

ผลของอิออนลบต่อการลดไนเตรทในน้ำเสียโดยระบบอีจีเอสบี



นางสาวพุทธิกุล ทองเนื้อสูง

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF ANIONS ON NITRATE REDUCTION IN WASTEWATER BY EGSB SYSTEM



Miss Puttikul Tongnuesook

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2007

Copyright of Chulalongkorn University

พหุธิกุล ทองเนื้อสูง : ผลของอิออนลบต่อการลดไนเตรทในน้ำเสียโดยระบบอีจีเอสบี .
(EFFECT OF ANIONS ON NITRATE REDUCTION IN WASTEWATER BY EGSB SYSTEM) อ.ที่ปรึกษา : รศ. ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล , 206 หน้า .

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นของผล การกำจัดไนเตรทในน้ำเสียสังเคราะห์โดยมีอิออนลบ ได้แก่ ซัลเฟตคลอไรด์ และไนไตรท์ เป็นสารรบกวนในกระบวนการกำจัดไนเตรทและซีโอดีในน้ำเสีย ด้วยระบบอีจีเอสบี โดยงานวิจัยทั้งหมดนี้เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ กำหนด น้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกรณ์อีจีเอสบีด้วยความเร็ว 3 ม./ชม. มีเวลากักเก็บน้ำ 3.8 ชม. มีค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 6.6 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน โดยใช้น้ำตาลทรายเป็นน้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นซีโอดี 1,000 มก./ล. และมีความเข้มข้นของไนเตรท 100 มก./ล.

ผลการทดลอง พบว่า ระบบอีจีเอสบี ที่เดินระบบโดยที่ไม่มีสารรบกวน มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี อยู่ในช่วง 92 - 95 % และมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรท อยู่ในช่วง 98 - 99 % ผลของสารรบกวนซัลเฟตที่ความเข้มข้น 50, 100 และ 150 มก./ล. มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี 92 , 94 และ 89 % ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรท 97, 97 และ 97 % ตามลำดับ ผลของสารรบกวนคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 1,000, 1,500 และ 2,000 มก./ล. มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี 92, 94 และ 91 % ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพในการกำจัด ไนเตรท 99, 99 และ 99 % ตามลำดับ ผลของสารรบกวนไนไตรท์ที่ความเข้มข้น 50, 100 และ 200 มก./ล. มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี 92, 94 และ 92 % ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพในการกำจัด ไนเตรท เท่ากับ 97, 98 และ 99 % ตามลำดับ การศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น พบว่า ระบบอีจีเอสบีที่ไม่มีสารรบกวน มีปริมาณก๊าซชีวภาพอยู่ในช่วง 5,900 - 6,000 มล./วัน สำหรับปริมาณ ก๊าซที่เกิดจากระบบอีจีเอสบีที่มีสารรบกวนซัลเฟต คลอไรด์ และไนไตรท์ มีปริมาณก๊าซอยู่ในช่วง 5,100 - 5,600, 5,500 - 5,900, 5,000 - 5,500 มล./วัน ตามลำดับ ดังนั้นสรุปผลได้ว่า สารรบกวน ประเภทซัลเฟต คลอไรด์ และไนไตรท์ที่ความเข้มข้น 50 - 150 มก./ล., 1,000 - 2,000 มก./ล. และ 50 - 200 มก./ล. ตามลำดับ มีผลต่อการลดลงของประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรท และ ซีโอดีในน้ำเสียสังเคราะห์น้อยมาก และมีผลทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดจากระบบอีจีเอสบีลดลง เล็กน้อย ดังนั้น ระบบอีจีเอสบีสามารถทนต่อสารรบกวนอิออนลบในปริมาณที่ระบุไว้ จึงเป็น ทางเลือกหนึ่งในการใช้กำจัดซีโอดี และ ไนเตรท ในการบำบัดน้ำเสียที่มีซัลเฟต คลอไรด์ หรือ ไนไตรท์ เช่น น้ำเสียจากโรงงานผลิตสแตนเลส โรงงานปลากระป๋อง โรงงานผักกาดคองกระป๋อง หรือน้ำเสียจากสะพานปลา เป็นต้น

ภาควิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิสิต..... พหุธิกุล ทองเนื้อสูง
สาขาวิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา2550.....

4770390021 : MAJOR ENVIRONMENT ENGINEERING

KEY WORD: EGSB / NITRATE / SULFATE / CHLORIDE / NITRITE

PUTTIKUL TONGNUESOOK : EFFECT OF ANIONS ON NITRATE REDUCTION IN WASTEWATER BY EGSB SYSTEM. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. CHAVALIT RATANATUMSAKUL, Ph.D., 206 pp.

This research was conducted to investigate effect of anions such as sulfate, chloride and nitrite on nitrate and COD removal efficiencies by EGSB system. Laboratory - scale experimental set-up of EGSB system was employed with organic loading rate $6.6 \text{ kg.COD/m}^3\text{-d}$. The upflow velocities for all reactors were kept at 3 m/hr, resulting in HRT of 3.8 hrs. The feed had COD and nitrate concentration of 1,000 and 100 mg/l, respectively.

From the experimental results, it was found that the EGSB system with out interfering anions had COD and nitrate removal efficiencies in the range of 92 – 95 % and 98 – 99 %, respectively. In case of EGSB system with sulfate having concentrations at 50, 100 and 150 mg/l as an interference ,it was found that COD efficiencies were 92, 94 and 89 %, respectively ;for nitrate removal efficiencies were 97, 97 and 97 % respectively. In case with chloride having concentrations at 1000, 1500 and 2000 mg/l, it was found that COD removal efficiencies were 92, 94 and 91 % ,respectively ; for nitrate removal efficiencies were 99, 99 and 99 %, respectively. In case with nitrite having concentrations at 50, 100 and 200 mg/l, it was found that COD removal efficiencies were 92, 94 and 92 % ,respectively ; for nitrate removal efficiencies were 97, 98 and 99 % ,respectively. For Biogas production with EGSB system, the system without interfering anions seems to have higher biogas production potential as amount of 5,900 – 6,000 ml./day of biogas was obtained. In contrast to the system with interfere anions, less amount of biogas production were obtained in the range of 5,100 – 5,600, 5,500 – 5,900 and 5,000 – 5,500 ml/day with sulfate, chloride and nitrite interference, respectively. Therefore, it seems that interfering anions of sulfate, chloride and nitrite at above mention concentration did not significantly affect system performance in terms of COD and nitrate removal efficiencies ; however , they resulted in a significantly decrease in biogas production . Then EGSB system can be alternative system for treatment of COD and nitrate removal containing wastewater with interfere anions such as fish pier's wastewater, stainless industrial wastewater, canned fish industrial wastewater and canned pickled vegetable industrial wastewater.

Department...Environmental Engineering.... Student's signature..... *Puttikul Tongnuesook*.....

Field of study...Environmental Engineering... Advisor's signature..... *Chavalit Ratanatumsakul*.....

Academic year2007.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ที่ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางในการวิจัย และให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ตลอดจนเป็นกำลังใจและสร้างทัศนคติที่ดีต่อการทำงานวิจัยนี้ นอกจากนี้ ยังมีส่วนทำให้ ข้าพเจ้ามีความมุ่งมั่นในการทำวิจัยนี้ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณะ พิ้งรัมย์ และอาจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ ที่ ให้ความอนุเคราะห์ในการร่วมเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ ต่างๆ ตลอดจนช่วยแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาอนุญาตสนับสนุน การทำงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณครูประจำห้องปฏิบัติการในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์และอำนวยความสะดวก ในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆเพื่อใช้ในการ งานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่ให้ข้าพเจ้าได้เข้ามาศึกษาและเรียนรู้ สิ่งต่างๆ มากมายในระดับมหาบัณฑิต

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ รหัส 46 – 48 ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ เรื่อยมา จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยดี ตลอดจนขอขอบคุณทุกท่านที่มีได้กล่าว ณ ที่นี้ ที่มีส่วนเกี่ยวข้องและช่วยเหลือในการทำ วิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ พี่ๆ พี่ๆ และผู้บริหารทุกท่าน ในสำนักอนุรักษ์และฟื้นฟูแหล่งน้ำ ที่สนับสนุน ให้กำลังใจ คอยไต่ถาม และ ให้โอกาสในการศึกษาครั้งนี้

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อพิณรงค์ คุณแม่อรพรรณ ทองเนื้อสุก พี่ๆ และคุณวศิณธร ธรรมถาวร ที่ได้ให้การสนับสนุนและส่งเสริมทางการศึกษา ตลอดจนคอย เป็นกำลังใจที่ดีให้แก่ข้าพเจ้าเสมอมา จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

| | หน้า |
|---|----------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| คัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง | ญ |
| สารบัญรูป..... | ฉ |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... | 1 |
| 1.3 ขอบเขตการวิจัย..... | 2 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 2 |
| บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 3 |
| 2.1 กลไกพื้นฐานในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย..... | 3 |
| 2.2 กลไกการผลิตมีเทน..... | 4 |
| 2.2.1 ประเภทของแบคทีเรียในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศ..... | 8 |
| 2.3 ระบบยูเอเอสบี..... | 10 |
| 2.3.1 ความเป็นมาของระบบยูเอเอสบี..... | 10 |
| 2.3.2 ลักษณะและการทำงานของระบบยูเอเอสบี..... | 11 |
| 2.3.3 ข้อดีและข้อเสียของระบบยูเอเอสบี..... | 12 |
| 2.3.4 ประเภทของ Granular Sludge ในถังยูเอเอสบี..... | 13 |
| 2.3.5 โครงสร้างของแบคทีเรียในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์..... | 14 |
| 2.3.6 ความสำคัญของ Extracellular Polymers ต่อการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ | 16 |
| 2.3.7 กระบวนการรวมตัวเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ | 17 |
| 2.3.8 กลไกการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์..... | 18 |
| 2.3.9 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบยูเอเอสบี..... | 19 |
| 2.4 ระบบอีจีเอสบี..... | 24 |
| 2.4.1 ความเป็นมาของระบบอีจีเอสบี..... | 24 |
| 2.4.2 ลักษณะและการทำงานของระบบอีจีเอสบี..... | 24 |
| 2.4.3 ลักษณะของระบบอีจีเอสบี..... | 25 |
| 2.5 กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน..... | 27 |
| 2.5.1 สภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อดีไนตริฟิเคชัน..... | 29 |
| 2.6 ซัลเฟต..... | 36 |

| | | |
|----------------|--|-----------|
| 2.6.1 | วัฏจักรซัลเฟอร์ทางชีวภาพ | 36 |
| 2.6.2 | แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต..... | 37 |
| 2.6.3 | ปัจจัยทางสภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต..... | 38 |
| 2.7 | คลอไรด์..... | 41 |
| 2.7.1 | คุณสมบัติทั่วไปของคลอไรด์..... | 41 |
| 2.7.2 | แบคทีเรียรีดิวซ์คลอไรด์..... | 43 |
| 2.8 | ไนโตรเจน..... | 43 |
| 2.8.1 | คุณสมบัติทั่วไปของไนโตรเจน..... | 43 |
| 2.8.2 | ไนโตรเจนกับปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน..... | 44 |
| 2.9 | สมดุลมวลของซีไอดี ซัลเฟอร์และไนโตรเจนในกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนเมื่อมีซัลเฟตและไนเตรทอยู่ในน้ำเสีย..... | 45 |
| 2.9.1 | สมดุลมวลซีไอดี..... | 45 |
| 2.9.2 | สมดุลมวลซัลเฟอร์..... | 49 |
| 2.9.3 | สมดุลมวลไนโตรเจน..... | 50 |
| 2.10 | ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 51 |
| 2.10.1 | การศึกษาการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบอีจีเอสบี..... | 51 |
| 2.10.2 | การศึกษาการกำจัดไนโตรเจน ไนเตรทในน้ำเสียโดยระบบยูเอเอสบี..... | 52 |
| 2.10.3 | การศึกษาการกำจัดซัลเฟตในน้ำเสียโดยระบบยูเอเอสบี..... | 53 |
| 2.10.4 | การศึกษาผลของปฏิกิริยาร่วมและการแข่งขันของสารอาหารระหว่าง ไนเตรท และซัลเฟต ในกระบวนการแบบไร้อากาศ..... | 54 |
| 2.10.5 | การศึกษาผลกระทบของคลอไรด์ในน้ำเสีย..... | 55 |
| บทที่ 3 | แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย..... | 56 |
| 3.1 | แผนการทดลอง..... | 56 |
| 3.2 | น้ำเสียสังเคราะห์และการเตรียมน้ำเสีย..... | 59 |
| 3.2.1 | ส่วนประกอบของน้ำเสีย..... | 59 |
| 3.2.2 | วิธีการเตรียมน้ำเสีย..... | 59 |
| 3.3 | เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... | 59 |
| 3.3.1 | ถังพักน้ำเสีย..... | 59 |
| 3.3.2 | แบบจำลองถังปฏิกรณ์อีจีเอสบี..... | 60 |
| 3.3.3 | เครื่องสูบน้ำเข้าสู่ระบบและเครื่องสูบน้ำเสียเวียนกลับ..... | 60 |
| 3.3.4 | อุปกรณ์เก็บและวัดปริมาตรก๊าซแบบแทนที่น้ำ..... | 61 |

| | |
|---|------------|
| 3.3.5 ชุดดักเก็บก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์..... | 62 |
| 3.4 การติดตั้งเครื่องมือและหลักการทำงาน..... | 62 |
| 3.5 จุดเก็บตัวอย่าง..... | 63 |
| บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล..... | 66 |
| 4.1 ผลของสารรบกวนที่มีผลต่อการกำจัดไนเตรท และซีโอดี ในระบบอีจีเอสบี..... | 66 |
| 4.1.1 สภาพแวดล้อมของการเดินระบบ..... | 68 |
| 4.1.2 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัด..... | 84 |
| 4.1.3 ไนเตรทและประสิทธิภาพการกำจัด..... | 91 |
| 4.1.4 ประสิทธิภาพในการกำจัดสารรบกวนประเภทซัลเฟต คลอไรด์ และไนไตรท์..... | 97 |
| 4.1.4.1 ซัลเฟต และประสิทธิภาพในการกำจัด..... | 97 |
| 4.1.4.2 คลอไรด์และประสิทธิภาพในการกำจัด..... | 102 |
| 4.1.4.3 ไนไตรท์และประสิทธิภาพในการกำจัด..... | 103 |
| 4.1.5 ก๊าซชีวภาพ..... | 105 |
| 4.1.6 ของแข็งแขวนลอยที่ออกจากระบบ..... | 109 |
| 4.1.7 สมดุลมวลของสารในระบบ..... | 112 |
| 4.2 การศึกษาเม็ดตะกอนจุลินทรีย์..... | 119 |
| 4.3 การวิเคราะห์เปรียบเทียบผลของมลสารอินทรีย์ที่มีผลต่อระบบอีจีเอสบี..... | 128 |
| 4.3.1 ประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทและซีโอดี..... | 128 |
| 4.3.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพและสัดส่วนก๊าซมีเทน..... | 133 |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... | 136 |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง..... | 136 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ..... | 137 |
| รายการอ้างอิง..... | 138 |
| ภาคผนวก..... | 142 |
| ภาคผนวก ก..... | 143 |
| ภาคผนวก ข..... | 154 |
| ภาคผนวก ค..... | 163 |
| ภาคผนวก ง..... | 173 |
| ภาคผนวก จ..... | 185 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 206 |

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|---------------|--|
| ตารางที่ 2.1 | ปฏิบัติการรีดอกซ์ในการบำบัดน้ำเสีย..... 4 |
| ตารางที่ 2.2 | กลุ่มสารอาหารที่ใช้ในปฏิบัติการสร้างมีเทน..... 7 |
| ตารางที่ 2.3 | ผลของแอมโมเนียไนโตรเจนต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน..... 22 |
| ตารางที่ 2.4 | การทำงานของระบบกำจัดไนโตรเจนที่คลอไรด์ความเข้มข้นต่างๆ..... 34 |
| ตารางที่ 2.5 | อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ที่เหมาะสมสำหรับสารอินทรีย์ต่างๆ ในปฏิบัติการดีไนตริฟิเคชัน..... 35 |
| ตารางที่ 2.6 | ระดับเลขออกซิเดชันของตัวอย่างธาตุซัลเฟอร์และสารประกอบของ ธาตุซัลเฟอร์..... 36 |
| ตารางที่ 2.7 | ปริมาณเกลือในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม..... 42 |
| ตารางที่ 2.8 | พารามิเตอร์ต่างๆ ของน้ำเสียสะพานปลาสมุทรสาคร..... 42 |
| ตารางที่ 3.1 | แผนการทดลอง..... 57 |
| ตารางที่ 3.2 | ปริมาณสารประกอบซัลเฟอร์ที่มีผลต่อการบำบัดน้ำเสีย..... 58 |
| ตารางที่ 3.3 | สัดส่วนในการเติมค่าสภาพต่าง ธาตุอาหารหลัก และธาตุอาหารเสริม..... 60 |
| ตารางที่ 3.4 | รายละเอียดการเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ตัวอย่าง..... 64 |
| ตารางที่ 4.1 | คุณสมบัติของทุกชุดการทดลอง..... 69 |
| ตารางที่ 4.2 | ไออาร์พีของทุกชุดการทดลอง..... 72 |
| ตารางที่ 4.3 | พีเอชของระบบอีจีเอสบีของทุกชุดการทดลอง..... 74 |
| ตารางที่ 4.4 | สภาพต่างทั้งหมดของทุกชุดการทดลอง..... 77 |
| ตารางที่ 4.5 | กรดไขมันระเหยของทุกชุดการทดลอง..... 82 |
| ตารางที่ 4.6 | ซีไอดีและประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดี..... 86 |
| ตารางที่ 4.7 | ไนเตรทและประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรท..... 92 |
| ตารางที่ 4.8 | ซัลเฟตและประสิทธิภาพในการกำจัดของชุดการทดลองที่ 1 และ 4 98 |
| ตารางที่ 4.9 | ซัลไฟด์ในน้ำออกและในชุดดักก๊าซของชุดการทดลองที่ 1 และ 4..... 100 |
| ตารางที่ 4.10 | คลอไรด์และประสิทธิภาพในการกำจัดของชุดการทดลองที่ 2..... 102 |
| ตารางที่ 4.11 | ไนไตรท์และประสิทธิภาพในการกำจัดของชุดการทดลองที่ 3 103 |
| ตารางที่ 4.12 | ปริมาณก๊าซชีวภาพของทุกชุดการทดลอง..... 106 |
| ตารางที่ 4.13 | ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำออกของทุกชุดการทดลอง..... 110 |
| ตารางที่ 4.14 | สมมูลมวลของซีไอดีภายหลังผ่านระบบกับสมมูลมวลซีไอดีก่อนเข้าระบบ (% COD recovery) ของทุกชุดการทดลอง..... 112 |
| ตารางที่ 4.15 | เปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอน (% electron flow)..... 114 |
| ตารางที่ 4.16 | สมมูลมวลของไนโตรเจนภายหลังผ่านระบบกับสมมูลมวลไนโตรเจน |

| | | |
|---------------|--|-----|
| | ก่อนเข้าระบบ(% nitrogen recovery) ของทุกชุดการทดลอง..... | 116 |
| ตารางที่ 4.17 | สมมูลมวลของซัลเฟอร์ภายหลังผ่านระบบกับสมมูลมวลซัลเฟอร์ ก่อนเข้าระบบ(% sulfur recovery)ของทุกชุดการทดลอง..... | 118 |
| ตารางที่ 4.18 | ขนาดเม็ดตะกอนแบบคทีเรียในถังปฏิกรณ์ของทุกชุดการทดลอง..... | 126 |
| ตารางที่ 4.19 | งานวิจัยและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพในการกำจัด ซีโอดีและไนเตรท..... | 129 |
| ตารางที่ ก.1 | อุณหภูมิของชุดการทดลองที่ 1..... | 143 |
| ตารางที่ ก.2 | ไออาร์พีของชุดการทดลองที่ 1..... | 144 |
| ตารางที่ ก.3 | พีเอชของชุดการทดลองที่ 1..... | 136 |
| ตารางที่ ก.4 | สภาพต่างทั้งหมดของชุดการทดลองที่ 1..... | 137 |
| ตารางที่ ก.5 | กรดไขมันระเหยของชุดการทดลองที่ 1..... | 138 |
| ตารางที่ ก.6 | ซีโอดีของชุดการทดลองที่ 1..... | 139 |
| ตารางที่ ก.7 | ไนเตรทของชุดการทดลองที่ 1..... | 149 |
| ตารางที่ ก.8 | ซัลเฟตของชุดการทดลองที่ 1..... | 150 |
| ตารางที่ ก.9 | ซัลไฟด์ของชุดการทดลองที่ 1..... | 151 |
| ตารางที่ ก.10 | ก๊าซชีวภาพของชุดการทดลองที่ 1..... | 152 |
| ตารางที่ ก.11 | ของแข็งแขวนลอยที่ออกจากระบบของชุดการทดลองที่ 1..... | 153 |
| ตารางที่ ข.1 | อุณหภูมิของชุดการทดลองที่ 2..... | 154 |
| ตารางที่ ข.2 | ไออาร์พีของชุดการทดลองที่ 2..... | 155 |
| ตารางที่ ข.3 | พีเอชของชุดการทดลองที่ 2..... | 156 |
| ตารางที่ ข.4 | สภาพต่างทั้งหมดของชุดการทดลองที่ 2..... | 157 |
| ตารางที่ ข.5 | กรดไขมันระเหยของชุดการทดลองที่ 2..... | 158 |
| ตารางที่ ข.6 | ซีโอดีของชุดการทดลองที่ 2..... | 159 |
| ตารางที่ ข.7 | ไนเตรทของชุดการทดลองที่ 2..... | 160 |
| ตารางที่ ข.8 | คลอไรด์ของชุดการทดลองที่ 2..... | 161 |
| ตารางที่ ข.9 | ก๊าซชีวภาพของชุดการทดลองที่ 2..... | 161 |
| ตารางที่ ข.10 | ของแข็งแขวนลอยที่ออกจากระบบของชุดการทดลองที่ 2..... | 162 |
| ตารางที่ ค.1 | อุณหภูมิของชุดการทดลองที่ 3..... | 163 |
| ตารางที่ ค.2 | ไออาร์พีของชุดการทดลองที่ 3..... | 164 |
| ตารางที่ ค.3 | พีเอชของชุดการทดลองที่ 3..... | 165 |
| ตารางที่ ค.4 | สภาพต่างทั้งหมดของชุดการทดลองที่ 3..... | 166 |

| | หน้า |
|---------------|--|
| ตารางที่ ค.5 | กรดไขมันระเหยของชุดการทดลองที่ 3..... 167 |
| ตารางที่ ค.6 | ซีโอดีของชุดการทดลองที่ 3..... 168 |
| ตารางที่ ค.7 | ไนเตรทของชุดการทดลองที่ 3..... 169 |
| ตารางที่ ค.8 | ไนไตรท์ของชุดการทดลองที่ 3..... 170 |
| ตารางที่ ค.9 | ก๊าซชีวภาพของชุดการทดลองที่ 3..... 171 |
| ตารางที่ ค.10 | ของแข็งแขวนลอยที่ออกจากระบบของชุดการทดลองที่ 3..... 172 |
| ตารางที่ ง.1 | อุณหภูมิของชุดการทดลองที่ 4..... 173 |
| ตารางที่ ง.2 | ไออาร์พีของชุดการทดลองที่ 4..... 174 |
| ตารางที่ ง.3 | พีเอชของชุดการทดลองที่ 4..... 175 |
| ตารางที่ ง.4 | สภาพต่างทั้งหมดของชุดการทดลองที่ 4..... 176 |
| ตารางที่ ง.5 | กรดไขมันระเหยของชุดการทดลองที่ 4..... 177 |
| ตารางที่ ง.6 | ซีโอดีของชุดการทดลองที่ 4..... 178 |
| ตารางที่ ง.7 | ไนเตรทของชุดการทดลองที่ 4..... 179 |
| ตารางที่ ง.8 | ไนไตรท์ของชุดการทดลองที่ 4..... 180 |
| ตารางที่ ง.9 | ซัลเฟตของชุดการทดลองที่ 4..... 181 |
| ตารางที่ ง.10 | ซัลไฟด์ของชุดการทดลองที่ 4..... 182 |
| ตารางที่ ง.11 | ก๊าซชีวภาพของชุดการทดลองที่ 4..... 183 |
| ตารางที่ ง.12 | ของแข็งแขวนลอยที่ออกจากระบบของชุดการทดลองที่ 4..... 184 |
| ตารางที่ จ.1 | สัดส่วนของก๊าซแต่ละชนิดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatography..... 185 |
| ตารางที่ จ.2 | ค่าคงที่ K_n ของก๊าซต่างๆ..... 193 |

สารบัญรูป

หน้า

| | | |
|-------------|--|----|
| รูปที่ 2.1 | ปฏิกริยารีดอกซีในการบำบัดน้ำเสีย..... | 3 |
| รูปที่ 2.2 | ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน..... | 5 |
| รูปที่ 2.3 | รูปร่างของเซลล์ของแบคทีเรียสร้างมีเทน..... | 10 |
| รูปที่ 2.4 | ส่วนประกอบของระบบยูเอเอสบี..... | 12 |
| รูปที่ 2.5 | โครงสร้างของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบยูเอเอสบีที่บำบัดน้ำเสียกลูโคส..... | 15 |
| รูปที่ 2.6 | โครงสร้างและความหนาของแบคทีเรียในน้ำเสียประเภทคาร์โบไฮเดรต..... | 16 |
| รูปที่ 2.7 | บทบาทของประจุไฟฟ้าและ ECP ที่ส่งผลต่อการรวมตัวของเซลล์แบคทีเรีย..... | 17 |
| รูปที่ 2.8 | กลไกการเคลื่อนไหวต่างๆ ที่มีผลต่อการรวมตัวของเซลล์แบคทีเรีย..... | 17 |
| รูปที่ 2.9 | กลไกของการรวมตัวระหว่างแบคทีเรีย 2 เซลล์โดยอาศัย CEP จนกลายเป็น เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ | 18 |
| รูปที่ 2.10 | ผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการเจริญเติบโตของเซลล์แบคทีเรีย..... | 20 |
| รูปที่ 2.11 | แผนผังส่วนประกอบของระบบยูเอเอสบีและอีจีเอสบี..... | 25 |
| รูปที่ 2.12 | ผลของพีเอชต่ออัตราดีไนตริฟิเคชันจำเพาะสูงสุด..... | 30 |
| รูปที่ 2.13 | เปรียบเทียบประสิทธิภาพดีไนตริฟิเคชันที่ค่าพีเอชต่างกัน..... | 30 |
| รูปที่ 2.14 | ความสัมพันธ์ระหว่างดีไอกับไออาร์พีเมื่อมีสลัดจ์ตะกอนเร่ง..... | 32 |
| รูปที่ 2.15 | อัตราดีไนตริฟิเคชันจำเพาะกับไออาร์พี โดยใช้สารอาหารต่างกัน..... | 32 |
| รูปที่ 2.16 | อัตราดีไนตริฟิเคชันจำเพาะที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อใช้สารอาหารต่างกัน..... | 33 |
| รูปที่ 2.17 | ผลของพีเอชที่มีต่อการละลายน้ำของซัลไฟด์..... | 40 |
| รูปที่ 3.1 | แบบจำลองถึงปฏิกรณอีจีเอสบี..... | 61 |
| รูปที่ 3.2 | ชุดดักก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์..... | 62 |
| รูปที่ 3.3 | ขั้นตอนการทำงานของระบบอีจีเอสบี..... | 63 |
| รูปที่ 3.5 | รายละเอียดของจุดเก็บตัวอย่าง..... | 64 |
| รูปที่ 4.1 | อุณหภูมิตลอดการทดลองของทุกชุดการทดลอง..... | 70 |
| รูปที่ 4.2 | ไออาร์พีตลอดการทดลองของทุกชุดการทดลอง..... | 73 |
| รูปที่ 4.3 | พีเอชตลอดการทดลองของทุกชุดการทดลอง..... | 75 |
| รูปที่ 4.4 | สภาพต่างทั้งหมดตลอดการทดลองของทุกชุดการทดลอง..... | 78 |
| รูปที่ 4.5 | กรดไขมันระเหยตลอดการทดลองของทุกชุดการทดลอง..... | 83 |
| รูปที่ 4.6 | ซีไอดีและประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีตลอดการทดลองของชุดการทดลองที่ 1 ที่มีสารรบกวนประเภทซัลเฟตและชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน..... | 87 |
| รูปที่ 4.7 | ซีไอดีและประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีตลอดการทดลองของชุดการทดลองที่ 2 ที่มีสารรบกวนประเภทคลอไรด์และชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน..... | 88 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| รูปที่ 4.8 | ซีไอดีและประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีตลอดการทดลองของชุดการทดลองที่ 3 ที่มีสารรบกวนประเภทไนไตรท์และชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน..... | 89 |
| รูปที่ 4.9 | ไนเตรทและประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทตลอดการทดลองของชุดการทดลองที่ 1 ที่มีสารรบกวนประเภทซัลเฟตและชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน..... | 93 |
| รูปที่ 4.10 | ไนเตรทและประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทตลอดการทดลองของชุดการทดลองที่ 2 ที่มีสารรบกวนประเภทคลอไรด์และชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน..... | 94 |
| รูปที่ 4.11 | ไนเตรทและประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทตลอดการทดลองของชุดการทดลองที่ 3 ที่มีสารรบกวนประเภทไนไตรท์และชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน..... | 95 |
| รูปที่ 4.12 | ซัลเฟตและประสิทธิภาพในการกำจัดตลอดการทดลองของชุดการทดลองที่ 1 ที่มีสารรบกวนประเภทซัลเฟตและชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน..... | 99 |
| รูปที่ 4.13 | ซัลไฟด์ในน้ำออกและในชุดดักก๊าซของชุดการทดลองที่ 1 ที่มีสารรบกวนประเภท ซัลเฟตและชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน..... | 101 |
| รูปที่ 4.14 | ปริมาณคลอไรด์ตลอดการทดลองของชุดการทดลองที่ 2..... | 103 |
| รูปที่ 4.15 | ไนไตรท์และประสิทธิภาพในการกำจัดตลอดการทดลองของชุดการทดลองที่ 3 ที่มีสารรบกวนประเภทไนไตรท์..... | 104 |
| รูปที่ 4.16 | ปริมาณก๊าซชีวภาพของทุกชุดการทดลอง..... | 107 |
| รูปที่ 4.17 | ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำออกของทุกชุดการทดลอง..... | 111 |
| รูปที่ 4.18 | ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ จากถังปฏิกรณ์ของชุดการทดลองที่ 1 ที่มีซัลเฟต เมื่อสิ้นสุดการทดลอง..... | 121 |
| รูปที่ 4.19 | ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ จากถังปฏิกรณ์ของชุดการทดลองที่ 2 ที่มีคลอไรด์ เมื่อสิ้นสุดการทดลอง..... | 122 |
| รูปที่ 4.20 | ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ จากถังปฏิกรณ์ของชุดการทดลองที่ 3 ที่มีไนไตรท์ เมื่อสิ้นสุดการทดลอง..... | 123 |
| รูปที่ 4.21 | ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ จากถังปฏิกรณ์ของชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน เมื่อสิ้นสุดการทดลอง..... | 124 |
| รูปที่ 4.22 | เม็ดตะกอนแบคทีเรียของทุกชุดการทดลองเมื่อสิ้นสุดการทดลอง..... | 126 |
| รูปที่ 4.23 | ขนาดเม็ดตะกอนของทุกชุดการทดลอง..... | 126 |
| รูปที่ 4.24 | ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีของทุกชุดการทดลอง..... | 128 |
| รูปที่ 4.25 | ประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทของทุกชุดการทดลอง..... | 129 |
| รูปที่ 4.26 | ปริมาตรก๊าซเฉลี่ยของทุกชุดการทดลอง..... | 133 |
| รูปที่ 4.27 | เปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนของทุกชุดการทดลอง..... | 133 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบัน ประเทศไทยประสบปัญหาเกี่ยวกับมลภาวะทางน้ำ เนื่องจากการพัฒนาทางเศรษฐกิจที่ส่งเสริมการผลิตทั้งในภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม ทำให้มีปริมาณน้ำเสียเข้าสู่แหล่งน้ำสาธารณะซึ่งก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม แม้จะมีการติดตั้งระบบบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมแล้วก็ตาม แต่ก็ยังประสบปัญหาในการบำบัด เนื่องจากน้ำเสียในปัจจุบันมีส่วนประกอบซับซ้อนมากขึ้น ทำให้ต้องมีการศึกษาและวิจัยเพื่อพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

จากการวิจัยของภูคำ พิมจักร (2546) เรื่องการใช้กระบวนการยูเอเอสบี – แอนนออกซิก - แอโรบิกในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเค็มและไนโตรเจนสูงจากน้ำเสียสะพานปลา โดยการใช้ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีในการบำบัดสารอินทรีย์ และใช้ถังปฏิกรณ์แอนนออกซิกร่วมกับถังเอสบำบัดไนโตรเจนในน้ำเสีย พบว่า น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากระบบแอนนออกซิกและแอโรบิก มีปริมาณไนเตรทและไนไตรท์สูงกว่าน้ำเสียก่อนการบำบัด และยังพบอีกว่าระบบยังไม่สามารถบำบัดไนเตรทและไนไตรท์ให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ ส่วนการศึกษาข้อมูลจากโรงงานอุตสาหกรรมปลากระป๋อง โรงงานอาหารทะเลและโรงงานสะพานปลา พบว่า มีปัญหาในการบำบัดน้ำเสียที่มีส่วนประกอบของสารอินทรีย์ ไนโตรเจน ไนเตรท คลอไรด์ ซัลเฟต และไนไตรท์ จึงทำให้เกิดแนวคิดในการทดลองออกแบบระบบอีจีเอสบีเพื่อกำจัดสารอินทรีย์และไนเตรท โดยมีสารรบกวนไนทำปฏิกิริยา 3 ชนิด คือไนไตรท์ คลอไรด์ และซัลเฟต เพื่อดูความสามารถของระบบอีจีเอสบีในการบำบัดน้ำเสีย

ระบบอีจีเอสบี (EGSB) เป็นระบบทางชีวภาพแบบไร้อากาศ ที่ถูกแนะนำให้มาใช้งานร่วมกับระบบอื่น เพื่อบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ หรือแอมโมเนีย-ไนโตรเจนสูง โดยเวียนน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วแต่ยังมีความเข้มข้นของไนโตรเจนสูงเข้าสู่ระบบอีจีเอสบีอีกครั้งและใช้ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันที่เกิดในถังปฏิกรณ์กำจัดไนเตรท-ไนโตรเจน และระบบอีจีเอสบีได้มีการปรับปรุงประสิทธิภาพในการสัมผัสกันระหว่างอินทรีย์ในน้ำเสียกับจุลินทรีย์ให้ดีขึ้น โดยการทำให้เกิดการขยายตัวของชั้นสลัดจ์และการติดตั้งระบบหมุนเวียนน้ำทิ้งเพื่อให้เกิดการผสมกันอย่างทั่วถึง ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวนี้จึงทำให้ระบบอีจีเอสบี เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์และไนโตรเจนสูงที่มีประสิทธิภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาระดับความเข้มข้นของอิออนของซัลเฟต คลอไรด์ และไนไตรท์ ที่มีผลต่อระดับการกำจัดไนเตรทในปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันของระบบอีจีเอสบี
- 1.2.2 เพื่อศึกษาระดับความเข้มข้นของอิออนของซัลเฟต คลอไรด์ และไนไตรท์ ที่มีผลต่อการกำจัดซีโอดีและการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสีย โดยวิธีการบำบัดน้ำเสียแบบแอนแอโรบิคด้วยระบบอีจีเอสบี

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นของผลการกำจัดไนเตรทในน้ำเสียสังเคราะห์โดยมีมลสารอิออนลบได้แก่ซัลเฟต คลอไรด์และไนไตรท์ เป็นสารรบกวนในกระบวนการกำจัดไนเตรทของปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันและผลกระทบต่อการใช้ไนโตรเจนในน้ำเสียด้วยระบบอีจีเอสบี โดยงานวิจัยทั้งหมดนี้เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการและใช้น้ำตาลทรายเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ ใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์จากโรงงานผลิตน้ำอัดลมเบบี๋ จังหวัดปทุมธานี และใช้สารเคมีเป็นสารรบกวนโดยสารรบกวนประเภทซัลเฟตใช้โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ประเภทคลอไรด์ใช้โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และประเภทไนไตรท์ใช้โพแทสเซียมไนไตรท์ (KNO_2) โดยแปรค่าอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรทต่อความเข้มข้นของซัลเฟต คลอไรด์และไนไตรท์ และทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการวิจัยภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาแนวทางที่เหมาะสมของการบำบัดน้ำเสียที่มีส่วนประกอบของสารอินทรีย์ ไนเตรท ซัลเฟต คลอไรด์และไนไตรท์ที่เกิดจากโรงงานปลากระป๋อง โรงงานอาหารทะเล หรือน้ำเสียจากสะพานปลา ด้วยระบบอีจีเอสบี

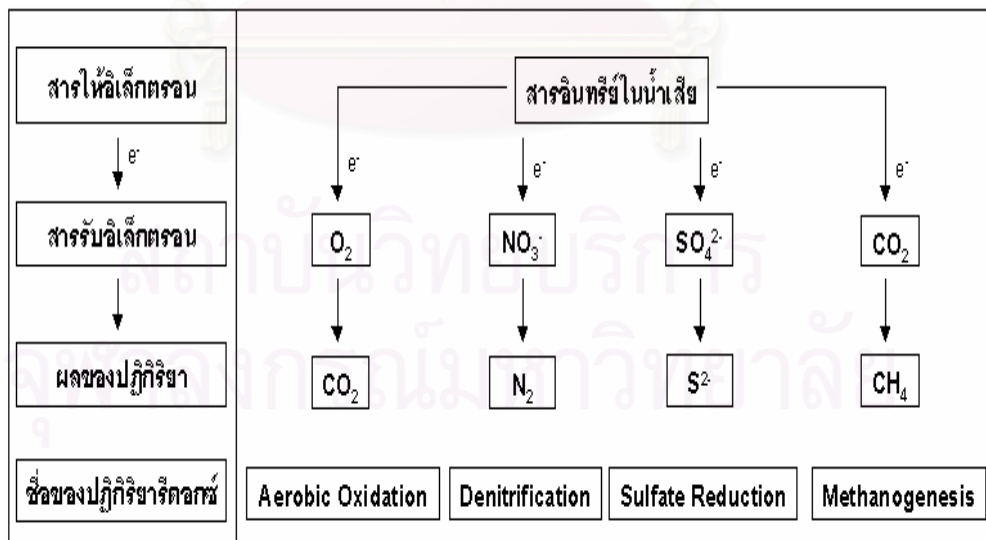
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กลไกพื้นฐานในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย

