที่ใช้สารประกอบที่มีคาร์บอน 1 อะตอม เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนในการเจริญเติบโตและได้ผลผลิตสุดท้ายเป็นอะซิเตตหรือกรดอะซิติก ดังสมการที่ 2.10



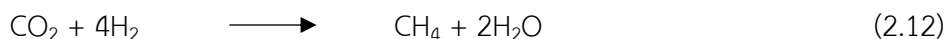
และ Heterotroph ได้แก่ แบคทีเรียที่ใช้สารประกอบที่มีคาร์บอนหลายอะตอมในการเจริญเติบโต ผลผลิตที่ได้มีทั้งอะซิเตตและไพโรฟอเนตซึ่งเป็นสารตัวกลางที่สำคัญในการผลิตก๊าซมีเทน ดังสมการที่ 2.11



2. แบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน (Methane producing bacteria)

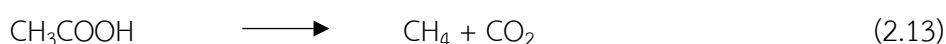
แบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทนสามารถใช้สารอาหารได้เพียงไม่กี่ชนิด แบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถแบ่งตามชนิดการใช้สารอาหารตั้งต้นได้ 2 กลุ่ม

- Hydrogenotrophic methanogens หรือ Hydrogen utilizing chemolithotrophs จะเปลี่ยนก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นก๊าซมีเทน ดังสมการที่ 2.12



แบคทีเรียกลุ่มนี้มีบทบาทสำคัญคือสามารถใช้ก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจนโดยจะคงสภาวะให้มีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนต่ำลงซึ่งมีผลต่อการเกิดอะซิเตตอย่างต่อเนื่อง

- Acetotrophic methanogens หรือ Acetoclastic bacteria ซึ่งจะเปลี่ยนอะซิเตตไปเป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ 2.13



ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ประมาณ 2 ใน 3 เกิดจากการเปลี่ยนอะซิเตตไปเป็นก๊าซมีเทนโดยแบคทีเรียกลุ่ม Acetotrophic methanogens และส่วนที่เหลือเป็นผลของปฏิกิริยาระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนโดยแบคทีเรียกลุ่ม Hydrogenotrophic methanogens (มันลิน ตันซุลเวศม์, 2542)

2.2.2 กระบวนการซัลเฟตรีดักชัน

ซัลเฟตรีดักชันเป็นกระบวนการย่อยสลายหรือเปลี่ยนรูปซัลเฟตไปในรูปอื่นๆ ในทางชีวภาพซัลเฟตจะถูกใช้เป็นการรีดิวซ์อิเล็กตรอนเกิดโดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต เกิดผลผลิตสุดท้ายเป็นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ กระบวนการดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนหากในน้ำเสียนี้ออกซิเจนมีปริมาณซัลเฟตเจือปน

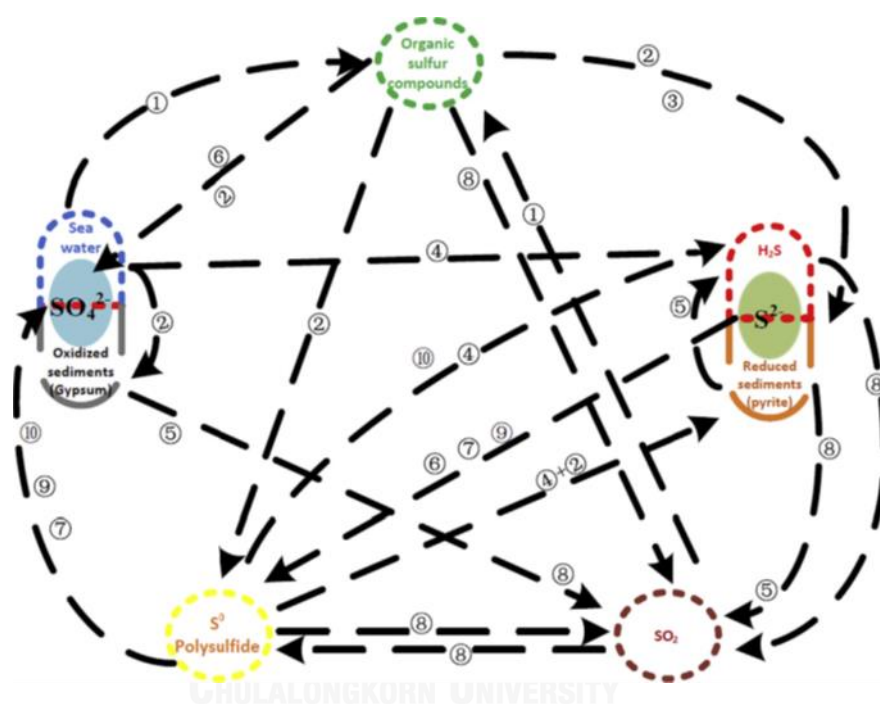
2.2.2.1 วัฏจักรซัลเฟอร์

ซัลเฟอร์สามารถพบได้ในธรรมชาติและคงอยู่ในรูปสารประกอบได้ โดยทั่วไปเมื่ออยู่ในรูปสารประกอบจะมีเลขออกซิเดชันระหว่าง -2 ถึง +6 ซึ่งซัลเฟตและซัลไฟด์จัดว่าเป็นรูปแบบที่คงตัวมากที่สุด (ตารางที่ 2.2) ซัลเฟอร์เป็นธาตุที่มีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตเนื่องจากเป็นองค์ประกอบของเซลล์ เอนไซม์ และโปรตีน สารประกอบซัลเฟอร์หลายชนิดเป็นตัวรีดิวซ์อิเล็กตรอนตัวสุดท้ายของจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนหรือเป็นตัวให้อิเล็กตรอนในจุลินทรีย์บางชนิด ตารางที่ 2.2 ระดับเลขออกซิเดชันของตัวอย่างชนิดและสารประกอบซัลเฟอร์

รูปของธาตุหรือสารประกอบซัลเฟอร์	ระดับเลขออกซิเดชัน	
สารอินทรีย์ซัลเฟอร์	Organic S (R-SH)	-2
ซัลไฟด์	Sulfide (H ₂ S)	-2
ซัลเฟอร์	Element sulfur (S ⁰)	0
ไทโอซัลเฟต	Thio sulfate (S ₂ O ₃ ²⁻)	+2 (average per S)
เตตระไทโอเนต	Tetra thionate (S ₄ O ₆ ²⁻)	+2.5 (average per S)
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	Sulfur dioxide (SO ₂)	+4
ซัลไฟต์	Sulfite (SO ₃ ²⁻)	+4
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์	Sulfur trioxide (SO ₃)	+6
ซัลเฟต	Sulfate (SO ₄ ²⁻)	+6

(กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

การเปลี่ยนแปลงรูปของสารประกอบซัลเฟอร์ เรียกว่า วัฏจักรซัลเฟอร์ ดังแสดงในภาพที่ 2.2 โดยทั่วไปการเปลี่ยนรูปของซัลเฟอร์ ประกอบด้วย 3 ปฏิกิริยาหลัก ได้แก่ Assimilatory, Desulfurization/Dissimilation และ oxidation, reduction ในส่วนของปฏิกิริยา Assimilatory เป็นการดึงซัลเฟตหรือซัลไฟด์เข้าสู่เซลล์เพื่อสร้างสารประกอบซัลเฟอร์ในรูปปรีตัวซ์ที่จำเป็นต่อเซลล์ ได้แก่ การสร้างกรดอะมิโนบางชนิดที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ เช่น Cysteine Cystine และ Methanoine เป็นต้น หรือวิตามินต่างๆที่เซลล์ต้องการ เช่น Biotin, Liponic acid และThaimin เป็นต้น



ภาพที่ 2.2 วัฏจักรซัลเฟอร์

(Muyzer และ Stams, 2008; Wu และคณะ, 2013)

1) assimilatory process, 2) mineralization process, 3) desulfurization, 4) dissimilatory sulfate reduction, 5) volcanoes, weathering and hot springs, 6) biological oxidation with O₂/NO₃⁻, 7) anaerobic oxidation by phototrophic bacteria, 8) industrial process, 9) chemolithotrophic oxidation, 10) sulfur disproportionation

นอกจากนี้ปฏิกิริยาดังกล่าวยังรวมถึงการปล่อยสารประกอบซัลเฟอร์ในรูปซัลเฟตออกนอกเซลล์และการตายของเซลล์อีกด้วย (Na และ Salt, 2011) จะเห็นได้ว่าปฏิกิริยา Assimilatory สารประกอบซัลเฟอร์ที่นำเข้าสู่เซลล์จะไม่มีหรือนำมาสร้างพลังงานหรือใช้ในการเจริญเติบโต ส่วนปฏิกิริยา

Desulfurization/dissimilation เป็นการใช้อุณหภูมิสูงเพื่อสลายซัลเฟอร์ซัลไฟด์เป็นซัลไฟด์และออกซิไดซ์มาสร้างพลังงานเพื่อใช้ในการเจริญเติบโตของเซลล์โดยตรง นอกจากนี้การเปลี่ยนรูปซัลเฟอร์ยังสามารถเกิดโดยปฏิกิริยาหรือกระบวนการอื่นๆ เช่น การออกซิเดชันของแบคทีเรียกลุ่ม โฟโตโทรฟิก (phototrophic bacteria) หรือในสภาวะทางธรรมชาติ เช่น บ่อน้ำร้อน ภูเขาไฟ ในทางอุตสาหกรรมต่างๆก็สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของซัลเฟอร์ได้ (Frigaard และ Dahl, 2008)

2.2.2.2 แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต (Sulfate reducing bacteria, SRB)

แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเป็นแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนในการเจริญเติบโตจัดอยู่ในกลุ่มของแบคทีเรียชนิดเคโมเฮเทอโรโทรป (chemoheterotroph) ดำรงชีพและเจริญเติบโตโดยรับพลังงานจากปฏิกิริยาทางเคมีในการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆซึ่งเป็นแหล่งคาร์บอนและสารให้อิเล็กตรอน เช่น กรดไขมันระเหยหรือแอลกอฮอล์ลักษณะเด่นของแบคทีเรียกลุ่มนี้คือการใช้สารประกอบไนโตรเจนของซัลเฟอร์บางชนิด เช่น ซัลเฟต ซัลไฟด์หรือ ไฮโดรซัลเฟตเป็นสารให้อิเล็กตรอนในการย่อยสลายสารอาหารแล้วเปลี่ยนสารประกอบซัลเฟอร์นั้นให้อยู่ในรูปซัลไฟด์ ผลผลิตที่สำคัญคือก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ขั้นตอนนี้ถือเป็นขั้นตอนสุดท้ายของการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนเช่นเดียวกับขั้นตอนการสร้างมีเทน ดังนั้นจึงมักพบแบคทีเรียชนิดนี้ร่วมกับแบคทีเรียสร้างกรดและแบคทีเรียสร้างมีเทนในระบบไม่ใช้ออกซิเจนที่ใช้บำบัดน้ำเสียที่มีซัลเฟต ความสัมพันธ์ของแบคทีเรียหลายกลุ่มดังที่กล่าวมามีทั้งการพึ่งพาอาศัยและการแข่งขันระหว่างกัน

การแบ่งชนิดของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตตามความสามารถในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์เพื่อการดำรงชีพและการเจริญเติบโต สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

1. แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตชนิดย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ไม่สมบูรณ์ (incompletely oxidizing sulfate reducing bacteria, I-SRB) แบคทีเรียชนิดนี้จะใช้สารอาหารเช่น กรดแลคติก กรดไพรูวิก เอทานอลหรือกรดไขมันบางชนิดโดยสารอินทรีย์ที่เหลือจากการย่อยสลายจะเป็นอะซิเตต เช่น แบคทีเรียกลุ่ม Desulfovibrio, Desulfomonas, Desulfo-tomaculum และ Desulfobulbus เป็นต้น ถึงแม้จะได้อะซิเตตเป็นผลิตภัณฑ์จากการย่อยสลายสารอินทรีย์แต่ไม่สามารถนำอะซิเตตไปใช้ได้ เนื่องจาก I-SRB ขาดกลไกที่เกี่ยวข้องกับการจัดการเอนไซม์บางชนิดที่มีบทบาทในการย่อยอะซิเตต อย่างไรก็ตาม I-SRB อาจใช้อะซิเตตเป็นแหล่งคาร์บอนได้เมื่อสารให้อิเล็กตรอน คือ ไฮโดรเจน หรือ ฟอर्मเมต ปฏิกิริยาในการย่อยสลายสารอาหารของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตชนิด I-SRB มีหลายปฏิกิริยา แสดงดังตารางที่ 2.4

2. แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตชนิดย่อยสลายสารอินทรีย์ได้สมบูรณ์ (completely oxidizing sulfateReducing bacteria, C-SRB) สารอาหารที่ใช้จะเป็นกรดไขมันโดยเฉพาะกรด

อะซิติกและถูกย่อยสลายอย่างสมบูรณ์จนกลายเป็นไบคาร์บอเนตหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในที่สุด
แบคทีเรียในกลุ่มนี้ ได้แก่ Desulfococcus, Desulfosarcina และ Desulfonema ปฏิบัติการในการ
ย่อยสลายสารอาหารของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตชนิด C-SRB มีหลายปฏิกิริยาดังแสดงในตารางที่ 2.4

นอกจากนี้ยังมีการแบ่งแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตตามแหล่งอาหารที่ใช้ออกเป็น 3 กลุ่มดังนี้
Hydrogen-consuming sulfate reducing bacteria ; HSRB, Acetate -consuming sulfate
reducing bacteria ; ASRB และ Fatty acid-consuming sulfate reducing bacteria ; FASRB

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและสารอาหารที่ใช้

ชนิดจุลินทรีย์	ชนิดสับสเตรทที่ใช้ ร่วมกับซัลเฟต	สามารถใช้ H ₂ +CO ₂
Group I (I-SRB)		
<i>Desulfovibriodesulfuricans</i>	Lactate, Ethanol, Malate	ได้
<i>Desulfovibrio vulgaris</i>	Lactate, Ethanol, Malate	ได้
<i>Desulfomonaspigra</i>	Lactate	ไม่ได้
<i>Desulfotomaculumnigrificans</i>	Lactate, Ethanol	ได้
<i>Desulfobulbuspropionicus</i>	Propionate	ไม่ได้
Group II (C-SRB)		
<i>Desulfotomaculumacetoxidans</i>	Acetate	ได้
<i>Desulfobacterpostgatei</i>	Acetate	ไม่ได้
<i>Desulfococcusmultivorans</i>	Acetate, Propionate, Benzoate, Fatty Acids (C1-C14)	ไม่ได้
<i>Desulfonemalimicola</i>	Formate, Acetate Propionate, Fatty Acids (C1-C12)	ได้
<i>Desulfosarcinavariabilis</i>	Acetate, Propionate, Benzoate, Fatty Acids (C1-C14)	ได้

(Gottschalk และคณะ, 1988)

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างปฏิกิริยาย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต

ลำดับที่	สารให้อิเล็กตรอน	แบคทีเรีย	ปฏิกิริยา
1	ไฮโดรเจน	I-SRB	$4\text{H}_2 + \text{SO}_4^{2-} + \text{H}^+ \longrightarrow 4\text{H}_2\text{O} + \text{HS}^-$
		C-SRB	$4\text{H}_2 + \text{SO}_4^{2-} + \text{H}^+ \longrightarrow 4\text{H}_2\text{O} + \text{HS}^-$
2	อะซิเตต	C-SRB	$\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{SO}_4^{2-} \longrightarrow 2\text{HCO}_3^- + \text{HS}^-$
		C-SRB	$4\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COO}^- + 7\text{SO}_4^{2-} \longrightarrow 12\text{HCO}_3^- + 7\text{HS}^- + \text{H}^+$
3	โพรไพโอเนต	I-SRB	$4\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COO}^- + 3\text{SO}_4^{2-} \longrightarrow 4\text{CH}_3\text{COO}^- + 4\text{HCO}_3^- + 3\text{HS}^- + \text{H}^+$
		C-SRB	$2\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{COO}^- + 5\text{SO}_4^{2-} \longrightarrow 8\text{HCO}_3^- + 5\text{HS}^- + \text{H}^+$
4	บิวทีเรต	I-SRB	$2\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{COO}^- + \text{SO}_4^{2-} \longrightarrow 4\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{HS}^- + \text{H}^+$
		C-SRB	$2\text{CH}_3\text{CHOHCOO}^- + 3\text{SO}_4^{2-} \longrightarrow 6\text{HCO}_3^- + 3\text{HS}^- + \text{H}^+$
5	แลคเตต	I-SRB	$2\text{CH}_3\text{CHOHCOO}^- + \text{SO}_4^{2-} \longrightarrow 2\text{CH}_3\text{COO}^- + 2\text{HCO}_3^- + \text{HS}^- + \text{H}^+$
		C-SRB	$4\text{C}_6\text{H}_5\text{COO}^- + 15\text{SO}_4^{2-} + 16\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 28\text{HCO}_3^- + 15\text{HS}^- + 9\text{H}^+$
6	เบนโซเอท	I-SRB	$4\text{C}_6\text{H}_5\text{COO}^- + 3\text{SO}_4^{2-} + 16\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 12\text{CH}_3\text{COO}^- + 4\text{HCO}_3^- + 3\text{HS}^- + 9\text{H}^+$

(Widdel, 1988)

ตารางที่ 2.5 สารให้อิเล็กตรอนสำหรับแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต

สารให้อิเล็กตรอนบางชนิดสำหรับแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต		
ไฮโดรเจน (H ₂)	อะซิเตท (Acetate)	กรดไขมันสายยาว (Long-chain fatty acids)
แลกเตท (Lactate)	โพรไพโอเนท (Propionate)	เบนโซเอท (Benzoate)
ไพรูเวท (Pyruvate)	บิวทีเรท (Butyrate)	อินโดล (Indole)
เอทานอลและแอลกอฮอล์อื่นๆ (Ethanol and other alcohols)	ฟูมาเรท (Fumarate)	เฮกซะเดคเคน (Hexadecane)
โคลีน (Choline)	มาเลท (Malate)	

(กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

2.2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการปรับตัวของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต

1. อุณหภูมิ

โดยทั่วไปแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตที่ได้จากการเลี้ยงเชื้อบริสุทธิ์ (Pure Culture) จะมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อเจริญเติบโตในช่วง 30 -40 องศาเซลเซียส ซึ่งจัดอยู่ในช่วงมีโซฟิลิก การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีผลต่อแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตค่อนข้างมาก โดย (Visser และคณะ, 1992 อ้างถึงใน Visser, 1994) พบว่าการซัลเฟตรีดักชันโดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตในดินตะกอนน้ำเค็มลดลงระหว่าง 2-3.9 เท่า เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปจากช่วงที่เหมาะสม 10 องศาเซลเซียส

2. ความต้องการเกลือและความทนต่อเกลือ

ความต้องการเกลือของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของแบคทีเรีย ซึ่งแยกพวกเป็นที่ได้จากแหล่งน้ำเค็มหรือแหล่งน้ำกร่อยกับพวกที่ได้จากแหล่งน้ำจืด แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตที่ได้จากแหล่งน้ำเค็มหรือแหล่งน้ำกร่อยมักต้องการปริมาณเกลือในระดับหนึ่ง จึงเจริญเติบโตได้ดี และในทางตรงข้าม ถ้านำแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตกลุ่มนี้มาเลี้ยงในสภาพที่มีความเค็มต่ำก็จะได้ผลในทางลบต่อการเจริญเติบโต ชนิดและปริมาณของเกลือสำหรับแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจากแหล่งน้ำเค็มที่เหมาะสมคือ โซเดียมคลอไรด์ 20 กรัมต่อลิตร และ แมกนีเซียมคลอไรด์ 1.5 กรัมต่อลิตร นอกเหนือจากเกลือทั้งสองชนิดนี้แล้ว บางสายพันธุ์ยังต้องการแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่ำ 0.5 กรัมต่อลิตร ปริมาณความต้องการเกลือจะลดลงสำหรับกลุ่มที่มาจากน้ำกร่อย สวนแบคทีเรีย

รีดิวซ์ซัลเฟตที่มาจากน้ำจืดอาจถูกยับยั้งการเจริญเติบโตได้ถ้ามีโซเดียมคลอไรด์ในระดับที่เข้มข้นเท่ากับที่มีอยู่ในน้ำทะเล (ประมาณ 27 กรัมต่อลิตร)

3. พีเอช

พีเอชที่เหมาะสมต่อแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจะอยู่ในช่วงที่เป็นกลาง คือ ประมาณ 7 และมีกัลกัยยับยั้งเมื่อค่าพีเอชต่ำกว่า 6 หรือสูงกว่า 9 อย่างไรก็ตามพบว่าปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันสามารถเกิดขึ้นได้ในแหล่งน้ำจากเหมืองแร่ซึ่งมีค่าพีเอชประมาณ 3-4 แต่เมื่อนำแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจากแหล่งน้ำนี้มาเพาะเชื้อและทดสอบกลับพบว่ากัลกัยยับยั้งการเจริญเติบโตเมื่อพีเอชต่ำกว่า 6 ทำให้เกิดข้อสันนิษฐานว่าแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตที่อยู่ในแหล่งน้ำของเหมืองแร่อาจมีสภาพแวดล้อมเล็กๆ เช่น โพรงหรือซอกหิน ขนาดเล็กมาก ๆ (Microniches) หรือ สภาพแวดล้อมในระดับไมโครลอรอบ ๆ ตัวของแบคทีเรีย (Microenvironment) ซึ่งมีค่าพีเอชที่สูงกว่าพีเอชของทั้งระบบ โดยค่าพีเอชที่สูงขึ้นในช่องว่างขนาดเล็กอาจเกิดจากผลของปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชัน โดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต ทั้งนี้เมื่อพิจารณาปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอาหารของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตสร้างสภาพต่าง เช่น ไบคาร์บอเนต หรือไบซัลไฟด์ให้กับระบบ แต่ในกรณีการเกิดซัลเฟตรีดักชันของสารอาหารที่มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนมาก ผลของปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอาหารจะผลิตไฮโดรเจนอ็อกซิเจนขึ้นมา ทำให้ค่าพีเอชของระบบลดลงได้ อย่างไรก็ตามโดยภาพรวมเมื่อพิจารณาไฮโดรเจนอ็อกซิเจนร่วมกับไบคาร์บอเนตหรือไบซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันสามารถพิจารณาได้ว่า ถ้าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือไฮโดรเจนซัลไฟด์หนีออกจากตัวกลางได้ ปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันมักทำให้ค่าพีเอชสูงขึ้นเสมอ

4. ความมีชีวิตรอดในสภาวะที่มีออกซิเจน

แม้ว่าแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจัดเป็นแบคทีเรียชนิดทนออกซิเจนไม่ได้แม้จะมีปริมาณเพียงเล็กน้อยก็ตาม แต่ก็พบว่ายังสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีออกซิเจนอิสระอยู่ชั่วคราวได้ และสามารถฟื้นตัวได้เมื่อกลับเข้าสู่สภาวะไม่มีออกซิเจน นอกจากนี้พบว่ามีซัลไฟด์ที่อยู่ในตัวกลางมีบทบาทต่อผลกระทบของออกซิเจนที่มีผลต่อแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตบางสายพันธุ์ในลักษณะที่ต่างกันไป ในกรณีที่มีซัลไฟด์พร้อมกับออกซิเจนมีผลกระทบทางลบมากกว่ากรณีที่มีออกซิเจนเพียงอย่างเดียว

5. การเปลี่ยนรูปร่างลักษณะหรือการจับกลุ่มของเซลล์และเซลล์ชนิดเส้นใย (Morphological Adaptation or Aggregating Cells Glinding Filaments)

การรวมกลุ่มของเซลล์แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตอาจเกิดจากการปรับตัวในสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิต เช่น ค่าพีเอช อุณหภูมิ การมีสารให้อิเล็กตรอนหรือเกลือที่อยู่ในช่วงที่ไม่เหมาะสมหรือการมีออกซิเจนในตัวกลาง ในสภาวะดังกล่าวแบคทีเรียจะแสดงลักษณะผิดปกติ

(Morbid) เช่น เซลล์มีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากการบวมหรือหยุดการเคลื่อนที่จากเดิมที่เคลื่อนที่ได้ นอกจากสาเหตุจากการปรับตัวในสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมแล้ว อาจเป็นลักษณะปกติที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติของแบคทีเรียริวิตซ์ซัลเฟตบางสายพันธุ์ อย่างไรก็ตามพบว่าข้อดีของการรวมกลุ่มหรือการเกาะติดผนังก็คือ จะเพิ่มประสิทธิภาพในการดั่งสารอาหารที่เป็นตัวจำกัดการเจริญเติบโตได้ดีกว่าเซลล์ที่แขวนลอยอยู่ในตัวกลาง

2.2.2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดซัลเฟตรีดักชันในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน

กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่มีซัลเฟตเจือปน สารอินทรีย์จะถูกย่อยสลายเป็นอะซิเตตและไฮโดรเจน แบคทีเรียผลิตมีเทนและแบคทีเรียริวิตซ์ซัลเฟตจะแย่งใช้สารดังกล่าวเป็นสารให้อิเล็กตรอน จึงทำให้มีการแข่งขันกันระหว่างแบคทีเรียสองกลุ่ม ปัจจัยสำคัญที่จะทำให้เกิดกระบวนการซัลเฟตรีดักชันมีดังนี้

1. ชนิดสไลด์จ (Hao และคณะ, 2013)

ชนิดหรือลักษณะของสไลด์จ เช่น เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (Granule) ฟล็อกซ์ (floc) หรือไบโอฟิล์ม (biofilm) จะมีผลต่อซัลเฟตรีดักชันในหลายๆด้าน เช่น ความเร็วในการเกิดปฏิกิริยา อุณหภูมิ ความทนต่อสารพิษ เป็นต้น

2. สายพันธุ์แบคทีเรียริวิตซ์ซัลเฟต (Brenner และคณะ, 2005)

สายพันธุ์ของแบคทีเรียริวิตซ์ซัลเฟตส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาโดยบางชนิดสามารถใช้สารให้อิเล็กตรอนที่แตกต่างกันจึงส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วกว่า เช่น C-SRB บางกลุ่มใช้สารให้อิเล็กตรอนเป็นอะซิเตต ในขณะที่ I-SRB บางกลุ่มใช้ไฮโดรเจนเป็นสารให้อิเล็กตรอน ซึ่งในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ส่วนใหญ่เกิดอะซิเตตมากกว่า หากในระบบมี C-SRB มาก ก็จะทำให้ปฏิกิริยาเร็วขึ้นได้

3. ความสมดุลในการทำงานร่วมกันระหว่างแบคทีเรียแต่ละกลุ่มในระบบ (Mulopo และคณะ, 2011)

การสลายสารอินทรีย์ทางชีวภาพในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจนจำเป็นต้องอาศัยแบคทีเรียหลายกลุ่มในการดำเนินปฏิกิริยา ซึ่งความสมดุลในการเจริญระหว่างแบคทีเรียแต่ละกลุ่มจึงมีความสำคัญ เช่น แบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดจะมีการสร้างกรดอะซิติกและแบคทีเรียริวิตซ์ซัลเฟตจะใช้กรดดังกล่าวเป็นสารให้อิเล็กตรอน การทำงานระหว่างแบคทีเรียทั้งสองชนิดจึงต้องมีความสมดุลกัน

4. การแข่งขันระหว่างแบคทีเรียสร้างมีเทนและแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต (O'Reilly และ Colleran, 2006)

ในระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนแบคทีเรียสร้างมีเทนและแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจะมีการแข่งขันกันเนื่องจากการใช้สารให้อิเล็กตรอนส่วนใหญ่เหมือนกัน คืออะซิเตต ดังนั้น ชนิดของแบคทีเรียแต่ละกลุ่มจึงมีความสำคัญ ทั้งในเรื่องของความโดดเด่นของแบคทีเรีนั้นๆหรือปริมาณซัลเฟตในระบบ

5. ความเข้มข้นของซัลเฟตในระบบ (Mohanty และคณะ, 2000)

ปริมาณซัลเฟตในระบบถือว่ามีความสำคัญต่อการเจริญของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตอย่างมากเนื่องจากแบคทีเรียดังกล่าวใช้ซัลเฟตเป็นสารรับอิเล็กตรอนซึ่งหากไม่มีซัลเฟตในระบบจะไม่มี การเจริญ ในขณะที่เดียวกันถ้ามีปริมาณซัลเฟตในระบบมากเกินไปก็จะเป็นการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียดังกล่าว

6. แร่ธาตุสำคัญ (trace element) (Biswas และคณะ, 2009)

แร่ธาตุหรือโลหะบางชนิดมีความสำคัญในการเจริญของแบคทีเรียกลุ่มซัลเฟตรีดิวซ์ซิง เช่น เหล็ก(Fe) คอปเปอร์(Cu) สังกะสี(Zn) โคบอลต์(Co) โมลิบดีนัม(MO)และนิกเกิล(Ni) เป็นต้น เมื่อมีปริมาณที่พอเหมาะจะช่วยให้การเจริญ แต่เมื่อมีมากเกินไปก็อาจยับยั้งการเจริญได้

7. ความเข้มข้นของไนเตรท (NO^3) (Zhang และคณะ, 2008)

ไนเตรทเป็นสารประกอบสำคัญในการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียกลุ่มซัลเฟตรีดิวซ์ซิงซึ่งปริมาณไนเตรท 70 มิลลิโมลาร์ สามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียกลุ่มดังกล่าวได้อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่การเติมไนเตรทความเข้มข้น 0.25-0.33 มิลลิโมลาร์จะสามารถควบคุมการเจริญของแบคทีเรียซัลเฟตรีดิวซ์ซิงในระยะยาวได้

8. อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต (Rzeczycka และคณะ, 2010)

อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเป็นตัวแปรสำคัญในการชี้วัดการแพ้ชนะระหว่างแบคทีเรียสร้างมีเทนและแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต เนื่องจากซีโอดีเป็นตัวจำกัดสำหรับแบคทีเรียทั้งสองชนิด อีกทั้งซัลเฟตในระบบก็เป็นปัจจัยสำคัญต่อการเจริญของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต Rzeczyckaและคณะพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการสลายซีโอดีและซัลเฟตอยู่ที่ 0.6-1.2 และ 2.4-4.8 ตามลำดับ

9. ปัจจัยอื่นๆ

นอกจากปัจจัยที่กล่าวข้างต้น ยังมีปัจจัยอื่นๆที่มีความสำคัญต่อการเกิดซัลเฟตรีดักชันอีกหลายปัจจัย เช่น อุณหภูมิ ความเค็ม ค่าพีเอช Sludge Retention Time (SRT) และ Hydraulic Retention Time (HRT) เป็นต้น (Hao และคณะ, 2014; กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

2.3 ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ทางชีวภาพในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน

ระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจนมีความจำเป็นต้องอาศัยการทำงาน ของแบคทีเรียร่วมกันหลายชนิดที่เจริญเติบโตร่วมกัน ดังนั้นจึงต้องมีสภาวะแวดล้อมและปัจจัยต่างๆ ที่เหมาะสมในการเดินระบบเพื่อให้เกิดความสมดุลและมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสูงที่สุด ซึ่ง ปัจจัยในด้านสิ่งแวดล้อมมีดังนี้

1. อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้กิจกรรมระดับเซลล์ของแบคทีเรีย เช่น อัตราการ เกิดปฏิกิริยาทางเคมีและปฏิกิริยาทางชีวเคมีภายในเซลล์แบคทีเรียสูงขึ้นตาม สามารถแบ่งอุณหภูมิที่ แบคทีเรียทำงานออกเป็น 3 ช่วงคือ

- ช่วงไซโครฟิลิก (Psychrophilic) เป็นช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส
- ช่วงมีโซฟิลิก (Mesophilic) เป็นช่วงอุณหภูมิระหว่าง 20-45 องศาเซลเซียส
- ช่วงเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) เป็นช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า 45 องศาเซลเซียส

ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนนั้นจะมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ 2 ช่วงที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทนขึ้นภายในระบบได้ดีคือช่วงอุณหภูมิ 30-38 องศาเซลเซียส และช่วงอุณหภูมิ 48-57 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามข้อเสียของการเดินระบบในช่วงเทอร์โมฟิลิกคือแบคทีเรียกลุ่มนี้มีความ ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ไม่ดีเมื่อเทียบกับแบคทีเรียกลุ่มมีโซฟิลิกและมีความเสี่ยงต่อ การล้มเหลวของระบบสูงและการเดินระบบที่อุณหภูมิสูงยังเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานในการควบคุม อุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์

2. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมควรอยู่ใน ช่วง 5.2-6.2 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการผลิตกรดไขมันระเหยง่ายของแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรด สำหรับค่าในช่วง 6.6-7.4 เป็นค่าที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน ใน ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนนี้มักพบการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่างเป็นประจำ มีสาเหตุเกิดจากปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ ถ้ามีการป้อนปริมาณสารอินทรีย์เข้าไปใน ระบบมากเกินไปจะทำให้แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรดผลิตกรดไขมันระเหยง่ายออกมามากจนแบคทีเรีย กลุ่มผลิตก๊าซมีเทนไม่สามารถใช้ได้ทันท่วงทีจึงเกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายภายในระบบ ส่งผลทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างภายในระบบลดลง ดังนั้นระบบจะต้องมีความสามารถในการควบคุม

การเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่างที่ดี ซึ่งหากมีค่าสภาพต่างในระบบที่มากพอก็สามารถป้องกันการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่างได้

3. ค่าสภาพต่าง (Alkalinity)

ค่าสภาพต่างเป็นค่าที่บอกถึงปริมาณบัฟเฟอร์ (Buffering capacity) ของระบบว่ามีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่าง และยังเป็นตัวบ่งชี้ถึงเสถียรภาพของระบบ ในกรณีที่ระบบมีค่าสภาพต่างสูงแสดงว่าระบบมีปริมาณบัฟเฟอร์สูงพอที่จะรักษาค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบให้คงตัวได้นานพอโดยไม่เกิดการแปรปรวนของค่าความเป็นกรด-ด่างได้ง่ายเมื่อมีปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายเพิ่มขึ้นภายในระบบ ค่าสภาพต่างที่เหมาะสมภายในระบบควรมีค่าอยู่ในช่วง 1,000-3,000 มิลลิกรัมของแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร ดังนั้นในการควบคุมระบบให้ทำงานเป็นปกติจึงจำเป็นต้องรักษาค่าสภาพต่างไม่ให้มีค่าต่ำจนเกินไปเพื่อรักษาระดับค่าความเป็นกรด-ด่างในระบบ

4. กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acid)

ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายมีความสำคัญในการตรวจสอบสถานะสมดุลของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน ชนิดกรดไขมันระเหยง่ายที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจนของแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด ได้แก่ กรดอะซิติก กรดบิวทีริกและกรดโพรพิโอนิก เป็นต้น ผลผลิตเหล่านี้เป็นสารตัวกลางที่จะถูกใช้โดยแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนซึ่งกรดอะซิติกเท่านั้นที่แบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนจะสามารถนำไปใช้ได้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ กรณีที่พบว่าปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายมากขึ้นมักเป็นสัญญาณเตือนถึงความล้มเหลวของระบบ ในระบบที่มีการสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายในปริมาณมากกว่า 2,000 มิลลิกรัมของกรดอะซิติกต่อลิตร ช่วงแรกจะทำให้ค่าสภาพต่างของระบบลดลงและถ้ายังไม่มีการกำจัดปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายให้น้อยลงต่อมามีค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบก็จะต่ำลงและถ้าค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าต่ำกว่า 6.5 จะเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน หากยังไม่ได้รับการแก้ไขและปล่อยให้ค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำลงถึง 4.5-5.0 ก็จะทำให้ระบบเสียสมดุลและล้มเหลวได้ ในสภาวะปกติปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายภายในถังปฏิกรณ์ไม่ควรเกิน 2,000 มิลลิกรัมของกรดอะซิติกต่อลิตร และวิธีการควบคุมระบบที่ดีที่สุดควรมีค่าสัดส่วนระหว่างปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายต่อค่าสภาพต่างไม่ควรเกิน 0.3-0.4

- วิธีการแก้ไขให้ระบบกลับสู่สภาพสมดุลมีดังนี้

- ตรวจสอบที่มาของการป้อนสารอินทรีย์ที่มากเกินไปถ้ามากเกินไปต้องลดการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบและควรมีบ่อกักสำรอง

- กรณีฉุกเฉินถ้าต้องการควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างให้เหมาะสม อาจจะใช้วิธีการเติมสารเคมี เช่น โซเดียมไบคาร์บอเนต โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือโซเดียมคาร์บอเนต เป็นต้น ข้อควรระวังไม่ควรใช้ปูนขาวเนื่องจากอาจทำให้เกิดการอุดตันในระบบได้

5. ขนาดอนุภาค (Particle size)

ขนาดของอนุภาคนั้นมีผลต่ออัตราการย่อยสลายทางชีวภาพในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งถ้าลดขนาดของอนุภาคจาก 25 เซนติเมตร ให้เหลือ 2.5 เซนติเมตร จะทำให้ปริมาณก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น 4.4 เท่า

6. สารอาหาร (Nutrients)

ในระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนนี้จำนวนเซลล์ของแบคทีเรียที่เพิ่มขึ้นถึงแม้จะมีน้อยกว่าระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจนแต่อย่างไรก็ตามการเติมสารอาหารให้กับแบคทีเรียถือเป็นสิ่งสำคัญโดยอัตราส่วน C : N : P : S ในเซลล์ของแบคทีเรียมีค่าประมาณ 100 : 10 : 1 : 1 ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเติมสารอาหารเหล่านี้เพื่อให้คงอัตราส่วนนี้ไว้ นอกจากนี้ยังมีธาตุบางตัวที่แบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนต้องการแต่ต้องการในปริมาณที่น้อย (trace element) ได้แก่ เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล และซัลไฟด์

- เหล็ก เป็นธาตุที่ละลายน้ำได้น้อยและสามารถรวมกับซัลไฟด์ในระบบและตกตะกอนอยู่ในรูปของเหล็กซัลไฟด์ซึ่งอาจเกิดปัญหาต่อระบบได้

- โคบอลต์ เป็นธาตุที่ละลายน้ำได้ดีกว่าเหล็ก แต่อาจเกิดปัญหาเช่นเดียวกับเหล็ก

- นิกเกิล เป็นส่วนประกอบสำคัญของโคเอนไซม์ F430 ซึ่งเป็นโคเอนไซม์ที่สำคัญต่อแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน แต่นิกเกิลอาจรวมตัวกับซัลไฟด์และตกตะกอนลงมาเช่นเดียวกับเหล็กแต่บางครั้งจึงจำเป็นต้องเติมนิกเกิลลงไปในกรณีที่มีนิกเกิลไม่เพียงพอ

- ซัลไฟด์ มีบทบาทต่อระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนทั้งเชิงลบและเชิงบวก โดยซัลไฟด์มีผลเสียต่อแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนเนื่องจากสามารถตกตะกอนออกมากับเหล็กได้ อย่างไรก็ตามซัลไฟด์มีความจำเป็นต่อแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน จากการวิเคราะห์โครงสร้างเซลล์ของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนพบว่าซัลไฟด์สูงถึงร้อยละ 2.6 ของน้ำหนักแห้งเซลล์ ปริมาณความต้องการซัลไฟด์ของแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 1-25 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งปริมาณซัลไฟด์ในน้ำที่แบคทีเรียจะนำไปใช้ได้จะถูกควบคุมโดยค่าความเป็นกรด-ด่างและค่าความดันพาร์เซียลของก๊าซไฮโดรเจนในบรรยากาศภายในถังปฏิกรณ์

7. สารพิษ (Toxic substance)

สารที่มีพิษต่อแบคทีเรียในระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนโดยเฉพาะแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนมีอยู่หลายชนิด เช่น พิษจากอ็อกซิดอนบวกและโลหะหนัก ซึ่งระดับความเป็นพิษจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดและความปริมาณของสารนั้นๆ หากมีการสะสมของสารบางชนิดภายในถังปฏิกรณ์

ในปริมาณที่มากเกินไปอาจจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ และอาจจะมีผลต่อการยับยั้ง (Inhibition) การเจริญเติบโต จนทำให้แบคทีเรียในระบบตายได้ นอกจากนี้ยังส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลงอีกด้วย ชนิดและปริมาณของสารพิษดังแสดงในตารางที่ 2.6 และ 2.7

ตารางที่ 2.6 ความเข้มข้นของไอออนบวกที่มีผลกระตุ้นหรือยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์

ชนิดไอออนบวก	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
	ช่วยกระตุ้น	ยับยั้งปานกลาง	ยับยั้งสูง
Na ⁺	100-200	3500-5500	8000
K ⁺	200-400	2500-4500	12000
Ca ²⁺	100-200	2500-4500	8000
Mg ²⁺	75-150	1000-1500	3000

(McCarty, 1964)

พิษของไอออนสามารถลดลงได้เมื่อมีธาตุอื่นร่วมด้วยในปริมาณที่เหมาะสม เช่น พิษของ Na⁺ ความเข้มข้น 3,500 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถมีความเป็นพิษลดลงถ้ามี Mg²⁺ และ Ca²⁺ ที่มีความเข้มข้นระหว่าง 50-1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 2.7 ความเข้มข้นของโลหะหนักที่มีผลยับยั้งประสิทธิภาพของระบบร้อยละ 50

โลหะหนัก	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
Fe ⁺	1-10
Zn ²⁺	10 ⁻⁴
Cd ²⁺	10 ⁻⁷
Cu ⁺	10 ⁻¹²
Cu ²⁺	10 ⁻¹⁶

(Mosey และ Hughes, 1975)

2.4 ก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ (Biogas) หมายถึงก๊าซที่ได้จากจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน ภายใต้การทำงานของแบคทีเรีย 2 กลุ่มหลักคือแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria) โดยส่วนใหญ่แล้วกรดที่ผลิตขึ้นเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย โดยที่แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรดจะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่ให้กลายเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเล็กลง (Volatile fatty acid) กลุ่มที่สองคือแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน (Methane producing bacteria) แบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนจะใช้สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเล็กเป็นสารอาหารและย่อยสลายให้ผลผลิตหลักเป็นก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โดยมีก๊าซอื่นๆเกิดขึ้นเช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) หรือก๊าซไข่เน่าและก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) เป็นต้น กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพต้องระวังไม่ให้อากาศเข้าไปสัมผัสกับแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนเพราะจะทำให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนลดลง

2.4.1 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพประกอบไปด้วยก๊าซหลายชนิดองค์ประกอบหลักเป็นก๊าซมีเทน มีประมาณร้อยละ 55 ถึง 80 รองลงมาคือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณร้อยละ 15 ถึง 45 ส่วนที่เหลือเป็นก๊าซอื่นๆเช่นไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) แอมโมเนีย (NH_3) และไอน้ำ (H_2O) นอกจากก๊าซดังกล่าวยังมีสารปนเปื้อนอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.8 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจะแตกต่างกันตามองค์ประกอบของสารตั้งต้น

ตารางที่ 2.8 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

ชนิดองค์ประกอบ	หน่วย	ปริมาณ
มีเทน (CH_4)	ร้อยละ	55 – 80
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	ร้อยละ	15 – 45
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)	มก./ลบ.ม.	0 – 5000
แอมโมเนีย (NH_3)	มก./ลบ.ม.	0 – 450
ความชื้น (Humidity)	ร้อยละ	0 - 10

(สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย, 2554)

2.4.2 สมบัติก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพแต่ละชนิดจะมีลักษณะทางกายภาพ และเคมีที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่

2.9

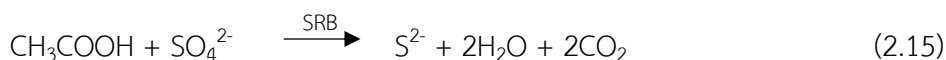
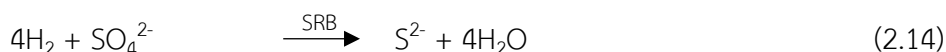
ตารางที่ 2.9 ลักษณะและสมบัติก๊าซชีวภาพ

สมบัติก๊าซชีวภาพ	CH ₄	CO ₂	H ₂ S
มวลโมลเฉลี่ย [กก./โมล]	16.04	44.01	34.08
ความหนาแน่น (@ 1.013 บาร์สมบูรณ์ , 15°ซ) [กก./ลบ.ม.]	0.68	1.87	1.45
Critical Temperature [°ซ]	-82.7	31	100
Critical Pressure [บาร์สมบูรณ์]	45.96	73.825	89.37
Compressibility Factor (Z) (@ 1.013 บาร์สมบูรณ์ , 15°ซ)	0.998	0.9942	0.9915
Sp. Gr. (เทียบกับอากาศ = 1) (@ 1.013 บาร์สมบูรณ์ , 15°ซ)	0.55	1.521	1.189
Specific volume (@ 1.013 บาร์สมบูรณ์ , 21°ซ) [ลบ.ม./กก.]	1.48	0.547	0.699
Heat capacity at constant pressure (Cp) (@ 1.013 บาร์สมบูรณ์ , 25°ซ) [กิโลจูล/(โมล.เคลวิน)]	0.035	0.037	0.034
Heat capacity at constant volume (Cv) (@ 1.013 บาร์สมบูรณ์ , 25°ซ) [กิโลจูล/(โมล.เคลวิน)]	0.027	0.028	-
Ratio , Cp/Cv (@ 1.013 บาร์สมบูรณ์ , 25°ซ)	1.3054	1.2938	-
Thermal conductivity (@ 1.013 บาร์สมบูรณ์ , 0°ซ) [มิลลิวัตต์/เมตร เคลวิน]	32.81	14.65	12.98
High Heating Value (@ 1.013 บาร์สมบูรณ์ , 15.6°ซ) [เมกกะจูล/ลบ.ม.]	37.63	-	12
Lower Heating Value (@ 1.013 บาร์สมบูรณ์ , 15°ซ) [เมกกะจูล/ลบ.ม.]	33.91	-	-
Solubility in water (@ 1.013 บาร์สมบูรณ์ , 2°ซ) vol/vol	0.054	1.7163	4.67
Auto-ignition temperature [°ซ]	595	-	270

(สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย, 2554)

2.4.3 ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide ; H₂S)

ไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นก๊าซที่พบได้ทั่วไปในธรรมชาติ มีกลิ่นเหม็นคล้ายไข่เน่า เกิดจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจนโดยปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชัน อาศัยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต (Sulfate reducing bacteria, SRB) ทำหน้าที่ในการออกซิเดชันสารอินทรีย์ ไฮโดรเจนหรือสารประกอบอะซิเตท โดยใช้ซัลเฟตเป็นสารรับอิเล็กตรอน ดังแสดงในสมการที่ 2.14 ถึง 2.16



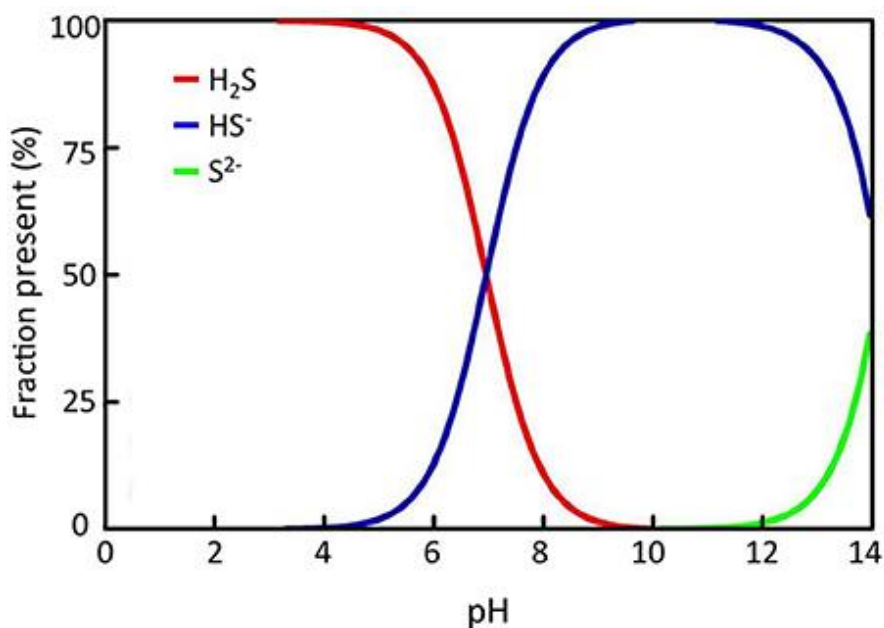
ซัลไฟด์ในน้ำและน้ำเสียสามารถจำแนกได้ 3 ประเภท คือ ซัลไฟด์ทั้งหมด (total sulfide) ได้แก่ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลาย (dissolved H₂S) อีออนซัลไฟด์ (S²⁻) และอีออนไบซัลไฟด์ (HS⁻) รวมทั้งสารประกอบโลหะซัลไฟด์ที่ปนกับตะกอนแขวนลอย ปริมาณซัลไฟด์ขึ้นอยู่กับพีเอชของน้ำ กล่าวคือ ที่พีเอช 11 และ 12 จะมีซัลไฟด์ละลาย (S²⁻) น้อยกว่า 0.05% และ 0.50% ตามลำดับ แสดงดังสมการที่ 2.17 และ 2.18 ซัลไฟด์ละลาย (dissolved sulfide) คือ อีออนซัลไฟด์ (S²⁻) และ



อีออนไบซัลไฟด์ (HS⁻) ที่เหลืออยู่ภายหลังจากการกำจัดตะกอนแขวนลอยออกจากน้ำด้วยวิธีฟลอคคูเลชันและตกตะกอน, ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์อิสระ (un-ionized hydrogen sulfide) ได้แก่ สารประกอบซัลไฟด์ที่อยู่ในรูปก๊าซซึ่งไม่แตกตัวเป็นอีออน สัดส่วนของ H₂S, S²⁻ และ HS⁻ ในน้ำขึ้นอยู่กับพีเอชและปริมาณสารละลายในน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 2.3

ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม อาจพบซัลไฟด์ในรูปแบบต่างๆในน้ำ ระดับพีเอชจะเป็นตัวกำหนดชนิดและความเข้มข้น น้ำที่มีพีเอชต่ำ จะพบไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) มากที่สุด ทำให้เกิดปัญหาเรื่องกลิ่นเหม็น ส่วนน้ำที่มีพีเอชสูงกว่าหรือเท่ากับ 8 ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป อีออนไบซัลไฟด์ (HS⁻) ซัลไฟด์ซึ่งไม่มีกลิ่นเหม็น หรือ อีออนซัลไฟด์ (S²⁻) จะมี H₂S อยู่ น้อยมาก

ดังนั้นจะไม่เกิดปัญหาเกี่ยวกับกลิ่น (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2542) ไฮโดรเจนซัลไฟด์มีลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมี ดังแสดงในตารางที่ 2.10



ภาพที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง พีเอชกับอไอออนซัลไฟด์ที่ละลายน้ำ

(Holmer และ Hasler-Sheetal, 2014)

ตารางที่ 2.10 ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

ลักษณะทางกายภาพ

ไม่มีสี

ติดไฟง่าย

กลื่นเหม็นเหมือนไข่เน่า

ลักษณะทางเคมี

น้ำหนักโมเลกุล	34.08
ความดันไอ	15,600 มม.ปรอท ที่ 25 °ซ
ความหนาแน่น	1.5392 ก./ล. ที่ 0 °ซ, 760 มม.ปรอท
จุดเดือด	-60.33 °ซ
จุดเยือกแข็ง	-82.30 °ซ
ความสามารถการละลายน้ำ	3,980 มก./ล. ที่ 20 °ซ
ค่าคงที่การแตกตัว	pKa1 = 7.04; pKa2 = 11.96
ตัวเปลี่ยนค่า	1 พีพีเอ็ม = 1.39 มก./ลบ.ม. ที่ 25 °ซ

(HSDB, 1998)

ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นก๊าซที่มีอันตรายต่อมนุษย์ แต่ไม่สามารถซึมผ่านผิวหนังได้ การเกิดพิษต้องมาจากการสูดดมเข้าโดยตรง ในระดับความเข้มข้นที่ไม่สูงมากนัก มีฤทธิ์ระคายเคืองต่อเยื่อทางเดินหายใจ และทางเดินอาหาร (ตารางที่ 2.11) เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นเริ่มทำให้ประสาทรับกลิ่นไม่ทำงาน ผู้ป่วยจะเริ่มไม่ได้กลิ่นที่ความเข้มข้นระดับมากกว่า 200 พีพีเอ็ม ไฮโดรเจนซัลไฟด์จะยับยั้งกระบวนการหายใจ โดยใช้ออกซิเจนที่ระดับเซลล์จะปรากฏได้ชัดเจนที่ระดับความเข้มข้นสูงๆ ไฮโดรเจนซัลไฟด์มีคุณสมบัติคล้ายไซยาไนด์โดยจะไปจับกับไซโตโครม (Cytochrome) ในกระบวนการถ่ายทอดอิเล็กตรอน กระบวนการหายใจโดยใช้ออกซิเจนถูกขัดขวาง เกิดภาวะ Lactic Acidosis มากขึ้น พร้อมกับการลดการทำงานของระบบประสาทพร้อมด้วย (Hoidal และคณะ, 1986)

ตารางที่ 2.11 ระดับความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์กับผลที่เกิดกับร่างกาย

ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	ผลกระทบที่เกิดขึ้น
0.2	เริ่มได้กลิ่น
10	ได้กลิ่นที่รุนแรงมากขึ้น เกิดการระคายเคือง
50	อาการระคายตา และเยื่อทางเดินหายใจ
150	ประสาทรับกลิ่นไม่ทำงาน
200	ไม่ได้กลิ่น ตาแดง เจ็บในคอ
250	เกิดภาวะน้ำท่วมปอด ถ้าสูดดมนาน
500	0.5- 1 ชั่วโมง เกิดอาการปวดศีรษะ คลื่นไส้ หมดสติ และหยุดหายใจ
500-1000	เกิดอาการจากการขาดออกซิเจนในทุกๆระบบ และหยุดหายใจ

(Hoidal และคณะ, 1986)

นอกจากปัญหาด้านกลิ่นเหม็นและอันตรายต่อมนุษย์แล้ว ไฮโดรเจนซัลไฟด์ยังคงเป็นปัญหาสำคัญในระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสีย กล่าวคือ เมื่อมีการบำบัดน้ำเสียที่มีซัลเฟตสูงทำให้เกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ การนำก๊าซชีวภาพไปใช้จะทำให้เกิดการสึกกร่อนของอุปกรณ์โลหะต่างๆ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องทำความสะอาดก๊าซชีวภาพก่อนนำไปใช้ประโยชน์

2.5 กระบวนการควบคุมและกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสีย

ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นก๊าซมลพิษที่เกิดจากกระบวนการในระบบสภาวะไม่ใช้ออกซิเจนที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งการกำจัดหรือควบคุมก๊าซมลพิษนี้สามารถทำได้หลายกระบวนการ เช่น การกำจัดซัลเฟตในน้ำเสียก่อนนำเข้าสู่ระบบและกระบวนการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เจอบนในก๊าซชีวภาพ ซึ่งในแต่ละกระบวนการจะมีข้อจำกัดและรายละเอียดแตกต่างกันดังนี้

2.5.1 การกำจัดซัลเฟตในน้ำเสีย

การกำจัดซัลเฟตในน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพเป็นวิธีหนึ่งในการลดปริมาณซัลเฟตเพื่อช่วยให้การเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบเกิดขึ้นน้อยลง มีหลายวิธี ดังนี้

2.5.1.1 วิธีเมมเบรน

เป็นระบบบำบัดน้ำซึ่งกำจัดแร่ธาตุต่างๆที่ละลายอยู่ในน้ำและที่เกิดจากกระบวนการทางเคมี เช่น ซัลเฟต ออกจากน้ำ โดยอาศัยเยื่อเมมเบรนในการแยกแร่ธาตุต่างๆและสารละลายซัลเฟต ออกจากน้ำ ในการทำงานของกระบวนการนี้ ความดันน้ำด้านที่มีสารปนเปื้อนจะเพิ่มขึ้น เพื่อผลักดันให้น้ำสามารถเคลื่อนผ่านเยื่อเมมเบรน (ซึ่งรู้จักกันในชื่อของ “semi permeable membrane” โดยทั่วไปสามารถกำจัดซัลเฟตในน้ำดื่มได้อยู่ที่ร้อยละ 93-99 ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของเมมเบรนและสถานะของการเดินระบบ) ไปได้ สารปนเปื้อนทั้งหลายจะถูกกักบริเวณไว้ ทำให้ไม่สามารถซึมผ่านไปพร้อมกับน้ำ ทำให้อีกด้านหนึ่งที่น้ำซึมผ่านไปได้กลายเป็นที่เก็บน้ำบริสุทธิ์ปราศจากสารปนเปื้อนใดๆ แต่อีกด้านหนึ่งจะมีความเข้มข้นของซัลเฟตสูง

Reverse Osmosis (RO) ถูกนำมาใช้ในการบำบัดน้ำอย่างแพร่หลาย เนื่องจากน้ำเป็นตัวทำละลายที่ดีและมีโมเลกุลขนาดเล็กมาก จึงสามารถแพร่กระจายผ่านเมมเบรนได้ง่าย แต่ข้อจำกัดของการบำบัดน้ำแบบ RO จะให้ผลผลิตน้ำมีอัตราการไหลต่ำ ดังนั้นจึงต้องการพื้นที่ผิวของเมมเบรนสูงเพื่อให้ได้น้ำปริมาณมากภายในเวลาที่เหมาะสม นอกจากนั้นการบำบัดน้ำแบบ RO ยังเกิดปัญหาจากการอุดตันและการเสียหายของเมมเบรนได้ง่าย หากน้ำที่นำมาบำบัดมีการปนเปื้อนสูง ดังนั้นน้ำที่นำมาบำบัดจะต้องนำไปผ่านการกรองเพื่อขจัดสารแขวนลอยที่มีโมเลกุลใหญ่ และขจัดสารประกอบคลอไรด์ที่เป็นสาเหตุของการเกิดความเสียหายของเมมเบรน

2.5.1.2 วิธีตกตะกอนทางเคมี (chemical precipitation)

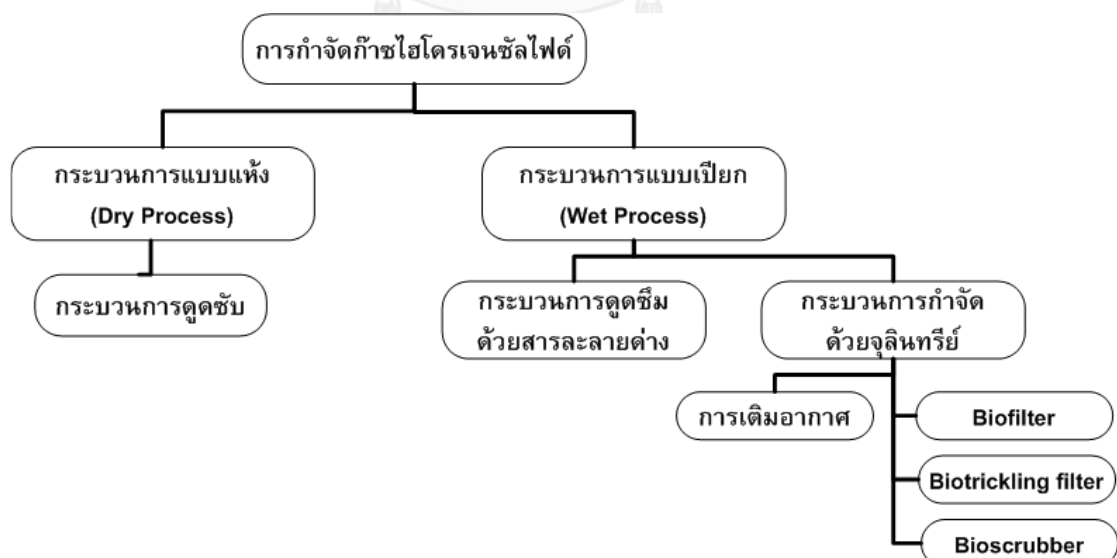
เป็นกระบวนการทางฟิสิกส์-เคมี ที่เปลี่ยนสารที่อยู่ในรูปของสารละลายให้อยู่ในรูปของตะกอน โดยมีการเติมสารลงไปให้น้ำเพื่อให้เกิดปฏิกิริยากับสารที่ละลายน้ำ เกิดเป็นสารประกอบใหม่ซึ่งเป็นการตกตะกอนที่ใหญ่และหนัก สามารถจมตัวและแยกออกจากสารละลายนั้นได้

การตกตะกอนด้วยอนุมูลซัลเฟต เป็นการตกตะกอนอนุภาคบวกหรือโลหะหนักออกจากน้ำเสียในรูปของโลหะซัลเฟต เช่น การตกตะกอนแบเรียมออกจากน้ำเสียในรูปของแบเรียมซัลเฟตหรือเกลือซัลเฟต โดยการเติมสารเคมี ที่มีสารประกอบของแบเรียม เพื่อเข้าทำปฏิกิริยากับซัลเฟต ที่ละลายอยู่ในน้ำ ให้เกิดเป็นตะกอน $BaSO_4$ แสดงดังสมการที่ 2.17 (Sawyer และ Lindquist, 2003) แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือ ได้ตะกอนเคมีเกิดเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีค่อนข้างสูง (Haaning Nielsen และคณะ, 2005)



2.5.2 การกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เจือปนในก๊าซชีวภาพ

กระบวนการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ทางชีวภาพมีหลายกระบวนการ โดยจำแนกเทคโนโลยีได้ดังภาพ 2.4



ภาพที่ 2.4 จำแนกเทคโนโลยีการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

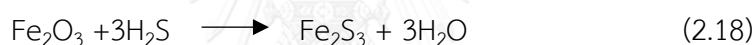
(สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย, 2554)

2.5.2.1 กระบวนการแบบแห้ง (Dry process)

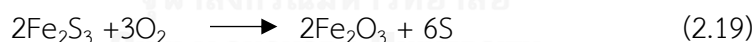
เป็นกระบวนการที่อาศัยหลักการดูดซับ (Adsorption) โดยสารดูดซับ (Adsorbent) ซึ่งก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะถูกจับในรูพรุนของสารดูดซับหรือหลังจากถูกจับแล้วอาจจะเกิดปฏิกิริยาเคมีก็ได้ มีดังนี้

- กระบวนการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S Adsorption)

เทคโนโลยีที่ใช้ในการจับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยสารดูดซับในรูปของแข็งนั้น จะประกอบไปด้วยถังปฏิกรณ์มีลักษณะเป็นคอลัมน์ ภายในบรรจุไว้ด้วยสารดูดซับ (Packed Bed) การไหลของก๊าซอาจจะมีทั้งไหลขึ้น (Upflow) หรือไหลลง (Downflow) ก็ได้ เมื่อก๊าซชีวภาพที่มีก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ไหลผ่านสารดูดซับก็จะมีก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดขึ้น สารดูดซับที่ใช้กัน ได้แก่ Iron oxide (Fe₂O₃) และ Hydrate Lime เมื่อมีการจับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จนอิ่มตัวแล้ว จะต้องมีการเปลี่ยนสารดูดซับใหม่ แล้วนำสารดูดซับที่อิ่มตัวแล้วไปฟื้นฟูสภาพ (Regenerate) ด้วยอากาศ และนำกลับมาใช้ใหม่ได้ การจับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ 2.18



เมื่อมีการฟื้นฟูสภาพด้วยอากาศ เกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ 2.19



ปฏิกิริยาทั้งสองที่เกิดขึ้นข้างต้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน โดยในช่วงการจับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ จะมีการคายความร้อน 0.65 กิโลจูล/กรัมของไฮโดรเจนซัลไฟด์ ดังนั้นในช่วงของการจับไฮโดรเจนซัลไฟด์ ถังปฏิกรณ์จะมีอุณหภูมิสูงขึ้น และในช่วงการฟื้นฟูสภาพด้วยอากาศก็จะมีมีการคายความร้อน 5.8 กิโลจูลต่อกรัมของไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ในช่วงการฟื้นฟูสภาพ สารดูดซับจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นมากและมีความเสี่ยงต่อการเกิดอัคคีภัย

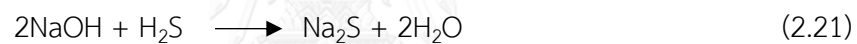
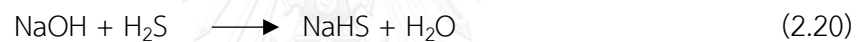
2.5.2.2 กระบวนการแบบเปียก (Wet Process)

เป็นกระบวนการดูดซึม (Absorption) อาศัยหลักการของการละลาย ซึ่งก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะละลายลงในสารละลายที่ทำหน้าที่เป็นสารดูดซึม (Absorbent) ที่ไหลผ่านกัน และเมื่อก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายลงในสารดูดซึมแล้ว อาจจะเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนรูปของก๊าซ

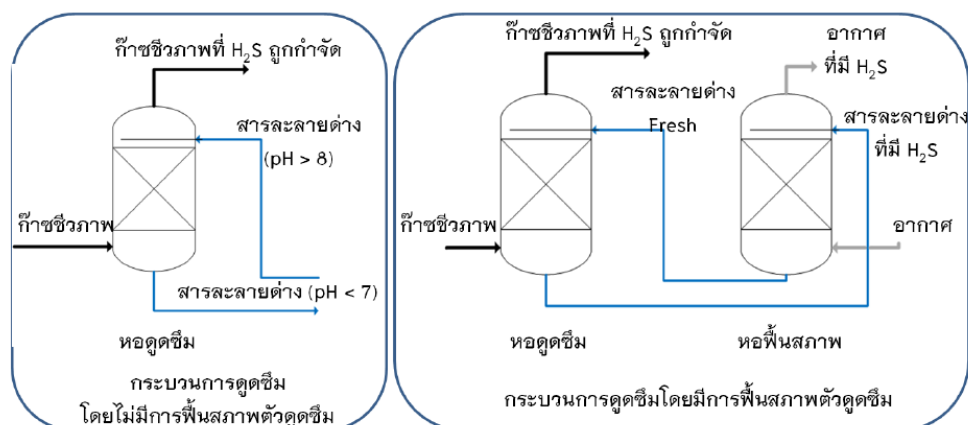
ไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นซัลเฟอร์ หรือไม่เกิดปฏิกิริยาก็ได้ ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีทั้งที่เป็นปฏิกิริยาเคมี (Chemical reaction) หรือเกิดปฏิกิริยาทางชีววิทยา (Biological reaction) จากจุลินทรีย์ที่มีในระบบ

- กระบวนการดูดซึมก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยสารละลายต่าง

เทคโนโลยีที่ใช้ในการจับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยสารละลายต่าง อาศัยหลักการเรื่องความสามารถในการละลายของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ละลายในสารละลายที่มีค่าพีเอช สูง ($8 \leq \text{pH} \leq 10$) เทคโนโลยีนี้ประกอบด้วย หอดูดซึม (Absorption column) ซึ่งมีลักษณะเป็นคอลัมน์ที่มีชั้นของตัวกลาง (Pack column) ภายใน การไหลของก๊าซส่วนใหญ่จะเป็นการไหลขึ้น (Upflow) หรืออาจจะเป็นในลักษณะที่ก๊าซถูกฉีดพ่นทางด้านล่างผ่านชั้นของสารละลาย (Bubble column) โดยเมื่อก๊าซชีวภาพที่มีไฮโดรเจนซัลไฟด์ไหลสวนทางกับสารละลายจะเกิดการถ่ายเทมวลสาร (mass transfer) โดยสารละลายที่ใช้ ได้แก่ น้ำที่มีค่าพีเอชสูง น้ำปูนใสหรือสารละลายโซดาไฟ เป็นต้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการที่ 2.20 และ 2.21



สารละลายที่ไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายลงไปแล้วทำให้พีเอช ของสารละลายลดลงและความสามารถในการละลายของไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่ำลงด้วย จึงต้องมีการเปลี่ยนสารละลายใหม่อยู่เสมอ โดยส่วนใหญ่ จะใช้การควบคุมพีเอชของสารละลายเข้าให้มีค่าสูงกว่า 8 ในการใช้สารละลายนี้ (ภาพที่ 2.5)

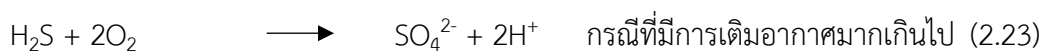


ภาพที่ 2.5 แผนผังการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ใช้สารละลายต่างทั้งแบบมีการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซึมและ ไม่มีการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซึม

(Qiyong และคณะ, 2011; สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย, 2554)

2.5.2.3 กระบวนการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยจุลินทรีย์

เทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์อาศัยกลุ่มของแบคทีเรียออกซิไดซ์ซัลไฟด์ (Sulfide Oxidizing Bacteria) ซึ่งใช้ออกซิเจนในการเปลี่ยนไฮโดรเจนซัลไฟด์อยู่ในรูปของซัลไฟด์(S^0) แต่ถ้าในกรณีที่มีการให้ออกซิเจนมากเกินไปไฮโดรเจนซัลไฟด์จะถูกออกซิไดซ์เป็นซัลเฟต ดังสมการที่ 2.22 และ 2.23



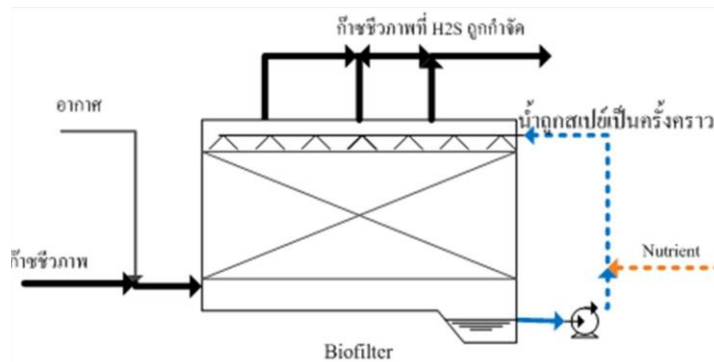
เทคโนโลยีในการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยอาศัยการทำงานของแบคทีเรีย ยังแบ่งเป็นเทคโนโลยีย่อยได้อีกหลายแบบ ได้แก่ เทคโนโลยีการเติมอากาศ ไบโอฟิลเตอร์ (Biofilter) ไบโอทริกคลิงฟิลเตอร์ (Biotrickling filter) และ ไบโอสครับเบอร์ (Bioscrubber) โดยมีรายละเอียดดังนี้

- เทคโนโลยีการเติมอากาศ

เทคโนโลยีกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยการเติมอากาศที่ผิวหน้าของน้ำในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อเปลี่ยนก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้อยู่ในรูปของซัลเฟอร์และย่อยสลายด้วยแบคทีเรีย โดยต้องมีการควบคุมปริมาณอากาศที่ป้อนเข้าโดยวัดจากความเข้มข้นของออกซิเจนในก๊าซชีวภาพไม่ให้เกินร้อยละ 3 โดยปริมาตร (v/v) ทั้งนี้ในถังปฏิกรณ์ต้องมีกลุ่มแบคทีเรียออกซิไดซ์ซัลไฟด์อยู่ด้วย ไม่เช่นนั้นก็จะไม่สามารถกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ได้

- Biofilter Technology

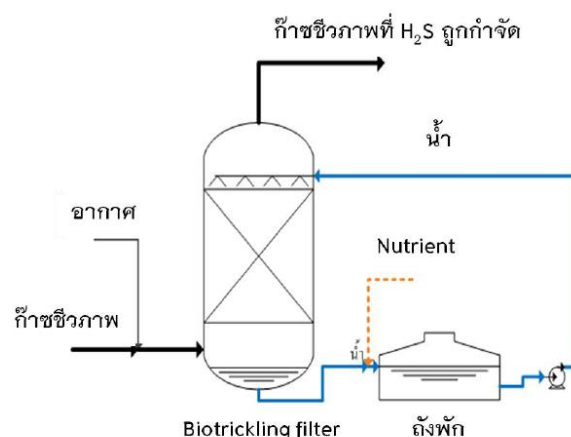
เป็นเทคโนโลยีที่ใช้การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยการเติมอากาศเข้าท่อก๊าซชีวภาพ แล้วย่อยสลายด้วยแบคทีเรียที่ใช้อากาศบนตัวกลางเปียกชื้น ตัวกลางที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นวัสดุจากธรรมชาติที่มีรูพรุนสูง ได้แก่ เปลือกไม้ หินภูเขาไฟ หรือตัวกลางที่ทำจากพลาสติก การไหลของก๊าซจะมีทิศทางการไหลขึ้น (Upflow) และการไหลลง (Down flow) โดยที่บนตัวกลางในถังปฏิกรณ์จะมีแบคทีเรียออกซิไดซ์ซัลไฟด์เกาะติดและเจริญเติบโตอยู่ที่ผิวในรูพรุนของตัวกลาง เมื่อก๊าซไหลผ่านตัวกลาง ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะละลายในน้ำแล้วแบคทีเรียก็จะเปลี่ยนไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้เป็นซัลเฟอร์ เทคโนโลยี Biofilter จะใช้การเติมอากาศในปริมาณไม่มากในท่อก๊าซชีวภาพก่อนเข้าถังปฏิกรณ์ โดยใช้ในการควบคุมปริมาณอากาศที่ป้อนเข้า จากความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนในก๊าซชีวภาพ ลักษณะของถังกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบ Biofilter แสดงดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 ลักษณะของถังกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบ Biofilter
(สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย, 2554)

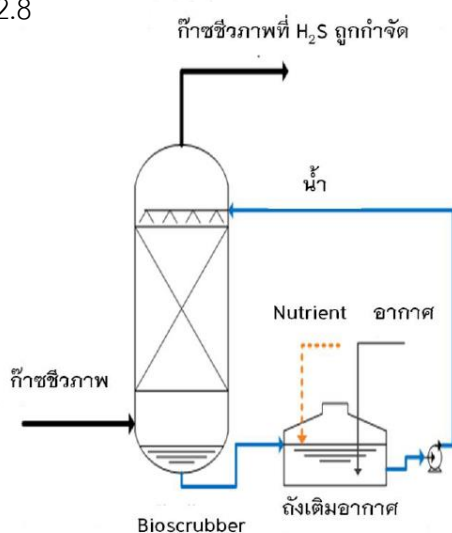
- Biotrickling Filter Technology

เป็นเทคโนโลยีที่ใช้การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยการเติมอากาศเข้าที่ก๊าซชีวภาพ แล้วผ่านหอดูดซึมด้วยน้ำที่เป็นต่างบนตัวกลางพลาสติกและย่อยสลายด้วยแบคทีเรีย โดยอาศัยหลักการความสามารถในการละลายน้ำของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ค่า pH สูง เทคโนโลยีนี้ประกอบด้วย หอดูดซึม (Absorption column) ซึ่งมีลักษณะเป็นคอลัมน์ที่มีชั้นของตัวกลาง ได้แก่ Plastic packing การไหลของก๊าซจะเป็นการไหลขึ้น (Upflow) และการไหลแบบ Cross flow โดยที่บนตัวกลางในคอลัมน์จะมีแบคทีเรียออกซิไดซ์ซัลไฟด์เกาะติดและเจริญเติบโตอยู่ที่ผิวของตัวกลาง มีการเติมอากาศในปริมาณไม่มากในท่อก๊าซชีวภาพก่อนเข้าถึงปฏิกรณ์กำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยควบคุมปริมาณอากาศที่ป้อนเข้าจากความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนในก๊าซชีวภาพ เมื่อก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายลงในน้ำก็จะถูกแบคทีเรียเปลี่ยนให้เป็นซัลเฟอไรต์ติดอยู่บนตัวกลาง จะมีการหมุนวนน้ำตลอดเวลาเพื่อให้มีการจับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้เต็มที่ ลักษณะของถังกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบ Biotrickling filter แสดงดังภาพ 2.7



ภาพที่ 2.7 ลักษณะของถังกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบ Biotrickling filter
(Qiyong และคณะ, 2011; สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย, 2554)

- Bioscrubber Technology เป็นเทคโนโลยีที่ใช้การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้น้ำที่เป็นด่างไหลผ่านหอดูดซึมที่มีตัวกลางพลาสติกเพื่อดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพและไหลเข้าบ่อเติมอากาศเพื่อย่อยสลายด้วยแบคทีเรีย อาศัยหลักการเรื่องความสามารถในการละลายของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ค่า pH สูงเทคโนโลยีนี้ ประกอบไปด้วย หอดูดซึม (Absorption column) ซึ่งมีลักษณะเป็นคอลัมน์ที่มีชั้นของตัวกลาง ได้แก่ plastic packing การไหลของก๊าซจะเป็นการไหลขึ้น (Upflow) โดยที่หอดูดซึมที่มีตัวกลางอยู่ด้านบนจะทำหน้าที่หลักในการจับไฮโดรเจนซัลไฟด์ และมีบ่อเติมอากาศที่เลี้ยงแบคทีเรียออกซิโดซัลไฟด์อยู่ในบ่อเติมอากาศนี้ แบคทีเรียจะทำการเปลี่ยนไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้เป็นซัลเฟต จะควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (DO) ให้มีค่าระหว่าง 0-1 มก./ลิตร ตลอดเวลา ลักษณะของถังกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบ Bioscrubber แสดงดังภาพ 2.8



ภาพที่ 2.8 ลักษณะของถังกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ Bioscrubber
(สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย, 2554)

2.6 โซเดียมโมลิบเดต (Sodium molybdate; Na_2MoO_4)

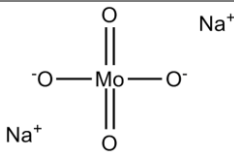
โซเดียมโมลิบเดตเป็นสารประกอบของธาตุโมลิบดีนัม (Molybdenum; Mo) สังเคราะห์ขึ้นครั้งแรกโดยปฏิกิริยาการเติมน้ำในโมเลกุล (Hydration) (Spitsyn และ Kuleshov, 1951) ต่อมา มีการพัฒนาวิธีการทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น โดยการละลายโมลิบดีนัมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกิดเป็นโซเดียมโมลิบเดต (Braithwaite และ Haber, 2013) ดังแสดงในสมการที่ 2.24



2.6.1 ลักษณะและสมบัติของโซเดียมโมลิบเดท

โซเดียมโมลิบเดทมีลักษณะและสมบัติดังนี้ (ตารางที่ 2.12)

ตารางที่ 2.12 ลักษณะและสมบัติของโซเดียมโมลิบเดท

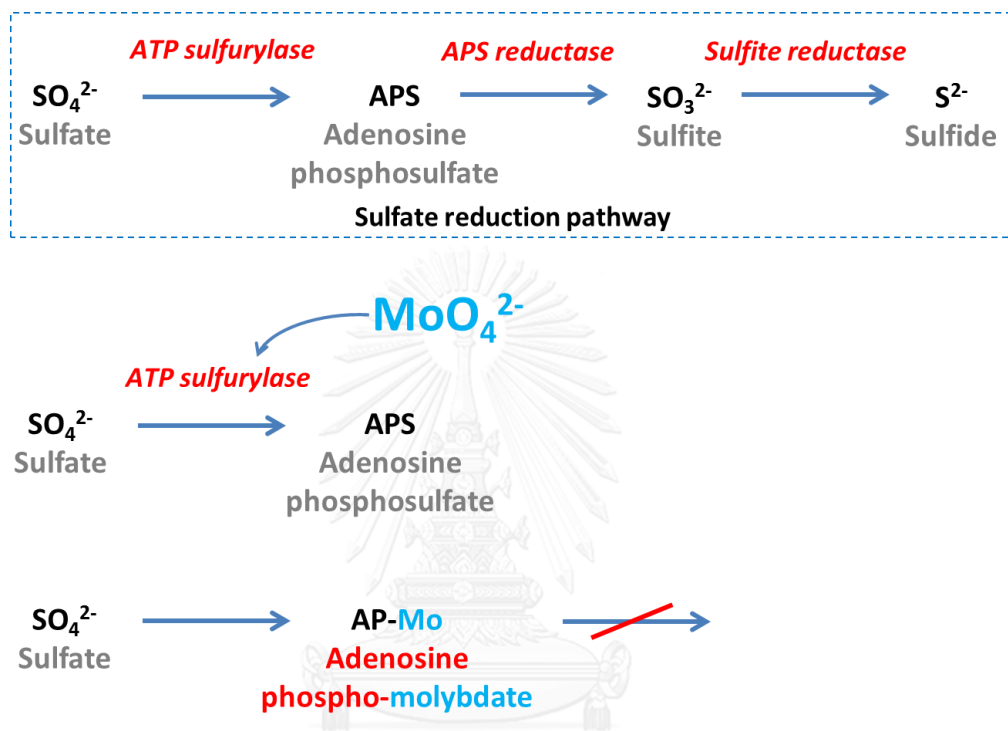
ลักษณะและสมบัติ	
ลักษณะโครงสร้างโมเลกุล	
การติดไฟ	ไม่ติดไฟ
มวลโมเลกุล (molar mass)	205.92 กรัม/โมล (anhydrous) 241.95 กรัม/โมล (dihydrate)
ความหนาแน่น (Density)	3.78 กรัม/ลบ.ซม., solid
จุดหลอมเหลว (Melting point)	687 °ซ (1,269 องศาฟาเรนไฮต์ ; 960 เคลวิน)
การละลายน้ำ (Solubility in water)	84 กรัม/100 มล. (100 °ซ)
ความเป็นอันตรายต่อร่างกาย	ระคายเคืองผิวหนังหรือดวงตาทหากสัมผัส

(Wold และคณะ, 1964)

2.6.2 กลไกการยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยโซเดียมโมลิบเดท

โซเดียมโมลิบเดทสามารถนำมาใช้ในการยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในทางชีวภาพได้ เนื่องจากเป็นสารยับยั้งกระบวนการซัลเฟตรีดักชัน ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเกิดจากแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต เปลี่ยนซัลเฟตเป็นอะดีโนซีนฟอสโฟซัลเฟต (Adenosine phosphosulfate ; APS) หรือเอพิเอส ด้วยเอนไซม์เอทีพีซัลฟูริเลส (ATP Sulfurylase) และเปลี่ยนเอพิเอสเป็นซัลไฟด์ (SO_3^{2-}) ด้วยเอนไซม์เอพิเอสรีดักเทส (APS reductase) และเปลี่ยนซัลไฟด์เป็นซัลไฟด์ (S^{2-}) ด้วยเอนไซม์ซัลไฟด์รีดักเทส (Sulfite reductase) (Postgate, 1984) กลไกการยับยั้งปฏิกิริยานี้จะเกิดโดยไอออนของโมลิบเดท (MoO_4^{2-}) เข้าจับกับเอนไซม์เอทีพีซัลฟูริเลส เกิดเป็นสารประกอบอะดีโนซีนฟอสโฟ-โมลิบเดท (Adenosime phosphor-molybdate) ทำให้กระบวนการซัลเฟตรีดักชันดำเนินต่อไปไม่ได้ ซัลไฟด์หรือไฮโดรเจนซัลไฟด์จึงไม่เกิดขึ้น (Qiyong และคณะ, 2011) ดังแสดงในภาพที่ 2.9 นอกจากนี้ จากการศึกษาของ Sugahara และ Schwartz (1979) ทดลองการยับยั้งเอนไซม์เอทีพีซัลฟูริเลส ด้วยโซเดียมโมลิบเดท พบว่า สารประกอบอะดีโนซีนฟอสโฟ-โมลิบเดทที่เกิดขึ้น เป็นสารที่ไม่เสถียรและสามารถสลายตัวตามธรรมชาติได้จึงไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมจุลินทรีย์อื่นๆ

Diamantino และคณะ (2000) ศึกษาความเป็นพิษของโซเดียมโมลิบเดตต่อสัตว์น้ำ โดยใช้โรน้าเป็นตัวอย่างในการทดลองและเปรียบเทียบเป็นค่า LC_{50} พบว่า โซเดียมโมลิบเดทมีค่า LC_{50} ที่ 48 ชั่วโมง เท่ากับ 2,847.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งแสดงว่า ความเข้มข้นที่จะทำให้โรน้าตายร้อยละ 50 ที่ 48 ชั่วโมง คือ 2,847.5 มิลลิกรัมต่อลิตร



ภาพที่ 2.9 กลไกการยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยโมลิบเดท
(Qiyong และคณะ, 2011; Sugahara และ Schwartz, 1979)

2.7 ระบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket : UASB)

ระบบยูเอเอสบีเป็นระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนชนิดหนึ่ง ถูกพัฒนาขึ้นโดย standers (1996) พบว่า การเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์จำนวนมากและติดตั้งถังตกตะกอนไว้ด้านบนจะช่วยลดเวลาในการบำบัดและสามารถรับปริมาณน้ำเสียได้มากขึ้น ต่อมามีการพัฒนาการเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์โดย Lettinga และคณะ ได้พัฒนาระบบยูเอเอสบีโดยการเลี้ยงจุลินทรีย์ให้เกิดการรวมตัวเป็นเม็ดตะกอนรวมทั้งพัฒนาอุปกรณ์ในการแยกน้ำเสีย ตะกอนและก๊าซชีวภาพออกเป็นส่วน เรียกว่า อุปกรณ์แยกสามสถานะ (Gas-Solid Separator; GSS) (Lettinga และคณะ, 1980)

2.7.1 ลักษณะการทำงานของระบบยูเอเอสบี

หลักการในการเดินระบบจะทำการเลี้ยงตะกอนแบคทีเรียให้สะสมอยู่ในถังปฏิกริยา และมีปริมาณตะกอนที่หลุดออกจากระบบน้อย โดยไม่ใช้ตัวกลางเพื่อให้ตะกอนเกาะติด ทั้งนี้ตะกอนแบคทีเรียที่อยู่ภายในระบบจะรวมตัวกันในรูปของเม็ดตะกอน (Granule) ที่มีน้ำหนักมากตกตะกอนได้ดี เกิดเป็นลักษณะชั้นตะกอนในบริเวณด้านล่างของถัง ขนาดของเม็ดตะกอนจะขึ้นอยู่กับลักษณะของน้ำเสีย กลไกการทำงานและลักษณะของตะกอนในระบบ เนื่องจากมีตะกอนบางส่วนที่มีขนาดเล็กและตกตะกอนไม่ได้ปะปนอยู่ การที่จะรักษาตะกอนส่วนนี้ไว้ต้องติดตั้งอุปกรณ์แยกสามสถานะไว้ตอนบนของถังหมัก เพื่อป้องกันไม่ให้ตะกอนหลุดออกจากถัง และเป็นการเพิ่มเวลาเก็บกักตะกอนในถังปฏิกริยาให้นานขึ้น

จากคุณสมบัติและลักษณะการทำงานของระบบยูเอเอสบี ทำให้สามารถแบ่งส่วนประกอบภายในถังยูเอเอสบีได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เกิดปฏิกริยาการย่อยสลายพร้อมด้วยระบบกระจายน้ำเสียในบริเวณด้านล่างของถัง และส่วนตกตะกอนและแยกก๊าซบริเวณด้านบน โดยมีกลไกและลักษณะการทำงานของส่วนต่างๆมีรายละเอียดดังนี้ (ภาพที่ 2.10)

ส่วนที่ 1 เป็นส่วนที่เกิดปฏิกริยาด้านล่างของถัง เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ การไหลของน้ำเสีย เป็นการไหลจากด้านล่างขึ้นด้านบน การกระจายน้ำเข้าถังจะเป็นไปอย่างสม่ำเสมอทั้งหน้าตัดของถัง แบคทีเรียในถังยูเอเอสบีจะควบคุมให้มีความหนาแน่นและสะสมเป็นชั้นตะกอนในบริเวณด้านล่างของถัง เมื่อเริ่มเดินระบบแบคทีเรียในชั้นตะกอนที่อยู่กันอย่างหนาแน่นจะเกิดการรวมกันเป็นเม็ด (Granule) โดยเม็ดตะกอนที่มีความหนาแน่นสูงจะจมตัวอยู่ด้านล่าง มีการจัดเรียงตัวจากขนาดใหญ่ขึ้นไปหาเล็กสะสมเป็นชั้นตะกอน ส่วนกลุ่มที่มีความหนาแน่นและมีความเร็วในการจมตัวต่ำจะพุ่งกระจายขึ้นมาเป็นชั้นตะกอนแขวนลอย

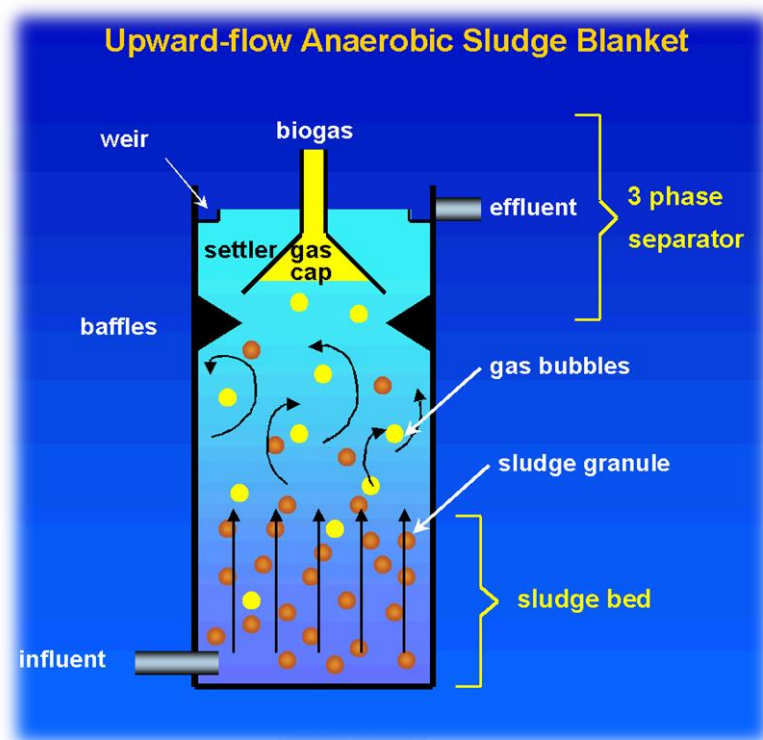
ส่วนที่ 2 ส่วนตกตะกอนและแยกก๊าซ เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมแบคทีเรียที่หลุดออกไปกับน้ำทิ้งและรวบรวมก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น ควบคุมโดยการติดตั้งอุปกรณ์แยกสามสถานะที่ส่วนดังกล่าว

การออกแบบขึ้นอยู่กับลักษณะและรูปร่างของถังปฏิกริยา ใช้หลักการออกแบบ คือ

- การแยกน้ำกับก๊าซ อาศัยหลักการที่ว่ากระแสสามารถไหลเลี้ยวไปมาได้ ในขณะที่ก๊าซมีการลอยตัวจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนเป็นเส้นตรงเท่านั้น ยกเว้นมีสิ่งกีดขวางหรือแผ่นปะทะใดๆมาเปลี่ยนทิศทางการลอยตัวขึ้น เมื่อผ่านพ้นสิ่งกีดขวางจึงลอยตัวเป็นเส้นตรงดังเดิม การออกแบบและติดตั้งแผ่นปะทะเพื่อขวางทิศทางการไหล ทำให้น้ำและก๊าซมาปะทะ แล้วเบี่ยงเบนการไหลของน้ำและก๊าซออกจากกัน

- การแยกตะกอนออกจากน้ำ โดยทำให้เกิดการตกตะกอนของจุลินทรีย์ที่ไหลขึ้นมาที่น้ำ การตกตะกอนจะเกิดในส่วนบนสุดของถัง ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่มีก๊าซ มีความปั่นป่วนของกระแสต่ำ ทำ

ให้สามารถแยกน้ำและตะกอนได้ง่าย ดังนั้น อุปกรณ์แยกสามสถานะจึงต้องมีพื้นที่ส่วนที่เป็นน้ำนิ่ง เพียงพอที่ตะกอนจะตกกลับมายังถังปฏิกิริยาได้



ภาพที่ 2.10 ลักษณะของระบบยูเอเอสบี

(Menurut, 2004)

ลักษณะกลไกการทำงานของอุปกรณ์แยกสามสถานะ การไหลของเมืงตะกอนน้ำเสียและก๊าซชีวภาพ สามารถอธิบายได้ดังนี้

ตะกอนแบคทีเรียและอนุภาคของน้ำจะไหลขึ้นมาพร้อมกัน เมื่อกระทบกับแผ่นอุปกรณ์แยกสามสถานะ ทำให้เกิดการแยกออกจากกัน อนุภาคน้ำจะไหลไปตามแผ่นอุปกรณ์แยกสามสถานะออกไปยังทางน้ำออกด้านบน ตะกอนแบคทีเรียขนาดใหญ่ที่ไม่มีก๊าซสะสมอยู่จะตกกลับลงมาโดยก๊าซชีวภาพจะไหลขึ้นไปสะสมยังส่วนรวบรวมก๊าซด้านบน ในกรณีที่กลุ่มของตะกอนแบคทีเรีย ก๊าซชีวภาพ และอนุภาคของน้ำ ไม่ไปชนกับแผ่นอุปกรณ์แยกสามสถานะ จะเกิดการแยกตัวเมื่อถึงผิวน้ำสำหรับตะกอนที่มีขนาดเบาที่สามารถไหลตามกระแส น้ำออกมาได้ จะเกิดการตกตะกอนในส่วนบนของแผ่นอุปกรณ์แยกสามสถานะ เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีความเร็วการไหลของน้ำต่ำและน้ำค่อนข้างนิ่ง

2.7.2 ข้อดีและข้อจำกัดของระบบยูเอเอสบี

ข้อดี

- มีความต้องการพลังงานต่ำ เนื่องจากไม่มีการเติมอากาศ
- ไม่ต้องใช้สารตัวกลางสำหรับให้แบคทีเรียเกาะ ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างลง
- เกิดตะกอนแบคทีเรียส่วนเกินน้อย เนื่องจากระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนมีการเจริญเติบโตต่ำกว่า ระบบบำบัดแบบใช้อากาศ เช่นระบบตะกอนเร่ง เป็นต้น
- สามารถรับภาระสารอินทรีย์ได้สูง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำเสีย ซึ่งปกติจะอยู่ในช่วง 2-10 กก.ซีโอดี/ม³.-วัน
- ผลผลิตที่ได้คือก๊าซชีวภาพซึ่งมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบหลัก สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ โดยสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงหรือใช้ทดแทนน้ำมันและก๊าซเชื้อเพลิงได้
- น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมีของแข็งแขวนลอยต่ำ
- ใช้สารเคมีในการปรับพีเอชน้อยขึ้นอยู่กับความเป็นด่างและพีเอชของน้ำเข้า
- ไม่มีปัญหาเรื่องการอุดตันของถังปฏิกรณ์ เนื่องจากแบคทีเรียจะรวมกันเป็นเม็ดและเคลื่อนที่ได้ง่ายในถังปฏิกรณ์
- สามารถหยุดระบบได้ทันทีที่ต้องการและพร้อมจะทำงานต่อได้อย่างมีประสิทธิภาพดังเดิมในเวลาประมาณ 2 สัปดาห์

ข้อจำกัด

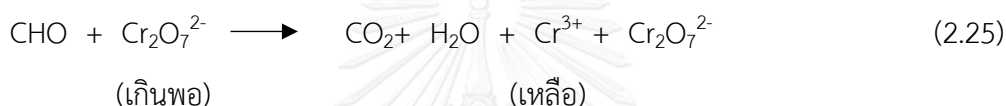
- ต้องการอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่เหมาะสมเพื่อช่วยในการกวนผสม
- ต้องเลี้ยงแบคทีเรียให้จับตัวเป็นเม็ด มิฉะนั้นประสิทธิภาพของระบบจะต่ำ หรือสามารถรับอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์น้อย
- ต้องพยายามรักษาตะกอนของแบคทีเรียในระบบให้มีปริมาณเหมาะสม และมีการหลุดออกจากระบบต่ำ
- ต้องใช้เวลาในการเริ่มต้นเดินระบบ (Start-Up) ค่อนข้างนาน โดยทั่วไปจะอยู่ที่ประมาณ 3-6 เดือน ในกรณีที่ไม่มีตะกอนเม็ดเป็นตะกอนหัวเชื้อ (Seed)
- แบคทีเรียโดยเฉพาะพวกผลิตมีเทน มีความสามารถเจริญเติบโตได้ดี ในช่วงสภาพเหมาะสมที่แคบ เช่น พีเอช 6.8 – 7.2 จึงจำเป็นที่จะต้องมียุทธศาสตร์ควบคุมพีเอชที่เหมาะสมเพื่อให้มีประสิทธิภาพ
- น้ำเสียที่เข้าระบบควรมีของแข็งแขวนลอยและไขมันต่ำกว่า 500 มก./ล.

2.8 สมดุลมวลของซีโอดีและซัลเฟต

2.8.1 สมดุลมวลของซีโอดี

เนื่องจากในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่มีซัลเฟตเข้ามาเกี่ยวข้อง จะมีการแข่งขันกันระหว่างแบคทีเรียสร้างมีเทน แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตในการใช้สารอาหาร ดังนั้นในการวัดว่าแบคทีเรียชนิดใดสามารถใช้สารอาหารได้ในสัดส่วนเท่าใด สามารถวัดได้คร่าว ๆ ด้วยปริมาณซีโอดีที่ถูกใช้ไปโดยแบคทีเรียแต่ละชนิด

ซีโอดี คือ ปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ทั้งที่แบคทีเรียย่อยสลายได้และไม่สามารถย่อยสลายได้ในน้ำเสียเกิดการเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ซึ่งเป็นผลผลิตสุดท้ายของปฏิกิริยา ดังสมการที่ 2.25



ส่วนสารจำพวกกรดอะมิโนจะถูกเปลี่ยนเป็นแอมโมเนียไนโตรเจนเป็นผลสุดท้ายของปฏิกิริยาแทนซึ่งปัจจัยสำคัญในการวิเคราะห์ซีโอดี คือ ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นต้องอาศัยสารออกซิไดซ์อย่างแรง และต้องเกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่เป็นกรดเข้มข้นและอุณหภูมิสูงจากหลักการของการวิเคราะห์ซีโอดีที่ใช้สารออกซิไดซ์อย่างแรงย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ดังนั้นค่าซีโอดีจึงเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้แสดงค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำได้ แต่การใช้สารออกซิไดซ์ที่มีอำนาจในการออกซิไดซ์สูง เช่น ไดโครเมต ทำให้สารอิเล็กตรอนอื่นในระบบที่ไม่เป็นสารอินทรีย์ที่ให้อิเล็กตรอนกับไดโครเมต และเปลี่ยนไปอยู่ในอีกรูปหนึ่ง เช่น ซัลไฟด์ไอออนถูกออกซิไดซ์โดยไดโครเมตเป็นซัลเฟต เป็นต้น ดังนั้นการวัดซีโอดีจึงไม่ได้เป็นการวัดสารอินทรีย์ในน้ำเพียงอย่างเดียว แต่เป็นการวัดปริมาณสารให้อิเล็กตรอนในน้ำทั้งหมด ดังนั้นต้องพยายามกำจัดสารให้อิเล็กตรอนอื่นๆ ในน้ำก่อนการวัดซีโอดี เช่น การปรับพีเอชของน้ำเสียให้ต่ำลงเพื่อไล่ไฮโดรเจนซัลไฟด์ในน้ำเสีย เป็นต้น

สมดุลมวลของซีโอดีก่อนและหลังกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน สามารถพิจารณาได้ดังสมการที่ 2.26

$$\text{COD}_{\text{in}} = \text{soluble COD}_{\text{eff}} + \Delta\text{SO}_4^{2-} - \text{COD} + \text{CH}_{4\text{gas}}\text{COD} + \text{COD}_{\text{acc}} \quad (2.26)$$

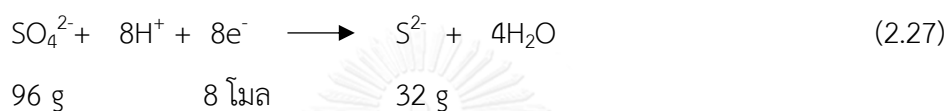
เมื่อ

$$\text{COD}_{\text{in}} = \text{ซีโอดีทั้งหมดก่อนเข้าระบบ}$$

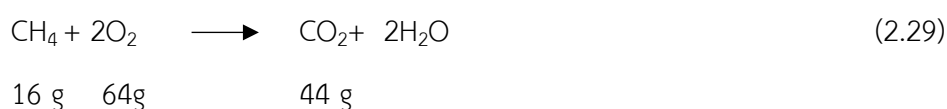
$$\text{soluble COD}_{\text{eff}} = \text{ซีโอดีละลายหลังผ่านระบบ}$$

$\text{CH}_{4\text{gas}}\text{-COD}$	=	ซีโอดีในรูปของก๊าซมีเทน
COD_{acc}	=	ซีโอดีที่ถูกสะสมอยู่ในเซลล์จุลินทรีย์
$\Delta\text{SO}_4^{2-} - \text{COD}$	=	ซีโอดีที่ถูกใช้สำหรับรีดิวซ์ซัลเฟตให้เปลี่ยนเป็นซัลไฟด์
$\text{soluble CH}_4 - \text{COD}$	=	ซีโอดีที่เกิดจากมีเทนละลายน้ำ

ค่า COD_{in} และ $\text{soluble COD}_{\text{eff}}$ เป็นค่าที่วัดได้โดยตรงจากการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ ส่วนค่า $\text{CH}_4\text{ gas-COD}$, $\text{soluble CH}_4 - \text{COD}$ และ $\Delta\text{SO}_4^{2-}\text{-COD}$ สามารถหาได้ทางอ้อมด้วยการคำนวณจาก Stoichiometric ดังสมการที่ 2.27 และ 2.28



จากสมการที่ 2.27 ซัลเฟตที่ลดลง 96 กรัม เกิดจากการรับอิเล็กตรอน 8 โมลกลายเป็นซัลเฟอร์ 32 กรัมและจากสมการที่ 2.28 อิเล็กตรอน 2 โมล คิดเทียบเป็นซีโอดีได้ 16 กรัม นั่นคือซัลไฟด์ที่เกิดขึ้น 32 กรัมมาจากซัลเฟตที่ลดลง 96 กรัมและมีค่าเทียบเท่ากับซีโอดี 64 กรัม เพราะฉะนั้น การหาค่า $\Delta\text{SO}_4^{2-} - \text{COD}$ ก็คำนวณได้จากซัลเฟตที่ลดลง โดยซัลเฟตที่ลดลง 3 มิลลิกรัมเทียบเท่ากับซีโอดี 2 มิลลิกรัม ส่วน $\text{CH}_4 - \text{COD}$ (ทั้ง $\text{CH}_{4\text{gas}}\text{-COD}$ และ $\text{soluble CH}_4 - \text{COD}$) คำนวณจากสมการที่ 2.29



จากสมการที่ 2.29 จะเห็นได้ว่า มีเทน 16 กรัม ทำปฏิกิริยาพอดีกับออกซิเจน 64 กรัมเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ แสดงว่ามีเทน 1 มิลลิกรัม มีค่าเทียบเท่ากับซีโอดี 4 มิลลิกรัม โดย $\text{CH}_{4\text{gas}} - \text{COD}$ หาได้จากการวัดปริมาตรก๊าซทั้งหมดและการวัดร้อยละของก๊าซมีเทนในปริมาตรก๊าซทั้งหมดแล้วจึงเปลี่ยนปริมาตรก๊าซที่คำนวณได้เป็นจำนวนโมลของก๊าซมีเทนด้วยกฎของก๊าซ ส่วน $\text{soluble CH}_4 - \text{COD}$ คำนวณโดยใช้ทฤษฎีของเฮนรี

ซีโอดีในรูปของก๊าซมีเทนหาได้จากสมการที่ 2.30

$$\text{CH}_4\text{-COD} = (\text{Total gas volume} \times \% \text{CH}_4 \times 16 \times 4) / (25.27 \times Q) \quad (2.30)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \text{CH}_{4\text{ gas}}\text{-COD} &= \text{ซีโอดีในรูปของก๊าซมีเทน (มิลลิกรัมต่อลิตร)} \\ \text{Total gas volume} &= \text{ปริมาตรก๊าซทั้งหมด (มิลลิลิตรต่อวัน)} \\ \% \text{CH}_4 &= \text{ร้อยละของก๊าซมีเทน} \\ 25.27 &= \text{ปริมาตรก๊าซ 1 โมล ที่ } 35^\circ\text{C (ลิตร)} \\ &(\text{ปริมาตรก๊าซ 1 โมลที่ } 0^\circ\text{C} = 22.4 \text{ ลิตร}) \\ Q &= \text{อัตราการไหลของน้ำเสียต่อวัน (ลิตรต่อวัน)} \\ 16 &= \text{น้ำหนักของมีเทน 1 โมล (กรัม)} \\ 4 &= \text{ซีโอดีของก๊าซมีเทน 1 กรัม (กรัม)} \end{aligned}$$

ซีโอดีในรูปมีเทนละลายน้ำในน้ำออกหาได้จากสมการที่ 2.31

$$\text{Soluble CH}_4\text{-COD} = K_h \text{CH}_4 \times \text{Partial Pressure of CH}_4 \times 16,000 \times 4 \quad (2.31)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} K_h &= \text{ค่าคงที่ของเฮนรีสำหรับก๊าซมีเทนที่ } 35^\circ\text{C (โมล/ลิตร)} \\ &= 11.55 \times 10^{-4} \\ \text{Partial Pressure of CH}_4 &= \text{ความดันพาร์เชียลของก๊าซมีเทน (สัดส่วนก๊าซมีเทน)} \end{aligned}$$

ส่วนซีโอดีที่ถูกเปลี่ยนเป็นเซลล์จุลชีพเป็นซีโอดีส่วนที่ไม่สามารถวัดได้ แต่ถ้าเราตั้งสมมติฐานว่า ซีโอดีที่ถูกย่อยสลายและไม่สามารถตรวจสอบได้ คือ ซีโอดีที่ถูกสะสมอยู่ในเซลล์จุลินทรีย์

เมื่อพิจารณาสมการ 2.30 และ 2.31 จะได้

$$\text{COD}_{\text{acc}} = \text{COD}_{\text{in}} - \Delta \text{SO}_4^{2-}\text{-COD} - \text{soluble COD}_{\text{eff}} - \text{soluble CH}_4\text{-COD} - \text{CH}_{4\text{ gas}}\text{COD} \quad (2.32)$$

สมการ 2.32 ใช้ในการทดสอบความน่าเชื่อถือของข้อมูล โดยดูจากร้อยละของมวลซีโอดีที่ออกจากระบบต่อร้อยละของมวลซีโอดีเข้าระบบ เรียกว่า %COD recovery แต่จากสมการที่ 2.32 ค่าซีโอดีที่ไม่สามารถตรวจสอบได้ คือ ซีโอดีที่ถูกเปลี่ยนและสะสมอยู่ในเซลล์จุลินทรีย์ ดังนั้น %COD

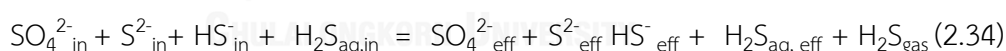
recovery จะมีค่าเป็น 100% เสมอ แต่ในความเป็นจริงที่จะวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ถูกต้องทั้งหมด 100% เป็นไปได้ยาก ถ้าพิจารณาโดยถือว่าซีโอดีที่หายไปจากการเปลี่ยนเป็นเซลล์จุลินทรีย์มีค่าน้อยเนื่องจากเป็นระบบไม่ใช้ออกซิเจน ค่า Yield observed มีค่าต่ำมาก สามารถตัดทิ้งได้โดยไม่ต้องนำมาพิจารณาหรืออาจตรวจวัดจากเซลล์จุลินทรีย์ที่หลุดออกจากระบบด้วยการตรวจค่าของแข็งทั้งหมดได้ ประโยชน์ที่ได้ก็คือสามารถตรวจสอบความน่าเชื่อถือในการทำงานทั้งหมดได้จากสมดุลมวลของซีโอดีที่ถูกสร้างขึ้นมาและจากพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ดังนั้น %COD recovery สามารถหาได้จากสมการ 2.33

$$\% \text{COD recovery} = \frac{[(\Delta \text{SO}_4^{2-} - \text{COD} + \text{soluble COD}_{\text{eff}} + \text{soluble CH}_4 - \text{COD} + \text{CH}_4_{\text{gas}} \text{COD}) / \text{COD}_{\text{in}}] \times 100}{(2.33)}$$

2.8.2 สมดุลมวลของซัลเฟอร์

เมื่อแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตใช้ซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ซัลเฟตจะถูกรีดิวซ์และเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของซัลไฟด์ โดยซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นมีอยู่หลายรูปแบบ ได้แก่ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในวัฏภาคก๊าซ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายน้ำที่ไม่แตกตัว HS^- และ S^{2-} ในวัฏภาคของเหลว รวมถึงซัลไฟด์ที่ตกตะกอนผลึกกับโลหะหนักเป็นตะกอนผลึกของโลหะซัลไฟด์ โดยสภาวะสมดุลระหว่างก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายน้ำที่ไม่แตกตัวสามารถอธิบายได้โดยใช้กฎของเฮนรี ส่วนสัดส่วนระหว่างไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายน้ำที่ไม่แตกตัว HS^- และ S^{2-} สามารถดูได้จากพีเอชของระบบบำบัด

สมดุลมวลของซัลเฟอร์ในระบบหาได้จากสมการที่ 2.34



เมื่อ

$\text{SO}_4^{2-}{}_{\text{in}}$	=	ซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปซัลเฟตในน้ำเข้า
$\text{S}^{2-}{}_{\text{in}}$	=	ซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปซัลไฟด์ไอออนในน้ำเข้า
$\text{HS}^-{}_{\text{in}}$	=	ซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายน้ำที่แตกตัวในน้ำเข้า
$\text{H}_2\text{S}_{\text{aq},\text{in}}$	=	ซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปซัลไฟด์ละลายน้ำที่ไม่แตกตัวในน้ำเข้า
$\text{SO}_4^{2-}{}_{\text{eff}}$	=	ซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปซัลเฟตในน้ำออก
$\text{S}^{2-}{}_{\text{eff}}$	=	ซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปซัลไฟด์ไอออนในน้ำออก
$\text{HS}^-{}_{\text{eff}}$	=	ซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายน้ำที่แตกตัวในน้ำออก
$\text{H}_2\text{S}_{\text{aq},\text{eff}}$	=	ซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปซัลไฟด์ละลายน้ำที่ไม่แตกตัวในน้ำออก
$\text{H}_2\text{S}_{\text{gas}}$	=	ซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปไฮโดรเจนซัลไฟด์ในสถานะก๊าซ

ซัลเฟอร์ในรูปซัลเฟตหาได้จากสมการที่ 2.35

$$\text{ซัลเฟอร์ในรูปซัลเฟต} = \text{SO}_4^{2-} \times 32/96 \quad (2.35)$$

เมื่อ

$$\text{SO}_4^{2-} = \text{ปริมาณซัลเฟตที่วัดได้จากระบบ}$$

$$32 = \text{น้ำหนักของซัลเฟอร์ 1 โมล (กรัม)}$$

$$96 = \text{น้ำหนักของซัลเฟต 1 โมล (กรัม)}$$

ซัลเฟอร์ในรูปก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถหาได้จากสมการที่ 2.36

$$(\text{H}_2\text{S}_{\text{gas}} \text{ concentration} \times 1.345 \times 10^{-3} \times \text{gas volume} / Q) \times 32/34 \quad (2.36)$$

เมื่อ

$$\text{H}_2\text{S}_{\text{gas}} \text{ concentration} = \text{ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่วัดได้}$$

$$\text{H}_2\text{S}_{\text{gas}} \text{ concentration 1 พีพีเอ็ม} = 1.345 \times 10^{-3} \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

$$\text{Gas volume} = \text{ปริมาตรก๊าซชีวภาพ}$$

$$Q = \text{อัตราการป้อนน้ำเสียเข้าระบบ}$$

$$32 = \text{น้ำหนักของซัลเฟอร์ 1 โมล (กรัม)}$$

$$34 = \text{น้ำหนักของไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1 โมล (กรัม)}$$

ในการวัดค่าซัลไฟด์ละลาย สามารถวัดเป็นค่าซัลไฟด์ทั้งหมด ซึ่งเท่ากับ $\text{S}^{2-} + \text{HS}^- + \text{H}_2\text{S}_{\text{aq}}$ จากสมมูลมวลของซัลเฟอร์สามารถนำมาคำนวณเป็น % recovery ได้เพื่อสะดวกต่อการตรวจสอบความถูกต้องของระบบ

$$\text{ดังนั้น \% sulfur recovery} = \frac{[(\text{SO}_4^{2-} \text{ eff} + \text{ซัลไฟด์ทั้งหมดในน้ำออก} + \text{H}_2\text{S}_{\text{gas}})]}{(\text{SO}_4^{2-} \text{ in} + \text{ซัลไฟด์ทั้งหมดในน้ำเข้า})} \times 100 \quad (2.37)$$

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียที่มีซัลเฟตในระบบยูเอเอสบี

Resis และคณะ (1992) ทำการศึกษาผลของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต โดยทำการเพาะเลี้ยงเชื้อจากถังปฏิกรณ์แบบไม่ใช้ออกซิเจนที่รับน้ำเสียซึ่งมีความเข้มข้นของซัลเฟต และกรดแลกติกสูง โดยใช้แลกเตท และซัลเฟตเป็นสารอาหาร และมีช่วงพีเอชที่ทำการศึกษาที่ 5.8 - 7.0 จากการศึกษาพบว่าที่ค่าพีเอชเป็น 6.7 จะมีอัตราการเจริญเติบโตสูงสุด และไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันมีผลโดยตรงต่อการยับยั้งแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต โดยการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์เมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์เท่ากับ 547 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตสามารถฟื้นตัวได้เมื่อมีการไล่ซัลไฟด์ออกจากตัวกลางแล้ว

Francese และคณะ (1998) ได้ศึกษาอิทธิพลของแรงดันน้ำ และอัตราการระบรทุกอินทรีย์ที่มีต่อ granulation และ specific activity โดยใช้ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีขนาด 9.5 ลิตร จำนวน 5 ถัง โดยใช้ความเร็วน้ำไหลขึ้น และเวลากักน้ำที่ค่าต่างๆกัน และศึกษาอิทธิพลแรงดันน้ำที่มีต่อลักษณะเม็ดตะกอนของถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีขนาด 180 ลิตร จากการศึกษาพบว่าค่าอัตราการระบรทุกอินทรีย์ที่สูงขึ้นจะส่งผลให้การเจริญเติบโตของเซลล์ดีขึ้น และลดเวลาในการเริ่มเดินระบบใหม่

อรุชา เศรษฐธีรวิจิ (2542) ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นซีโอดีและซัลเฟตที่มีต่ออัตราการเกิดซัลเฟตรีดักชัน โดยใช้ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีระดับปฏิบัติการ ลักษณะเหมือนกัน 3 ถัง ใช้น้ำเสียสังเคราะห์โดยมีน้ำตาลทรายเป็นแหล่งคาร์บอนและโซเดียมซัลเฟตเป็นแหล่งซัลเฟต และเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นสารบัฟเฟอร์ อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตที่ทำการทดลอง คือ 4 และ 2 โดยใช้ความเข้มข้นซีโอดี 5 ค่า คือ 400, 600, 800, 1,000 และ 1,200 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการศึกษาพบว่า ที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต เท่ากับ 4 มีประสิทธิภาพในการเกิดซัลเฟตรีดักชันร้อยละ 92.7 ที่ความเข้มข้นซีโอดี 1,200 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนการทดลองที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 2 ประสิทธิภาพในการเกิดซัลเฟตรีดักชันเท่ากับร้อยละ 95.1 ที่ความเข้มข้นของซีโอดี 1,000 และ 1,200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ นอกจากนี้ ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีมีค่าสูงกว่าร้อยละ 95 ในทุก ๆ การทดลอง โดยเฉลี่ยสัดส่วนการใช้ซีโอดีระหว่างแบคทีเรียสร้างมีเทนและแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต มีค่าเท่ากับร้อยละ 82.0/18.0 และ 62.9/37.1 ที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 4 และ 2 ตามลำดับ

อนุตร เปียงแก้ว (2542) ศึกษาการควบคุมระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันด้วยปริมาณซัลเฟต และชนิดของแหล่งคาร์บอน โดยใช้น้ำตาลทรายและอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอน แต่ละชุดป้อนเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเป็น 42, 84 และ 840 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าซีโอดีคงที่ตลอดการทดลอง คือ

500 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 12, 6 และ 0.6 ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า เมื่ออัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 0.6, 6 และ 12 ระดับการเกิดซัลเฟตริกชันมีค่าเท่ากับร้อยละ 66, 87 และ 90 ตามลำดับ เมื่อใช้น้ำตาลทราย และ เท่ากับร้อยละ 72, 82 และ 80 ตามลำดับ เมื่อใช้อะซิเตท ซึ่งเมื่ออัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตมีค่ามากกว่า 6 การเกิดซัลเฟตริกชันจะเกิดได้เต็มที่ เนื่องจากมีซีโอดีอยู่ในระบบมากเกินไป ขณะที่ซีโอดีอยู่อย่างจำกัด ซัลเฟตในระบบจึงถูกรีดิวซ์เกือบทั้งหมด ในขณะที่เมื่ออัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 0.6 ระดับการเกิดซัลเฟตริกชันจะมีค่าลดลง เนื่องจากในระบบมีซัลเฟตมากเกินไป ในขณะที่มีซีโอดีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นความเข้มข้นของซีโอดีจึงเป็นตัวควบคุมระดับการเกิดซัลเฟตริกชัน นอกจากนี้ จากผลการทดลองยังแสดงให้เห็นอีกว่า การใช้อะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนทำให้ระดับการเกิดซัลเฟตริกชันมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการใช้น้ำตาลทราย

Yu และคณะ (2001) ได้ทำการศึกษาผลของตามเติมแคลเซียมลงในระบบยูเอเอสพีสำหรับกระบวนการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์โดยใช้ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสพีจำนวน 6 ถัง ความเข้มข้นของแคลเซียมที่ทำการศึกษาได้แก่ 0, 150, 300, 450, 600 และ 800 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าซีโอดี 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีอัตราส่วนซีโอดี:ไนโตรเจน:ฟอสฟอรัสประมาณ 200:4:1 ทำการเดินระบบพร้อมกันเป็นเวลา 146 วัน จากการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นของแคลเซียมที่เหมาะสมต่อการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์คือ 150-300 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจะช่วยให้การสะสมมวลจุลินทรีย์ และกระบวนการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ โดยที่ความเข้มข้นของแคลเซียมในเม็ดตะกอนมีสัดส่วนใกล้เคียงกับความเข้มข้นของแคลเซียมที่เติมให้กับระบบ และยังตรวจพบตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ซึ่งเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในเม็ดตะกอน อีกทั้งค่าความสามารถจำเพาะของเม็ดตะกอนจะลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแคลเซียมในน้ำเข้า ซึ่งกระบวนการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่พบจะแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ Adsorption, Adhesion และ Multiplication แต่จากการทดลองไม่พบความแตกต่างของสายพันธุ์จุลินทรีย์ในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

จันทิมา สุกุลพานิชย์ (2548) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มีซัลเฟตและไนเตรทสูงด้วยระบบยูเอเอสพี โดยศึกษาผลของแคลเซียมต่อการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์และประสิทธิภาพของระบบ แบ่งการทดลองเป็น 2 ช่วงการทดลอง ใช้น้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานแอสแตนเลส ตามลำดับ และใช้อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตต่อไนเตรท คือ 600:90:60 ทดลอง 3 ถังปฏิกรณ์ด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อแคลเซียม 10:0.85 10:1.70 และ 10:3.40 ตามลำดับ พบว่า ที่อัตราส่วนซีโอดีต่อแคลเซียม 10:1.70 ระบบมีประสิทธิภาพดีที่สุด ทั้งน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง นอกจากนี้อัตราส่วนดังกล่าวยังทำให้สามารถสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ใหญ่ขึ้นอีกด้วย

Shayegan และคณะ (2005) ศึกษาผลของความเร็วน้ำไหลขึ้น (up-flow velocity) ในระบบยูเอเอสบีซึ่งส่งผลต่อแบคทีเรียกลุ่มรีดิวซ์ซัลเฟตในระบบ ทำการศึกษาโดยใช้ความเข้มข้นซีโอดี 500 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ด้วยกากน้ำตาล ปรับค่าความเร็วน้ำไหลขึ้น 0.5 1.0 1.5 และ 2.5 เมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ พบว่า เมื่อปรับค่าความเร็วน้ำไหลขึ้นเท่ากับ 1.0 เมตรต่อชั่วโมง ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและซัลเฟตสูงที่สุด นอกจากนี้ การปรับค่าความเร็วน้ำไหลขึ้นต่ำกว่า 1 เมตรต่อชั่วโมง จะมีผลทำให้แบคทีเรียกลุ่มรีดิวซ์ซัลเฟตทำงานได้ดีขึ้น ซึ่งในทางตรงกันข้าม เมื่อปรับค่าความเร็วน้ำไหลขึ้นมากกว่า 1 เมตรต่อชั่วโมงจะทำให้ลดการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มดังกล่าวได้

O'Reilly และคณะ (2006) ศึกษาผลของอัตราส่วนซีโอดีและซัลเฟตต่อการเจริญของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียสร้างมีเทนในระบบยูเอเอสบี โดยกำหนดอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 16:1, 4:1 และ 2:1 ตามลำดับ พบว่า ในทุกอัตราส่วน แบคทีเรียที่เจริญเป็นกลุ่มหลักคือ แบคทีเรียผลิตมีเทน นอกจากนี้มีการทดลองให้สารให้อิเล็กตรอนที่ต่างกัน เช่น อะซิเตท โพรไพโอเนต และ ไฮโดรเจน ซึ่งพบว่าทำให้ไฮโดรเจนจะทำให้มีการเจริญของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตดีขึ้น แต่ยังไม่สามารถเจริญเป็นกลุ่มหลักในระบบได้ การทดลองยังแสดงให้เห็นอีกว่า การแข่งขันของแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มในระบบ ยังมีปัจจัยอีกหลายชนิด เช่น อุณหภูมิ ชนิดสัลดิจ เป็นต้น

กนกกาญจน์ กาญจนวัฒน์ (2552) ศึกษาผลของพีเอชและอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ต่อการลดซัลเฟตในระบบยูเอเอสบีจากน้ำเสียอุตสาหกรรมน้ำยางข้น แบ่งการทดลองเป็น 2 ช่วง โดยช่วงแรกกำหนดอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 0.5 กก.ซีโอดี/ม³/วัน กำหนดค่าพีเอชที่ 5, 6, 7 และ 8.5 ตามลำดับ ช่วงที่ 2 กำหนดอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 1, 2 และ 3 กก.ซีโอดี/ลบม.-วัน ตามลำดับ พบว่า การกำจัดซีโอดีและของแข็งแขวนลอยทั้งสองช่วงมีประสิทธิภาพสูงสุดที่พีเอช 7 และประสิทธิภาพจะลดลงเมื่ออัตราการระบรทุกสารอินทรีย์มีค่ามากขึ้น

Subtil และคณะ (2012) ศึกษาการละลายน้ำของซัลเฟตและซัลไฟด์ทั้ง 3 รูป (HS^- , H_2S_{aq} , S^{2-}) ในระบบยูเอเอสบีที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตต่ำ โดยได้ทำการศึกษาการละลายของสารดังกล่าวในส่วนของเหลว (Liquid phase) พบว่า จากการทดลองเกิดปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันโดยเฉลี่ยร้อยละ 24 มีค่าซัลไฟด์ละลายไม่เกิน 5 มิลลิกรัม-ซัลเฟอร์ (S) ต่อลิตร เมื่อคำนวณไคเนติก (Kinetic) จากปฏิกิริยาอันดับ 1 ได้ค่าคงที่ (K_1) ระหว่าง $2.94 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ และ 1.17×10^{-5} ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันสูงสุดเท่ากับ 18 มิลลิกรัม-ซัลเฟต (SO_4^{2-}) ต่อลิตรต่อชั่วโมงและการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างซีโอดีต่อซัลเฟตไม่มีผลต่อการละลายของซัลไฟด์ในระบบ

Jing และคณะ (2013) ศึกษาการแข่งขันระหว่างแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียผลิตมีเทนในระบบยูเอเอสพีด้วยน้ำเสียที่มีเอทานอลและอะซิเตทในระบบยูเอเอสพี ทดลองด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 1 ทดลองเป็นเวลา 180 วัน ปรับค่าเวลากัก (HRT) เป็น 48 24 12 6 4 3 2 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่า เมื่อใช้ HRT ต่ำกว่า 6 ชั่วโมงและอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ (OLR) เท่ากับ 12.3 กรัมซีโอดี/ลิตร-วัน ระบบมีประสิทธิภาพกำจัดซีโอดีสูงกว่าร้อยละ 80 และมีประสิทธิภาพกำจัดซัลเฟตสูงกว่าร้อยละ 30 และเมื่อลดค่า HRT จะทำให้เกิดกรดไขมันระเหยสะสมซึ่งทำให้ประสิทธิภาพระบบลดลง ยกเว้นการใช้ HRT เท่ากับ 2 ชั่วโมง พบว่ามีค้ายิลด์มีเทนอยู่ในช่วง 0.18–0.24 ลิตรมีเทน/กรัมซีโอดี เกิดจากแบคทีเรียผลิตมีเทน คือ *Methanosaeta concilii* GP6 ใช้อะซิเตทเป็นสารอาหาร นอกจากนี้พบว่า ซัลเฟตในระบบถูกใช้โดย *Desulfovibrio* ซึ่งเป็นแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตที่ใช้เอทานอลเป็นสารอาหาร

Hu และคณะ (2015) ศึกษาผลของซีโอดีต่อซัลเฟตในระบบยูเอเอสพีด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 ช่วง ช่วงแรกกำหนดอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 20:1 และมีการเพิ่มค่าอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์จาก 1.4 – 36.6 กรัมซีโอดี/ลิตร-วัน เป็นเวลา 159 วัน พบว่าที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 25.2 กรัมซีโอดี/ลิตร-วัน มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีและซัลเฟตสูงสุดเท่ากับ 87.8 และ 97.8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในการทดลองช่วงที่ 2 มีการลดอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเป็น 20:1, 10:1, 5:1, 3:1, 1:1 และ 0.5:1 ตามลำดับ กำหนดอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 11.9 กรัมซีโอดี/ลิตร-วัน ทดลองเป็นเวลา 215 วัน พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีลดลงจาก 89.1 เปอร์เซ็นต์ เหลือเพียง 79.2 เปอร์เซ็นต์ การเกิดมีเทนลดลงจาก 4.47 ลิตร/ลิตร-วัน เหลือ 3.26 ลิตร/ลิตร-วัน จากการทดลองทำให้ทราบว่า อัตราส่วนระหว่างซีโอดีต่อซัลเฟตมีผลต่อการบำบัดซีโอดีและการผลิตมีเทนอย่างมีนัยสำคัญ

2.9.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยโซเดียมโมลิบเดต

Yadav และ Archer (1989) ศึกษาการยับยั้งปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันในระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศของน้ำเสียจากกากน้ำตาลที่มีปริมาณซัลเฟตสูง โดยใช้โซเดียมโมลิบเดต 3 ความเข้มข้น คือ 0.1, 0.5 และ 1 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ ทดลองกับน้ำเสียที่มีค่าซีโอดีและซัลเฟต 27,000 และ 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ พบว่า โซเดียมโมลิบเดต 0.1 มิลลิโมลาร์ ไม่สามารถยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันได้ ในขณะที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1 มิลลิโมลาร์ สามารถยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวได้และมีผลกระทบต่ออายุของแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่า การเติมโซเดียมโมลิบเดตที่ความเข้มข้นสูง จะสามารถยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันได้อย่างสมบูรณ์แต่จะยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนด้วยเช่นกัน

Ranade และคณะ (1999) ศึกษาการยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในถังย่อยไร้อากาศ (Anaerobic digester) โดยใช้เตียมโมลิบเดท กำหนดอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 1.33 กก. ซีไอดี/ลบม.-วัน ความเข้มข้นซัลเฟต 10 กรัม/ลิตร แบ่งเป็น 3 ชุดการทดลอง ชุดที่ 1 เป็นชุดควบคุม ชุดที่ 2 เตียมโมลิบเดทความเข้มข้น 3 มิลลิโมลาร์ตลอดการทดลอง ส่วนชุดที่ 3 เตียมโมลิบเดทความเข้มข้น 3 มิลลิโมลาร์และลดลงเหลือ 1 มิลลิโมลาร์ ทำการเดินระบบจนครบ 66 วันจึง เตียมโมลิบเดท พบว่า การเตียมโมลิบเดทความเข้มข้น 3 มิลลิโมลาร์ สามารถยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบได้ทันทีและควบคุมการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ถึง 10 วัน ในขณะที่การลดความเข้มข้นโมลิบเดทในชุดการทดลองที่ 3 ยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ในช่วงแรกของการทดลองหลังจากนั้นจะมีการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ขึ้นอีก นอกจากนี้ยังพบว่าเตียมโมลิบเดทไม่ส่งผลกระทบต่อการใช้งานมีเทน

Patidar และคณะ (2005) ศึกษาผลของโมลิบเดทต่อการทำงานของแบคทีเรียผลิตมีเทนและแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต โดยแบ่งการทดลองเป็นสองส่วน กำหนดค่าซีไอดีต่อซัลเฟตเป็นเท่ากับ 3.5:1 และใช้น้ำตาลซูโครสเป็นสารตั้งต้น ในการทดลองส่วนแรก กำหนดความเข้มข้นโมลิบเดทเท่ากับ 3 มิลลิโมลาร์ พบว่า เมื่อเปรียบเทียบชุดการทดลองที่เตียมโมลิบเดทและชุดควบคุม มีการผลิตมีเทนคิดเป็น 0.77 และ 0.43 $\text{gCH}_4\text{-CODgVSS}^{-1}\text{d}^{-1}$ ตามลำดับ ในขณะที่ อัตราการลดซัลเฟตคิดเป็น 0.02 และ 0.14 $\text{gSO}_4^{2-}\text{-reduced gVSS}^{-1}\text{d}^{-1}$ ตามลำดับ ทั้งนี้จากการทดลองยังพบว่า ความเข้มข้นโมลิบเดท 3 มิลลิโมลาร์ ไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนและสามารถยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตได้ถึง 85 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการทดลองช่วงที่ 2 เป็นการศึกษาผลของความเข้มข้นของโมลิบเดท ต่อการทำงานของแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มโดยปรับเปลี่ยนความเข้มข้นโมลิบเดทตั้งแต่ 0.25 – 4 มิลลิโมลาร์ พบว่า การใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 0.25 มิลลิโมลาร์ สามารถยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตได้อย่างมีนัยสำคัญ แต่ความเข้มข้นโมลิบเดท 4 มิลลิโมลาร์จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของแบคทีเรียผลิตมีเทนลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มข้นโมลิบเดทที่ 0.75–2.0 มิลลิโมลาร์ สามารถกระตุ้นการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนได้อีกด้วย

Predicala และคณะ (2008) ศึกษาการยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์จากน้ำเสียมูลสุกรเก่าและใหม่ โดยใช้เตียมไนไตรท์และเตียมโมลิบเดท ทำการทดลองระดับห้องปฏิบัติการและระดับกึ่งภาคสนาม (Semi-pilot scale) ในการทดลองระดับปฏิบัติการ ทดลองในขวดซีรัมระบบปิดขนาด 125 มิลลิลิตรและ 4 ลิตร เปรียบเทียบการยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ระหว่างการเตียมโมลิบเดท 2 มิลลิโมลาร์ และ เตียมไนไตรท์ 80 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ เป็นระยะเวลา 40 – 60 วันเทียบกับชุดควบคุม พบว่า สามารถควบคุมปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ เท่ากับ 10 ไมโครลิตร/ลิตร ขณะที่ชุดควบคุมเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1,500 ไมโครลิตร/ลิตร ซึ่งให้ผลใกล้เคียงกันทั้งในมูลสุกรใหม่

และมูลสุกรเก่า ทั้งนี้ยังมีการทดลองผสมสารทั้งสองเพื่อศึกษาการเสริมประสิทธิภาพระหว่างสารดังกล่าว พบว่า การผสมสารทั้งสองไม่มีผลในการเสริมประสิทธิภาพซึ่งกันและกัน นอกจากนี้ในการทดลองระดับกึ่งภาคสนามด้วยถังระบบปิดขนาด 200 ลิตร เพื่อยืนยันผลการทดลองระดับปฏิบัติการพบว่า การเติมสารทั้งสองในความเข้มข้นข้างต้น สามารถควบคุมการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ที่ 2-25 ไมโครลิตร/ลิตร ขณะที่ชุดควบคุมเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ 500 ไมโครลิตร/ลิตร

Qiyong และคณะ (2011) ศึกษาการยับยั้งการเกิดกลิ่นเหม็นจากไฮโดรเจนซัลไฟด์ในหลุมฝังกลบขยะประเภทแผ่นผ้าใยปซัม โดยองค์ประกอบส่วนใหญ่ของแผ่นใยปซัมคือ แคลเซียมซัลเฟต (Calcium sulfate ; CaSO_4) ซึ่งสารดังกล่าวแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตสามารถใช้เป็นตัวรับอิเล็กตรอนและเปลี่ยนเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ ทดลองโดยใช้สารยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ 3 ชนิด คือ โซเดียมโมลิบเดต เพอร์ริกคลอไรด์และ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ระหว่างสารดังกล่าว การทดลองทำในระดับห้องปฏิบัติการ 2 ชุดการทดลอง โดยการทดลองแรก ใช้ขวดรูปชมพู่ขนาด 1,000 มิลลิลิตร ในระบบปิด เติมผงใยปซัมที่เก็บจากหลุมฝังกลบ และเติมสารทั้งสารทั้ง 3 ชนิด เปรียบเทียบประสิทธิภาพดังนี้ โซเดียมโมลิบเดต ทดลองที่ความเข้มข้น 2, 4, 10 และ 20 มิลลิโมลาร์ เพอร์ริกคลอไรด์ ทดลองที่ความเข้มข้น 5, 10, 100 และ 500 มิลลิโมลาร์ และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทดลองที่ความเข้มข้น 1, 14, 40 และ 68 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ พบว่า โซเดียมโมลิบเดต เพอร์ริกคลอไรด์และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ สามารถควบคุมการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่ำกว่า 10 พีพีเอ็ม ที่ความเข้มข้น 2, 500 และ 68 มิลลิโมลาร์ตามลำดับ การทดลองที่สอง ทำการทดลองในคอลัมน์ สูง 50 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ซึ่งพบว่าให้ผลการทดลองใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังมีการทดลองผสมสารระหว่างโซเดียมโมลิบเดตและเพอร์ริกคลอไรด์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการยับยั้งไฮโดรเจนซัลไฟด์ พบว่า สามารถยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้นานถึง 180 วัน

2.9.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ระบบยูเอเอสบีบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

Lo และคณะ (1994) ศึกษาการปรับปรุงลักษณะของระบบยูเอเอสบีในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร โดยเปรียบเทียบระหว่างการติดตั้งฟิล์มตัวกลางในถังยูเอเอสบีและติดตั้งถาดเชือกตามความยาวของถัง เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียดังกล่าว พบว่า หลังจากเริ่มเดินระบบ (Start-up) สามารถบำบัดซีโอดีได้ร้อยละ 57 และเกิดมีเทน 0.71 ลิตรต่อวัน เมื่อค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic loading rate; OLR) มีค่าปานกลาง ซึ่งจากการทดลองสามารถบ่งบอกได้ว่าการใช้ถาดเชือกสามารถให้ประสิทธิภาพการบำบัดใกล้เคียงกับการติดตั้งฟิล์มตัวกลางทั่วไปได้

Tanaka (1998) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรด้วยระบบยูเอเอสบีต่อด้วยระบบโปรยกรองเป็นขั้นสุดท้าย ทดลองใช้น้ำเสียที่มีค่าบีโอดีเริ่มต้นเท่ากับ 535 มิลลิกรัมต่อลิตร และ

แอมโมเนีย-ไนโตรเจนเท่ากับ 72 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการะบรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 0.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน เติบระบบเป็นเวลา 6 เดือน พบว่า ระบบยูเอเอสบีมีประสิทธิภาพการบำบัดได้ร้อยละ 40-70 และระบบโปรยกรองมีประสิทธิภาพการบำบัดได้ร้อยละ 30-80

Song และคณะ (2010) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงประชากรจุลินทรีย์ในระบบยูเอเอสบีจากการบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกร โดยตรวจ 16s RNA ด้วยวิธีเรียลไทม์พีซีอาร์ (real-time PCR) ทำการทดลองด้วยระบบขนาดความจุ 35 ลูกบาศก์เมตร เป็นเวลา 382 วัน แบ่งการทดลองเป็น 4 ช่วง โดยปรับระยะเวลาพักน้ำในระบบ (HRT) เป็น 7.0, 6.4, 5.0 และ 3.5 ตามลำดับ พบว่า ในระบบมีกลุ่มจุลินทรีย์ 4 กลุ่ม ได้แก่ Methanobacteriales, Methanomicrobiales, Methanosaetaceae และ Mathanosarcinaceae ซึ่งที่ระยะเวลาพักน้ำต่ำกว่า 7 วัน จุลินทรีย์กลุ่ม Methanobacteriales จะเจริญได้ดีเป็นกลุ่มหลักในระบบ จุลินทรีย์กลุ่มดังกล่าว ใช้ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารอาหารในการสร้างมีเทน ขณะที่เมื่อปรับระยะเวลาพักน้ำมากกว่า 20 วัน พบว่า แบคทีเรียกลุ่ม Methanosaetaceae จะเจริญเป็นกลุ่มหลักในระบบ ซึ่งจุลินทรีย์กลุ่มดังกล่าวใช้อะซิเตทเป็นสารอาหารในการสร้างมีเทนและให้ปริมาณก๊าซชีวภาพและสัดส่วนมีเทนสูงขึ้นอีกด้วย

Hassan และ Jeries (2010) ศึกษาการหมักร่วมระหว่างน้ำเสียจากฟาร์มสุกรและน้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำมันมะกอกด้วยระบบยูเอเอสบี ทำการทดลองเป็นระยะเวลา 170 วัน พบว่า สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดได้ถึงร้อยละ 85-95 และมีปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น 0.55 ลิตรต่อกรัมซีโอดี เมื่อผสมน้ำเสียจากฟาร์มสุกรและน้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำมันมะกอกในอัตราส่วนร้อยละ 67 และ 33 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถลดค่าซีโอดีได้จาก 28,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือเพียง 1,500-3,500 มิลลิกรัมต่อลิตรอีกด้วย

Tuo และคณะ (2014) ศึกษาผลกระทบของ ซิงค์ (II) ไอออน (Zn^{2+}) ต่อการเจริญของจุลินทรีย์ในกลุ่มสร้างมีเทน ในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ด้วยระบบยูเอเอสบี (UASB reactor) ทำการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ โดยเติมซิงค์ (II) ไอออน ลงไปในถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีระหว่างการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มหมู ซึ่งอยู่สภาวะคงตัว และทำการศึกษาผลกระทบที่มีต่อกลุ่มจุลินทรีย์สร้างมีเทน โดยใช้เรียลไทม์พีซีอาร์ (Real-time PCR) ในการศึกษา 16S RNA เพื่อศึกษาปริมาณของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน ทำการทดลองเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่เติมซิงค์ (II) ไอออน โดยถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีทั้ง 2 ถัง มีระยะเวลาพักที่ 48 ชั่วโมง ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 35 °ซ จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี และประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนให้ผลการทดลองเป็นไปในทางเดียวกัน แสดงให้เห็นว่า ซิงค์ (II) ไอออน มีผลต่อปริมาณของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีที่ใช้บำบัดน้ำเสียจากฟาร์มหมูที่มีความเข้มข้นไม่แน่นอนของซิงค์ (II) ไอออน นอกจากนี้การศึกษาทางโมเลกุลของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนยังพบว่า

Methanomicrobiales (MMB) ซึ่งเป็นจุลินทรีย์กลุ่มหลักที่ได้รับผลกระทบจากปริมาณ ชิงค์ (II) ไอออนอย่างเห็นได้ชัด อย่างไรก็ตามเพื่อให้เกิดความเสถียรของระบบบำบัดจึงควรใช้ ชิงค์ (II) ไอออนในปริมาณต่ำกว่า 17.8 มก./ล.

2.9.4 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า การบำบัดน้ำเสียด้วยระบบยูเอเอสบีได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นระบบที่สามารถควบคุมดูแลได้ง่าย ประหยัดพลังงาน มีถังตกตะกอนและการแยกส่วนก๊าซชีวภาพในถังเดียว ในการควบคุมการเดินระบบจำเป็นต้องอาศัยปัจจัยทางกายภาพและเคมีหลายประการ เนื่องจากปัจจัยต่างๆมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ เช่น อุณหภูมิ ค่าพีเอช เวลาพัก (HRT) ความเร็วน้ำไหลขึ้น (up-flow velocity) และอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต เป็นต้น Shayegan และคณะ (2005) พบว่า ควรควบคุมอุณหภูมิอยู่ที่ 35 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีความเหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบ และความเร็วน้ำไหลขึ้น 1 เมตรต่อชั่วโมง สามารถทำให้ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงขึ้นได้ Speece (1996) พบว่า การควบคุมค่าพีเอชของระบบในช่วง 6.8-7.2 ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงที่สุด นอกจากนี้ การบำบัดน้ำเสียในประเทศไทย พบว่า หลายอุตสาหกรรมเกิดปัญหาคือ น้ำเสียมีซัลเฟตเจือปนในระบบ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดและผลิตก๊าซชีวภาพลดลง การติดตามปริมาณซัลเฟต สามารถวัดค่าซัลเฟตเทียบกับซีโอดีในระบบ ซึ่งค่านี้จะมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบโดยตรง กล่าวคือ เมื่อมีปริมาณซัลเฟตในระบบสูงขึ้นจะทำให้แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเจริญได้ ซึ่งจะไปแข่งขันกับแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน ทำให้การผลิตมีเทนลดลงและยังเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบ Hu และคณะ (2015) พบว่า การลดอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตจะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ฟาร์มสุกรเป็นอีกแหล่งปัญหาหนึ่ง เนื่องจากอาหารที่ให้สุกรมีส่วนประกอบของซัลเฟต ทำให้มีการเจือปนในน้ำเสียจากมูลของสุกร การบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรหลายแห่งนิยมใช้ระบบยูเอเอสบี แต่ยังคงต้องมีการแก้ปัญหาในเรื่องดังกล่าว ปัจจุบันสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีหนึ่งที่น่าสนใจคือการยับยั้งการทำงานของกลุ่มแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตด้วยโซเดียมโมลิบเดต สารดังกล่าวเป็นองค์ประกอบของธาตุโมลิบดินัม ซึ่งมีความเป็นพิษต่ำ มีการใช้ในอุตสาหกรรมการเกษตรอย่างแพร่หลาย เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม Patidar และ Tare (2005) ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นโซเดียมโมลิบเดตต่อการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์และการผลิตมีเทน พบว่า โซเดียมโมลิบเดตความเข้มข้น 3 มิลลิโมลาร์ สามารถยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้โดยไม่มีผลต่อการผลิตมีเทนในระบบ ขณะที่ความเข้มข้น 4 มิลลิโมลาร์จะทำให้ประสิทธิภาพการผลิตมีเทนของระบบลดลง ทั้งนี้ จากงานวิจัยดังกล่าว ยังคงต้องศึกษาเพิ่มเติมอย่างต่อเนื่องเพื่อเป็นประโยชน์ต่อการใช้งานจริงต่อไป

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของโซเดียมโมลิบเดทในการยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบยูเอเอสบี โดยการทดลองแบ่งเป็น 3 ช่วงดังนี้

3.1.1 การทดลองช่วงที่ 1

ศึกษาประสิทธิภาพของโซเดียมโมลิบเดทต่อการยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบแบตช์ (Batch) ทดลองในขวดซีรัมขนาด 1,000 มิลลิลิตร กำหนดความเข้มข้นโซเดียมโมลิบเดท 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ โดยชุดควบคุมไม่มีการเติมโซเดียมโมลิบเดท แบ่งเป็น 4 ชุดการทดลอง โดยกำหนดความเข้มข้นซีโอตีต่อซัลเฟตในแต่ละชุดการทดลองคือ 100:1, 50:1, 20:1 และ 15:1 ตามลำดับ เป็นระยะเวลา 7 วัน

ตัวแปรควบคุม ได้แก่

- ค่าซีโอตีและซัลเฟต

กำหนดความเข้มข้นซีโอตีเท่ากับ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และปรับอัตราส่วนซีโอตีต่อซัลเฟตเป็น 100:1, 50:1, 20:1 และ 15:1 ตามลำดับ

- ค่าของแฉียงแวนลอยระยะเหย (VSS) ของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบร้อยละ 2.5
- ค่าพีเอชในระบบเท่ากับ 7.0
- อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส
- เขย่าที่ 100 รอบต่อนาที

ตัวแปรอิสระที่ทำการศึกษา ได้แก่

- ความเข้มข้นโซเดียมโมลิบเดททั้ง 4 ค่า ได้แก่ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 มิลลิโมลาร์

ตัวแปรตามที่ต้องวิเคราะห์ ได้แก่

- ค่าซีโอตีเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลอง
- ปริมาณซัลเฟตละลายเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลอง
- ปริมาณก๊าซชีวภาพ
- ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์
- ร้อยละของปริมาณก๊าซมีเทนในระบบ

3.1.2 การทดลองช่วงที่ 2

ศึกษาการยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบยูเอเอสบีโดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมโมลิบเดทที่ได้จากการทดลองช่วงที่ 1 และใช้น้ำเสียสังเคราะห์ในการเดินระบบ เริ่มเดินระบบจนเสถียรใช้เวลา 70 วัน และทำการทดลองเป็นระยะเวลา 60 วัน การทดลองใช้ถังปฏิกรณ์ระบบยูเอเอสบีจำนวน 2 ถัง ดังนี้

ถังที่ 1 เป็นชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมโซเดียมโมลิบเดท

ถังที่ 2 เป็นชุดทดลองที่มีการเติมโซเดียมโมลิบเดท

ตัวแปรควบคุม ได้แก่

- ค่าซีไอดีต่อซัลเฟต กำหนดดั่งเช่นการทดลองช่วงที่ 1
- อัตราการสูบน้ำเสียเข้าระบบ 20 ลิตรต่อวัน
- ระยะเวลาพักน้ำ 12 ชั่วโมง
- ความเร็วการไหลขึ้นของน้ำ 1 เมตรต่อชั่วโมง
- ค่าพีเอชในระบบเท่ากับ 6.8-7.5
- อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

ตัวแปรตามที่ต้องวิเคราะห์ ได้แก่

- ค่าซีไอดี
- ปริมาณซัลเฟตละลาย
- ปริมาณซัลไฟด์ละลาย
- ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์
- ร้อยละของปริมาณก๊าซมีเทน
- ปริมาณก๊าซชีวภาพ
- ค่าโออาร์พี (ORP)
- ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS)
- กรดไขมันระเหย (VFA)
- ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity)
- ค่าพีเอช

3.1.3 การทดลองช่วงที่ 3

ศึกษาการยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ตั้งการทดลองช่วงที่ 2 โดยใช้ น้ำเสียจริงจากฟาร์มสุกร ซึ่งมีค่าซีไอดี 2,000-5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร แทนการใช้น้ำเสียสังเคราะห์ ทำการทดลองเป็นเวลา 20 วัน โดย

- ศึกษาสมบัติของน้ำเสียก่อนป้อนเข้าระบบ ได้แก่

ค่าซีไอดี ปริมาณซัลเฟต ปริมาณไนโตรเจน ค่าพีเอช ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) กรดไขมันระเหย (VFA)

- กำหนดตัวแปรควบคุมและตัวแปรอิสระเช่นเดียวกับการทดลองช่วงที่ 2

3.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์และลักษณะน้ำเสีย

การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ในงานวิจัยนี้ เป็นการเตรียมให้มีค่าใกล้เคียงกับน้ำเสียจริงที่จะใช้ในการทดลองช่วงที่ 3 ซึ่งมีค่าซีไอดีประมาณ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และเน้นในเรื่องอัตราส่วนของค่าซีไอดีต่อซัลเฟต เพื่อเป็นปัจจัยควบคุมให้เกิดกระบวนการซัลเฟตรีดักชันควบคู่กับกระบวนการผลิตมีเทน โดยน้ำเสียที่เตรียมในช่วงการทดลองที่ 1 และช่วงที่ 2 ใช้น้ำตาลทรายขาวเป็นแหล่งคาร์บอนให้กับแบคทีเรีย ส่วนประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์

ส่วนประกอบ	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ส่วนประกอบ	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
COD	5,000	H ₃ BO ₃	0.5
(NH ₂) ₂ CO	428.5	ZnCl ₂	0.5
KH ₂ PO ₄	108	CuCl ₂ .4H ₂ O	0.5
Na ₂ SO ₄	*	MnCl ₂ .4H ₂ O	0.5
NaHCO ₃	2,500	NaMoO ₄ .2H ₂ O	0.5
CaCl ₂ .2H ₂ O	40	AlCl ₃ .6H ₂ O	0.5
FeCl ₂ .7H ₂ O	40	NiCl ₂ .6H ₂ O	0.5
MgSO ₄ .7H ₂ O	40	CoCl ₂ .6H ₂ O	10
		KI	10

*คิดตามอัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟต ,COD:N:P = 100:2:0.5

(Speece, 1996; Yu และคณะ, 2001; จันทิมา สุกุลพานิชย์, 2548)

ลักษณะน้ำเสียสังเคราะห์และฟาร์มสุกรมีลักษณะดังแสดงในตารางที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.2 ลักษณะน้ำเสียสังเคราะห์ตลอดการทดลองช่วงที่ 1-2

พารามิเตอร์	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย
ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	4989	5495	5164
กรดไขมันระเหย (มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปกรดอะซิติก)	57	88	76
สภาพต่างทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปแคลเซียม คาร์บอเนต)	2325	2608	2507
ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	5022	5972	5460
พีเอช	6.927	7.343	7.021

หมายเหตุ ปริมาณซัลเฟตและซัลไฟด์ขึ้นกับการปรับค่าที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.3 ลักษณะน้ำเสียฟาร์มสุกร

พารามิเตอร์	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย
ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	2578	3134	2801
ซัลเฟต (มิลลิกรัมต่อลิตร)	25.8	32.4	28.9
ซัลไฟด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	1.03	2.01	1.42
กรดไขมันระเหย (มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปกรดอะซิติก)	87	100	94
สภาพต่างทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปแคลเซียม คาร์บอเนต)	876	1024	940
ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	535	621	566
พีเอช	7.211	7.343	7.252

3.3 ลักษณะเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ ได้จากระบบยูเอเอสบี บริษัท เสริมสุข มหาชน (จำกัด) ลักษณะเป็นเม็ดสีดำ ขนาด 0.5 - 1.0 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.1 วัตถุประสงค์ของแข็งแขวนลอยระเหย (Volatile suspended solid ; VSS) ได้เท่ากับ 93,000 มิลลิกรัมต่อลิตร



ภาพที่ 3.1 ลักษณะเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.4.1 การทดลองครั้งที่ 1

มีการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ ดังนี้

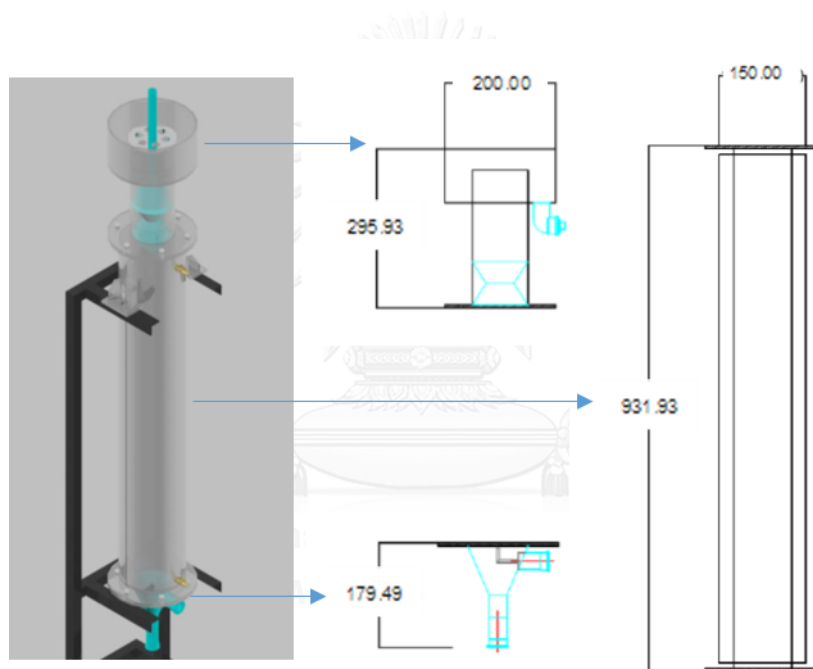
1. ขวดซีรัมขนาด 1 ลิตร
2. สายยางซิลิโคน
3. กระบอกตวง
4. หัวเข็มพลาสติก
5. ถังเก็บแก๊ส
6. ตู้บ่มเพาะเชื้อแบบเขย่า
7. Gas Detection Equipment
8. Gas Chromatography
9. Gas tight syringe

3.4.2 การทดลองช่วงที่ 2 และ 3

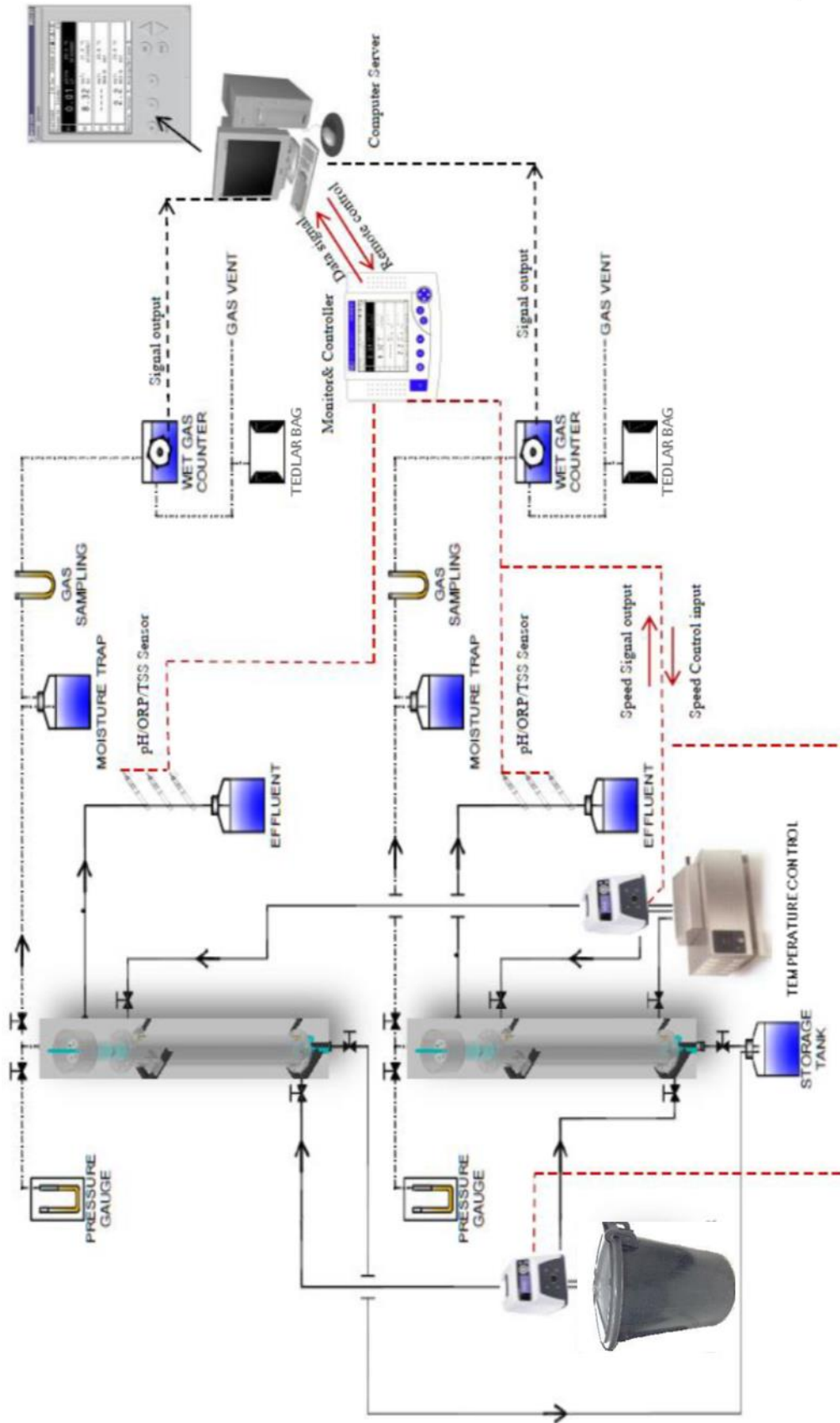
ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์หลักคือ ชุดอุปกรณ์ระบบยูเอเอสพี ซึ่งมีส่วนประกอบดังนี้

3.4.2.1 ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสพี

เป็นถังปฏิกรณ์ทรงสูงทำด้วยวัสดุอะคริลิกใส 2 ชั้น โดยชั้นในเป็นส่วนเกิดปฏิกิริยา ชั้นนอกเป็นส่วนควบคุมอุณหภูมิด้วยการหล่อน้ำ ขนาดถังปฏิกรณ์ในส่วนเกิดปฏิกิริยามีความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 90 เซนติเมตร หนา 3 มิลลิเมตร ตั้งติดกับโครงเหล็ก ปริมาตรบรรจุน้ำ 10 ลิตร ดังแสดงในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 แบบจำลองขนาดถังยูเอเอสพี
(หน่วยความยาวมิลลิเมตร)



ภาพที่ 3.3 แผนภาพชุดอุปกรณ์ระบบยูเอเอสบี

3.4.2.2 เครื่องสูบน้ำ

เครื่องสูบน้ำที่ใช้เป็นชนิดดูดจ่ายน้ำแบบปริดท่อ (Peristaltic pump) มีหน้าจอแสดงผลแบบตัวเลข (Graphic LCD) สามารถวัดอัตราการไหลช่วง 0.006 ถึง 3400 มิลลิลิตรต่อนาที มีความแม่นยำในการปรับอัตราเร็วรอบไม่ต่ำกว่า $\pm 0.1\%$ มีหัวปั๊มจำนวน 2 หัว โดยการใช้งานจะใช้ 1 เครื่องต่อ 1 ถังปฏิกรณ์ เพื่อสูบน้ำเสียป้อนเข้าระบบและสูบน้ำหล่อถังเพื่อควบคุมอุณหภูมิ ยี่ห้อที่ใช้คือ Masterflex ดังแสดงในภาพที่ 3.4

ในการใช้เครื่องสูบน้ำสำหรับการทดลองนี้ จะใช้ทั้งหมด 3 เครื่อง โดยอีก 1 เครื่องจะใช้ในการสูบน้ำเสียเพื่อเวียนน้ำเพิ่มภายในถังปฏิกรณ์



ภาพที่ 3.4 เครื่องสูบน้ำเสียแบบดูดจ่ายน้ำแบบปริดสาย (Peristaltic pump)

3.4.2.3 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)

อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ใช้ควบคุมอุณหภูมิน้ำที่ 35 องศาเซลเซียส และดูดจ่ายน้ำเวียนผ่านชั้นนอกของถังปฏิกรณ์ เพื่อรักษาอุณหภูมิของถังปฏิกรณ์ให้คงที่ตลอดการทดลอง

3.4.2.4 ถังพักน้ำเสีย

- ถังพักน้ำเสียก่อนเข้าระบบ ใช้ถังพลาสติกสีดำ ขนาด 60 ลิตร จำนวน 2 ถัง
- ถังพักน้ำทิ้งออกจากระบบ ใช้ถังสแตนเลสปริมาตรความจุ 20 ลิตร จำนวน 2 ถัง พร้อมติดตั้งเครื่องวัดของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) ทั้งสองถัง

3.4.2.5 เครื่องวัดอัตราการไหลและปริมาตรก๊าซ (Gas meter)

เป็นเครื่องวัดอัตราการไหลและปริมาตรของก๊าซ โดยใช้หลักการทำงาน นำก๊าซไหลผ่านตัวกลางที่เป็นของเหลว ทำงานร่วมกับระบบ Counting Mechanism แสดงผลอัตราการไหลและปริมาตร แสดงผลเป็นตัวเลข สามารถวัดค่าอัตราการไหล (Flow rate) ได้ตั้งแต่ 1-1,000 มิลลิลิตร / ชั่วโมง มีค่าความผิดพลาดในการวัดค่าอัตราการไหลที่ $\pm 3\%$ และสามารถควบคุมการทำงานผ่าน Computer โดยใช้ Software ได้ ยี่ห้อที่เลือกใช้คือ Ritter Type MGC-1 PMMA ดังแสดงในภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 เครื่องวัดอัตราการไหลและปริมาตรก๊าซ (Gas meter)

3.4.2.6 เครื่องวัดคุณภาพน้ำแบบหลายพารามิเตอร์

เป็นเครื่องยี่ห้อ Multi 3430 สามารถวัดค่าพีเอชและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (ORP) ภายในถึงปฏิกิริยา สามารถวัดค่าพีเอชได้ 0.000 ถึง 14.000 ค่าความถูกต้องไม่เกิน ± 0.004 และสามารถวัดค่าอุณหภูมิได้ที่ 0 – 80 องศาเซลเซียส ค่าความถูกต้องไม่เกิน ± 0.2 องศาเซลเซียส วัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ -1200.0 มิลลิโวลต์ ถึง 1200.0 มิลลิโวลต์ ค่า ความถูกต้องไม่เกิน ± 0.2 มิลลิโวลต์ ดังแสดงในภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 เครื่องวัดค่าพีเอช โออาร์พี และอุณหภูมิ

3.4.2.7 เครื่องวัดปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS)

เป็นเครื่องวัดของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) ในระบบ ซึ่งจะติดตั้งไว้ในถังพักน้ำทิ้งขาออก เป็นเครื่องยี่ห้อ IQ Sensor Net ซึ่งสามารถวัดค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ได้ตลอดระยะเวลาการทดลองทำให้สามารถวิเคราะห์สมบัติน้ำเสียขาออกได้ง่ายขึ้น ลักษณะและการติดตั้งดังแสดงในภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 ลักษณะและการติดตั้งเครื่องวัดปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS)

เครื่องมือและอุปกรณ์ระบบยูเอเอสบีได้ติดตั้งไว้ภายในห้องปฏิบัติการ ดังภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 ระบบยูเอเอสบีที่ใช้ในการทดลอง

3.5 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.5.1 การทดลองช่วงที่ 1

ในการทดลองช่วงที่ 1 เป็นการทดลองแบบแบตช์ (Batch) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของโซเดียมโมลิบเดตและการเพิ่มปริมาณซัลเฟตต่อการยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบไม่ใช้ออกซิเจน ทดลองในขวดซีรัมขนาด 1,000 มิลลิลิตร ดังแสดงในตารางที่ 3.4

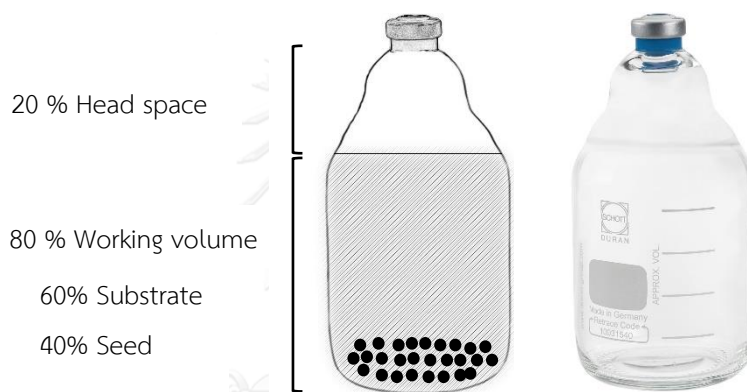
ตารางที่ 3.4 แผนการทดลองช่วงที่ 1

อัตราส่วนซีโอดี ต่อซัลเฟต	การเติมโซเดียมโมลิบเดต (มิลลิโมลาร์)				
	ขวดที่ 1	ขวดที่ 2	ขวดที่ 3	ขวดที่ 4	ขวดที่ 5
100:1	-	0.5	1.0	1.5	2.0
50:1	-	0.5	1.0	1.5	2.0
20:1	-	0.5	1.0	1.5	2.0
15:1	-	0.5	1.0	1.5	2.0

มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. กำหนดปริมาตรการทำงานเท่ากับร้อยละ 80 เต็มเม็ดตะกอนจุลินทรีย์จากบริษัท เสริมสุข (มหาชน) จำกัด โดยกำหนดค่าของแข็งแขวนลอยระเหยได้ (VSS) ของจุลินทรีย์ในระบบเท่ากับร้อยละ 2.5 จากนั้นเติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีส่วนประกอบดังตารางที่ 4.1 มีอัตราส่วนน้ำเสียต่อเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เท่ากับ 60:40 เต็มโซเดียมโมลิบเดทตามความเข้มข้นที่ต้องการศึกษา ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 7.0 ด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) หรือ โซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) (Speece, 1983)

2. ใส่ก๊าซออกซิเจนในขวดด้วยก๊าซผสมไนโตรเจนต่อคาร์บอนไดออกไซด์ 80:20 ปิดระบบด้วยจุกยางและฝาปิดขวด นำไปป่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เขย่าที่ 100 รอบต่อนาที วัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นทุกวันและวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆตามหัวข้อ 3.1.1



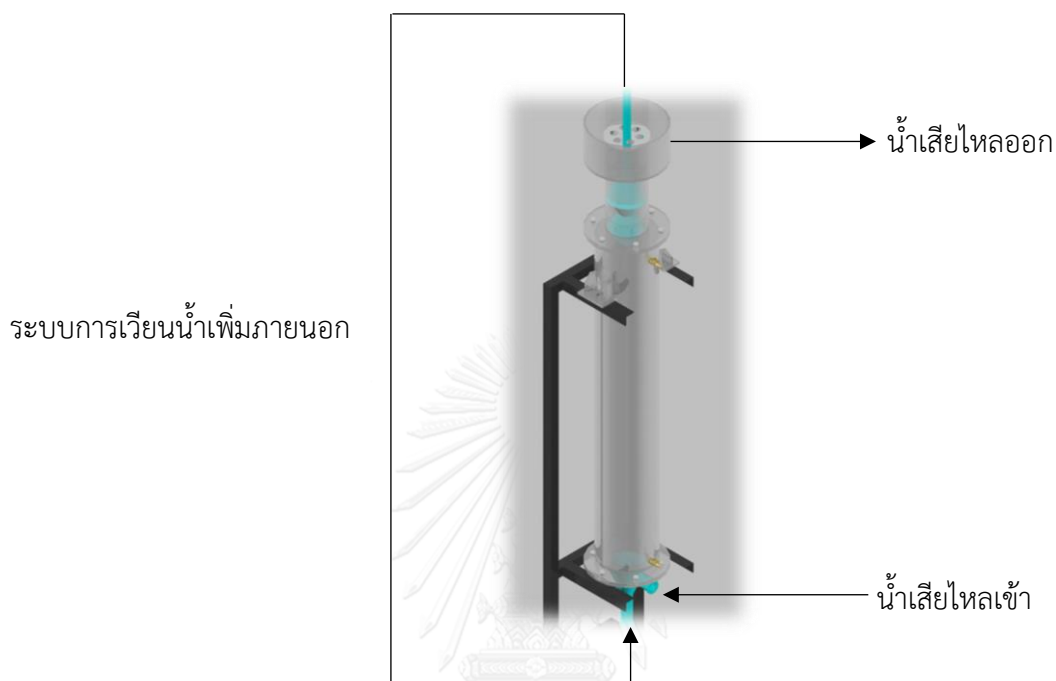
ภาพที่ 3.9 ส่วนประกอบของชุดการทดลองระบบไม้ออกซิเจนแบบแบดซ์

3.5.2 การทดลองช่วงที่ 2

3.5.2.1 การเดินระบบ

การเดินระบบยูเอเอสพีจะทำการทดลองพร้อมกันทั้งสองถัง คือ ชุดทดลองและชุดควบคุม เริ่มเดินระบบ (Start up) โดยการเติมเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ประมาณร้อยละ 30 ของถัง ป้อนน้ำเสียจากความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้นจาก 1,000 2,000 3,000 4,000 และ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยพิจารณาให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงกว่าร้อยละ 80 ควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้ กำหนดค่าเวลาพัก (Hydraulic Retention Time ; HRT) เท่ากับ 12 ชั่วโมง ป้อนน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 20 ลิตรต่อวัน กำหนดความเร็วน้ำไหลขึ้นภายในถังเท่ากับ 1 เมตรต่อชั่วโมง (Shayegan และคณะ, 2005) ทำให้ภายในถังมีอัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 188.4 ลิตรต่อวัน มีการติดตั้งระบบเวียนน้ำเพิ่มในระบบ 168.4 ลิตรต่อวัน โดยติดตั้งระบบเวียนน้ำภายนอก ควบคุมค่าพีเอช

ในระบบเท่ากับ 6.8-7.5 ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส ทำการทดลองจนระบบเสถียรเป็นเวลา 70 วัน การวิเคราะห์พารามิเตอร์ในการทดลองทำดังข้อ 3.1.2



ภาพที่ 3.10 ลักษณะการเวียนน้ำเพิ่มภายนอกระบบ

3.5.2.2 การเติมโซเดียมโพลิบเดทและการปรับอัตราส่วนซีโอติต่อซัลเฟต

สำหรับการเติมโซเดียมโพลิบเดทเพื่อยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ จะมีการคำนวณและเติมสารดังกล่าวในรูปแบบผงลงในถังพักน้ำเสียขาเข้าของชุดทดลอง ขณะที่ถังชุดควบคุมจะไม่มี การเติม การเติมโซเดียมโพลิบเดทมีการทดลองเติมแบบต่อเนื่องและเติมแบบเป็นรอบ กล่าวคือ การเติมแบบต่อเนื่อง ทำโดยเติมพร้อมกับการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ทุกครั้งของการทดลอง ส่วนการเติมแบบเป็นรอบ ทำโดยเติมเพียงครั้งแรกของการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์และติดตามผลการทดลองต่อไป ซึ่งความเข้มข้นของโซเดียมโพลิบเดทจะใช้ค่าที่ได้จากการทดลองช่วงที่ 1 โดยจะเริ่มเติมเมื่อระบบเสถียร นอกจากนั้น มีการแบ่งการทดลองเป็นระยะการทดลอง เพื่อศึกษาถึงความเข้มข้นของปริมาณซัลเฟตที่เปลี่ยนแปลงต่อประสิทธิภาพการยับยั้งไฮโดรเจนซัลไฟด์ของโซเดียมโพลิบเดท ดังแสดงในตารางที่ 3.5 ทำการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ของทั้งสองถัง ดังข้อ 3.1.2

ตารางที่ 3.5 แผนการทดลองช่วงที่ 2

ระยะที่	วันที่	อัตราส่วน ซีโอดีต่อซัลเฟต	การเติมโซเดียมโมลิบเดท (มิลลิโมลาร์)	
			ถังที่ 1	ถังที่ 2
1	1-10	100:1	-	0.5, เติมต่อเนื่อง
2	11-20	50:1	-	1.0, เติมต่อเนื่อง
3	21-30	20:1	-	1.5, เติมต่อเนื่อง
4	31-40	15:1	-	2.0, เติมต่อเนื่อง
5	41-60	50:1	-	1.0, เติมเป็นรอบ

หมายเหตุ ความเข้มข้นของโซเดียมโมลิบเดทที่ใช้เติม จะเลือกค่าที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 1 มาใช้ในการทดลองช่วงนี้

3.5.3 การทดลองช่วงที่ 3

เป็นการทดลองต่อเนื่องจากการทดลองช่วงที่ 2 โดยเปลี่ยนเป็นน้ำเสียจริงจากฟาร์มสุกร ซึ่งมีค่าซีโอดี 2,000-5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งนี้มีการศึกษาลักษณะน้ำเสียก่อนป้อนเข้าระบบและเดินระบบดังกล่าวทดลองช่วงที่ 2 นอกจากนี้ มีการเติมโซเดียมโมลิบเดทไปพร้อมกับการป้อนน้ำเสียจริงเข้าระบบ แบ่งการทดลองเป็นตอน โดยมีการเติมสารดังกล่าวแบบต่อเนื่องและเติมแบบเป็นรอบ ดังแสดงในตารางที่ 3.6 เปรียบเทียบการทดลองทั้งสองชุดและติดตามวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ ดังข้อ 3.2.1

ตารางที่ 3.6 แผนการทดลองช่วงที่ 3

ระยะที่	วันที่	แหล่งน้ำเสีย	การเติมโซเดียมโมลิบเดท (มิลลิโมลาร์)	
			ถังที่ 1	ถังที่ 2
1	1-10	ฟาร์มสุกร	-	0.5, เติมต่อเนื่อง
2	11-20	ฟาร์มสุกร	-	0.5, เติมเป็นรอบ

หมายเหตุ ความเข้มข้นของโซเดียมโมลิบเดทที่ใช้เติม จะเลือกค่าที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 2 มาใช้ในการทดลองนี้

3.6 การเก็บและวิธีวิเคราะห์ตัวอย่าง

การทดลองครั้งที่ 1

ตารางที่ 3.7 พารามิเตอร์ วิธีวิเคราะห์และความถี่ในการเก็บตัวอย่าง

ตัวแปร	วิธีวิเคราะห์	ความถี่
ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H ₂ S)	Gas Chromatography	A
สัดส่วนมีเทน	Gas Chromatography	A
ปริมาณก๊าซชีวภาพ	Gas tight syringe	A
ค่าพีเอช (pH)	pH Meter	B
ซีโอดี (COD)	Close Reflux	B
ซัลเฟต (SO ₄ ²⁻)	Turbidimetric Method	B

หมายเหตุ

A คือ ทุกวัน

B คือ ก่อนและหลังการทดลอง

การทดลองช่วงที่ 2 และ 3

ตารางที่ 3.8 พารามิเตอร์ วิธีวิเคราะห์และความถี่ในการเก็บตัวอย่าง

ตัวแปร	วิธีวิเคราะห์	ความถี่
พีเอช (pH)	เครื่อง Multi 3430	A
อุณหภูมิ	เครื่อง Multi 3430	A
โอรพี (ORP)	เครื่อง Multi 3430	A
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS)	เครื่อง IQ Sensor	A
ปริมาณก๊าซ	Gas meter	A
ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H ₂ S)	Gas Chromatography	A
สัดส่วนมีเทน	Gas Chromatography	A
ซีโอดี (COD)	Close Reflux	B
กรดไขมันระเหย (VFA)	Direct Titration Method	B
สภาพต่างทั้งหมด (Alk _{total})	Direct Titration Method	B
ซัลเฟต (SO ₄ ²⁻)	Turbidimetric Method	B
ซัลไฟด์ (S ²⁻)	Iodometric Method	B

หมายเหตุ

A คือ ทุกวัน

B คือ สัปดาห์ละ 3 ครั้ง

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

4.1 ผลการทดลองช่วงที่ 1 การยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยโซเดียมโมลิบเดตในระบบแบบแบตช์

การทดลองนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบแบบไม่ใช้อากาศโดยโซเดียมโมลิบเดต ที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตต่างๆ ได้แก่ 100:1 50:1 20:1 และ 15:1 ใช้ความเข้มข้นโซเดียมโมลิบเดต 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 มิลลิโมลาร์ ทดสอบในทุกอัตราส่วนดังกล่าว ดังแสดงในตารางที่ 3.4 โดยการทดลองนี้ จะเลือกค่าความเข้มข้นโซเดียมโมลิบเดตที่สามารถยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ต่ำกว่า 20 พีพีเอ็ม ไปใช้ในการทดลองช่วงที่ 2 ต่อไป

4.1.1 ผลการทดลองด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 100:1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองปรับอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 100:1

พารามิเตอร์		การเติม Na ₂ MoO ₄ (มิลลิโมลาร์)				
		ชุดควบคุม	0.5	1.0	1.5	2.0
ประสิทธิภาพกำจัดซีโอดี (ร้อยละ)		91.94	92.00	92.06	91.68	91.84
ประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟต (ร้อยละ)		69.58	10.36	7.77	6.47	5.50
สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ค่าสูงสุด	57.14	55.36	63.26	56.40	59.94
	ค่าต่ำสุด	7.39	6.49	8.79	4.53	5.33
ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ค่าสูงสุด	472	562	572	600	584
	ค่าต่ำสุด	10	5	8	5	6
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	ค่าสูงสุด	1200	6	0	0	0
	ค่าต่ำสุด	5	0	0	0	0
ค่าพีเอช	ก่อน	7.005	7.005	7.005	7.005	7.005
	หลัง	7.113	7.011	7.095	7.062	7.011

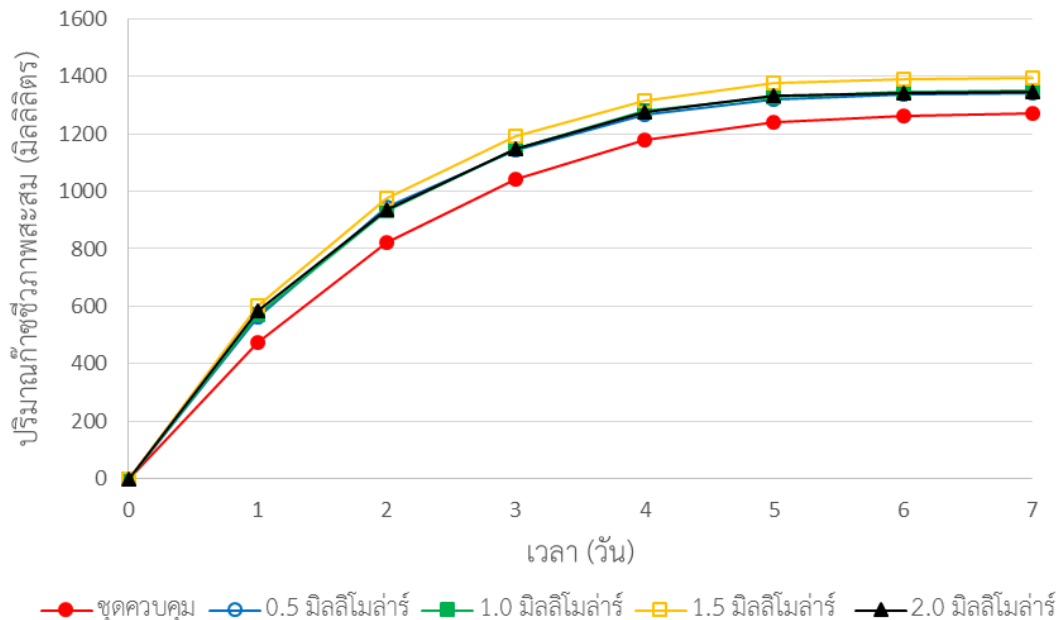
จากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าชุดทดลองที่ปรับอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 100:1 ในชุดควบคุม ชุดที่เติมโซเดียมโมลิบเดต 0.5 1.0 1.5 และ 2 มิลลิโมลาร์ มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีร้อยละ 91.94 92.00 92.06 91.68 และ 91.84 ตามลำดับ ขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตของการ

ทดลองในชุดควบคุมและชุดที่เติมโซเดียมโมลิบเดท 0.5 1.0 1.5 และ 2 มิลลิโมลาร์ คือ ร้อยละ 69.58 10.36 7.77 6.47 และ 5.50 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อมีการเติมโซเดียมโมลิบเดท จะทำให้ระบบมีการใช้ซัลเฟตได้น้อยลง นอกจากนี้ พีเอชของระบบ หลังการทดลองสิ้นสุด มีค่า 7.113 7.011 7.095 7.062 และ 7.011 ตามลำดับ

4.1.1.1 ก๊าซชีวภาพ

จากภาพที่ 4.1 พบว่า การทดลองในชุดควบคุมและชุดที่เติมโซเดียมโมลิบเดทเข้มข้น 0.5 1.0 1.5 และ 2 มิลลิโมลาร์ มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม 1,273 1,343 1,352 1,394 และ 1,347 มิลลิลิตร ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าในชุดควบคุมและชุดที่เติมโซเดียมโมลิบเดทเกิดก๊าซชีวภาพใกล้เคียงกัน แสดงว่าการเติมโซเดียมโมลิบเดทในความเข้มข้นดังกล่าวไม่เป็นยับยั้งการเกิดก๊าซในระบบ

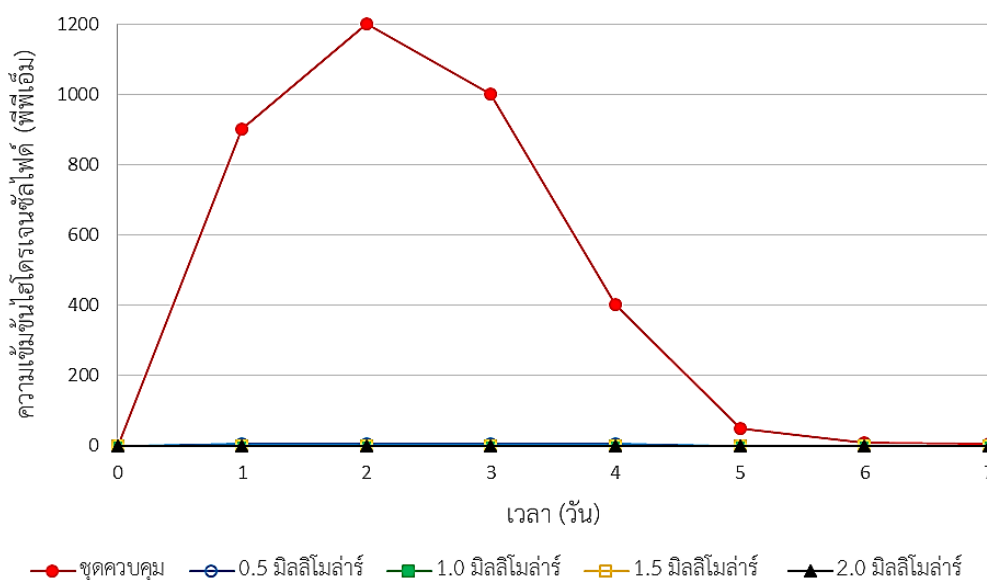
จากงานวิจัยของ Patidar และ Tare (2005) ศึกษาความประสิทธิภาพของโซเดียมโมลิบเดท ในต่อการทำงานของแบคทีเรียผลิตมีเทนและแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต พบว่า การเติมโซเดียมโมลิบเดทต่ำกว่า 3 มิลลิโมลาร์ ไม่มีผลยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน



ภาพที่ 4.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในชุดการทดลองอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 100:1

4.1.1.2 ไฮโดรเจนซัลไฟด์

จากภาพที่ 4.2 พบว่า ในชุดควบคุม มีการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงถึง 1,200 พีพีเอ็ม ในวันที่สองของการทดลอง ขณะที่ชุดที่มีการเติมโซเดียมโมลิบเดตความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์เกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ 6 พีพีเอ็ม นอกจากนั้น ชุดอื่นๆไม่มีไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดขึ้น



ภาพที่ 4.2 ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ในชุดการทดลองอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 100:1

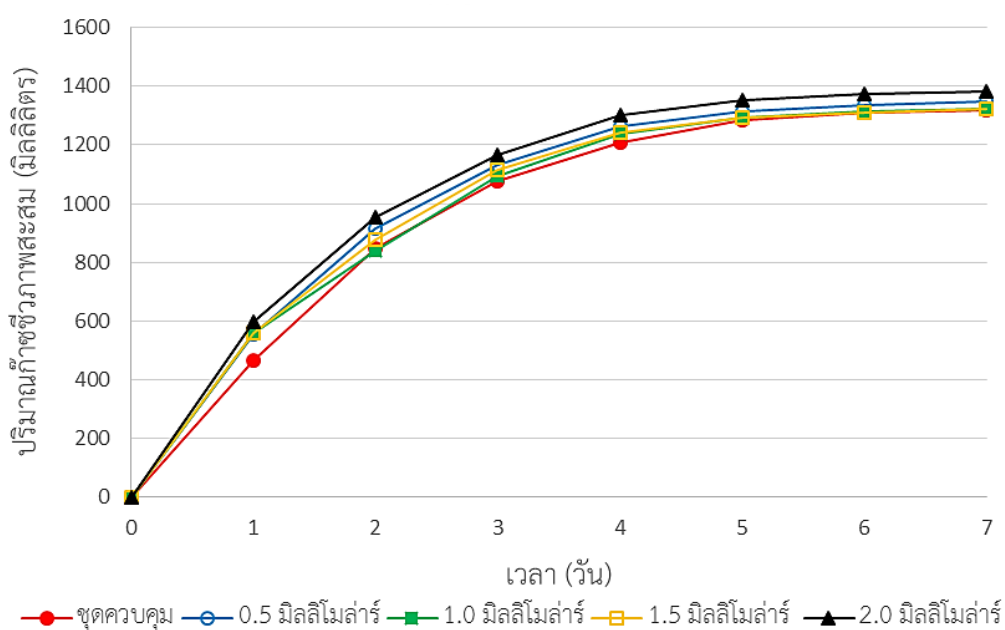
4.1.2 ผลการทดลองด้วยอัตราส่วนอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 50:1

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 50:1

พารามิเตอร์	การเติม Na_2MoO_4 (มิลลิโมลาร์)					
	ชุดควบคุม	0.5	1.0	1.5	2.0	
ประสิทธิภาพกำจัดซีโอดี (ร้อยละ)	91.93	91.87	92.82	92.00	92.13	
ประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟต (ร้อยละ)	51.70	14.80	6.12	4.25	4.08	
สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ค่าสูงสุด	55.98	60.76	56.87	58.86	58.89
	ค่าต่ำสุด	8.45	10.35	9.57	6.45	10.49
ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ค่าสูงสุด	465	554	560	558	595
	ค่าต่ำสุด	7	10	8	10	8
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	ค่าสูงสุด	1800	300	10	0	0
	ค่าต่ำสุด	0	0	0	0	0
ค่าพีเอช	ก่อน	7.002	7.002	7.002	7.002	7.002
	หลัง	7.124	7.103	7.021	6.985	7.023

จากตารางที่ 4.2 พบว่า ชุดทดลองที่ปรับอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 50:1 ในชุดควบคุม ชุดที่เติมโซเดียมโมลิบเดท 0.5 1.0 1.5 และ 2 มิลลิโมลาร์ มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ร้อยละ 91.93 91.87 92.82 92.00 และ 92.13 ตามลำดับ ขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟต ของการทดลองของชุดควบคุม ชุดที่เติมโซเดียมโมลิบเดท 0.5 1.0 1.5 และ 2 มิลลิโมลาร์ คือ ร้อยละ 51.70 14.80 6.12 4.25 และ 4.08ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อมีการเติมโซเดียมโมลิบเดท จะทำให้ระบบมีการใช้ซัลเฟตได้น้อยลง นอกจากนี้ พีเอชของระบบ หลังการทดลองสิ้นสุด มีค่า 7.124 7.103 7.021 6.985 และ 7.023 ตามลำดับ

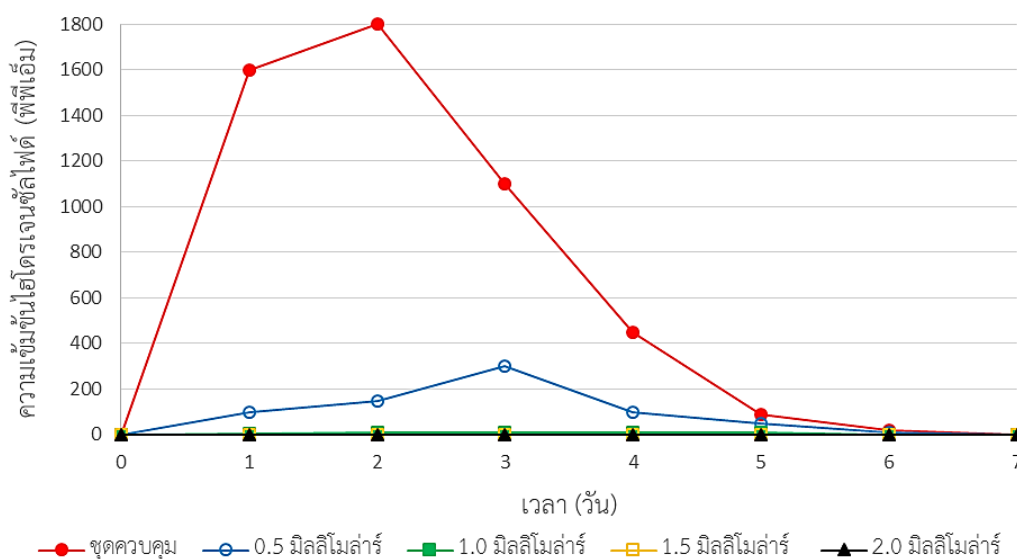
4.1.2.1 ก๊าซชีวภาพ



ภาพที่ 4.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในชุดการทดลองอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 50:1

จากภาพที่ 4.3 พบว่า การทดลองในชุดควบคุม ชุดที่เติมโซเดียมโมลิบเดท 0.5 1.0 1.5 และ 2 มิลลิโมลาร์ มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม 1,317 1,346 1,324 1,321 และ 1,383 มิลลิลิตรตามลำดับ จะเห็นได้ว่าในทุกๆชุดทดลองเกิดก๊าซชีวภาพใกล้เคียงกันซึ่งแสดงว่าการเติมโซเดียมโมลิบเดทที่ความเข้มข้น 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 มิลลิโมลาร์ ไม่ยับยั้งการสร้างก๊าซชีวภาพ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Predicala และคณะ (2008) ซึ่งศึกษาการใช้โซเดียมโมลิบเดทเพื่อยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในมูลสุกร พบว่า ความเข้มข้น 2 มิลลิโมลาร์ สามารถยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์และไม่ยับยั้งการเกิดก๊าซชีวภาพเมื่อเทียบกับชุดควบคุม

4.2.1.2 ไฮโดรเจนซัลไฟด์



ภาพที่ 4.4 ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ในชุดการทดลองอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 50:1

จากภาพที่ 4.4 พบว่า ในชุดควบคุม มีการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงสุดถึง 1,800 พีพีเอ็ม ชุดที่มีการเติมโซเดียมโมลิบเดตความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ เกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงสุด 300 มิลลิโมลาร์ ชุดที่มีการเติมโซเดียมโมลิบเดตความเข้มข้น 1.0 มิลลิโมลาร์ เกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงสุด 10 มิลลิโมลาร์ นอกจากนี้ ชุดการทดลองอื่นๆไม่มีไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดขึ้น

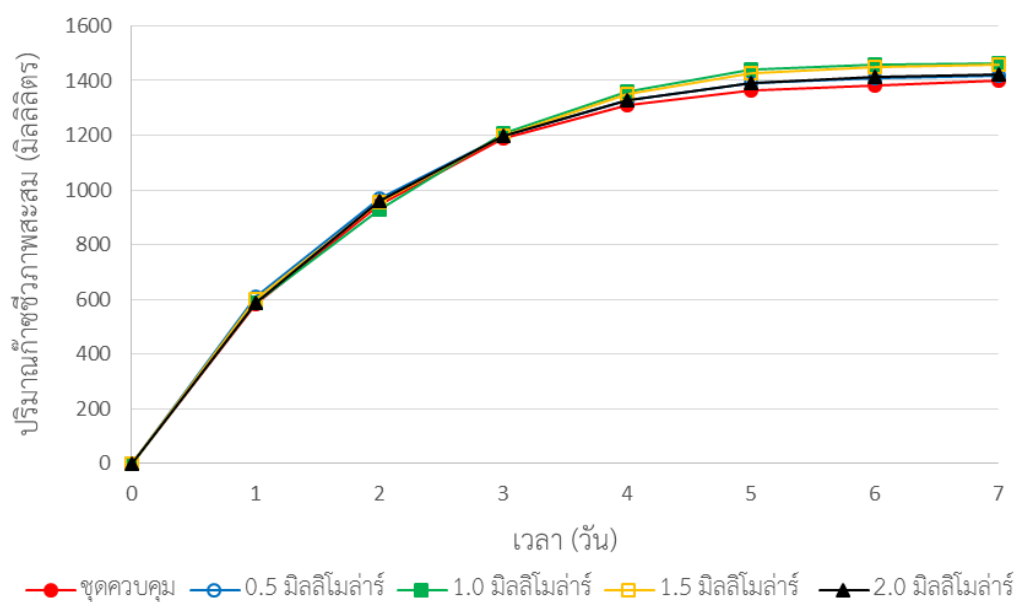
4.1.3 ผลการทดลองด้วยอัตราส่วนอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 20:1

จากตารางที่ 4.3 พบว่า ชุดทดลองที่ปรับอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 20:1 ในชุดควบคุม ชุดที่เติมโซเดียมโมลิบเดต 0.5 1.0 1.5 และ 2 มิลลิโมลาร์ มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ร้อยละ 92.60 92.99 92.51 93.50 และ 92.67 ตามลำดับ ขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟต ของการทดลองของชุดควบคุม ชุดที่เติมโซเดียมโมลิบเดต 0.5 1.0 1.5 และ 2 มิลลิโมลาร์ คือ ร้อยละ 44.00 8.33 7.39 2.27 1.58 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อมีการเติมโซเดียมโมลิบเดต จะทำให้ระบบมีการใช้ซัลเฟตได้น้อยลง นอกจากนี้ พีเอชของระบบ หลังการทดลองสิ้นสุด มีค่า 7.123 7.042 7.045 7.032 และ 7.075 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 20:1

พารามิเตอร์	การเติม Na_2MoO_4 (มิลลิโมลาร์)					
	ชุดควบคุม	0.5	1.0	1.5	2.0	
ประสิทธิภาพกำจัดซีโอดี (ร้อยละ)	92.60	92.99	92.51	93.50	92.67	
ประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟต (ร้อยละ)	44.00	8.33	7.39	2.27	1.58	
สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ค่าสูงสุด	58.35	52.40	60.55	54.49	55.70
	ค่าต่ำสุด	10.57	5.50	4.69	4.86	2.45
ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ค่าสูงสุด	582	611	585	600	589
	ค่าต่ำสุด	18	8	5	10	8
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	ค่าสูงสุด	2400	350	70	10	0
	ค่าต่ำสุด	80	0	0	0	0
ค่าพีเอช	ก่อน	7.001	7.001	7.001	7.001	7.001
	หลัง	7.123	7.042	7.045	7.032	7.075

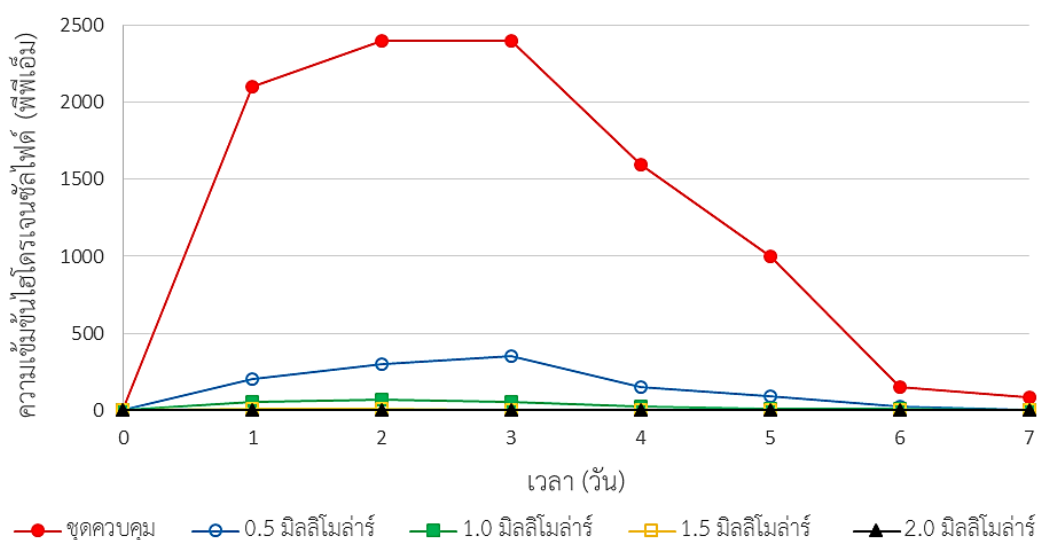
4.1.3.1 ก๊าซชีวภาพ



ภาพที่ 4.5 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในชุดการทดลองอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 20:1

จากภาพที่ 4.5 พบว่า การทดลองในชุดควบคุม ชุดที่เติมโซเดียมโมลิบเดท 0.5 1.0 1.5 และ 2 มิลลิโมลาร์ มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม 1,402 1,419 1,462 1,459 และ 1,421 มิลลิลิตร ตามลำดับ

4.1.3.2 ไฮโดรเจนซัลไฟด์



ภาพที่ 4.6 ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ในชุดการทดลองอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 20:1

จากภาพที่ 4.6 พบว่า ในชุดควบคุม มีการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงสุดถึง 2,400 พีพีเอ็ม ชุดที่มีการเติมโซเดียมโมลิบเดทความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ เกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงสุด 350 มิลลิโมลาร์ ชุดที่มีการเติมโซเดียมโมลิบเดทความเข้มข้น 1.0 มิลลิโมลาร์ เกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงสุด 70 มิลลิโมลาร์ ชุดที่มีการเติมโซเดียมโมลิบเดทความเข้มข้น 1.5 มิลลิโมลาร์ เกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงสุด 10 มิลลิโมลาร์ นอกจากนั้น ชุดการทดลองอื่นๆไม่มีไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดขึ้น นั้นแสดงให้เห็นว่า เมื่อมีปริมาณซัลเฟตเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงขึ้น ทั้งยังต้องใช้โซเดียมโมลิบเดทในการยับยั้งก๊าซดังกล่าวมากขึ้นอีกด้วย ในการทดลองนี้ ความเข้มข้นโซเดียมโมลิบเดท 1.5 มิลลิโมลาร์ สามารถยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ต่ำกว่า 20 พีพีเอ็ม จึงเลือกค่าดังกล่าวเพื่อทดลองในช่วงที่ 2 ต่อไป

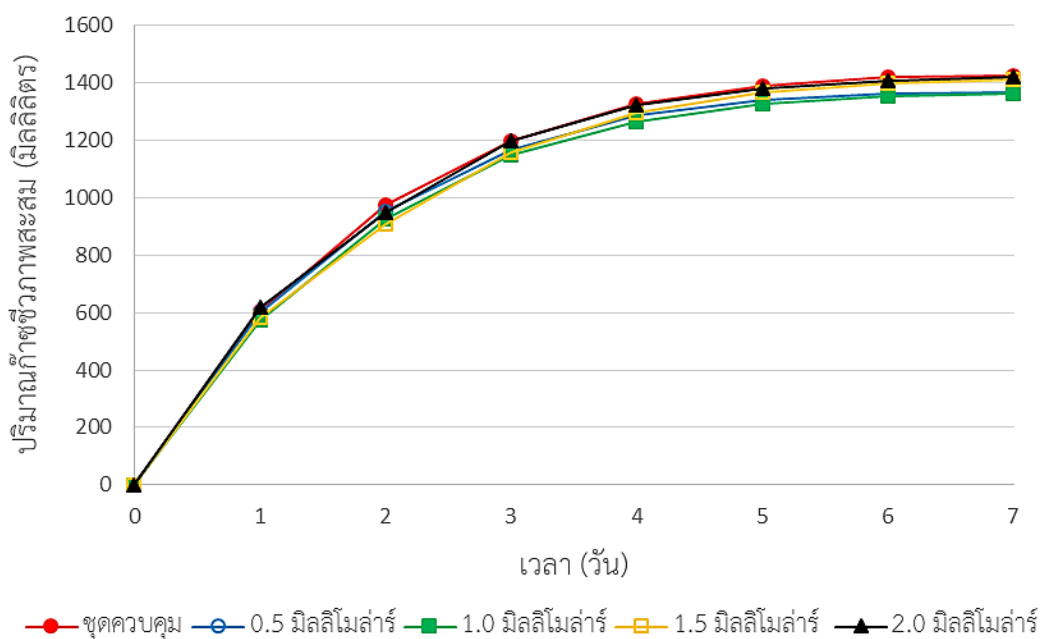
4.1.4 ผลการทดลองด้วยอัตราส่วนอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1

พารามิเตอร์	การเติม Na_2MoO_4 (มิลลิโมลาร์)					
	ชุดควบคุม	0.5	1.0	1.5	2.0	
ประสิทธิภาพกำจัดซีโอดี (ร้อยละ)	93.17	92.80	92.60	93.10	92.86	
ประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟต (ร้อยละ)	36.27	5.64	4.71	3.53	2.94	
สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ค่าสูงสุด	51.85	50.64	47.65	56.70	49.57
	ค่าต่ำสุด	6.66	7.93	6.65	3.59	9.08
ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ค่าสูงสุด	604	600	575	584	616
	ค่าต่ำสุด	5	7	5	12	14
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	ค่าสูงสุด	3200	400	250	60	0
	ค่าต่ำสุด	0	0	0	0	0
ค่าพีเอช	ก่อน	7.002	7.002	7.002	7.002	7.002
	หลัง	7.235	7.014	7.010	7.042	7.043

จากตารางที่ 4.4 พบว่า ชุดทดลองที่ปรับอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1 ในชุดควบคุม ชุดที่เติมโซเดียมโมลิบเดท 0.5 1.0 1.5 และ 2 มิลลิโมลาร์ มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ร้อยละ 93.17 92.80 92.60 93.10 และ 92.86 ตามลำดับ ขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟต ของการทดลองของชุดควบคุม ชุดที่เติมโซเดียมโมลิบเดท 0.5 1.0 1.5 และ 2 มิลลิโมลาร์ คือ ร้อยละ 36.27 5.64 4.71 3.53 และ 2.94 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อมีการเติมโซเดียมโมลิบเดท จะทำให้ระบบมีการใช้ซัลเฟตได้น้อยลง นอกจากนี้ พีเอชของระบบ หลังการทดลองสิ้นสุด มีค่า 7.235 7.044 7.01 7.042 7.043 ตามลำดับ

4.1.4.1 ก๊าซชีวภาพ

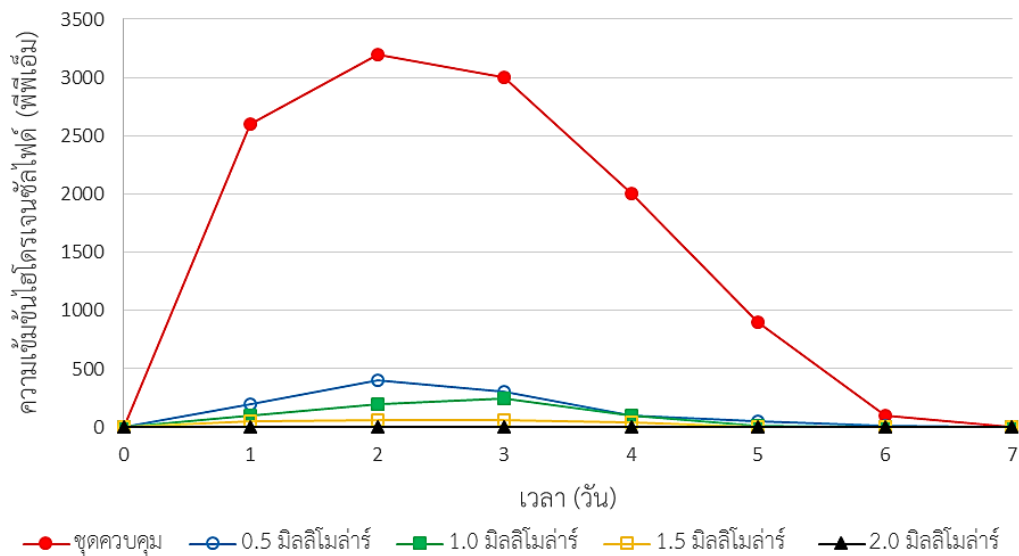


ภาพที่ 4.7 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในชุดการทดลองอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1

จากภาพที่ 4.7 พบว่า การทดลองในชุดควบคุม ชุดที่เติมโซเดียมโมลิบเดท 0.5 1.0 1.5 และ 2 มิลลิโมลาร์ มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม 1,425 1,368 1,360 1,409 และ 1,419 มิลลิลิตร ตามลำดับ

4.1.4.2 ไฮโดรเจนซัลไฟด์

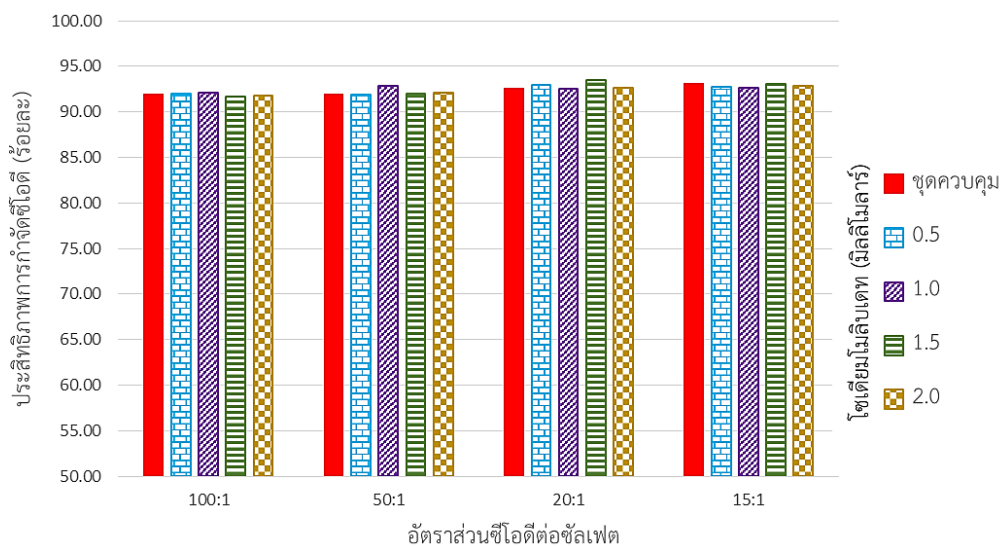
จากภาพที่ 4.8 พบว่า ในชุดควบคุม ชุดที่เติมโซเดียมโมลิบเดทความเข้มข้น 0.5 1.0 และ 1.5 มิลลิโมลาร์ มีไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดขึ้นสูงสุดถึง 3,200 400 250 และ 60 พีพีเอ็ม ตามลำดับ ส่วนในชุดการทดลองที่เติมโซเดียมโมลิบเดทความเข้มข้น 2.0 มิลลิโมลาร์ ไม่มีไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดขึ้น ในการทดลองนี้ ความเข้มข้นโซเดียมโมลิบเดท 2.0 มิลลิโมลาร์ สามารถยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้โดยสมบูรณ์ จึงเลือกค่าดังกล่าวเพื่อทดลองในช่วงที่ 2 ต่อไป



ภาพที่ 4.8 ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ในชุดการทดลองอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1

4.1.5 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี

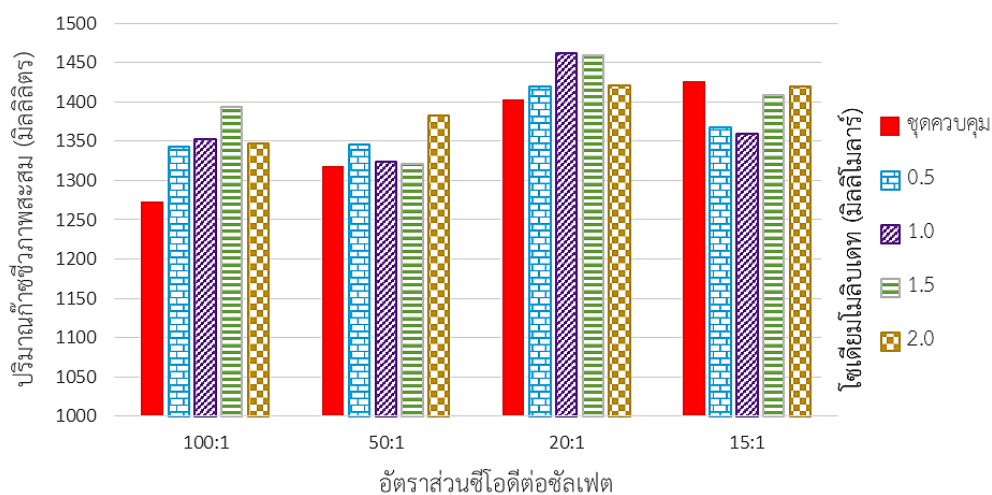
จากการทดลองช่วงที่ 1 เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเปรียบเทียบในทุกๆชุดทดลอง จะเห็นว่า ทุกชุดการทดลองมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงกว่าร้อยละ 90 และมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.9 นั้นแสดงให้เห็นว่าการเติมโซเดียมโพลิเบตความเข้มข้น 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 มิลลิโมลาร์ ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของจุลินทรีย์ในระบบแบบแบดซ์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Patidar และ Tare (2005) ทดลองยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบแบบแบดซ์ด้วยโซเดียมโพลิเบต พบว่า การใช้ความเข้มข้นโซเดียมโพลิเบต 0.75 - 2 มิลลิโมลาร์ ไม่ยับยั้งประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของระบบ



ภาพที่ 4.9 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีตลอดช่วงการทดลองช่วงที่ 1

4.1.6 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม

จากภาพที่ 4.10 เมื่อพิจารณาการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมตลอดช่วงที่ทดลองที่ 1 พบว่าที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 100 50 และ 20 ชุดการทดลองที่เติมโซเดียมโพลิเบตทุกความเข้มข้นมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงกว่าชุดควบคุม นั่นแสดงว่า การเติมโซเดียมโพลิเบตทุกความเข้มข้นที่ใช้ทดลองไม่ยับยั้งการเกิดก๊าซชีวภาพ ทั้งยังทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นอีกด้วย แต่เมื่อพิจารณาในชุดทดลองที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 15 จะเห็นว่าปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในชุดทดลองที่เติมโซเดียมโพลิเบตมีปริมาณต่ำกว่าชุดควบคุม ซึ่งอาจเกิดจากการเติมโซเดียมโพลิเบต 2.0 มิลลิโมลาร์มีผลยับยั้งการผลิตมีเทนของกลุ่มจุลินทรีย์ผลิตมีเทน จึงทำให้ก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นน้อยลงเมื่อเทียบกับชุดควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Predicala และคณะ (2008) ศึกษาผลของโซเดียมโพลิเบตในการยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยทดลองในขวดซีรัมระบบไม่ใช้ออกซิเจนขนาด 125 มิลลิลิตร พบว่า โซเดียมโพลิเบตความเข้มข้น 2 มิลลิโมลาร์ สามารถยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้เท่ากับ 10 ไมโครลิตรต่อลิตร ขณะที่ชุดควบคุมเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1,500 ไมโครลิตรต่อลิตร และเมื่อพิจารณาปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม พบว่ามีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นต่ำกว่าชุดควบคุม



ภาพที่ 4.10 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมตลอดช่วงการทดลองที่ 1

จากการทดลองช่วงที่ 1 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตในแต่ละการทดลอง ในการทดลองนี้ได้กำหนดค่าซีโอดีคงที่ เท่ากับ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และปรับค่าอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเป็น 100 50 20 และ 15 ตามลำดับ พบว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณซัลเฟตจะส่งผลให้เกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตสามารถใช้ซัลเฟตได้มากขึ้นและมีการแย่งใช้ซีโอดีกับจุลินทรีย์ผลิตมีเทน เมื่อพิจารณาสัดส่วนมีเทนจึงทำให้สัดส่วนมีเทนลดลงและสอดคล้องกับผลของการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ จะเห็นว่าเมื่อปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงขึ้น จะทำให้ค่าสัดส่วนมีเทนในระบบต่ำลงเช่นกัน

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาในด้านการนำก๊าซชีวภาพไปใช้งานจริง ในทางอุตสาหกรรมค่าความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ยอมรับได้ต่อการนำก๊าซชีวภาพไปใช้เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเครื่องปั่นไฟคือ 100 พีพีเอ็ม (สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย, 2554) ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาประสิทธิภาพของโซเดียมโมลิบเดตที่สามารถยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ต่ำที่สุดและใช้ความเข้มข้นสารดังกล่าวอย่างเหมาะสม ในแง่ของปริมาณเพื่อลดภาระเรื่องราคาของสารดังกล่าว ซึ่งจากการทดลองช่วงนี้พบว่า ค่าความเข้มข้นของโซเดียมโมลิบเดตที่สามารถยับยั้งไฮโดรเจนซัลไฟด์ในอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 100 50 20 และ 15 ได้แก่ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ ซึ่งแต่ละค่าความเข้มข้นสามารถยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ต่ำกว่า 20 พีพีเอ็ม ทั้งนี้จึงมีการพิจารณาค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้ต่ำกว่าค่าที่ยอมรับได้ในการใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการใช้งานจริง ผู้วิจัยจึงเลือกค่าความเข้มข้นของโซเดียมโมลิบเดตข้างต้น เพื่อใช้ในการทดลองช่วงที่ 2 และ 3 ต่อไป

4.2 ผลการทดลองช่วงที่ 2 การยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบยูเอเอสบีด้วยน้ำเสียสังเคราะห์

จากการทดลองช่วงที่ 1 พบว่า การปรับอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตลดลง (ปริมาณซัลเฟตเพิ่ม) ทำให้เกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงขึ้น การใช้โซเดียมโมลิบเดตเพื่อยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์จึงเพิ่มขึ้นด้วย จากการทดลองดังกล่าวทำให้สามารถเลือกค่าความเข้มข้นโซเดียมโมลิบเดตที่เหมาะสมมาใช้ทดลองต่อในช่วงการทดลองนี้

การทดลองช่วงที่ 2 เป็นการทดลองศึกษาประสิทธิภาพการยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบยูเอเอสบีด้วยน้ำเสียสังเคราะห์โดยโซเดียมโมลิบเดต ประกอบด้วย 2 ถังปฏิกรณ์ ถังแรกกำหนดเป็นชุดควบคุม ซึ่งไม่มีการเติมโซเดียมโมลิบเดต ถังที่ 2 กำหนดเป็นชุดทดลองซึ่งมีการเติมโซเดียมโมลิบเดตผสมลงในถังพักน้ำเสียขาเข้า โดยคำนวณความเข้มข้นตามปริมาณน้ำเสียภายในถัง

การทดลองช่วงนี้ แบ่งเป็น 5 ระยะการทดลอง โดยระยะที่ 1 ถึง 4 ทดลองเป็นเวลาระยะละ 10 วัน มีการเติมโซเดียมโมลิบเดตแบบต่อเนื่อง โดยเติมพร้อมกับการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ทุกครั้ง ส่วนระยะการทดลองที่ 5 ทดลองเป็นเวลา 20 วัน เติม โซเดียมโมลิบเดตแบบเป็นรอบ โดยการเติมพร้อมทั้งน้ำเสียสังเคราะห์ในครั้งแรกและติดตามผลการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ จึงเติมครั้งถัดไป ระยะการทดลองที่ 1 ถึง 5 ปรับอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 100 50 20 15 และ 50 ซึ่งคิดเป็นปริมาณซัลเฟต 50 100 250 333.33 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เติมโซเดียมโมลิบเดตระยะที่ 1 ถึง 5 ด้วยความเข้มข้น 0.5 1.0 1.5 2.0 และ 1.0 มิลลิโมลาร์ คิดเป็นความเข้มข้น 121 242 363 และ 484 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ การเติมโซเดียมโมลิบเดตแบบต่อเนื่องทำเพื่อศึกษาถึงความเป็นพิษต่อระบบ ส่วนการเติมแบบเป็นรอบทำเพื่อศึกษาผลการยับยั้งไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระยะยาวหลังจากหยุดเติม กำหนดค่าซีโอดีคงที่ตลอดการทดลอง คือ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร แผนการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.5

การเริ่มเดินระบบทำโดยปรับสภาพความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ ให้คุ้นเคยกับน้ำเสียสังเคราะห์เป็นเวลา 70 วัน โดยเริ่มเตรียมน้ำเสียด้วยความเข้มข้นซีโอดี 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการวัดค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีให้มีค่ามากกว่าร้อยละ 80 จากนั้นจึงปรับเพิ่มความเข้มข้นซีโอดีเป็น 2,000 3,000 4,000 และ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ ค.1 หลังจากระบบเสถียรจึงดำเนินการทดลองตามแผนต่อไป

4.2.1 ผลการทดลองการยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบยูเอเอสพีด้วยน้ำเสียสังเคราะห์

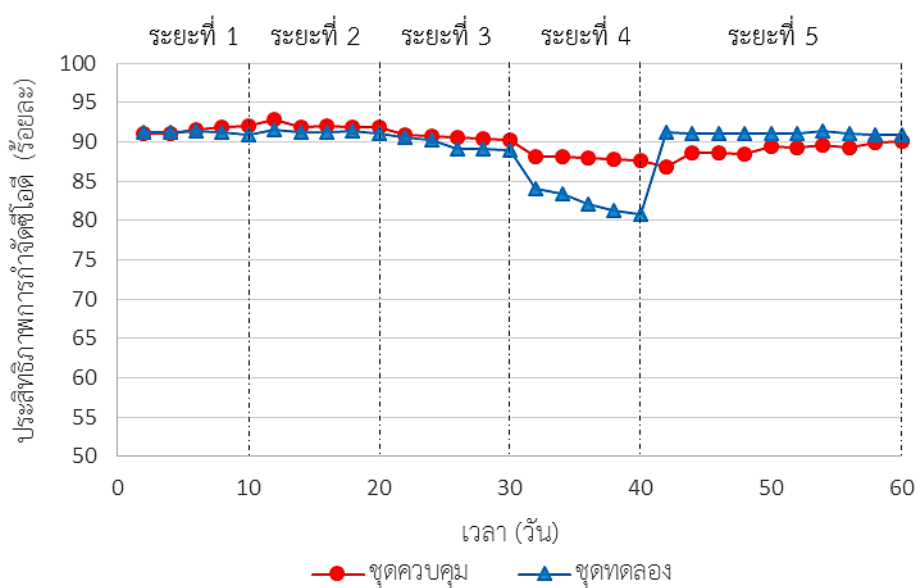
4.2.1.1 ซีไอดีและประสิทธิภาพการกำจัด

ตารางที่ 4.5 ค่าซีไอดีและประสิทธิภาพการกำจัดตลอดช่วงการทดลองที่ 2

ระยะที่	ซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ชุดควบคุม		ชุดทดลอง	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
1	ค่าต่ำสุด	4989	405	4992	439
	ค่าสูงสุด	5104	450	5186	466
	ค่าเฉลี่ย	5047	430	5099	451
	ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ย (ร้อยละ)	91.46		91.15	
2	ค่าต่ำสุด	5044	365	5103	431
	ค่าสูงสุด	5144	420	5225	464
	ค่าเฉลี่ย	5093	403	5167	451
	ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ย (ร้อยละ)	92.07		91.25	
3	ค่าต่ำสุด	5197	474	5288	495
	ค่าสูงสุด	5233	509	5355	591
	ค่าเฉลี่ย	5211	491	5324	554
	ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ย (ร้อยละ)	90.56		89.58	
4	ค่าต่ำสุด	5384	637	5521	886
	ค่าสูงสุด	5495	676	5688	1094
	ค่าเฉลี่ย	5427	655	5634	998
	ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ย (ร้อยละ)	87.92		82.28	
5	ค่าต่ำสุด	5022	515	5083	450
	ค่าสูงสุด	5167	672	5204	477
	ค่าเฉลี่ย	5098	561	5149	460
	ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ย (ร้อยละ)	88.97		91.05	