กลไกพื้นฐานในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย คือ ปฏิกิริยาเคมีที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างสารให้อิเล็กตรอน (electron donor) และสารรับอิเล็กตรอน (electron acceptor) หรือที่เรียกว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (รีดอกซ์)

สารให้อิเล็กตรอนในน้ำเสียเป็นสารอินทรีย์หรือมลสารในน้ำเสีย ซึ่งเป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานให้กับจุลชีพ ในขณะที่สารรับอิเล็กตรอนจะมีหลายชนิด จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นผลที่ได้จากปฏิกิริยาก็จะแตกต่างกันออกไปด้วย เมื่อพิจารณาชนิดของสารรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย สามารถจำแนกกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นได้ดังรูปที่ 2.1 และตารางที่ 2.1 ตัวอย่างเช่น ถ้าสารรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายเป็นออกซิเจน ก็เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่าการออกซิไดซ์แบบใช้ออกซิเจน (aerobic oxidation) ถ้าสารรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายเป็นสารอินทรีย์ ก็เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่า การหมัก (fermentation) และถ้าใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนจะเรียกว่า ปฏิกิริยาการผลิตมีเทน (methanogenesis) เป็นต้น



รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยารีดอกซ์ในการบำบัดน้ำเสีย (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2542)

ตารางที่ 2.1 ปฏิกริยารีดอกซ์ในการบำบัดน้ำเสีย(มันสิน ตันพูลเวศม์, 2542)

| ลำดับที่ | สารรับอิเล็กตรอน | ผลของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น | ชื่อของปฏิกิริยา |
|----------|------------------|-------------------------------|-------------------|
| 1 | ออกซิเจน | คาร์บอนไดออกไซด์ | Aerobic Oxidation |
| 2 | ไนเตรท | ไนโตรเจน | Denitrification |
| 3 | ซัลเฟต | ซัลไฟด์ | Sulfate Reduction |
| 4 | คาร์บอนไดออกไซด์ | มีเทน | Methanogenesis |
| 5 | สารอินทรีย์ | สารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลเล็กลง | Fermentation |

ในกรณีที่มีสารรับอิเล็กตรอนหลายชนิดในน้ำเสียหนึ่ง ๆ เมื่อพิจารณาเฉพาะปัจจัยทางเทอร์โมไดนามิกส์เป็นหลักแล้วแล้ว จะสามารถเรียงลำดับปฏิกิริยาตามปริมาณพลังงานที่ได้รับจากมากไปน้อย ตามชนิดของสารรับอิเล็กตรอนในกรณีที่ย่อยสลายสารอินทรีย์เดียวกันได้ดังนี้คือ ออกซิเจน ไนเตรท ซัลเฟต และคาร์บอนไดออกไซด์ตามลำดับ และโอกาสที่ปฏิกิริยาต่างๆ จะเกิดขึ้น ก็จะเป็นไปตามลำดับดังกล่าวข้างต้นด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตามจะต้องพิจารณาปัจจัยด้านอื่นประกอบด้วย ปัจจัยทางด้านพลศาสตร์ ปัจจัยทางด้านสภาวะแวดล้อมต่างๆ เช่น ช่วงอุณหภูมิ ค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลชีพที่มีบทบาทสำคัญเป็นต้น ซึ่งปัจจัยที่สำคัญอื่นๆ จึงจะได้ภาพรวมที่แท้จริงของการเกิดปฏิกิริยาย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลชีพในการบำบัดน้ำเสีย ทั้งนี้ปัจจัยทางด้านเทอร์โมไดนามิกส์ เป็นแนวทางที่สำคัญในการพิจารณา โอกาสในการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ในเบื้องต้นด้วย

2.2 กลไกการผลิตมีเทน (กลไกการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน)

ภายใต้สภาวะไร้อากาศที่มีปริมาณซัลเฟตหรือไนเตรทเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีเลย ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียจะได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นก๊าซมีเทน โดยผ่านกระบวนการย่อยสลายที่ประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

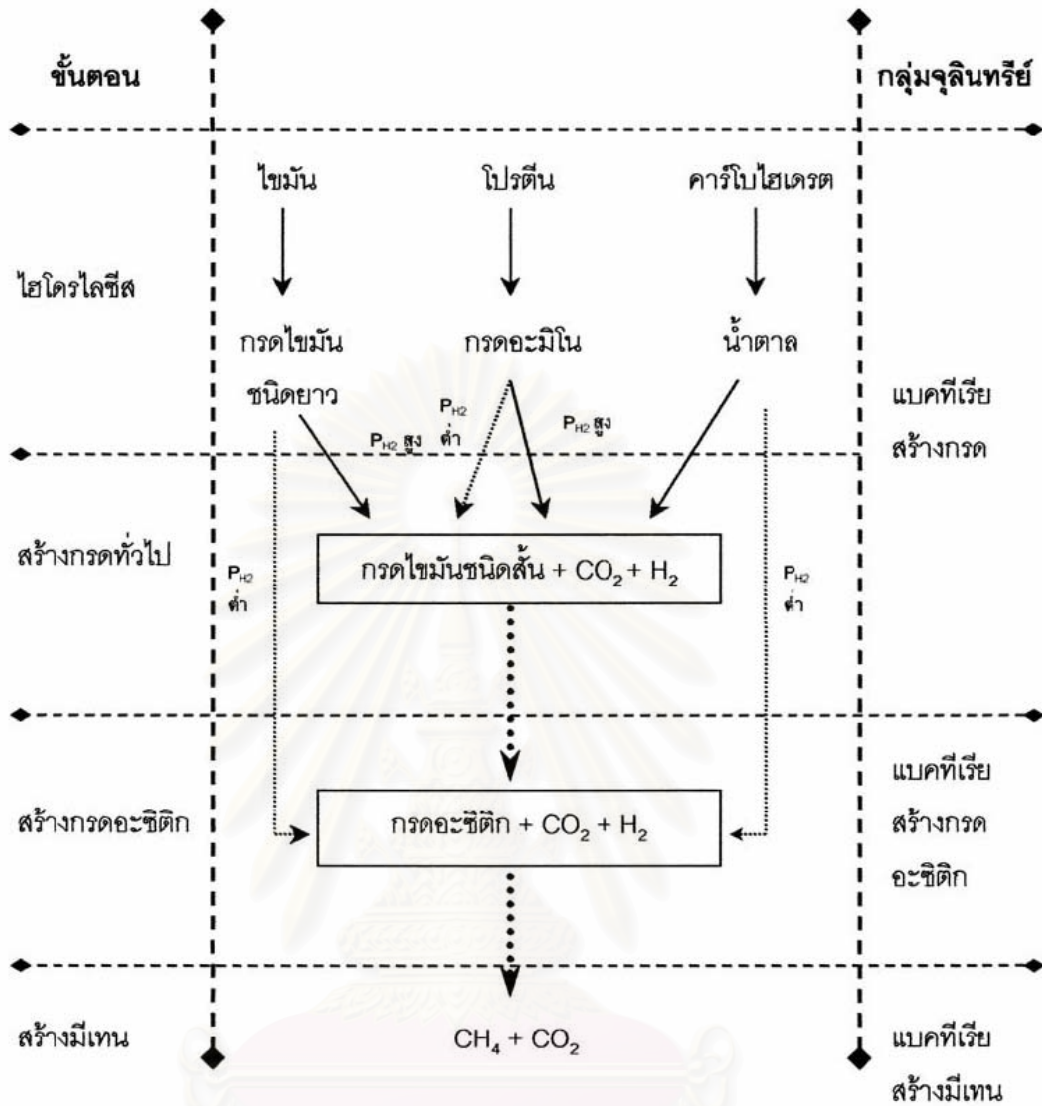
ขั้นที่ 1 ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

ขั้นที่ 2 การสร้างกรดไขมันระเหย (Acidogenesis)

ขั้นที่ 3 การสร้างกรดอะซิติก (Acetogenesis)

ขั้นที่ 4 การสร้างมีเทน (Methanogenesis)

ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย โดยกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Sam-soon และคณะ, 1987 อ้างถึงใน ภูคำ พิมจักร, 2546)

ขั้นที่ 1 ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

กระบวนการนี้อาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า กระบวนการแตกสลายพอลิเมอร์ (Polymer Break-down) ในขั้นตอนนี้สารประกอบอินทรีย์ประเภทซับซ้อนทั้งที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมันจะถูกทำให้ละลายน้ำ โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งใช้เอนไซม์ที่ขับออกมาสู่ภายนอกเซลล์ของแบคทีเรียเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลของปฏิกิริยาจะทำให้ได้สารประกอบอินทรีย์ที่ไม่ซับซ้อนและละลายน้ำได้ เช่น น้ำตาลกลูโคส กรดอะมิโน กรดไขมัน ขึ้นอยู่กับสารตั้งต้นของปฏิกิริยาการทำงานของเอนไซม์จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ความเข้มข้นของเอนไซม์ อุณหภูมิ พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเอนไซม์กับสารอินทรีย์ เป็นต้น ดังนั้นกระบวนการย่อยสลายสารในแต่ละชนิดจึงใช้เวลาแตกต่างกัน

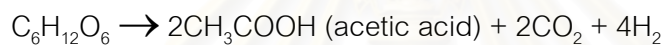
ขั้นที่ 2 การสร้างกรดไขมันระเหย (Acidogenesis)

ผลผลิตจากขั้นที่ 1 จะได้สารประกอบอินทรีย์โมเลกุลเล็ก เช่น กรดอะมิโน น้ำตาลและกรดไขมัน เป็นต้น แล้วแต่ชนิดของสารอินทรีย์เริ่มต้น ซึ่งผลผลิตดังกล่าวจะถูกแบคทีเรียที่สร้างกรดดูดซึมเข้าไปภายในเซลล์ เพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงาน โดยผ่านกระบวนการหมัก (Fermentation) ภายในเซลล์และเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหย เช่น กรดอะซิติก กรดไพรูวิก และ กรดบิวทริก เป็นต้น ผลผลิตที่ได้จะขึ้นอยู่กับ

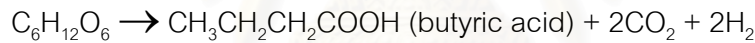
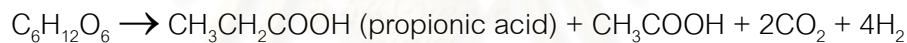
- ก) ชนิดของสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลาย
- ข) ความดันพาหะของไฮโดรเจนในขณะนั้น

ตัวอย่าง เช่น การย่อยสลายน้ำตาลเป็นกรดอะซิติกโดยผ่านวิถีชีวเคมีที่เรียกว่า Emden-Meyethof pathway สำหรับผลผลิตที่มีระดับความดันพาหะของไฮโดรเจนเป็นปัจจัยด้วยนั้น สามารถแสดงได้ตามสมการในแต่ละกรณี ดังนี้

ความดันพาหะของไฮโดรเจนต่ำ



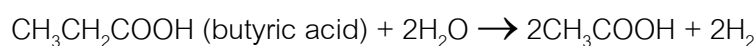
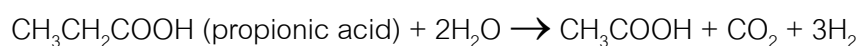
ความดันพาหะของไฮโดรเจนสูง



กรดไขมันชนิดยาวจะเปลี่ยนเป็นกรดอะซิติกและไฮโดรเจน ภายใต้ความดันพาหะของไฮโดรเจนต่ำ และเปลี่ยนเป็นกรดไพรูวิกและบิวทริก ภายใต้สภาวะความดันพาหะของไฮโดรเจนสูง

ขั้นที่ 3 การสร้างกรดอะซิติก (Acetogenesis)

กรดไขมันระเหยที่ผลิตขึ้นในขั้นที่ 2 จะเป็นอาหารให้แบคทีเรียกลุ่มที่ทำหน้าที่สร้างมีเทนต่อไป แต่เนื่องจากแบคทีเรียที่สร้างมีเทนไม่สามารถใช้กรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม (เช่น กรดไพรูวิกหรือบิวทริก) เป็นสารอาหารได้ จึงต้องอาศัยแบคทีเรียอะซิโตเจนิก (แบคทีเรียสร้างกรดอะซิติก) ทำการย่อยกรดไขมันที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมให้กลายเป็นกรดอะซิติกดังสมการข้างล่าง จากนั้นแบคทีเรียสร้างมีเทนนำกรดอะซิติกไปใช้งานต่อไปได้



โดยกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นภายใต้สภาวะความดันพาหะของไฮโดรเจนต่ำเท่านั้น กรดไขมันระเหยไม่สามารถย่อยสลายกลายเป็นกรดอะซิติกภายใต้สภาวะความดันพาหะของ

ไฮโดรเจนสูงได้ และแบคทีเรียชนิดนี้จะมีส่วนช่วยไม่ให้เกิดการสะสมตัวของกรดไพรูวิกและบิวทิริกในถังปฏิกรณ์ ซึ่งเป็นเหตุให้ค่าพีเอชลดต่ำจนยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียสร้างมีเทนได้

ขั้นที่ 4 การสร้างมีเทน (Methanogenesis)

ขั้นตอนการสร้างมีเทนนี้เป็นขั้นตอนสุดท้าย ที่มีความสำคัญต่อการเปลี่ยนสารอินทรีย์ ก๊าซไฮโดรเจนให้ไปอยู่ในรูปของก๊าซมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยบทบาทของแบคทีเรียผลิตมีเทน (Methane Producing Bacteria, MPB หรือ Methanogen) จากปฏิกิริยาการสร้างมีเทนที่เป็นปฏิกิริยาไร้ออกซิเจนชนิดเด็ดขาด (Obligate anaerobic reaction) ที่มีความเฉพาะเจาะจงในชนิดสารอาหารที่จะสามารถนำมาใช้ได้ โดยชนิดของสารอาหารได้ถูกแจกแจงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 กลุ่มสารอาหารที่ใช้ในปฏิกิริยาการสร้างมีเทน

(Madigan และ คณະ, 1997 อ้างอิงถึงใน มั่นสิน ตันทุลเวศน์, 2542)

| สับสเตรทประเภทคาร์บอนไดออกไซด์ | |
|---|--|
| คาร์บอนไดออกไซด์ | |
| $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ | ; $\Delta G_0' = -131 \text{ kJ/reaction}$ |
| ฟอร์มเมต, HCOO^- | |
| $4\text{HCOO}^- + 4\text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ | ; $\Delta G_0' = -145 \text{ kJ/reaction}$ |
| คาร์บอนมอนอกไซด์, CO | |
| $4\text{CO} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{CO}_2$ | ; $\Delta G_0' = -210 \text{ kJ/reaction}$ |
| สับสเตรทประเภทเมทิล | |
| Methanol, CH_3OH | |
| $4\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow 3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ | ; $\Delta G_0' = -319 \text{ kJ/reaction}$ |
| Methylamine, CH_3NH_2 | |
| $4\text{CH}_3\text{NH}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 4\text{NH}_3$ | ; $\Delta G_0' = -230 \text{ kJ/reaction}$ |
| Dimethylamine, $(\text{CH}_3)_2\text{NH}$ | |
| $(\text{CH}_3)_2\text{NH} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 2\text{NH}_3$ | ; $\Delta G_0' = -230$ |
| Trimethylamine, $(\text{CH}_3)_3\text{N}$ | |
| $4(\text{CH}_3)_3\text{N} + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 9\text{CH}_4 + 3\text{CO}_2 + 4\text{NH}_3$ | ; $\Delta G_0' = -666$ |
| Methylmercaptan, CH_3SH | |
| Dimethylsulfide, $(\text{CH}_3)_2\text{S}$ | |
| อะซิเตท | |
| Acetate, CH_3COO^- | |
| $\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$ | ; $\Delta G_0' = -31 \text{ kJ/reaction}$ |

2.2.1 ประเภทของแบคทีเรียในกระบวนการย่อยแบบไม่ใช้ออกาศ

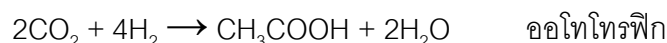
ก. แบคทีเรียสร้างกรดไขมันระเหย (Acidogenic Bacteria)

ในขั้นตอนการสร้างกรดไขมันระเหยของกระบวนการไม่ใช้ออกาศ กรดจะผลิตขึ้นโดยแบคทีเรียไม่ใช้ออกาศชนิดเด็ดขาด (Obligate Anaerobes) มากกว่า ชนิดแฟคัลเททีฟ (Facultative) ซึ่งแบคทีเรียไม่ใช้ออกาศชนิดเด็ดขาดที่มีบทบาทในการสร้างกรดไขมันระเหย ก็คือกลุ่ม Clostridium ซึ่งมีเมตาบอลิซึมหลายแบบ จึงสามารถใช้สารอาหารทั้งที่เป็นพวกแป้งหรือโปรตีนได้ ผลปฏิกิริยาที่ได้มีหลากหลายชนิดเช่น กรดบิวทิริก กรดอะซิติก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน เอทานอล บิวทานอล อะซีโตน เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีแบคทีเรียในกลุ่ม Propionibacterium ที่ผลิตกรดไพรูวอิก (Propionic Acid) และกรดอะซิติกจากกรดแลคติก (Fenchel and Finlay 1995, Madigan และคณะ 1997 อ้างถึงใน มั่นสิน ตันกุลเวศน์, 2542)

ข. แบคทีเรียสร้างกรดอะซิติก (Acetogenic Bacteria)

เมื่อผลผลิตจากแบคทีเรียสร้างกรดมีหลายชนิดดังที่กล่าวข้างต้น และบางชนิดยังเป็นสารโมเลกุลใหญ่จนทำให้แบคทีเรียสร้างมีเทนไม่สามารถนำไปใช้เป็นสารอาหารได้ จึงต้องมีการเปลี่ยนสารเหล่านั้นให้กลายเป็นสารอาหารอย่างง่ายสำหรับแบคทีเรียที่สร้างมีเทน เพื่อให้สามารถดูดซึมเข้าไปใช้ในเซลล์ได้ แบคทีเรียที่ย่อยกรดไขมันระเหยโมเลกุลใหญ่ ให้กลายเป็นกรดอะซิติก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ได้นั้น สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ดังนี้

- แบคทีเรียผลิตอะซิเตทอย่างเดียว (Homoacetogenic Bacteria) แบคทีเรียชนิดนี้เป็นแบคทีเรียที่ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารรับอิเล็กตรอน และผลิตกรดอะซิติกขึ้นมา (เป็นกระบวนการหายใจแบบไม่ใช้ออกาศ) โดยผ่านวิถีชีวเคมีที่เรียกว่า Acetyl-CoA ตัวอย่างของแบคทีเรียชนิดนี้ ได้แก่ Acetobacterium woodii และ Clostridium aceticum ซึ่งสามารถเจริญเติบโตได้ทั้งในแบบออโทโทรฟิก (autotrophic) และแบบเฮเทโรโทรฟิก (Heterotrophic) โดยแบบออโทโทรฟิก จะใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารรับอิเล็กตรอนและแหล่งคาร์บอน และใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นสารให้อิเล็กตรอน เพื่อเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์เป็นกรดอะซิติก ส่วนแบบเฮเทโรโทรฟิก จะได้โดยการหมักน้ำตาล ตามสมการที่แสดงข้างล่าง



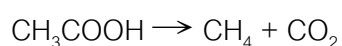
แบคทีเรียที่อยู่ในจีนัส Clostridium พบอยู่ทั้งในกลุ่มแบคทีเรียที่สร้างกรดไขมันระเหยทั่วไป (Acidogenic Bacteria) และกลุ่มแบคทีเรียที่สร้างกรดอะซิติก (Acetogenic Bacteria) แบคทีเรียกลุ่มนี้จึงมีเมตาบอลิซึมหลายแบบ

- แบคทีเรียสร้างอะซิเตทที่ผลิตไฮโดรเจนได้ (H_2 -Producing Acetogenic Bacteria) แบคทีเรียชนิดนี้จะใช้กรดไขมันระเหย (ที่ไม่ใช้กรดอะซิติก) หรือแอลกอฮอล์เป็นสารอาหาร แล้วสร้างกรดอะซิติกและก๊าซไฮโดรเจนซึ่งเป็นสารอาหารของแบคทีเรียสร้างมีเทนขึ้นมา ดังนั้นแบคทีเรียชนิดนี้จึงมีบทบาทสำคัญ เพราะเป็นตัวเชื่อมระหว่างแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกกับแบคทีเรียสร้างมีเทน อย่างไรก็ตามแบคทีเรียชนิดนี้จะไม่เจริญเติบโตเมื่ออยู่ตามลำพัง ทั้งนี้เพราะเมื่อมีการสะสมของก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตขึ้นมา (ทำให้มีความดันพาหะของไฮโดรเจนสูง) ปฏิกิริยาสร้างกรดอะซิติกจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้ เนื่องจากแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกจะหยุดการเจริญเติบโต ดังนั้นจะต้องมีการกำจัดไฮโดรเจนก่อนเพื่อให้แบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกเจริญเติบโตได้ แบคทีเรียสร้างมีเทนจึงเข้ามามีบทบาทในส่วนนี้ เพราะแบคทีเรียสร้างมีเทนสามารถบริโภคไฮโดรเจนได้ การอยู่ร่วมกันระหว่างแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกและแบคทีเรียสร้างมีเทนจะให้ประโยชน์ซึ่งกันและกัน ซึ่งความสัมพันธ์นี้จะถูกเรียกว่า Syntrophy ในขณะเดียวกัน แบคทีเรียทั้งสองก็ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ถ้าอยู่เพียงลำพัง กล่าวคือ แบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกจะสร้างอาหารให้แก่แบคทีเรียที่สร้างมีเทน ส่วนแบคทีเรียที่สร้างมีเทนก็ช่วยทำลายก๊าซไฮโดรเจนให้กับแบคทีเรียที่สร้างกรดอะซิติก แบคทีเรียชนิดนี้ อยู่ในกลุ่ม Syntrophomonas และกลุ่ม Syntrophobacter แบคทีเรีย Syntrophomonas wolfei สามารถย่อยกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนตั้งแต่ 4 ถึง 8 อะตอม ให้กลายเป็นกรดอะซิติกไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ส่วนแบคทีเรีย Syntrophobacter wolinii ก็สามารถย่อยกรดไพรูวอิกให้กลายเป็นกรดอะซิติก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์เช่นกัน

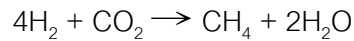
ค. แบคทีเรียสร้างมีเทน

แบคทีเรียสร้างมีเทนเป็นแบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจนได้แต่ขาด ไม่สามารถทนต่อออกซิเจนได้แม้จะมีปริมาณเพียงเล็กน้อย จัดอยู่ในกลุ่มของแบคทีเรียชนิด เคโมเฮเทโรโทรฟ ดำรงชีวิตอยู่และเจริญเติบโตโดยได้รับพลังงานจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ประมาณ 10 ชนิดเท่านั้น สารอาหารชนิดอื่นนอกเหนือจากนี้ ไม่ว่าจะเป็นกรดไขมันระเหย เช่น บิวทริก หรือไพรูวอิก (ซึ่งปกติเป็นสารอาหารของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต) แบคทีเรียสร้างมีเทนไม่สามารถนำไปใช้ได้ แบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ชนิด ตามชนิดของสารอาหารที่ใช้ ได้แก่

- เมทาโนเจนที่บริโภคเฉพาะอะซิเตท (Obligate Acetoclastic Methanogen) เป็นแบคทีเรียสร้างมีเทนที่ใช้กรดอะซิติกเป็นแหล่งพลังงาน ตามสมการดังนี้

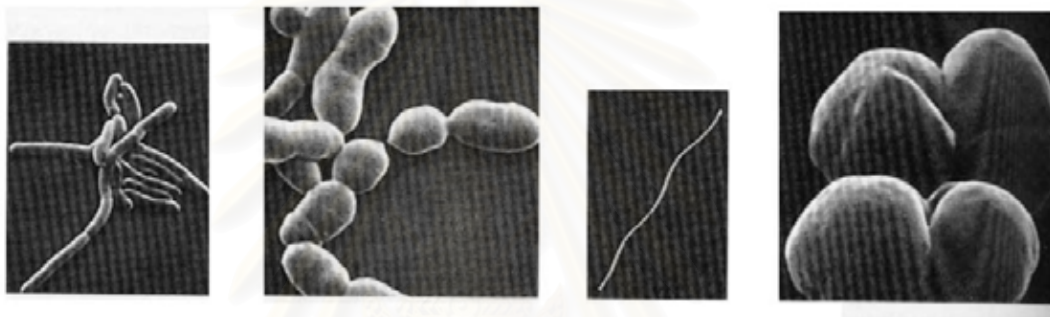


- เมทาโนเจนที่บริโภคเฉพาะไฮโดรเจน (Obligate Hydrogenotrophic Methanogen หรือ Hydrogen Utilizer) เป็นแบคทีเรียที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนในการผลิตก๊าซมีเทนโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน ตามสมการ ดังนี้



นอกจากก๊าซไฮโดรเจนแล้ว แบคทีเรียชนิดนี้ยังสามารถใช้กรดฟอร์มิกเป็นแหล่งอาหารเพียงอย่างเดียวได้ เพราะกรดฟอร์มิกสามารถแตกตัวเป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ได้

- เมทาโนเจนที่บริโภคได้ทั้งไฮโดรเจนและอะซิเตท (Hydrogenotrophic / Acetoclastic Methanogen) แบคทีเรียที่สร้างมีเทนได้ทั้งจากกรดอะซิติกหรือก๊าซไฮโดรเจน แต่ใช้ไฮโดรเจนได้ดีกว่า รูปร่างของเซลล์ของแบคทีเรียสร้างมีเทนแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 รูปร่างของเซลล์ของแบคทีเรียสร้างมีเทน (Madigan และคณะ, 1997 อ้างถึงใน มั่นสิน ตันฑุลเวศน์, 2542)

2.3 ระบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB)

2.3.1 ความเป็นมาของระบบยูเอเอสบี

ระบบยูเอเอสบีเป็นระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ ซึ่งได้มีการพัฒนาขึ้นมาในเวลาไม่นานนัก โดย Lettinga et al, 1980 (อ้างถึงใน พีรพงษ์ ทิพยาทร, 2530) ได้พัฒนาระบบยูเอเอสบี โดยการเลี้ยงจุลินทรีย์ให้เกิดการรวมตัวกันเป็นเม็ดตะกอนที่มีขนาดใหญ่และตกตะกอนได้ดี พร้อมทั้งได้ทำการพัฒนาอุปกรณ์ที่ช่วยในการแยกน้ำเสีย ตะกอนจุลินทรีย์ และก๊าซชีวภาพ เรียกว่า อุปกรณ์แยกสามสถานะ (Gas – solid separator, GSS) ทำให้ระบบยูเอเอสบีสามารถเก็บกักจุลินทรีย์ไว้ในระบบได้ดี ซึ่งระบบนี้จะป้อนน้ำเสียเข้าทางส่วนล่างสุดของถังยูเอเอสบี โดยให้มีทางเข้าหลาย ๆ จุดกระจายตามพื้นที่หน้าตัดของบ่อ ตะกอนจุลินทรีย์ที่รวมตัวกันเป็นเม็ดที่มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากสามารถตกตะกอนได้ดี จะตกตะกอนลงมาบริเวณส่วนล่างสุดของถังยูเอเอสบี ซึ่งบริเวณส่วนล่างนี้จะเรียกว่า ชั้น Sludge Bed ในขณะที่บริเวณเหนือชั้น Sludge Bed ขึ้นไป จะเป็นชั้นตะกอนแขวนลอยที่มีขนาดเล็กตกลงมา ซึ่งเรียกว่า ชั้น Sludge Blanket เป็นชั้นที่ตะกอนมี

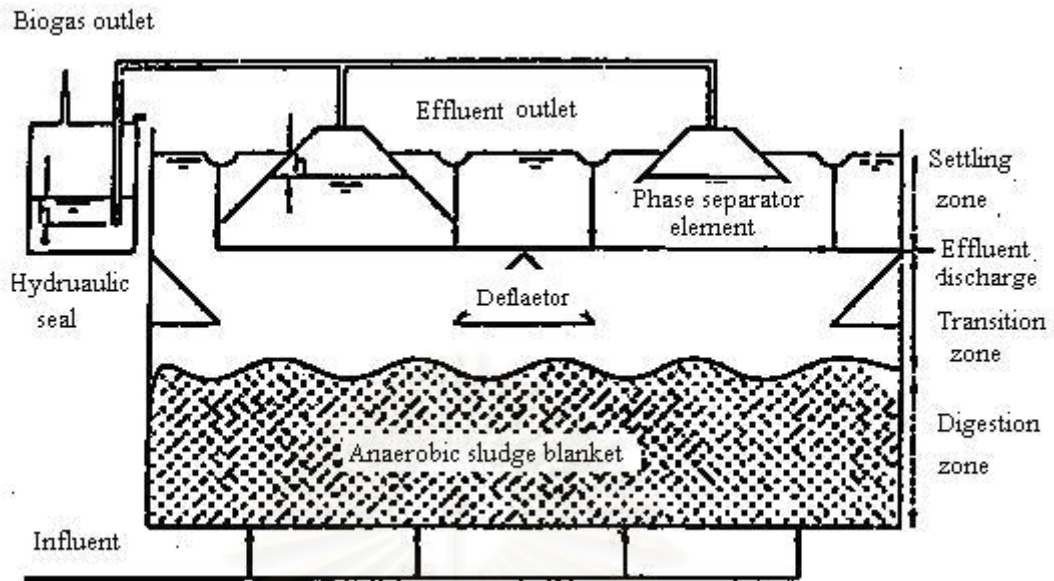
ความสามารถในการตกตะกอนได้น้อยกว่าในชั้น Sludge Bed ส่วนบนของถังยูเอเอสบีจะมีการติดตั้งอุปกรณ์แยกสามสถานะ เพื่อช่วยในการแยกน้ำเสีย ตะกอนจุลินทรีย์ และก๊าซชีวภาพ ทำให้มีการสะสมของตะกอนจุลินทรีย์ที่บริเวณส่วนล่างของถังและมีอายุตะกอนสูง ส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง นอกจากนี้ Heertjes and van der Meer, 1983 (อ้างถึงใน กิตติศักดิ์ ต้นชนะชัย, 2539) ได้กล่าวว่า ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในถังยูเอเอสบีเมื่อลอยตัวขึ้นสู่ส่วนบนของถังจะช่วยให้เกิดการรวมผลที่ดีภายในชั้นสลัดจ์

2.3.2 ลักษณะและการทำงานของระบบยูเอเอสบี

ระบบยูเอเอสบีเป็นระบบบำบัดน้ำเสีย ที่มีการปล่อยน้ำเสียเข้าทางด้านล่างของถังยูเอเอสบี และไหลขึ้นสู่ด้านบนของถังปฏิกรณ์โดยไม่มีสารตัวกลางมาช่วยในการพองมวลจุลินทรีย์ ลักษณะทั่วไปของถังยูเอเอสบีจะเป็นถังรูปทรงสี่เหลี่ยม หรือรูปทรงกระบอกก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

- 1) ส่วนที่เป็นถังหมักและระบบป้อนน้ำเสียที่ส่วนล่างของถังยูเอเอสบี
- 2) ส่วนที่เป็นถังตกตะกอนที่ส่วนบนของถังยูเอเอสบี โดยมีการติดตั้งอุปกรณ์แยกสามสถานะ ซึ่งเป็นส่วนที่ทำหน้าที่แยกน้ำเสีย ตะกอนจุลินทรีย์ และก๊าซชีวภาพ ประกอบด้วยแผ่นกั้นเอียง ทำมุมประมาณ 45 – 60 องศา (Lettinga and Hulshoff Pol, 1986 อ้างถึงใน กิตติศักดิ์ ต้นชนะชัย , 2539)

น้ำเสียจะถูกป้อนเข้าทางส่วนล่างของถังยูเอเอสบี โดยผ่านระบบกระจายน้ำเสีย เพื่อให้การกระจายของน้ำเสียเป็นไปอย่างทั่วถึง เมื่อน้ำเสียไหลผ่านชั้นตะกอนจุลินทรีย์จะเกิดการสัมผัสระหว่างสารอินทรีย์ในน้ำเสียกับจุลินทรีย์ ทำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยจุลินทรีย์ ประกอบกับความเร็วของน้ำที่ไหลขึ้น ทำให้เกิดการลอยตัวของตะกอนจุลินทรีย์ขึ้นสู่ด้านบน เป็นการช่วยให้เกิดการสัมผัสที่ทั่วถึงระหว่างสารอินทรีย์ในน้ำเสียกับจุลินทรีย์ เมื่อน้ำเสียไหลขึ้นสู่ส่วนบนของถัง จะเกิดการแยกน้ำเสีย ตะกอนจุลินทรีย์ และก๊าซชีวภาพ ออกจากกัน ด้วยอุปกรณ์แยกสามสถานะ กล่าวคือ น้ำเสียจะปะทะกับแผ่นกั้น ก๊าซที่เกาะมากับกลุ่มตะกอนจุลินทรีย์จะถูกแยกออก โดยจะลอยตัวขึ้นไปยังส่วนบนผ่านท่อเก็บก๊าซเพื่อลำเลียงก๊าซที่ได้ไปยังอุปกรณ์เก็บก๊าซ น้ำเสียจะถูกแยกออกจากตะกอนจุลินทรีย์และไหลล้นออกไปนอกถังยูเอเอสบี ส่วนเม็ดตะกอนจุลินทรีย์จะถูกดักไว้และตกลงไปยังส่วนล่างของถังยูเอเอสบี โดยส่วนใหญ่แล้ว การที่ระบบล้มเหลวเป็นเพราะไม่สามารถสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่และตกตะกอนได้ดี ที่มากพอเพราะการเลี้ยงตะกอน จุลินทรีย์ให้จับตัวกันเป็นเม็ดเป็นเรื่องยาก และใช้เวลานาน จึงทำให้เกิดการหลุดออกไปของจุลินทรีย์พร้อมกับน้ำทิ้ง



รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบของระบบยูเอเอสบี (Van Haandel และ Lettinga, 1994)

2.3.3 ข้อดีและข้อเสียของระบบยูเอเอสบี

ข้อดี ได้แก่

- 1) สามารถรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้สูงกว่าระบบไม่ใช้อากาศแบบอื่น
- 2) ใช้พลังงานเดินระบบต่ำเพราะไม่มีการเติมอากาศและไม่ใช้เครื่องจักรกล
- 3) ปริมาณสลัดจ์ที่ต้องกำจัดจากระบบน้อยกว่าแบบใช้อากาศ
- 4) ต้องการไนโตรเจนและฟอสฟอรัสต่ำกว่าระบบใช้อากาศ
- 5) การก่อสร้างและควบคุมระบบสามารถกระทำได้ง่ายและมีราคาถูก
- 6) ก๊าซมีเทนที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นพลังงานได้
- 7) สามารถป้องกันมิให้จุลินทรีย์หลุดออกจากระบบได้ดีกว่าระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศแบบอื่น
- 8) มีความเหมาะสมที่จะใช้ในระบบบำบัดทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ และในพื้นที่ชุมชนเขตนอกเมือง
- 9) สามารถหยุดระบบได้เป็นเวลานานโดยไม่มีปัญหา และการเริ่มต้นระบบใหม่สามารถกระทำได้ง่าย ระบบฟื้นตัวได้เร็ว จึงเหมาะกับอุตสาหกรรมที่ทำงานเป็นฤดู
- 10) สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีสารพิษบางอย่างได้ เช่น halogenated solvents

ข้อเสีย ได้แก่

- 1) ใช้เวลาในการเริ่มต้นระบบ (start up) นาน และต้องเลี้ยงตะกอนให้จับตัวกันเป็นเม็ด ระบบจึงจะมีประสิทธิภาพที่ดี
- 2) ต้องควบคุมปริมาณของตะกอนที่มีอยู่ในระบบให้เหมาะสม และให้เกิดการล้างออก (wash out) น้อยที่สุด
- 3) ต้องควบคุมอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในถังปฏิกรณ์ ให้เพียงพอต่อการกวนผสมในชั้นสัลดจ์
- 4) จุลินทรีย์ในระบบมีความสามารถในการเจริญเติบโต ในช่วงค่าพีเอชที่ค่อนข้างแคบ โดยประมาณ 6.5 – 7.2
- 5) ระบบมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยเฉพาะในช่วงอุณหภูมิต่ำ
- 6) ต้องอาศัยความรู้และประสบการณ์เป็นอย่างมาก
- 7) ระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ ไม่สามารถเป็นระบบบำบัดที่สมบูรณ์ในตัวเองได้ เนื่องจากยังคงมีชั้นตัวกลาง (intermediate) ต่าง ๆ เหลืออยู่ ทำให้น้ำทิ้งมีค่าซีโอดีสูง

2.3.4 ประเภทของ Granular Sludge ในถังยูเอเอสบี

ลักษณะของ Granular Sludge ที่เกิดขึ้นในระบบยูเอเอสบี ขึ้นอยู่กับชนิดของตะกอนหัวเชื้อ (Seed Sludge) ส่วนประกอบของน้ำเสีย ตลอดจนการเริ่มต้นกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศและสิ่งแวดล้อมที่เริ่มต้น Granular Sludge อาจมีหลายชนิด ดังนี้

1) Sarcina Granular เป็นชนิดที่มีจุลชีพรูปร่างกลม ส่วนใหญ่เกาะกันเป็นกลุ่ม Granular ชนิดนี้ สร้างขึ้นมาจากน้ำเสียที่มีกรดอะซิติกเข้มข้นมากกว่า 1,000 มก./ล. Granular ชนิดนี้มีขนาดเล็กเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 6.5 มม. จึงถูกชะล้างออกได้ง่าย และยังเป็นชนิดที่มีความสามารถในการย่อยสลายต่ำ

2) Spinky Granular เป็นชนิดที่มีความยาวมากกว่า 1 มม. มีความหนาแน่นน้อยกว่า 0.5 มม. ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตมากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ Granular ชนิดนี้ สร้างขึ้นมาจากน้ำเสียของโรงงานผลิตแป้งข้าวโพด

3) Filamentous เป็นจุลชีพที่มีรูปร่างเป็นแท่งต่อกันเป็นสายยาว ประกอบด้วย Methanotrix ชนิดที่เป็นเส้น Granular ชนิดนี้ สร้างขึ้นจากน้ำเสียที่มีแต่กรดไขมันระเหย (Volatile fatty acid)

4) Rod ลักษณะเป็นรูปกลม ประกอบด้วย Methanotrix ชนิดที่เป็นเส้น รวมกันประมาณ 5 เซลล์ พบในถังหมักที่บำบัดน้ำเสียในโรงงานแป้งมันสำปะหลังและโรงงานน้ำตาล