จากตารางที่ 4.5 พบว่า ระยะการทดลองที่ 1-5 ชุดควบคุมมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ร้อยละ 91.46 92.07 90.56 87.92 และ 88.97 ตามลำดับ ขณะที่ชุดทดลองมีประสิทธิภาพการกำจัด ซีโอดีร้อยละ 91.15 91.25 89.58 82.28 และ 91.05 ตามลำดับ จากการทดลองจะเห็นได้ว่าในชุด ควบคุมมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีลดลงเมื่อมีการลดอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต (ความเข้มข้น ซัลเฟตเพิ่มขึ้น) จากงานวิจัยของ Hu และคณะ (2015) ได้ทำการทดลองผลของอัตราส่วนซีโอดีต่อ ซัลเฟตในระบบยูเอเอสบี โดยลดอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต เป็น 20:1, 10:1, 5:1, 3:1, 1:1 และ 0.5:1 ตามลำดับ กำหนดอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 11.9 กรัมซีโอดี/ลิตร-วัน ทดลองเป็นเวลา 215 วัน พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีลดลงจากร้อยละ 89.1 เหลือเพียงร้อยละ 79.2 นั้นแสดง ให้เห็นว่า การลดอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตจะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีลดลง

ขณะเดียวกัน ชุดทดลองในระยะการทดลองที่ 4 ซึ่งมีการเติมโซเดียมโมลิบเดต 2.0 มิลลิ- โมลาร์ ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยร้อยละ 82.28 (ภาพที่ 4.11) ซึ่งเป็นไปได้ว่าการใช้ความ เข้มข้นโซเดียมโมลิบเดต 2.0 มิลลิโมลาร์ อาจยับยั้งประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี



ภาพที่ 4.11 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของช่วงการทดลองที่ 2

4.2.1.2 ซัลเฟตและประสิทธิภาพการกำจัด

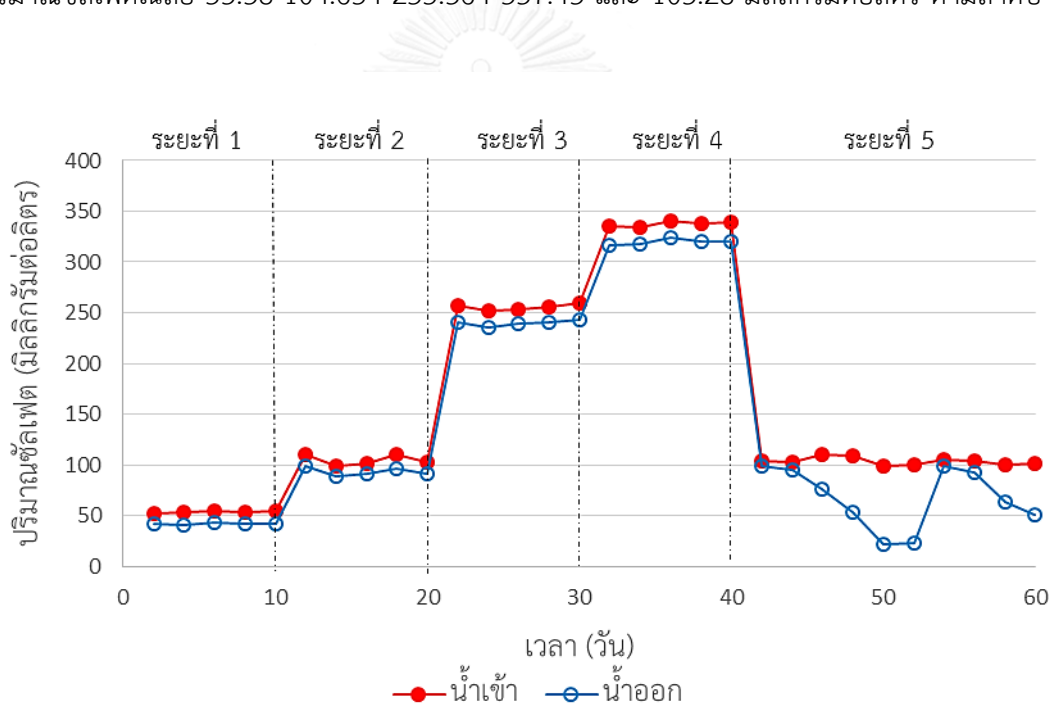
ตารางที่ 4.6 ค่าซัลเฟตและประสิทธิภาพการกำจัดตลอดการทดลองช่วงที่ 2

ระยะที่	ซัลเฟต (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ชุดควบคุม		ชุดทดลอง	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
1	ค่าต่ำสุด	48.5	12.7	52.2	45.2
	ค่าสูงสุด	54.6	16.3	55.1	46.8
	ค่าเฉลี่ย	51.46	14.44	53.38	46.08
	ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ย (ร้อยละ)	71.96		13.64	
2	ค่าต่ำสุด	96.4	21.7	99.36	88.45
	ค่าสูงสุด	107.4	29.8	110.03	98.26
	ค่าเฉลี่ย	102.04	25.24	104.65	93.33
	ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ย (ร้อยละ)	75.23		10.80	
3	ค่าต่ำสุด	247.6	135.4	251.76	235.19
	ค่าสูงสุด	257.2	148.5	259.42	243.01
	ค่าเฉลี่ย	252.7	141.56	255.36	239.74
	ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ย (ร้อยละ)	43.97		6.11	
4	ค่าต่ำสุด	329.8	164.7	334.47	316.94
	ค่าสูงสุด	340.6	171.2	340.64	323.82
	ค่าเฉลี่ย	333.86	168.14	337.43	319.90
	ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ย (ร้อยละ)	49.63		5.19	
5	ค่าต่ำสุด	98.8	27.5	98.8	21.9
	ค่าสูงสุด	115.85	30.1	110.5	99.1
	ค่าเฉลี่ย	106.62	28.83	103.28	67.41
	ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ย (ร้อยละ)	72.92		35.12	

จากการทดลองช่วงที่ 2 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งการเตรียมน้ำเสียดังกล่าว เตรียมตามปริมาณซัลเฟตในอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 100:1 50:1 20:1 และ 15:1 กำหนดค่าซีโอดี 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้มีค่าปริมาณซัลเฟตละลายน้ำคือ 50 100 250 และ 333.33 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แต่เนื่องจากในการทดลองนี้เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยน้ำประปา ซึ่งก่อนหน้านี้มีการเตรียมน้ำเสียและวัดปริมาณซัลเฟตละลาย พบว่า ค่าที่ได้มีค่าสูงกว่าที่ควรจะเป็น จึงสันนิษฐานว่า อาจมีซัลเฟตเจือปนจากแหล่งอื่น ดังนั้นผู้วิจัยจึงทดลองตรวจหาปริมาณซัลเฟตละลายในน้ำประปา พบว่า มีปริมาณซัลเฟตเฉลี่ย 25-30 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสันนิษฐานว่า ซัลเฟตที่ตรวจพบอาจเกิดจากกระบวนการผลิตน้ำประปาซึ่งมีการเติมสารส้มหรืออะลูมิเนียมซัลเฟต

($Al_2(SO_4)_3$) จากผลดังกล่าว ผู้วิจัยจึงมีการตรวจปริมาณซัลเฟตในน้ำประปา ก่อน แล้วจึงคำนวณค่าปริมาณซัลเฟตในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อให้ได้ค่าใกล้เคียงในการทดลอง

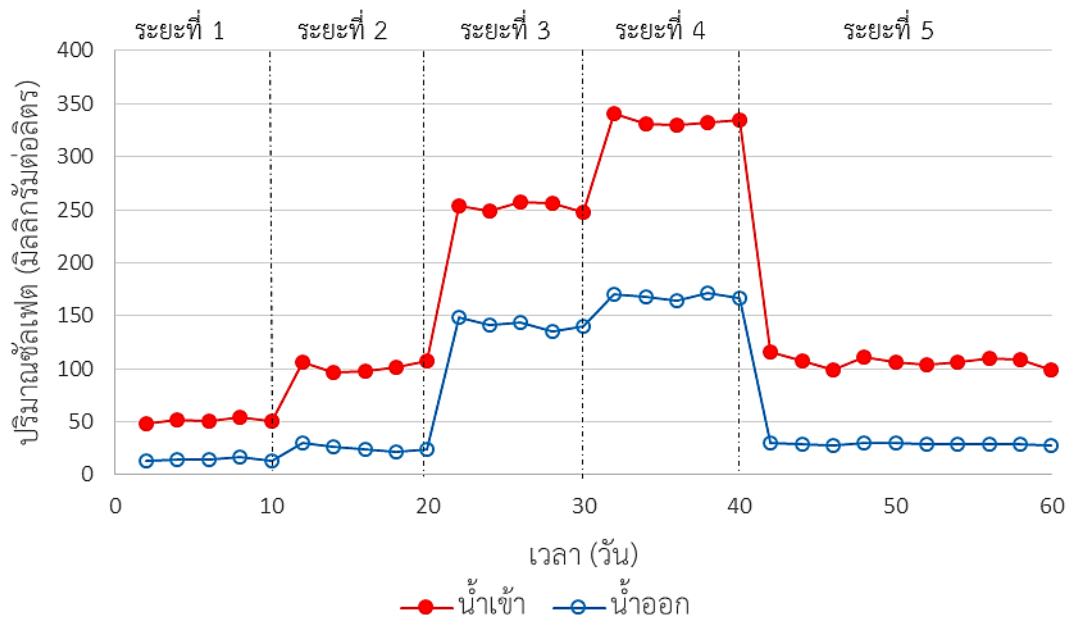
จากตารางที่ 4.6 พบว่า ระยะการทดลองที่ 1-5 ชุดควบคุมมีประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตร้อยละ 71.96 75.23 43.97 49.63 และ 72.92 ตามลำดับ ขณะที่ชุดทดลองมีประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตร้อยละ 13.64 10.80 6.11 5.19 และ 35.12 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาปริมาณซัลเฟตในน้ำเข้าของชุดควบคุมระยะที่ 1-5 พบว่ามีค่าเฉลี่ย 51.46 102.04 252.7 333.86 และ 106.62 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนน้ำออกมีค่าเฉลี่ย 14.44 25.24 141.56 168.14 และ 28.83 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าในชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมโซเดียมโมลิบเดต จุลินทรีย์ในระบบสามารถใช้ซัลเฟตได้ ดังแสดงในภาพที่ 4.12 เมื่อพิจารณาในชุดทดลอง ระยะที่ 1-5 น้ำเข้ามีปริมาณซัลเฟตเฉลี่ย 53.38 104.654 255.364 337.43 และ 103.28 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ



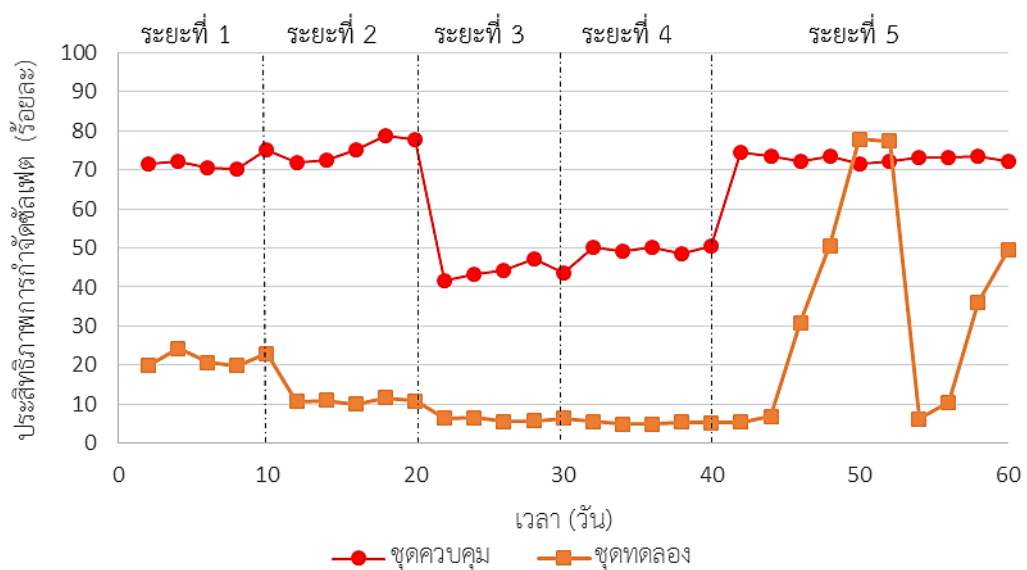
ภาพที่ 4.12 ปริมาณซัลเฟตของชุดทดลองในช่วงการทดลองที่ 2

น้ำออกมีค่าเฉลี่ย 46.08 93.33 239.74 319.90 และ 67.41 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จะเห็นว่าในชุดทดลองที่มีการเติมโซเดียมโมลิบเดตทำให้จุลินทรีย์กลุ่มรีดิวซ์ซัลเฟตในระบบไม่สามารถใช้ซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนได้จึงทำให้ปริมาณซัลเฟตในน้ำขาออกยังคงมีปริมาณใกล้เคียงกับน้ำขาเข้าระบบ ดังแสดงในภาพที่ 4.13 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Qiyong และคณะ (2011) ได้ศึกษาการใช้โซเดียมโมลิบเดตเพื่อยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ พบว่า โซเดียมโมลิบเดตสามารถจับกับเอนไซม์เอพีเอสรีดักเทส (APS-reductase) ของแบคทีเรียกลุ่มรีดิวซ์ซัลเฟตซึ่งเป็นเอนไซม์สำคัญใน

การเปลี่ยนรูปซัลเฟตเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ จึงทำให้แบคทีเรียกลุ่มดังกล่าวไม่สามารถใช้ซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนได้ นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาในระยะที่ 5 ในชุดการทดลอง ด้วยการเติมโซเดียมโมลิบเดทแบบเป็นรอบ พบว่าเมื่อหยุดเติมโซเดียมโมลิบเดทจะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตมีค่าสูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.14



ภาพที่ 4.13 ปริมาณซัลเฟตของชุดควบคุมในช่วงการทดลองที่ 2



ภาพที่ 4.14 ประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตของการทดลองช่วงที่ 2

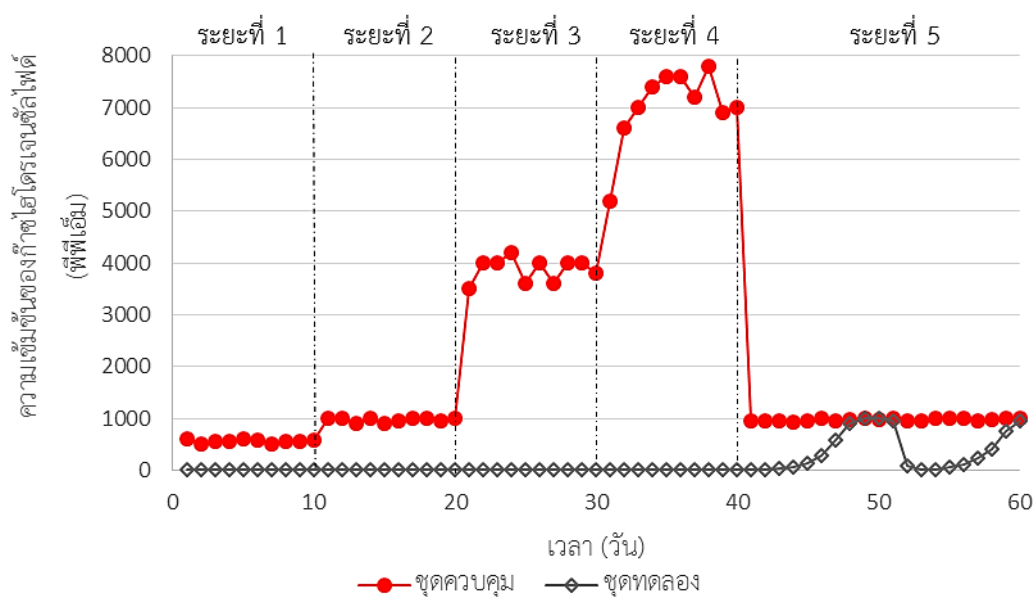
4.2.1.3 ไฮโดรเจนซัลไฟด์

ตารางที่ 4.7 ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ตลอดการทดลองช่วงที่ 2

ระยะที่	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง
1	ค่าต่ำสุด	500	15
	ค่าสูงสุด	600	25
	ค่าเฉลี่ย	555	19
2	ค่าต่ำสุด	900	10
	ค่าสูงสุด	1000	16
	ค่าเฉลี่ย	970	12.1
3	ค่าต่ำสุด	3500	10
	ค่าสูงสุด	4200	15
	ค่าเฉลี่ย	3870	12
4	ค่าต่ำสุด	5200	15
	ค่าสูงสุด	7800	20
	ค่าเฉลี่ย	7030	19
5	ค่าต่ำสุด	925	20
	ค่าสูงสุด	1000	1000
	ค่าเฉลี่ย	974.28	367.38

จากตารางที่ 4.7 ระยะที่ 1-5 ชุดควบคุมมีการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์เฉลี่ย 555 970 3,870 7,030 และ 974.28 พีพีเอ็ม ตามลำดับ ขณะที่ชุดทดลองมีการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์เฉลี่ย 19 12.1 12 19 และ 367.38 พีพีเอ็ม ตามลำดับ จากภาพที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าไฮโดรเจนซัลไฟด์จะเพิ่มขึ้นในทุกๆระยะที่มีการลดอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตและในชุดควบคุมในระยะที่ 1-4 เกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่ำกว่า 20 พีพีเอ็มในทุกๆระยะการทดลอง ส่วนในระยะการทดลองที่ 5 ซึ่งมีการเติมโซเดียมโมลิบเดตแบบเป็นรอบ พบว่า ไฮโดรเจนซัลไฟด์จะเพิ่มขึ้นใกล้เคียงชุดควบคุมเมื่อหยุดเติมเป็นเวลา 12 วัน ทั้งนี้ ในการเติมโซเดียมโมลิบเดตแบบเป็นรอบนั้น ทำเพื่อศึกษาผลของโซเดียมโมลิบเดตต่อการยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยที่จะมีการเติมสารดังกล่าวผสมไปกับการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ในวันที่ 41 จากนั้นในรอบการเติมน้ำเสียครั้งถัดไปจะไม่มีการเติมเพื่อติดตามผลของการหยุดเติม ในการทดลองนี้ ผู้ทดลองได้เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ครั้งละ 50 ลิตร และใช้อัตราการป้อนน้ำเสีย 20 ลิตรต่อวัน ซึ่งปริมาตรถังปฏิกรณ์เท่ากับ 10 ลิตร เมื่อคำนวณแล้วจะได้ค่าเวลากักน้ำ (HRT) 12 ชั่วโมง นั้นหมายความว่า น้ำเสียในการเตรียมหนึ่งครั้งจะใช้เวลาเดินระบบได้ 2.5 วัน ซึ่งแสดงว่า โซเดียมโมลิบ-

เตหจะอยู่ในระบบถึง 2.5 วัน หลังจากนั้นการเตรียมน้ำเสียในรอบถัดไปไม่มีการเติมสารดังกล่าว จาก การวัดความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้น พบว่า ไฮโดรเจนซัลไฟด์จะเริ่มเพิ่มขึ้นหลังจากการ เติรียน้ำเสียในวันที่ 44 และ 47 ซึ่งเพิ่มเป็น 30 และ 300 พีพีเอ็ม ตามลำดับ และเพิ่มเป็น 1,000 พีพีเอ็ม ในวันที่ 50 ของการทดลอง ทั้งนี้ จะเห็นได้ว่าการหยุดเติมโซเดียมโมลิบเดทยังไม่สามารถ ควบคุมการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ เนื่องจาก เมื่อหยุดเติมไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบจะค่อยๆเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.15 ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ช่วงการทดลองที่ 2

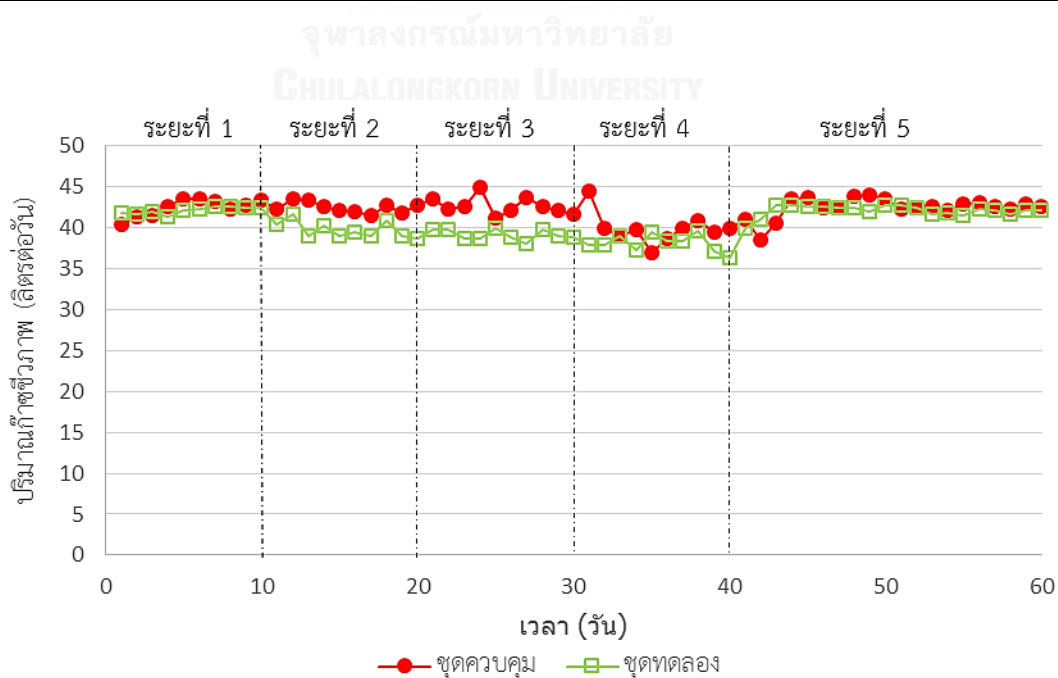
4.2.1.4 ก๊าซชีวภาพ

จากตารางที่ 4.8 ระยะเวลาที่ 1-5 ชุดควบคุมมีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นเฉลี่ย 42.475 42.613 42.797 39.594 และ 42.492 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ ชุดทดลอง มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นเฉลี่ย 42.154 39.759 39.180 38.149 และ 42.118 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ จากภาพที่ 4.16 จะเห็นได้ว่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในการทดลองระยะที่ 1 ซึ่งมีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 100:1 โดยชุดทดลองเติมโซเดียมโมลิบเดท 0.5 มิลลิโมลาร์ มีการเกิดก๊าซชีวภาพเฉลี่ยใกล้เคียงกัน ในขณะที่ระยะที่ 2 และ 3 มีการเติมโซเดียมโมลิบเดท 1.0 และ 1.5 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ในชุดทดลองมีการเกิดก๊าซชีวภาพต่ำกว่า ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าการเติมโซเดียมโมลิบเดทความเข้มข้นสูงขึ้นอาจมีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ส่วนในการทดลองระยะที่ 4 ใช้อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1 คิดเป็นซัลเฟต 333.33 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งค่อนข้างสูงจึงทำให้แนวโน้มการเกิดก๊าซชีวภาพมีค่าลดลง ในที่นี้จะสอดคล้องกับงานวิจัยของ จันทิมา สุกุลพานิชย์ (2548) ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียในระบบยูเอเอสบีที่มีซัลเฟตและไนเตรทสูง พบว่า เมื่อปริมาณซัลเฟตในระบบสูงขึ้นจะทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพลดลง

นอกจากนี้ การทดลองระยะที่ 5 ซึ่งมีการปรับอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 50:1 และเติมโซเดียมโมลิบเดตเข้มข้น 1.0 มิลลิโมลาร์แบบเป็นรอบ จะเห็นว่าปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.8 ปริมาณก๊าซชีวภาพตลอดการทดลองช่วงที่ 2

ระยะที่	ก๊าซชีวภาพ (ลิตรต่อวัน)	จุดควบคุม	จุดทดลอง
1	ค่าต่ำสุด	40.472	41.365
	ค่าสูงสุด	43.583	42.581
	ค่าเฉลี่ย	42.475	42.154
2	ค่าต่ำสุด	41.454	38.757
	ค่าสูงสุด	43.546	41.743
	ค่าเฉลี่ย	42.613	39.759
3	ค่าต่ำสุด	41.134	38.134
	ค่าสูงสุด	45.006	39.990
	ค่าเฉลี่ย	42.797	39.180
4	ค่าต่ำสุด	37.034	36.387
	ค่าสูงสุด	40.995	39.65
	ค่าเฉลี่ย	39.594	38.149
5	ค่าต่ำสุด	38.534	39.957
	ค่าสูงสุด	44.091	42.857
	ค่าเฉลี่ย	42.492	42.118



ภาพที่ 4.16 ปริมาณก๊าซชีวภาพของการทดลองช่วงที่ 2

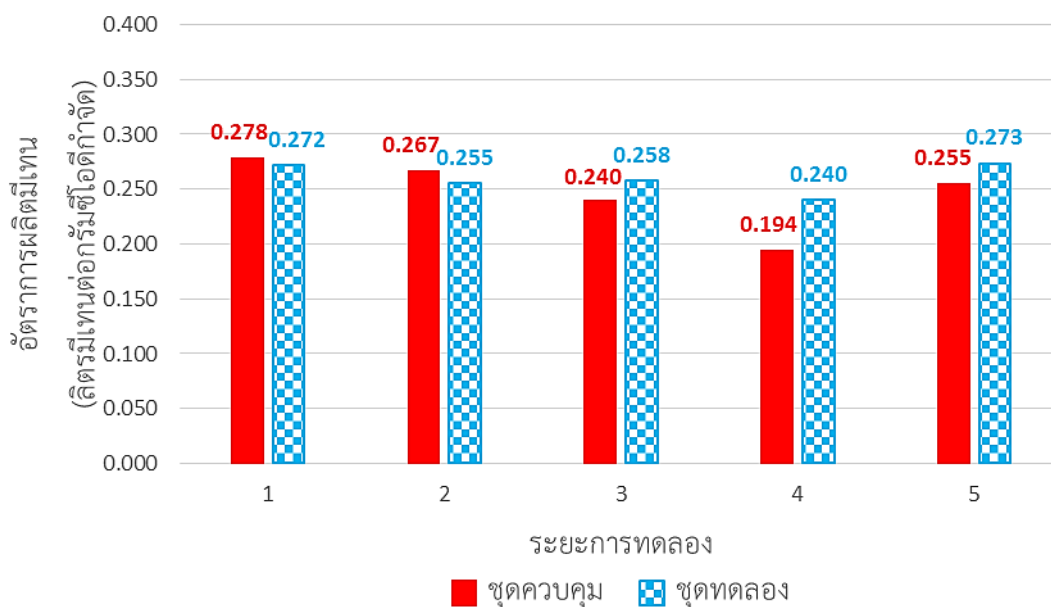
4.2.1.5 สัตส่วนมีเทน

ตารางที่ 4.9 สัตส่วนมีเทนตลอดการทดลองที่ 2

ระยะที่	สัตส่วนมีเทน(ร้อยละ)	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง
1	ค่าต่ำสุด	56.232	55.968
	ค่าสูงสุด	62.582	62.548
	ค่าเฉลี่ย	60.498	60.030
2	ค่าต่ำสุด	50.523	58.714
	ค่าสูงสุด	64.254	64.328
	ค่าเฉลี่ย	58.737	60.527
3	ค่าต่ำสุด	50.643	59.657
	ค่าสูงสุด	64.21	67.705
	ค่าเฉลี่ย	52.978	62.703
4	ค่าต่ำสุด	41.46	54.392
	ค่าสูงสุด	61.028	62.567
	ค่าเฉลี่ย	46.852	58.3907
5	ค่าต่ำสุด	45.649	53.875
	ค่าสูงสุด	60.015	65.334
	ค่าเฉลี่ย	54.393	60.885

จากตารางที่ 4.9 ระยะที่ 1-5 ชุดควบคุมมีสัตส่วนมีเทนเฉลี่ยร้อยละ 60.498 58.737 52.978 46.852 และ 54.393 ตามลำดับ ชุดทดลองมีสัตส่วนมีเทนเฉลี่ยร้อยละ 60.030 60.527 62.703 58.390 และ 60.885 ตามลำดับ จากการทดลองจะเห็นว่า สัตส่วนมีเทนทั้งชุดควบคุมและชุดทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน สามารถบ่งบอกได้ว่าการเติมโซเดียมโมลิบเดทในทุกๆความเข้มข้นไม่มีผลต่อการยับยั้งการผลิตมีเทนในระบบ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในระยะการทดลองที่ 4 ซึ่งใช้อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1 จะเห็นว่าในชุดควบคุมและชุดทดลองมีสัตส่วนมีเทนเฉลี่ยร้อยละ 46.852 และ 58.390 ตามลำดับ นั้นแสดงว่าการที่ระบบมีซัลเฟตปริมาณมากจะทำให้สัตส่วนมีเทนลดลงแต่ในชุดทดลอง เมื่อมีการเติมโซเดียมโมลิบเดททำให้ยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ จึงทำให้สัตส่วนมีเทนเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้จากการทดลองข้างต้น เมื่อนำค่าสัดส่วนมีเทนมาคำนวณหาอัตราการผลิตมีเทนต่อซีโอดีที่ถูกกำจัด ดังแสดงในภาพที่ 4.17 จะเห็นได้ว่า ในการทดลองระยะที่ 1-5 ชุดควบคุมมีค่าอัตราการผลิตมีเทนต่อซีโอดีที่ถูกกำจัด คือ 0.278 0.267 0.240 0.194 และ 0.255 ลิตรมีเทนต่อกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด ตามลำดับ ส่วนในชุดทดลองมีค่าอัตราการผลิตมีเทนต่อซีโอดีที่ถูกกำจัด คือ 0.272 0.255 0.258 0.240 และ 0.273 ลิตรมีเทนต่อกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด ตามลำดับ จากงานวิจัยของ Speece (1996) ตามทฤษฎีของการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส อัตราการผลิตมีเทนต่อซีโอดีที่ถูกกำจัดมีค่าเท่ากับ 0.40 ลิตรมีเทนต่อซีโอดีที่ถูกกำจัด ซึ่งจากการทดลองนี้จะเห็นว่า ค่าที่ได้มีค่าต่ำกว่าทฤษฎี ซึ่งในความเป็นจริงแล้วจุลินทรีย์ในระบบจะมีการใช้สารซีโอดีในการสร้างเซลล์หรือใช้ในกระบวนการอื่นๆ เช่น ซัลเฟตรีดักชัน จึงทำให้ค่าที่ได้มีค่าต่ำกว่าค่าทฤษฎีเสมอ



ภาพที่ 4.17 อัตราการผลิตมีเทนต่อซีโอดีที่ถูกกำจัด

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพกำจัดซีโอดีในชุดควบคุม มีค่าเฉลี่ยระยะการทดลองที่ 1 ถึง 5 เท่ากับ 91.46 92.07 90.56 87.92 และ 88.97 ตามลำดับ ส่วนชุดทดลองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 91.15 91.25 89.58 82.28 และ 91.05 ตามลำดับ ซึ่งสามารถพิจารณาเปรียบเทียบกับสัดส่วนมีเทน ระยะที่ 1-5 ชุดควบคุมมีสัดส่วนมีเทนเฉลี่ยร้อยละ 60.498 58.737 52.978 46.852 และ 54.393 ตามลำดับ ชุดทดลองมีสัดส่วนมีเทนเฉลี่ยร้อยละ 60.030 60.527 62.703 58.390 และ 60.885 ตามลำดับ จะเห็นว่า ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในชุดควบคุมระยะที่ 1 ถึง 4 มีค่าสูงกว่าชุดทดลอง แต่กลับมีค่าสัดส่วนมีเทนต่ำกว่า นั่นเป็นเพราะเมื่อปริมาณซัลเฟตในระบบเพิ่มขึ้นทำให้สัดส่วนมีเทนลดลง เนื่องจากแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตสามารถใช้ซัลเฟตได้มากขึ้นและมีการแย่งใช้ซีโอดีในระบบ

(Hu และคณะ, 2015) ขณะที่ชุดทดลอง จะเห็นได้ว่ามีสัดส่วนมีเทนสูงกว่าในชุดควบคุม เนื่องจากแบบคที่เรียกกลุ่มรีดิวิซ์ซัลเฟตไม่สามารถใช้ซัลเฟตในระบบได้ จากสาเหตุดังกล่าวทำให้อัตราการผลิตมีเทนของชุดทดลองในระยะที่ 3 4 และ 5 มีค่าสูงกว่าชุดควบคุม ดังแสดงในภาพที่ 4.17

4.2.1.6 ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดและประสิทธิภาพการกำจัด

ตารางที่ 4.10 ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดตลอดการทดลองที่ 2

ระยะที่	ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ชุดควบคุม		ชุดทดลอง	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
1	ค่าต่ำสุด	5029.00	213.00	4995.00	219.00
	ค่าสูงสุด	5275.00	284.00	5273.00	264.00
	ค่าเฉลี่ย	5158.00	247.33	868.21	241.33
	ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ย (ร้อยละ)	95.21		95.32	
2	ค่าต่ำสุด	5310.00	265.00	5194.00	274.00
	ค่าสูงสุด	5656.00	311.00	5655.00	343.00
	ค่าเฉลี่ย	5483.56	292.78	895.31	300.11
	ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ย (ร้อยละ)	94.66		94.45	
3	ค่าต่ำสุด	5523.00	299.00	5459.00	288.00
	ค่าสูงสุด	5720.00	343.00	5863.00	344.00
	ค่าเฉลี่ย	5623.00	320.00	924.56	314.67
	ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ย (ร้อยละ)	94.31		94.46	
4	ค่าต่ำสุด	5802.00	284.00	5795.00	299.00
	ค่าสูงสุด	5972.00	342.00	5989.00	359.00
	ค่าเฉลี่ย	5879.67	303.89	946.07	331.11
	ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ย (ร้อยละ)	94.83		94.37	
5	ค่าต่ำสุด	5221.00	230.00	5041.00	217.00
	ค่าสูงสุด	5498.00	291.00	5564.00	266.00
	ค่าเฉลี่ย	5331.60	269.55	906.55	245.90
	ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ย (ร้อยละ)	94.94		95.36	

จากตารางที่ 4.10 ค่าประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในระหว่างการทดลองที่ 1-5 ของชุดควบคุม คือ ร้อยละ 95.21 94.66 94.31 94.83 และ 94.94 ตามลำดับ ชุดทดลองคือ ร้อยละ 95.32 94.45 94.46 94.37 และ 95.36 ตามลำดับ ในการทดลองครั้งนี้การวัดค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ใช้ระบบหัววัดยี่ห้อ IQ Sensor Net ซึ่งติดตั้งไว้บริเวณถังพักน้ำเสียขาออก ทำให้สามารถอ่านค่าดังกล่าวได้อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังสามารถย้ายหัววัดออกมาจุ่มลงในถังพักน้ำเสียขาเข้าและอ่านค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดของน้ำเสียขาเข้าได้อีกด้วย ทั้งนี้ การวัดค่าดังกล่าว ผู้วิจัยได้ทำการวัดค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดด้วยวิธีตามมาตรฐานเพื่อเปรียบเทียบและพบว่าค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับการวัดจากหัววัด จึงใช้หัววัดอ่านค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในการวิจัยในครั้งนี้ จากตารางดังกล่าว จะเห็นได้ว่าค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดมีค่าค่อนข้างสูง ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าการเตรียมน้ำเสียดังกล่าว เตรียมด้วยความเข้มข้นซีโอดีค่อนข้างสูง อีกทั้งสารต่างๆอาจละลายน้ำได้ไม่ดีเท่าที่ควรจึงทำให้ค่าที่ได้มีค่าสูงตามไปด้วย

4.2.1.7 โออาร์พี

ตารางที่ 4.11 ค่าโออาร์พีตลอดการทดลองช่วงที่ 2

ระยะที่	โออาร์พี (มิลลิโวลต์)	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง
1	ค่าต่ำสุด	-412	-418
	ค่าสูงสุด	-359	-348
	ค่าเฉลี่ย	-390.6	-376.8
2	ค่าต่ำสุด	-366	-365
	ค่าสูงสุด	-349	-349
	ค่าเฉลี่ย	-356.8	-355.2
3	ค่าต่ำสุด	-357	-372
	ค่าสูงสุด	-334	-355
	ค่าเฉลี่ย	-343.7	-363
4	ค่าต่ำสุด	-382	-412
	ค่าสูงสุด	-316	-335
	ค่าเฉลี่ย	-356.6	-369.3
5	ค่าต่ำสุด	-403	-411
	ค่าสูงสุด	-349	-341
	ค่าเฉลี่ย	-368.95	-371.9

จากตารางที่ 4.11 ค่าโออาร์พีเฉลี่ยตลอดการทดลองระยะที่ 1-5 ในชุดควบคุม คือ -390.6 -356.8 -343.7 -356.6 และ -368.95 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ชุดทดลองคือ -376.8 -355.2 -363 -369.3 และ -371.90 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ จากการทดลองดังกล่าว พบว่า ค่าโออาร์พีมีค่าเป็นลบ เนื่องจากค่าโออาร์พีเป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการให้หรือรับอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์ซึ่งโดยทั่วไป ค่าโออาร์พีของน้ำเสียในระบบแบบไม่ใช้อากาศมีค่าอยู่ในช่วง -500 ถึง -300 มิลลิโวลต์ และค่าโออาร์พีของช่วงการเกิดปฏิกิริยากระบวนการการผลิตมีเทนอยู่ที่ -400 ซึ่งในการทดลองนี้ ค่าโออาร์พีของทั้งสองชุดการทดลองอยู่ในช่วง -418 ถึง -316 สอดคล้องกับค่าโออาร์พีของช่วงปฏิกิริยาการเกิดมีเทน

4.2.1.8 กรดไขมันระเหย

ตารางที่ 4.12 ค่ากรดไขมันระเหยตลอดการทดลองช่วงที่ 2

ระยะที่	กรดไขมันระเหย (มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปกรดอะซิติก)	ชุดควบคุม		ชุดทดลอง	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
1	ค่าต่ำสุด	73	148	71	150
	ค่าสูงสุด	80	155	79	155
	ค่าเฉลี่ย	76.6	151.8	74.2	153.4
2	ค่าต่ำสุด	72	149	70	156
	ค่าสูงสุด	88	155	81	164
	ค่าเฉลี่ย	78.4	151.8	74.8	159.8
3	ค่าต่ำสุด	57	110	73	150
	ค่าสูงสุด	85	148	77	165
	ค่าเฉลี่ย	73	126.4	74.8	158
4	ค่าต่ำสุด	67	100	73	127
	ค่าสูงสุด	84	123	86	144
	ค่าเฉลี่ย	77.2	108.6	78	135.6
5	ค่าต่ำสุด	70	150	70	148
	ค่าสูงสุด	81	160	80	156
	ค่าเฉลี่ย	75.4	153.9	76.7	153

ค่ากรดไขมันระเหยเจ็ลลี่น้ำเข้าและน้ำออกของระยะการทดลองที่ 1-5 ในชุดควบคุม คือ 76.12 และ 138.5 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดอะซิติก ตามลำดับ ส่วนในชุดทดลองคือ 75.7 และ 151.9 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดอะซิติก ตามลำดับ ค่าแต่ละระยะการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.12 จากการทดลองจะเห็นได้ว่า ค่าเฉลี่ยของกรดไขมันระเหยน้ำเข้าน้อยกว่าน้ำออก ทั้งนี้เนื่องจากการทดลองนี้เป็นการทดลองที่ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ในการทดลองซึ่งจะมีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตเพื่อเพิ่มกำลังบัฟเฟอร์ให้กับระบบ เนื่องจากระบบยูเอเอสพีเป็นระบบต่อเนื่อง จุลินทรีย์ในระบบมีสองกลุ่มหลัก คือ กลุ่มสร้างกรด (ขั้นตอน Acidogenesis) และกลุ่มสร้างมีเทน (ขั้นตอน Methanogenesis) ซึ่งในขั้นตอนการสร้างกรดอาจทำให้ค่าพีเอชของระบบต่ำลงและเป็นพิษต่อจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนได้ จึงมีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตเพื่อควบคุมพีเอชของระบบดังกล่าว โดยค่าอัตราส่วนระหว่างค่ากรดไขมันระเหยต่อค่าสภาพต่างทั้งหมด (Alkalinity) ที่เหมาะสมควรมีค่าต่ำกว่า 0.4 ซึ่งในการทดลองนี้มีค่าเท่ากับ 0.03 ทั้งสองชุดการทดลอง แสดงให้เห็นว่าระบบมีกำลังบัฟเฟอร์สูง

4.2.1.9 สภาพต่างทั้งหมด (Alkalinity)

ตารางที่ 4.13 สภาพต่างทั้งหมดตลอดการทดลองครั้งที่ 2

ระยะที่	สภาพต่างทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต)	ชุดควบคุม		ชุดทดลอง	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
1	ค่าต่ำสุด	2464	3025	2465	3021
	ค่าสูงสุด	2608	3275	2511	3205
	ค่าเฉลี่ย	2528.8	3129.6	2489.4	3115.8
2	ค่าต่ำสุด	2420	2943	2406	2995
	ค่าสูงสุด	2567	3084	2594	3143
	ค่าเฉลี่ย	2485	3028.6	2508	3049
3	ค่าต่ำสุด	2325	2984	2395	3033
	ค่าสูงสุด	2584	3135	2512	3194
	ค่าเฉลี่ย	2504.6	3049.4	2463.8	3111
4	ค่าต่ำสุด	2459	2849	2431	2984
	ค่าสูงสุด	2583	3023	2581	3200
	ค่าเฉลี่ย	2522.2	2937.4	2520.6	3081.4
5	ค่าต่ำสุด	2453	3015	2459	3015
	ค่าสูงสุด	2594	3243	2544	3285
	ค่าเฉลี่ย	2501.1	3105.4	2500.8	3116.3

ค่าสภาพต่างทั้งหมดเฉลี่ยน้ำเข้าและน้ำออกตลอดระยะเวลาการทดลองที่ 1-5 ในชุดควบคุมคือ 2,508.34 และ 3,050.08 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ ส่วนในชุดทดลองคือ 2,496.52 และ 3,094.7 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ ค่าแต่ละระยะเวลาการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.13 ในระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศสภาพต่างมีความสำคัญต่อระบบมาก เนื่องจากเป็นตัวควบคุมพีเอชในระบบ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเมื่อแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดมีการสร้างกรดสูงขึ้น ค่าพีเอชในระบบต่ำลงจะทำให้ระบบล้มเหลวได้ จากงานวิจัยของ McCarty (1964) พบว่าค่าความเป็นด่างในระบบ ไม่ควรต่ำกว่า 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต

4.2.1.10 พีเอช

ตารางที่ 4.14 ค่าพีเอชตลอดการทดลองช่วงที่ 2

ระยะที่	พีเอช	ชุดควบคุม		ชุดทดลอง	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
1	ค่าต่ำสุด	6.989	6.898	6.989	6.915
	ค่าสูงสุด	7.077	6.982	7.077	7.073
	ค่าเฉลี่ย	7.033	6.953	7.032	6.982
2	ค่าต่ำสุด	7.003	6.947	7.003	6.824
	ค่าสูงสุด	7.074	6.991	7.074	6.978
	ค่าเฉลี่ย	7.028	6.975	7.027	6.894
3	ค่าต่ำสุด	7.011	7.143	7.011	6.847
	ค่าสูงสุด	7.091	7.323	7.091	9.833
	ค่าเฉลี่ย	7.060	7.243	7.054	7.247
4	ค่าต่ำสุด	6.953	7.411	6.977	7.124
	ค่าสูงสุด	7.072	7.563	7.072	7.258
	ค่าเฉลี่ย	7.011	7.474	7.022	7.177
5	ค่าต่ำสุด	6.927	6.891	6.927	6.879
	ค่าสูงสุด	7.084	7.034	7.084	7.032
	ค่าเฉลี่ย	6.999	6.965	7.000	6.959

ค่าพีเอชเฉลี่ยน้ำเข้าของชุดควบคุมตลอดระยะเวลาการทดลองที่ 1-5 คือ 7.033 7.028 7.060 7.011 และ 6.999 ตามลำดับ น้ำออกมีค่าเฉลี่ย 6.953 6.975 7.243 7.474 และ 6.965 ตามลำดับ ส่วนในชุดทดลองค่าพีเอชเฉลี่ยน้ำเข้ามีค่า เท่ากับ 7.032 7.027 7.054 7.022 และ 7.000 ตามลำดับ น้ำออกมีค่า เท่ากับ 6.982 6.894 7.247 7.177 และ 6.959 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.14

จากการทดลองจะเห็นได้ว่า ในระยะการทดลองที่ 1-2 ค่าเฉลี่ยของน้ำเข้าในชุดควบคุมมีค่าสูงกว่าน้ำออก ซึ่งสาเหตุอาจเกิดจากการสร้างกรดของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดในระบบจึงทำให้ค่าพีเอชในระบบลดลงแต่เนื่องจากการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตลงในน้ำเสียสังเคราะห์จึงทำให้พีเอชไม่ลดลงมากนัก และในระยะที่ 1-2 นั้นมีปริมาณซัลเฟตในน้ำค่อนข้างต่ำจึงทำให้มีการใช้โปรตรอน (H^+) ในระบบน้อย เมื่อพิจารณาการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์กลุ่มรีดิวซ์ซัลเฟตจะมีการดึงโปรตรอน ไปใช้ในกระบวนการซัลเฟตรีดักชันเพื่อเปลี่ยนซัลเฟตให้เป็นซัลไฟด์ (S^{2-}) ดังสมการที่ 4.1



จะเห็นได้ว่าในชุดควบคุมหลังจากระยะการทดลองที่ 3 ค่าพีเอชในน้ำออกจะสูงกว่าน้ำเข้าเนื่องจากการดึงโปรตรอนไปใช้ในกระบวนการซัลเฟตรีดักชัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในชุดทดลองที่มีการเติมโซเดียมโมลิบเดต จะเห็นได้ว่าค่าพีเอชน้ำเข้าและน้ำออกมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากเกิดกระบวนการซัลเฟตรีดักชันได้น้อยเนื่องจากซัลเฟตในระบบถูกใช้ได้น้อย และจากการทดลองดังกล่าวมีค่าพีเอชเฉลี่ยเหมาะสมต่อการทำงานในระบบแบบไม่ใช้ออกซิเจน คือช่วง 6.5-7.8

4.2.1.11 ซัลไฟด์

ตารางที่ 4.15 ค่าซัลไฟด์ตลอดการทดลองช่วงที่ 2

ระยะที่	ซัลไฟด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ชุดควบคุม		ชุดทดลอง	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
1	ค่าต่ำสุด	0.15	9.80	0.13	1.50
	ค่าสูงสุด	2.00	12.10	0.20	2.00
	ค่าเฉลี่ย	0.74	10.82	0.16	1.74
2	ค่าต่ำสุด	0.11	20.30	0.11	0.90
	ค่าสูงสุด	0.24	25.30	0.17	1.60
	ค่าเฉลี่ย	0.156	21.84	0.142	1.22
3	ค่าต่ำสุด	0.09	20.10	0.11	1.00
	ค่าสูงสุด	0.19	25.10	0.16	1.60
	ค่าเฉลี่ย	0.134	22.90	0.132	1.20
4	ค่าต่ำสุด	0.18	25.00	0.15	2.40
	ค่าสูงสุด	1.80	29.4	2.00	3.20
	ค่าเฉลี่ย	0.856	27.84	0.93	2.80
5	ค่าต่ำสุด	0.13	18.70	0.11	1.20
	ค่าสูงสุด	1.24	23.10	0.21	20.10
	ค่าเฉลี่ย	0.273	19.96	0.159	8.66

ค่าซัลไฟด์เฉลี่ยของน้ำเข้าในชุดควบคุมตลอดระยะเวลาการทดลองที่ 1-5 เท่ากับ 0.74 0.156 0.134 0.856 0.273 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ น้ำออก เท่ากับ 10.82 21.84 22.90 27.84 และ 19.96 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนในชุดทดลอง ค่าซัลไฟด์น้ำเข้าตลอดระยะเวลาการทดลองที่ 1-5 เท่ากับ 0.16 0.142 0.132 0.93 และ 0.159 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ค่าซัลไฟด์เฉลี่ยน้ำออก เท่ากับ 1.74 1.22 1.20 2.80 และ 8.66 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.15

จากการทดลอง พบว่าปริมาณซัลไฟด์น้ำเข้ามีค่าน้อยมาก ซึ่งในการทดลองนี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ในการทดลอง ซึ่งผู้วิจัยได้วัดปริมาณซัลไฟด์หลังจากเตรียมน้ำเสีย จึงทำให้ค่าที่ได้ในช่วงแรกมีค่าน้อย โดยปกติแล้วซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในระบบแบบไม่ใช้อากาศจะเกิดเมื่อจุลินทรีย์กลุ่มรีดิวซ์ซัลเฟตใช้ซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนเกิดเป็นซัลไฟด์ ดังสมการที่ 4.2



จากสมการดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าซัลไฟด์น้ำเข้าในช่วงวันแรกของน้ำเสียสังเคราะห์จะมีค่าน้อย เนื่องจากการวัดค่าซัลไฟด์ทันทีหลังเตรียมน้ำเสียและในถังพักน้ำเสียขาเข้าระบบมีจุลินทรีย์กลุ่มรีดิวซ์ซัลเฟตน้อย นอกจากนี้ในชุดควบคุมจะเห็นได้ว่ามีปริมาณซัลไฟด์น้ำออกเฉลี่ยทั้ง 5 ระยะเวลาการทดลอง คือ 21.84 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Koster และคณะ (1986) ได้ทดลองเกี่ยวกับความเข้มข้นซัลไฟด์ในระบบยูเอเอสปีต่อการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์กลุ่มรีดิวซ์ซัลเฟต และกลุ่มผลิตมีเทน พบว่า ซัลไฟด์จะยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์กลุ่มดังกล่าวที่พีเอช 6.4-7.2 และ 7.8-8 ด้วยความเข้มข้น 250 และ 90 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ นอกจากนี้ งานวิจัยของ Lopes และคณะ (2010) ศึกษาความเข้มข้นซัลไฟด์ต่อการเกิดกระบวนการซัลเฟตรีดักชัน พบว่า ซัลไฟด์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จะยับยั้งกระบวนการซัลเฟตรีดักชันได้ ในการทดลองครั้งนี้จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของซัลไฟด์เฉลี่ยของชุดควบคุมอยู่ที่ 21.84 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงที่ไม่เป็นพิษต่อระบบ

นอกจากนี้ในชุดการทดลอง จะเห็นได้ว่าปริมาณซัลไฟด์น้ำออกมีค่าเฉลี่ยตลอด 5 ระยะเวลาการทดลอง เท่ากับ 1.22 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากในชุดทดลองมีการเติมโซเดียมโมลิบเดตและทำให้ยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองหัวข้อที่ 4.2.1.3

4.3 ผลการทดลองช่วงที่ 3 การยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบบยูเอเอสบีด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

การทดลองช่วงที่ 3 เป็นการทดลองการยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบบยูเอเอสบีด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ทำการทดลองโดย วัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของน้ำเสียเบื้องต้น คำนวณอัตราส่วนของค่าซีโอดีต่อซัลเฟต ตลอดจนทดสอบปริมาณการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในระบบ จากนั้นจึงเลือกค่าความเข้มข้นโซเดียมโมลิบเดตที่เหมาะสมเพื่อใช้ในยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบต่อไป เตินระบบด้วยถังปฏิกรณ์ 2 ถัง คือ ชุดควบคุมและชุดทดลอง โดยชุดควบคุมจะไม่มี การเติมโซเดียมโมลิบเดต ทำการทดลองเป็นเวลา 20 วัน ประกอบด้วย 2 ระยะเวลาทดลอง ระยะเวลา 10 วัน โดยระยะที่ 1 เป็นการเติมโซเดียมโมลิบเดตความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ แบบต่อเนื่อง ส่วนระยะที่ 2 เป็นการเติมโซเดียมโมลิบเดตความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์แบบเป็นรอบ คือ เติมในวันที่ 11 ของการทดลองและติดตามผลการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ แล้วจึงเติมอีกครั้ง ดังแสดงในตารางที่ 3.6

จากการวัดค่าซีโอดีและซัลเฟตเฉลี่ยของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรเบื้องต้น พบว่า มีค่าเท่ากับ 2,674 และ 29.62 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็นอัตราส่วน 90.27 ซึ่งใกล้เคียงกับการทดลองช่วงที่ 2 ที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 100:1 และสามารถใส่โซเดียมโมลิบเดตความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ ยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่ำกว่า 20 พีพีเอ็มได้ ผู้วิจัยจึงเลือกใส่โซเดียมโมลิบเดตเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ มาใช้ในการทดลองช่วงนี้

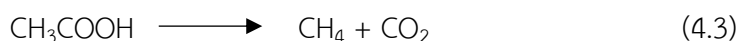
ในการเดินระบบ เนื่องจากการทดลองนี้เป็นการทดลองต่อเนื่องจากการทดลองช่วงที่ 2 ซึ่งใช้น้ำเสียสังเคราะห์ในการทดลองและใช้น้ำตาลทรายขาวเป็นสารให้ซีโอดี จากการทดลองช่วงที่ 2 พบว่า ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีมากกว่าร้อยละ 90 เนื่องจากซีโอดีที่ได้จากน้ำตาลทรายขาว จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ได้ง่าย แต่เมื่อมีการเดินระบบต่อเนื่องโดยใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกรนั้น ลักษณะน้ำเสียมีค่าแตกต่างจากน้ำเสียสังเคราะห์ การเดินระบบจึงต้องมีการบ่อน้ำเสียเพื่อให้จุลินทรีย์ในระบบคุ้นชินกับน้ำเสียชนิดนี้ก่อน ในการทดลองนี้ ผู้วิจัยได้บ่อน้ำเสียด้วยอัตราการสูบน้ำเท่ากับ 5 ลิตรต่อวันเป็นเวลาสองสัปดาห์ เพื่อวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆเบื้องต้น พบว่า ระบบสามารถกำจัดซีโอดีได้มากกว่าร้อยละ 80 เกิดก๊าซชีวภาพเฉลี่ย 3.6906 ลิตรต่อวัน แต่เกิดปัญหาคือ ไม่มีไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากจุลินทรีย์ในระบบยังไม่คุ้นชินกับน้ำเสียดังกล่าวและปริมาณซัลเฟตที่เข้าระบบมีปริมาณน้อย อีกทั้งเมื่อคำนวณค่าอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ (OLR) ในระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.33 กรัมซีโอดี/ลิตร-วัน ซึ่งน้อยกว่าค่า criteria ของระบบบยูเอเอสบีที่ใช้ในการทดลอง ผู้วิจัยจึงค่อยๆ ปรับอัตราการสูบน้ำเสียจาก 5 ลิตรต่อวันเป็น 10 และ 20 ลิตรต่อวันตามลำดับ จนระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีมากกว่าร้อยละ 70 และเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์เฉลี่ย 300 พีพีเอ็ม ดังแสดงในตารางที่ ค.2 แล้วจึงทดลองการเติมโซเดียมโมลิบเดตต่อไป

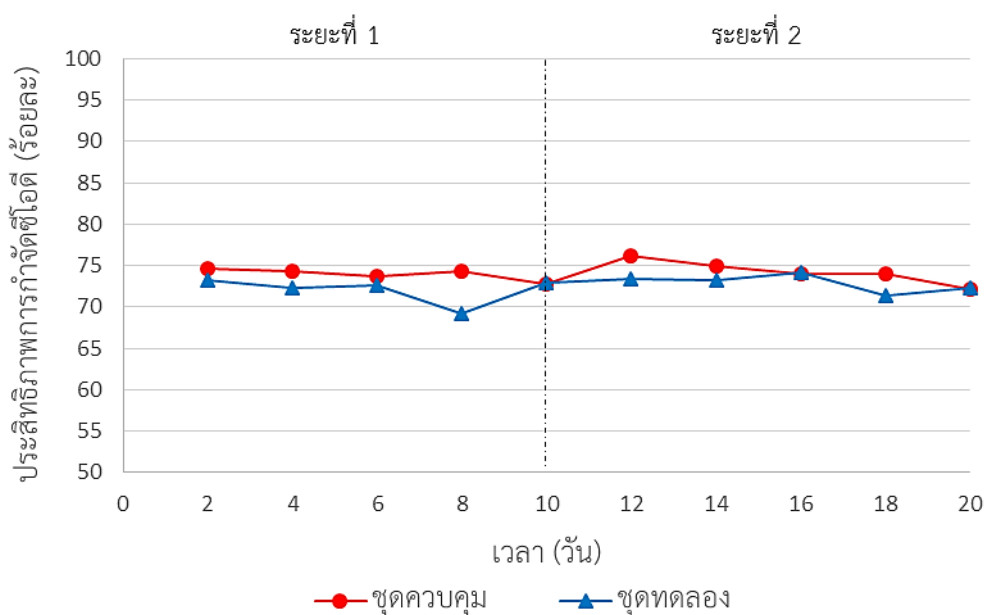
4.3.1.1 ซีไอดีและประสิทธิภาพการกำจัด

ตารางที่ 4.16 ค่าซีไอดีและประสิทธิภาพการกำจัดตลอดการทดลองด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

ระยะที่	ซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ชุดควบคุม		ชุดทดลอง	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
1	ค่าต่ำสุด	2578	656	2590	705
	ค่าสูงสุด	2791	731	2711	823
	ค่าเฉลี่ย	2674	696.8	2659.6	744.4
	ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ย (ร้อยละ)	73.94		72.01	
2	ค่าต่ำสุด	2831	682	2754	733
	ค่าสูงสุด	3134	787	2996	824
	ค่าเฉลี่ย	2929.4	753	2878	780
	ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ย (ร้อยละ)	74.27		72.89	

ค่าซีไอดีของชุดควบคุมน้ำเข้าเฉลี่ยของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรตลอดระยะเวลาการทดลองที่ 1-2 เท่ากับ 2,674 และ 2,929.4 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ น้ำออกเท่ากับ 696.8 และ 753 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยชุดทดลองน้ำเข้าตลอดระยะเวลาการทดลองที่ 1-2 เท่ากับ 2,659.6 และ 2,878 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ น้ำออก เท่ากับ 744.4 และ 780 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีของชุดควบคุมตลอดระยะเวลาการทดลองที่ 1-2 เท่ากับร้อยละ 73.94 และ 74.27 ตามลำดับ ส่วนในชุดทดลองเท่ากับร้อยละ 72.01 และ 72.89 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.16 และภาพที่ 4.18 จากการทดลองจะเห็นได้ว่า ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีต่ำกว่าช่วงการทดลองที่ 2 เนื่องจากในช่วงการทดลองนี้ใช้น้ำเสียจริงจากฟาร์มสุกร ซึ่งลักษณะน้ำเสียมีค่าซีไอดีต่ำกว่าน้ำเสียสังเคราะห์แต่อาจมีสารอินทรีย์หรือของแข็งในน้ำที่จุลินทรีย์ย่อยสลายได้ยากกว่า เนื่องจากสารอินทรีย์ในน้ำเสียฟาร์มสุกรส่วนใหญ่มาจากมูลและปัสสาวะของสุกร โดยหลักการแล้ว ค่าซีไอดีหรือสารอินทรีย์ในระบบจะถูกแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดย่อยสลายสารโมเลกุลใหญ่ เช่น โปรตีนและคาร์โบไฮเดรต ไปเป็นกรดอะซิติก ในขั้นตอน ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) อะซิโดจีเนซิส (Acidogenesis) และ อะซิโตจีเนซิส (Acetogenesis) ตามลำดับ จากนั้นกลุ่มแบคทีเรียผลิตมีเทนจะใช้กรดดังกล่าวไปผลิตมีเทน ดังสมการที่ 4.3





ภาพที่ 4.18 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีตลอดการทดลองการใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกร

การที่จุลินทรีย์ในระบบจะย่อยสารอินทรีย์ได้มากหรือน้อยนั้นขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของกลุ่มจุลินทรีย์ในระบบหรือการปรับค่าเวลากักน้ำของระบบ เป็นต้น ในกรณีนี้ ผู้วิจัยได้ปรับค่าเวลากักน้ำของระบบเป็น 0.5 วัน ซึ่งหมายความว่าเวลาของน้ำเสียอยู่ในระบบเพียง 12 ชั่วโมง จึงอาจทำให้ความสามารถการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ในระบบต่ำลงได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Song และคณะ (2010) ศึกษาประชากรของแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนในระบบบิวเอเอสพีด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร โดยปรับค่าเวลากักน้ำเป็น 7.0 6.4 5.0 และ 3.5 วัน ตามลำดับ ทดลองเป็นเวลา 382 วัน พบว่าระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีลดลงเฉลี่ยจากร้อยละ 80 เป็นร้อยละ 60 เมื่อปรับค่าเวลากักน้ำเท่ากับ 3.5 วัน นอกจากนี้การใช้ซีโอดีหรือสารอินทรีย์ในระบบที่มีซัลเฟตยังสามารถเกิดจากกระบวนการซัลเฟตรีดักชัน เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มรีดิวซ์ซัลเฟตใช้ซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนและใช้ซัลไฟด์เป็นตัวให้อิเล็กตรอนได้ตามสมการที่ 4.4 และ 4.5



ทั้งนี้เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในชุดควบคุมและชุดทดลองจะเห็นว่ามีความใกล้เคียงกัน นั้นแสดงว่าการเติมโซเดียมโมลิบเดต 0.5 มิลลิโมลาร์มีผลต่อการกำจัดซีโอดีของระบบน้อยมาก

4.3.1.2 ซัลเฟตและประสิทธิภาพการกำจัด

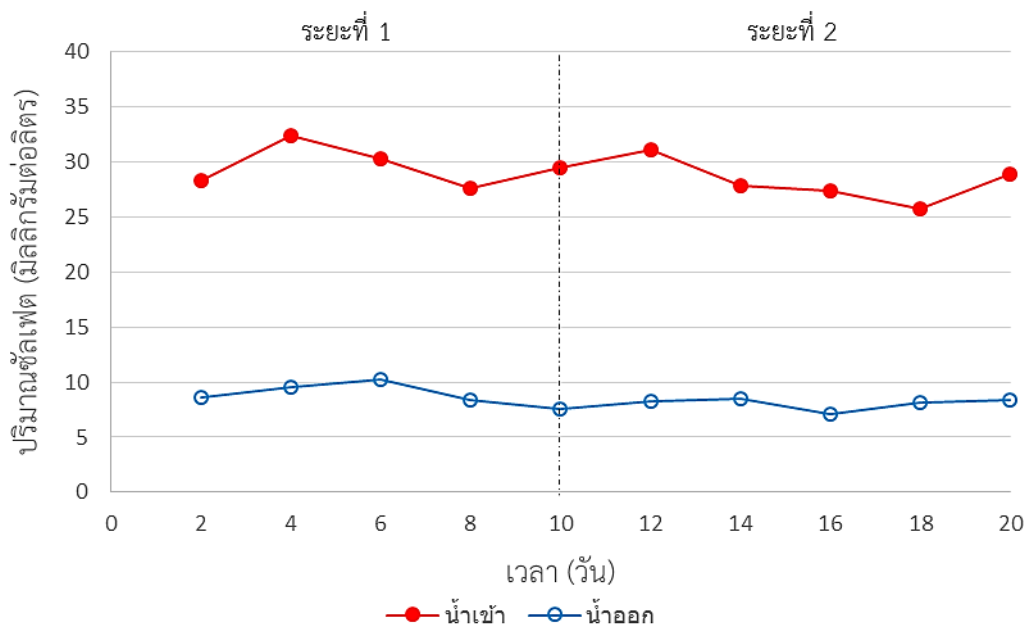
ตารางที่ 4.17 ซัลเฟตและประสิทธิภาพการกำจัดตลอดการทดลองด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

ระยะที่	ซัลเฟต (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ชุดควบคุม		ชุดทดลอง	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
1	ค่าต่ำสุด	27.6	7.6	29.2	26.4
	ค่าสูงสุด	32.4	10.2	31.5	28.9
	ค่าเฉลี่ย	29.62	8.86	30	27.38
	ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ย (ร้อยละ)	70.08		8.74	
2	ค่าต่ำสุด	25.8	7.1	27.5	10.3
	ค่าสูงสุด	31.1	8.5	31.4	26.9
	ค่าเฉลี่ย	28.22	8.1	29.08	21.1
	ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ย (ร้อยละ)	71.21		28.03	

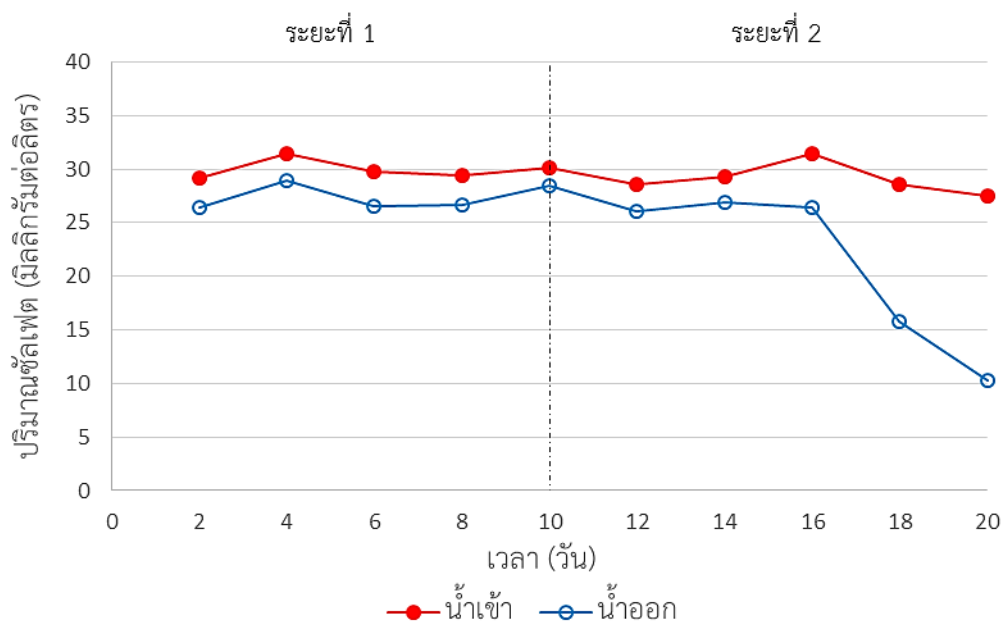
จากการทดลอง ปริมาณซัลเฟตของชุดควบคุมในน้ำเข้าตลอดระยะเวลาการทดลองที่ 1-2 เฉลี่ยเท่ากับ 29.62 และ 28.22 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ น้ำออกเท่ากับ 8.86 และ 8.1 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ส่วนในชุดทดลองปริมาณซัลเฟตน้ำเข้าตลอดระยะเวลาการทดลองที่ 1-2 เท่ากับ 30 และ 29.08 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ น้ำออกเท่ากับ 27.38 และ 21.1 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของชุดควบคุมตลอดระยะเวลาการทดลองที่ 1-2 เท่ากับร้อยละ 70.08 และ 71.21 ตามลำดับ ส่วนในชุดทดลองเท่ากับร้อยละ 8.74 และ 28.03 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.17 และ ภาพที่ 4.19-4.21

จากภาพที่ 4.21 เมื่อพิจารณาระยะการทดลองที่ 1 จะเห็นได้ว่าในชุดควบคุม ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตเฉลี่ยถึงร้อยละ 70.08 ขณะที่ชุดทดลองมีการเติมโซเดียมโมลิบเดตแบบต่อเนื่อง พบว่าระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตเพียงร้อยละ 8.74 ซึ่งในการทดลองนี้จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการเติมโซเดียมโมลิบเดตจะทำให้ระบบมีการกำจัดซัลเฟตได้น้อยลง สอดคล้องกับผลการทดลองหัวข้อที่ 4.2.1.2 ซึ่งเป็นการทดลองใช้น้ำเสียสังเคราะห์ นั้นแสดงว่าโซเดียมโมลิบเดตสามารถใช้กับน้ำเสียจริงจากฟาร์มสุกรได้เช่นกัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการทดลองในระยะเวลาการทดลองที่ 2 ในชุดทดลองซึ่งมีการเติมโซเดียมโมลิบเดตเป็นรอบ โดยผู้วิจัยได้เติมสารดังกล่าวลงในถังพักน้ำเสียวันที่ 11 ของการทดลอง หลังจากนั้นพบว่า เมื่อเวลาผ่านไปจนถึงวันที่ 16 ระบบเริ่มมีการกำจัดซัลเฟตได้สูงขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากความเข้มข้นของโซเดียมโมลิบเดตในระบบลดลง แบบที่เรียกกลุ่ม

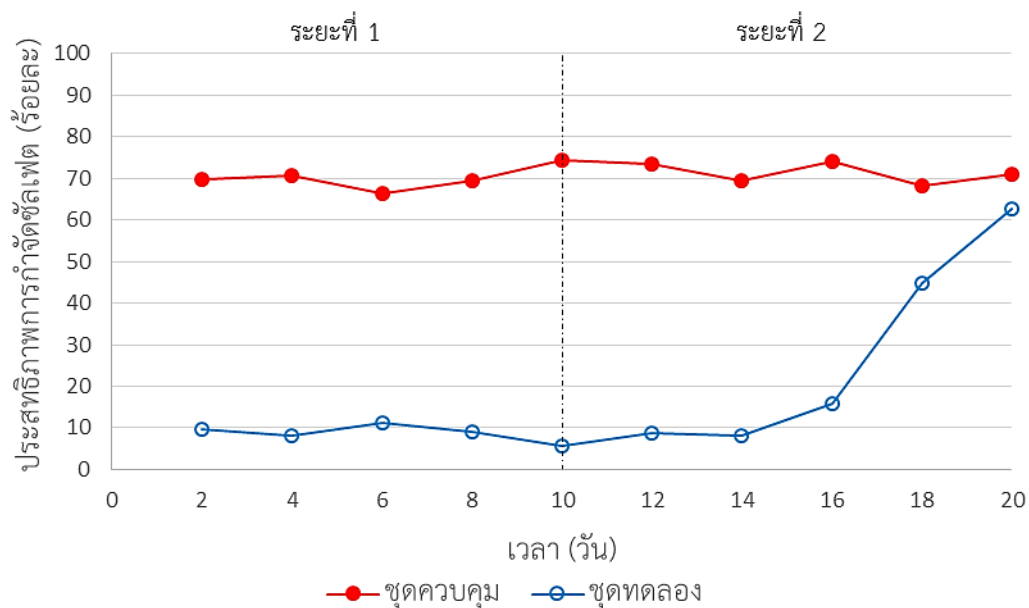
รีดิวซ์ซัลเฟตในระบบจึงสามารถกลับมาใช้ซัลเฟตได้



ภาพที่ 4.19 ปริมาณซัลเฟตของชุดควบคุมตลอดการทดลองการใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกร



ภาพที่ 4.20 ปริมาณซัลเฟตของชุดทดลองตลอดการทดลองการใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกร



ภาพที่ 4.21 ประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตตลอดการทดลองใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกร

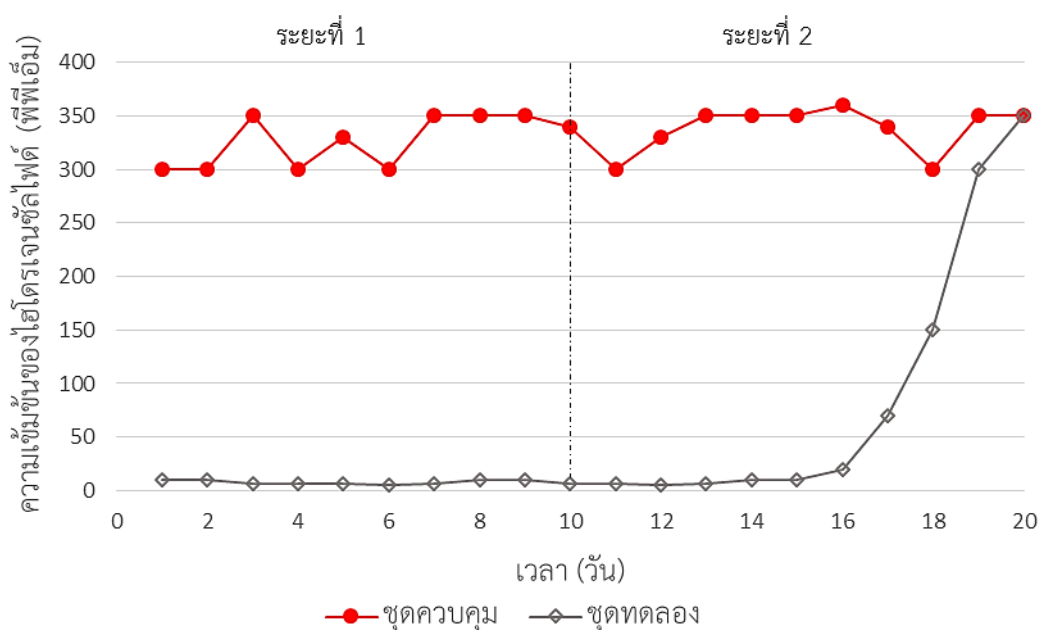
4.3.1.3 ไฮโดรเจนซัลไฟด์

การทดลองด้วยน้ำเสียจริงจากฟาร์มสุกร ผู้วิจัยได้เริ่มเดินระบบด้วยอัตราการสูบน้ำเสีย 5 ลิตรต่อวัน เพื่อให้จุลินทรีย์ในระบบสามารถคุ้นชินกับน้ำเสียก่อน แต่ในระยะแรกพบว่าไม่มีไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดขึ้น ซึ่งคาดว่าแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตในระบบอาจยังไม่คุ้นชินกับน้ำเสียดังกล่าว จึงทำให้ใช้ซัลเฟตในระบบได้น้อย ผู้วิจัยจึงต้องเวลาเดินระบบประมาณ 45 วันและเพิ่มอัตราการสูบน้ำเสียเป็น 10 และ 20 ลิตรต่อวันตามลำดับ เพื่อให้จุลินทรีย์ในระบบสามารถปรับตัวและให้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆคงที่ได้

ตารางที่ 4.18 ไฮโดรเจนซัลไฟด์ตลอดการทดลองด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

ระยะที่	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง
1	ค่าต่ำสุด	300	5
	ค่าสูงสุด	350	10
	ค่าเฉลี่ย	330	7.67
2	ค่าต่ำสุด	300	5
	ค่าสูงสุด	360	350
	ค่าเฉลี่ย	338	92.8

จากตารางที่ 4.18 พบว่า ปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์เฉลี่ยในชุดควบคุมตลอดระยะเวลาการทดลองที่ 1-2 เท่ากับ 330 และ 338 พีพีเอ็ม ตามลำดับ ส่วนในชุดทดลอง เท่ากับ 7.67 และ 92.8 พีพีเอ็ม ตามลำดับ จากภาพที่ 4.22 เมื่อพิจารณาในชุดทดลองตลอดระยะที่ 1 คือมีการเติมโซเดียมโมลิบเดตแบบต่อเนื่องความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ พบว่า มีปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์เฉลี่ย 7.67 พีพีเอ็ม แสดงให้เห็นว่า การเติมโซเดียมโมลิบเดตแบบต่อเนื่องสามารถยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ต่ำกว่า 20 พีพีเอ็ม ส่วนในการเติมโซเดียมโมลิบเดตแบบเป็นรอบ สำหรับการทดลองนี้เติมในวันที่ 11 และหยุดเติม จะเห็นได้ว่าเมื่อระบบดำเนินไปจนถึงวันที่ 16 ปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์เพิ่มขึ้นจาก 10 พีพีเอ็ม จนถึง 350 พีพีเอ็มในวันที่ 20 ของการทดลอง ซึ่งการเพิ่มขึ้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้อธิบายดังเช่นหัวข้อที่ 4.2.1.3



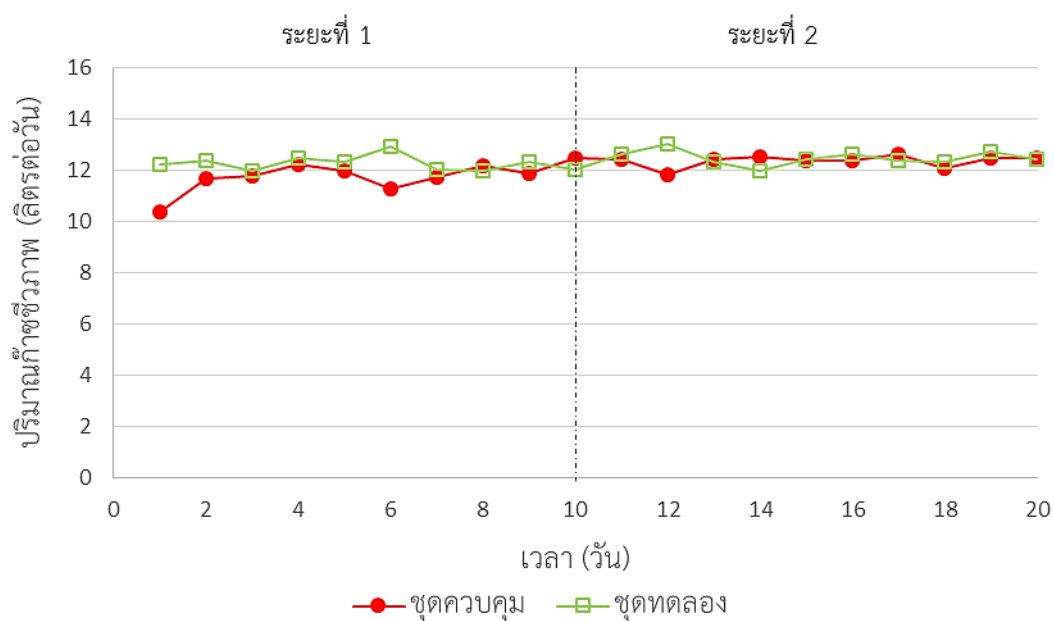
ภาพที่ 4.22 ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ตลอดการทดลองใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกร

นอกจากนี้ ผลการทดลองดังกล่าวยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ranade และคณะ (1999) ซึ่งศึกษาการผลของโซเดียมโมลิบเดตต่อการยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบกวนสมบูรณ พบว่า การใช้ความเข้มข้นโซเดียมโมลิบเดต 3 มิลลิโมลาร์ สามารถยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ถึง 10 วัน แต่หลังจากนั้นไฮโดรเจนซัลไฟด์จะค่อยๆเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนมีความเข้มข้นใกล้เคียงกับชุดควบคุม

4.3.1.4 ก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ 4.19 ก๊าซชีวภาพตลอดการทดลองด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

ระยะที่	ก๊าซชีวภาพ (ลิตรต่อวัน)	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง
1	ค่าต่ำสุด	8.411	11.973
	ค่าสูงสุด	12.221	12.957
	ค่าเฉลี่ย	11.353	12.301
2	ค่าต่ำสุด	11.834	11.988
	ค่าสูงสุด	12.635	13.021
	ค่าเฉลี่ย	12.373	12.462



ภาพที่ 4.23 ปริมาณก๊าซชีวภาพตลอดการทดลองใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกร

จากตารางที่ 4.19 ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการทดลองที่ 1-2 ของชุดควบคุม คือ 11.353 และ 12.373 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ ส่วนในชุดทดลอง เท่ากับ 12.301 และ 12.462 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ ในการเริ่มต้นเดินระบบด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ผู้วิจัยปรับอัตราการสูบน้ำเสียคือ 5 และ 20 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ เพื่อให้จุลินทรีย์ในระบบคุ้นชินกับน้ำเสียดังกล่าว พบว่ามีปริมาณ

ก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นเฉลี่ยจาก 3.69 6.77 และ 12.06 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราการสูบน้ำเสียทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าในระยะการทดลองที่ 1 ชุดทดลองมีการเกิดก๊าซชีวภาพเฉลี่ยมากกว่าชุดควบคุมเนื่องจากการเติมโซเดียมโกลิเบตเพื่อยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ ดังแสดงในภาพที่ 4.23 และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นระหว่างชุดควบคุมและชุดทดลอง จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้แตกต่างกันไม่มากนัก แสดงให้เห็นว่าการเติมโซเดียมโกลิเบตที่ความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ ทั้งการเติมแบบต่อเนื่องและการเติมแบบเป็นรอบไม่เป็นพิษต่อระบบ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Predicala และคณะ (2008) ศึกษาการยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์จากน้ำเสียมูลสุกรเก่าและใหม่ โดยใช้โซเดียมโกลิเบต ทำการทดลองระดับห้องปฏิบัติการและระดับกึ่งภาคสนาม (Semi-pilot scale) ในการทดลองระดับปฏิบัติการ ทดลองในขวดซีรัมระบบปิดขนาด 125 มิลลิลิตรและ 4 ลิตร เปรียบเทียบการยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ระหว่างการเติมโซเดียมโกลิเบต 2 มิลลิโมลาร์ เป็นระยะเวลา 40-60 วัน เทียบกับชุดควบคุม พบว่าสามารถควบคุมปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ เท่ากับ 10 ไมโครลิตร/ลิตร ขณะที่ชุดควบคุมเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1,500 ไมโครลิตร/ลิตร ซึ่งให้ผลใกล้เคียงกันทั้งในมูลสุกรใหม่และมูลสุกรเก่า นอกจากนี้การใช้โซเดียมโกลิเบตความเข้มข้นดังกล่าว ไม่ยับยั้งการเกิดก๊าซชีวภาพเมื่อเทียบกับชุดควบคุม

4.3.1.5 สัดส่วนมีเทน

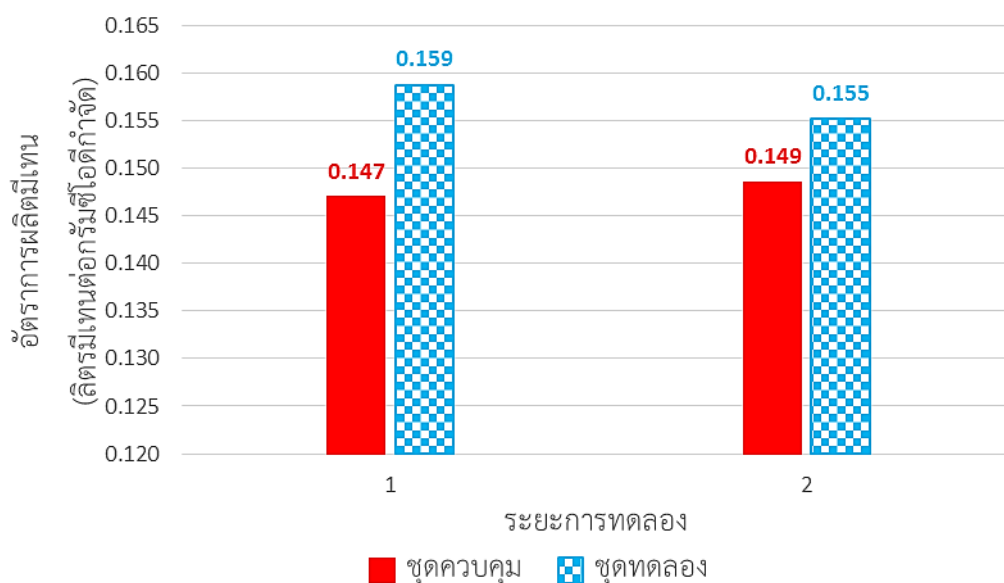
ตารางที่ 4.20 สัดส่วนมีเทนตลอดการทดลองด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

ระยะที่	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง
1	ค่าต่ำสุด	48.631	39.468
	ค่าสูงสุด	54.635	55.596
	ค่าเฉลี่ย	51.201	49.442
2	ค่าต่ำสุด	48.881	49.980
	ค่าสูงสุด	57.308	54.968
	ค่าเฉลี่ย	52.255	52.261

จากตารางที่ 4.20 สัดส่วนมีเทนเฉลี่ยในระยะการทดลองที่ 1 และ 2 ของชุดควบคุม คือ ร้อยละ 51.201 และ 52.255 ตามลำดับ ส่วนในชุดทดลอง คือ ร้อยละ 49.442 และ 52.261 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ทั้งสองชุดการทดลองมีสัดส่วนมีเทนใกล้เคียงกัน ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วค่าสัดส่วนมีเทนในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนควรมีค่าประมาณร้อยละ 60-70 (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542) จากการทดลองนี้มีต่ำกว่าช่วงดังกล่าว ซึ่งอาจเกิดจากจุลินทรีย์ในระบบยังไม่คุ้นชินกับ

น้ำเสีย เนื่องจากน้ำเสียที่ได้จากฟาร์มสุกรมีลักษณะน้ำเสียไม่คงที่และมีสารอินทรีย์อื่นๆที่จุลินทรีย์ในระบบใช้ได้ยาก นอกจากนี้อาจเป็นผลจากการปรับค่าเวลากักน้ำในระบบต่ำเพียง 12 ชั่วโมง ซึ่งมีผลทำให้สัดส่วนมีเทนต่ำกว่าทฤษฎีได้ สอดคล้องกับการทดลองของ Song และคณะ (2010) ศึกษาประชากรของแบคทีเรียผลิตมีเทนในระบบยูเอเอสบีด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร โดยปรับค่าเวลากักน้ำ (HRT) ในระบบเป็น 7.0 6.4 5.0 และ 3.5 วัน ตามลำดับ พบว่า เมื่อปรับค่าเวลากักน้ำต่ำกว่า 7 วัน จะทำให้ระบบมีการผลิตก๊าซชีวภาพและมีค่าสัดส่วนมีเทนต่ำกว่าการใช้ค่าเวลากักน้ำสูงกว่า 7 วัน

เมื่อนำค่าสัดส่วนมีเทนที่ได้จากการทดลองมาคำนวณหาอัตราการผลิตมีเทนต่อซีโอดีที่ถูกกำจัด ดังแสดงในภาพที่ 4.24 พบว่า อัตราการผลิตมีเทนต่อซีโอดีที่ถูกกำจัดเฉลี่ยในระยะการทดลองที่ 1 และ 2 ของชุดทดลองที่มีการเติมโซเดียมโมลิบเดตมีค่า 0.159 และ 0.155 ลิตรมีเทนต่อซีโอดีที่ถูกกำจัด ตามลำดับ ส่วนในชุดควบคุมมีค่า 0.147 และ 0.149 ลิตรมีเทนต่อซีโอดีที่ถูกกำจัด ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าในชุดทดลองมีอัตราการผลิตมีเทนสูงกว่าในชุดควบคุม



ภาพที่ 4.24 อัตราการผลิตมีเทนต่อซีโอดีที่ถูกกำจัด

4.3.1.6 ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดและประสิทธิภาพการกำจัด

ตารางที่ 4.21 ของแข็งแขวนลอยและประสิทธิภาพการกำจัดตลอดการทดลองด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

ระยะที่	ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ชุดควบคุม		ชุดทดลอง	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
1	ค่าต่ำสุด	535	190	559	196
	ค่าสูงสุด	621	236	610	244
	ค่าเฉลี่ย	562.33	210	215.22	225.33
	ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ย (ร้อยละ)	62.56		61.16	
2	ค่าต่ำสุด	548	198	559	197
	ค่าสูงสุด	603	242	623	244
	ค่าเฉลี่ย	571.88	219.33	216.36	222
	ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ย (ร้อยละ)	61.64		62.12	

จากตารางที่ 4.21 ระยะการทดลองที่ 1 และ 2 ในชุดควบคุมมีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยเฉลี่ย 62.56 และ 61.64 ตามลำดับ ในชุดทดลองมีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยเฉลี่ย 61.16 และ 62.12 ตามลำดับ ในการทดลองนี้ใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกรซึ่งพบว่า มีปริมาณของแข็งแขวนลอยค่อนข้างสูงและในแต่ละครั้งที่ผู้วิจัยเก็บน้ำเสียยังพบว่า มีปริมาณของแข็งแขวนลอยไม่คงที่เนื่องจากน้ำเสียดังกล่าวมีปริมาณตะกอนค่อนข้างสูง ซึ่งในการวัดค่าของแข็งแขวนลอยในการทดลองนี้ ใช้หัตถ์ด้วย IQ Sensor Net ตรวจวัดติดตามอย่างต่อเนื่อง ทั้งยังมีการตรวจสอบด้วยวิธีมาตรฐานเพื่อเปรียบเทียบเพื่อให้ค่าที่ได้ถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าของแข็งแขวนลอยในชุดควบคุมและชุดทดลองพบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถบ่งบอกได้ว่าในชุดทดลองที่มีการเติมโซเดียมโมลิบเดตทั้งแบบต่อเนื่องและแบบเป็นรอบไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยดังกล่าว

4.3.1.7 โออาร์พี

ตารางที่ 4.22 ค่าโออาร์พีตลอดการทดลองด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

ระยะที่	โออาร์พี (มิลลิโวลต์)	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง
1	ค่าต่ำสุด	-405	-407
	ค่าสูงสุด	-356	-353
	ค่าเฉลี่ย	-377	-375
2	ค่าต่ำสุด	-412	-371
	ค่าสูงสุด	-334	-334
	ค่าเฉลี่ย	-371	-356

จากตารางที่ 4.22 ค่าโออาร์พีตลอดระยะเวลาการทดลองที่ 1 และ 2 ของชุดควบคุมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ -377 และ -371 ตามลำดับ ส่วนในชุดทดลองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ -375 และ -356 ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าเฉลี่ยของการทดลองทั้งสองชุดอยู่ในช่วงที่เหมาะสมในการเกิดกระบวนการผลิตมีเทน คือ ประมาณ -400

4.3.1.8 กรดไขมันระเหย

ตารางที่ 4.23 ค่ากรดไขมันระเหยตลอดการทดลองด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

ระยะที่	กรดไขมันระเหย (มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปกรดอะซิติก)	ชุดควบคุม		ชุดทดลอง	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
1	ค่าต่ำสุด	87	67	90.3	72
	ค่าสูงสุด	100.5	82	101.7	80.3
	ค่าเฉลี่ย	95.7	76.9	95.6	75.0
2	ค่าต่ำสุด	90.5	71.5	85.5	70
	ค่าสูงสุด	97.5	80	96.7	79.1
	ค่าเฉลี่ย	93.8	75.7	90.8	74.4

จากตารางที่ 4.23 ค่ากรดไขมันระเหยตลอดการทดลองระยะที่ 1 และ 2 ของชุดควบคุมในน้ำเข้าเฉลี่ยเท่ากับ 95.7 และ 93.8 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดอะซิติก ตามลำดับ น้ำออกมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 76.9 และ 75.7 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดอะซิติก ตามลำดับ ส่วนในชุดทดลองในน้ำเข้ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 95.6 และ 90.8 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดอะซิติก ตามลำดับ น้ำออกมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ

75.0 และ 74.4 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดอะซิติก ตามลำดับ จากการทดลอง จะเห็นได้ว่าค่ากรดไขมันระเหยในน้ำเสียฟาร์มสุกรในน้ำเข้ามีค่าเฉลี่ยมากกว่าน้ำออก ซึ่งแตกต่างจากการใช้น้ำเสียสังเคราะห์เนื่องจากไม่มีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตในการปรับค่าลึงค์ฟเฟอร์ในน้ำ โดยทั่วไปแล้วกรดไขมันระเหยในน้ำเสียเกิดจากสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรด ประกอบด้วยกรด 3 ชนิด ได้แก่ อะซิติก โพรไพโอนิก และบิวทิริก ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นอะซิติก และจะถูกใช้ต่อโดยกลุ่มแบคทีเรียผลิตมีเทน ซึ่งจากการทดลองจะเห็นได้ว่ากรดไขมันระเหยมีค่าลดลงเมื่อวัดค่าเปรียบเทียบในน้ำออกของทั้งสองชุดทดลอง สอดคล้องกับค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของการทดลองนี้เช่นกัน

4.3.1.9 สภาพต่างทั้งหมด (Alkalinity)

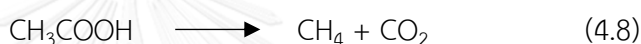
ตารางที่ 4.24 สภาพต่างทั้งหมดตลอดการทดลองด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

ระยะที่	สภาพต่างทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต)	ชุดควบคุม		ชุดทดลอง	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
1	ค่าต่ำสุด	920	1025	892	1035
	ค่าสูงสุด	1024	1212	985	1134
	ค่าเฉลี่ย	967	1102.4	938.2	1097.6
2	ค่าต่ำสุด	876	998	880	961
	ค่าสูงสุด	960	1178	948	1075
	ค่าเฉลี่ย	914.4	1081.4	912	1010.2

จากตารางที่ 4.24 สภาพต่างทั้งหมดตลอดระยะการทดลองที่ 1 และ 2 ของชุดทดลองในน้ำเข้าเฉลี่ยเท่ากับ 967 และ 914.4 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ ในน้ำออกเท่ากับ 1,102.4 และ 1,081.4 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ ส่วนในชุดทดลอง สภาพต่างทั้งหมดตลอดระยะการทดลองที่ 1 และ 2 ในน้ำเข้ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 938.2 และ 912 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ น้ำออกเท่ากับ 1,097.6 และ 1,010.2 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ จากการทดลองจะเห็นได้ว่าสภาพต่างทั้งหมดของชุดควบคุม ในน้ำออกจะมีมากกว่าน้ำเข้าซึ่งเกิดจากในระบบสามารถเกิดสภาพต่างขึ้นได้เองจากกระบวนการซัลเฟตรีดักชัน ด้วยสภาพต่างจากซัลไฟด์ไอออน (HS^-) และไบคาร์บอเนตไอออน ดังสมการที่ 4.6 และ 4.7



จากสมการดังกล่าว จะเห็นได้ว่าเมื่อเกิดกระบวนการซัลเฟตรีดักชันในระบบจะสามารถเกิดสภาพต่าง และจะส่งผลให้ระบบมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นด้วย สอดคล้องกับวิจัยของ กนกกาญจน์ กาญจนวัฒน์ (2552) ได้ศึกษาผลของพีเอชและอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่อการลดซัลเฟตในระบบยูเอเอสพีสำหรับการบำบัดน้ำเสียยางชัน พบว่า ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1 2 และ 3 กก./ลบ.ม./วัน ที่พีเอช 5 6 7 และ 8.5 ในน้ำออกมีค่าสภาพต่างสูงขึ้นกว่าน้ำเข้าทุกๆถึงปฏิกรณ์ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในชุดทดลองที่มีการเติมโซเดียมโมลิบเดต จะเห็นได้ว่าสภาพต่างในน้ำออกมากกว่าน้ำเข้าเช่นกัน ซึ่งโดยทฤษฎีแล้วเมื่อมีการเติมโซเดียมโมลิบเดต ระบบจะเกิดกระบวนการซัลเฟตรีดักชันได้ต่ำมาก จึงควรจะมีซัลไฟด์อ็อกไซด์และไบคาร์บอเนตอ็อกไซด์เกิดขึ้นต่ำเช่นกัน แต่จากการทดลองนี้สภาพต่างในน้ำออกมีค่าสูงกว่า อาจเกิดได้จากแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดสามารถสร้างกรดในระบบได้น้อยเนื่องจากสารอินทรีย์ในน้ำเสี่ย่อยสลายได้ยากกว่า ทั้งระบบยังมีการผลิตมีเทนเกิดขึ้น เมื่อพิจารณาตามสมการที่ 4.8



จะเห็นได้ว่าจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น ซึ่งเมื่อก๊าซดังกล่าวละลายน้ำจะมีผลทำให้เกิดสภาพต่างขึ้นได้ จึงทำภาพรวมของระบบเป็นเช่นนี้

4.3.1.10 พีเอช

ตารางที่ 4.25 ค่าพีเอชตลอดการทดลองด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

ระยะที่	พีเอช	ชุดควบคุม		ชุดทดลอง	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
1	ค่าต่ำสุด	7.216	7.321	7.231	7.38
	ค่าสูงสุด	7.343	7.425	7.343	7.432
	ค่าเฉลี่ย	7.259	7.356	7.264	7.402
2	ค่าต่ำสุด	7.211	7.367	7.211	7.378
	ค่าสูงสุด	7.305	7.429	7.305	7.456
	ค่าเฉลี่ย	7.246	7.400	7.245	7.417

จากตารางที่ 4.25 ค่าพีเอชตลอดระยะเวลาการทดลองที่ 1 และ 2 ของชุดควบคุม พบว่าน้ำเข้ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.259 และ 7.246 ตามลำดับ น้ำออกมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.356 และ 7.400 ตามลำดับ ส่วนในชุดทดลอง พบว่าน้ำเข้ามีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 7.264 และ 7.245 ตามลำดับ น้ำออกมีค่าเฉลี่ย

เท่ากับ 7.402 และ 7.417 ตามลำดับ จากการทดลองจะเห็นได้ว่า ค่าพีเอชเฉลี่ยน้ำออกของชุดทดลองทั้งสองมีค่าสูงกว่าน้ำเข้า ซึ่งการที่ค่าพีเอชสูงขึ้นอาจเนื่องมาจากการปรับค่าเวลากักน้ำต่ำ ทำให้แบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดเปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นกรดได้น้อยลง อีกทั้งการเกิดกระบวนการผลิตมีเทนในระบบจะทำให้ระบบจะมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นดังอธิบายในหัวข้อ 4.2.1.10

4.3.1.11 ซัลไฟด์

ตารางที่ 4.26 ค่าซัลไฟด์ตลอดการทดลองด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

ระยะที่	ซัลไฟด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ชุดควบคุม		ชุดทดลอง	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
1	ค่าต่ำสุด	1.03	5.7	1.23	0.9
	ค่าสูงสุด	2.01	7.5	1.54	1.35
	ค่าเฉลี่ย	1.434	6.6	1.342	1.132
2	ค่าต่ำสุด	1.24	5.8	1.27	0.88
	ค่าสูงสุด	1.59	6.8	1.44	5.59
	ค่าเฉลี่ย	1.414	6.36	1.376	2.776

จากตารางที่ 4.26 ซัลไฟด์ตลอดระยะการทดลองที่ 1 และ 2 ของชุดควบคุมในน้ำเข้ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.434 และ 1.414 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ น้ำออกมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.6 และ 6.36 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนในชุดทดลองในน้ำเข้ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.342 และ 1.376 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ น้ำออกมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.132 และ 2.776 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากการทดลองจะเห็นได้ว่า ในชุดควบคุมทั้งระยะการทดลองที่ 1 และ 2 มีค่าซัลไฟด์น้ำเข้าน้อยกว่าน้ำออกมาก ซึ่งในน้ำเสียจริงอาจมีปริมาณซัลไฟด์เกิดขึ้นได้เนื่องจากในน้ำเสียมีกลุ่มจุลินทรีย์เจือปนมากับน้ำเสียและเมื่อป้อนเข้าสู่ระบบเกิดกระบวนการซัลเฟตรีดักชันได้จึงทำให้มีค่าซัลไฟด์ละลายเพิ่มขึ้น จากงานวิจัยของ Speece (1983) แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของซัลไฟด์ละลายน้ำที่แบคทีเรียทนได้สูงสุดคือ 145 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งซัลไฟด์สามารถเปลี่ยนรูปได้ตามค่าพีเอชในระบบ ในการทดลองนี้จะเห็นว่าค่าพีเอชอยู่ในช่วง 7.2-7.4 ซึ่งทำให้ซัลไฟด์อยู่ในรูปก๊าซและลายน้ำอย่างละร้อยละ 50 โดยประมาณ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในชุดทดลองที่มีการเติมโซเดียมโมลิบเดตจะเห็นได้ว่ามีปริมาณซัลไฟด์น้อยมากทั้งน้ำเข้าและน้ำออก สอดคล้องกับหัวข้อ 4.3.1.3 ซึ่งพบว่าเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์น้อยมากเช่นกัน

4.4 สมดุลมวลสารของระบบ

4.4.1 สมดุลมวลของซีโอดี

การพิจารณาสมดุลมวลซีโอดี ทำให้ทราบถึงความน่าเชื่อถือของข้อมูล โดยการหาค่า % recovery ของข้อมูลดังกล่าว ซึ่งการใช้ซีโอดีของจุลินทรีย์ในระบบแบบไม่ใช้ออกซิเจนเกิดจากหลายกระบวนการ เช่น กระบวนการซัลเฟตรีดักชัน (Sulfate reduction) กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (denitrification) และ กระบวนการผลิตมีเทน (Methanogenesis) เป็นต้น กระบวนการเหล่านี้ใช้สารให้อิเล็กตรอนคือซีโอดีจากสารอินทรีย์ หรือสารให้คาร์บอนประเภทต่างๆที่จุลินทรีย์สามารถใช้ได้ งานวิจัยนี้ ใช้สารให้ซีโอดีคือน้ำตาลทรายขาวในช่วงการทดลองที่ 2 และใช้สารอินทรีย์จากน้ำเสียฟาร์มสุกรเป็นสารให้ซีโอดีในช่วงการทดลองที่ 3

4.4.1.1 สมดุลมวลของซีโอดีช่วงการทดลองที่ 2

ช่วงการทดลองที่ 2 เป็นการทดลองด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งสารให้ซีโอดีคือน้ำตาลทรายขาว น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมขึ้นได้กำหนดสัดส่วนค่าซีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส เท่ากับ 100:2:0.5 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตมีเทน ในการทดลองช่วงนี้ สามารถหาค่าซีโอดีได้จากค่าซีโอดีน้ำเข้า ซีโอดีน้ำออก ซีโอดีที่ถูกใช้ในกระบวนการซัลเฟตรีดักชัน ปริมาตรก๊าซชีวภาพและสัดส่วนมีเทนในระบบ ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถนำมาคำนวณหา % recovery เพื่อทราบความน่าเชื่อถือของข้อมูลได้

ตารางที่ 4.27 ค่า % recovery ของสมดุลมวลซีโอดีตลอดช่วงการทดลองที่ 2

ระยะ ที่	ชุดการ ทดลอง	ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ซัลเฟต (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ก๊าซชีวภาพ (ลิตรต่อวัน)	สัดส่วน มีเทน (ร้อยละ)	% Recovery
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก			
1	ชุดควบคุม	5047	430	51.46	14.44	42.475	60.49	74.37
	ชุดทดลอง	5099	451	53.38	41.88	42.154	60.03	72.65
2	ชุดควบคุม	5093	403	102.04	25.24	42.613	58.73	72.01
	ชุดทดลอง	5167	451	104.65	93.33	39.759	60.52	68.73
3	ชุดควบคุม	5211	491	252.7	141.56	42.797	52.97	66.70
	ชุดทดลอง	5324	554	255.36	239.74	39.180	62.70	69.91
4	ชุดควบคุม	5427	655	337.43	168.14	39.594	46.85	58.07
	ชุดทดลอง	5634	998	337.43	319.90	38.149	58.39	68.76
5	ชุดควบคุม	5098	561	106.62	28.83	42.492	54.39	70.24
	ชุดทดลอง	5149	460	103.28	67.41	42.118	60.88	73.35

จากตารางที่ 4.27 จะเห็นได้ว่า ค่า % recovery ของชุดทดลองและชุดควบคุมทั้ง 5 ระยะการทดลองมีค่าต่ำสุด-สูงสุด คือ 58.07 และ 74.37 ตามลำดับ ซึ่งค่าดังกล่าวมีค่าไม่ถึง 100 เนื่องจากไม่สามารถวัดค่าซีไอดีที่ถูกเปลี่ยนไปเป็นเซลล์แบคทีเรียได้ รวมถึงระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ ค่าอีลด์ในการเปลี่ยนเป็นเซลล์แบคทีเรียในระบบมีค่าเพียงร้อยละ 10 ของสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายเท่านั้น (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2542) ค่าที่วัดได้จึงต่ำกว่าความเป็นจริงเสมอ และเมื่อพิจารณาจุลินทรีย์ในระบบ พบว่าเป็นจุลินทรีย์ประเภทไม่ใช้ออกซิเจน แบคทีเรียดังกล่าวจะได้พลังงานจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่ำ ทำให้นำพลังงานไปใช้ในการสร้างเซลล์ได้น้อย เมื่อเปรียบเทียบกับจุลินทรีย์ประเภทใช้ออกซิเจน จะเห็นได้ว่า แบคทีเรียประเภทใช้ออกซิเจนได้พลังงาน 38 ATP จากการย่อยสลายกลูโคส 1 โมเลกุล ขณะที่แบคทีเรียประเภทไม่ใช้ออกซิเจนได้พลังงานเพียง 7 ATP เท่านั้น (Speece, 1996) นอกจากนี้ ตลอดการทดลองผู้วิจัยไม่มีการตรวจวัดค่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระบบ เมื่อคำนวณค่า % recovery จึงทำให้มีค่าต่ำกว่า 100

4.4.1.2 สมดุลมวลซีไอดีของช่วงการทดลองที่ 3

ช่วงการทดลองที่ 3 เป็นการทดลองด้วยน้ำเสียจริงจากฟาร์มสุกร สารให้ซีไอดีคือสารอินทรีย์จากน้ำเสียดังกล่าว

ตารางที่ 4.28 ค่า % recovery ของสมดุลมวลซีไอดีตลอดช่วงการทดลองที่ 3

ระยะที่	ชุดการทดลอง	ซีไอดี		ซัลเฟต		ก๊าซชีวภาพ (ลิตรต่อวัน)	สัดส่วน มีเทน	% Recovery
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก			
1	ชุดควบคุม	2929	753	28.22	8.10	12.373	52.25	55.52
	ชุดทดลอง	2659	744	30.01	27.38	12.301	49.44	58.39
2	ชุดควบคุม	2929	753	28.22	8.10	12.373	52.25	55.43
	ชุดทดลอง	2878	780	29.08	21.10	12.462	52.26	57.29

จากตารางที่ 4.28 จะเห็นได้ว่า ค่า % recovery ของชุดทดลองและชุดควบคุมในระยะการทดลองที่ 1 เท่ากับ 55.52 และ 58.39 ส่วนในระยะการทดลองที่ 2 เท่ากับ 55.43 และ 57.29 ตามลำดับ ค่าดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าการทดลองด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าน้ำเสียที่ใช้อาจมีไนโตรเจนเจือปน ทำให้เกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันซึ่งเปลี่ยนไนเตรทเป็นไนโตรเจน กระบวนการดังกล่าวมีการดึงซีไอดีไปใช้ เมื่อไม่มีการหาค่าซีไอดีที่ใช้ในกระบวนการดีไนตริฟิเคชันจึงทำให้คิดค่า % recovery ได้ต่ำกว่าที่ควรจะเป็น ในการทดลองนี้ไม่ได้คำนึงถึงการเกิดกระบวนการดังกล่าว ทำให้ไม่มีการตรวจค่าไนเตรทของน้ำเสียและไม่มีการหาซีไอดีจากกระบวนการข้างต้น ซึ่งอาจเป็นจุดอ่อนของการทดลองในช่วงนี้ได้ จากงานวิจัยของ จันทิมา สกกุลพานิชย์ (2548) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มี

ซัลเฟตและไนเตรทสูงด้วยระบบยูเอเอสพี ใช้อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตต่อไนเตรท คือ 600:90:60 ทดลอง 3 ถึงปฏิบัติการ พบว่า คิดค่า % recovery ได้เท่ากับ 63.81 60.33 และ 63.68 ตามลำดับ ซึ่งค่าดังกล่าวเกิดจากการคำนวณด้วยค่าซีโอดีที่ได้จากกระบวนการซัลเฟตรีดักชันและดีไนตริฟิเคชันด้วย

4.4.2 สมดุลมวลของซัลเฟอร์

การพิจารณาสมดุลมวลซัลเฟอร์ในงานวิจัยนี้ เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่ง เนื่องจากการพิจารณาดังกล่าวมีส่วนช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อทวนสอบย้อนกลับได้ กล่าวคือ งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบไม่ใช้ออกซิเจนด้วยถังปฏิกรณ์ยูเอเอสพีโดยใช้โซเดียมโมลิบเดต ซึ่งสารดังกล่าวมีผลยับยั้งการใช้ซัลเฟตของแบคทีเรียในระบบ ทั้งนี้การตรวจสอบว่าโซเดียมโมลิบเดตสามารถยับยั้งการใช้ซัลเฟตได้จริง จึงต้องพิจารณาจากการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ซัลเฟต และซัลไฟด์ทั้งน้ำเข้าและน้ำออกของระบบ ในที่นี้เราสามารถพิจารณาค่าดังกล่าวในรูปแบบซัลเฟอร์ (S) และคำนวณเป็นค่า % recovery ได้

4.4.2.1 สมดุลมวลของซัลเฟอร์ตลอดช่วงการทดลองที่ 2

ช่วงการทดลองที่ 2 เป็นการทดลองด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ ค่าซัลเฟตที่ป้อนเข้าสู่ระบบจึงถูกควบคุมตามค่าซีโอดีต่อซัลเฟต โดยในระยะเวลาการทดลองที่ 1-5 มีค่าซัลเฟต 50 100 250 333.33 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