2.3.5 โครงสร้างของแบคทีเรียในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

Guiot, Pauss และ Corterton, 1992 (อ้างถึงใน ตูลชัย แจ่มใส, 2545) กล่าวว่าความเร็วในการไหลในถังปฏิกรณ์เป็นปัจจัยสำคัญในการคัดเลือกพันธุ์ของแบคทีเรีย ที่สามารถรวมตัวกันเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์และตกตะกอนได้ดี เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้น มีข้อดี ดังนี้

- มีความหนาแน่นสูง
- ไม่มีการใช้ตัวกลาง (media) จึงไม่มีการสูญเสียพื้นที่ในถังปฏิกรณ์
- เม็ดตะกอนจุลินทรีย์มีอัตราส่วนของแบคทีเรียต่อปริมาตรที่สูงมาก

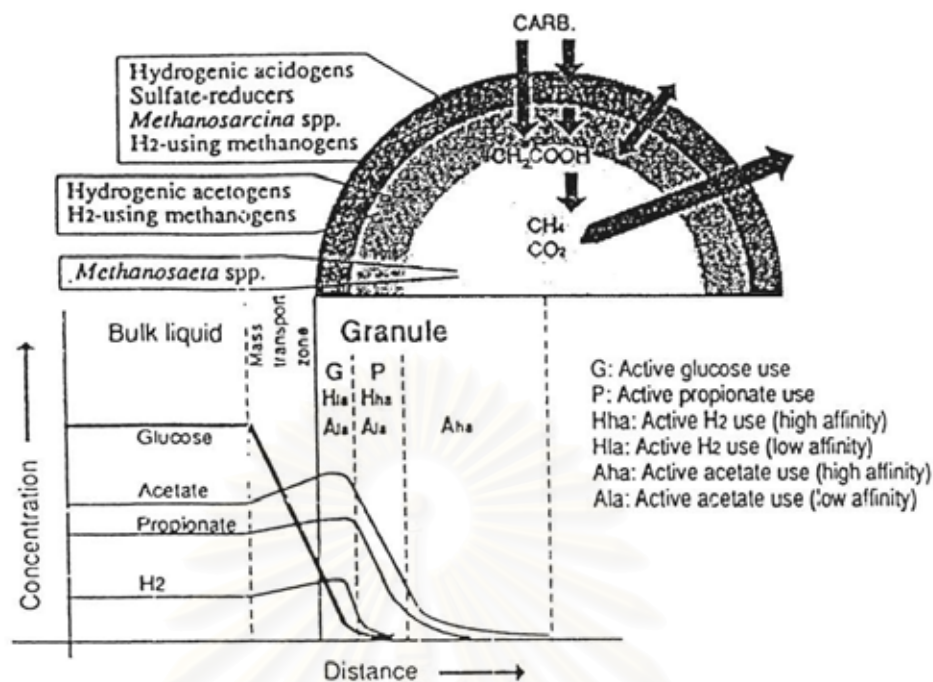
เมื่อมีการศึกษาโครงสร้างของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในน้ำเสียประเภทคาร์โบไฮเดรต ด้วยวิธีการ SEM (Scanning Electron Microscopy) พบว่า มีโครงสร้างภายในแบ่งออกเป็น 3 ชั้น โครงสร้างภายในของเม็ดตะกอนสามารถแบ่งออก แสดงดังรูปที่ 2.5

ชั้นนอก ประกอบด้วย จุลินทรีย์หลายกลุ่ม ได้แก่ Hydrogenic acidogens, sulfate reducers, Methanosarcina และ H_2 -utilizing methanogens

ชั้นกลาง ประกอบด้วย Hydrogenic acetogens และ H_2 -utilizing methanogens เช่น Methanosarcina, Methanococcales และ Methanospirillum

ชั้นใน ประกอบด้วย จุลินทรีย์ประเภท Aceticlastic ซึ่งส่วนใหญ่เป็น Methanosaeta

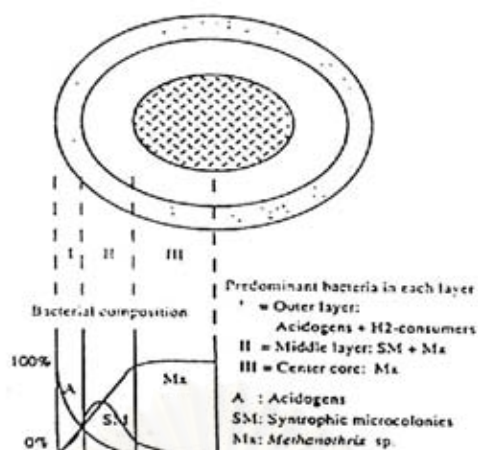
จุลินทรีย์ H_2 -utilizing methanogens ในชั้นกลางและชั้นนอก มีความแตกต่างกัน คือ กลุ่มจุลินทรีย์ชั้นนอกจะใช้สารอาหารที่ต่ำกว่า กลุ่มแบคทีเรียชั้นกลาง (มีค่า K_s สูง) จึงส่งผลให้เกิดสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์แต่ละชนิด โดยเฉพาะในแกนกลางของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ซึ่งเป็น Aceticlastic methanogens (ส่วนใหญ่เป็น Methanosaeta) เป็นส่วนสำคัญในการผลิตมีเทนโดยอาศัยสารอาหาร ได้แก่ อะซิเตต ซึ่งเป็นผลผลิตที่เกิดจากกระบวนการเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์กลุ่มชั้นนอกและชั้นกลาง ทั้งนี้ Methanosaeta เป็นแบคทีเรียที่มีค่า K_s ต่ำที่สุดในกลุ่มจุลินทรีย์ Aceticlastic methanogens ซึ่งถือว่าเป็นผลดีต่อการทำปฏิกิริยาของ Methanosaeta ในสภาวะที่มีข้อจำกัดในการแพร่กระจายอะซิเตตมายังแกนกลางของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบยูเอเอสพีที่บำบัดน้ำเสียกลูโคส (Guiot, Pauss และ Corterton, 1992 อ้างถึงใน ตูลชัย แจ่มใส, 2545)

อย่างไรก็ตาม มีรายงานว่าไม่พบโครงสร้างที่แบ่งชั้นของแบคทีเรียในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่บำบัดน้ำเสียประเภทไพโรฟิไอเนท, เอทานอล และน้ำเสียประเภทที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต โดยเฉพาะน้ำเสียประเภทไพโรฟิไอเนท พบแบคทีเรียกลุ่ม propionate oxidizing acetogens กระจายอยู่ทั่วเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (Fang, Chui and Li, 1994 อ้างถึงใน ตูลชัย แจ่มใส, 2545)

โครงสร้างและขนาดของชั้นแบคทีเรียในแต่ละชั้น ขึ้นกับอัตราการย่อยสลายสารอาหารและการแพร่กระจายของสารที่เป็นผลผลิตของปฏิกิริยาในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในน้ำเสียประเภทคาร์โบไฮเดรตที่ผิววนอกสุดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ พบว่า กลุ่ม acidogens จะมีปริมาณมาก ทั้งนี้เพราะนอกเหนือไปจากความเข้มข้นของคาร์โบไฮเดรตที่มีค่าสูงบริเวณรอบนอก (bulk liquid) แล้วยังเป็นผลมาจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาของ acidogenesis ที่มีค่าสูงกว่า acetogenesis และ methanogenesis อะซิเตทที่ถูกผลิตจะแพร่กระจายไปยังโครงสร้างชั้นกลางและชั้นในของเม็ดตะกอนแบคทีเรียต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 2.6



Proposed layered structure and bacterial composition for the granules treating soluble carbohydrates.

รูปที่ 2.6 โครงสร้างและความหนาแน่นของแบคทีเรียในน้ำเสียประเภทคาร์โบไฮเดรต
 (Fang, Chui และ Li, 1994 อ้างถึงใน ตูลชัย แจ่มใส, 2545)

ในกรณีที่เป็นน้ำเสียประเภทโปรตีนหรือกรดอะมิโน เช่น กลูตาเมต ขั้นตอน acidogenesis จะเป็นตัวกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด (rate limiting step) เนื่องจากอัตราการย่อยสลายและการแพร่กระจายที่ช้าของกลูตาเมต ทำให้มีการแพร่กระจายของสารอาหารอย่างทั่วถึงทั้งเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ส่งผลให้แบคทีเรียมีลักษณะเหมือนกันทั่วทั้งเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ และไม่เกิดโครงสร้างที่แบ่งเป็นชั้นของกลุ่มแบคทีเรีย (Fang, Chui and Li, 1994 อ้างถึงใน ตูลชัย แจ่มใส, 2545)

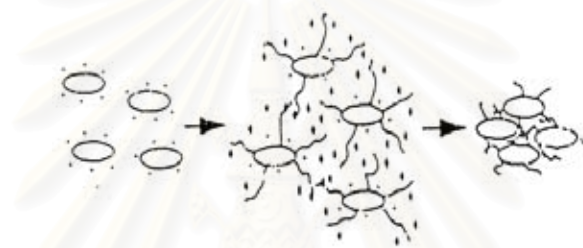
2.3.6 ความสำคัญของ Extracellular Polymers (ECP) ต่อการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์
 (Schmidt และ Ahring, 1995)

Extracellular Polymers (ECP) เป็นสารอินทรีย์ที่เป็นส่วนสำคัญของโครงสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ECP ประกอบไปด้วยโพลีเมอร์ของ saccharide โปรตีน ไขมัน และกรดนิวคลีอิก มีความสามารถในการดักจับสารอาหารละลาย (soluble nutrients) และใช้ช่วยในการยึดเกาะระหว่างเซลล์ของแบคทีเรีย เมื่อมีการศึกษาถึงโครงสร้างของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์พบว่า แบคทีเรียที่อยู่ในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์มี ECP ล้อมรอบอยู่ โดยพบปริมาณ ECP ที่อยู่ในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ มีค่าประมาณ 0.6 - 20 เปอร์เซ็นต์ ของของแข็งแขวนลอย (%VSS) ซึ่ง ECP ที่พบส่วนใหญ่ในตะกอนจุลินทรีย์ จะประกอบด้วยโปรตีน และ polysaccharide มีอัตราส่วนของโปรตีนต่อ polysaccharide เท่ากับ 2 : 1 ถึง 6 : 1 และมีไขมันอยู่ในปริมาณ 0.02 - 0.05 เปอร์เซ็นต์ของแข็งแขวนลอย (%VSS) เนื่องจากว่าแบคทีเรียที่กระจายอยู่ในน้ำเสียมีประจุเป็นลบ จึงเกิดแรงผลักระหว่างเซลล์แบคทีเรียทำให้ไม่สามารถรวมตัวกันได้ เมื่อ ECP ซึ่งมีประจุเป็นบวกมาล้อมรอบที่ผิวของเซลล์แบคทีเรีย จึงทำให้เซลล์แบคทีเรียสามารถรวมตัวกันได้ ดังแสดงใน

รูปที่ 2.7 แต่ถ้ามี ECP ปริมาณมากเกินไป อาจทำให้เกิดการผลัดกันของประจุบวก ทำให้ เซลล์แบคทีเรียไม่สามารถรวมตัวกันได้

นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อเปลี่ยนจากการบำบัดน้ำเสียประเภทน้ำตาล มาเป็นการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่เติม อะซิเตต โพรพิโอเนท และบิวทิเรทแล้ว ปริมาณความเข้มข้นของ ECP ในช่วงอุณหภูมิ มีโซฟิลิค (Mesophilic) จะสูงกว่า ในช่วงอุณหภูมิเทอร์โมฟิลิค (Thermophilic) และปริมาณของโปรตีนกับ polysaccharide ในสาร ECP จะลดลงด้วย

ปัจจุบันยังไม่เป็นที่แน่ชัดว่า ECP เกิดจากแบคทีเรียกลุ่มใด แต่สามารถระบุได้ว่า สาร ECP โดยเฉพาะ polysaccharide เกิดมาจากแบคทีเรียกลุ่ม methanogenic และ acetogenic น้อยมาก ในขณะที่แบคทีเรียกลุ่ม acidogenic มีส่วนสำคัญอย่างมากในการสร้าง ECP

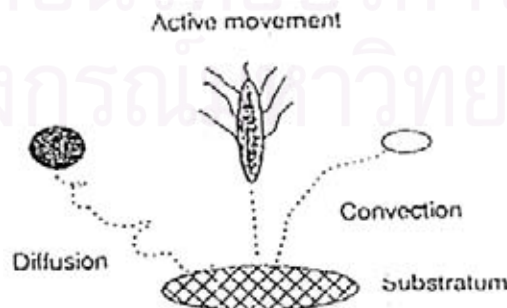


รูปที่ 2.7 บทบาทของประจุไฟฟ้าและ ECP ที่ส่งผลต่อการรวมตัวของเซลล์แบคทีเรีย (Schmidt และ Ahring, 1995)

2.3.7 กระบวนการรวมตัวเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (Schmidt และ Ahring, 1995)

ขั้นตอนการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ มีดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 Transport การเคลื่อนไหวของเซลล์ เพื่อไปจับตัวกับอนุภาคเฉื่อยหรือเซลล์ของแบคทีเรียอื่น จนกลายเป็นอนุภาคพื้นฐาน (substratum) สามารถเคลื่อนไหวได้หลายวิธี ได้แก่ การแพร่กระจาย (Brownian motion), การพัดพา (convective) โดยของเหลว ก๊าซ , การตกตะกอนหรือการเคลื่อนไหวของเซลล์โดย flagella ดังแสดงในรูปที่ 2.8

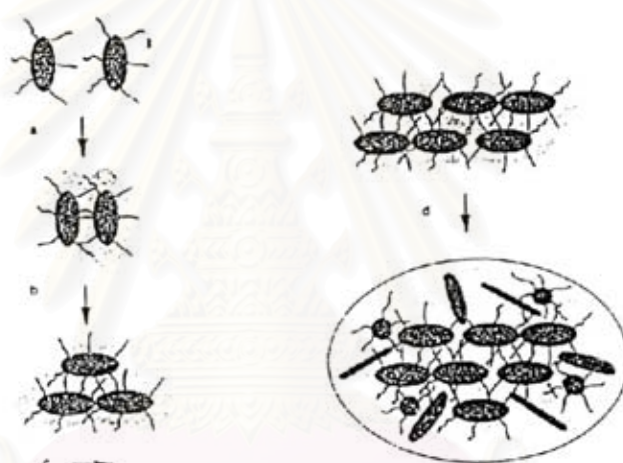


รูปที่ 2.8 กลไกการเคลื่อนไหวต่าง ๆ ที่มีผลต่อการรวมตัวของเซลล์แบคทีเรีย (Schmidt และ Ahring, 1995)

ขั้นตอนที่ 2 Reversible adsorption การดูดติดผิวของเซลล์แบคทีเรียกับอนุภาคพื้นฐาน ซึ่งอาจเป็นกลุ่มแบคทีเรียหรืออนุภาคของแข็งเฉื่อย โดยแรงทางฟิสิกส์ – เคมี ซึ่งสามารถเกิดการแยกตัวหรือหลุดออกไปได้อีกครั้ง การดูดติดเป็นผลมาจากแรงทางประจุไฟฟ้า (ionic strength)

ขั้นตอนที่ 3 Irreversible adhesion เป็นการเกาะยึดด้วยพันธะแข็งแรงของโพลีเมอร์ (ECP) กับการเกาะยึดของเซลล์เข้ากับ substratum ซึ่งเซลล์มีโอกาสที่จะหลุดออกมาจากเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ได้ยากมาก ยังไม่เป็นที่แน่ชัดว่า ECP ถูกผลิตขึ้นมาก่อนหรือหลังการเกาะยึดของเซลล์ (adhesion)

ขั้นตอนที่ 4 Multiplication หรือการแบ่งเซลล์ของแบคทีเรียที่อยู่ในชั้น ECP ในเซลล์ที่แบ่งตัวใหม่ยังคงถูกกักอยู่ในชั้น ECP และเกิดการเพิ่มขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ นอกจากนี้ยังเกิดการดักเซลล์ใหม่ที่อยู่ในน้ำเสียให้เข้ามาจับตัวในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์



รูปที่ 2.9 กลไกของการรวมตัวระหว่างแบคทีเรีย 2 เซลล์โดยอาศัย ECP จนกลายเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (Schmidt และ Ahring, 1995)

2.3.8 กลไกการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

Hulshoff Pol และคณะ, 1983 (อ้างถึงใน ชำนาญ กายประสิทธิ์, 2538) ได้ศึกษาการเกิดเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ โดยสังเกตจากพฤติกรรมในการคงอยู่ หรือการหลุดออกของตะกอน จุลินทรีย์ และได้กล่าวถึงขั้นตอนของการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ไว้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 (อัตราภาวะบรรทุกระหว่างอินทรีย์น้อยกว่า 2 กก. ซีไอดี / ลบ.ม.วัน)

เป็นขั้นตอนเริ่มต้น เมื่อได้ทำการบ่อน้ำเสียเข้าสู่ถังยูเอเอสบีแล้ว ชั้นตะกอนด้านล่างเกิดการขยายตัว เนื่องจากน้ำเสียไหลผ่านชั้นตะกอน และก๊าซที่เกิดในระบบ รวมทั้งจุลินทรีย์จำพวกเส้นใย(filamentous organisms) ที่เกิดขึ้น ทำให้ตะกอนจุลินทรีย์จมตัวให้น้อยลง

ขั้นตอนที่ 2 (อัตราภาวะบรรทุksารอินทรีย์ 2 – 5 กก. ซีไอดี / ลบ.ม.วัน)

ในขั้นตอนนี้จะมีอัตราการสูญเสียตะกอนแขวนลอยสูงมาก เนื่องจากการเพิ่มอัตราภาวะบรรทุksารอินทรีย์ทำให้เกิดการผลิตก๊าซมากขึ้น และยังเกิดการหลุดออกของตะกอนจุลินทรีย์ที่มีขนาดเล็กๆ ออกนอกถังอีกด้วย ส่วนตะกอนจุลินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่และหนัก สามารถคงตัวในถังต่อไปได้ ซึ่งนับว่าเป็นการคัดเลือกพันธุ์ของระบบ โดยมีการรวมตัวกันเป็นเม็ดตะกอนจมอยู่ในส่วนล่างของถัง ที่อาจมีขนาดใหญ่ถึง 5 มม.

ขั้นตอนที่ 3 (อัตราภาวะบรรทุksารอินทรีย์มากกว่า 3 – 5 กก. ซีไอดี / ลบ.ม.วัน)

เป็นขั้นตอนที่อัตราการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์มีสูงกว่าอัตราการหลุดออกจากระบบของตะกอนจุลินทรีย์ เมื่อระบบผ่านขั้นตอนนี้ไปแล้ว ระบบจะสามารถรับภาวะบรรทุksารอินทรีย์ได้มากขึ้น จนถึงค่าสูงสุดที่ระบบสามารถรับได้ ซึ่งจากผลการทดลองที่ผ่านมา พบว่าระบบอาจรับภาวะบรรทุksารอินทรีย์ได้ถึง 50 กก. ซีไอดี / ลบ.ม.วัน

2.3.9 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบยูเอเอสบี

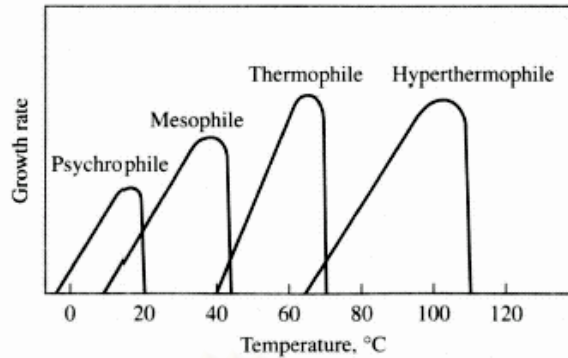
ก) อุณหภูมิ

ระบบยูเอเอสบี สามารถทำงานในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้ 2 ช่วง คือ

- ช่วงอุณหภูมิเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) ซึ่งมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 50 – 65 องศาเซลเซียส

- ช่วงอุณหภูมิไซฟิลิก (Mesophilic) ซึ่งมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 20 – 45 องศาเซลเซียส

อย่างไรก็ตาม มีการพบว่า ในการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ ช่วงอุณหภูมิเทอร์โมฟิลิกจะมีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้รวดเร็วกว่าช่วงอุณหภูมิมิไซฟิลิก แต่ก็มักนิยมให้แบคทีเรียอยู่ในช่วงอุณหภูมิมิไซฟิลิกมากกว่า เนื่องจากมีการพบว่า พวกเทอร์โมฟิลิกจะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากกว่า ดังนั้นการรักษาคอุณหภูมิให้สม่ำเสมอจึงเป็นสิ่งสำคัญ เพราะการลดหรือเพิ่มอุณหภูมิแม้เพียง 2 – 3 องศาเซลเซียส จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซมีเทนเป็นอย่างมาก



รูปที่ 2.10 ผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการเจริญเติบโตของเซลล์แบคทีเรีย (Rittmann และ McCarty, 2001 อ้างถึงใน มั่นสิน ตัณฑุลเวศน์, 2542)

ข) ค่าพีเอช

เนื่องจากแบคทีเรียที่สร้างมีเทน มีความไวต่อค่าพีเอชมากที่สุด ดังนั้น ประสิทธิภาพในการทำงานของระบบที่ดีที่สุด จึงควรมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.5 – 8.2 จากนั้นประสิทธิภาพของระบบก็จะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อค่าพีเอชต่ำกว่า 6.2 ในขณะที่แบคทีเรียชนิดสร้างกรดยังสามารถทำงานได้ดีที่ค่าพีเอช 6.0 – 6.5 นอกจากนี้ ค่าพีเอชยังส่งผลทางอ้อมต่อแบคทีเรียที่ผลิตมีเทน กล่าวคือ ค่าพีเอชจะมีผลต่อรูปอ็อกซิเจนของสารต่างๆ เช่น กรดไขมันระเหย แอมโมเนีย ไฮโดรเจนซัลไฟด์ จะเกิดการเป็นพิษต่อแบคทีเรียซึ่งจะแตกต่างกันออกไปตามชนิดของสาร

ค) ความเข้มข้นของกรดอินทรีย์

ระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศสามารถทำงานได้ดี ควรจะมีความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ซึ่งอยู่ในรูปของกรดอะซิติก ประมาณ 200 – 400 มก./ล. ซึ่งอัตราการเพิ่มของความเข้มข้นของกรดจะมีความสำคัญมากกว่าปริมาณของกรด โดยระบบยังสามารถทำงานได้ดีที่ความเข้มข้นของกรดอินทรีย์สูงกว่า 1,000 มก./ล. แต่ถ้าความเข้มข้นของกรดอินทรีย์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเกินไปจะเป็นการแสดงให้เห็นถึงการเสถียรของระบบ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการชะลอการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่สร้างมีเทน หรือการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่สร้างกรดถูกเร่งให้เร็วขึ้น นอกจากนี้ ชนิดของกรดอินทรีย์ก็มีความสำคัญเช่นกัน ตัวอย่างเช่น กรดโพรพิโอนิกความเข้มข้นสูงกว่า 1,000 มก./ล. จะทำให้เกิดปัญหาทั้งความเป็นพิษของกรดและระดับค่าพีเอชที่ต่ำลง

ง) ระดับสภาพต่างในรูปไบคาร์บอเนต

สภาพต่างบอกให้ทราบถึงกำลังบัฟเฟอร์ (buffer capacity) ของระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ ถ้ากำลังบัฟเฟอร์ต่ำปริมาณกรดที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้ ค่าพีเอชลดลงอย่างรวดเร็ว และยังมีผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่สร้างมีเทนอีกด้วย ระดับสภาพต่างที่จะทำให้มีกำลังบัฟเฟอร์ที่เหมาะสมนั้น ขึ้นอยู่กับประเภทและความเข้มข้นของน้ำเสีย ถ้าน้ำเสียที่มี

ความเข้มข้นสูงก็มีโอกาสที่จะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มาก ดังนั้นกำลังบัฟเฟอร์ของระบบจะต้องเพิ่มขึ้น โดยทั่วไประบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศควรมีสภาพต่างประมาณ 1,500–2,000 มก./ล. และนอกจากนี้ยังมีปัจจัยที่สำคัญอื่นๆอีก เช่น อัตราส่วนของความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยในรูปของกรดอะซิติกต่อระดับสภาพต่างในรูปไบคาร์บอเนต (มก./ล.ของ CaCO_3) ซึ่งระบบจะมีกำลังบัฟเฟอร์สูง เมื่ออัตราส่วนนี้น้อยกว่า 0.4 และถ้าอัตราส่วนนี้สูงกว่า 0.8 แสดงว่าค่าพีเอชของระบบกำลังจะลดลงอย่างรวดเร็ว

จ) โออาร์พี (ORP)

โออาร์พี (Oxidation Reduction Potential) เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงปฏิกิริยารีดอกซ์ โดยแสดงปริมาณความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่เกิดจากการถ่ายเทอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในระบบ โดยทั่วไป ค่าโออาร์พีในน้ำที่มีออกซิเจนหรือไนเตรตจะวัดได้เป็นค่าบวก และค่าโออาร์พีในน้ำที่ไม่มีออกซิเจนจะวัดได้เป็นค่าลบ โออาร์พีแสดงถึงความสามารถในการรับอิเล็กตรอนของสารละลาย กล่าวคือ ถ้าโออาร์พีที่วัดได้มีค่าเป็นบวกมากๆ ก็แสดงว่าสารละลายนี้มีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้ดี สำหรับระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ มีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้น้อย หรืออีกนัยหนึ่งก็คือมีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนได้ดี ส่วนค่าโออาร์พีที่เหมาะสมสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศมีค่าอยู่ในช่วง -150 ถึง -300 มิลลิโวลท์

ฉ) ประเภทสารอาหารในน้ำเสีย

สารอาหารในน้ำเสีย เกี่ยวข้องโดยตรงกับชนิดของแบคทีเรียในระบบและประสิทธิภาพในการย่อยสลาย จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า สารอาหารที่ต่างชนิดกันมีอัตราการย่อยสลายที่แตกต่างกัน โดยสารอาหารพวกคาร์โบไฮเดรตจะมีอัตราการย่อยสลายที่เร็วกว่าโปรตีนและไขมัน

ช) ธาตุอาหารที่จำเป็น

การบำบัดด้วยกระบวนการไม่ใช้อากาศ มีข้อดีประการหนึ่ง คือ มีเซลล์จุลินทรีย์ที่สร้างขึ้นน้อยกว่าแบบใช้อากาศ ดังนั้น จึงต้องการธาตุอาหารเสริม เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ต่ำกว่าแบบใช้อากาศ ซึ่งจุลินทรีย์ต้องการปริมาณธาตุไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียอย่างน้อยด้วยอัตราส่วน BOD : N : P เท่ากับ 100 : 1.1 : 0.2 หรือ COD : N : P เท่ากับ 350 : 5 : 1 นอกจากนี้อัตราส่วนระหว่าง COD : N ยังมีผลต่อลักษณะของเมือกอีกด้วย โดยทำให้เมือกมีลักษณะเป็นนุย เมื่อมีอัตราส่วนโดยประมาณ 100 : 10

นอกจากนี้ แบคทีเรียที่สร้างมีเทนยังต้องการธาตุบางอย่างแต่ในปริมาณน้อยเพื่อให้ระบบดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งธาตุเหล่านั้น ได้แก่ เหล็ก โคบอลท์ นิกเกิล และซัลเฟอร์ (ในรูปของซัลไฟด์) แต่อย่างไรก็ดี การเติมธาตุดังกล่าวให้กับแบคทีเรียเป็นสิ่งที่ไม่จำเป็น เนื่องจากซัลไฟด์สามารถทำให้โลหะต่างๆ ตกผลึกและแยกออกจากน้ำได้ จึงทำให้แบคทีเรียไม่สามารถนำ

ธาตุอาหารประเภทโลหะและซัลเฟอร์ไปใช้ได้ ปัจจุบันจึงได้มีการแก้ไขโดยการเติม Yeast Extract ให้แก่ระบบโดยตรง ในอัตราส่วนที่ไม่ต่ำกว่า 1.5 กก./ลบ.ม. ของน้ำเสีย ซึ่ง Yeast Extract เป็นอาหารที่อุดมไปด้วยธาตุและสารอินทรีย์ต่างๆ ที่แบคทีเรียต้องการเล็กน้อยแต่จำเป็น หรืออาจจะใช้ Milorganite ในอัตราส่วนอย่างต่ำ 5 กก./ลบ.ม. ของน้ำเสียก็ได้

ช) สารพิษ

น้ำเสียที่จะนำมาผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ จะต้องไม่มีสารที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ เพราะจะไปรบกวนการทำงานของแบคทีเรียในระบบ หรือยับยั้งการเจริญเติบโต ซึ่งความรุนแรงนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารนั้น ถ้าหากสารเหล่านี้มีปริมาณน้อยก็จะมีผลกระทบต่อการทำงานของระบบ สารที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบ ได้แก่

- พิษของกรดไขมันระเหย

กรดไขมันระเหยที่ถูกสร้างขึ้นในปริมาณที่สูงเกินไปในระบบ เช่น ในสภาวะที่มีสารอินทรีย์เข้ามามาก แบคทีเรียจะผลิตกรดไขมันระเหยออกมามาก หากว่าระบบมีกำลังบำบัดไม่เพียงพอ จะส่งผลกระทบต่อค่าพีเอช ทำให้มีค่าลดลงในช่วงที่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรีย

- พิษของแอมโมเนีย

แอมโมเนียที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนรวมอยู่ คือ โปรตีนหรือยูเรีย โดยทั้งนี้ไนโตรเจนอาจอยู่ในรูปแอมโมเนียอิออน (NH_4^+) หรือก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ตามสมการต่อไปนี้



ถ้าพีเอชต่ำกว่า 7.2 ปฏิกิริยาจะดำเนินไปทางซ้าย แต่ถ้าพีเอชสูงกว่า 7.2 ปฏิกิริยาจะดำเนินไปทางขวา NH_3 จะยับยั้งการทำงานและเป็นพิษต่อแบคทีเรียมากกว่า NH_4^+

ตารางที่ 2.3 ผลของแอมโมเนียไนโตรเจนต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน

(McCarty, 1994 อ้างถึงใน ภูคำ พิมจักร, 2546)

| แอมโมเนียไนโตรเจน (มก./ล.) | ผลต่อระบบ |
|----------------------------|---------------------------|
| 50-200 | ปริมาณพอเหมาะ |
| 200-100 | ยังไม่เกิดผลเสีย |
| 1,500-3,000 | เริ่มยับยั้งเมื่อพีเอชสูง |
| >3,000 | เป็นพิษโดยตรง |

- พิษของซัลไฟด์

พิษของซัลไฟด์เกิดขึ้นได้เมื่อน้ำเสียที่เข้ามาในระบบ มีปริมาณซัลไฟด์มากเกินไป ซึ่งซัลไฟด์อาจเกิดจากการย่อยสลายซัลเฟต หรือการย่อยสลายโปรตีนซัลไฟด์ในระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศก็ได้ ทั้งนี้สารประกอบซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นอาจอยู่ในรูปที่ละลายน้ำหรือไม่ละลายน้ำขึ้นอยู่กับอิออนบวกที่รวมอยู่ ถ้าอิออนบวกรวมตัวกับโลหะหนักก็จะอยู่ในรูปของตะกอน ส่วนที่ละลายน้ำจะอยู่ในรูปของไฮโดรเจนซัลไฟด์ จุลินทรีย์ที่ไม่ใช้อากาศจะทนซัลไฟด์ (ที่ละลายน้ำ) ที่มีความเข้มข้นถึง 50 – 100 มก./ล. แต่ความเข้มข้นที่มากกว่า 200 มก./ล. จะทำให้เป็นพิษ การลดพิษซัลไฟด์ทำได้โดยการตกตะกอนซัลไฟด์หรือการแยกซัลไฟด์ของน้ำเสียก่อนเข้าระบบ

- พิษของอิออนและโลหะหนัก

อิออนหรือโลหะหนักที่มีความเข้มข้นสูงเกินปริมาณหนึ่ง จะเกิดความเป็นพิษต่อระบบได้ อิออนที่สำคัญที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ ได้แก่ Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} และ S^{2-} ซึ่งธาตุเหล่านี้โดยปกติจะเป็นประโยชน์ต่อแบคทีเรียถ้ามีความเข้มข้นในระดับที่เหมาะสม แต่ถ้ามีมากเกินไปก็จะเป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ อิออนบวกจะมีความเป็นพิษมากกว่าอิออนลบ นอกจากนี้ อิออนบวกที่มีวาเลนซ์สูงจะมีความเป็นพิษมากกว่าอิออน บวกที่มีวาเลนซ์ต่ำ กล่าวคือ อิออนบวกที่มีวาเลนซ์เท่ากับ 2 จะมีพิษต่อจุลินทรีย์มากกว่าอิออน บวกที่มีวาเลนซ์เท่ากับ 1 ถึง 10 เท่า

พิษของอิออนสามารถลดลงได้ เมื่ออยู่ร่วมกับธาตุอื่น ๆ ในปริมาณที่เหมาะสม เช่น พิษของ Na^+ มีความเข้มข้น 3,500 มก./ล. สามารถทำให้ลดลงได้ ถ้ามี Mg^{2+} และ Ca^{2+} ที่มีความเข้มข้นอยู่ระหว่าง 50 – 1,000 มก./ล. ไปรวมอยู่ แต่ในทางตรงกันข้ามอิออนบางชนิด จะไปเพิ่มความเข้มข้นให้มากขึ้นเมื่ออยู่ร่วมกัน

ส่วนพิษของโลหะหนัก ได้แก่ แมงกานีส แคดเมียม สังกะสี นิกเกิล โคบอลท์ ทองแดง และโครเมียม โลหะหนักเหล่านี้จะอยู่ในน้ำทิ้งในรูปอิออน ซึ่ง Mosey และ Hughes, 1975 (อ้างถึงใน กิตติศักดิ์ ดันชนะชัย, 2539) พบว่า ทองแดง มีผลกระทบต่อกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศมากที่สุด พิษของโลหะหนักจะมากหรือน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีอยู่ในน้ำเสีย ความเป็นพิษของโลหะหนักสามารถลดลงได้ ถ้าน้ำเสียมีไฮโดรเจนซัลไฟด์ในปริมาณที่พอเหมาะ เพราะไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถรวมกับโลหะหนักแล้ว เกิดเป็นตะกอนเกลือของโลหะหนักซึ่งไม่ละลายน้ำ แต่อย่างไรก็ตามโลหะหนักต่างๆเหล่านี้ มีความจำเป็นสำหรับจุลินทรีย์ โดยต้องมีในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อเป็นธาตุอาหารให้กับจุลินทรีย์

- พิษของสารอินทรีย์

สารอินทรีย์บางชนิด สามารถยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศได้

ซึ่งสารจำพวกนี้ ได้แก่ แอลกอฮอล์ และกรดไขมันที่มีโมเลกุลยาว เช่น เมทานอล ซึ่งความเป็นพิษของสารอินทรีย์เหล่านี้ สามารถทำลายได้โดยการนำน้ำทิ้งที่มีสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบบำบัดอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้จุลินทรีย์คุ้นเคยและปรับตัวได้ แม้ว่าจะมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เป็นพิษถึง 10,000 มก./ล.

2.4 ระบบอีจีเอสบี (Expanded Granular Sludge Bed, EGSB)

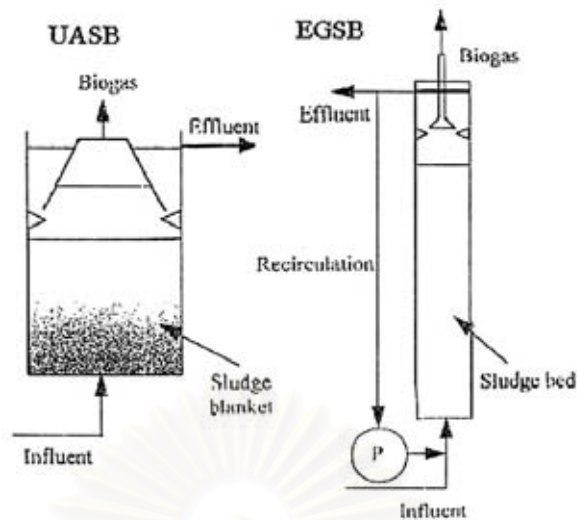
2.4.1 ความเป็นมาของระบบอีจีเอสบี

เนื่องจากได้มีความพยายามที่จะนำระบบยูเอเอสบีไปบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำ เช่น น้ำเสียจากโรงงานที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า 1,000 มก./ล. น้ำเสียชุมชนเป็นต้น แต่พบว่าส่วนใหญ่ยังไม่มีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดีพอ โดย Kato และคณะ (1994) กล่าวว่า ปัญหาที่เกิดขึ้นกับระบบยูเอเอสบี เมื่อนำไปใช้บำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำ (ซึ่งมีสาเหตุมาจากลักษณะของน้ำเสียที่มีค่าความเข้มข้นของซีโอดีต่ำมาก) จึงทำให้ความเข้มข้นของสารอาหารมีน้อย ส่งผลให้มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นน้อย การกวนผสมภายในชั้นสลัดจ์ไม่เพียงพอ และเกิดการสัมผัสกันระหว่างสารอินทรีย์ในน้ำเสียจุลินทรีย์ไม่ทั่วถึง ดังนั้น ระบบยูเอเอสบีจึงไม่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำ

ต่อมาได้มีการคิดค้นและทำการพัฒนาระบบยูเอเอสบี โดยการปรับปรุงประสิทธิภาพในการสัมผัสกันระหว่างอินทรีย์ในน้ำเสียกับจุลินทรีย์ให้ดีขึ้น ด้วยการทำให้เกิดการขยายตัวของชั้นสลัดจ์และเกิดการผสมที่ทั่วถึง โดยการติดตั้งระบบหมุนเวียนน้ำทิ้ง ซึ่งเรียกระบบนี้ว่า อีจีเอสบี (Expanded Granular Sludge Bed, EGSB)

2.4.2 ลักษณะและการทำงานของระบบอีจีเอสบี

ระบบอีจีเอสบีเป็นระบบบำบัดน้ำเสีย ที่มีลักษณะและการทำงานคล้ายกับระบบยูเอเอสบีแต่จะมีข้อแตกต่างกัน คือ ระบบอีจีเอสบีจะมีการเวียนน้ำทิ้งกลับเข้ามาสู่ระบบใหม่ ทำให้เป็นการเพิ่มความเร็วในการไหลขึ้น ซึ่งจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 4 – 10 ม./ชม. (Seghezzeo และคณะ, 1998 อ้างถึงใน ปรีชา ทดนาที, 2547) ในขณะที่ระบบยูเอเอสบี โดยทั่วไปจะมีความเร็วในการไหลขึ้นอยู่ในช่วง 0.5 – 1.5 ม./ชม. หรือต่ำกว่า (Kato และคณะ, 1994) ลักษณะทั่วไปของอีจีเอสบีจะมีอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างค่อนข้างมาก เมื่อเทียบกับถังยูเอเอสบี แสดงดังรูปที่ 2.11 ซึ่งส่วนประกอบของระบบอีจีเอสบีจะเหมือนกับระบบยูเอเอสบี กล่าวคือ มีส่วนที่เป็นถังหมักและระบบป้อนน้ำเสียที่ส่วนล่างของถัง และมีส่วนที่เป็นถังตกตะกอนที่ส่วนบนของถัง โดยมีการติดตั้งอุปกรณ์แยกสามสถานะ ซึ่งเป็นส่วนที่ทำหน้าที่แยกน้ำเสีย ตะกอนจุลินทรีย์ และก๊าซชีวภาพ แต่จะมีการติดตั้งระบบเวียนน้ำกลับเพิ่มขึ้นมา



รูปที่ 2.11 แผนผังส่วนประกอบของระบบยูเอเอสบีและอีจีเอสบี
(Seghezzi และคณะ, 1998 อ้างถึง ปรีชา ทดนาที, 2547)

2.4.3 ลักษณะของระบบอีจีเอสบี (Seghezziและคณะ,1998 อ้างถึงใน ปรีชา ทดนาที, 2547)

- 1) มีค่าความเร็วในการไหลขึ้นสูง (มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 4 – 10 ม./ชม.)
- 2) สามารถรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงถึง 40 กก.ซีไอดี/ลบ.ม./วัน
- 3) เกิดการขยายตัวของชั้นสลัดจ์
- 4) มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำ
- 5) สลัดจ์มีลักษณะเป็นเม็ด ตกตะกอนได้ดี และมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สูง
- 6) ลักษณะการกวนผสม จะแตกต่างจากระบบยูเอเอสบี กล่าวคือ เนื่องจากค่าความเร็วในการไหลขึ้นสูง และมีก๊าซถูกผลิตเพิ่มขึ้น ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการสัมผัสระหว่างน้ำเสียกับชั้นสลัดจ์
- 7) ความดันในชั้นสลัดจ์ที่บริเวณส่วนล่างของถังมีค่าสูง (ในกรณีที่ถังอีจีเอสบี ความสูงมาก)
- 8) สลัดจ์แบบฟล็อก (flocculent sludge) จะถูกล้างออก (wash out) จากระบบ
- 9) ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย และคอลลอยด์ ค่อนข้างต่ำ

ระบบอีจีเอสบี เป็นการปรับปรุงข้อเสียของระบบยูเอเอสบี ที่มีการถ่ายเทมวลสาร (mass transfer) ต่ำ เนื่องจากมีการสัมผัสกันของน้ำเสียกับจุลินทรีย์ไม่ทั่วถึง ซึ่งแก้ไขโดยทำให้เกิดการขยายตัวของชั้นสลัดจ์ ซึ่งเป็นการเพิ่มความเร็วในการไหลให้สูงขึ้น อาจทำได้ด้วยการออกแบบให้ถังอีจีเอสบี มีอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างที่มากเพียงพอต่อการขยายตัวของชั้นสลัดจ์หรือมีอัตราการเวียนน้ำทิ้งกลับที่เพียงพอ (Kato, 1994)

แต่อย่างไรก็ตาม ลักษณะของระบบอีจีเอสบีที่มีความเร็วในการไหลขึ้นที่สูง ทำให้ต้องคำนึงถึงการออกแบบอุปกรณ์แยกสามสถานะเป็นพิเศษ เนื่องจากอาจเกิดการล้างออก(wash out) ของตะกอนจุลินทรีย์ (Kato และคณะ, 1999)

เนื่องจากว่าระบบอีจีเอสบี มีการถ่ายเทมวลสารที่ดีกว่าระบบยูเอเอสบี (Kato และคณะ, 1994) ทำให้มีความเหมาะสมที่จะใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำ และยังสามารถใช้บำบัดสารอินทรีย์ ซึ่งมีความเป็นพิษที่มีความเข้มข้นสูงๆ เช่น ฟอรัลดีไฮด์ และยังสามารถบำบัดน้ำเสียประเภท long chain fatty acid ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงถึง 30 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน โดยมีประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดีสูงถึง 85 – 95 เปอร์เซ็นต์ (Rinzema และคณะ, 1993)

Kato และคณะ (1994) กล่าวว่า ระบบอีจีเอสบีเป็นระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ ที่มีความเหมาะสมในการใช้บำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำ ในขณะที่ ระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศทั่วไป จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำไม่ดี ซึ่งเห็นได้จากรายงานวิจัยของระบบยูเอเอสบีทั่วไปที่นำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียชุมชน ซึ่งสามารถบำบัดค่าซีโอดีได้ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ค่าซีโอดีในน้ำเสียที่มีค่าต่ำจะส่งผลให้ระดับของสารอาหารลดลงเรื่อยๆ ตามขึ้นความลึกในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ทำให้เม็ดตะกอนจุลินทรีย์มีอัตราการเกิด ปฏิกริยาในการย่อยสลายสารอาหารต่ำไปด้วย จากสมการของโมนอด์ ได้แสดงว่า อัตราการทำปฏิกริยาของแบคทีเรียขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารอาหาร อัตราการย่อยสลายขึ้นอยู่กับค่า K_s ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงคุณลักษณะจำเพาะของแบคทีเรียต่อสารอาหารนั้นๆ โดย Kato ได้แบ่งค่า K_s ออกเป็น 2 ประเภทได้แก่

1) Intrinsic K_s เป็นค่า K_s ที่แท้จริง ซึ่งแสดงถึง การถ่ายเทมวลสารเข้าไปยังเซลล์ของแบคทีเรีย ที่มีลักษณะการเจริญเติบโตในน้ำเสียแบบกระจาย (dispersed bacterial cells) ในสภาพที่เซลล์แบคทีเรียมีการแขวนลอยอย่างสมบูรณ์

2) Apparent K_s เป็นค่า K_s ปรากฏ ซึ่งแสดงถึง การถ่ายเทมวลสารผ่าน biofilm ที่ห่อหุ้มอยู่รอบนอกของกลุ่มเซลล์แบคทีเรียหรือเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

Apparent K_s จะมีค่าสูงกว่า Intrinsic K_s เนื่องจาก มีการถ่ายเทมวลสารผ่าน biofilm ของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์มากกว่าการถ่ายเทมวลสารเข้าไปยังเซลล์ของแบคทีเรีย ที่มีลักษณะการเจริญเติบโตในน้ำเสียแบบกระจาย ดังนั้นจึงพบว่า ค่าความเข้มข้นของสารอาหารจะต่ำลงเรื่อยๆ ตามความลึกในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ และไม่มีอาหารที่เพียงพอต่อจุลินทรีย์ ที่อยู่ในชั้นในของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ และจุลินทรีย์ที่อยู่ในชั้นลึกๆ เกิดการขาดอาหาร และย่อยสลายตัวเองกลายเป็นโพรงว่างบริเวณแกนกลางของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ส่งผลให้เกิดการ wash out ของเม็ดตะกอน

จุลินทรีย์ จากการที่มีก๊าซสะสมตัวอยู่ภายในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์นั่นเอง จึงทำให้เกิดการจับตัวกันแบบหลวม ๆ นำไปสู่การแตกสลาย เนื่องจากความปั่นป่วนทางกลศาสตร์ในถังปฏิกรณ์ได้

การที่จะให้มีสารอาหารที่เพียงพอต่อจุลินทรีย์ จำเป็นที่จะต้องเกิดอัตราการถ่ายเทมวลสารผ่านชั้น biofilm ได้เร็วกว่าอัตราการย่อยสลายสารอาหาร ด้วยจุลินทรีย์ในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ดังนั้น ในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำ จึงต้องมีการควบคุมอย่างเพียงพอเพื่อให้น้ำเสียสัมผัสกับจุลินทรีย์ได้อย่างสม่ำเสมอ และทำให้ค่า Apparent K_s ต่ำลง ซึ่งในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำด้วยระบบอ็อกซิเจนสามารถทำให้เกิดการควบคุมอย่างเพียงพอได้ โดยการติดตั้งระบบเวียนน้ำทิ้งกลับ เพื่อเพิ่มความเร็วในการไหลขึ้น

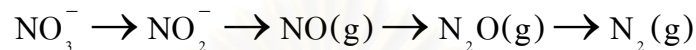
2.5 กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน

ดีไนตริฟิเคชัน คือ กระบวนการรีดักชันของไนเตรทไนโตรเจน ซึ่งไนเตรททำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายสำหรับการหายใจของจุลินทรีย์ที่ไม่มีออกซิเจนโมเลกุลเรียกว่าการหายใจแบบแอนแอโรบิก แบคทีเรียที่ทำปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันเป็นพวกแพคคิลเททีฟ และใช้ pathways ทางชีวเคมีเหมือนกันทั้งระหว่างการหายใจแบบแอโรบิกและแอนแอโรบิก โดยมีความแตกต่างที่สำคัญ คือ เอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาการส่งผ่านอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย จุลินทรีย์ช่วยในการทำปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน มีทั้งกลุ่มที่สร้างอาหารเองไม่ได้และสร้างอาหารเองได้ ตัวอย่างจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างอาหารเองไม่ได้ได้แก่ *Achromobacter*, *Acinetobacter*, *Aerobacter*, *Agrobacterium*, *Alcaligenes*, *Arthrobacter*, *Bacillus*, *Chromobacterium*, *Corynebacterium*, *Flavobacterium*, *Hypomicrobium*, *Micrococcus*, *Moraxella*, *Neisseria*, *Paracoccus*, *Propionibacterium*, *Proteus*, *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Rhodopseudomonas*, *Spirillum* and *Vibrio* (Parker et al, 1975 ; Christensen and Harremoos. 1997 ; Payne. 1981 อ้างถึงในธีระ เกרות, 2539) เกือบทั้งหมดของแบคทีเรียพวกนี้สามารถใช้ออกซิเจนเช่นเดียวกับไนเตรทและบางชนิดสามารถทำการหมักเมื่อไม่มีไนเตรท หรือออกซิเจนภายใต้สภาวะดีไนตริฟิเคชัน แบคทีเรียใช้คาร์บอนไดออกไซด์หรือไบคาร์บอเนตเป็นแหล่งคาร์บอน แทนคาร์บอนอินทรีย์หลายชนิดที่พบตามธรรมชาติในระบบบำบัดน้ำเสีย ดังนั้น จึงทำให้การสร้างกลุ่มดีไนตริฟิเคชันในระบบบำบัดน้ำเสียค่อนข้างง่าย

ระบบเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับรีดักชันของไนเตรทมีอยู่สองแบบคือ (1) assimilatory และ (2) dissimilatory ซึ่งปฏิกิริยารีดักชันของไนเตรทแบบ assimilatory คือการแปลงไนเตรทให้เป็นแอมโมเนีย โดยเซลล์ในกระบวนการ biosynthesis และเกิดในกรณีที่ไม่มีแอมโมเนียในระบบ แต่มีไนเตรทเพียงรูปเดียวที่เป็นไนโตรเจนที่สามารถนำไปใช้ ส่วนปฏิกิริยารีดักชันของไนเตรทแบบ

dissimilatory จะทำให้เกิดการสร้างแก๊สไนโตรเจนจากไนเตรท และเป็นตัวรับผิดชอบปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันของน้ำเสีย ผลของออกซิเจนที่มีต่อปฏิกิริยาของเอมไซม์ขึ้นอยู่กับชนิดของแบคทีเรียที่เกี่ยวข้อง จากการพิจารณาปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์และปฏิกิริยาของเอมไซม์ที่รับผิดชอบดีไนตริฟิเคชัน เห็นพ้องกันโดยทั่วไปว่า ระดับออกซิเจนควรเข้าใกล้ศูนย์ เพื่อให้ระบบทำงานมีประสิทธิภาพ

ขั้นตอนรีดักชันของไนเตรท แสดงได้ดังนี้



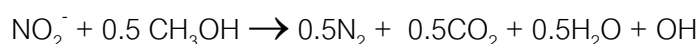
ผลผลิตสุดท้ายของปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันจะอยู่ในรูปแก๊สไนโตรเจน (N_2) ซึ่งปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อชนิดของผลผลิตสุดท้ายที่สร้างขึ้นคือ ชนิดของจุลินทรีย์และค่าพีเอชของตัวกลาง ซึ่งค่าพีเอชที่ต่ำกว่า 7.3 จะทำให้เกิด N_2O ที่เพิ่มขึ้น (Wijler and Delwiche, 1954 อ้างถึงใน ธีระ เกรอต, 2539) อย่างไรก็ตามโดยทั่วไป N_2 จะเป็นผลผลิตหลักที่สร้างขึ้นโดยกลุ่มจุลินทรีย์ผสมที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย (Johnson and Schroepfer, 1964 อ้างถึงใน ธีระ เกรอต, 2539)

กระบวนการดีไนตริฟิเคชันจะทำงานตรงกันข้ามกับระบบบำบัดส่วนใหญ่ เนื่องจากระบบส่วนใหญ่มีสารอินทรีย์เป็นตัวให้อิเล็กตรอน ซึ่งผู้ออกแบบต้องออกแบบให้ระบบมีการเติมออกซิเจน (ตัวรับอิเล็กตรอน) ในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างสมบูรณ์ของสารอินทรีย์เป็นเซลล์ของแบคทีเรียและคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งวัตถุประสงค์ของระบบดีไนตริฟิเคชันคือ การกำจัดตัวรับอิเล็กตรอน (ไนเตรท) ดังนั้น การออกแบบจำเป็นต้องมีปริมาณตัวให้อิเล็กตรอน(สารอินทรีย์)ที่นำไปใช้ได้เพียงพอ ซึ่งต้องพิจารณาความจำเป็นทั้งทางสโตอิชิโอเมตริกและจลนพลศาสตร์ของระบบ

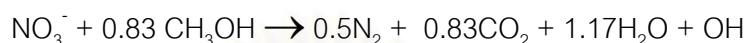
สารอินทรีย์ทั้งหมดที่เติมลงในถังปฏิกรณ์ดีไนตริฟิเคชันจะถูกแปลงเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ค่า $T_b\text{OD}$ ที่จำเป็นเพื่อรีดิวส์ไนเตรททั้งหมดให้เป็น N_2 เท่ากับ 2.86 เท่าของความเข้มข้นของไนเตรท อย่างไรก็ตาม มีสารอินทรีย์บางส่วนถูกเปลี่ยนเป็นเซลล์และการเกิดออกซิเดชันเกิดขึ้นที่ไม่สมบูรณ์ ดังนั้น ปริมาณสารอินทรีย์ที่จำเป็นในระบบจะต้องมีค่ามากกว่าค่าดังกล่าวเสมอ สารที่ให้yieldสูงจะใช้ในระบบปริมาณมาก ดังนั้นจึงควรใช้สารที่มีคาร์บอนเดี่ยว(single carbon) ที่มีyieldต่ำ เพราะต้องการพลังงานมากและจำเป็นสำหรับการสังเคราะห์เซลล์ จึงเหมาะที่จะเป็นตัวให้อิเล็กตรอน นอกจากนี้ ถ้าตัวให้อิเล็กตรอนมีสถานะที่ถูกรีดิวส์สูง จะมีค่า $T_b\text{OD}$ ต่อหน่วยมวลสูง ดังนั้น ปริมาณที่ต้องใช้เติมในระบบจะลดลง เมทานอล (CH_3OH) จึงเป็นสารประกอบคาร์บอนเดี่ยวที่ถูกรีดิวส์สูง ($T_b\text{OD} = 1.5$ ก.ก.) ที่ถูกแนะนำให้นำมาใช้ เพราะหาง่าย มีคุณภาพไม่เปลี่ยนแปลงราคาถูก และมีค่าyieldต่ำ (McCarty et al, 1969 อ้างถึงใน ธีระ เกรอต, 2539) จึงเป็นสารที่ถูกเลือก

มาใช้ เมื่อจำเป็นต้องเติมตัวให้อิเล็กตรอนภายนอกในระบบ ในกรณีมีสารอินทรีย์ในระบบไม่เพียงพอ โดยมีการทำปฏิกิริยา ดังสมการดังต่อไปนี้

ปฏิกิริยาแบบง่ายเป็นดังนี้



ปฏิกิริยารวม



ทำให้เป็นจำนวนเต็ม



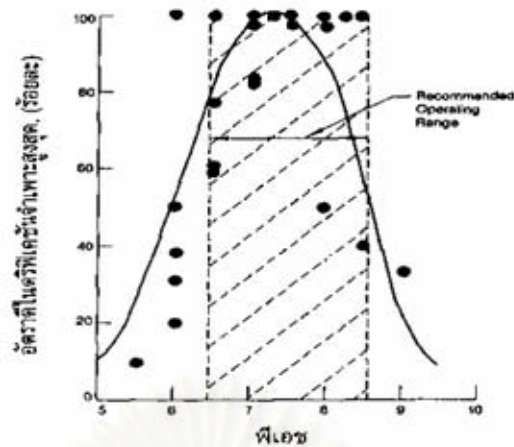
ซึ่งในปฏิกิริยามีการผลิต 1 สมมูลของสภาพต่างต่อ 1 สมมูลของไนเตรทที่ลดลง เท่ากับ 3.57 กรัม เทียบกับ CaCO_3 ของสภาพต่างที่ผลิตต่อกรัมของไนเตรทที่ลดลง

2.5.1 สภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อดีไนตริฟิเคชัน

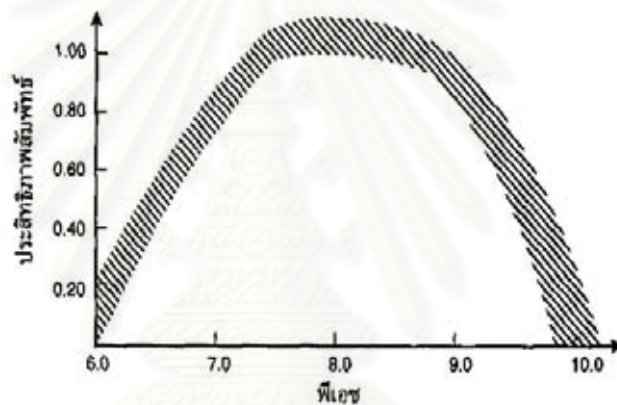
พารามิเตอร์ที่สำคัญต่ออัตราของดีไนตริฟิเคชัน ได้แก่ ค่าพีเอช ปริมาณดีไอ อุณหภูมิ ความเค็ม आयुस्लद्ध् ความเข้มข้นของไนโตรเจน และอัตราส่วนซีไอดีต่อไนเตรท เป็นต้น

ก) ค่าพีเอช

ในกระบวนการดีไนตริฟิเคชันจะเกิดการผลิตสภาพต่างขึ้นมาได้ จึงทำให้ค่าพีเอชมีค่าสูงขึ้น ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับดีไนตริฟิเคชันแบคทีเรีย คือ 6.5 – 8.5 (ดังรูปที่ 2.12) (Henze และคณะ, 1997 อ้างถึงใน ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544) โดยให้ค่าพีเอชในช่วง 7 – 9 เป็นค่าพีเอชในช่วงที่เหมาะสม (ดังรูปที่ 2.13) ถ้าค่าพีเอชลดลงต่ำ เช่น มีค่าต่ำกว่า 7 จะเกิดไนตรัสออกไซด์ (N_2O) เป็นผลสุดท้ายของปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันแทนที่จะเป็นก๊าซไนโตรเจน (N_2) ซึ่งไม่สมควรให้เกิดเพราะก๊าซไนตรัสออกไซด์เป็นภัยต่อสิ่งแวดล้อมโดยรวม แต่ถ้าค่าพีเอชมีค่ามากกว่า 9 ไนตรัสออกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซไนโตรเจน (Bremner and Shaw; 1958, Nommick; 1956, Wiljer and Delwiche, 1954 อ้างถึงใน ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544) ส่วนก๊าซไนตริกออกไซด์ (NO) ซึ่งเป็นก๊าซที่มีพิษรุนแรง ซึ่งมักไม่เกิดขึ้นในระบบจริง (Pichinoty และคณะ, 1977 อ้างถึงใน ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)



รูปที่ 2.12 ผลของพีเอชต่ออัตราดีไนตรifikasi เค้นน้ำเฉพาะสูงสุด (WEF, 1998b อ้างถึงใน ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)



รูปที่ 2.13 เปรียบเทียบประสิทธิภาพดีไนตรifikasi เค้นน้ำที่ค่าพีเอชที่ต่างกัน (Henze และคณะ, 1997 อ้างถึงใน ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

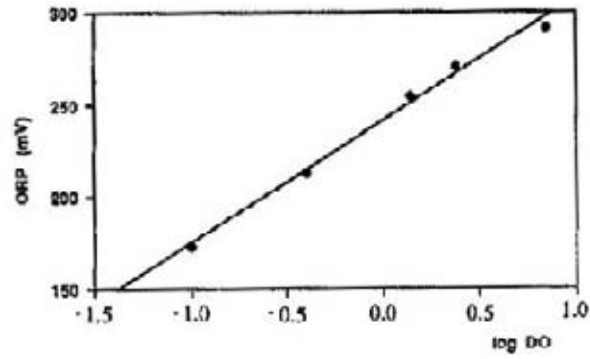
ข) ออกซิเจน

ปฏิกิริยารีดอกซ์ของสารอาหารในเซลล์ เมื่อมีออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนจะให้พลังงานสูงกว่าเมื่อมีไนเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ดังนั้น หากในระบบมีออกซิเจนอยู่คู่กับไนเตรทแบคทีเรียจะเลือกใช้ออกซิเจนก่อนการใช้นิเตรท ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองคาร์บอนอินทรีย์ไปจนอาจเหลือไม่พอสำหรับกระบวนการดีไนตรifikasi ที่สมบูรณ์ จึงควรพึงระวังมิให้ออกซิเจนมารบกวนในกระบวนการ โดยค่าออกซิเจนละลายน้ำหรือดีไอหากมีมากกว่า 0.2 มก./ล. จะสามารถยับยั้งดีไนตรifikasi ของ ซูโดโมนาส (Skerman and MacRac, 1957; Terai และ Mori, 1975 อ้างถึงใน ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544) และของแอคติเวทเต็ดสลัดจ์ได้ (Dewsen and Murphy, 1972 อ้างถึงใน ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544) ทั้งนี้ดีไอที่กล่าวถึง หมายถึงค่าดีไอในมวลของน้ำ ไม่ใช่ในฟล็อก แต่ถ้าดีไอลดลงเมื่อผ่านเข้าไปในฟล็อก และลดลงจนเกิดสถานะแอนน็อกซิกในฟล็อก กระบวนการดีไนตรifikasi ก็สามารถเกิดขึ้นต่อไปได้โดยไม่ถูกยับยั้งจากออกซิเจนในน้ำ

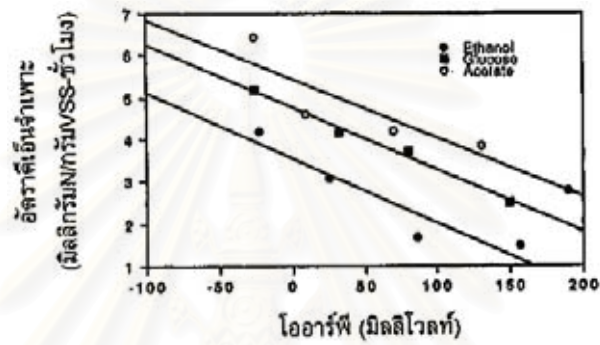
ค) ไออาร์พี

เมื่อทราบแล้วว่าออกซิเจนอิสระมีผลเสียต่อดีไนตริฟิเคชัน กล่าวคือ ค่าดีไอที่เริ่มยับยั้งกระบวนการดีไนตริฟิเคชันมีค่าเท่ากับประมาณ 0.2 มก./ล. (Kowles, 1982 อ้างถึงใน ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544) ดังนั้น จึงควรจัดให้กระบวนการหรือปฏิกิริยามีค่าดีไอต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่เครื่องวัดดีไอที่มีจำหน่ายและใช้ในเชิงปฏิบัติในปัจจุบัน มีขีดจำกัดที่ไม่สามารถวัดดีไอที่ความเข้มข้นต่ำมาก ๆ ได้ จึงได้มีผู้พยายามหาพารามิเตอร์อื่นมาทดแทน เพื่อนำมาควบคุมระบบ (Lefevre et al, 1993; Lie and Wilander, 1994 อ้างถึงใน ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544) รูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดีไอและไออาร์พี ในการทดลองแบบแบตช์ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียสกับตะกอนสลัดจ์จากระบบตะกอนเร่ง ในประเทศสวีเดน ซึ่งเห็นได้ว่า แม้จะมีตะกอนสลัดจ์อยู่ในถังทดสอบ แต่ความสัมพันธ์ดังกล่าวก็เป็นเส้นตรงที่ดีมาก เมื่อได้ทดลองกับไนเตรทกลับพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างไออาร์พีกับไนเตรทไม่เป็นรูปแบบที่สรุปได้แน่นอน

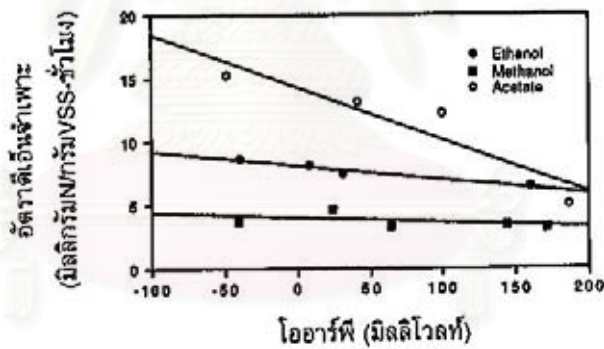
เมื่อทดลองกับสลัดจ์จากโรงบำบัดคนละแห่ง และใช้แหล่งคาร์บอนต่างกัน ได้แก่ เอทานอล กลูโคส และอะซิเตต พบว่า อัตราของดีไนตริฟิเคชันจำเพาะส่วนใหญ่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับไออาร์พี ยกเว้นบางกรณีที่มีความสัมพันธ์ดังกล่าวไม่ดีเท่ากับกรณีอื่น ๆ ดังรูปที่ 2.15 ก, ข และ ค ดังนั้นการใช้ไออาร์พีสามารถเป็นตัวกำหนดหรือควบคุมการดีไนตริฟิเคชันแทนค่าดีไอ และควรมีค่าไออาร์พีให้อยู่ในช่วง -50 ถึง -150 มิลลิโวลท์สำหรับสภาวะแอนน็อกซิก ซึ่งต้องระวังมิให้มีค่าต่ำเกินไปมิฉะนั้นจะหมายถึงกระบวนการทำงานเป็นแบบแอนแอโรบิก แทนที่จะเป็นแอนน็อกซิก (Lefevre et al, 1993 อ้างถึงใน ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544) สิ่งที่น่าสนใจอีกประการคือ แม้ความสัมพันธ์จะเป็นเส้นตรงดังว่า แต่ความสัมพันธ์นั้นก็เป็นเรื่องเฉพาะ สำหรับสารอาหารนั้น ๆ และสลัดจ์นั้น ๆ จะใช้เข้าข่ายหรือคร่อมไปมาระหว่างกันไม่ได้ ดังนั้นหากโรงบำบัดน้ำเสียต้องการนำมาตรการนี้ไปใช้ ก็ต้องพัฒนาหาความสัมพันธ์ดังกล่าวขึ้นมาเป็นของตัวเอง ซึ่งวิศวกรชาวฝรั่งเศสได้นำเทคนิคนี้มาใช้ในการควบคุมระบบกำจัดไนโตรเจนแบบเวลาจริง(real-time) ในโรงบำบัดน้ำเสียจริงขนาด 16,000 คน พบว่า เมื่อปรับหรือแก้ไขข้อมูลการควบคุมรวมทั้งปรับแต่งจนได้ที่แล้ว เทคนิคนี้ใช้งานได้ดีและเป็นประโยชน์มาก (Wouters – Wasial et al, 1994 อ้างถึงใน ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)



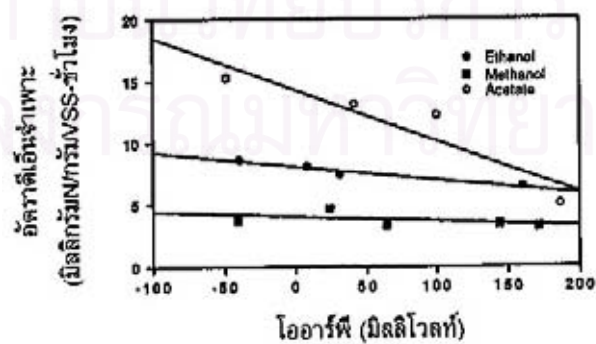
รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างดีโอกับโออาร์พีเมื่อมีสลัดจ์ตะกอนเร่ง (Lie และ Wilander, 1994 อ้างถึงใน ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)



ก) สลัดจ์จากโรงบำบัด A



ข) สลัดจ์จากโรงบำบัด B

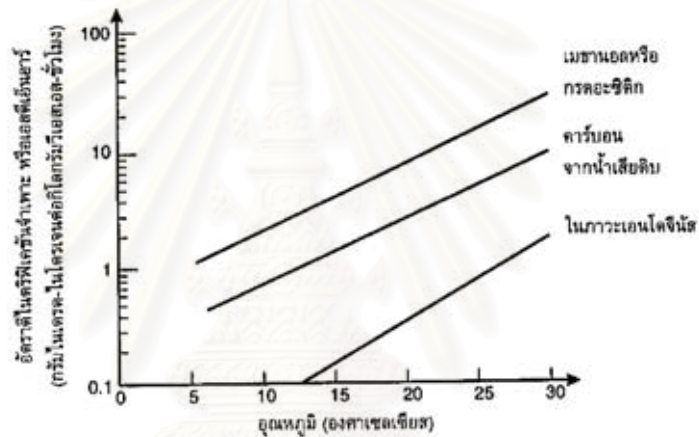


ค) สลัดจ์จากโรงบำบัด C

รูปที่ 2.15 อัตราดีเอ็นเอจำเพาะกับโออาร์พี โดยใช้สารอาหารต่างกัน (Lie และ Wilander, 1994 อ้างถึงใน ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

ง) อุณหภูมิ

ดีไนตริฟายเออร์มีความไวต่ออุณหภูมิ และแม้ว่าจะโตได้ดีที่อุณหภูมิในช่วง 5 – 25 องศาเซลเซียส (WEF, 1998a อ้างถึงใน ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544) แต่สามารถทำงานได้ดีกว่าที่อุณหภูมิมากกว่า 20 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 2.16 ซึ่งไม่เป็นปัญหาสำหรับภูมิอากาศในประเทศไทย เพราะ ในเขตกรุงเทพมหานคร ช่วงเดือนที่มีอากาศเย็นจัดติดต่อกันนานหลายวัน มีอุณหภูมิน้ำลดต่ำลงเพียงประมาณ 20 องศาเซลเซียส ส่วนเชียงใหม่ซึ่งมีอากาศหนาวเย็นกว่ากรุงเทพมหานคร อุณหภูมิวิกฤตของน้ำในหน้าหนาวเท่ากับ 19 – 20 องศาเซลเซียสเท่านั้น (ข้อมูลปลายปี พ.ศ. 2542) ค่าอุณหภูมียังมีผลต่ออัตราดีไนตริฟิเคชัน กล่าวคือ ถ้าเพิ่มอุณหภูมิในถังปฏิกรณ์ ระบบก็จะสามารถทำให้อัตราดีไนตริฟายได้ดีขึ้น โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณหนึ่งเท่าทุก ๆ อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสที่เพิ่มขึ้นในช่วง 5 – 25 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.16 อัตราดีไนตริฟิเคชันจำเพาะที่อุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อใช้สารอาหารต่างกัน (Henze และคณะ, 1997 อ้างถึงใน ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

จ) ความเค็ม

ความเค็มในรูปของโซเดียมคลอไรด์มีผลต่อดีไนตริฟายเออร์อยู่บ้าง โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลง (หรือซ็อก) ของคลอไรด์อย่างรวดเร็ว Panswad และ Anan (1999) (อ้างถึงใน ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544) ได้ทำการศึกษากิจกรรมของเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อระบบแอนแอโรบิก/แอนนออกซิก/แอโรบิก โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์ที่ไม่ขึ้น (หน่วยบำบัด A) และขึ้น (หน่วยบำบัด B) ต่อเกลือมาก่อน พบว่า จุลินทรีย์ทั้งชนิดเฮเทอโรทรอพอโตโทรฟิกไนตริฟายเออร์ และเฮเทอโรโทรฟิกดีไนตริฟายเออร์ ล้วนสามารถปรับตัวเข้ากับความเค็มได้สูงถึง 30,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและไนโตรเจนลดลงเพียงร้อยละ 27 และ 18 ตามลำดับ และผลกระทบที่มีต่อเฮเทอโรทรอพอติกนั้นมีมากกว่าออโตทรอพอติกและดีไนตริฟายเออร์ รายละเอียดตามตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 การทำงานของระบบกำจัดไนโตรเจนที่คลอไรด์ความเข้มข้นต่างๆ

(Panswad และ Anan , 1999a อ้างถึงใน ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

| พารามิเตอร์ | หน่วยบำบัด A (ไม่มีหัวเชื้อขินความเค็ม) (กรัมNaCl/ลิตร) | | | | | หน่วยบำบัด B (มีหัวเชื้อขินความเค็ม) (กรัมNaCl/ลิตร) | | | |
|--------------------------|--|-------|-------|-------|-------|---|-------|-------|-------|
| | 0 | 5 | 10 | 20 | 30 | 5 | 10 | 20 | 30 |
| ที่สถานะคงตัว | | | | | | | | | |
| เอ็มแอลเอสเอส(มก./ล) | 2,600 | 2,500 | 2,600 | 2,100 | 1,600 | 2,030 | 2,200 | 2,500 | 2,080 |
| เอสวีไอ | 68 | 65 | 61 | 63 | 68 | 52 | 66 | 74 | 72 |
| กำจัดซีไอดี (%) | 94 | 85 | 84 | 74 | 59 | 97 | 87 | 84 | 44 |
| กำจัดทีเอ็น (%) | 97 | 94 | 95 | 81 | 73 | 98 | 87 | 95 | 90 |
| ที่ภาวะช็อก | | | | | | | | | |
| เอ็มแอลเอสเอส(มก./ล) | 1,700 | 1,800 | 2,500 | 2,000 | 1,500 | 1,700 | 2,300 | 2,000 | 2,180 |
| เอสวีไอ | 70 | 80 | 55 | 48 | 60 | 40 | 60 | 80 | 62 |
| กำจัดซีไอดี (%) | 57 | 50 | 50 | 40 | 36 | 76 | 76 | 46 | 40 |
| กำจัดทีเอ็น (%) | 50 | 70 | 69 | 51 | 43 | 73 | 68 | 68 | 47 |
| หลังการฟื้นฟูสภาพ | | | | | | | | | |
| เอ็มแอลเอสเอส(มก./ล) | 1,800 | 1,700 | 2,000 | 1,800 | 1,400 | 1,400 | 1,800 | 2,100 | 2,000 |
| เอสวีไอ | 77 | 80 | 80 | 50 | 71 | 80 | 75 | 85 | 68 |
| กำจัดซีไอดี (%) | 92 | 70 | 70 | 62 | 58 | 98 | 83 | 60 | 60 |
| กำจัดทีเอ็น (%) | 70 | 56 | 68 | 68 | 65 | 80 | 77 | 80 | 71 |

ฉ) อายุสลัดจ์

เมื่ออายุสลัดจ์เพิ่มขึ้น การผลิตเซลล์สุทธิลดลง ดังนั้นปริมาณคาร์บอนที่ต้องการสำหรับดีไนตริฟายจะลดลง นอกจากนี้ถ้าอายุสลัดจ์ในถังแอนน็อกซิกเพิ่มขึ้น อัตราดีไนตริฟิเคชันจำเพาะลดลงด้วย ทั้งนี้ ถ้าววมเอาถังเดิมอากาศที่มีไว้สำหรับการไนตริฟิเคชันด้วยแล้ว การเพิ่มอายุสลัดจ์(รวม) จะทำให้การกำจัดไนโตรเจนโดยรวมดีขึ้นเพราะหากไม่มีไนตริฟิเคชันมาก่อนแล้ว ก็จะทำให้ไม่สามารถเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันขึ้นได้

ช) ไนไตรท์

ไนไตรท์ที่พบในระบบส่วนมาก จะในรูปแบบของกรดไนตริก (HNO_2) อิศระกล่าวคือ ไม่แตกตัวเป็นไอออน ซึ่งสามารถยับยั้งดีไนตริฟิเคชันได้ที่ความเข้มข้นเพียง 0.13 มก./ล. แต่ที่ความเข้มข้นนี้ โดยมีค่าพีเอชในช่วง 6 – 8 จะเทียบเท่าเป็นไนไตรต์ในรูปแบบแตกตัวเป็นไอออนเท่ากับ 100 มก.ไนไตรต์/ล. แต่ผลกระทบของไนไตรต์ต่อดีไนตริฟายอิงแบคทีเรีย จึงยังไม่มีมากในงานปฏิบัติการภาคสนามจริง แต่ถ้ามีสารพิษอื่นๆ มาทำให้ไนโตรแบคทีเรียไม่ทำงานหรือทำงานช้าลง ก็อาจมีปริมาณไนไตรต์สะสมมากขึ้นจนเป็นอันตรายต่อระบบได้

ข) อัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจน

ในการดีไนตริฟิเคชัน แบคทีเรียซึ่งเป็นชนิดเฮเทโรโทรปเป็นส่วนใหญ่ต้องใช้คาร์บอนเป็นองค์ประกอบหรือเป็นแหล่งพลังงานในการทำงาน อัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนจึงมีความสำคัญต่อกระบวนการนี้ โดยทฤษฎีแล้วอัตราส่วนนี้เท่ากับ 5 – 10 แต่ว่าเป็นน้ำเสียยุโรปหรืออเมริกา ในทางปฏิบัติแล้วอัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนในโตรเจนควรเท่ากับ 3 – 7 เป็นอย่างน้อย ซึ่งตารางที่ 2.5 เป็นการสรุปชนิดและปริมาณสารอาหารหรือแหล่งพลังงานที่สามารถนำมาใช้ในกลไกนี้ได้ โดยวิศวกรควรให้ความสนใจเป็นพิเศษกับการใช้สารอินทรีย์ในสลัดจ์ และน้ำเสียโดยเฉพาะอย่างยิ่ง น้ำเสียจากโรงผลิตสุราหรือเบียร์ เพราะไม่ต้องเสียค่าใช้จ่าย หากไม่สามารถหาคาร์บอนมาใช้ในระบบได้พอ สามารถใช้เมทานอลหรือกรดอะซิติกเป็นแหล่งคาร์บอนเสริมจากภายนอก อนึ่ง แม้ว่าค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนจะอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ก็ตาม แต่อัตราส่วนนี้ มีค่าไม่แน่นอนตลอดเวลา โดยสามารถแปรผันตามเวลาในแต่ละวันหรือตามวันในแต่ละสัปดาห์ ฯลฯ ซึ่งทำให้น้ำทิ้งไม่ได้มาตรฐานในบางขณะได้ ดังนั้นหากต้องการผลิตน้ำทิ้งให้ได้คุณภาพน้ำดีตลอดเวลา ก็จำเป็นต้องมีการเติมสารอาหารคาร์บอนจากภายนอกด้วย ซึ่งด้วยวิธีการเช่นนี้จะให้ผลดีเป็นที่น่าพอใจมาก (Lie and Wilander, 1994; Saacs et al, 1994 อ้างถึงใน ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