ตารางที่ 4.29 ค่า % recovery ของสมดุลมวลซัลเฟอร์ตลอดช่วงการทดลองที่ 2

ระยะ ที่	ชุดการ ทดลอง	ซัลเฟต (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ซัลไฟด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ไฮโดรเจน ซัลไฟด์ (พีพี เอ็ม)	ก๊าซ ชีวภาพ (ลิตร)	% Recovery
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก			
1	ชุดควบคุม	51.46	14.44	0.74	10.8	555	42.475	95.70
	ชุดทดลอง	53.38	41.88	0.162	1.7	19	42.154	95.51
2	ชุดควบคุม	102.04	25.24	0.156	21.8	970	42.613	96.19
	ชุดทดลอง	104.65	93.33	0.142	1.22	12.1	39.759	92.38
3	ชุดควบคุม	252.7	141.56	0.134	22.9	3870	42.797	95.49
	ชุดทดลอง	255.36	239.74	0.132	1.2	12	39.180	95.17
4	ชุดควบคุม	333.86	168.14	0.856	27.8	7030	39.594	90.51
	ชุดทดลอง	337.43	319.90	0.93	2.8	19	38.149	96.53
5	ชุดควบคุม	106.62	28.83	0.27	19.9	974	42.492	89.88
	ชุดทดลอง	103.28	67.41	0.15	8.6	367	42.118	92.84

จากตารางที่ 4.29 จะเห็นได้ว่าค่า % recovery ในระยะการทดลองที่ 1-5 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 94.02 ซึ่งใกล้เคียง 100 แต่สาเหตุที่ค่าดังกล่าวต่ำกว่า 100 เนื่องจากอาจมีซัลเฟตบางส่วนเปลี่ยนรูปเป็นตะกอนซัลเฟตในระบบซึ่งไม่สามารถตรวจสอบได้ นอกจากนี้ซัลเฟตยังเป็นสารอาหารจำเป็นอย่างหนึ่งที่แบคทีเรียใช้ในการสร้างเซลล์ ดังนั้นจะมีซัลเฟตส่วนหนึ่งที่แบคทีเรียดึงไปใช้ จึงทำให้ไม่สามารถตรวจสอบได้เช่นกัน จากสาเหตุดังกล่าวเมื่อนำค่าที่ได้มาคำนวณ % recovery จึงได้ค่าต่ำกว่า 100 เสมอ

4.4.2.2 สมดุลมวลของซัลเฟตตลอดช่วงการทดลองที่ 3

การทดลองช่วงที่ 3 เป็นการใช้น้ำเสียจริงจากฟาร์มสุกร ซึ่งปริมาณซัลเฟตในแต่ละรอบของการเก็บตัวอย่างจะมีค่าไม่เสถียร จากช่วงการทดลองนี้ซัลเฟตที่ป้อนเข้าสู่ระบบมีค่าเฉลี่ย 29.23 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 4.30 ค่า % recovery ของสมดุลมวลซัลเฟตตลอดช่วงการทดลองที่ 3

ระยะ ที่	ชุดการ ทดลอง	ซัลเฟต (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ซัลไฟด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ไฮโดรเจนซัล ไฟด์ (พีพีเอ็ม)	ก๊าซ ชีวภาพ (ลิตร)	% Recovery
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก			
		1	ชุดควบคุม	29.62	8.86			
	ชุดทดลอง	30.00	27.38	1.3	1.1	8	12.301	90.50
2	ชุดควบคุม	28.22	8.10	1.4	6.4	338	12.374	86.18
	ชุดทดลอง	29.08	21.10	1.4	2.8	93	12.462	89.28

จากตารางที่ 4.30 ค่า % recovery ของชุดควบคุมและชุดทดลองในระยะการทดลองที่ 1 เท่ากับ 86.59 และ 90.50 ส่วนระยะการทดลองที่ 2 เท่ากับ 86.18 และ 89.28 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าดังกล่าวมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าช่วงการทดลองที่ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ และต่ำกว่า 100 ซึ่งสาเหตุดังกล่าว นอกจากจะเกิดจากที่ได้อธิบายไปในหัวข้อ 4.4.2.1 แล้ว ยังอาจเกิดได้จากการที่ค่าซัลไฟด์ละลาย (S^{2-}) หนีออกจากน้ำได้เมื่อสัมผัสกับอากาศ เป็นผลให้การวัดค่าดังกล่าวคลาดเคลื่อนได้ และเนื่องจากในระหว่างการทดลอง ผู้วิจัยต้องเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ยังไม่ได้ใช้ทดลองในอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อรักษาสภาพน้ำเสียให้ใกล้เคียงกับลักษณะน้ำเสียที่เก็บมาจากฟาร์มสุกรจึงอาจทำให้ลักษณะน้ำเสียเปลี่ยนแปลงได้ นอกจากนี้ในน้ำเสียจริงจะมีกลุ่มแบคทีเรียที่สามารถใช้ซัลเฟตได้ เมื่อนำมาทดลองโดยการเติมลงในถังน้ำเสียขาเข้าซึ่งไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ จึงทำให้เกิดกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนหรือเกิดการเน่าเสียของน้ำตามธรรมชาติได้ จากสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้ค่าซัลเฟตและซัลไฟด์ละลายในถังพักน้ำเสียขาเข้ามีความคลาดเคลื่อนได้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การทดลองช่วงที่ 1 เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของโซเดียมโมลิบเดตในการยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบแบบแบตช์ ในแต่ละอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต ได้แก่ 100 50 20 และ 15 โดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมโมลิบเดต 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 มิลลิโมลาร์ ทดลองในแต่ละอัตราส่วนดังกล่าว ตามลำดับ พบว่า โซเดียมโมลิบเดตสามารถยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ต่ำกว่า 20 พีพีเอ็ม ที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 100 50 20 และ 15 เมื่อใช้โซเดียมโมลิบเดตเข้มข้น 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ นอกจากนี้ การใช้ความเข้มข้นดังกล่าวไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและสัดส่วนมีเทนในระบบ แต่เมื่อใช้ความเข้มข้นโซเดียมโมลิบเดต 2.0 มิลลิโมลาร์ จะทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพต่ำลงเมื่อเทียบกับชุดทดลอง จากการทดลองทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพและความเข้มข้นที่เหมาะสมในการยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์และผลต่อการผลิตมีเทนได้

การทดลองช่วงที่ 2 เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของโซเดียมโมลิบเดตในการยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ ในระบบยูเอเอสบี แบ่งการทดลองเป็น 5 ระยะ การทดลองระยะที่ 1-4 ระยะละ 10 วัน ปรับอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเป็น 100 50 20 และ 15 เติมโซเดียมโมลิบเดตแบบต่อเนื่องด้วยความเข้มข้น 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ ส่วนระยะที่ 5 ทดลองเป็นเวลา 20 วัน ใช้อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 50:1 เติมโซเดียมโมลิบเดตแบบเป็นรอบที่ความเข้มข้น 1.0 มิลลิโมลาร์ พบว่า ระยะที่ 1-4 สามารถยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ต่ำกว่า 20 พีพีเอ็ม ขณะที่ชุดควบคุมเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์เฉลี่ย 555 970 3,870 และ 7,030 พีพีเอ็ม ตามลำดับ ในระยะการทดลองที่ 5 การเติมแบบเป็นรอบสามารถยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ 5 วัน หลังจากนั้นความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์จะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนใกล้เคียงชุดควบคุม และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี พบว่า เมื่อใช้โซเดียมโมลิบเดต 2.0 มิลลิโมลาร์ จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีต่ำลงเมื่อเทียบกับชุดควบคุม

การทดลองช่วงที่ 3 เป็นการศึกษาต่อเนื่องจากการทดลองช่วงที่ 2 โดยใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกร แบ่งการทดลองเป็น 2 ระยะ ระยะแรกมีการเติมโซเดียมโมลิบเดตแบบต่อเนื่อง ระยะที่สองเติมแบบเป็นรอบ จากการศึกษาสมบัติน้ำเสียเบื้องต้น พบว่า น้ำเสียมีค่าซีโอดีต่อซัลเฟตคิดเป็นอัตราส่วน 90.27 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ใช้ในการทดลองช่วงที่ 2 ระยะการทดลองที่ 1 (ซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 100) ผู้วิจัยจึงเลือกใช้โซเดียมโมลิบเดตความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ในการทดลอง พบว่า สามารถยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ต่ำกว่า 20 พีพีเอ็ม ขณะที่ชุดควบคุมเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์เฉลี่ย 329

พีพีเอ็ม นอกจากนี้การเติมโซเดียมโพลิบิเตทแบบเป็นรอบสามารถยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่ำกว่า 20 พีพีเอ็มได้ถึง 5 วัน จากนั้นจะค่อยๆเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับชุดทดลอง จากการทดลองในช่วงที่ 2 และ 3 ทำให้ทราบว่า โซเดียมโพลิบิเตทสามารถใช้ในการยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบยูเอ-เอสพีด้วยน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงจากฟาร์มสุกรได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้ จากการทดลองข้างต้นมีการใช้โซเดียมโพลิบิเตทชนิดผงเติมลงในถังน้ำเสียขาเข้า และคำนวณความเข้มข้นตามปริมาตรน้ำเสียในถังได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเติมโซเดียมโพลิบิเตทเช่นนี้ สามารถปรับใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียอื่นๆ โดยการเติมลงในถังน้ำเสียขาเข้าได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยนี้ สามารถนำผลการทดลองไปประยุกต์ใช้ในเชิงอุตสาหกรรมได้ เนื่องจากโซเดียมโพลิบิเตทมีความเป็นพิษต่ำ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สารประกอบของโซเดียมโพลิบิเตทหลังทำปฏิกิริยาสามารถสลายตัวตามธรรมชาติได้ อีกทั้งความเข้มข้นในการใช้ยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ (Diamantino และคณะ, 2000; Sugahara และ Schwartz, 1979) การใช้งานโซเดียมโพลิบิเตทในระบบอื่นๆ สามารถคำนวณและเติมโซเดียมโพลิบิเตทชนิดผง ลงในถังน้ำเสียขาเข้าได้ หรือในกรณีใช้เพื่อการยับยั้งกลิ่นเหม็นจากไฮโดรเจนซัลไฟด์ก็สามารถทำได้ในลักษณะเดียวกัน จากการทดลองนี้ สามารถใช้โซเดียมโพลิบิเตทความเข้มข้นตั้งแต่ 0.5-2.0 มิลลิโมลาร์ หรือ 121-484 มิลลิกรัมต่อลิตร ยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ที่มีความเข้มข้น 500-7,800 พีพีเอ็มได้ แต่การใช้งานอาจมีข้อด้อยในเรื่องราคาของโซเดียมโพลิบิเตท ในกรณีที่ซื้อปริมาณน้อยสารดังกล่าวจะมีราคาแพง แต่เมื่อใช้งานในปริมาณมากขึ้นจะทำให้คุ้มทุนต่อการใช้งานได้ โซเดียมโพลิบิเตทที่สามารถใช้ได้มีหลายเกรด ในการทดลองนี้ใช้เกรดแลบความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 ซึ่งเมื่อใช้งานอาจไม่เหมาะสมในเรื่องราคา ผู้วิจัยจึงมีการทดลองเพิ่มเติมดังเช่นการทดลองช่วงที่ 1 โดยใช้โซเดียมโพลิบิเตทเกรดอุตสาหกรรมความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 ราคา กิโลกรัมละ 800 บาทแทน พบว่า ผลการทดลองให้ค่าใกล้เคียงกับการใช้โซเดียมโพลิบิเตทเกรดแลบในการทดลอง นั้นแสดงว่า สามารถใช้โซเดียมโพลิบิเตทเกรดอุตสาหกรรมในการใช้งานจริงได้ ผลการทดลองดังแสดงในภาคผนวก ค. นอกจากนี้สามารถเปรียบเทียบความคุ้มทุนต่อการใช้งานจริงได้ดังนี้

ตัวอย่าง การนำก๊าซชีวภาพไปใช้เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเครื่องปั่นไฟ

สมมุติให้ระบบบำบัดมีน้ำเสียความเข้มข้นซีไอที 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ถ้าซีไอที 1 กรัม เปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพ 0.5 ลิตร (สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย, 2554)

แสดงว่า

น้ำเสียปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร จะผลิตก๊าซชีวภาพได้ 2.5 ลูกบาศก์เมตร

ก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตร ผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 2 กิโลวัตต์-ชั่วโมง และ
1 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ขายไฟฟ้าได้ 4 บาท (สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย, 2554)

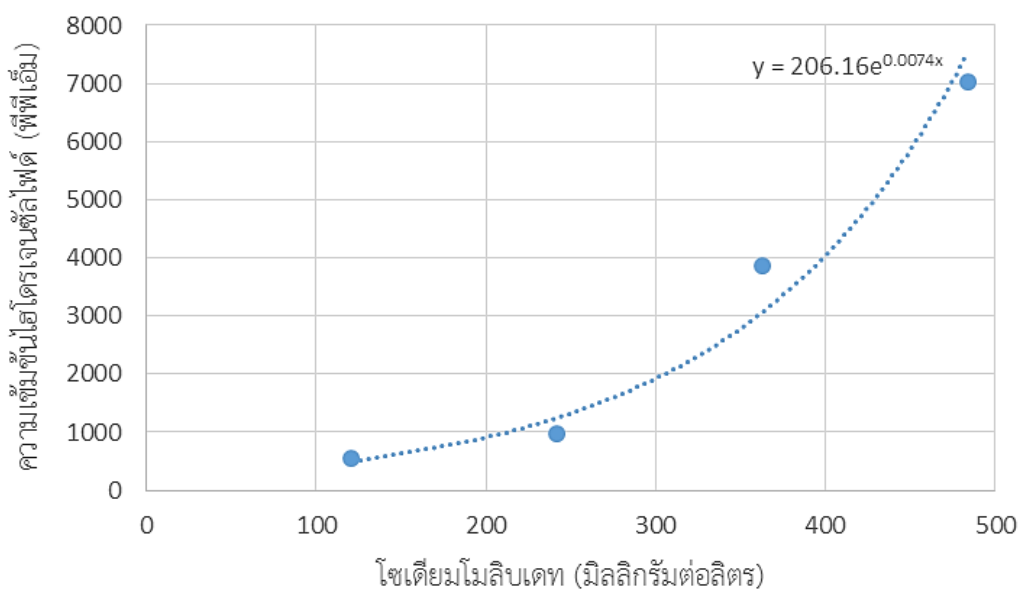
แสดงว่า

ก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตร ขายไฟฟ้าได้ 8 บาท

เพราะฉะนั้น

น้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร จะสามารถขายไฟฟ้าได้เท่ากับ $8 \times 2.5 = 20$ บาท

สมมติให้ใช้โซเดียมโพลิบิเดทความเข้มข้น 121 มิลลิกรัมต่อลิตร ชนิดเกรดแลป ราคา 800 บาทต่อ
กิโลกรัม คิดเป็น 96 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งจะเห็นได้ว่า การใช้โซเดียมโพลิบิเดทดังกล่าว
ยังไม่คุ้มทุนต่อการใช้กับน้ำเสีย แต่ในกรณีที่มีการซื้อขั้นต่ำ 1 ตัน จะได้ราคาโซเดียมโพลิบิเดทกิโลกรัม
ละ 142 บาท ซึ่งคิดเทียบเป็นการใช้งานข้างต้นจะเท่ากับ 17 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร
เพราะฉะนั้นการใช้โซเดียมโพลิบิเดทในปริมาณมากจะช่วยให้คุ้มค่าต่อการใช้งานจริง นอกจากนี้การ
ยกตัวอย่างดังกล่าวเป็นเพียงข้อมูลเบื้องต้นเท่านั้น ในกรณีน้ำเสียจริงมีค่าซีโอดีที่สูงกว่า 5,000
มิลลิกรัมต่อลิตร จะสามารถทำให้เพิ่มมูลค่าความคุ้มทุนเพิ่มขึ้นอีกด้วย นอกจากนี้ จากการทดลอง
ผู้วิจัยได้สร้างกราฟมาตรฐานเพื่อคำนวณความเข้มข้นโซเดียมโพลิบิเดทเบื้องต้นในการใช้งานจริงกับ
ระบบบำบัดน้ำเสียประเภทต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 5.1 และได้สมการคำนวณ คือ $y = 206.16e^{0.0074x}$



ภาพที่ 5.1 กราฟมาตรฐานสำหรับคำนวณความเข้มข้นโซเดียมโพลิบิเดทเพื่อการใช้งาน

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กนกกาญจน์ กาญจนวัฒน์. 2552. ผลของพีเอชและอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ต่อการลดซัลเฟตในระบบบยูเอเอสพีสำหรับการบำบัดน้ำเสียยางชั้น. ปรินูญามหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2545). ตำราาระบบบำบัดมลพิษน้ำ (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพมหานคร: สมาคมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- กรมควบคุมมลพิษ. คู่มือวิชาการระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ [ออนไลน์]. 2546. แหล่งที่มา: http://infofile.pcd.go.th/ptech/anair_manual1.pdf?CFID=1646059&CFTOKEN=74714494. [30 มีนาคม 2558]
- จันทิมา สกุลพานิชย์. 2548. การบำบัดน้ำเสียที่มีซัลเฟตและไนเตรทสูงโดยใช้ระบบบยูเอเอสพี. ปรินูญามหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- มันสิน ตันจุลเวศม์. (2542). เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม เล่ม 2 (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย. คู่มือ การปฏิบัติงานเกี่ยวกับการผลิต การควบคุมคุณภาพ และการใช้ก๊าซชีวภาพสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: http://www.div.go.th/km/safety/pdf/biogas_2.pdf. [10 เมษายน 2558]
- อนุตร เปียงแก้ว. 2542. การควบคุมระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันด้วยปริมาณซัลเฟต และชนิดของแหล่งคาร์บอน. ปรินูญามหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- อรุชา เศรษฐ์ธีรกิจ. 2542. อิทธิพลของความเข้มข้นซีโอดีและซัลเฟตที่มีต่อระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชัน. ปรินูญามหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.

ภาษาอังกฤษ

- Biswas, K. C., Woodards, N. A., Xu, H. and Barton, L. L. 2009. Reduction of molybdate by sulfate-reducing bacteria. *Biometals*. 22(1): 131-139.
- Braithwaite, E. R. and Haber, J. (2013). Molybdenum: an outline of its chemistry and uses (19). Elsevier.

- Brenner, G., Krieg, N. and Staley, J. (2005). Bergey's Manual® of Systematic Bacteriology: In: The Proteobacteria Part C the Alpha-, Beta-, Delta-, and Epsilonproteobacteria (2).
- Diamantino, T. C., Guilhermino, L., Almeida, E. and Soares, A. M. 2000. Toxicity of sodium molybdate and sodium dichromate to *Daphnia magna* Straus evaluated in acute, chronic, and acetylcholinesterase inhibition tests. Ecotoxicology and environmental Safety. 45(3): 253-259.
- Francese, P., CoÂrdoba, J., DuraÂn and SinÄ eriz, F. 1998. High upflow velocity and organic loading rate improve granulation in upflow anaerobic sludge blanket reactors. World Journal of Microbiology & Biotechnology. 14: 337-341.
- Frigaard, N. U. and Dahl, C. 2008. Sulfur metabolism in phototrophic sulfur bacteria. Advances in microbial physiology. 54: 103-200.
- Gottschalk, G., Barton, L. L. and Tomei, F. (1988). Characteristics and Activities of Sulfate-Reducing Bacteria (8). Springer US.
- Haaning Nielsen, A., Lens, P., Vollertsen, J. and Hvitved-Jacobsen, T. 2005. Sulfide-iron interactions in domestic wastewater from a gravity sewer. Water Res. 39(12): 2747-2755.
- Hao, T., Lu, H., Chui, H. K., van Loosdrecht, M. C. and Chen, G. H. 2013. Granulation of anaerobic sludge in the sulfate-reducing up-flow sludge bed (SRUSB) of SANI((R)) process. Water Sci Technol. 68(3): 560-566.
- Hao, T. W., Xiang, P. Y., Mackey, H. R., Chi, K., Lu, H., Chui, H. K., van Loosdrecht, M. C. and Chen, G. H. 2014. A review of biological sulfate conversions in wastewater treatment. Water Res. 65: 1-21.
- Hassan, A. and Jeries, J. 2010. Co-digestion of olive mill wastewater and swine manure using up-flow anaerobic sludge blanket reactor for biogas production. Journal of Water Resource and Protection. 2010.
- Hoidal, C., Hall, A., Robinson, M., Kulig, K. and Rumack, B. 1986. Hydrogen sulfide poisoning from toxic inhalations of roofing asphalt fumes. Ann Emerg Med: 826-830.

- Holmer, M. and Hasler-Sheetal, H. 2014. Sulfide intrusion in seagrasses assessed by stable sulfur isotopes—a synthesis of current results. Frontiers in Marine Science. 1: 64.
- HSDB, H. S. D. B. (1998). MEDLARS Online Information Retrieval System, National Library of Medicine. Retrieval 3/13/98.
- Hu, Y., Jing, Z., Sudo, Y., Niu, Q., Du, J., Wu, J. and Li, Y. Y. 2015. Effect of influent COD/SO₄(²⁻) ratios on UASB treatment of a synthetic sulfate-containing wastewater. Chemosphere. 130: 24-33.
- Jing, Z., Hu, Y., Niu, Q., Liu, Y., Li, Y.-Y. and Wang, X. C. 2013. UASB performance and electron competition between methane-producing archaea and sulfate-reducing bacteria in treating sulfate-rich wastewater containing ethanol and acetate. Bioresource technology. 137: 349-357.
- Koster, I., Rinzema, A., De Vegt, A. and Lettinga, G. 1986. Sulfide inhibition of the methanogenic activity of granular sludge at various pH-levels. Water Research. 20(12): 1561-1567.
- Lettinga, G., Van Velsen, A., Hobma, S. W., De Zeeuw, W. and Klapwijk, A. 1980. Use of the upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment. Biotechnology and bioengineering. 22(4): 699-734.
- Lo, K., Liao, P. and Gao, Y. 1994. Anaerobic treatment of swine wastewater using hybrid UASB reactors. Bioresource Technology. 47(2): 153-157.
- Lopes, S. I., Capela, M. I. and Lens, P. N. 2010. Sulfate reduction during the acidification of sucrose at pH 5 under thermophilic (55 degrees C) conditions. II: effect of sulfide and COD/SO₄(²⁻)(4) ratio. Bioresour Technol. 101(12): 4278-4284.
- McCarty, P. L. 1964. Anaerobic waste treatment fundamentals. Public works. 95(9): 107-112.
- Menurut, A. Mengenal Reaktor UASB. [online]. 2004. Available from: <http://www.airlimbah.com/2011/01/24/mengenal-reaktor-uasb/> [30 march 2015]
- Mohanty, S., Das, T., Mishra, S. and Chaudhury. 2000. Kinetics of SO₂-S₄ reduction under different growth media by sulfate reducing bacteria. Kluwer publishers bioMetals. 13: 73-76.

- Mosey, F. and Hughes, D. A. 1975. The toxicity of heavy metal ions to anaerobic digestion. Water Pollution Control.
- Mulopo, J., Greben, H., Sigama, J., Radebe, V., Mashego, M. and Burke, L. 2011. The relationships between sulphate reduction and COD/VFA utilisation using grass cellulose as carbon and energy sources. Appl Biochem Biotechnol. 163(3): 393-403.
- Muyzer, G. and Stams, A. J. 2008. The ecology and biotechnology of sulphate-reducing bacteria. Nat Rev Microbiol. 6(6): 441-454.
- Na, G. and Salt, D. E. 2011. The role of sulfur assimilation and sulfur-containing compounds in trace element homeostasis in plants. Environmental and Experimental Botany. 72(1): 18-25.
- O'Reilly, C. and Collieran, E. 2006. Effect of influent COD/SO₄(²⁻) ratios on mesophilic anaerobic reactor biomass populations: physico-chemical and microbiological properties. FEMS Microbiol Ecol. 56(1): 141-153.
- Onofre, A. Microbial Biomass in Batch and Continuous System [online]. 2013. Available from: <http://www.intechopen.com/books/biomass-now-sustainable-growth-and-use/microbial-biomass-in-batch-and-continuous-system> [20 april 2015]
- Patidar, S. K. and Tare, V. 2005. Effect of molybdate on methanogenic and sulfidogenic activity of biomass. Bioresour Technol. 96(11): 1215-1222.
- Postgate, J. R. (1984). The Sulphate Reducing Bacteria (2.). Cambridge Cambridge University
- Predicala, B., Nemati, M., Stade, S. and Lague, C. 2008. Control of H₂S emission from swine manure using Na-nitrite and Na-molybdate. J Hazard Mater. 154(1-3): 300-309.
- Qiyong, X., Timothy, T. and Gabriel, B. 2011. Inhibition of hydrogen sulfide generation from disposed gypsum drywall using chemical inhibitors. Journal of Hazardous Materials. 191: 204-211.
- Ranade, D. R., Dighe, A. S. and Bhirangi. 1999. Evaluation of the use of sodium molybdate to inhibit sulphate reduction during anaerobic digestion of distillery waste. Bioresource Technology 68: 287-291.

- Resis, M.A.M., Lemos P.C., Almeida, J. S. and Carrondo. 1992. Effect of hydrogen sulfide on growth of sulfate reducing bacteria. Biotecthnology and Bioengineering. 40: 593-600.
- Rzeczycka, M., Miernik, A. and Markiewicz, Z. 2010. Simultaneous degradation of waste phosphogypsum and liquid manure from industrial pig farm by a mixed community of sulfate reducing bacteria. Microbiol. 59: 241-247.
- Sawyer, J. and Lindquist, V. (2003). Identification of onsite wastewater treatment systems in the central Black Hills, South Dakota. Paper presented at the Western South Dakota Hydrology Conference, Rapid City, SD.
- Shayegan, J., Ghavipankeh, F. and Mirjafari, P. 2005. The effect of influent COD and upward flow velocity on the behaviour of sulphate-reducing bacteria. Process Biochemistry. 40(7): 2305-2310.
- Song, M., Shin, S. G. and Hwang, S. 2010. Methanogenic population dynamics assessed by real-time quantitative PCR in sludge granule in upflow anaerobic sludge blanket treating swine wastewater. Bioresource Technology. 101(1): S23-S28.
- Speece, R. E. 1983. Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatment. Environmental science & technology. 17(9): 416A-427A.
- Speece, R. E. (1996). Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters
- Spitsyn, V. and Kuleshov, I. 1951. Thermal Analysis of the Systems $K_2 MoO_4 \cdot MoO_3$, $Rb_2 MoO_4 \cdot MoO_3$ and $Cs_2 MoO_4 \cdot MoO_3$. J. Gen. Chem. USSR. 21(8): 1493-1502.
- Subtil, E. L., Cassini, S. T. A. and Gonçalves, R. F. 2012. Sulfate and dissolved sulfide variation under low COD/Sulfate ratio in Up-flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) treating domestic wastewater. Revista Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science: v. 7(1).
- Sugahara, K. and Schwartz, N. B. 1979. Defect in 3'-phosphoadenosine 5'-phosphosulfate formation in brachymorphic mice. Proceedings of the National Academy of Sciences. 76(12): 6615-6618.
- Tanaka, Y. 1998. Swine Wastewater Treatment by A Process Consisted of UASB Reactor and Aerobic Biological Filter. 34(2): 45-60.

- Tuo, Y., Cai, J., Zhu, D., Zhu, Y., Liu, G., Hua, Y. and He, J. 2014. Effect of Zn²⁺ on the Performances and Methanogenic Community Shifts of UASB Reactor During the Treatment of Swine Wastewater. Water, Air, & Soil Pollution. 225(6): 1-11.
- Widdel. (1988). Microbiology and Ecology of Sulfate- and Sulfur-Reducing Bacteria. Biology of Anaerobic Microorganisms.
- Wold, A., Kunmann, W., Arnott, R. and Ferretti, A. 1964. Preparation and properties of sodium and potassium molybdenum bronze crystals. Inorganic chemistry. 3(4): 545-547.
- Wu, D., Ekama, G. A., Lu, H., Chui, H. K., Liu, W. T., Brdjanovic, D., van Loosdrecht, M. C. and Chen, G. H. 2013. A new biological phosphorus removal process in association with sulfur cycle. Water Res. 47(9): 3057-3069.
- Yadav, V. K. and Archer, D. B. 1989. Sodium molybdate inhibits sulphate reduction in the anaerobic treatment of high-sulphate molasses wastewater. Applied microbiology and biotechnology. 31(1): 103-106.
- Yu, H., Tay, J. and Fang, H. H. 2001. The roles of calcium in sludge granulation during UASB reactor start-up. Water Research. 35(4): 1052-1060.
- Zhang, L., De Schryver, P., De Gussemé, B., De Muynck, W., Boon, N. and Verstraete, W. 2008. Chemical and biological technologies for hydrogen sulfide emission control in sewer systems: a review. Water Res. 42(1-2): 1-12.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

ผลการทดลองช่วงที่ 1

การทดลองในระบบแบบแบตช์ด้วยน้ำเสียสังเคราะห์

ตารางที่ ก.1.1 อัตราส่วนซีโอติต่อซัลเฟต 100:1

ชุดควบคุม						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอติ (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	3125	30.9	7.005
1	472	900	25.614			
2	352	1200	57.139			
3	216	1000	42.342			
4	137	400	40.253			
5	62	50	12.452			
6	24	7	8.798			
7	10	5	7.388	252	9.4	7.113
โซเดียมโมลิบเดต 0.5 มิลลิโมลาร์						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอติ (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	3125	30.9	7.005
1	562	5	21.334			
2	382	6	55.355			
3	200	5	42.473			
4	124	6	38.412			
5	52	0	15.735			
6	18	0	6.758			
7	5	0	6.493	250	27.7	7.011

ตารางที่ ก.1.1 อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 100:1 (ต่อ)

โซเดียมโมลิบเดท 1.0 มิลลิโมลาร์						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	3125	30.9	7.005
1	572	0	20.746			
2	362	0	63.264			
3	212	0	50.372			
4	135	0	28.501			
5	48	0	12.75			
6	15	0	9.776			
7	8	0	8.785	248	28.5	7.095
โซเดียมโมลิบเดท 1.5 มิลลิโมลาร์						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	3125	30.9	7.005
1	600	0	18.603			
2	374	0	56.395			
3	218	0	41.229			
4	123	0	29.875			
5	60	0	13.348			
6	14	0	4.752			
7	5	0	4.532	260	28.9	7.062

ตารางที่ ก.1.1 อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 100:1 (ต่อ)

โซเดียมโมลิบเดต 2.0 มิลลิโมลาร์						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	3125	30.9	7.005
1	584	0	21.375			
2	351	0	59.935			
3	211	0	42.223			
4	130	0	26.657			
5	55	0	14.389			
6	10	0	5.663			
7	6	0	5.331	255	29.2	7.011

ตารางที่ ก.1.2 อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 50:1

ชุดควบคุม						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	3062	58.8	7.002
1	465	1600	20.47			
2	381	1800	55.98			
3	229	1100	46.612			
4	135	450	24.642			
5	74	90	25.468			
6	26	20	20.432			
7	7	0	8.453	247	28.4	7.124

ตารางที่ ก.1.2 อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 50:1 (ต่อ)

โซเดียมโมลิบเดท 0.5 มิลลิโมลาร์						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	3062	58.8	7.002
1	554	100	18.485			
2	360	150	60.756			
3	218	300	46.892			
4	130	100	23.259			
5	54	50	22.434			
6	20	10	11.233			
7	10	0	10.348	249	50.1	7.103
โซเดียมโมลิบเดท 1.0 มิลลิโมลาร์						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	3062	58.8	7.002
1	560	5	30.877			
2	280	7	56.865			
3	255	10	45.383			
4	142	10	20.344			
5	55	10	19.574			
6	24	0	12.785			
7	8	0	9.573	220	55.2	7.021

ตารางที่ ก.1.2 อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 50:1 (ต่อ)

โซเดียมโมลิบเดท 1.5 มิลลิโมลาร์						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	3062	58.8	7.002
1	558	0	20.446			
2	320	0	58.863			
3	235	0	49.875			
4	130	0	30.583			
5	48	0	25.849			
6	20	0	8.464			
7	10	0	6.450	245	56.3	6.985
โซเดียมโมลิบเดท 2.0 มิลลิโมลาร์						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	3062	58.8	7.002
1	595	0	15.694			
2	360	0	58.885			
3	212	0	49.923			
4	134	0	29.801			
5	50	0	19.563			
6	24	0	12.937			
7	8	0	10.485	241	56.4	7.023

ตารางที่ ก.1.3 อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 20:1

ชุดควบคุม						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	3110	158.4	7.001
1	582	2100	18.776			
2	364	2400	58.352			
3	245	2400	34.464			
4	117	1600	26.84			
5	54	1000	19.987			
6	22	150	15.667			
7	18	100	10.572	230	88.7	7.123
โขเดียมโมลิบเดท 0.5 มิลลิโมลาร์						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	3110	158.4	7.001
1	611	200	20.325			
2	358	300	52.396			
3	230	350	48.573			
4	130	150	26.494			
5	62	90	24.449			
6	20	20	10.975			
7	8	0	5.496	218	145.2	7.042

ตารางที่ ก.1.3 อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 20:1 (ต่อ)

โซเดียมโพลิบเตท 1.5 มิลลิโมลาร์						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	3110	158.4	7.001
1	600	10	17.69			
2	356	10	54.485			
3	244	0	48.573			
4	149	0	36.095			
5	76	0	15.554			
6	24	0	6.793			
7	10	0	4.857	202	154.8	7.032
โซเดียมโพลิบเตท 1.0 มิลลิโมลาร์						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	3110	158.4	7.001
1	585	50	17.779			
2	344	70	60.545			
3	276	55	51.309			
4	155	20	33.094			
5	82	10	17.942			
6	15	10	8.885			
7	5	0	4.690	233	146.7	7.045

ตารางที่ ก.1.3 อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 20:1 (ต่อ)

โซเดียมโพลิบเตท 2.0 มิลลิโมลาร์						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	3110	158.4	7.001
1	589	0	16.266			
2	372	0	55.698			
3	236	0	41.039			
4	130	0	27.889			
5	66	0	12.335			
6	20	0	4.558			
7	8	0	2.454	228	155.9	7.075

ตารางที่ ก.1.4 อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1

ชุดควบคุม						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	2985	204	7.002
1	604	2600	20.744			
2	372	3200	51.846			
3	220	3000	42.579			
4	128	2000	28.861			
5	66	900	20.445			
6	30	100	8.821			
7	5	0	6.656	204	130	7.235

ตารางที่ ก.1.4 อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1 (ต่อ)

โซเดียมโมลิบเดต 0.5 มิลลิโมลาร์						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	2985	204	7.002
1	600	200	18.46			
2	351	400	50.635			
3	215	300	48.775			
4	118	100	31.114			
5	57	50	20.475			
6	20	10	10.473			
7	7	0	7.931	215	192.5	7.014
โซเดียมโมลิบเดต 1.0 มิลลิโมลาร์						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	2985	204	7.002
1	575	100	21.434			
2	350	200	47.654			
3	224	250	40.071			
4	117	100	20.224			
5	62	10	16.463			
6	27	0	7.965			
7	5	0	6.649	221	194.4	7.010

ตารางที่ ก.1.4 อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1 (ต่อ)

โซเดียมโมลิบเดท 1.5 มิลลิโมลาร์						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	2985	204	7.002
1	584	50	21.169			
2	322	60	56.697			
3	251	60	49.376			
4	138	40	36.665			
5	70	0	21.463			
6	32	0	6.775			
7	12	0	3.585	206	196.8	7.042
โซเดียมโมลิบเดท 2.0 มิลลิโมลาร์						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	2985	204	7.002
1	616	0	24.443			
2	331	0	49.573			
3	248	0	44.375			
4	126	0	35.455			
5	58	0	19.891			
6	26	0	10.284			
7	14	0	9.082	213	198	7.043

ผลการทดลองช่วงที่ 2

การทดลองในระบบบิโอดีด้วยน้ำเสียสังเคราะห์

ตารางที่ ก.2.1 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)

วันที่	COD/SO ₄ ²⁻	ชุดควบคุม			ชุดทดลอง		
		น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพกำจัด	น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพกำจัด
1	100:1	4989	448	91.00	5055	448	91.13
3		5011	450	91.00	4992	439	91.20
5		5079	430	91.52	5186	451	91.30
7		5104	416	91.83	5144	452	91.21
9		5053	405	91.97	5121	466	90.90
11	50:1	5063	365	92.78	5103	431	91.53
13		5044	409	91.87	5126	453	91.15
15		5125	412	91.94	5182	460	91.12
17		5144	420	91.82	5225	449	91.38
19		5088	410	91.93	5200	464	91.07
21	20:1	5203	474	90.88	5288	495	90.62
23		5197	480	90.74	5311	521	90.17
25		5233	494	90.55	5314	582	89.03
27		5218	500	90.41	5355	580	89.15
29		5205	509	90.20	5351	591	88.95
31	15:1	5384	637	88.15	5521	886	83.95
33		5404	645	88.05	5672	941	83.40
35		5464	657	87.95	5612	1010	81.99
37		5391	659	87.77	5688	1062	81.32
39		5495	676	87.68	5679	1094	80.73
41	50:1	5064	672	86.72	5083	451	91.12
43		5109	584	88.55	5155	462	91.03
45		5153	591	88.52	5204	470	90.96
47		5034	578	88.50	5138	458	91.08

ตารางที่ ก.2.1 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัด (มิลลิกรัมต่อลิตร) (ต่อ)

วันที่	COD/SO ₄ ²⁻	ชุดควบคุม			ชุดทดลอง		
		น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพกำจัด	น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพกำจัด
49	50:1	5112	540	89.42	5096	453	91.11
51		5022	536	89.31	5154	461	91.05
53		5167	540	89.54	5193	450	91.33
55		5029	538	89.28	5166	462	91.05
57		5127	520	89.85	5192	477	90.81
59		5157	515	90.00	5116	464	90.93

ตารางที่ ก.2.2 ซัลเฟตประสิทธิภาพการกำจัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)

วันที่	COD/SO ₄ ²⁻	ชุดควบคุม			ชุดทดลอง		
		น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพกำจัด	น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพกำจัด
1	100:1	48.5	13.8	71.55	52.2	41.8	19.92
3		52.1	14.4	72.36	53.1	40.2	24.29
5		51.2	15.0	70.70	55.1	43.7	20.69
7		54.6	16.3	70.15	52.6	42.2	19.77
9		50.9	12.7	75.05	53.9	41.5	23.01
11	50:1	106.4	29.8	71.99	110.03	98.2	10.70
13		96.4	26.4	72.61	99.36	88.4	10.98
15		98.2	24.5	75.05	101.77	91.6	9.91
17		101.8	21.7	78.68	109.64	96.8	11.67
19		107.4	23.8	77.84	102.47	91.4	10.77
21	20:1	254.2	148.5	41.58	256.84	240.6	6.32
23		248.7	140.9	43.35	251.76	235.1	6.58
25		257.2	143.1	44.36	253.39	239.2	5.58
27		255.8	135.4	47.07	255.41	240.6	5.78
29		247.6	139.9	43.50	259.4	243.0	6.33

ตารางที่ ก.2.2 ซัลเฟตประสิทธิภาพการกำจัด (มิลลิกรัมต่อลิตร) (ต่อ)

วันที่	COD/SO ₄ ²⁻	ชุดควบคุม			ชุดทดลอง		
		น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพกำจัด	น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพกำจัด
31	15:1	340.6	170.2	50.03	335.4	316.9	5.52
33		331.3	168.2	49.23	334.4	318.3	4.83
35		329.8	164.7	50.06	340.6	323.8	4.94
37		332.5	171.2	48.51	337.9	319.6	5.40
39		335.1	166.4	50.34	338.7	320.7	5.29
41	50:1	115.8	29.6	74.45	104.0	98.4	5.38
43		107.5	28.5	73.51	102.4	95.3	6.93
45		98.8	27.5	72.17	110.5	76.4	30.86
47		111.6	29.6	73.48	108.4	53.6	50.55
49		105.7	30.1	71.52	98.8	21.9	77.83
51		103.4	28.8	72.15	99.5	22.5	77.39
53		105.7	28.4	73.13	105.6	99.1	6.16
55		110.1	29.5	73.21	103.3	92.4	10.55
57		108.6	28.7	73.57	99.6	63.6	36.14
59		98.9	27.6	72.09	100.7	50.9	49.45

ตารางที่ ก.2.3 ซัลไฟต์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

วันที่	COD/SO ₄ ²⁻	ชุดควบคุม		ชุดทดลอง	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
1	100:1	0.15	10.30	0.13	2.00
3		1.22	11.40	0.15	1.80
5		0.18	12.10	0.20	1.50
7		2.00	10.50	0.17	1.60
9		0.15	9.80	0.16	1.80
11	50:1	0.24	25.30	0.14	1.40
13		0.13	20.30	0.13	1.00
15		0.18	21.60	0.16	1.20

ตารางที่ ก.2.3 ซัลไฟด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร) (ต่อ)

วันที่	COD/SO ₄ ²⁻	ชุดควบคุม		ชุดทดลอง	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
17	50:1	0.12	21.10	0.11	0.90
19		0.11	20.90	0.17	1.60
21	20:1	0.19	20.10	0.11	1.10
23		0.14	20.60	0.13	1.20
25		0.13	24.00	0.14	1.10
27		0.09	24.70	0.16	1.0
29		0.12	25.10	0.12	1.60
31		15:1	0.18	28.40	0.15
33	1.64		25.00	1.60	3.20
35	0.45		29.40	0.65	2.40
37	1.80		28.10	2.00	2.60
39	0.21		28.30	0.25	3.10
41	50:1		0.16	19.50	0.20
43		1.24	20.40	0.13	2.40
45		0.15	20.00	0.11	8.70
47		0.13	23.10	0.17	12.90
49		0.15	20.20	0.12	18.60
51		0.16	18.70	0.12	20.10
53		0.20	19.30	0.15	1.20
55		0.21	19.50	0.20	2.00
57		0.14	20.10	0.21	8.50
59		0.19	18.80	0.18	10.80

ตารางที่ ก.2.4 ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดและประสิทธิภาพการกำจัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)

วันที่	COD/SO ₄ ²⁻	ชุดควบคุม			ชุดทดลอง		
		น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพ กำจัด	น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพ กำจัด
1	100:1	5022	223	95.55	5024	249	95.04
2		5037	224	95.55	5011	251	94.99
3		5135	253	95.07	4995	264	94.71
4		5029	233	95.36	5121	223	95.64
5		5275	263	95.01	5237	219	95.81
6		5264	237	95.49	5273	233	95.58
7		5112	213	95.83	5151	243	95.28
8		5233	245	95.31	5254	237	95.48
9		5195	284	94.53	5245	244	95.34
10		5142	274	94.67	5174	258	95.01
11	50:1	5244	284	94.58	5328	304	94.29
12		5310	302	94.31	5334	298	94.41
13		5455	265	95.14	5239	322	93.85
14		5527	311	94.37	5467	343	93.72
15		5395	290	94.62	5512	321	94.17
16		5552	295	94.68	5487	294	94.64
17		5398	281	94.79	5655	274	95.15
18		5656	290	94.87	5452	289	94.69
19		5472	298	94.55	5194	283	94.55
20		5587	303	94.57	5385	277	94.85
21	20:1	5621	318	94.34	5757	288	94.99
22		5638	311	94.48	5863	303	94.83
23		5523	315	94.29	5792	343	94.07
24		5658	305	94.60	5655	326	94.23
25		5720	339	94.07	5459	344	93.69
26		5621	321	94.28	5721	295	94.84
27		5547	333	93.99	5590	297	94.68

ตารางที่ ก.2.4 ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดและประสิทธิภาพการกำจัด (มิลลิกรัมต่อลิตร) (ต่อ)

วันที่	COD/SO ₄ ²⁻	ชุดควบคุม			ชุดทดลอง		
		น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพ กำจัด	น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพ กำจัด
28	20:1	5670	343	93.95	5673	314	94.46
29		5688	314	94.47	5672	322	94.32
30		5542	299	94.60	5959	294	95.06
31	15:1	5833	282	95.16	5821	304	94.77
32		5839	284	95.13	5877	324	94.48
33		5943	301	94.93	5834	335	94.25
34		5832	311	94.66	5893	299	94.92
35		5874	342	94.17	5989	327	94.53
36		5972	321	94.62	5974	351	94.12
37		5802	301	94.81	5953	359	93.96
38		5932	297	94.99	5832	330	94.34
39		5912	294	95.02	5795	351	93.94
40		5811	284	95.11	5230	286	94.53
41	50:1	5356	283	94.71	5348	254	95.25
42		5283	290	94.51	5288	233	95.59
43		5498	279	94.92	5447	243	95.53
44		5318	230	95.67	5322	225	95.77
45		5395	256	95.25	5329	264	95.04
46		5221	277	94.69	5477	243	95.56
47		5306	265	95.00	5041	217	95.69
48		5278	249	95.28	5212	237	95.45
49		5329	251	95.28	5205	266	94.88
50		5424	243	95.51	5232	258	95.06
51		5385	258	95.20	5564	259	95.34
52		5299	267	94.96	5342	261	95.11
53		5354	280	94.77	5359	245	95.42
54		5406	275	94.91	5211	237	95.45

ตารางที่ ก.2.4 ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดและประสิทธิภาพการกำจัด (มิลลิกรัมต่อลิตร) (ต่อ)

วันที่	COD/SO ₄ ²⁻	ชุดควบคุม			ชุดทดลอง		
		น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพ กำจัด	น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพ กำจัด
55	50:1	5312	264	95.03	5401	247	95.42
56		5276	283	94.63	5095	253	95.03
57		5335	291	94.54	5223	241	95.38
58		5278	276	94.77	5394	246	95.43
59		5289	288	94.55	5246	244	95.34
60		5290	286	94.59	5244	245	95.32

ตารางที่ ก.2.5 กรดอินทรีย์ระเหย (มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดอะซิติก)

วันที่	COD/SO ₄ ²⁻	ชุดควบคุม		ชุดทดลอง	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
1	100:1	75	155	72	154
3		79	154	79	155
5		76	148	71	155
7		80	150	75	153
9		73	152	74	150
11	50:1	72	150	70	157
13		75	151	76	156
15		88	149	75	164
17		79	155	81	164
19		78	154	72	158
21	20:1	57	136	73	150
23		68	148	77	165
25		73	120	75	160
27		85	118	73	162
29		82	110	76	153

ตารางที่ ก.2.4 กรดอินทรีย์ระเหย (มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดอะซิติก) (ต่อ)

วันที่	COD/SO ₄ ²⁻	ชุดควบคุม		ชุดทดลอง	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
31	15:1	67	100	74	144
33		84	123	80	127
35		74	103	73	132
37		82	115	86	135
39		79	102	77	140
41	50:1	70	152	70	155
43		71	150	74	152
45		79	155	75	153
47		76	153	80	156
49		80	160	76	154
51		71	154	78	150
53		78	150	79	148
55		73	151	76	152
57		81	156	80	154
59		75	158	79	156

ตารางที่ ก.2.6 สภาพต่างทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต)

วันที่	COD/SO ₄ ²⁻	ชุดควบคุม		ชุดทดลอง	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
1	100:1	2563	3025	2465	3043
3		2487	3132	2505	3021
5		2522	3275	2488	3,122
7		2608	3051	2511	3,05
9		2464	3165	2478	3188
11	50:1	2420	3054	2448	3042
13		2546	3074	2594	3143
15		2567	2943	2406	3022

ตารางที่ ก.2.6 สภาพต่างทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต) (ต่อ)

วันที่	COD/SO ₄ ²⁻	ชุดควบคุม		ชุดทดลอง	
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
17	50:1	2433	2988	2547	2995
19		2459	3084	2545	3043
21	20:1	2549	3002	2395	3110
23		2584	3135	2512	3065
25		2543	3022	2485	3153
27		2325	3104	2472	3194
29		2522	2984	2455	3033
31		2459	2995	2431	2984
33	15:1	2463	2849	2574	3044
35		2583	2877	2532	3200
37		2535	2943	2485	3154
39		2571	3023	2581	3025
41		2502	3122	2484	3015
43	50:1	2485	3033	2459	3023
45		2477	3015	2539	3112
47		2493	3127	2538	3129
49		2521	3100	2465	3285
51		2453	3243	2487	3245
53		2486	3096	2508	3104
55		2461	3075	2544	3137
57		2539	3128	2489	3034
59		2594	3115	2495	3079

ตารางที่ ก.2.7 ปริมาณก๊าซชีวภาพ (ลิตร)

วันที่	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง	วันที่	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง
1	40.472	41.875	31	39.994	37.858
2	41.334	41.677	32	38.944	37.857

ตารางที่ ก.2.7 ปริมาณก๊าซชีวภาพ (ลิตร) (ต่อ)

วันที่	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง	วันที่	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง
3	41.583	41.974	33	39.843	38.955
4	42.584	41.365	34	37.034	37.364
5	43.583	42.227	35	38.771	39.475
6	43.570	42.314	36	39.994	38.464
7	43.242	42.573	37	40.832	38.395
8	42.324	42.581	38	39.559	39.650
9	42.735	42.471	39	39.975	37.085
10	43.332	42.489	40	40.995	36.387
11	43.522	40.430	41	38.534	39.957
12	43.432	41.743	42	40.526	41.047
13	42.684	38.975	43	43.511	42.847
14	42.123	40.342	44	43.684	42.857
15	41.953	39.050	45	42.543	42.645
16	41.454	39.419	46	42.513	42.661
17	42.745	38.975	47	43.853	42.464
18	41.845	40.932	48	44.091	42.485
19	42.834	38.975	49	43.541	41.975
20	43.546	38.757	50	42.277	42.753
21	42.356	39.742	51	42.483	42.857
22	42.698	39.775	52	42.580	42.416
23	45.006	38.743	53	42.145	41.756
24	41.134	38.759	54	42.957	41.776
25	42.164	39.990	55	43.095	41.462
26	43.785	38.874	56	42.563	42.291
27	42.545	38.134	57	42.316	42.142
28	42.086	39.854	58	42.957	41.657
29	41.636	39.080	59	42.664	42.074
30	44.565	38.858	60	41.453	42.127

ตารางที่ ก.2.8 สัตส่วนมีเทน (ร้อยละ)

วันที่	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง	วันที่	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง
1	56.23	55.97	31	61.03	62.25
2	60.35	57.44	32	55.87	56.80
3	59.97	59.04	33	48.29	54.39
4	61.38	60.95	34	45.46	55.94
5	58.96	61.17	35	43.97	62.57
6	60.58	61.36	36	45.67	59.86
7	62.23	62.55	37	41.50	58.98
8	61.86	60.87	38	42.32	59.23
9	60.85	59.98	39	42.96	55.29
10	62.58	60.99	40	41.46	58.62
11	61.41	64.33	41	45.65	60.64
12	64.25	61.46	42	48.69	57.74
13	58.66	60.48	43	52.50	58.89
14	55.94	58.71	44	53.58	59.87
15	60.55	59.04	45	55.97	60.83
16	61.62	59.69	46	56.66	61.95
17	55.39	60.76	47	56.98	60.49
18	50.52	60.33	48	60.02	63.57
19	58.39	59.11	49	56.56	64.45
20	60.64	61.36	50	55.29	62.40
21	64.21	60.63	51	52.57	61.95
22	52.36	62.19	52	53.34	60.38
23	51.06	67.71	53	51.42	63.95
24	50.64	65.22	54	52.23	65.33
25	52.31	61.52	55	54.57	63.57
26	53.13	59.66	56	56.99	61.43
27	51.30	59.87	57	56.98	60.53
28	52.59	63.73	58	55.48	60.00

ตารางที่ ก.2.8 สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ) (ต่อ)

วันที่	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง	วันที่	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง
29	51.23	66.57	59	54.64	60.36
30	50.97	59.93	60	56.80	56.39

ตารางที่ ก.2.9 ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)

วันที่	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง	วันที่	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง
1	600	20	31	5200	20
2	500	25	32	6600	20
3	550	20	33	7000	15
4	550	15	34	7400	15
5	600	20	35	7600	20
6	575	20	36	7600	20
7	500	15	37	7200	20
8	550	20	38	7800	20
9	550	20	39	6900	20
10	575	15	40	7000	20
11	1000	10	41	950	20
12	1000	13	42	960	20
13	900	15	43	950	25
14	1000	12	44	925	30
15	900	16	45	950	60
16	950	12	46	1000	150
17	1000	10	47	950	300
18	1000	10	48	975	575
19	950	13	49	1000	900
20	1000	10	50	975	1000
21	3500	10	51	1000	1000
22	4000	15	52	950	950
23	4000	10	53	950	100

ตารางที่ ก.2.9 ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม) (ต่อ)

วันที่	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง	วันที่	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง
24	4200	15	54	1000	25
25	3600	10	55	1000	20
26	4000	10	56	1000	70
27	3600	15	57	950	120
28	4000	15	58	975	250
29	4000	10	59	1000	400
30	3800	10	60	1000	750

ตารางที่ ก.2.10 ค่าพีเอช

วันที่	ชุดควบคุม		วันที่	ชุดทดลอง	
	น้ำเข้า	น้ำออก		น้ำเข้า	น้ำออก
1	7.013	6.954	31	7.045	7.431
2	6.989	6.976	32	6.993	7.488
3	7.077	6.941	33	7.061	7.563
4	7.023	6.982	34	6.977	7.487
5	6.994	6.933	35	7.032	7.423
6	7.072	6.941	36	6.989	7.411
7	7.045	6.976	37	7.024	7.456
8	7.062	6.898	38	7.001	7.532
9	7.011	6.955	39	7.072	7.465
10	7.024	6.973	40	6.953	7.439
11	7.032	6.935	41	7.036	7.215
12	7.057	6.947	42	6.998	7.034
13	7.003	6.956	43	7.032	6.922
14	7.021	6.974	44	6.974	6.954
15	7.012	6.989	45	7.084	7.004
16	7.074	6.986	46	6.972	6.971
17	7.003	6.973	47	7.02	6.935

ตารางที่ ก.2.10 ค่าพีเอช (ต่อ)

วันที่	ชุดควบคุม		วันที่	ชุดทดลอง	
	น้ำเข้า	น้ำออก		น้ำเข้า	น้ำออก
18	7.032	6.979	48	6.942	6.942
19	7.011	6.98	49	7.045	6.996
20	7.042	6.991	50	6.957	6.978
21	7.027	7.104	51	6.998	7.012
22	7.091	7.143	52	6.945	6.962
23	7.048	7.253	53	7.042	6.915
24	7.032	7.241	54	6.982	6.952
25	7.071	7.184	55	7.073	6.941
26	7.083	7.193	56	6.936	6.935
27	7.063	7.263	57	7.032	6.988
28	7.011	7.282	58	6.977	7.023
29	7.057	7.301	59	7.032	6.955
30	7.083	7.323	60	6.927	6.992

ตารางที่ ก.2.11 ค่าโออาร์พี (มิลลิโวลต์)