ตารางที่ 2.5 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ที่เหมาะสมสำหรับสารอินทรีย์ต่างๆ ในปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน (Henze และคณะ, 1997 อ้างถึงใน ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

| สารอินทรีย์ | C/N ที่เหมาะสม | หน่วย |
|-------------------|----------------|---------------------------|
| น้ำเสียชุมชนยุโรป | 3 – 3.5 | กรัมบีโอดีต่อกรัมไนโตรเจน |
| | 4 – 5 | กรัมซีโอดีต่อกรัมไนโตรเจน |
| สลัดจ์ | 1.5 – 2.5 | กรัมบีโอดีต่อกรัมไนโตรเจน |
| | 2.9 – 3.2 | กรัมซีโอดีต่อกรัมไนโตรเจน |
| เมทานอล | 2.3 – 2.7 | กรัม MeOH ต่อกรัมไนโตรเจน |
| | 3.5 – 4.1 | กรัมซีโอดีต่อกรัมไนโตรเจน |
| | 1.0 – 1.2 | โมล MeOH ต่อโมลไนโตรเจน |
| กรดอะซิติก | 2.9 – 3.5 | กรัม HAc ต่อกรัมไนโตรเจน |
| | 3.1 – 3.7 | กรัมซีโอดีต่อกรัมไนโตรเจน |
| | 0.9 – 1.1 | โมล HAc ต่อโมลไนโตรเจน |

2.6 ซัลเฟต

2.6.1 วัฏจักรซัลเฟอร์ทางชีวภาพ (The biological Sulfur Cycle)

ธาตุซัลเฟอร์เป็นธาตุในหมู่ที่ 6 ของตารางธาตุ เมื่ออยู่ในรูปสารประกอบจะมีระดับเลขออกซิเดชันอยู่ระหว่าง -2 ถึง +6 และค่าที่สำคัญคือ -2, 0, +2, +4 และ +6 ในทางเคมีซัลเฟตและซัลไฟด์จัดว่าเป็นสารประกอบของธาตุซัลเฟอร์รูปที่มีความคงตัวดีที่สุด เนื่องจากมีระดับเลขออกซิเดชันสูงสุดและต่ำที่สุดซึ่งเท่ากับ +6 และ -2 ตามลำดับ โดยตารางที่ 2.6 แสดงระดับเลขออกซิเดชันของตัวอย่างชนิดของธาตุซัลเฟอร์และสารประกอบของธาตุซัลเฟอร์ ที่พบในธรรมชาติ ตารางที่ 2.6 ระดับเลขออกซิเดชันของตัวอย่างชนิดธาตุซัลเฟอร์และสารประกอบของธาตุซัลเฟอร์ (Madigan, Martinko และ Parker 2003 อ้างถึงใน อนุตร เปียงแก้ว, 2542)

| รูปของธาตุหรือสารประกอบซัลเฟอร์ | | ระดับเลขออกซิเดชัน |
|---------------------------------|----------------------------------|--------------------|
| สารอินทรีย์ซัลเฟอร์ | Organic S (R-SH) | -2 |
| รูปซัลไฟด์ | Sulfide (H_2S) | -2 |
| ธาตุซัลเฟอร์ | Elemental sulfur (S^0) | 0 |
| ไทโอซัลเฟต | Thio sulfate ($S_2O_3^{2-}$) | +2 |
| เตตระไทโอเนต | Tetra thionate ($S_4O_6^{2-}$) | +2.5 |
| ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ | Sulfur dioxide (SO_2) | +4 |
| รูปซัลไฟท์ | Sulfite (SO_3^{2-}) | +4 |
| ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ | Sulfur trioxide (SO_3) | +6 |
| ซัลเฟต | Sulfate (SO_4^{2-}) | +6 |

แหล่งของธาตุซัลเฟอร์และสารประกอบของธาตุซัลเฟอร์ ในธรรมชาติพบได้ในหลายรูปแบบเป็นรูปแบบแร่ต่าง ๆ ที่อยู่ใต้ดิน เช่น แร่ธาตุซัลเฟอร์บริสุทธิ์ Elemental sulfate (S^0), แร่ยิปซัม Gypsum ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), แร่ไพไรต์ Pyrite (FeS_2), เป็นส่วนผสมที่ไม่ต้องการในถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ และน้ำมันปิโตรเลียม เป็นต้น การระเบิดภูเขาไฟเป็นต้นเหตุสำคัญอย่างหนึ่งในการปลดปล่อยสารซัลเฟอร์สู่บรรยากาศ ที่อยู่ในรูปก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์(SO_2) ซึ่งอาจทำให้เกิดปรากฏการณ์ฝนกรดตามมา รวมทั้งซัลไฟด์ในรูปแบบต่างๆ ขณะที่ไอออนซัลเฟต (SO_4^{2-}) เป็นแอนไอออนที่สำคัญพบได้ทั้งในน้ำทะเลและแหล่งน้ำจืด และในทางอุตสาหกรรม กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) มีบทบาทที่สำคัญในกระบวนการผลิตของโรงงานหลายประเภท กิจกรรมของมนุษย์และปรากฏการณ์ ธรรมชาติเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเคลื่อนย้าย และเปลี่ยนรูปของสารประกอบซัลเฟอร์ต่างๆ อยู่ตลอดเวลา ในทางชีวภาพซัลเฟอร์เป็นธาตุที่มีความสำคัญกับสิ่งมีชีวิต ทุกชนิด

เป็นองค์ประกอบของเซลล์ เอนไซม์ และโปรตีนต่างๆ สารประกอบของซัลเฟอริในรูปแบบออกไซด์หลายชนิด ทำหน้าที่เป็นสารรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย ในกระบวนการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนอิสระของจุลชีพบางกลุ่ม และในทางกลับกัน สารประกอบของซัลเฟอริในรูปแบบรีดิวซ์บางรูปก็จะถูกใช้เป็นสารให้อิเล็กตรอนสำหรับการดำรงชีพของจุลชีพบางกลุ่มได้เช่นเดียวกัน

3.6.2 แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต

แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเป็นแบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจนชนิดเด็ดขาด (obligate anaerobe) จัดอยู่ในกลุ่มของแบคทีเรียชนิดเคโมเฮเทอโรทรอป ซึ่งดำรงชีวิตและเติบโตโดยได้รับพลังงานจากปฏิกิริยาทางเคมีในการย่อยสลายสารอินทรีย์ซึ่งเป็นแหล่งคาร์บอนของแบคทีเรียประเภทนี้ ลักษณะเด่นของแบคทีเรียกลุ่มนี้ คือ ความสามารถในการรีดิวซ์สารประกอบของแบคทีเรีย ที่ถูกออกซิไดซ์ เช่น ซัลเฟต ซัลไฟท์ ไธโอซัลเฟต เป็นต้น โดยทำให้เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของซัลไฟด์ เนื่องจากแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจะใช้ซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายในการออกซิไดซ์ สารประกอบอินทรีย์หลายชนิด เช่น กรดอินทรีย์ กรดไขมัน และแอลกอฮอล์ หรือไฮโดรเจนโมเลกุลได้ เนื่องจากมีความสามารถในการสร้างเอนไซม์ hydrogenase แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตสามารถแบ่งออกได้เป็น 10 genera และสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ตามความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อการดำรงชีพและเจริญเติบโต คือ

- 1) แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตชนิดย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ไม่สมบูรณ์ (Incompletely Oxidizing Sulfate Reducing Bacteria; I-SRB) โดยสารอินทรีย์ที่เหลือจากการย่อยสลายคือ อะซิเตต
- 2) แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างสมบูรณ์ (Completely Oxidizing Sulfate Reducing Bacteria; C-SRB) โดยสารอินทรีย์จะถูกย่อยสลายอย่างสมบูรณ์จนได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต สามารถใช้สารอาหารที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนได้หลายชนิด โดยแลคเตตและไพรูเวตถูกใช้มากที่สุด โดยแบคทีเรียกลุ่ม I-SRB หลาย species สามารถใช้ มาเลต ฟอर्मेट และ primary alcohol (เช่น เมทานอล โพรพานอล และ บิวทานอล) ได้ และบางสายพันธุ์ (strains) ของ Desulfotomaculum สามารถใช้กลูโคสได้ แต่พบได้ค่อนข้างยากสำหรับแบคทีเรียกลุ่ม C-SRB สามารถใช้กรดไขมัน แลคเตต ซัลซิเนต และแม้แต่นิโคเตตได้ โดยจะย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ จนได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ขณะที่แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต Genera Desulfosarcina Desulfotomaculum Desulfovibrio มีการเจริญเติบโตแบบ lithotropic ได้เช่นกัน กล่าวคือ สามารถใช้ไฮโดรเจนเป็นสารให้อิเล็กตรอน ใช้ซัลเฟตเป็นสารรับอิเล็กตรอน และใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน

การที่กลุ่ม I-SRB ต้องปล่อยอะซิเตตออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ จากการย่อยสลาย สารอินทรีย์ รวมทั้งยังไม่สามารถนำอะซิเตตไปใช้ได้ แม้ว่าจะเป็นสารอาหารที่มีอยู่เพียงประเภท เดียวก็ตาม มีสาเหตุเนื่องมาจาก I-SRB ขาดกลไกที่เกี่ยวข้องกับการจัดการเอนไซม์บางชนิดที่มี บทบาทต่อการย่อยอะซิเตตนั่นเอง อย่างไรก็ตาม I-SRB อาจใช้อะซิเตตเป็นแหล่งคาร์บอนได้ เมื่อสารให้อิเล็กตรอนที่ใช้คือ ไฮโดรเจนหรือฟอร์มेट ข้อแตกต่างอีกประการหนึ่งของแบคทีเรีย รีดิวิซัลเฟตทั้งสองกลุ่มนี้คือ เมื่ออยู่ในสภาพที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแต่ละกลุ่ม พบว่า กลุ่มของ I-SRB มักมีอัตราการเจริญเติบโตที่เร็วกว่ากลุ่ม C-SRB

นอกเหนือจากการใช้ซัลเฟตแล้ว แบคทีเรียรีดิวิซัลเฟตหลายชนิดยังสามารถใช้ ไนเตรทเป็นสารรับอิเล็กตรอน โดยผลของการรีดิวิซัลเฟตเกิดเป็นแอมโมเนีย และยังสามารถใช้สารอินทรีย์บาง ชนิดเพื่อใช้ในการสร้างพลังงานโดยผ่านทาง fermentative pathways ในกรณีที่ไม่มีซัลเฟต หรือ สารรับอิเล็กตรอนชนิดอื่นที่เหลืออยู่ โดยสารอินทรีย์ดังกล่าวที่ใช้มาก คือ ไพรูเวท ซึ่งถูกเปลี่ยน ผ่านปฏิกิริยา phosphoclastic ไปเป็นอะซิเตต, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน สำหรับ กรณีที่สารอินทรีย์เป็นแลคเตตหรือเอทานอล พลังงานที่ได้จากเฉพาะปฏิกิริยาทาง fermentative pathway จะไม่เพียงพอ ปฏิกิริยาดังกล่าวจะไม่เกิดขึ้น แต่สามารถเกิดขึ้นได้ ถ้าก๊าซไฮโดรเจนที่ เกิดขึ้นถูกใช้ไปในทันทีโดยแบคทีเรียผลิตมีเทนหรือแบคทีเรียรีดิวิซัลเฟตที่ใช้ไฮโดรเจน เป็นต้น อย่างไรก็ตาม หากเปรียบเทียบกับปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันตามปกติ พลังงานที่ได้จากปฏิกิริยา ซัลเฟตรีดักชันจะมีค่าสูงกว่ามาก

2.6.3 ปัจจัยทางสภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อแบคทีเรียรีดิวิซัลเฟต

ก) อุณหภูมิ

โดยทั่วไปแบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจนจะสามารถเจริญเติบโตได้ใน 2 ช่วงอุณหภูมิ คือ 30 - 40 องศาเซลเซียส ซึ่งจัดอยู่ในประเภทมีโซฟิลิกแบคทีเรีย (Mesophilic Bacteria) และ 45 - 55 องศาเซลเซียส ซึ่งจัดอยู่ในประเภทเทอร์โมฟิลิกแบคทีเรีย (Thermophilic Bacteria)

สำหรับแบคทีเรียรีดิวิซัลเฟตที่ได้จากการเลี้ยงกลุ่มเชื้อบริสุทธิ์ (pure culture) โดยส่วนใหญ่ มีช่วงของอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตในช่วงเดียวกัน คือ 30 - 40 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีผลต่อการทำงานของแบคทีเรียรีดิวิซัลเฟตเป็นอย่างมาก โดยมีรายงานที่พบว่า การเกิดซัลเฟตรีดักชันของตะกอนดินน้ำเค็มลดลง 2 - 3.9 เท่าเมื่ออุณหภูมิ เปลี่ยนไปจากช่วงที่เหมาะสม 10 องศาเซลเซียส

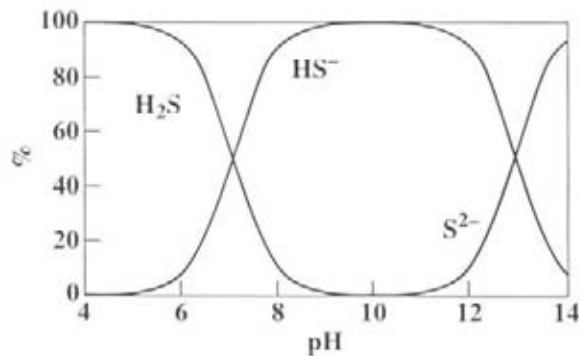
ข) ความต้องการเกลือและความคงทนต่อเกลือ

ความต้องการเกลือของแบคทีเรียรีดิวิซัลเฟตขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา ของแบคทีเรีย รีดิวิซัลเฟต ซึ่งแยกเป็นพวกที่ได้จากแหล่งน้ำเค็มหรือแหล่งน้ำกร่อยกับพวกที่ได้จากแหล่งน้ำจืด

แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจากแหล่งน้ำเค็มหรือน้ำกร่อย มักต้องการปริมาณเกลือในระดับหนึ่งจึงจะเจริญเติบโตได้ดี และทางตรงกันข้ามถ้าแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตกลุ่มนี้มาเลี้ยงในตู้กลางน้ำจืดก็จะได้ผลทางลบต่อการเจริญเติบโต ชนิดและปริมาณของเกลือที่เหมาะสมสำหรับแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต คือ โซเดียมคลอไรด์ 20 ก./ล. และแมกนีเซียมคลอไรด์ 1.5 ก./ล. นอกเหนือจากเกลือ 2 ชนิดนี้แล้ว บางสายพันธุ์ยังต้องการแคลเซียมคลอไรด์เพิ่มอีกที่ความเข้มข้นอย่างต่ำ 0.5 ก./ล. และปริมาณความต้องการเกลือที่จำเป็น จะลดลงสำหรับกลุ่มที่มาจากแหล่งน้ำกร่อย เช่น แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจากแหล่งน้ำจืด อาจถูกยับยั้งการเจริญเติบโตได้ ถ้าในตู้กลางมีโซเดียมคลอไรด์ในระดับความเข้มข้นเท่าที่มีอยู่ในน้ำทะเล (ประมาณ 27 ก./ล.) อย่างไรก็ตามมีรายงานถึงความสามารถในการปรับตัวของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจากแหล่งน้ำจืดบางสายพันธุ์ ซึ่งสามารถทนอยู่ในตู้กลางที่มีระดับความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูงเท่ากับในระดับความเข้มข้นในน้ำทะเล และบางพวกจะสามารถปรับตัวให้อยู่ได้ทั้งในระดับความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เท่ากับ 60 ก./ล. หรือแม้จะไม่มีโซเดียมคลอไรด์อยู่เลยก็ตาม

ค) ค่าพีเอช

ช่วงพีเอชที่เหมาะสมต่อแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจะอยู่ในค่าเป็นกลางคือ 7 และมักถูกยับยั้งเมื่อค่าพีเอชต่ำกว่า 6 หรือสูงกว่า 9 อย่างไรก็ตามพบว่า ปฏิริยาซัลเฟตรีดักชันสามารถเกิดขึ้นได้ในแหล่งน้ำขังจากเหมืองแร่ซึ่งมีค่าพีเอชในแหล่งน้ำประมาณ 3 – 4 แต่เมื่อนำแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจากแหล่งน้ำนี้มาเพาะเชื้อและทดสอบกลับพบว่า แบคทีเรียดังกล่าวจะถูกยับยั้งการเจริญเติบโตเมื่อมีค่าพีเอชต่ำกว่า 6 ทำให้เกิดข้อสันนิษฐานว่าแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตที่อยู่ในแหล่งน้ำของเหมืองแร่จะอาศัยอยู่ในช่องว่างหรือรูขนาดเล็กมาก (microniches) ซึ่งจะมีค่าพีเอชที่สูงขึ้นและเหมาะสมต่อการดำรงชีพมากกว่า โดยค่าพีเอชที่สูงขึ้นในช่องว่างขนาดเล็กที่มีแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตนี้อาศัยอยู่ อาจเกิดจากผลของปฏิริยาการออกซิไดส์สารอาหารของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาถึงปฏิริยาการย่อยสลายสารอาหารของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต พบว่า อาจเป็นปฏิริยาที่มีการให้ไฮโดรเจนไอออนเป็นปฏิริยาการสร้างบัพเฟอร์ เช่น ไบคาร์บอเนต หรือไบซัลไฟด์ เมื่อใช้ไฮโดรเจน หรืออะซิเตตเป็นสารอาหาร แต่เมื่อสารอาหารหรือสารอินทรีย์ไยยาว ผลของปฏิริยาการย่อยสลายสารอาหารจะผลิตไฮโดรเจนไอออนขึ้นมาทำให้ค่าพีเอชลดลงได้ อย่างไรก็ตามโดยภาพรวมเมื่อพิจารณาไฮโดรเจนไอออนร่วมกับไบคาร์บอเนต หรือไบซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิริยาซัลเฟตรีดักชัน สามารถมองได้ว่า ถ้าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือไฮโดรเจนซัลไฟด์ หนีออกจากตู้กลางได้ปฏิริยาซัลเฟตรีดักชันมักทำให้ค่าพีเอชสูงขึ้นเสมอ



รูปที่ 2.17 ผลของพีเอชที่มีต่อการละลายน้ำของซัลไฟด์ (Sawyer, McCarty และ Parkin, 2003 อ้างถึงใน อนุตร เปียงแก้ว, 2542)

ง) ความมีชีวิตรอดในสภาวะที่มีออกซิเจน

ถึงแม้ว่าแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจัดเป็นแบคทีเรียชนิดทนออกซิเจนไม่ได้ แม้จะมีปริมาณเพียงเล็กน้อยก็ตาม แต่ก็พบว่ายังดำรงชีวิตอยู่ได้เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีออกซิเจนอิสระอยู่ชั่วคราว และสามารถฟื้นตัวได้เมื่อกลับเข้าสู่สภาพไร้ออกซิเจน นอกจากนั้นพบว่าซัลไฟด์ที่อยู่ในตัวกลางมีบทบาทต่อผลกระทบของออกซิเจนที่มีผลต่อแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตบางสายพันธุ์ในลักษณะที่แตกต่างกัน ในกรณีที่มีซัลไฟด์พร้อมกับออกซิเจนมีผลกระทบทางลบมากกว่ากรณีที่มีออกซิเจนเพียงอย่างเดียว โดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต จินัส *Desulfovibrio* สามารถทนอยู่ในสภาวะที่มีออกซิเจนได้หลายชั่วโมงแต่ต้องไม่มีซัลเฟตอยู่ในตัวกลาง

จ) การเปลี่ยนรูปร่างลักษณะ : การจับกลุ่มของเซลล์และเซลล์ชนิดเส้นใย (Morphological adaptation : aggregating cells and glindin filaments)

การรวมกลุ่มของเซลล์แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต อาจเกิดจากการปรับตัวเพื่อรับกับสภาพที่ไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิต เช่น ค่าพีเอช อุณหภูมิ การมีสารให้อิเล็กตรอนหรือเกลือที่อยู่ในช่วงที่ไม่เหมาะสม หรือการมีออกซิเจนในตัวกลาง ในสภาวะดังกล่าวแบคทีเรียจะแสดงลักษณะผิดปกติ (morbid) เช่น เซลล์มีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากการบวมหรือหยุดการเคลื่อนที่จากเดิมที่เคลื่อนที่ได้ นอกจากสาเหตุจากการปรับตัวให้รับกับสภาพที่ไม่เหมาะสมแล้ว อาจเป็นลักษณะปกติที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตบางสายพันธุ์ อย่างไรก็ตามมีการพบว่าข้อดีของเกาะกลุ่มหรือการเกาะติดผนังก็คือจะเพิ่มประสิทธิภาพในการดั่งสารอาหารที่เป็นตัวจำกัดการเจริญเติบโตได้ดีกว่าเซลล์ที่แขวนลอยอยู่ในตัวกลาง

แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตชนิดเส้นใย ลักษณะแบบเส้นใยของเซลล์แบคทีเรียจะเอื้อประโยชน์ต่อการดั่งสารอาหารเพื่อใช้ในการเจริญเติบโตได้ นอกจากนั้นลักษณะแบบเส้นใยของเซลล์ช่วยกันต่อต้านการล่า (phagocytosis) จากพวกซิลิเอตและอะมีบาที่มักใช้แบคทีเรียเป็นอาหาร

2.7 คลอไรด์

2.7.1 คุณสมบัติทั่วไปของคลอไรด์

สัญลักษณ์ Cl มีเลขอะตอมเท่ากับ 17 น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 35.472 จัดอยู่ในตารางธาตุหมู่ 7 ของตารางธาตุ(Halogen group) มีเลขแสดงจำนวนไฮโดรเจนที่สามารถรวม 1 อะตอมกับธาตุอื่นเท่ากับ -1 มีเมื่ออยู่ในรูปสารประกอบจะมีระดับออกสถานะoxidation จาก +1 ถึง +7 ส่วนมากจะเกิดในสถานะก๊าซคลอรีน(Cl_2) ซึ่งมีจุดหลอมเหลวเท่ากับ $-101^{\circ}C$ มีจุดเดือดเท่ากับ $-35^{\circ}C$ มีค่าความถ่วงจะเพาะเท่ากับ 1.4 มีอันตรายต่อสุขภาพเมื่อสัมผัสทางหายใจ จะทำให้ทางเดินหายใจเกิดแผลไฟไหม้ เกิดอาการหายใจติดขัด ปวดศีรษะ เวียนศีรษะ ผิวน้ำเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน ปอดถูกทำลาย และการสัมผัสเป็นระยะ เวลานานจะทำให้ฟันผุ และปอดถูกทำลาย

คลอไรด์ เป็นธาตุที่ไม่เสถียร เพราะมี reactivity สูง ในธรรมชาติจะพบในสถานะโซเดียมคลอไรด์(NaCl) ในน้ำทะเล ในหินและแร่ที่เป็นแหล่งโปรแทสเซียมในรูปแบบ carnallite ($KMgCl_3 \cdot 6 H_2O$) และ sylvite (KCl)

โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) มีอยู่ทั้งในเกลือทะเลและเกลือสินเธาว์ เกลือทะเลที่ใช้ในประเทศไทยมีโซเดียมคลอไรด์อยู่ประมาณ 88.26+2.79 เปอร์เซ็นต์ สารเจืออื่นที่เจือปนในเกลือทะเลได้แก่ แคลเซียมซัลเฟต 0.24 เปอร์เซ็นต์ แมกนีเซียมคลอไรด์ 0.30 เปอร์เซ็นต์ แคลเซียมคลอไรด์ 0.24 เปอร์เซ็นต์ แมกนีเซียมซัลเฟต 0.17 เปอร์เซ็นต์ สารที่ไม่ละลายน้ำ 0.40 เปอร์เซ็นต์ และน้ำ 2.40 เปอร์เซ็นต์

คลอไรด์ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมอย่างมาก เช่น

- ใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษ วัสดุสิ่งทอ สีทา สีย้อม ยาหรือสารที่ทำฤทธิ์ค่าจุลินทรีย์ บีโตรเลียม ยาฆ่าแมลง ยาปราบศัตรูพืช พลาสติก ตัวทำลายและอุตสาหกรรมบรรจุอาหาร เป็นต้น
- ใช้ฆ่าเชื้อโรคและแบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำประปา
- เป็น Oxidizing agent
- เป็น substituent agent ในการปฏิกิริยา organic carbon
- ใช้ทำ ปูนขาวสำหรับทำสารฟอกขาว ใช้อุตสาหกรรมอาหาร ป้องกันการหุดตัว การซีมน้ำของขนแกะ และ กำจัดดีบุกและสังกะสีจากเหล็ก เป็นต้น

น้ำเสียที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมหรือกิจกรรมดังกล่าว จะมีค่าความเค็มสูงถึงสูง แสดงไว้ในตารางที่ 2.7 และ 2.8

ตารางที่ 2.7 ปริมาณเกลือในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม (ชฎารัตน์ อนันต์, 2540)

| แหล่งกำเนิด | ความเข้มข้น | อ้างอิง |
|----------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| โรงงานอุตสาหกรรมการฟอกหนัง | 3,310 – 11,120 มก.NaCl/ลิตร | ปธาน บรรจงปรุ, 1993 |
| โรงงานคองผัก | 5,000 - 20,000 มก.NaCl/ลิตร | บุญส่ง ไช้เกษ, 1976 |
| โรงงานปลากระป๋อง | 1,200 – 1,500 มก.NaCl/ลิตร | บุญเลิศ ผดุงศุภไธย, 1978 |

ตารางที่ 2.8 พารามิเตอร์ต่างๆ ของน้ำเสียสะพานปลาสมุทรสาคร (กรมควบคุมมลพิษ, 2544)

| พารามิเตอร์ | หน่วย | ค่าต่ำสุด | ค่าสูงสุด |
|-------------------------|----------------------------|-----------|-----------|
| ความเค็ม | พีพีเอ็ม | 10 | 20 |
| ความเป็นพีเอช | - | 6.5 | 7.8 |
| ความเข้มข้นบีโอดี | มก./ล | 1,200 | 6,000 |
| ความเข้มข้นซีโอดี | มก./ล | 3,000 | 9,000 |
| ปริมาณไนโตรเจน-ทีเคเอ็น | มก./ล | 500 | 1,200 |
| ปริมาณแอมโมเนีย | มก./ล | 350 | 850 |
| ปริมาณของแข็งแขวนลอย | มก./ล | 1,000 | 2,500 |
| สภาพต่างทั้งหมด | มก./ล as CaCO ₃ | 1,200 | 2,300 |

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย ได้ที่ระดับความเค็มหรือความเข้มข้นของเกลือได้ต่างกัน เพราะ

- เกิดแรงดันออสโมซิส (osmotic pressure) ทำให้เซลล์แบคทีเรียตาย หรือหยุดการเจริญเติบโตเนื่องจากเกิดพลาสโมไลซิส (plasmolysis)
- การแตกตัวของโซเดียมคลอไรด์ ทำให้ได้โซเดียมไอออนและคลอไรด์ไอออนซึ่งเป็นอันตรายต่อเซลล์แบคทีเรียที่ไวต่อไอออนชนิดนั้นๆ โดยโซเดียมไอออนจะไปรวมตัวกับสารที่มี Sulfhydryl group (-SH) ทำให้สารนั้นไม่สามารถ transfer acyl group
- ขัดขวางต่อการทำงานของเอนไซม์ต่างๆ ภายในเซลล์แบคทีเรีย
- ทำให้เซลล์แบคทีเรียไวต่อคาร์บอนไดออกไซด์
- ลดการละลายของออกซิเจนในน้ำ ทำให้เกิดสภาพที่ค่อนข้างจะเป็นสภาพไร้ออกซิเจน (anaerobic) ซึ่งพบที่อุณหภูมิตั้งแต่ 40 องศาเซลเซียส ออกซิเจนจะละลายในน้ำได้ประมาณ 6.1 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ถ้ามีเกลือละลายอยู่ 25 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณการละลายของออกซิเจนเหลือเพียง 2 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.7.2 แบคทีเรียรีดิวซ์คลอไรด์

สามารถแบ่งประเภทของแบคทีเรีย ออกเป็น 3 กลุ่ม ตามสภาพความต้องการเกลือได้ดังนี้

- แบคทีเรียพวกไม่ชอบเกลือ (non-halophobic หรือ salt-sensitive bacteria) ซึ่งรวมแบคทีเรียที่เป็นสาเหตุของโรคส่วนใหญ่ แบคทีเรียกลุ่มนี้ไม่สามารถเจริญได้ในที่มีความเข้มข้น เกลือสูงกว่า 6 เปอร์เซ็นต์ ถึงแม้ว่าจะมีชีวิตรอดอยู่ได้ยาวนานในสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม

- แบคทีเรียทนความเค็ม (halotolerant หรือ haloduric bacteria) เป็นกลุ่มที่ไม่ต้องการเกลือในการเจริญ แต่จะเจริญได้ในที่มีความเข้มข้นเกลือตั้งแต่ 10 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป ซึ่งได้แก่ แบคทีเรียที่สร้างสปอร์, Micrococci, Staphylococci และแบคทีเรียที่ไม่ต้องการออกซิเจนบางชนิด โดยเฉพาะ Clostridium botulinum

- แบคทีเรียพวกชอบความเค็ม (halophilic bacteria) ต้องการเกลือในการเจริญมากกว่า 3 เปอร์เซ็นต์ และไม่สามารถเจริญเติบโตได้ในสภาวะที่มีเกลือ อาจแบ่งเป็นเป็น 2 กลุ่ม คือ

- ก) แบคทีเรียที่ชอบเค็มปานกลาง (moderately halophilic bacteria) แบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถเจริญในที่มี ความเข้มข้นเกลือ 3-15 เปอร์เซ็นต์ มักพบมากในน้ำทะเล ได้แก่ Pseudomonas spp., Achromobacter spp., Micrococcus spp., Pediococcus spp., Bacillus spp., และกลุ่ม Coryneform

- ข) แบคทีเรียที่ชอบเค็มสูง (extremely halophilic bacteria) แบคทีเรียกลุ่มนี้ต้องการเกลือ สำหรับการเจริญ 12 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป ได้แก่ แบคทีเรียในวงศ์ Halobacteriaceae ซึ่งมี 2 สกุล คือ Halobacterium spp. และ Halococcus spp. แบคทีเรียในกลุ่มนี้มีลักษณะเด่น คือ โคลิไนจะเป็นสีชมพู ส้มถึงแดงสด เนื่องจากมีรงควัตถุคาโรทีนอยด์สีแดง ซึ่งเป็นตัวกั้น (Screen) แสงแดดและรังสีอุลตราไวโอเล็ต ช่วยให้สามารถอาศัยอยู่ในแหล่งน้ำหรือทะเลที่ถูกแผดเผาอยู่ตลอดเวลา

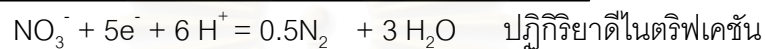
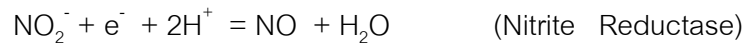
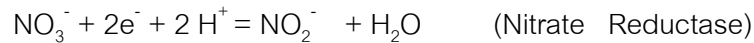
2.8 ไนไตรท์

2.8.1 คุณสมบัติทั่วไปของไนไตรท์

สารประกอบไนไตรท์ หมายถึง สารประกอบที่มีอยู่ในรูป NO_2^- มีเลขออกซิเดชัน +3 สามารถพบไนไตรท์ในแหล่งน้ำที่มีแอมโมเนียและแบคทีเรีย nitrosomonas ไนไตรท์มีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ เพราะไนไตรท์จะไปขัดขวางความสามารถในการใช้ออกซิเจนของปลา และที่พีเอชต่ำกว่า 6.5 ไนไตรท์จะเปลี่ยนเป็นกรดไนตริกที่มีความเข้มข้นมากกว่า 1.0 พีพีเอ็ม ซึ่งมีความเป็นพิษรุนแรงกว่าไนไตรท์

ในระบบบำบัดน้ำเสีย สารประกอบไนโตรสเกิดจากการออกซิเดชันที่ไม่ยังสมบูรณ์ของสารประกอบไนโตรเจนอื่น (MaCarty, 1969 อ้างถึงในธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544) เช่น

1.ปฏิกิริยา ดีไนตริฟิเคชัน จากสมการ half-reaction และ enzyme catalyzing ไนเตรทจะถูกรีดักซ์เป็นไนโตรท์ ไนตริกออกไซด์และไนโตรเจน ตามลำดับ ดังสมการ

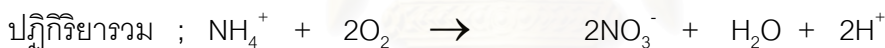


2. ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน ซึ่งแอมโมเนียจะถูกรีดักซ์เป็น แอมโมเนียดังสมการ

Nitrosomonas

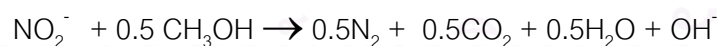


Nitrobactor



2.8.2 ไนโตรท์กับปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน

ในปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน มีสารอินทรีย์เป็นสารให้อิเล็กตรอน และใช้ในเตรทที่ทำหน้าที่เป็นสารรับอิเล็กตรอนแล้ว ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันยังสามารถใช้ไนโตรท์เป็นสารรับอิเล็กตรอนในปฏิกิริยาได้ด้วย ตัวอย่างดังสมการ



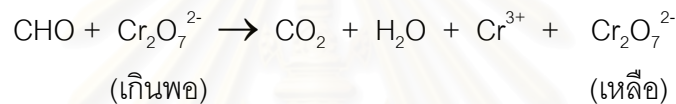
ไนโตรท์ที่อยู่ในรูป กรดไนตริส (HNO_2) อีสระ ไม่แตกตัวเป็นไอออนสามารถยับยั้งปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันได้ที่มีความเข้มข้น 0.13 มก./ล, และถ้ามีค่าพีเอช ในช่วง 6 - 8 กรดไนตริสมีความเข้มข้นจะเทียบเท่าเป็น (NO_2^-) 100 มก.ไนโตรท์/ล. ซึ่งมีผลกระทบของไนโตรท์ต่อดีไนตริฟิเคชันแบบคทีเรีย

2.9 สมดุลมวลของซีไอดี ซัลเฟอร์ และไนโตรเจนในกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน เมื่อมีซัลเฟตและไนเตรทอยู่ในน้ำเสีย

2.9.1 สมดุลมวลซีไอดี

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่มีซัลเฟตและไนเตรทอยู่ในระบบ จะมีการแข่งขันกันระหว่างแบคทีเรียสร้างมีเทน แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียดีไนตริฟายอิงในการใช้สารอาหาร ดังนั้นในการวัดว่าแบคทีเรียชนิดใดสามารถใช้สารอาหารได้ในสัดส่วนเท่าใด สามารถวัดคร่าวๆ ด้วยปริมาณซีไอดีที่ถูกใช้ไปโดยแบคทีเรียแต่ละชนิด

ซีไอดี คือ ปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ทั้งที่แบคทีเรียย่อยสลายได้และไม่สามารถย่อยสลายได้ในน้ำเสียเกิดการเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำซึ่งเป็นผลผลิตสุดท้ายของปฏิกิริยา ดังสมการ



ส่วนสารจำพวกกรดอะมิโนจะถูกเปลี่ยนเป็นแอมโมเนียไนโตรเจนเป็นผลผลิตสุดท้ายของปฏิกิริยาแทน ซึ่งปัจจัยสำคัญในการวิเคราะห์ซีไอดี คือ ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นต้องอาศัยสารออกซิไดซ์อย่างแรง และต้องเกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่เป็นกรดเข้มข้นและมีอุณหภูมิสูง

จากหลักการวิเคราะห์ซีไอดีที่ใช้สารออกซิไดซ์อย่างแรงย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ดังนั้นค่าซีไอดีจึงเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ใช้แสดงค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำได้ แต่การใช้สารออกซิไดซ์ที่มีอำนาจในการออกซิไดซ์สูง เช่น ไดโครเมต ทำให้สารอินทรีย์ชนิดอื่นในระบบที่ไม่เป็นสารอินทรีย์ที่ให้ผลิตภัณฑ์กับไดโครเมตจะเปลี่ยนไปอยู่อีกรูปหนึ่ง เช่น ซัลไฟด์อินทรีย์จะถูกออกซิไดซ์โดยไดโครเมตเป็นซัลเฟต เป็นต้น ดังนั้น การวัดซีไอดีจึงไม่ได้เป็นการวัดสารอินทรีย์เพียงอย่างเดียว แต่เป็นการวัดสารให้อิเล็กตรอนในน้ำทั้งหมด ดังนั้น ต้องพยายามกำจัดสารให้อิเล็กตรอนอื่น ๆ ในน้ำเสียก่อนการวัดซีไอดี เช่น ปรับพีเอชให้ต่ำลงเพื่อไลไฮโดรเจนซัลไฟด์ในน้ำเสียในน้ำเสีย เป็นต้น

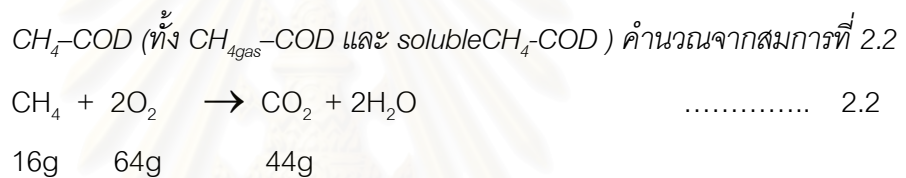
สมดุลมวลของซีไอดีก่อนและหลังกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนสามารถพิจารณาได้ดังสมการด้านล่างนี้

$$\text{COD}_{\text{in}} = \text{solubleCOD}_{\text{eff}} + \text{CH}_{4\text{gas}}\text{-COD} + \text{solubleCH}_4\text{-COD} + \text{COD}_{\text{acc}} + \Delta\text{SO}_4^{2-}\text{-COD} + \Delta\text{NO}_3^- \text{-COD} + \Delta\text{NO}_2^- \text{-COD} \dots\dots\dots 2.1$$

เมื่อ

- COD_{in} = ซีโอดีทั้งหมดก่อนเข้าระบบ
- solubleCOD_{eff} = ซีโอดีละลายหลังผ่านระบบ
- CH_{4gas}-COD = ซีโอดีในรูปก๊าซมีเทน
- solubleCH₄-COD = ซีโอดีในรูปมีเทนละลายน้ำ
- COD_{acc} = ซีโอดีที่ถูกสะสมในเซลล์จุลินทรีย์
- ΔSO₄²⁻-COD = ซีโอดีที่ถูกใช้ในกระบวนการซัลเฟตรีดักชัน
- ΔNO₃⁻-COD = ซีโอดีที่ถูกใช้ในกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน

ค่า COD_{in} และ solubleCOD_{eff} เป็นค่าที่วัดได้โดยตรงจากการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ ส่วนค่าCH_{4gas}-COD , solubleCH₄-COD , CO_{2gas} , solubleCO₂ , ΔSO₄²⁻-COD และ ΔNO₃⁻-COD หาได้ทางอ้อมด้วยการคำนวณจาก Stoichimetric ดังนี้ คือ



จากสมการที่ 2.2 จะเห็นได้ว่า มีเทน 16 กรัม ทำปฏิกิริยาพอดีกับออกซิเจน 64 กรัม เกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ แสดงว่า มีเทน 1 มิลลิกรัม มีค่าเทียบเท่าซีโอดี 4 มิลลิกรัม โดย CH₄-COD หาได้จากการวัดปริมาตรก๊าซทั้งหมด และการวัดร้อยละของก๊าซมีเทนในปริมาตรก๊าซทั้งหมด แล้วจึงเปลี่ยนปริมาตรก๊าซที่คำนวณได้เป็นจำนวนโมลของก๊าซมีเทนด้วยกฎของก๊าซส่วน solubleCH₄-COD คำนวณได้โดยใช้ทฤษฎีของเฮนรี

ซีโอดีในรูปของก๊าซมีเทน หาได้จาก

$$\text{CH}_{4\text{gas}}\text{-COD} = (\text{Total gas volume} \times \% \text{CH}_4 \times 16 \times 4) / (24.86 \times Q)$$

เมื่อ

- CH_{4gas}-COD = ซีโอดีในรูปของก๊าซมีเทน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
- Total gas volume = ปริมาตรของก๊าซทั้งหมด (มิลลิลิตรต่อวัน)
- %CH₄ = ร้อยละของก๊าซมีเทน
- Q = อัตราการไหลของน้ำเสียต่อวัน (ลิตรต่อวัน)
- 24.86 = ปริมาตรก๊าซ 1 โมล ที่ 30°C (ลิตร) (ปริมาตรก๊าซ 1 โมล ที่ 0°C = 22.4 ลิตร)
- 16 = น้ำหนักของมีเทน 1 โมล (กรัม)
- 4 = ซีโอดีของก๊าซมีเทน 1 โมล (กรัม)

ซีโอดีในรูปมีเทนละลายน้ำในน้ำ หาได้จาก

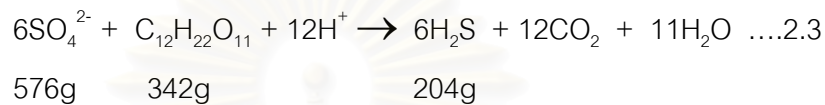
$$\text{solubleCH}_4\text{-COD} = K_{\text{CH}_4} \times \text{Partial Pressure of CH}_4 \times 16,000 \times 4$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} K_{\text{CH}_4} &= \text{ค่าคงที่ของเฮนรีสำหรับก๊าซมีเทนที่ } 30^\circ\text{C (โมลต่อลิตร)} \\ &= 12.4 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

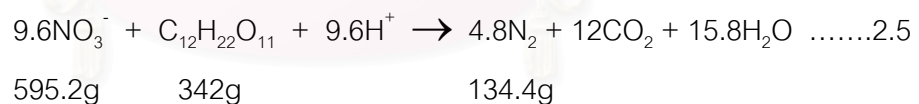
Partial Pressure of CH₄ = ความดันพาร์เชียลของก๊าซมีเทน (สัดส่วนของก๊าซมีเทน)

ส่วน $\Delta\text{SO}_4^{2-}\text{-COD}$ คำนวณได้จากสมการที่ 2.3 และ 2.4



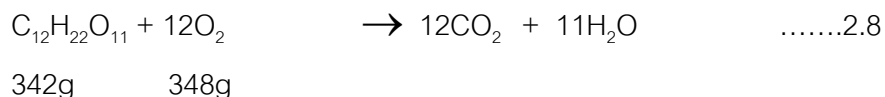
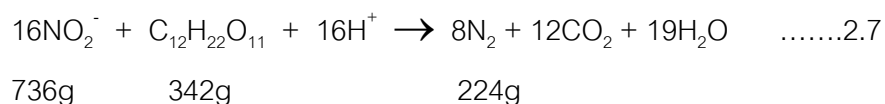
จากสมการที่ 2.3 ซัลเฟตที่ลดลง 576 กรัม เกิดจากการใช้สารอินทรีย์ (น้ำตาลทราย) 342 กรัม กลายเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ 204 กรัม และจากสมการที่ 2.4 สารอินทรีย์ (น้ำตาลทราย) 342 กรัม คิดเทียบเป็นซีโอดีได้ 348 กรัม นั่นคือ ซัลเฟตที่ลดลง 576 กรัม จะใช้ซีโอดี 384 กรัม เกิดเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ 204 กรัม เพราะฉะนั้นค่า $\Delta\text{SO}_4^{2-}\text{-COD}$ คำนวณได้จากซัลเฟตที่ลดลง 3 มิลลิกรัม เกิดจากการใช้ซีโอดีเทียบเท่า 2 มิลลิกรัม

ส่วน $\Delta\text{NO}_3^- \text{-COD}$ คำนวณได้จากสมการที่ 2.5 และ 2.6



จากสมการที่ 2.5 ไนเตรตที่ลดลง 595.2 กรัม เกิดจากการใช้สารอินทรีย์ (น้ำตาลทราย) 342 กรัม กลายเป็นไนโตรเจน 134.4 กรัม และจากสมการที่ 2.6 สารอินทรีย์ (น้ำตาลทราย) 342 กรัมเทียบเป็นซีโอดีได้ 348 กรัม นั่นคือ ไนเตรตที่ลดลง 595.2 กรัม จะใช้ซีโอดี 348 กรัม เกิดเป็นไนโตรเจน 134.4 กรัม เพราะฉะนั้นค่า $\Delta\text{NO}_3^- \text{-COD}$ คำนวณได้จากไนเตรตที่ลดลง โดยไนเตรตที่ลดลง 3.4 มิลลิกรัม เกิดจากการใช้ซีโอดีเทียบเท่า 2 มิลลิกรัม

กรณีมี ΔNO_2^- -COD ในระบบ คำนวณได้จากสมการที่ 2.7 และ 2.8



จากสมการที่ 2.7 ไนโตรที่ลดลง 736 กรัม เกิดจากการใช้สารอินทรีย์(น้ำตาลทราย) 342 กรัมกลายเป็นไนโตรเจน 224 กรัม และจากสมการที่ 2.8 สารอินทรีย์(น้ำตาลทราย) 342 กรัมเทียบเป็นซีไอดีได้ 348 กรัม นั่นคือ ไนโตรที่ลดลง 736 กรัม จะใช้ซีไอดี 348 กรัม เกิดเป็นไนโตรเจน 224 กรัม เพราะฉะนั้นค่า ΔNO_2^- -COD คำนวณได้จากไนโตรที่ลดลง โดย ไนโตรที่ลดลง 2.1 มิลลิกรัม เกิดจากการใช้ซีไอดีเทียบเท่า 1 มิลลิกรัม

ส่วนซีไอดีที่ถูกเปลี่ยนเป็นเซลล์แบคทีเรียเป็นซีไอดีที่ไม่สามารถวัดได้ แต่ถ้าตั้งสมมติฐานว่า ซีไอดีที่ถูกย่อยสลายไม่สามารถตรวจสอบได้ คือ ซีไอดีที่ถูกระบายอยู่ในเซลล์แบคทีเรีย เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 2.1 จะได้

$$COD_{acc} = COD_{in} - solubleCOD_{eff} - CH_{4gas}-COD - solubleCH_4-COD - \Delta SO_4^{2-}-COD - \Delta NO_3^- -COD - \Delta NO_2^- -COD \quad \text{..... 2.9}$$

สมการที่ 2.9 ใช้ในการทดสอบความน่าเชื่อถือของข้อมูล โดยดูจากร้อยละของมวลซีไอดีที่ออกจากระบบต่อร้อยละของมวลซีไอดีที่เข้าสู่ระบบ เรียกว่า %COD recovery แต่จากสมการ 2.9 ค่าซีไอดีที่ไม่สามารถตรวจสอบได้ คือ ค่าซีไอดีที่สะสมอยู่ในเซลล์ ดังนั้นค่า %recovery จะมีค่าเป็น 100% เสมอ แต่ในความเป็นจริงโอกาสที่วิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ได้ถูกต้องทั้งหมด 100% เป็นไปได้อยาก ถ้าพิจารณาถึงว่าซีไอดีที่หายไปจากการเปลี่ยนเซลล์มีค่าน้อย เนื่องจากเป็นระบบไร้ออกซิเจนที่มีเวลากักเซลล์ยาวนาน ค่าYield observed มีค่าต่ำมาก สามารถตัดทิ้งโดยไม่ต้องนำมาพิจารณา ประโยชน์ที่ได้ก็คือสามารถตรวจสอบความน่าเชื่อถือในการทำงานทั้งหมดได้จากสมดุลมวลของซีไอดีที่ถูกสร้างขึ้นมาและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ดังนั้น %COD recovery สามารถหาได้จากสมการ 2.10

$$\%COD \text{ recovery} = [(solubleCOD_{eff} + CH_{4gas}-COD + solubleCH_4-COD + \Delta SO_4^{2-}-COD + \Delta NO_3^- -COD + \Delta NO_2^- -COD) / COD_{in}] \times 100 \quad \text{..... 2.10}$$

นอกจากนั้น จากสมมูลมวลซีไอดีที่สร้างขึ้นยังทำให้หาสัดส่วนซีไอดีที่ถูกใช้โดยแบคทีเรียสร้างมีเทน แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียดีไนตริฟายอิงได้ โดยเรียกว่า เปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอน ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.11 – 2.13

$$\% \text{electron flow to MBP} = \frac{[(\text{CH}_4\text{-COD})/(\text{CH}_4\text{-COD} + \Delta\text{SO}_4^{2-}\text{-COD} + \Delta\text{NO}_3^- \text{-COD} + \Delta\text{NO}_2^- \text{-COD})] \times 100}{\dots\dots\dots} \quad 2.11$$

$$\% \text{electron flow to SRP} = \frac{[(\Delta\text{SO}_4^{2-}\text{-COD})/(\text{CH}_4\text{-COD} + \Delta\text{SO}_4^{2-}\text{-COD} + \Delta\text{NO}_3^- \text{-COD} + \Delta\text{NO}_2^- \text{-COD})] \times 100}{\dots\dots\dots} \quad 2.12$$

$$\% \text{electron flow to DNB} = \frac{[(\Delta\text{NO}_3^- \text{-COD})/(\text{CH}_4\text{-COD} + \Delta\text{SO}_4^{2-}\text{-COD} + \Delta\text{NO}_3^- \text{-COD} + \Delta\text{NO}_2^- \text{-COD})] \times 100}{\dots\dots\dots} \quad 2.13$$

จากเปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอน เราสามารถเปรียบเทียบการแข่งขันระหว่างแบคทีเรียสร้างมีเทน แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียดีไนตริฟายอิงได้ โดยแบคทีเรียชนิดใดที่มีเปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอนมากกว่าจะเป็นแบคทีเรียที่มีความโดดเด่น (Predominate) มากกว่าในระบบนั้นๆ

2.9.2 สมดุลมวลซัลเฟอร์

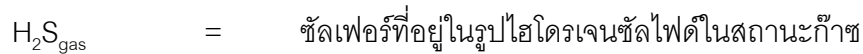
เมื่อแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตใช้ซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ซัลเฟตจะถูกรีดิวซ์และเปลี่ยนไปอยู่ในรูปซัลไฟด์ โดยซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นมีอยู่หลายรูปแบบ ได้แก่ ก๊าซไฮโดรเจนซัลเฟต ในวัฏภาคก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายน้ำที่ไม่แตกตัว และในวัฏภาคของเหลว รวมถึงซัลไฟด์ที่ตกตะกอนผลึกกับโลหะหนักเป็นตะกอนของโลหะซัลไฟด์ โดยสภาวะสมดุลระหว่างก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายน้ำที่ไม่แตกตัว HS⁻ และ S²⁻ สามารถอธิบายได้โดยใช้กฎของเฮนรี่ ส่วนสัดส่วนระหว่างไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายน้ำที่ไม่แตกตัว HS⁻ และ S²⁻ สามารถดูได้จากพีเอชของระบบบำบัด

สมดุลมวลของซัลเฟอร์ในระบบหาได้จาก

$$\text{SO}_4^{2-} \text{ in} = \text{SO}_4^{2-} \text{ eff} + \text{S}^{2-} + \text{HS}^- + \text{H}_2\text{S}_{\text{aq}} + \text{H}_2\text{S}_{\text{gas}} \quad \dots\dots\dots 2.14$$

เมื่อ

- SO₄²⁻ in = ซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปซัลเฟตที่อยู่ในน้ำเข้า
- SO₄²⁻ eff = ซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปซัลเฟตที่ออก
- S²⁻ = ซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปซัลไฟด์อิสระ
- HS⁻ = ซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายน้ำที่แตกตัว
- H₂S_{aq} = ซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปซัลไฟด์ละลายน้ำที่ไม่แตกตัว



และ

$$\% \text{ sulfur recovery} = [(\text{SO}_4^{2-}{}_{\text{eff}} + \text{S}^{2-} + \text{HS}^- + \text{H}_2\text{S}_{\text{aq}} + \text{H}_2\text{S}_{\text{gas}}) / \text{SO}_4^{2-}{}_{\text{in}}] \times 100 \dots\dots\dots 2.15$$

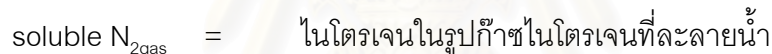
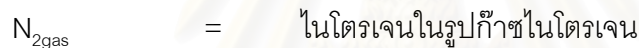
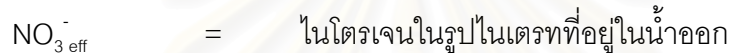
2.9.3 สมดุลมวลไนโตรเจน

เมื่อแบคทีเรียดีไนตริฟายอิงใช้ในเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ไนเตรทจะถูกรีดิวซ์และเปลี่ยนไปอยู่ในรูปไนโตรเจน

สมดุลมวลของไนโตรเจนในระบบหาได้จาก

$$\text{NO}_3^-{}_{\text{in}} = \text{NO}_3^-{}_{\text{eff}} + \text{NO}_2^- + \text{N}_2\text{O}_{\text{gas}} + \text{N}_{2\text{gas}} + \text{soluble N}_{2\text{gas}} \dots\dots\dots 2.16$$

เมื่อ

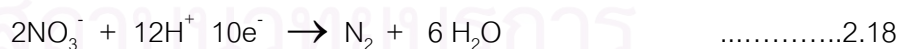


และ

$$\% \text{ nitrogen recovery} = [(\text{NO}_3^-{}_{\text{eff}} + \text{N}_{2\text{gas}} + \text{soluble N}_{2\text{gas}}) / \text{NO}_3^-{}_{\text{in}}] \times 100 \dots\dots\dots 2.17$$

โดยไนโตรเจนในรูป N_2O มักไม่พบในระบบจริงเพราะเป็นรูปของไนโตรเจนที่ไม่เสถียร ซึ่งกระบวนการดีไนตริฟิเคชันรูปของไนโตรเจนก๊าซที่พบมากที่สุดคือก๊าซไนโตรเจน

N_2 (ทั้ง $\text{N}_{2\text{gas}}$ และ $\text{soluble N}_{2\text{gas}}$) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.19



จากสมการด้านบน จะเห็นว่า ไนเตรทที่ลดลง 124 กรัม เกิดจากการรับอิเล็กตรอน 10 โมล กลายเป็นก๊าซไนโตรเจน 28 กรัม โดย $\text{N}_{2\text{gas}}$ หาได้จากการวัดปริมาตรก๊าซทั้งหมดและวัดสัดส่วนของก๊าซไนโตรเจนในปริมาตรก๊าซทั้งหมด แล้วจึงเปลี่ยนปริมาตรก๊าซที่ได้เป็นจำนวนโมลของก๊าซไนโตรเจนด้วยกฎของก๊าซ ส่วน soluble N_2 คำนวณโดยใช้ทฤษฎีของเฮนรี เช่นเดียวกันกับการคำนวณซีไอดีในรูปของก๊าซมีเทน

โดย น้ำหนักของไนโตรเจน 1 โมล = 28 กรัม

$$K_h = \text{ค่าคงที่ของเฮนรีสำหรับก๊าซไนโตรเจนที่ } 30^\circ\text{C (โมลต่อลิตร)} = 6.03 \times 10^{-4}$$

2.10 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.10.1 การศึกษาการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบอีจีเอสบี

Kato และคณะ (1994) ศึกษาประสิทธิภาพของระบบอีจีเอสบี โดยใช้ถังอีจีเอสบี ขนาด 2.5 ลิตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยใช้ทดลองกับน้ำเสียเอทานอล มีค่าซีโอดี เท่ากับ 200 และ 600 มก./ล. แบ่งการทดลองเป็น 2 ชุด โดยในการทดลองชุดที่ 2 ทำการเติม ออกซิเจนลงไปจนถึงน้ำเข้าประมาณ 3.8 มก./ล. เพื่อศึกษาผลกระทบของออกซิเจนที่มีต่อการ ทำงานของระบบ พบว่า ในการทดลองชุดที่ 1 เมื่อน้ำเสียเข้าสู่ระบบมีค่าซีโอดี เท่ากับ 600 มก./ล. ที่เวลากักน้ำเสีย เท่ากับ 2 ชม. พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีสูงกว่า 90 % ที่ภาวะบรรทุก สารอินทรีย์ 8.1 ก.ซีโอดี/ล.-วัน และเมื่อเปลี่ยนแปลงซีโอดีน้ำเสียเข้าเป็น 100-200 มก./ล. พบว่า ประสิทธิภาพในการลดซีโอดีสูงกว่า 80 % ที่ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์ 12 ก.ซีโอดี/ล.-วัน เวลา กักเก็บ 0.5 ชม. ส่วนการทดลองชุดที่ 2 จะได้ประสิทธิภาพของระบบใกล้เคียงกับชุดการ ทดลองที่ 1 จึงสรุปได้ว่า ระบบอีจีเอสบีสามารถบำบัดน้ำเสียที่มีซีโอดีต่ำกว่า 200 มก./ล. ที่เวลา กักต่ำกว่า 2 ชม. และปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเสีย โดยไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพ ของระบบ

Rebac และคณะ(1995) ศึกษาประสิทธิภาพของระบบอีจีเอสบี โดยใช้ถังอีจีเอสบี ขนาด 4.3 ลิตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. ที่อุณหภูมิในช่วงประมาณ 10 – 12 องศาเซลเซียส ใช้ น้ำเสียประเภทกรดไขมันระเหยง่าย ที่มีความเข้มข้นซีโอดี ประมาณ 500 – 800 มก./ล. ที่เวลากักน้ำ เสียอยู่ในช่วง 1.6 – 2.5 ชม. ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์ 12 กก.ซีโอดี/ล.-วัน และมีเวลากักเก็บ 1 ชม. ความเร็วไหลขึ้นเท่ากับ 10 ม./ชม. พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีมีค่าสูงกว่า 80 - 90 %

Pereira และคณะ(2002) ทำการศึกษาการกำจัด Oleic acid ที่เป็นสารที่ใช้ใน การผลิตเครื่องสำอางมีลักษณะเป็น long-chain acid (C18:1) โดยใช้ถังอีจีเอสบี ในการทำ ปฏิกริยาดีไนตริฟิเคชัน ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เวลากักเก็บน้ำ 1.9 วัน แปรค่าภาวะ บรรทุกสารอินทรีย์ 3.8 -8.6 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ระยะเวลา 219 วัน แยกเป็น 2 การทดลอง โดย ใช้สัลดจ์แบบเม็ดและใช้สัลดจ์แบบตะกอนแขวนลอย พบว่า ระบบสามารถลดซีโอดีได้มากที่สุดที่ ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์ 6.2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม /วัน มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี 68.8 % และ 69.4 % และมีก๊าซมีเทนเกิดขึ้นมากที่สุด 1.6 และ 2.0 ล.มีเทน/วัน ที่ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์ 8 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ระบบมีการเกิดปฏิกริยา methenogenic ลดลง เพราะมีก๊าซไฮโดรเจนและ คาร์บอนไดออกไซด์ เกิดขึ้นซึ่งจะไปยับยั้งการเกิดปฏิกริยาดังกล่าว

Kato และ คณะ (2003) ศึกษาประสิทธิภาพของระบบอีจีเอสบี สำหรับบำบัด น้ำเสียที่ผ่านจากการบำบัดขั้นสุดท้ายจากน้ำเสียชุมชนที่ผ่านระบบยูเอเอสบี ซึ่งมีค่าซีโอดีและ

ของแข็งแขวนลอย อยู่ในช่วง 120 – 180 และ 94 – 123 มก./ล. ตามลำดับ โดยใช้ถังอีจีเอสบี ขนาด 157.5 ลิตร โดยใช้ตะกอนชนิดฟล็อกที่มาจากระบบยูเอเอสบีข้างต้น ทำการทดลองเป็นเวลา 331 วัน แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ช่วง แต่ละช่วงใช้ความเร็วไหลขึ้น เท่ากับ 1.25, 2.5 และ 3.75 ม./ชม. ตามลำดับ พบว่า ที่เวลากักน้ำเสีย 4 ชม. ความเร็วไหลขึ้น 3.75 ม./ชม. ค่าซีไอดีและของแข็งแขวนลอยลดลงเหลือต่ำกว่า 87 และ 32 มก./ล. ตามลำดับ สรุปได้ว่าระบบอีจีเอสบีสามารถนำมาใช้ในการบำบัดขั้นสุดท้ายจากน้ำเสียชุมชนที่ผ่านระบบยูเอเอสบี ซึ่งมีความเข้มข้นต่ำได้

ตุลชัย แจ่มใส (2545) ศึกษาประสิทธิภาพของระบบอีจีเอสบี ในการบำบัดน้ำเสียชุมชนที่ โดยถังอีจีเอสบีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. มีขนาด 2 ลิตร มีค่าซีไอดี บีไอดี 5 วัน และของแข็งแขวนลอยประมาณ 160, 65 และ 45 มก./ล.ตามลำดับ ที่อุณหภูมิประมาณ 25 – 28 องศาเซลเซียส มีเวลากักน้ำเสียเท่ากับ 2 และ 6 ชม. พบว่า ที่เวลากักน้ำเสีย เท่ากับ 2 และ 6 ชม. มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดี, บีไอดี และของแข็งแขวนลอย ที่ใกล้เคียงกัน คือประมาณ 67, 84 และ 64 % ตามลำดับ จึงสรุปว่า ที่เวลากักน้ำเสีย 2 ชม. เพียงต่อการกำจัดซีไอดี และบีไอดี เนื่องจากเกิดการกระจายของสารอินทรีย์สม่ำเสมอทั่วชั้นสไลด์

2.10.2 การศึกษาการกำจัดไนโตรเจน ไนเตรทในน้ำเสียโดยระบบยูเอเอสบี

Hanne และ Birgitte (1996) ได้สรุปว่ากระบวนการดีไนตริฟิเคชันและกระบวนการผลิตมีเทนสามารถเกิดขึ้นร่วมกันได้ ในระบบบำบัดแบบยูเอเอสบีเดียวกันได้ และเป็นก้าวที่ยิ่งใหญ่สำหรับการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม แต่จะต้องมีค่า C : N ที่สูงเพียงพอด้วย

Bilanovic และคณะ (1999) ได้ศึกษาการดีไนตริฟิเคชันที่ความเข้มข้นไนเตรทสูงถึง 750 มก./ล. ในระบบยูเอเอสบี ระบบสามารถดำเนินได้อย่างไม่มีปัญหาแม้บางครั้งจะมีไนโตรเจนออกมากับน้ำที่ออกจากระบบบ้างในบางการทดลอง

Convantes, Rosa และ Gomez (2001) ศึกษาการกำจัดไนโตรเจนในน้ำเสียที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำด้วยระบบยูเอเอสบี โดยใช้แอมโมเนียและอะซิเตทเป็นตัวให้อิเล็กตรอน การทดลองช่วงแรกใช้อะซิเตทเป็นตัวให้อิเล็กตรอน แปรค่าความเข้มข้นไนเตรท 125, 250 และ 500 มล.ไนเตรท-ไนโตรเจน/ลิตร/วัน พบว่าเมื่อความเข้มข้นไนเตรทสูงขึ้นไปจะไม่พบแอมโมเนียและไนเตรทเกิดขึ้นในระบบ มีปริมาณไนโตรเจนและก๊าซไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้น การทดลองครั้งที่ 2 ใช้แอมโมเนียเป็นตัวให้อิเล็กตรอน แปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนทั้งหมด (แอมโมเนีย+ไนเตรท) 0.6, 0.8 และ 1.0 ใช้ความเข้มข้นแอมโมเนียคงที่ 100 มล.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล./วัน แปรค่าความเข้มข้นไนเตรท 503, 510 และ 510 มล.ไนเตรท/ล./วัน พบว่าที่

อัตราส่วน 0.6 จะเหลือปริมาณไนโตรเจนอยู่มากที่สุด และเมื่อทดลองใช้อัตราส่วน 0.4 จะทำให้เกิดไนโตรเจน 200 -400 มล.ไนโตรเจน-ไนโตรเจน/ล. ซึ่งเป็นพิษต่อสุขภาพ ดังนั้นการใช้แอมโมเนียเป็นตัวให้อิเล็กตรอน ไม่เหมาะสมต่อปฏิกิริยาดีไนริฟิเคชันเพราะที่ค่าอัตราส่วนน้อยๆ จะทำให้เกิดไนโตรเจนสะสมในระบบมากขึ้น

Ruiz และคณะ(2006) ศึกษากระบวนการไนริฟิเคชันและดีไนริฟิเคชันในการกำจัดไนโตรเจนในน้ำเสียโดยใช้สารไนโตรเจน กำหนดค่าตัวแปร คือ การเติมอากาศและคาร์บอนปริมาณสูง (สำหรับดีไนริฟิเคชัน) ทำให้มีการสะสมไนโตรเจนที่เกิดจากปฏิกิริยาไนริฟิเคชันในสลัดจ์ส่วนเกิน โดยมีหลักการคือ ทำให้เกิดไนโตรเจนมากที่สุดจากปฏิกิริยาไนริฟิเคชันในถังปฏิกรณ์แบบซีเอสทีอาร์ เติมน้ำ 25 วัน ควบคุมค่าออกซิเจนละลาย 0.7 มล.ดีโอ/ล. ให้แอมโมเนีย 587 มก./ล. เวลาพักเก็บ 2.4 ชม. ค่าพีเอช 7.85 สามารถทำให้เกิดไนโตรเจนเพิ่มขึ้น 65 % และนำไนโตรเจนที่เกิดมาทำปฏิกิริยาดีไนริฟิเคชันในระบบยูเอเอสบี โดยควบคุมความเข้มข้นของซีโอดี 1,700 มก./ล. เวลาพักเก็บ 2.9 ชม. พีเอช 7.85 มีค่าไนโตรเจน(ไนโตรเจน+ไนโตรเจน) ที่ออกจากถังซีเอสทีอาร์เข้าระบบยูเอเอสบี 500 และ 600 มก./ล. ทำให้มีค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 3.2 มก.ซีโอดี/มก.ไนโตรเจน-ไนโตรเจน พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 20 วัน ระบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัวและมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจน 93.5 %

2.10.3 การศึกษาการกำจัดซัลเฟตในน้ำเสียโดยระบบยูเอเอสบี

อนุตร เปียงแก้ว (2542) ทดลองซัลเฟตรีดักชันในระบบยูเอเอสบี เมื่อแปรค่าอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต เท่ากับ 12, 6 และ 0.6 โดยใช้แหล่งคาร์บอนเป็นน้ำตาลทราย วัดระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันได้ 90, 87 และ 66 % ตามลำดับ และเมื่อเปลี่ยนแหล่งคาร์บอนเป็นอะซิเตตวัดระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันได้ 80, 82 และ 72 % ตามลำดับ สรุปได้ว่าอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตที่มากกว่า 6 ไม่มีผลต่อระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันที่มากขึ้นนัก และชนิดของแหล่งคาร์บอนแทบไม่มีผลต่อระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันเลย

อุรษา เศรษฐธีรกิจ (2542) ทดลองซัลเฟตรีดักชันในระบบยูเอเอสบี โดยแปรอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต เป็น 4 และ 2 โดยแต่ละอัตราส่วนใช้ ความเข้มข้นซีโอดี 5 ค่าดังนี้ 400, 600, 800, 1000 และ 1200 มก./ล. ที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 4 พบว่าอัตราการเกิดซัลเฟตรีดักชันเท่ากับ 86.8, 89.3, 92.0, 91.9 และ 92.7 % ตามลำดับ ที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 2 พบว่าอัตราการเกิดซัลเฟตรีดักชันเท่ากับ 91.1, 93.5, 95.1 และ 95.5 % สรุปได้ว่า การแปรความเข้มข้นซีโอดีต่อซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นในขอบเขตที่ใช้ในงานวิจัย ทำให้ระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันเพิ่มขึ้น แต่มีนัยสำคัญน้อย

Rinzema และ Lettinga (1988) แสดงให้เห็นถึงผลของซัลไฟด์ที่มีผลต่อการย่อยสลายโพธิโอเนตในถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีที่เลี้ยงด้วยโพธิโอเนตและซัลเฟต โดยใช้สัลดที่ขึ้นกับความเข้มข้นของน้ำเสียต่ำ พีเอช 7.5 พบว่า ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีค่าเกิน 100 มก./ล. ทำให้การย่อยโพธิโอเนตเริ่มถูกยับยั้งและความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ 140 มก./ล. จะทำให้เกิดการยับยั้งการย่อยสลายโพธิโอเนตที่ 50 %

2.10.4 การศึกษาผลของปฏิกริยาร่วมและการแข่งขันของสารอาหาร (interaction and substrate competition) ระหว่าง ไนเตรท และ ซัลเฟต ในกระบวนการแบบไร้อากาศ

Veerial (1992) ทำการศึกษาการรวมตัวเป็นเม็ดตะกอนและการเกาะติดของแบคทีเรียสร้างมีเทนและแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตในถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี 3 ถัง ป้อนด้วยสารอาหารที่แตกต่างกัน ได้แก่ ถังที่ 1 เป็นระบบสำหรับสร้างมีเทน ถังที่ 2 เป็นระบบสำหรับสร้างซัลไฟด์ และถังที่ 3 เป็นระบบผสมระหว่าง 2 ระบบแรก จากการศึกษา พบว่า ลักษณะของเชื้อจุลินทรีย์ในระบบสร้างซัลไฟด์ไม่เกิดการรวมตัวกันเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ส่วนอีกสองระบบที่เหลือเกิดเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ได้ดี และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีเทนใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ ยังพบว่าการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ของแบคทีเรียสร้างมีเทนใช้เวลาสั้นกว่าแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต ดังนั้น จึงควรมีแบคทีเรียสร้างมีเทนอยู่ด้วย เพราะแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตขาดความสามารถในการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในเวลาอันสั้น

Gilles และคณะ (1999) ได้ศึกษาผลของปฏิกริยาร่วมระหว่างแบคทีเรียสร้างมีเทนและดีไนตริไฟอิงแบคทีเรียในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศแบบเบดที่ในน้ำเสียที่มีซัลเฟต พบว่าอัตราส่วนระหว่างซีโอไซด์ต่อไนเตรทไนโตรเจนที่มีค่าสูงๆ จะไม่ส่งเสริมการรีดักชันของไนเตรทไปเป็นแอมโมเนีย แต่ดีไนตริฟิเคชันจะเป็นกระบวนการหลักที่รีดิวซ์ไนเตรทเป็นก๊าซแอมโมเนีย ในช่วง lag phase ช่วงเริ่มต้นการทดลอง มีซัลไฟด์เกิดขึ้นในปริมาณมาก และที่ความเข้มข้นของไนเตรทน้อยกว่า 500 มก./ล. แบคทีเรียสร้างมีเทนสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ปกติ ยกเว้นกลุ่มแบคทีเรียที่ถูกเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำๆ และการทำปฏิกริยาซัลเฟตรีดักชันของแบคทีเรียกลุ่มนี้จะถูกขัดขวางโดยตรงจากไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้น และการผลิตมีเทนจะหยุดลงเมื่อกระบวนการดีไนตริฟิเคชันเริ่มขึ้น ในช่วงนี้ควรมีการเติมสารเคมีเพื่อป้องกันการยับยั้งการผลิตก๊าซมีเทน ทำให้พบว่า ซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นมีปริมาณลดลง เพราะถูกใช้ตลอดเพื่อทำปฏิกริยาดีไนตริฟิเคชัน ซึ่งบอกเป็นนัยว่า ดีไนตริฟิเคชันใช้ซัลไฟด์เป็นตัวให้อิเล็กตรอน แต่ควรมีการกำจัดเหล็กในน้ำเสียก่อน เพื่อให้การรีดักชันของไนเตรทไปสู่แอมโมเนียและกระบวนการผลิตก๊าซมีเทนมีประสิทธิภาพมากขึ้น

2.10.5 การศึกษาผลกระทบของคลอรีนในน้ำเสีย

ชฎารัตน์ อนันต์ (2540) ได้ศึกษาผลของความเค็มที่มีต่อการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของกระบวนการเอเอสแบบฟลูอิดไดค็อกซ์ 3 ชั้นตอน พบว่าประสิทธิภาพของระบบที่ใช้เชื้อที่ชินต่อคลอรีนมาก่อนนั้น สามารถทำงานได้ดี และรับสภาพช็อกได้ดีกว่าระบบที่ใช้หัวเชื้อทั่วไป และเมื่อความเข้มข้นคลอรีนสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์และไนโตรเจนลดลง

กรมควบคุมมลพิษ (2544) ได้จัดทำโครงการพัฒนากระบวนการจัดการน้ำเสียที่มีความเค็ม โดยเลือกใช้ระบบยูเอเอสบีร่วมกับระบบเอเอส (Activated Sludge ,AS) เพื่อเป็นต้นแบบสาธิตระดับนำร่อง สำหรับการบำบัดน้ำเสียที่มีความเค็มจากกิจกรรมบริเวณท่าเทียบเรือประมงหรือสะพานปลา ซึ่งการศึกษาโดยจัดทำต้นแบบสาธิตในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าซีโอดี 5,420–7,542 มก./ล ความเค็ม 5.38 -7.5 ก.โซเดียมคลอไรด์/ล. ทีเคเอ็น 285 -873 มก./ล พบว่า ที่ภาระบรทุกสารอินทรีย์ 1.5 - 2.64 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.วัน เวลาพักน้ำ 12 ชม. มีประสิทธิภาพ 58 -78 % ที่ภาระบรทุกสารอินทรีย์ 2.75 - 4.32 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.วัน เวลาพักน้ำ 8 ชม. มีประสิทธิภาพ 58-66 % เมื่อนำมาทดลองใช้กับน้ำเสียจริง พบว่า ที่ภาระบรทุกสารอินทรีย์ 2.4 – 4.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม. วัน เวลาพักน้ำ 12 ชม. มีประสิทธิภาพ 71 - 77% ที่ภาระบรทุกสารอินทรีย์ 2.03 - 5.85 กก. ซีโอดี/ลบ.ม.- วัน เวลาพักน้ำ 8 ชม. มีประสิทธิภาพ 57 - 71 %

ภูคำ พิมจักร (2546) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากสะพานปลา ซึ่งแบ่งการทดลองเป็น 2 ช่วง โดยช่วงแรกเป็นการศึกษาประสิทธิภาพของระบบยูเอเอสบี ในระดับห้องปฏิบัติการ มีค่าภาระบรทุกสารอินทรีย์อยู่ในช่วง 6.0 – 9.5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ความเร็วไหลขึ้นเท่ากับ 1 และ 3 ม./ชม. พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี เท่ากับ 77.2 % และประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี เท่ากับ 84.2 % สำหรับระบบยูเอเอสบีที่เติมเชื้อแบคทีเรียแบบคัดสายพันธุ์ ช่วงที่ 2 ศึกษากระบวนการยูเอเอสบี-แอนนออกซิก-แอโรบิก ในระดับต้นแบบสาธิตนำร่อง มีค่าภาระบรทุกสารอินทรีย์ 8.6 - 15.1 กก.ซีโอดี/ลบม.-วัน อัตราการเวียนตะกอน 200 % ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจน เท่ากับ 80.0 %

บทที่ 3

แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์อิมัลชันต่อการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ โดยมุ่งศึกษาถึงประสิทธิภาพของระบบอิมัลชันในการกำจัดไนเตรทในน้ำเสียที่มีมลสารอินทรีย์เป็นสารรบกวนโดยอ้างอิงชนิดของสารรบกวนจากการวิจัยที่ผ่านมาของภูคำ พิมพ์จักร (2546) คือสารอินทรีย์ประเภทซัลเฟต คลอไรด์ และไนเตรท ที่พบมากในการบำบัดน้ำเสียสะพานปลา โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าระดับความเข้มข้นของมลสารอินทรีย์ดังกล่าว ซึ่งการทดลองนี้มีชุดการทดลองทั้งหมด 4 ชุดการทดลอง ดังนี้

ชุดการทดลองที่ 1 เป็นการศึกษาผลรบกวนของมลสารอินทรีย์ประเภทซัลเฟตต่อการกำจัดไนเตรท โดยใช้ถังปฏิกรณ์ถังที่ 1 และเดินระบบที่ความเข้มข้นของซัลเฟตที่แตกต่างกันได้แก่ 50, 100 และ 150 มก./ล. ตามลำดับ

ชุดการทดลองที่ 2 เป็นการศึกษาผลรบกวนของมลสารอินทรีย์ประเภทคลอไรด์ต่อการกำจัดไนเตรท โดยใช้ถังปฏิกรณ์ถังที่ 2 และเดินระบบที่ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่แตกต่างกันได้แก่ 1,000, 1,500 และ 2,000 มก./ล. ตามลำดับ

ชุดการทดลองที่ 3 เป็นการศึกษาผลรบกวนของมลสารอินทรีย์ประเภทไนเตรทต่อการกำจัดไนเตรท โดยใช้ถังปฏิกรณ์ถังที่ 3 และเดินระบบที่ความเข้มข้นของไนเตรทที่แตกต่างกันได้แก่ 50, 100 และ 200 มก./ล. ตามลำดับ

ชุดการทดลองที่ 4 เป็นชุดการทดลองควบคุม โดยใช้ถังปฏิกรณ์ถังที่ 4 โดยไม่มีสารรบกวน

ตารางที่ 3.1 แผนการทดลองระบบอีจีเอสบี

| ชุดการทดลองที่ | ช่วงการทดลองที่ | | |
|---------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | 1 | 2 | 3 |
| 1 (สารรบกวนของซิลเฟต) | 50 มก./ล. 2 เดือน | 100 มก./ล. 2 เดือน | 150 มก./ล. 2 เดือน |
| 2 (สารรบกวนของคลอไรด์) | 1,000 มก./ล. 2 เดือน | 1,500 มก./ล. 2 เดือน | 2,000 มก./ล. 2 เดือน |
| 3 (สารรบกวนของไนไตรท์) | 50 มก./ล. 2 เดือน | 100 มก./ล. 2 เดือน | 200 มก./ล. 2 เดือน |
| 4 (ไม่มีสารรบกวน) | 6 เดือน | | |

การใช้ความเข้มข้นที่แตกต่างกันของสารรบกวนทั้ง 3 ชนิดดังกล่าวมีเหตุผลดังนี้ ที่ความเข้มข้นของสารรบกวนของซิลเฟตที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นค่าที่เริ่มมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ และที่ความเข้มข้นของซิลเฟตเท่ากับ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นค่าระบบเริ่มมีความเป็นพิษรายละเอียดดังตารางที่ 3.2 แต่ในการทดลองเป็นการทดสอบเพื่อศึกษา อัตราส่วนไนเตรทต่อซิลเฟต เท่ากับ 1:0.5, 1:1 และ 1:1.5 ว่าแบคทีเรียในระบบมีการแย่งใช้สารอาหารกันอย่างไร ส่วนค่าความเข้มข้นของคลอไรด์กำหนดให้ค่าความเข้มข้นอยู่ในช่วงระหว่าง 1,000 – 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นค่าปริมาณเกลือที่พบในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปลากระป๋องและสะพานปลาดังตารางที่ 2.7 และ 2.8 และค่าความเข้มข้นของไนไตรท์เป็นการวางแผนการทดลองเพื่อศึกษาว่าที่ค่าความเข้มข้นไนเตรทของ ไนเตรทต่อไนไตรท์ เท่ากับ 1:0.5, 1:1 และ 1:2 ตามลำดับ เพื่อศึกษาผลต่อปฏิริยาดีไนตริฟิเคชันในการเลือกใช้นิเตรทและไนไตรท์เป็นสารรับอิเล็กตรอนในการทำปฏิริยา และผลของไนไตรท์ต่อไนตริฟายอิงแบคทีเรีย (MaCarty, 1969 อ้างถึงในธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

การทดลองทั้งหมดได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุม คือ กำหนดให้ใช้หัวเชื้อแบคทีเรียจากโรงงานผลิตน้ำอัดลม บริษัทเสริมสุข จำกัด จังหวัดปทุมธานี เนื่องจากจุดประสงค์ต้องการใช้หัวเชื้อแบคทีเรียที่ใช้ในระบบบำบัดที่ไม่สารรบกวน 3 ประเภท เพื่อนำมาดูการปรับตัวของแบคทีเรียต่อสารรบกวนดังกล่าว และทำการบ่อน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกรณ์อีจีเอสบีด้วยเครื่องสูบน้ำแบบรีดสายของแต่ละชุดการทดลองด้วยความเร็ว 3 ม./ ชม. โดยมีเวลากักเก็บน้ำ 3.8 ชม. อัตราสูบ

น้ำเสีย 25 ลิตร/วัน อัตราการเวียนกลับของน้ำ 84 ลิตร/วัน และมีค่าการบำบัดทุกสารอินทรีย์ 6.6 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน

โดยเริ่มจากใช้น้ำตาลทรายเป็นสารอาหาร ความเข้มข้นซีโอดีประมาณ 500 มก./ล.เข้าระบบ ปรับพีเอชด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) เพื่อให้ค่าพีเอชเท่ากับ 7 สูบน้ำเสียเข้าระบบสู่ถังปฏิกรณ์ โดยให้ใช้ความเร็วไหลขึ้นเริ่มต้นระบบที่ประมาณ 0.5 ม./ชม. จากนั้นเพิ่มความเร็วไหลขึ้นจนถึงค่าความเร็วไหลขึ้นเท่ากับ 3 ม./ชม.ตามแผนการทดลอง เมื่อแบคทีเรียมีการปรับตัว (โดยดูจากประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของระบบไม่ต่ำกว่าร้อยละ 80) จึงเพิ่มความเข้มข้นซีโอดีจนมีค่าความเข้มข้นเท่ากับ 1,000 มก./ล. และหลังจากนั้นใส่ไนเตรทความเข้มข้นเท่ากับ 100 มก./ล.ในถังปฏิกรณ์ทั้ง 4 ชุดการทดลอง เมื่อระบบเริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัว จะเริ่มทำการทดลองโดยใส่สารบรกวินต่างๆ โดยแปรค่าความเข้มข้นของสารบรกวินทั้ง 3 ชนิดๆ ละ 3 ค่าความเข้มข้น ซึ่งแต่ละการทดลองใช้เวลาการทดลองจนระบบจะเข้าสู่สภาวะสมดุล ดังแผนการทดลองที่แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.2 ไฮโดรเจนซัลไฟด์และความเข้มข้นของซัลไฟด์ที่ทำให้เกิดการยับยั้งการผลิต

มีเทนจากกรดอะซิติกที่ 50 เปอร์เซ็นต์ (Visser, 1994 อ้างถึงในมันลิน ตัณฑุลเวศน์, 2542)

| ลักษณะเชื้อ | พีเอช | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (มก./ล.) |
|-------------|-----------|----------------------------|-----------------------------|
| แขวนลอย | 6.5 - 7.4 | 30 | 100 |
| | 7.7 - 7.9 | | 125 |
| | 6.3 - 6.4 | 55 | 18 |
| | 7.1 - 7.2 | | 21 |
| | 7.9 - 8.0 | | 24 |
| เป็นเม็ด | 6.4 - 6.6 | 30 | 246 |
| | 7.0 - 7.2 | 55 | 252 |
| | 7.8 - 8.0 | | 50 |
| | 6.3 - 6.4 | | 54 |
| | 7.1 - 7.2 | 75 | |
| | 7.9 - 8.0 | 24 | |

3.2 น้ำเสียสังเคราะห์และการเตรียมน้ำเสีย

3.2.1 ส่วนประกอบของน้ำเสีย

น้ำเสียที่สังเคราะห์ขึ้นในการทดลองนี้ ใช้น้ำตาลทรายเทียบเป็นปริมาณซีไอดีเท่ากับ 1,000 มก./ล. เพื่อให้ได้อัตราส่วนซีไอดีต่อไนเตรท 10:1 มก./ล. จะเติมไนเตรทให้ได้ความเข้มข้นที่ 100 มก./ล. และการทดลองนี้แบ่งเป็น 4 ชุดตามประเภทสารอินอนลบ เพื่อศึกษาถึงผลของความเข้มข้นของซัลเฟต คลอไรด์ ไนไตรท์ ที่มีผลกระทบต่อการลดไนเตรท ดังนั้น จึงสารรบกวนประเภทคลอไรด์ใช้โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ประเภทซัลเฟตใช้โซเดียมซัลเฟต (Na₂SO₄) และประเภทไนไตรท์ใช้โพแทสเซียมไนไตรท์ (KNO₂) นอกจากสารอาหาร น้ำตาล ไนเตรท แล้วแบคทีเรียในระบบซึ่งเป็นแบคทีเรียประเภทที่ไม่ใช้ออกซิเจน ยังต้องการให้ธาตุอาหารชนิดอื่นๆ อีกด้วย เพื่อการเจริญเติบโต และดำรงชีวิต จึงจำเป็นต้องเติมธาตุอาหารลงไปใต้น้ำเสียที่สังเคราะห์ขึ้นด้วย อาหารธาตุอาหารหลักที่จำเป็นเหล่านั้นได้แก่ ไนโตรเจน แคลเซียม แมกนีเซียม ฟอสฟอรัสและเหล็ก ทำการใส่ใต้น้ำเสียสังเคราะห์ทุกวัน ส่วนธาตุอาหารที่ต้องการเพียงเล็กน้อยแต่จำเป็น ได้แก่ โคบอลท์ และนิกเกิล เป็นต้น จะใส่ใต้น้ำเสียเพียงอาทิตย์ละครั้ง นอกจากนั้นยังจำเป็นต้องเพิ่มบัฟเฟอร์ให้ระบบเพื่อเป็นการรักษาระดับพีเอช ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย สำหรับสัดส่วนในการเติมสภาพต่าง ธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารเสริมที่เติมในการทดลอง แสดงดังตารางที่ 3.3

3.2.2 วิธีการเตรียมน้ำเสีย

การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ในแต่ละวันจะเตรียมน้ำเสีย แล้วเก็บไว้ในถังพลาสติกก่อนการเปลี่ยนน้ำเสีย เมื่อน้ำเสียในถังพักน้ำเสียหมดก็จะนำถังพักน้ำเสียมาล้างทำความสะอาดก่อนแล้วจึงเติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมไว้ลงในถังพักน้ำเสียที่สะอาดแล้ว ทั้งนี้เพื่อป้องกันปัญหาการหมักที่อาจเกิดขึ้นได้ในถังพักน้ำเสีย

3.3 เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง มีดังนี้

3.3.1 ถังพักน้ำเสีย

ใช้ถังพลาสติก ขนาดความจุ 100 ลิตร 4 ถัง

ตารางที่ 3.3 สัดส่วนในการเติมค่าสภาพต่าง ธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารเสริม (Speece, 1996 อ้างถึงใน Rittmann และ McCarty, 2001)

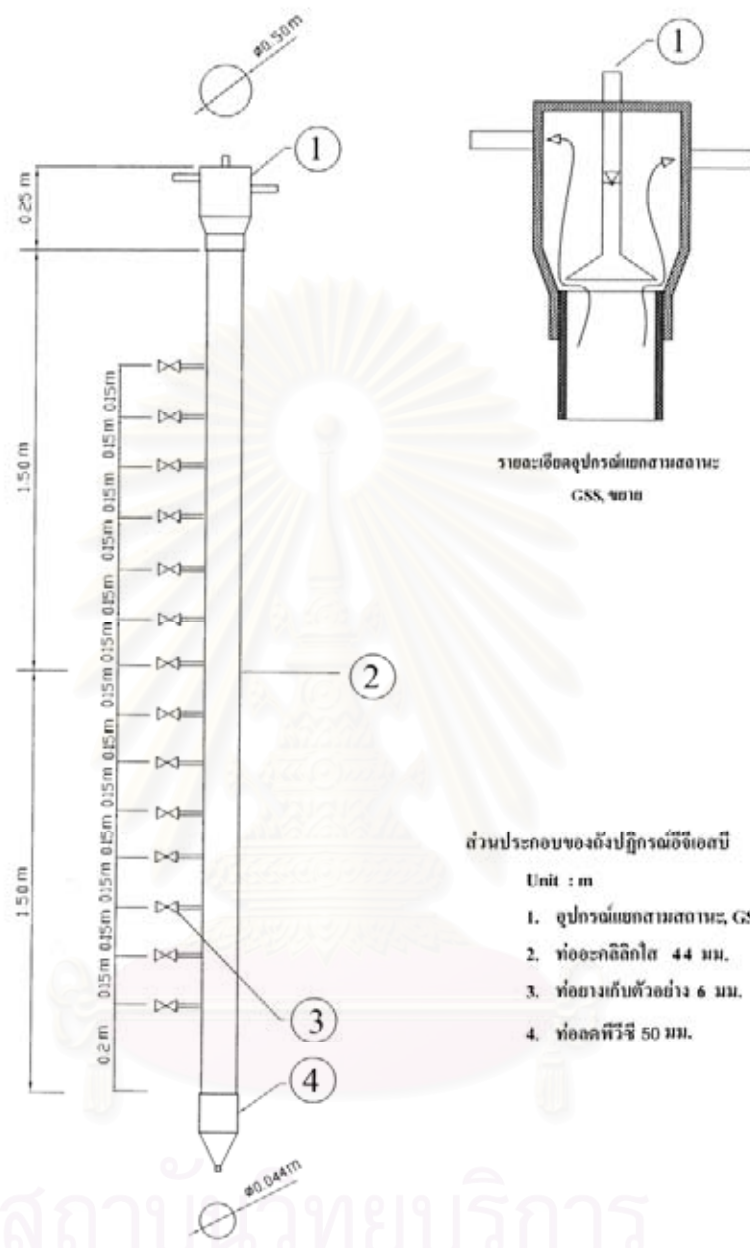
| ลำดับที่ | ส่วนประกอบ | ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร) |
|----------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| | สารอาหารหลัก | |
| 1 | COD | 1,000 |
| 2 | (NH ₂) ₂ CO | 85.72 |
| 3 | KH ₂ PO | 21.96 |
| 4 | NaHCO ₃ | 500 |
| 5 | CaCl ₂ *2H ₂ O | 150 |
| 6 | MgSO ₄ *7H ₂ O | 40 |
| 7 | FeSO ₄ *7H ₂ O | 40 |
| | สารอาหารเสริม | |
| 8 | H ₃ BO ₃ | 0.5 |
| 9 | CaCl ₂ *4H ₂ O | 0.5 |
| 10 | NiSO ₄ | 0.5 |
| 11 | CoCl ₂ *6H ₂ O | 0.5 |
| 12 | ZnCl ₂ | 0.5 |
| 13 | MnCl ₂ *4H ₂ O | 0.5 |
| 14 | NH ₄ VO ₃ | 0.5 |
| 15 | KI | 0.5 |

3.3.2 แบบจำลองถังปฏิกรณ์ไอ้จีสปี

ใช้แบบจำลองระดับห้องปฏิบัติการ ทำจากท่ออะคริลิกประกอบด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 44 ซม. สูง 300 ซม. คิดเป็นปริมาตร 3.8 ลิตร จำนวน 4 ชุด รายละเอียดของแบบจำลองถังปฏิกรณ์ไอ้จีสปี แสดงดังรูปที่ 3.1

3.3.3 เครื่องสูบน้ำเข้าสู่ระบบและเครื่องสูบน้ำเสียเวียนกลับ

ใช้เครื่องสูบน้ำเสียเข้าสู่ระบบ เป็นแบบไดอะแฟรม จำนวน 4 ชุด และเครื่องสูบน้ำเสียเวียนกลับ เป็นแบบไดอะแฟรม จำนวน 4 ชุด



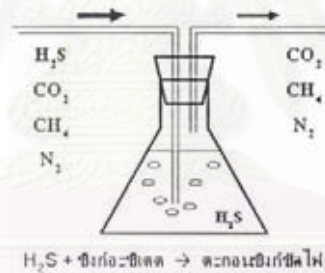
รูปที่ 3.1 แบบจำลองถังปฏิกรณ์อีซีเอสบี

3.3.4 อุปกรณ์เก็บและวัดปริมาตรก๊าซแบบแทนที่น้ำ

อุปกรณ์วัดก๊าซมีจำนวน 4 ชุด ทำงานโดยใช้หลักการแทนที่น้ำ โดยมีกระบอกแทนที่น้ำทำจากพลาสติก บรรจุน้ำเต็มกระบอก โดยทำการปรับพีเอชน้ำให้ต่ำกว่า 3 โดยใช้โซเดียมไบซัลไฟท์ (Na_2SO_3) 20 กรัม ผสมกับกรดซัลฟูริกเข้มข้น (conc. H_2SO_4) 5 มล. ในน้ำ 100 มล. เพื่อป้องกันการละลายน้ำของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กระบอกแทนที่น้ำจะต่อกับสายยางนำก๊าซออกจากถังปฏิกรณ์ โดยก๊าซจะไปแทนที่น้ำที่บรรจุอยู่ในกระบอกแทนที่น้ำ

3.3.5 ชุดดักก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

การดักก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์อาศัยสารละลายซิงก์อะซิเตต ($Zn(C_2H_3O_2)_2$) ดักจับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ จากการรีดักชันของซัลเฟตที่พีเอช 7 จะได้ซัลไฟด์ประมาณร้อยละ 50 และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ประมาณร้อยละ 50 ซึ่งในการทดลองใช้ความเข้มข้นซัลเฟตเท่ากับ 112.5 มก./ล. ซึ่งจะเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เท่ากับ 56.25 มก./ล. ดังนั้นจะใช้สารละลายซิงก์ อะซิเตตที่ความเข้มข้น 100 มก./ล. ชุดดักก๊าซประกอบด้วยขวดรูปชมพู่ (flask) ขนาด 500 มล. บรรจุด้วยสารละลายซิงก์อะซิเตต ที่มีค่าพีเอชประมาณ 3 – 3.5 โดยใช้โซเดียมไบซัลไฟท์ (Na_2SO_3) 20 กรัม ผสมกับกรดซัลฟูริกเข้มข้น (H_2SO_4) 5 มล. ในน้ำ 100 มล. เพื่อป้องกันการละลายน้ำของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ต่อท่อนำก๊าซจากส่วนดักก๊าซมาปล่อยใต้สารละลายซิงก์อะซิเตต ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะทำปฏิกิริยากับสารละลายซิงก์อะซิเตตเกิดเป็นตะกอนซิงก์ซัลไฟด์ ก๊าซที่เหลือผ่านสารละลายซิงก์อะซิเตตมาได้จะต่อท่อรวบรวมก๊าซออกไปเก็บไว้ในอุณหภูมิก่อนและวัดปริมาตรก๊าซแบบแทนที่น้ำ ดังรูปที่ 3.2 เมื่อครบ 24 ชั่วโมง สารละลายซิงก์อะซิเตตในขวดรูปชมพู่จะถูกนำไปกรองเอาตะกอนซิงก์ซัลไฟด์ แล้วจึงนำไปวิเคราะห์หาปริมาณซัลไฟด์ที่ถูกดักจับไว้ในแต่ละวันต่อไป



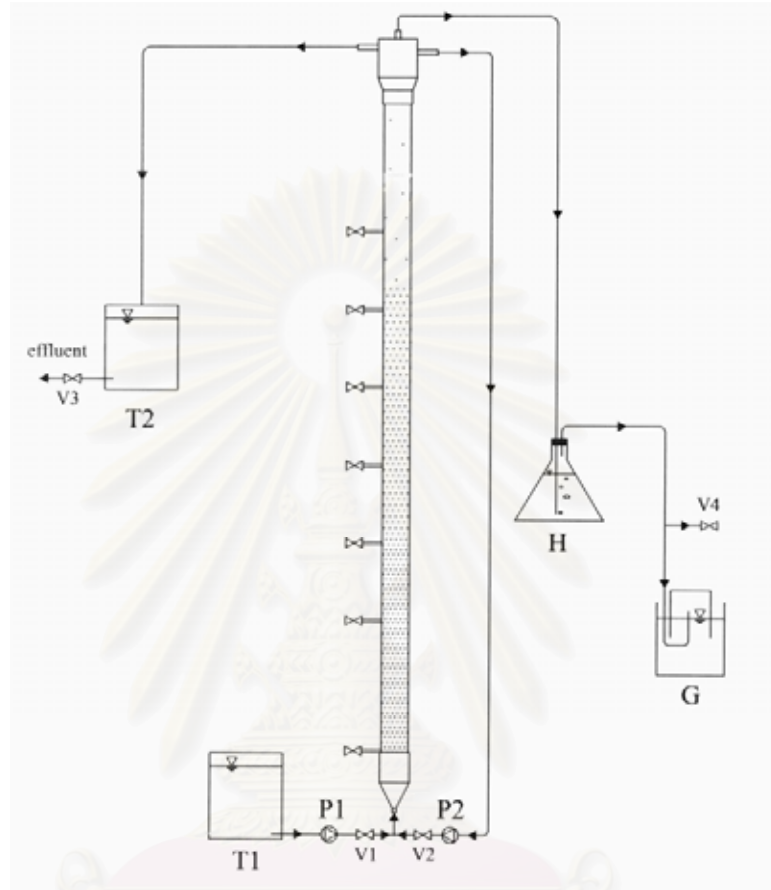
รูปที่ 3.2 ชุดดักก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

3.4 การติดตั้งเครื่องมือและหลักการทำงาน

การติดตั้งเครื่องมือและหลักการทำงานของ กระบวนอีจีเอสบี แสดงดังรูปที่ 3.3 โดยมีขั้นตอนการทำงาน ดังนี้

- 3.4.1 เครื่องสูบน้ำเสียเข้าสู่ระบบ (P1) จะสูบน้ำเสียจากถังพักน้ำเสีย (T1) ผ่านวาล์ว (V1) ส่งเข้าไปยังจุดน้ำเข้าของถังปฏิกรณ์อีจีเอสบี
- 3.4.2 น้ำทิ้งที่ออกจากถังปฏิกรณ์อีจีเอสบี จะไหลต่อไปยังถังพักน้ำทิ้ง (T2)
- 3.4.3 เครื่องสูบน้ำเสียเวียนกลับ (P2) จะสูบน้ำเสียเวียนกลับมาผ่านวาล์ว (V2) เข้ายังจุดน้ำเข้าของถังปฏิกรณ์
- 3.4.4 ก๊าซที่เกิดขึ้นจะผ่านอุปกรณ์แยกสามสถานะส่งไปยังอุปกรณ์วัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H)

3.4.5 ก๊าซที่ผ่านอุปกรณ์วัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H) จะไหลผ่านวาล์ว (V4) และวาล์ว (V5) มายังอุปกรณ์วัดปริมาตรก๊าซแบบแทนที่น้ำ (G)



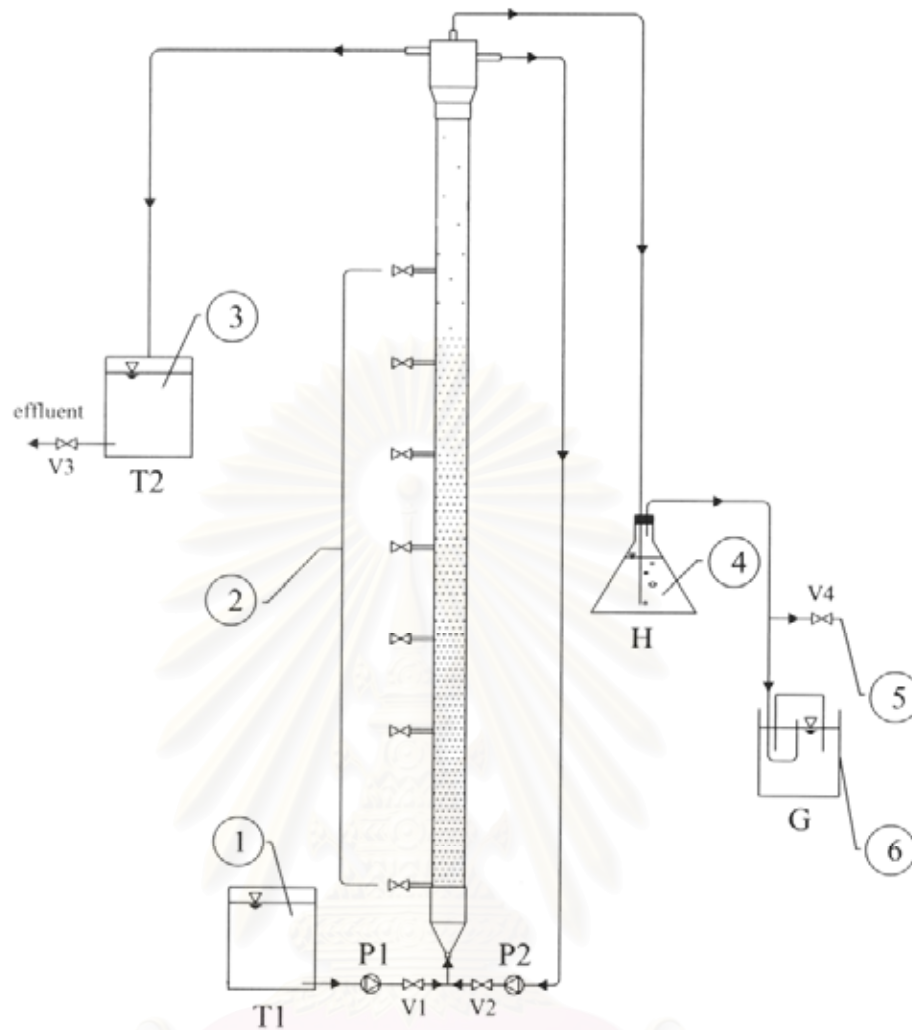
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการทำงานของระบบอ็อกซิเอสปี

3.5 จุดเก็บตัวอย่าง

จุดเก็บตัวอย่างมีด้วยกัน 6 จุด คือ

- 1) ถังพักน้ำเสีย (T1)
- 2) ท่อแยงเก็บตัวอย่างตะกอนตามความสูง
- 3) น้ำออกจากระบบอ็อกซิเอสปี ที่ถังพักน้ำทิ้ง (T2)
- 4) ชุดดักก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H)
- 5) จุดเก็บก๊าซ วาล์ว (V4)
- 6) ชุดวัดปริมาตรก๊าซแบบแทนที่น้ำ (G)

ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 รายละเอียดของจุดเก็บตัวอย่าง

จากรูปที่ 3.4 แต่ละจุดที่เก็บตัวอย่างจะถูกนำไปวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 รายละเอียดการเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ตัวอย่าง

| จุดเก็บตัวอย่าง | พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ | ความถี่ | วิธีวิเคราะห์ |
|------------------------------------|-------------------------|-----------------|--|
| 1. ถังพักน้ำเสีย (T1) (น้ำเข้า) | ซีโอดี | 3 ครั้ง/สัปดาห์ | Close Reflux (5220 C) |
| | ไนเตรท | 3 ครั้ง/สัปดาห์ | Ultraviolet spectrophotometric Screening Method (4500_NO ₃ ⁻ B) |
| | ไนไตรท์ | 3 ครั้ง/สัปดาห์ | Color Metric Method (4500_NO ₂ ⁻ B) |
| | ซัลเฟต | 3 ครั้ง/สัปดาห์ | Capillary Ion Electrophoresis with Indirect UV Detection (4140 B) |

ตารางที่ 3.4 รายละเอียดการเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ตัวอย่าง (ต่อ)

| จุดเก็บตัวอย่าง | พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ | ความถี่ | วิธีวิเคราะห์ |
|---|-------------------------|---------------------|---|
| | คลอไรด์ | 3 ครั้ง/สัปดาห์ | Mercuric Nitrate Method (4500-Cl ⁻ C) |
| | ฟิเอช | 3 ครั้ง/สัปดาห์ | Electrometric Method (4500-H ⁺) |
| | อุณหภูมิ | 3 ครั้ง/สัปดาห์ | ใช้ เทอร์โมมิเตอร์ (2550) |
| | สภาพต่างทั้งหมด | 3 ครั้ง/สัปดาห์ | Titration Method (2320 B) |
| | กรดไขมันระเหย | 3 ครั้ง/สัปดาห์ | Titration Method (2310 B) |
| 2. ตัวอย่างเก็บตัวอย่าง ตะกอนตามความสูง | โครงสร้างเม็ด ตะกอน | เมื่อจบการ ทดลอง | SEM (Scanning Electron Microscope) |
| 3. ถังพักน้ำทิ้ง (T2) (น้ำออก) | ซีโอดี | 3 ครั้ง/สัปดาห์ | Close Reflux (5220 C) |
| | ไนเตรท | 3 ครั้ง/สัปดาห์ | Ultraviolet spectrophotometric Screening Method (4500_NO ₃ ⁻ B) |
| | ไนไตรท์ | 3 ครั้ง/สัปดาห์ | Color Metric Method (4500_NO ₂ ⁻ B) |
| | ซัลเฟต | 3 ครั้ง/สัปดาห์ | Capillary Ion Electrophoresis with Indirect UV Detection (4140 B) |
| | ซัลไฟด์ | 1 ครั้ง/สัปดาห์ | Iodometric Method (4500-S ²⁻) |
| | คลอไรด์ | 3 ครั้ง/สัปดาห์ | Mercuric Nitrate Method (4500-Cl ⁻ C) |
| | ฟิเอช | 3 ครั้ง/สัปดาห์ | Electrometric Method (4500-H ⁺) |
| | อุณหภูมิ | 3 ครั้ง/สัปดาห์ | ใช้ เทอร์โมมิเตอร์ (2550) |
| | สภาพต่างทั้งหมด | 3 ครั้ง/สัปดาห์ | Titration Method (2320 B) |
| | กรดไขมันระเหย | 3 ครั้ง/สัปดาห์ | Titration Method (2310 B) |
| | ของแข็งแขวนลอย | 1 ครั้ง/สัปดาห์ | Total Suspended Solid Dried at 103-105 °C (2540 D) |
| | โออาร์พี | 3 ครั้ง/สัปดาห์ | Oxidation-Reduction Potential Measurement in clean water (2580) |
| 4. ชุดดักก๊าซ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H) | ซัลไฟด์ | 1 ครั้ง/สัปดาห์ | Iodometric Method (4500-S ²⁻) |
| 5. อุปกรณ์เก็บก๊าซ (V4) | สัดส่วนของก๊าซแต่ละชนิด | เมื่อจบการ ทดลอง | Gas Chromatographic Method (2720 C) |
| 6. อุปกรณ์วัดปริมาณ ก๊าซ แบบแทนที่น้ำ (G) | ปริมาตรก๊าซ ทั้งหมด | 1 ครั้ง/สัปดาห์ | วัดปริมาตรแบบแทนที่น้ำ |

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

การทดลองนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลของการรบกวนของสารอินอลบประเภทซัลเฟต คลอไรด์ และ ไนไตรท์ ในการกำจัดไนเตรท โดยเริ่มการทดลองจากการเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียในถังปฏิกรณ์ชีวเคมี ใช้น้ำตาลทรายที่มีความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็นสารอาหาร กำหนดอัตราการสูบน้ำเสียเข้าระบบ 25 ลิตรต่อวัน โดยใช้ความเร็วในการไหลขึ้นในถังปฏิกรณ์คกที่เท่ากับ 3 เมตรต่อชั่วโมง และให้มีอัตราการเวียนกลับของน้ำเท่ากับ 85 ลิตรต่อวัน มีค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 6.6 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร-วัน มีความเข้มข้นซีโอดีคกที่ตลอดการทดลองเท่ากับ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีความเข้มข้นของไนเตรทเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรเท่ากันทั้ง 4 ถังปฏิกรณ์ ทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารรบกวนซัลเฟต คลอไรด์ และ ไนไตรท์ของน้ำที่ไหลเข้าในถังปฏิกรณ์ที่ 1 , 2 และ 3 ตามลำดับ ส่วนถังปฏิกรณ์ที่ 4 เป็นถังปฏิกรณ์ที่เดินระบบโดยไม่ใส่สารรบกวน เพื่อเป็นถังเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและไนเตรทกับถังที่ใส่สารรบกวนอื่นๆ

ในช่วงก่อนเริ่มต้นทำการทดลอง จะต้องเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียในถังปฏิกรณ์ชีวเคมีเป็นเวลา 5-6 เดือนก่อน เพื่อให้แบคทีเรียเกิดความคุ้นเคยต่อสภาพแวดล้อมภายในระบบ โดยในระหว่างนี้ได้เก็บตัวอย่างของน้ำเพื่อนำไปวิเคราะห์ลักษณะคุณสมบัติความเป็นไปของระบบ และเพื่อการควบคุมระบบเท่านั้น จึงไม่นำผลที่ได้ในช่วงนี้ไปรวมการวิเคราะห์ และการเก็บตัวอย่างของน้ำเพื่อนำมาวิเคราะห์นี้ จะเก็บหลังจากที่ระบบเริ่มทำงานไปแล้วอย่างน้อย 4 - 5 ชั่วโมง

ผลการทดลองที่ได้จะนำไปวิเคราะห์และอธิบาย โดยจำแนกออกตามชุดการทดลองและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อสะดวกต่อความเข้าใจถึงผลของสารรบกวนแต่ละชนิด ที่มีผลต่อการกำจัดไนเตรท ซีโอดี และประสิทธิภาพของการทำงานของระบบ ค่าที่แสดงนี้จะเป็นค่าเฉลี่ยกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของพารามิเตอร์ต่างๆในน้ำเสีย โดยจะนำค่าที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์ และเปรียบเทียบกันในแต่ละชุดการทดลอง แล้วจึงนำมาสรุปถึงผลของสารรบกวนแต่ละประเภทที่มีต่อประสิทธิภาพของการทำงานของระบบในการกำจัดไนเตรท และซีโอดีอีกครั้ง จากวิธีที่กล่าวมาข้างต้นรวมถึงผลการทดลอง สามารถนำมาสรุปโดยจำแนกตามแต่ละพารามิเตอร์ได้ดังนี้

4.1 ผลของสารรบกวนที่มีผลต่อการกำจัดไนเตรท และซีโอดี ในระบบชีวเคมี

ชุดการทดลองที่ 1 เป็นชุดการทดลองที่มีมลสารอินอลบประเภทซัลเฟตในน้ำเข้า และมีความเข้มข้นเท่ากับ 50 , 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชุดการทดลองนี้ จะเริ่มจากการใส่ซัลเฟตในรูปของโซเดียมซัลเฟต (NaSO_4) 50 มิลลิกรัม ต่อลิตร ลงในน้ำเสียสังเคราะห์ เข้าถึงปฏิกรณ์ที่ 1 ในช่วงแรกระบบมีการปรับตัวกับสารบวทอนที่เติมเข้าไป และมีการยกขึ้นของตะกอนแบคทีเรียในบางครั้ง เมื่อระบบสามารถปรับตัวได้แล้ว จึงเริ่มเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อนำไปวิเคราะห์ หลังจากนั้นปล่อยให้ระบบทำงานต่อไปเป็นเวลา 62 วัน จึงเพิ่มความเข้มข้นของซัลเฟตเป็น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลาอีก 65 วัน หลังจากนั้นจึงเพิ่มความเข้มข้นของซัลเฟตเป็น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร สิ่งหนึ่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงภายหลังจากการเพิ่มความเข้มข้นของซัลเฟตในแต่ละครั้ง คือ ตะกอนแบคทีเรียในระบบเริ่มมีการยกขึ้นบ่อยครั้ง จนบางครั้งตะกอนหลุดออกนอกระบบ

ชุดการทดลองที่ 2 เป็นชุดการทดลองที่มีมลสารอินอนลบประเภทคลอไรด์ในน้ำเข้า และมีความเข้มข้นเท่ากับ 1,000, 1,500 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชุดการทดลองนี้ จะเริ่มจากการเติมคลอไรด์ในรูปของเกลือคลอไรด์ (NaCl) 500 มิลลิกรัม ต่อลิตร ลงในน้ำเสียสังเคราะห์ เข้าถึงปฏิกรณ์ที่ 2 ในช่วงแรกระบบมีการปรับตัวกับสารบวทอนที่เติมเข้าไป เมื่อแบคทีเรียในระบบสามารถปรับตัวกับความเข้มข้นของคลอไรด์ จึงเพิ่มความเข้มข้นของคลอไรด์เป็น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามแผนการทดลอง เก็บตัวอย่างน้ำเพื่อนำไปวิเคราะห์ หลังจากให้ระบบทำงานต่อไปเป็นเวลา 55 วัน จึงเพิ่มความเข้มข้นของคลอไรด์เป็น 1,500 มิลลิกรัมต่อลิตร และให้ระบบทำงานเป็นเวลา 67 วัน จึงเริ่มการทดลองช่วงที่ 3 โดยเพิ่มความเข้มข้นของคลอไรด์เป็น 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร สิ่งหนึ่งที่มีการเปลี่ยนแปลงภายหลังจากการเพิ่มความเข้มข้นของคลอไรด์แต่ละครั้ง คือ ตะกอนแบคทีเรียในระบบเริ่มมีการยกขึ้นบ่อยครั้ง จนบางครั้งตะกอนหลุดออกนอกระบบ ทำให้ไม่สามารถเดินระบบได้ต่อเนื่อง

ชุดการทดลองที่ 3 เป็นชุดการทดลองที่มีมลสารอินอนลบประเภทไนโตรเจนในน้ำเข้า และมีความเข้มข้นเท่ากับ 50, 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชุดการทดลองนี้ จะเริ่มจากการใส่ไนโตรเจนในรูปของโปแทสเซียมไนเตรท (KNO_3) 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงในน้ำเสียสังเคราะห์ เพื่อป้อนเข้าถึงปฏิกรณ์ที่ 3 ซึ่งระบบสามารถทำงานได้ดี จึงเริ่มเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อนำไปวิเคราะห์ รวมเป็นระยะเวลา 59 วัน จึงเพิ่มความเข้มข้นของไนโตรเจนเป็น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อระบบทำงานเป็นเวลา 53 วัน จึงเพิ่มความเข้มข้นของไนโตรเจนเป็น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามแผนการทดลองช่วงการทดลองที่ 3 ซึ่งระบบก็สามารถทำงานได้ดี

ชุดการทดลองที่ 4 เป็นชุดการทดลองที่ไม่มีมลสารอินอนลบในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าระบบโดยเริ่มจากให้ระบบทำงานต่อจากขั้นตอนการเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียในถังปฏิกรณ์อีจีเอสบี โดยมีความเข้มข้นของสารบวทอนอินอนลบจากสารอาหารที่เติมในน้ำเสียสังเคราะห์ ประกอบด้วยซัลเฟตความเข้มข้นเท่ากับ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร และ คลอไรด์ความเข้มข้นเท่ากับ 73 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจะนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากชุดการทดลองชุดที่ 4 ไปเปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์

จากชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ที่มีสารรบกวนมลสารอินทรีย์ประเภทซัลเฟต คลอไรด์ และ ไนไตรท์ ตามลำดับ

จากวิธีการดำเนินการทดลองที่กล่าวมาข้างต้นทั้ง 4 ชุดการทดลอง สามารถแสดงผล การทดลอง ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าสูงสุด และค่าต่ำสุด ในรูปแบบของตาราง รวมถึง เปรียบเทียบในรูปแบบของกราฟของแต่ละพารามิเตอร์ ซึ่งแสดงไว้ในแต่ละหัวข้อ ดังต่อไปนี้

4.1.1 สภาพแวดล้อมของการการเดินระบบ

สภาพแวดล้อมของการเดินระบบ เป็นค่าพารามิเตอร์เพื่อดูความเป็นไปของ ระบบ และใช้เป็นข้อมูลประกอบการควบคุมระบบให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่ง ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วย อุณหภูมิ ไออาร์พี พีเอช สภาพต่างทั้งหมด และ กรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้นในระบบ

1) อุณหภูมิ

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 ค่าอุณหภูมิของน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสีย ที่ออกจากระบบในชุดการทดลองที่ 1 ที่มีความเข้มข้นซัลเฟตของเท่ากับ 50, 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 30.3, 29.3 และ 29.3 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วน น้ำที่ออกจากระบบมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 29.9, 29.5 และ 29.4 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ก.1)

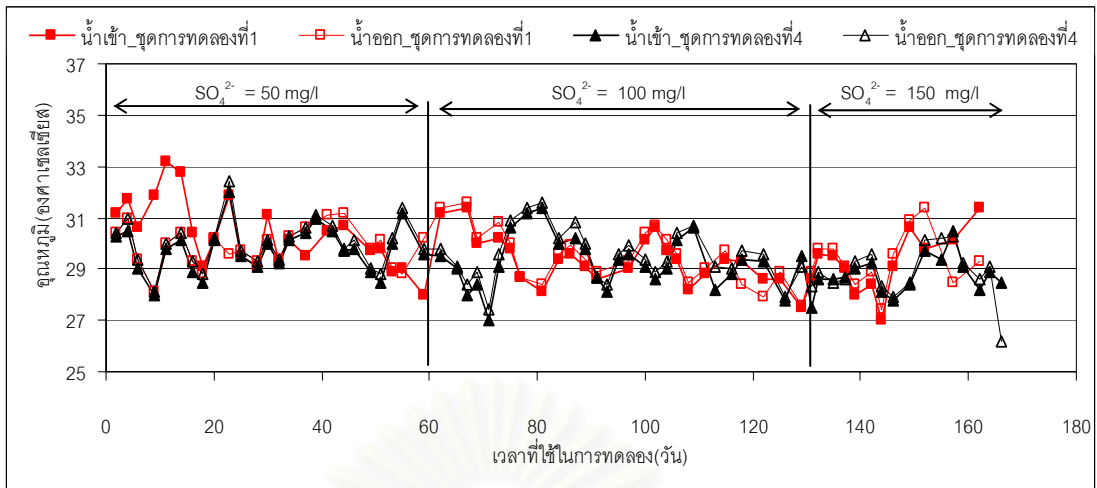
ชุดการทดลองที่ 2 ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์เท่ากับ 1,000, 1,500 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าอุณหภูมิของน้ำเสียสังเคราะห์เฉลี่ยเท่ากับ 29.7, 29.4 และ 29.2 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนน้ำที่ออกจากระบบมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 30.1, 29.6 และ 29.4 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ข.1)

ชุดการทดลองที่ 3 ที่มีความเข้มข้นของไนไตรท์ 50, 100 และ 200 มิลลิกรัม ต่อลิตร มีค่าอุณหภูมิของน้ำเสียสังเคราะห์เฉลี่ยเท่ากับ 29.8, 29.4 และ 29.1 องศาเซลเซียส ตามลำดับ น้ำที่ออกจากระบบมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 30.0, 29.7 และ 29.2 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ค.1)

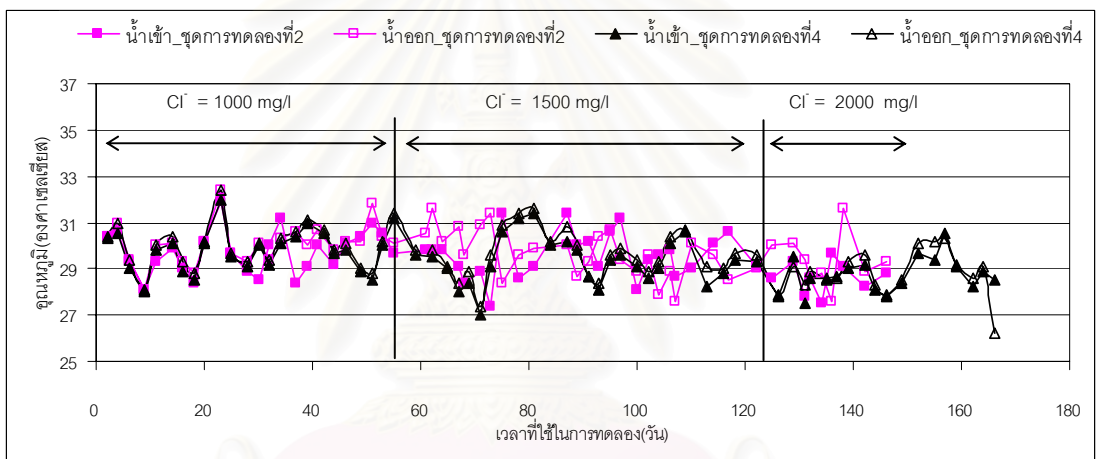
ชุดการทดลองที่ 4 ที่เดินระบบโดยไม่มีสารรบกวน มีค่าอุณหภูมิของน้ำเสีย สังเคราะห์เฉลี่ยเท่ากับ 29.8, 29.4 และ 28.8 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนน้ำที่ออกจากระบบ มีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 30.0, 29.7 และ 28.9 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (รายละเอียดข้อมูล จากตารางภาคผนวก ง.1)

ตารางที่ 4.1 คุณลักษณะของทุกชุดการทดลอง

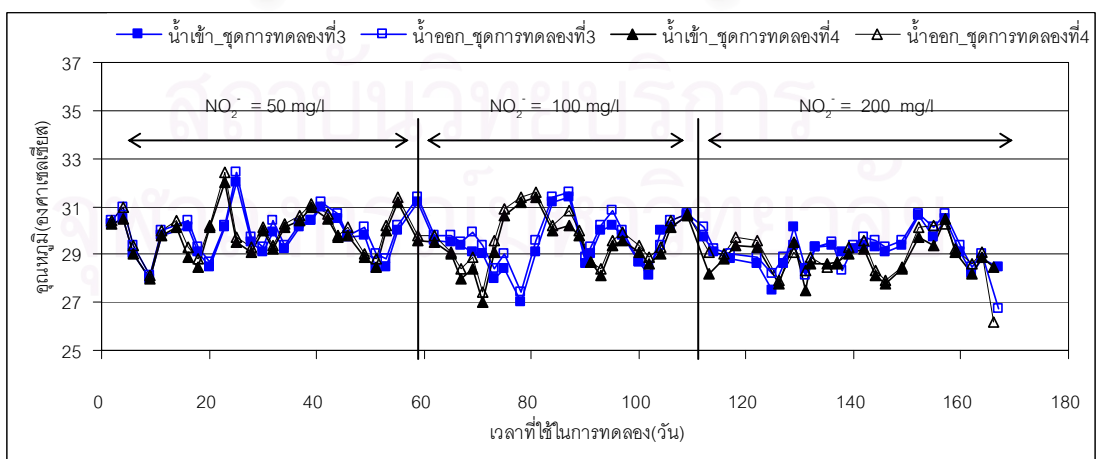
| ชุดการทดลองที่ | ช่วงการทดลองที่ 1 | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | ช่วงการทดลองที่ 3 | |
|-------------------------|---|--------|--|--------|--|--------|
| | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | น้ำเข้า | น้ำออก | น้ำเข้า | น้ำออก |
| ชุดการทดลองที่ 1 | $\text{NO}_3^- : \text{SO}_4^{2-} = 100 : 50$ | | $\text{NO}_3^- : \text{SO}_4^{2-} = 100 : 100$ | | $\text{NO}_3^- : \text{SO}_4^{2-} = 100 : 150$ | |
| จำนวน | 23 | 23 | 24 | 24 | 11 | 11 |
| ค่าเฉลี่ย | 30.3 | 29.9 | 29.3 | 29.5 | 29.3 | 29.4 |
| SD | 1.32 | 0.78 | 0.95 | 1.04 | 1.23 | 1.13 |
| ค่าสูงสุด | 33.2 | 31.2 | 31.4 | 31.6 | 31.4 | 31.4 |
| ค่าต่ำสุด | 28.0 | 28.1 | 27.5 | 27.6 | 27.0 | 27.4 |
| ชุดการทดลองที่ 2 | $\text{NO}_3^- : \text{Cl}^- = 100 : 1,000$ | | $\text{NO}_3^- : \text{Cl}^- = 100 : 1,500$ | | $\text{NO}_3^- : \text{Cl}^- = 100 : 2,000$ | |
| จำนวน | 25 | 25 | 9 | 9 | 24 | 24 |
| ค่าเฉลี่ย | 29.7 | 30.1 | 29.4 | 29.6 | 29.2 | 29.4 |
| SD | 0.94 | 0.87 | 1.02 | 1.04 | 1.11 | 1.14 |
| ค่าสูงสุด | 31.9 | 32.4 | 31.4 | 31.6 | 31.4 | 31.6 |
| ค่าต่ำสุด | 28.1 | 28.1 | 27.5 | 27.6 | 27.4 | 27.6 |
| ชุดการทดลองที่ 3 | $\text{NO}_3^- : \text{NO}_2^- = 100 : 50$ | | $\text{NO}_3^- : \text{NO}_2^- = 100 : 100$ | | $\text{NO}_3^- : \text{NO}_2^- = 100 : 200$ | |
| จำนวน | 24 | 24 | 22 | 22 | 22 | 22 |
| ค่าเฉลี่ย | 29.8 | 30.0 | 29.4 | 29.7 | 29.1 | 29.2 |
| SD | 0.95 | 0.96 | 1.04 | 0.99 | 0.72 | 0.88 |
| ค่าสูงสุด | 32.0 | 32.4 | 31.4 | 31.6 | 30.6 | 30.7 |
| ค่าต่ำสุด | 28.0 | 28.1 | 27.0 | 27.4 | 27.5 | 26.7 |
| ชุดการทดลองที่ 4 | ไม่มีสารรบกวน | | ไม่มีสารรบกวน | | ไม่มีสารรบกวน | |
| จำนวน | 24 | 24 | 22 | 22 | 22 | 22 |
| ค่าเฉลี่ย | 29.8 | 30.0 | 29.4 | 29.7 | 28.8 | 28.9 |
| SD | 0.93 | 0.95 | 1.07 | 1.04 | 0.71 | 0.92 |
| ค่าสูงสุด | 32.0 | 32.4 | 31.4 | 31.6 | 30.5 | 30.3 |
| ค่าต่ำสุด | 28.0 | 28.1 | 27.0 | 27.4 | 27.5 | 26.2 |



(ก) ชุดการทดลองที่ 1 ที่มีสารรบกวนประเภทซัลเฟตและชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน



(ข) ชุดการทดลองที่ 2 ที่มีสารรบกวนประเภทคลอไรด์และชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน



(ค) ชุดการทดลองที่ 3 ที่มีสารรบกวนประเภทไนไตรท์และชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน

รูปที่ 4.1 อุณหภูมิตลอดการทดลองของทุกชุดการทดลอง

จากรูปที่ 4.1 ค่าอุณหภูมิของน้ำที่ออกจากระบบของชุดการทดลอง มีค่าอุณหภูมิอยู่ในช่วง 27 - 33 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก เป็นช่วงที่อุณหภูมิแบบมีโซฟิลิค (20 - 45 องศาเซลเซียส) แบคทีเรียในระบบสามารถทำงานอยู่ได้ แต่ไม่ใช่ช่วงที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ดีที่สุด (ช่วงอุณหภูมิเทอร์โมฟิลิค ,Thermophilic ซึ่งมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 50 - 65 องศาเซลเซียส) เพราะเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีและการทำงานของเอนไซม์ภายในเซลล์ของแบคทีเรียจะทำงานเร็วขึ้น ทำให้อัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น (มันสิน ตัณฑุลเวศน์,2542)

2) ไออาร์พี

ค่าไออาร์พีในน้ำเสียที่ออกจากระบบในชุดการทดลองที่ 1 ที่มีความเข้มข้นของซัลเฟตเท่ากับ 50, 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าไออาร์พีเฉลี่ยเท่ากับ -312.0, -346.1 และ -292.3 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ก.2)

ชุดการทดลองที่ 2 ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์เท่ากับ 1,000, 1,500 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าไออาร์พีในน้ำที่ออกจากระบบเฉลี่ยเท่ากับ -313.2, -336.7 และ -250.1 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ข.2)

ชุดการทดลองที่ 3 ที่มีความเข้มข้นของไนโตรเจนเท่ากับ 50, 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าไออาร์พีเฉลี่ยเท่ากับ -332.8, -328.7 และ -329.8 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ค.2)

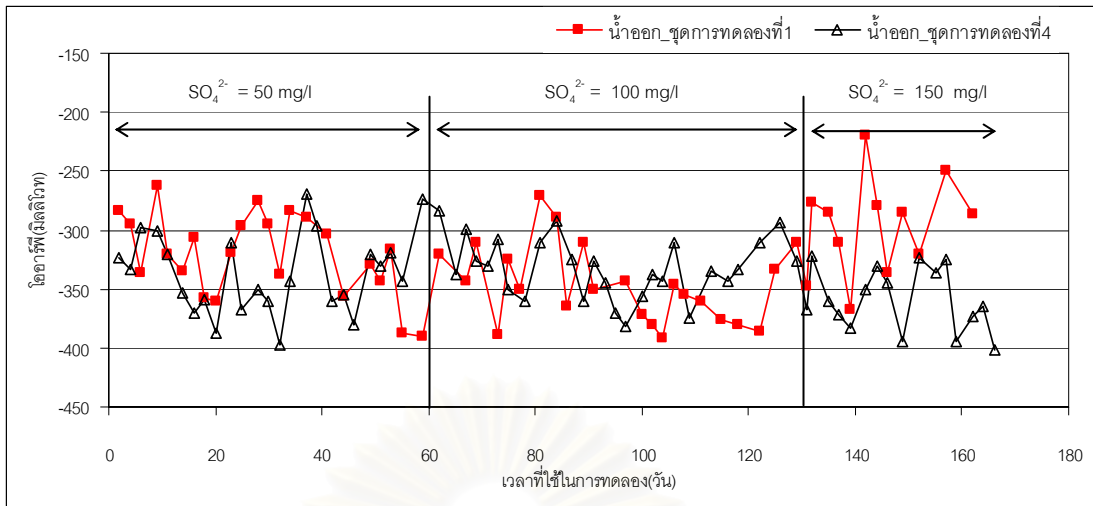
ชุดการทดลองที่ 4 ที่เดินระบบโดยไม่มีสารรบกวน มีค่าไออาร์พีเฉลี่ยเท่ากับ -339.7, -331.9 และ -349.3 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ง.2)

จากรูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.2 จะเห็นว่า ค่าไออาร์พีของน้ำที่ออกจากถังปฏิกรณ์ของทั้ง 4 ชุดการทดลองมีค่าเป็นลบ ทั้งนี้เนื่องจาก ค่าไออาร์พี (Oxidation Reduction Potential) ของน้ำเสีย เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการให้หรือรับอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์ ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะมีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้น้อยแต่มีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนมาก จึงมีค่าไออาร์พีอยู่ในช่วง -500 ถึง -300 มิลลิโวลต์ ค่าไออาร์พีของน้ำที่ออกจากถังปฏิกรณ์ทดลองชุดการทดลองอยู่ในช่วง -400 ถึง -200 มิลลิโวลต์ โดยมีค่าลบบางค่าที่มีค่าลบน้อยกว่าช่วงที่เหมาะสม เนื่องจาก ส่วนประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทำการทดลองมีสารรับอิเล็กตรอนประเภทไนเตรท และซัลเฟต จึงทำให้มีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น และในการวัดค่าไออาร์พีในน้ำตัวอย่างจะนำน้ำภายในถังปฏิกรณ์ใส่ปิเกตอร์ก่อนแล้วจึงวัดค่าไออาร์พี ซึ่งในบางครั้งทำการวัดค่าไออาร์พีหลังจากเริ่มเดินระบบหลังจากเกิดการยกตัวของชั้นตะกอนหลุดออกมาข้างนอกถังปฏิกรณ์ ทำให้แบคทีเรีย

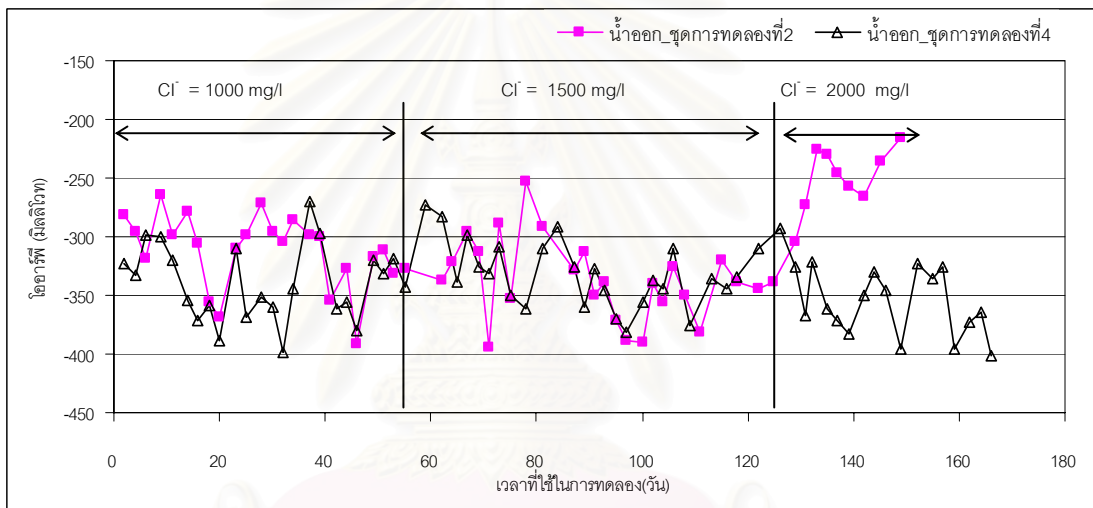
ในระบบและน้ำในถังปฏิกรณ์มีการสัมผัสออกซิเจน ทำให้ค่าไออาร์พีที่ได้เป็นค่าลบน้อยกว่าค่าที่ควรจะเป็น

ตารางที่ 4.2 ไออาร์พีของทุกชุดการทดลอง

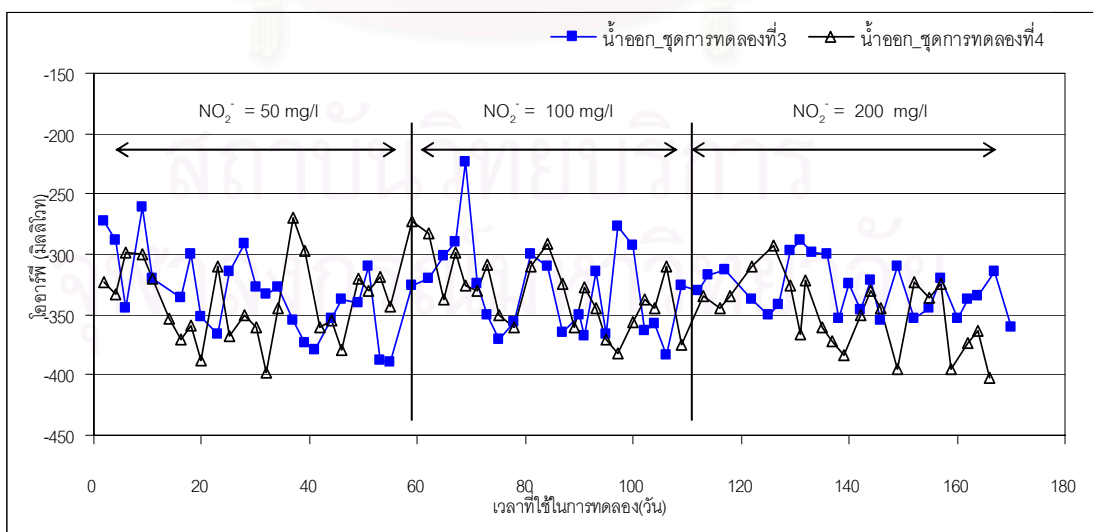
| ชุดการทดลองที่ | ช่วงการทดลองที่ 1 | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | ช่วงการทดลองที่ 3 | |
|-------------------------|---|--------|--|--------|--|--------|
| | ไออาร์พี (มิลลิโวลท์) | | ไออาร์พี (มิลลิโวลท์) | | ไออาร์พี (มิลลิโวลท์) | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | น้ำเข้า | น้ำออก | น้ำเข้า | น้ำออก |
| ชุดการทดลองที่ 1 | $\text{NO}_3^- : \text{SO}_4^{2-} = 100 : 50$ | | $\text{NO}_3^- : \text{SO}_4^{2-} = 100 : 100$ | | $\text{NO}_3^- : \text{SO}_4^{2-} = 100 : 150$ | |
| จำนวน | - | 23 | - | 24 | - | 11 |
| ค่าเฉลี่ย | - | -321.0 | - | -346.1 | - | -292.3 |
| SD | - | 34.73 | - | 32.32 | - | 40.20 |
| ค่าสูงสุด | - | -390 | - | -392 | - | -367 |
| ค่าต่ำสุด | - | -262 | - | -271 | - | -220 |
| ชุดการทดลองที่ 2 | $\text{NO}_3^- : \text{Cl}^- = 100 : 1,000$ | | $\text{NO}_3^- : \text{Cl}^- = 100 : 1,500$ | | $\text{NO}_3^- : \text{Cl}^- = 100 : 2,000$ | |
| จำนวน | - | 25 | - | 24 | - | 9 |
| ค่าเฉลี่ย | - | -313.2 | - | -336.7 | - | -250.1 |
| SD | - | 30.81 | - | 34.86 | - | 27.80 |
| ค่าสูงสุด | - | -392 | - | -394 | - | -304 |
| ค่าต่ำสุด | - | -264 | - | -253 | - | -216 |
| ชุดการทดลองที่ 3 | $\text{NO}_3^- : \text{NO}_2^- = 100 : 50$ | | $\text{NO}_3^- : \text{NO}_2^- = 100 : 100$ | | $\text{NO}_3^- : \text{NO}_2^- = 100 : 200$ | |
| จำนวน | - | 24 | - | 23 | - | 22 |
| ค่าเฉลี่ย | - | -332.8 | - | -328.7 | - | -329.8 |
| SD | - | 34.70 | - | 37.79 | - | 22.12 |
| ค่าสูงสุด | - | -390 | - | -384 | - | -360 |
| ค่าต่ำสุด | - | -261 | - | -224 | - | -288 |
| ชุดการทดลองที่ 4 | ไม่มีสารรบกวน | | ไม่มีสารรบกวน | | ไม่มีสารรบกวน | |
| จำนวน | - | 24 | - | 22 | - | 22 |
| ค่าเฉลี่ย | - | -339.7 | - | -331.9 | - | -349.3 |
| SD | - | 31.93 | - | 30.01 | - | 29.40 |
| ค่าสูงสุด | - | -398 | - | -382 | - | -402 |
| ค่าต่ำสุด | - | -270 | - | -273 | - | -293 |



(ก) ชุดการทดลองที่ 1 ที่มีสารรบกวนประเภทซัลเฟตและชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน



(ข) ชุดการทดลองที่ 2 ที่มีสารรบกวนประเภทคลอไรด์และชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน

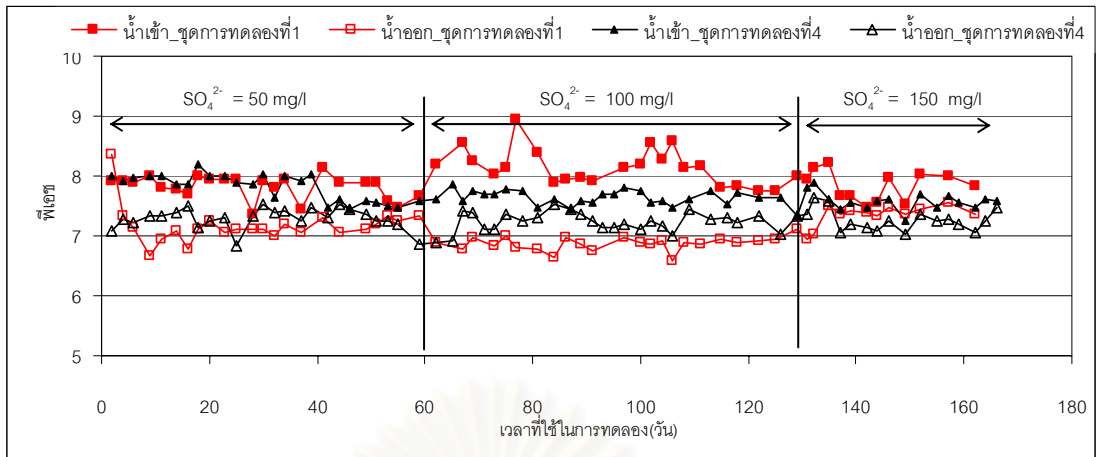


(ค) ชุดการทดลองที่ 3 ที่มีสารรบกวนประเภทไนไตรท์และชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน

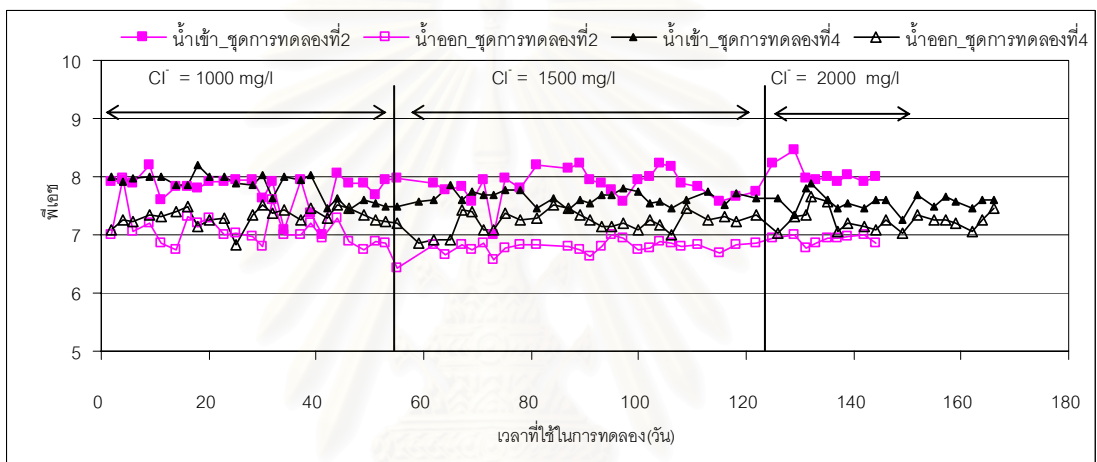
รูปที่ 4.2 ไฮอาร์ทตลอดการทดลองของทุกชุดการทดลอง

ตารางที่ 4.3 พีเอชของทุกชุดการทดลอง

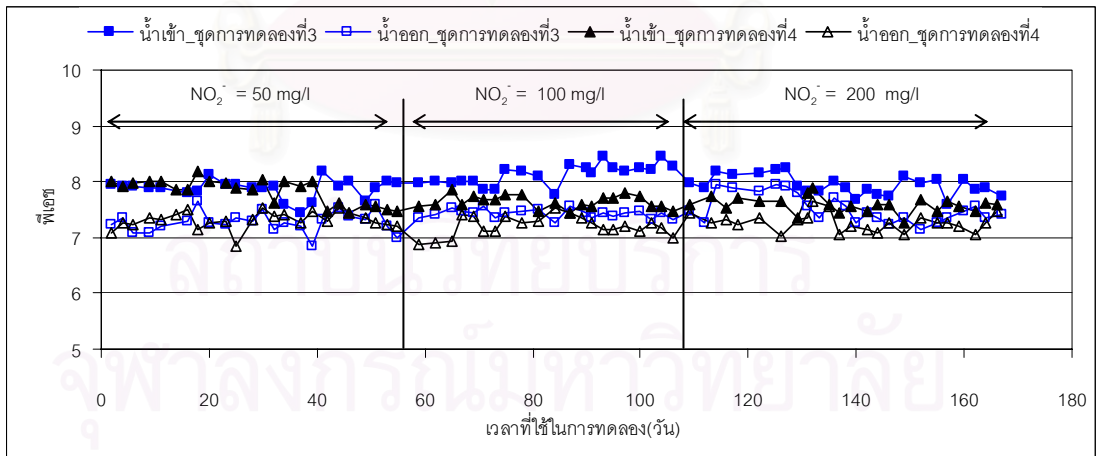
| ชุดการทดลองที่ | ช่วงการทดลองที่ 1 | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | ช่วงการทดลองที่ 3 | |
|-------------------------|---|--------|--|--------|--|--------|
| | พีเอช | | พีเอช | | พีเอช | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | น้ำเข้า | น้ำออก | น้ำเข้า | น้ำออก |
| ชุดการทดลองที่ 1 | $\text{NO}_3^- : \text{SO}_4^{2-} = 100 : 50$ | | $\text{NO}_3^- : \text{SO}_4^{2-} = 100 : 100$ | | $\text{NO}_3^- : \text{SO}_4^{2-} = 100 : 150$ | |
| จำนวน | 23 | 23 | 24 | 24 | 11 | 11 |
| ค่าเฉลี่ย | 7.82 | 7.17 | 8.14 | 6.88 | 7.83 | 7.39 |
| SD | 0.20 | 0.31 | 0.30 | 0.11 | 0.26 | 0.14 |
| ค่าสูงสุด | 8.13 | 8.37 | 8.94 | 7.11 | 8.23 | 7.56 |
| ค่าต่ำสุด | 7.36 | 6.67 | 7.74 | 6.59 | 7.46 | 7.04 |
| ชุดการทดลองที่ 2 | $\text{NO}_3^- : \text{Cl}^- = 100 : 1,000$ | | $\text{NO}_3^- : \text{Cl}^- = 100 : 1,500$ | | $\text{NO}_3^- : \text{Cl}^- = 100 : 2,000$ | |
| จำนวน | 24 | 24 | 24 | 24 | 9 | 9 |
| ค่าเฉลี่ย | 7.80 | 7.05 | 7.86 | 6.80 | 8.05 | 6.92 |
| SD | 0.28 | 0.31 | 0.27 | 0.09 | 0.18 | 0.07 |
| ค่าสูงสุด | 8.20 | 7.96 | 8.24 | 6.99 | 8.46 | 6.99 |
| ค่าต่ำสุด | 7.01 | 6.44 | 7.00 | 6.57 | 7.90 | 6.78 |
| ชุดการทดลองที่ 3 | $\text{NO}_3^- : \text{NO}_2^- = 100 : 50$ | | $\text{NO}_3^- : \text{NO}_2^- = 100 : 100$ | | $\text{NO}_3^- : \text{NO}_2^- = 100 : 200$ | |
| จำนวน | 24 | 24 | 22 | 22 | 22 | 22 |
| ค่าเฉลี่ย | 7.89 | 7.28 | 8.12 | 7.42 | 7.94 | 7.53 |
| SD | 0.16 | 0.18 | 0.19 | 0.09 | 0.18 | 0.26 |
| ค่าสูงสุด | 8.19 | 7.64 | 8.46 | 7.57 | 8.25 | 7.96 |
| ค่าต่ำสุด | 7.45 | 6.84 | 7.77 | 7.25 | 7.59 | 7.15 |
| ชุดการทดลองที่ 4 | ไม่มีสารรบกวน | | ไม่มีสารรบกวน | | ไม่มีสารรบกวน | |
| จำนวน | 24 | 24 | 22 | 22 | 22 | 22 |
| ค่าเฉลี่ย | 7.83 | 7.31 | 7.64 | 7.21 | 7.58 | 7.26 |
| SD | 0.22 | 0.15 | 0.12 | 0.19 | 0.14 | 0.16 |
| ค่าสูงสุด | 8.19 | 7.52 | 7.86 | 7.52 | 7.88 | 7.65 |
| ค่าต่ำสุด | 7.44 | 6.84 | 7.44 | 6.87 | 7.25 | 7.03 |



(ก) ชุดการทดลองที่ 1 ที่มีสารรบกวนประเภทซัลเฟตและชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน



(ข) ชุดการทดลองที่ 2 ที่มีสารรบกวนประเภทคลอไรด์และชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน



(ค) ชุดการทดลองที่ 3 ที่มีสารรบกวนประเภทไนไตรท์และชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน

รูปที่ 4.3 พิเอชตลอดการทดลองของทุกชุดการทดลอง

3) พีเอช

ชุดการทดลองที่ 1 ที่มีความเข้มข้นของซัลเฟตเท่ากับ 50, 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์เฉลี่ยเท่ากับ 7.82, 8.14 และ 7.83 ตามลำดับ ส่วนน้ำที่ออกจากระบบมีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 7.17, 6.88 และ 7.39 ตามลำดับ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ก.3)

ชุดการทดลองที่ 2 ที่มีความเข้มข้นคลอไรด์เท่ากับ 1,000, 1,500 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์เฉลี่ยเท่ากับ 7.80, 7.86 และ 8.05 ตามลำดับ ส่วนน้ำที่ออกจากระบบมีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 7.05, 6.80 และ 6.92 ตามลำดับ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ข.3)

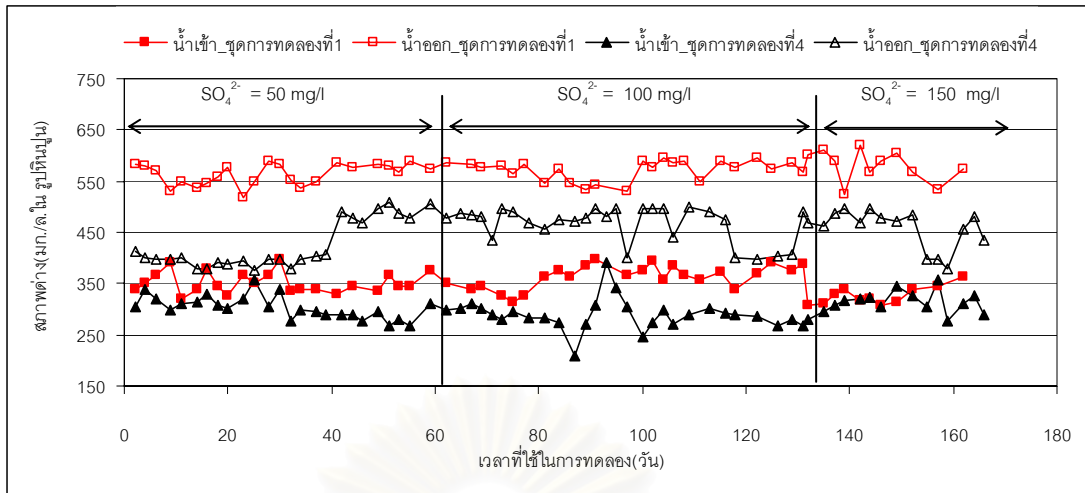
ชุดการทดลองที่ 3 ที่มีความเข้มข้นของไนไตรท์เท่ากับ 50, 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์เฉลี่ยเท่ากับ 7.89, 8.10 และ 7.94 ตามลำดับ ส่วนน้ำที่ออกจากระบบมีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 7.28, 7.40 และ 7.53 ตามลำดับ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ค.3)

ชุดการทดลองที่ 4 ที่เดินระบบโดยไม่มีสารรบกวน มีค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์เฉลี่ยเท่ากับ 7.83, 7.64 และ 7.58 ส่วนน้ำที่ออกจากระบบมีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 7.31, 7.21 และ 7.26 (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ง.3)

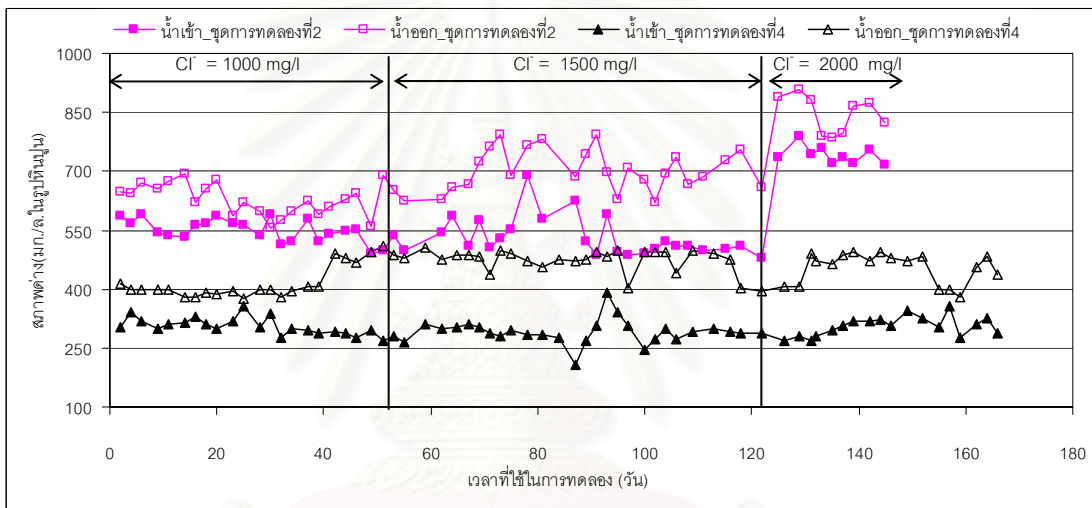
จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า ตลอดการทดลอง ค่าพีเอชของน้ำที่ออกจากระบบทั้ง 4 ชุดการทดลอง มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับค่าพีเอชของน้ำเข้าระบบ เมื่อพิจารณาถึงค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมเพื่อเข้าระบบ มีค่าพีเอชสูง เนื่องจาก การเติมสภาพต่างในรูปโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต เพื่อรักษาระดับพีเอชในถังปฏิกรณ์ไม่ให้ต่ำเกินไป เพิ่มความเป็นบัฟเฟอร์ให้กับระบบ และเมื่อพิจารณาร่วมกับผลการทดลองในส่วนของค่าสภาพต่างที่มีค่าเพิ่มขึ้นในน้ำที่ออกจากระบบนั้น (ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป) มีเหตุผลที่สอดคล้องกับสิ่งที่เกิดขึ้น คือ แบคทีเรียในระบบอีจีเอสบีมีการผลิตกรดไขมันระเหยในปริมาณที่ค่อนข้างมาก ทำให้ค่าพีเอชในน้ำที่ออกจากระบบมีค่าลดลง ซึ่งในขั้นตอนนี้ ค่าพีเอชของระบบที่ลดลงเกิดจากการย่อยสลายน้ำตาลทรายเป็นกรดไขมันระเหยและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่เนื่องจากแบคทีเรียในระบบยังสามารถทำงานอยู่ได้ ค่าพีเอชในระบบจึงไม่ลดลงต่ำมากนัก ทำให้ค่าพีเอชของน้ำที่ออกจากระบบมีค่าพีเอชอยู่