วันที่	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง	วันที่	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง
1	-384	-366	31	-335	-367
2	-412	-371	32	-316	-354
3	-404	-392	33	-336	-372
4	-412	-418	34	-362	-402
5	-398	-405	35	-352	-412
6	-365	-389	36	-371	-348
7	-374	-362	37	-382	-383
8	-359	-348	38	-371	-366
9	-397	-356	39	-361	-335
10	-401	-361	40	-380	-366
11	-365	-357	41	-400	-354
12	-366	-355	42	-375	-363

ตารางที่ ก.2.11 ค่าโออาร์พี (มิลลิโวลต์) (ต่อ)

วันที่	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง	วันที่	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง
13	-355	-365	43	-358	-376
14	-358	-353	44	-362	-359
15	-361	-349	45	-355	-402
16	-353	-352	46	-374	-411
17	-349	-353	47	-383	-405
18	-350	-355	48	-371	-410
19	-358	-362	49	-366	-397
20	-353	-351	50	-368	-372
21	-334	-355	51	-388	-366
22	-345	-365	52	-365	-368
23	-357	-357	53	-403	-352
24	-355	-363	54	-362	-366
25	-343	-372	55	-353	-358
26	-339	-366	56	-349	-367
27	-335	-361	57	-361	-353
28	-336	-370	58	-355	-365
29	-347	-358	59	-359	-341
30	-346	-354	60	-364	-359

ผลการทดลองช่วงที่ 3

การทดลองในระบบยูเอเอเอสบีด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

ตารางที่ ก.3.1 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัด (มีลลิกรัมต่อลิตร)

วันที่	ชุดควบคุม			ชุดทดลอง		
	น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพ กำจัด	น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพ กำจัด
1	2578	656	74.55	2626	705	73.15
3	2694	693	74.28	2711	752	72.26
5	2619	689	73.69	2590	711	72.55
7	2791	715	74.38	2666	823	69.13
9	2688	731	72.81	2705	731	72.98
11	2862	682	76.17	2754	733	73.38
13	3134	784	74.98	2996	801	73.26
15	2876	746	74.06	2905	752	74.11
17	2944	766	73.98	2884	824	71.43
19	2831	787	72.20	2851	790	72.29

ตารางที่ ก.3.2 ซัลเฟตประสิทธิภาพการกำจัด (มีลลิกรัมต่อลิตร)

วันที่	ชุดควบคุม			ชุดทดลอง		
	น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพ กำจัด	น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพ กำจัด
1	28.3	8.6	69.61	29.2	26.4	9.59
3	32.4	9.5	70.68	31.5	28.9	8.25
5	30.3	10.2	66.34	29.8	26.5	11.07
7	27.6	8.4	69.57	29.4	26.7	9.18
9	29.5	7.6	74.24	30.1	28.4	5.65
11	31.1	8.3	73.31	28.6	26.1	8.74
13	27.9	8.5	69.53	29.3	26.9	8.19
15	27.4	7.1	74.09	31.4	26.4	15.92

ตารางที่ ก.3.2 ซัลเฟตประสิทธิภาพการกำจัด (มิลลิกรัมต่อลิตร) (ต่อ)

วันที่	ชุดควบคุม			ชุดทดลอง		
	น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพ กำจัด	น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพ กำจัด
17	25.8	8.2	68.22	28.6	15.8	44.76
19	28.9	8.4	70.93426	27.5	10.3	62.54545

ตารางที่ ก.3.3 ซัลไฟต์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

วันที่	ชุดควบคุม		ชุดทดลอง	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
1	1.43	5.70	1.35	1.09
3	1.14	7.50	1.23	1.21
5	1.03	6.20	1.27	0.9
7	1.56	6.40	1.32	1.35
9	2.01	7.20	1.54	1.11
11	1.24	5.80	1.39	0.93
13	1.58	6.30	1.42	1.23
15	1.32	6.40	1.36	0.88
17	1.34	6.80	1.27	5.25
19	1.59	6.50	1.44	5.59

ตารางที่ ก.3.4 ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดและประสิทธิภาพการกำจัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)

วันที่	ชุดควบคุม			ชุดทดลอง		
	น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพ กำจัด	น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพ กำจัด
1	556	190	65.83	610	237	61.15
2	544	212	61.03	564	221	60.82
3	621	215	65.38	598	244	59.20
4	580	204	64.83	588	215	63.44
5	574	195	66.03	565	232	58.94
6	552	198	64.13	559	221	60.47

ตารางที่ ก.3.4 ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดและประสิทธิภาพการกำจัด (มิลลิกรัมต่อลิตร) (ต่อ)

วันที่	ชุดควบคุม			ชุดทดลอง		
	น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพ กำจัด	น้ำเข้า	น้ำออก	ประสิทธิภาพ กำจัด
7	535	224	58.13	573	229	60.03
8	550	216	60.73	580	233	59.83
9	549	236	57.01	588	196	66.67
10	558	218	60.93	579	211	63.56
11	566	211	62.72	594	197	66.84
12	560	219	60.89	578	222	61.59
13	603	205	66.00	591	215	63.62
14	577	231	59.97	583	224	61.58
15	594	242	59.26	623	231	62.92
16	583	235	59.69	590	228	61.36
17	552	218	60.51	578	244	57.79
18	564	215	61.88	581	232	60.07
19	548	198	63.87	559	205	63.33
20	560	200	64.29	573	212	63.00

ตารางที่ ก.3.5 กรดอินทรีย์ระเหย (มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดอะซิติก)

วันที่	ชุดควบคุม		ชุดทดลอง	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
1	87	78	92	72
3	95	78	101	75
5	97	82	95	80
7	100	79	97	75
9	98	67	90	72
11	92	71	85	70
13	90	74	87	71
15	93	77	90	75
17	97	80	94	79

ตารางที่ ก.3.5 กรดอินทรีย์ระเหย (มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดอะซิติก) (ต่อ)

วันที่	ชุดควบคุม		ชุดทดลอง	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
19	95	75	96	75

ตารางที่ ก.3.6 สภาพต่างทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต)

วันที่	ชุดควบคุม		ชุดทดลอง	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
1	947	1025	92	72
3	920	1108	101	75
5	1024	1212	95	80
7	994	1033	97	75
9	950	1134	90	72
11	900	998	85	70
13	890	1007	87	71
15	960	1139	90	75
17	876	1085	94	79
19	946	1178	96	75

ตารางที่ ก.3.7 ปริมาณก๊าซชีวภาพ (ลิตร)

วันที่	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง	วันที่	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง
1	10.375	12.224	11	12.411	12.643
2	11.663	12.375	12	11.834	13.021
3	11.783	11.988	13	12.453	12.345
4	12.221	12.472	14	12.547	11.988
5	11.996	12.323	15	12.375	12.434
6	11.274	12.957	16	12.399	12.643
7	11.735	12.058	17	12.635	12.396
8	12.187	11.973	18	12.098	12.352
9	11.889	12.343	19	12.476	12.746

ตารางที่ ก.3.7 ปริมาณก๊าซชีวภาพ (ลิตร) (ต่อ)

วันที่	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง	วันที่	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง
10	12.508	12.054	20	12.475	12.445

ตารางที่ ก.3.8 สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)

วันที่	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง	วันที่	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง
1	54.08	39.46	11	56.28	51.14
2	50.21	43.58	12	52.25	53.72
3	48.96	45.52	13	49.97	51.94
4	52.23	50.68	14	49.3	50.39
5	52.37	51.32	15	48.88	49.98
6	50.29	50.68	16	50.55	52.28
7	48.63	53.58	17	51.02	52.47
8	49.37	55.59	18	53.58	54.68
9	54.63	54.54	19	57.30	51.02
10	53.32	54.96	20	56.34	52.28

ตารางที่ ก.3.9 ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)

วันที่	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง	วันที่	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง
1	300	10	11	330	5
2	350	7	12	350	7
3	300	6	13	350	10
4	330	7	14	350	10
5	300	5	15	360	20
6	350	7	16	340	70
7	350	10	17	300	150
8	350	10	18	350	300
9	340	7	19	350	350
10	300	6	20	360	350

ตารางที่ ก.3.10 ค่าพีเอช

วันที่	ชุดควบคุม		ชุดทดลอง	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
1	7.244	7.322	7.236	7.398
2	7.232	7.401	7.244	7.432
3	7.264	7.425	7.232	7.411
4	7.265	7.346	7.264	7.425
5	7.231	7.339	7.265	7.388
6	7.285	7.321	7.231	7.393
7	7.343	7.343	7.285	7.38
8	7.255	7.322	7.343	7.395
9	7.216	7.388	7.255	7.401
10	7.221	7.434	7.216	7.423
11	7.274	7.429	7.221	7.378
12	7.234	7.403	7.274	7.421
13	7.305	7.381	7.234	7.389
14	7.211	7.377	7.305	7.413
15	7.253	7.425	7.211	7.456
16	7.214	7.423	7.253	7.445
17	7.284	7.398	7.214	7.432
18	7.211	7.367	7.284	7.399
19	7.232	7.404	7.211	7.424
20	7.274	7.386	7.232	7.438

ตารางที่ ก.3.11 ค่าโออาร์พี (มิลลิโวลต์)

วันที่	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง	วันที่	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง
1	-368	-387	11	-412	-334
2	-405	-353	12	-361	-357
3	-394	-366	13	-388	-361
4	-389	-392	14	-355	-349
5	-380	-407	15	-361	-352
6	-356	-397	16	-372	-361
7	-363	-368	17	-355	-355
8	-367	-353	18	-334	-356
9	-372	-355	19	-391	-371
10	-384	-367	20	-365	-366

ภาคผนวก ข
การคำนวณสมดุลมวลในระบบ

การติดตามสมดุลมวลของระบบเป็นดัชนีหนึ่งในการวัดความถูกต้องของระบบดังกล่าว ในที่นี้ผู้วิจัยได้วิเคราะห์และคำนวณสมดุลมวลซีโอดีและซัลเฟตในรูปแบบ % recovery ซึ่งมีรายละเอียดการคำนวณดังตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่าง การคำนวณสมดุลมวลของซีโอดี

ตารางที่ ข.1 % recovery ของช่วงการทดลองที่ 2 ระยะการทดลองที่ 1

ระยะที่	ชุดการทดลอง	ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ซัลเฟต (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ก๊าซชีวภาพ (ลิตรต่อวัน)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	% Recovery
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก			
1	ชุดควบคุม	5047	430	51.46	14.44	42.475	60.49	74.37
	ชุดทดลอง	5099	451	53.38	41.88	42.154	60.03	72.65

จากตารางที่ ข.1 เป็นตัวอย่างค่า % recovery ของการทดลองช่วงที่ 2 ระยะการทดลองที่ 1 ซึ่งในการคำนวณหาค่าดังกล่าว สามารถนำค่าจากการทดลองมาคำนวณ ดังนี้

ชุดควบคุม

ซีโอดีน้ำเข้า	5047	มิลลิกรัมต่อลิตร
ซีโอดีน้ำออก	430	มิลลิกรัมต่อลิตร
ซัลเฟตน้ำเข้า	51.46	มิลลิกรัมต่อลิตร
ซัลเฟตน้ำออก	14.44	มิลลิกรัมต่อลิตร
ก๊าซชีวภาพ	42.475	ลิตรต่อวัน
สัดส่วนมีเทนร้อยละ	60.49	

จากสมการที่ 2.34

$$\% \text{COD recovery} = \frac{[(\Delta \text{SO}_4^{2-} \text{-COD} + \text{soluble COD}_{\text{eff}} + \text{soluble CH}_4 \text{-COD} + \text{CH}_4 \text{ gas COD}) / \text{COD}_{\text{in}}] \times 100}{}$$

เมื่อ

COD_{in} = ซีโอดีทั้งหมดก่อนเข้าระบบ

$\text{soluble COD}_{\text{eff}}$ = ซีโอดีละลายหลังผ่านระบบ

$$\begin{aligned} \text{CH}_{4\text{gas}}\text{COD} &= \text{ซีโอดีในรูปของก๊าซมีเทน} \\ \Delta\text{SO}_4^{2-} - \text{COD} &= \text{ซีโอดีที่ถูกใช้สำหรับรีดิวซ์ซัลเฟตให้เปลี่ยนเป็นซัลไฟด์} \\ \text{soluble CH}_4 - \text{COD} &= \text{ซีโอดีที่เกิดจากมีเทนละลายน้ำ} \end{aligned}$$

จากตัวอย่าง

$$\begin{aligned} \text{COD}_{\text{in}} &= 5047 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปซีโอดี} \\ \text{soluble COD}_{\text{eff}} &= 430 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปซีโอดี} \\ \text{CH}_{4\text{gas}}\text{COD} &= (\text{ปริมาตรก๊าซ} \times \text{สัดส่วนมีเทน}/25.27) \times 16 \times 4 / Q \\ &= (42.475 \times 0.6049 / 25.27) \times 16 \times 4 \times 20 \\ &= 3254.11 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปซีโอดี} \\ \Delta\text{SO}_4^{2-} - \text{COD} &= (\text{ซัลเฟตเข้า} - \text{ซัลเฟตออก}) \times 2/3 \\ &= (51.46 - 14.44) \times 2/3 \\ &= 24.68 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปซีโอดี} \\ \text{soluble CH}_4 - \text{COD} &= K_{\text{hCH}_4} \times \text{สัดส่วนมีเทน} \times 16000 \times 4 \\ &= 11.55 \times 10^{-4} \times 0.6049 \times 16000 \times 4 \\ &= 44.72 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปซีโอดี} \\ \text{ดังนั้น \% recovery} &= (430 + 3254.11 + 24.68 + 44.72) / 5047 \times 100 \\ &= 74.37 \end{aligned}$$

ตัวอย่าง การคำนวณสมมูลมวลของซัลเฟอร์

ตารางที่ ข.2 % recovery ของสมมูลมวลซัลเฟอร์ของช่วงการทดลองที่ 3 ระยะเวลาทดลองที่ 1

ระยะ ที่	ชุดการทดลอง	ซัลเฟต (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ซัลไฟด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	ก๊าซ ชีวภาพ (ลิตร)	% Recovery
		น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก			
1	ชุดควบคุม	29.62	8.86	1.43	6.60	330.00	11.353	86.59
	ชุดทดลอง	30.00	27.38	1.34	1.13	7.67	12.301	90.50

จากตารางที่ ข.2 เป็นตัวอย่างค่า % recovery ของการทดลองช่วงที่ 3 ระยะเวลาทดลองที่ 1 ซึ่งในการคำนวณหาค่าดังกล่าว สามารถนำค่าจากการทดลองมาคำนวณ ดังนี้

ชุดทดลอง

ซัลเฟตเข้า	30.00	มิลลิกรัมต่อลิตร
ซัลเฟตออก	27.38	มิลลิกรัมต่อลิตร
ซัลไฟด์น้ำเข้า	1.34	มิลลิกรัมต่อลิตร
ซัลไฟด์น้ำออก	1.13	มิลลิกรัมต่อลิตร
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	7.67	พีพีเอ็ม
ก๊าซชีวภาพ	12.301	ลิตร

จากสมการที่ 2.37

$$\% \text{ sulfur recovery} = \frac{[(\text{SO}_4^{2-} \text{ eff} + \text{ซัลไฟด์ทั้งหมดในน้ำออก} + \text{H}_2\text{S}_{\text{gas}})]}{(\text{SO}_4^{2-} \text{ in} + \text{ซัลไฟด์ทั้งหมดในน้ำเข้า})} \times 100$$

เมื่อ

$\text{SO}_4^{2-} \text{ in}$	=	ซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปซัลเฟตในน้ำเข้า
$\text{SO}_4^{2-} \text{ eff}$	=	ซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปซัลเฟตในน้ำออก
$\text{H}_2\text{S}_{\text{gas}}$	=	ซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปไฮโดรเจนซัลไฟด์ในสถานะก๊าซ
ซัลไฟด์ทั้งหมด	=	$\text{S}^{2-} + \text{HS}^- + \text{H}_2\text{S}_{\text{aq}}$ ซึ่งได้จากการวัดค่าซัลไฟด์ละลาย

จากตัวอย่าง

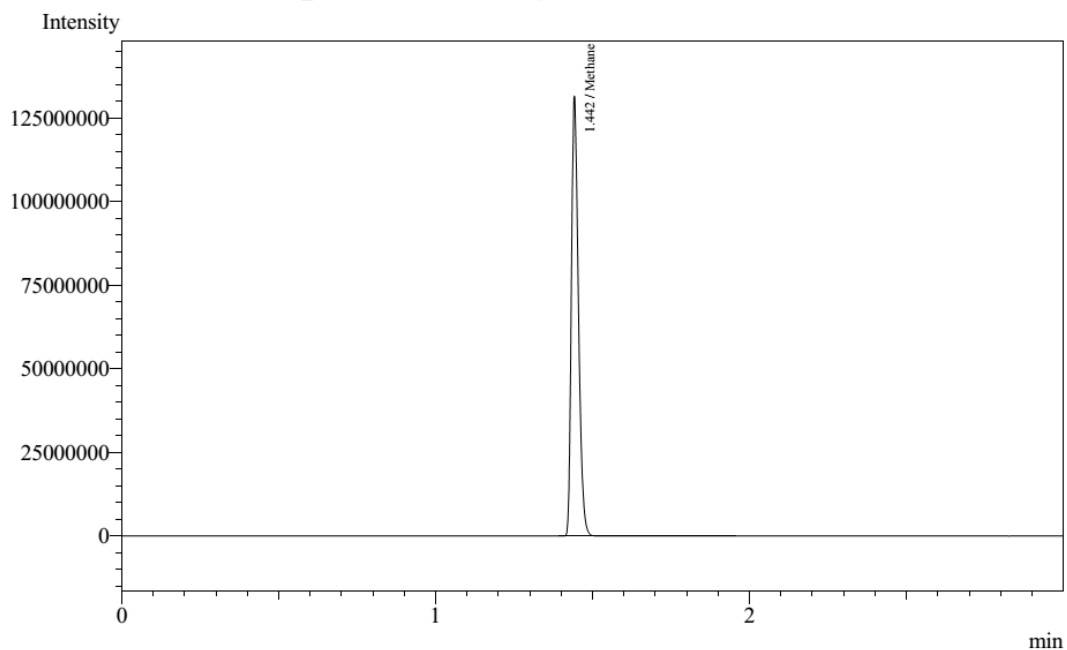
$\text{SO}_4^{2-} \text{ in}$	=	$30.00 \times 32/96$
	=	10 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปซัลเฟอร์
$\text{SO}_4^{2-} \text{ eff}$	=	$27.38 \times 32/96$
	=	9.12 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปซัลเฟอร์
ซัลไฟด์น้ำเข้าทั้งหมด	=	1.34 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปซัลเฟอร์
ซัลไฟด์น้ำออกทั้งหมด	=	1.13 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปซัลเฟอร์
$\text{H}_2\text{S}_{\text{gas}}$	=	$[(\text{ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์} \times 1.345 \times 10^{-3}) \times (\text{ปริมาตรก๊าซชีวภาพ}/Q) \times (32/34)]$
	=	$(7.67 \times 1.345/1000) \times (12.301/20) \times (32/34)$
	=	0.006 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปซัลเฟอร์
ดังนั้น % sulfur recovery	=	$(9.12 + 1.13 + 0.006) / (10 + 1.34) \times 100$
	=	90.50

การวิเคราะห์สัดส่วนมีเทน

การวิเคราะห์สัดส่วนมีเทนในการทดลองนี้ ผู้วิจัยใช้เครื่อง Gas Chromatography ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น GC-2010A ด้วย FID detector และ DB-WAX column ณ ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างผลการวิเคราะห์สัดส่วนมีเทน ดังนี้

Analysis Date & Time : 7/11/2558 16:06:59
 User Name : Admin
 Vial# : 21
 Sample Name : sww 100.1 1.5 mM
 Sample ID :
 Sample Type : Unknown
 Injection Volume : 1.00
 ISTD Amount :
 Data Name : D:\THE_AON\sww 100.1 1.5 mM.gcd
 Method Name : D:\THE_AON\methane condition.gcm

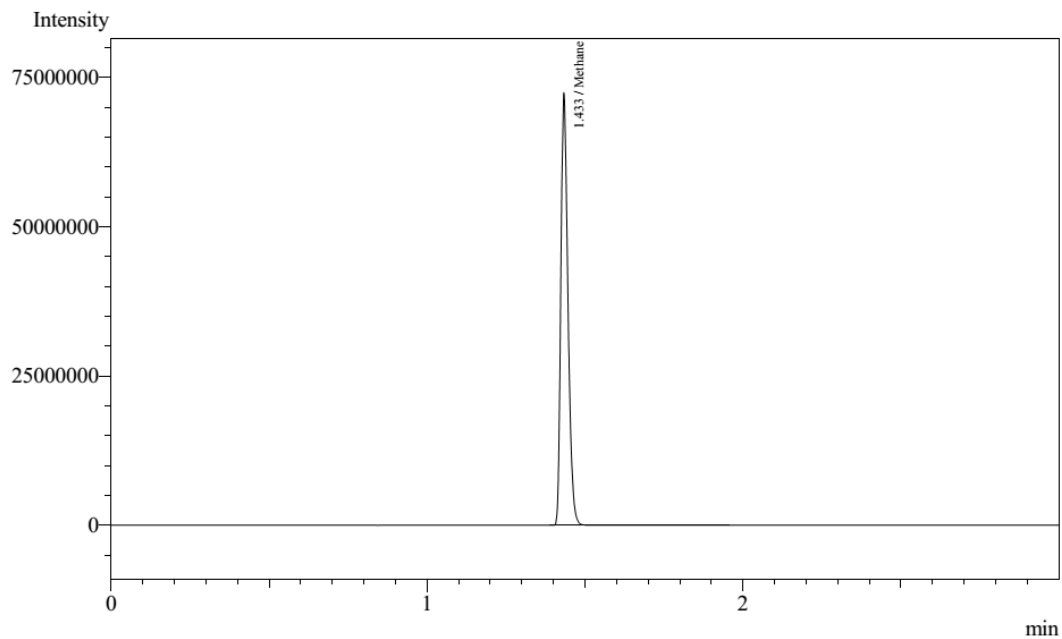


Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	ID#	Cmpd Name
1	1.442	205738412	128533332	56.395	%	S	1	Methane
Total		205738412	128533332					

ภาพที่ ข.1 การวิเคราะห์สัดส่วนมีเทนในการทดลองช่วงที่ 1 อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 100:1 เดิม
 โซเดียมโมลิบเดตเข้มข้น 1.5 มิลลิโมลาร์

Analysis Date & Time : 6/11/2558 18:11:23
 User Name : Admin
 Vial# : 21
 Sample Name : sww 50.1 1.0 mM
 Sample ID :
 Sample Type : Unknown
 Injection Volume : 1.00
 ISTD Amount :

Data Name : D:\THE_AON\sww 50.1 1.0 mM.gcd
 Method Name : D:\THE_AON\methane condition.gcm

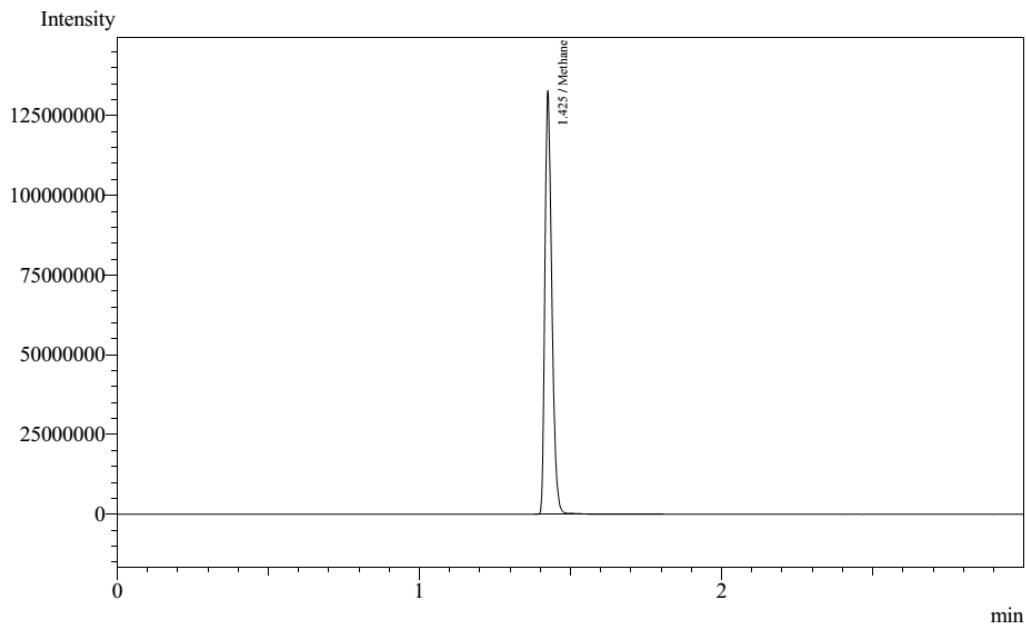


Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	ID#	Cmpd Name
1	1.433	113873596	70500388	30.877	%	S	1	Methane
Total		113873596	70500388					

ภาพที่ ข. 2 การวิเคราะห์สัดส่วนมีเทนในการทดลองช่วงที่ 1 อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 50:1 เดิม
 โซเดียมโมลิบเดตเข้มข้น 1.0 มิลลิโมลาร์

Analysis Date & Time : 15/11/2558 15:02:21
 User Name : Admin
 Vial# : 21
 Sample Name : sww 20.1 control
 Sample ID :
 Sample Type : Unknown
 Injection Volume : 1.00
 ISTD Amount :

Data Name : D:\THE_AON\sww 20.1 control.gcd
 Method Name : D:\THE_AON\methane condition.gcm

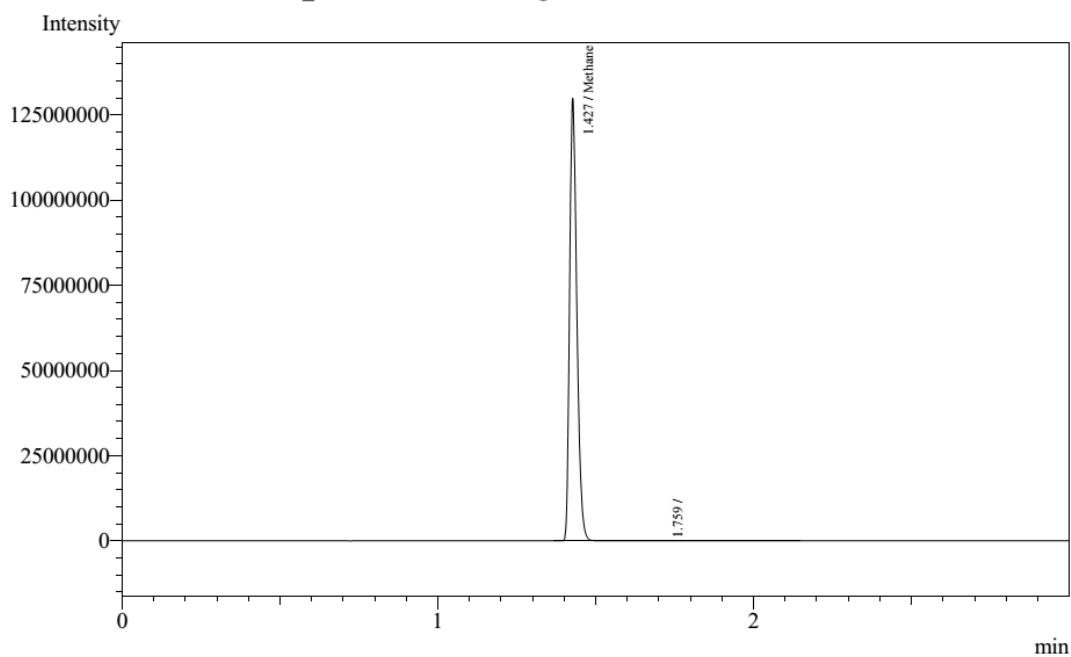


Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	ID#	Cmpd Name
1	1.425	212783013	130534563	58.352 %	S		1	Methane
Total		212783013	130534563					

ภาพที่ ข.3 การวิเคราะห์สัดส่วนมีเทนในการทดลองช่วงที่ 1 อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 20:1 ไม่
 เต็มไซเตียมโมลิบดีนัม

Analysis Date & Time : 15/11/2558 16:20:14
 User Name : Admin
 Vial# : 21
 Sample Name : sww 15.1 1.5 mM
 Sample ID :
 Sample Type : Unknown
 Injection Volume : 1.00
 ISTD Amount :

Data Name : D:\THE_AON\sww 15.1 1.5 mM.gcd
 Method Name : D:\THE_AON\methane condition.gcm

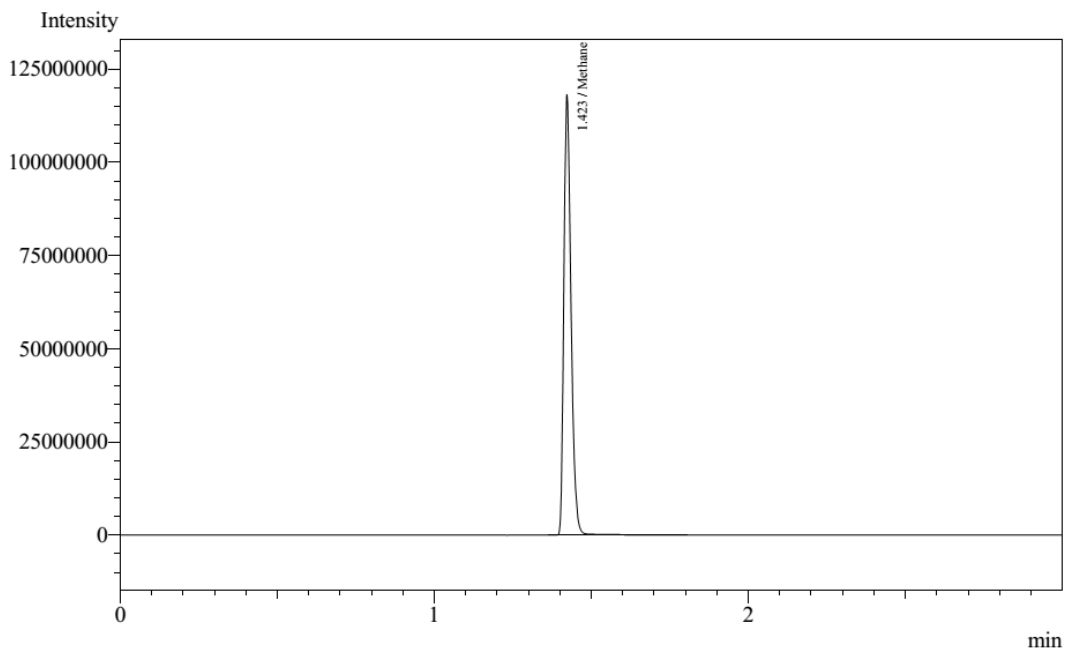


Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	ID#	Cmpd Name
1	1.427	206825295	128588053	56.697	%	S	1	Methane
2	1.759	1550	738	0.000		TV		
Total		206826845	128588791					

ภาพที่ ข.4 การวิเคราะห์สัดส่วนมีเทนในการทดลองช่วงที่ 1 อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1 เต็ม
 โซเดียมโมลิบเดตเข้มข้น 1.5 มิลลิโมลาร์

Analysis Date & Time : 14/2/2559 15:07:34
User Name : Admin
Vial# : 21
Sample Name : Reactor1
Sample ID :
Sample Type : Unknown
Injection Volume : 1.00
ISTD Amount :

Data Name : D:\THE_AON\13-2-59 Rc1.gcd
Method Name : D:\THE_AON\methane condition.gcm

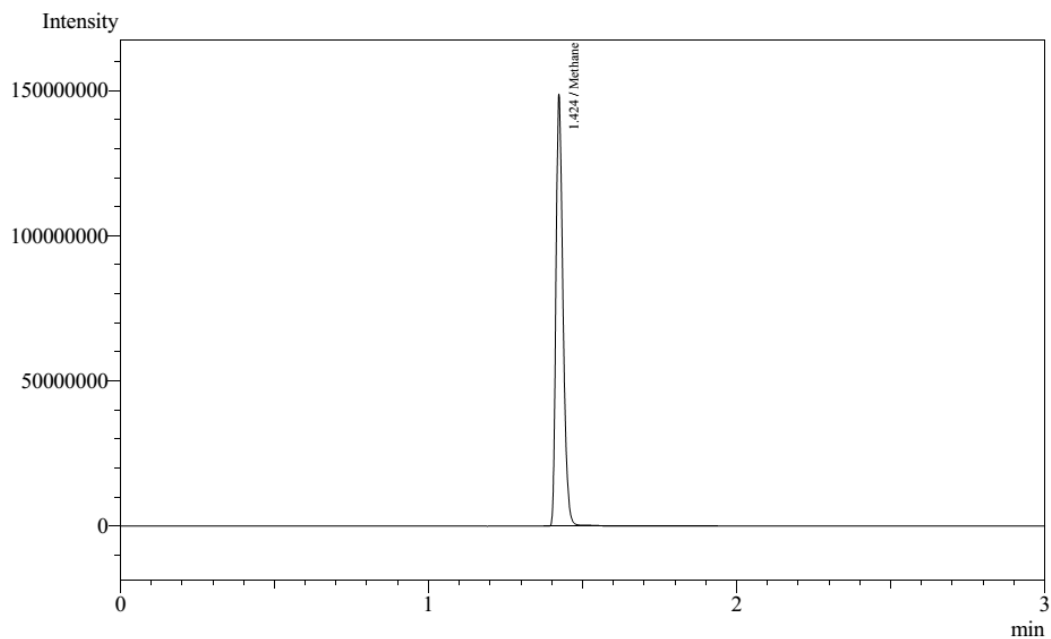


Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	ID#	Cmpd Name
1	1.423	187842512	116985833	51.424	%	S	1	Methane
Total		187842512	116985833					

ภาพที่ ข.5 การวิเคราะห์สัดส่วนมีเทนในการทดลองช่วงที่ 2 ชุดควบคุม

Analysis Date & Time : 14/2/2559 15:14:57
User Name : Admin
Vial# : 21
Sample Name : Reactor2
Sample ID :
Sample Type : Unknown
Injection Volume : 1.00
ISTD Amount :

Data Name : D:\THE_AON\13-2-59 Rc2.gcd
Method Name : D:\THE_AON\methane condition.gcm

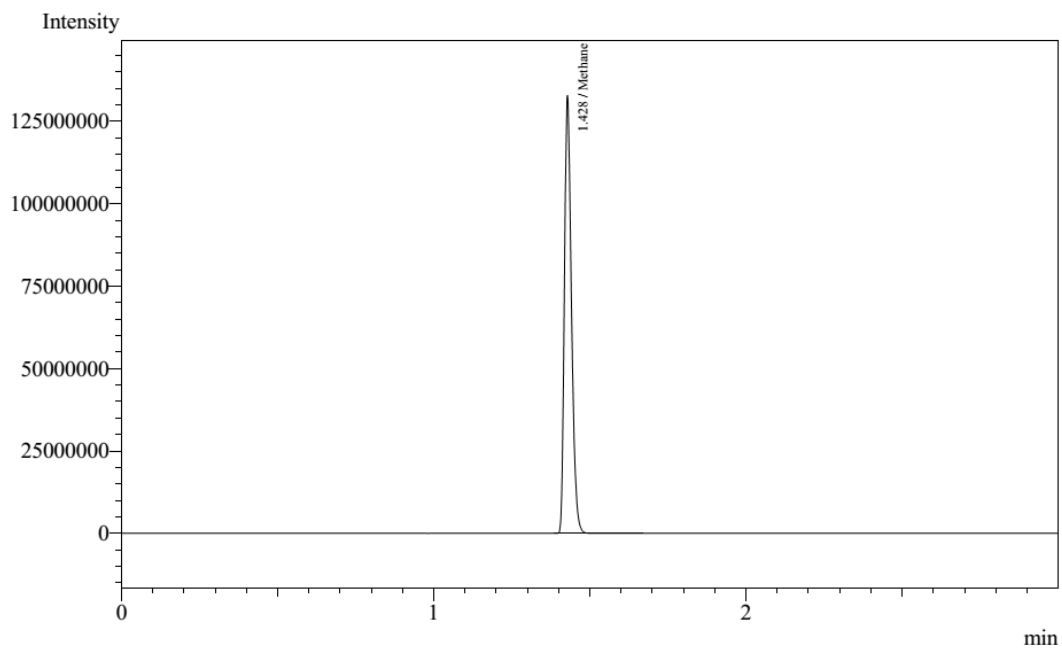


Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	ID#	Cmpd Name
1	1.424	237920081	146091321	65.334	%	S	1	Methane
Total		237920081	146091321					

ภาพที่ ข.6 การวิเคราะห์สัดส่วนมีเทนในการทดลองช่วงที่ 2 ชุดทดลอง

Analysis Date & Time : 17/5/2559 15:23:33
 User Name : Admin
 Vial# : 21
 Sample Name : 15-5--59 swine wastewater 1
 Sample ID :
 Sample Type : Unknown
 Injection Volume : 1.00
 ISTD Amount :

Data Name : D:\THE_AON\15-5-59 swine wastewater1.gcd
 Method Name : D:\THE_AON\methane condition.gcm

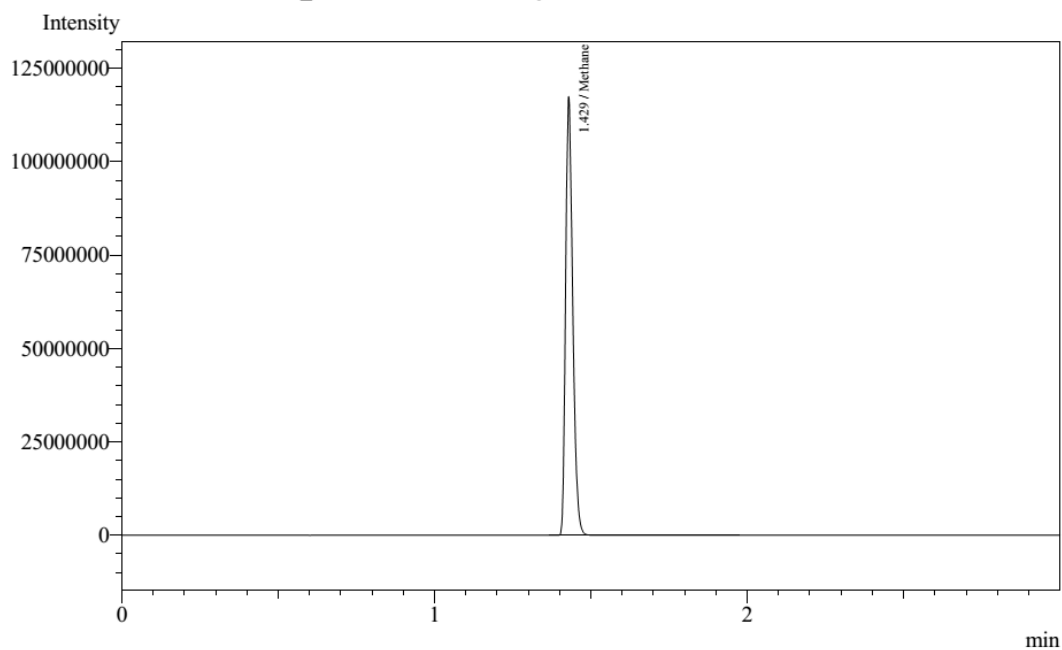


Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	ID#	Cmpd Name
1	1.428	209026623	129822149	57.308	%		1	Methane
Total		209026623	129822149					

ภาพที่ ข.7 การวิเคราะห์สัดส่วนมีเทนในการทดลองช่วงที่ 3 ชุดควบคุม

Analysis Date & Time : 17/5/2559 16:14:23
 User Name : Admin
 Vial# : 21
 Sample Name : 17-5--59 swine wastewater 2
 Sample ID :
 Sample Type : Unknown
 Injection Volume : 1.00
 ISTD Amount :

Data Name : D:\THE_AON\17-5-59 swine wastewate 2.gcd
 Method Name : D:\THE_AON\methane condition.gcm



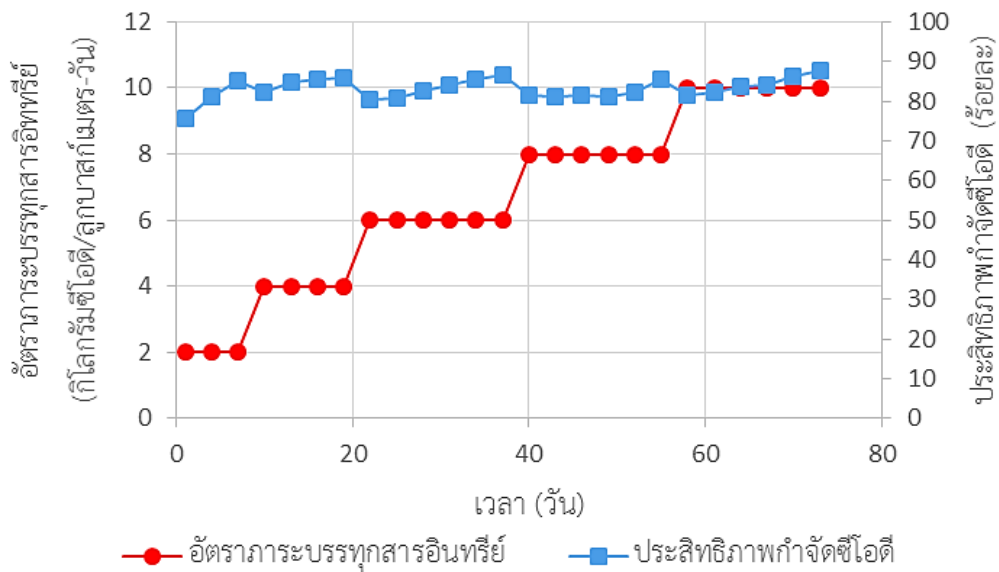
Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	ID#	Cmpd Name
1	1.429	186406104	114224761	51.025	%	S	1	Methane
Total		186406104	114224761					

ภาพที่ ข.8 การวิเคราะห์สัดส่วนมีเทนในการทดลองช่วงที่ 3 ชุดทดลอง

ภาคผนวก ค

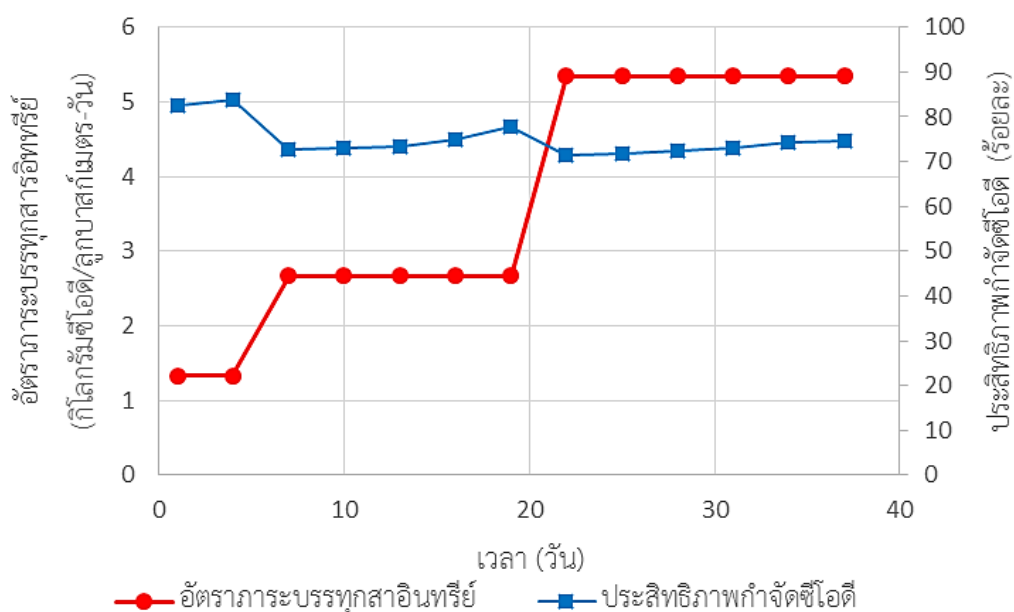
การเริ่มต้นเดินระบบ

ในช่วงการทดลองที่ 2 เป็นการทดลองด้วยระบบยูเอเอสบี ซึ่งก่อนจะเริ่มต้นการทดลอง จะต้องมีการเริ่มต้นระบบ (start up) เพื่อให้จุลินทรีย์ในระบบมีความคุ้นชินกับน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง โดยการทดลองช่วงนี้ผู้วิจัยได้เริ่มป้อนน้ำเสียที่มีความเข้มข้นซีไอดีเริ่มต้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรและค่อยๆเพิ่มเป็น 2,000 3,000 4,000 และ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็นค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 2 4 6 8 และ 10 กิโลกรัมซีไอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ตามลำดับ ป้อนน้ำเสียด้วยอัตราเร็ว 20 ลิตรต่อวัน ดังแสดงในภาพที่ ค.1



ภาพที่ ค.1 ค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์และประสิทธิภาพการกำจัดในช่วงการทดลองที่ 2

การทดลองครั้งที่ 3 เป็นการทดลองด้วยน้ำเสียจริงจากฟาร์มสุกร ซึ่งมีค่าซีโอดีไม่คงที่ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2,674 มิลลิกรัมต่อลิตร การเริ่มต้นเดินระบบในช่วงแรก ผู้วิจัยได้ป้อนน้ำเสียด้วยอัตรา 5 ลิตรต่อวัน พบว่ามีค่าประสิทธิภาพกำจัดซีโอดีสูงกว่า 80 แต่พบปัญหาคือ ไม่เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ผู้วิจัยจึงค่อยๆปรับค่าอัตราการไหลเข้าระบบจาก 5 ลิตรต่อวัน เป็น 10 และ 20 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ ทั้งนี้จะควบคุมให้ระบบมีค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงกว่าร้อยละ 70 ดังแสดงในภาพที่ ค.2 หลังจากนั้นจึงทำการทดลองต่อไป



ภาพที่ ค.2 ค่าอัตราภาระบรรทุกลำอินทรีย์และประสิทธิภาพการกำจัดในช่วงการทดลองที่ 3

การทดลองเปรียบเทียบเกรดโซเดียมโมลิบเดท

จากการทดลองนี้ ผู้วิจัยได้ใช้โซเดียมโมลิบเดทความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 เกรดแลป ยี่ห้อ Univar ซึ่งมีราคาสูง หากมีการนำไปใช้จริงจะทำให้ไม่คุ้มทุน ทั้งนี้ทางผู้วิจัยจึงได้มีการทดลองเพิ่มเติม ด้วยระบบแบบแบตช์ เช่นเดียวกับการทดลองช่วงที่ 1 โดยเปลี่ยนเป็นโซเดียมโมลิบเดทความบริสุทธิ์ ร้อยละ 99 เกรดอุตสาหกรรม จากบริษัท บลูเพลเนตเคมีคอล จำกัด ซึ่งอนุเคราะห์ตัวอย่างสาร ดังกล่าวในการทดลอง มีผลการทดลอง ดังนี้

ตารางที่ ค.1 อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 100:1

ชุดควบคุม						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	3220	32.6	7.008
1	491	950	24.624			
2	364	1200	60.245			
3	226	1100	40.224			
4	145	500	41.233			
5	60	40	125.637			
6	20	7	7.965			
7	10	5	7.428	259	9.1	7.143
โซเดียมโมลิบเดท 0.5 มิลลิโมลาร์						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	3220	32.6	7.008
1	548	6	20.214			
2	362	6	54.265			
3	210	5	44.443			
4	126	4	39.462			
5	50	0	18.352			
6	16	0	6.218			
7	5	0	5.403	248	28.4	7.021

ตารางที่ ค.1 อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 100:1 (ต่อ)

โซเดียมโมลิบเดท 1.0 มิลลิโมลาร์						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	3220	32.6	7.008
1	544	0	25.693			
2	386	0	64.164			
3	235	0	52.632			
4	149	0	27.431			
5	46	0	11.75			
6	14	0	9.632			
7	10	0	9.415	244	29.7	7.101
โซเดียมโมลิบเดท 1.5 มิลลิโมลาร์						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	3220	32.6	7.008
1	586	0	17.443			
2	371	0	54.285			
3	220	0	40.534			
4	131	0	30.593			
5	66	0	12.943			
6	12	0	5.522			
7	6	0	4.032	250	27.7	7.092

ตารางที่ ค.1 อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 100:1 (ต่อ)

โฆเดียมโมลิบเดท 2.0 มิลลิโมลาร์						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	3220	32.6	7.008
1	592	0	20.492			
2	361	0	60.482			
3	224	0	41.033			
4	135	0	27.217			
5	65	0	16.304			
6	10	0	5.563			
7	4	0	5.230	254	29.9	7.021

ตารางที่ ค.2 อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 50:1

ชุดควบคุม						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	3128	60.8	7.032
1	485	1500	21.923			
2	379	1800	56.042			
3	241	1200	44.853			
4	138	440	22.053			
5	79	80	24.236			
6	24	10	19.322			
7	5	0	7.434	251	28.6	7.165

ตารางที่ ค.2 อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 50:1 (ต่อ)

โซเดียมโมลิบเดท 0.5 มิลลิโมลาร์						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	3128	60.8	7.032
1	562	110	17.942			
2	374	150	58.526			
3	239	320	44.054			
4	141	90	21.767			
5	56	40	20.214			
6	18	10	10.832			
7	10	0	10.048	238	49.2	7.129
โซเดียมโมลิบเดท 1.0 มิลลิโมลาร์						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	3128	60.8	7.032
1	580	8	32.947			
2	279	10	57.632			
3	263	10	46.392			
4	137	10	22.593			
5	50	10	18.590			
6	20	0	14.847			
7	5	0	8.935	216	58.1	7.121

ตารางที่ ค.2 อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 50:1 (ต่อ)

โซเดียมโมลิบเดท 1.5 มิลลิโมลาร์						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	3128	60.8	7.032
1	570	0	21.449			
2	324	0	59.361			
3	221	0	48.032			
4	128	0	33.314			
5	50	0	24.598			
6	18	0	9.218			
7	10	0	6.430	239	57.1	7.084
โซเดียมโมลิบเดท 2.0 มิลลิโมลาร์						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	3128	60.8	7.032
1	600	0	18.572			
2	340	0	57.325			
3	226	0	48.053			
4	127	0	31.301			
5	48	0	18.594			
6	26	0	10.431			
7	8	0	10.055	236	53.1	7.097

ตารางที่ ค.3 อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 20:1

ชุดควบคุม						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	3214	149.4	7.012
1	586	2000	19.942			
2	362	2500	55.591			
3	224	2400	36.932			
4	104	1700	24.805			
5	50	1000	18.397			
6	20	100	14.593			
7	15	100	8.593	228	84.6	7.248
โขเดียมโมลิบเดท 0.5 มิลลิโมลาร์						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	3214	149.4	7.012
1	597	150	19.343			
2	360	300	50.944			
3	246	350	49.571			
4	134	100	25.426			
5	60	80	27.852			
6	18	10	9.052			
7	5	0	5.643	220	147.1	7.122

ตารางที่ ค.3 อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 20:1 (ต่อ)

โซเดียมโมลิบเดต 1.0 มิลลิโมลาร์						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	3214	149.4	7.012
1	590	40	19.953			
2	330	80	58.494			
3	270	50	50.551			
4	149	20	32.650			
5	80	10	18.422			
6	20	10	8.676			
7	5	0	5.632	228	140.5	7.0.98
โซเดียมโมลิบเดต 1.5 มิลลิโมลาร์						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	3214	149.4	7.012
1	588	10	18.593			
2	360	10	58.185			
3	250	0	49.442			
4	150	0	35.730			
5	72	0	17.128			
6	20	0	10.483			
7	10	0	5.295	190	142.3	7.014

ตารางที่ ค.3 อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 20:1 (ต่อ)

โซเดียมโมลิบเดต 2.0 มิลลิโมลาร์						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	3214	149.4	7.012
1	580	0	15.492			
2	377	0	57.328			
3	240	0	45.884			
4	126	0	25.322			
5	60	0	10.436			
6	20	0	4.976			
7	5	0	0.654	230	145.2	7.005

ตารางที่ ค.4 อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1

ชุดควบคุม						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	3138	216	7.005
1	595	2700	18.954			
2	371	3200	44.483			
3	215	3100	40.594			
4	130	2200	29.377			
5	70	900	20.424			
6	25	100	8.121			
7	5	0	4.599	218	131	7.275

ตารางที่ ค.4 อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1 (ต่อ)

โซเดียมโมลิบเดต 0.5 มิลลิโมลาร์						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	3138	216	7.005
1	598	150	17.094			
2	360	400	51.335			
3	228	300	44.765			
4	120	100	32.842			
5	60	60	21.884			
6	15	10	10.095			
7	7	0	5.832	227	197.3	7.104
โซเดียมโมลิบเดต 1.0 มิลลิโมลาร์						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	3138	216	7.005
1	580	150	22.575			
2	340	250	48.959			
3	234	200	41.214			
4	120	100	24.686			
5	60	10	18.095			
6	20	0	7.883			
7	5	0	6.451	230	195.5	7.086

ตารางที่ ค.4 อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1 (ต่อ)

โซเดียมโมลิบเดท 1.5 มิลลิโมลาร์						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	3138	216	7.005
1	592	40	24.592			
2	320	50	58.593			
3	248	60	48.326			
4	140	30	35.095			
5	60	0	20.473			
6	30	0	7.425			
7	10	0	3.584	220	198.2	7.094
โซเดียมโมลิบเดท 2.0 มิลลิโมลาร์						
วันที่	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (พีพีเอ็ม)	สัดส่วนมีเทน (ร้อยละ)	ซีโอดี (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ซัลเฟต (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช
0	0	0	-	3138	216	7.005
1	600	0	26.921			
2	340	0	50.911			
3	239	0	45.758			
4	128	0	36.217			
5	60	0	16.094			
6	28	0	11.594			
7	10	0	9.742	228	208	7.024

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวิชณุ สีโหน เกิดเมื่อวันที่ 1 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2529 ที่จังหวัดสมุทรสาคร สำเร็จ การศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสมุทรสาครวิทยาลัย จังหวัดสมุทรสาคร ในปีการศึกษา 2547 สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551 จากนั้นเข้าทำงานในตำแหน่ง นักวิจัยหน่วยงานตรวจสอบสารพันธุกรรม ศูนย์วิจัยสุขภาพสัตว์น้ำ บริษัท เจริญโภคภัณฑ์อาหาร จำกัด (มหาชน) ในปี พ.ศ. 2553 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556

การเผยแพร่วิทยานิพนธ์แบบบรรยายในที่ประชุมระดับนานาชาติ

Witsanu Seehone, Warawut Chulalaksananukul, Chalermchai Ruangchainikom and Orathai Chavalparit “Inhibition of Hydrogen Sulfide on UASB Treating Synthetic Wastewater By Sodium Molybdate” The proceedings of International Society for Engineering Research and Development (ISERD) at the International Conference on Science and Innovative Engineering (ICSIE), Osaka, Japan. 30th March 2016

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY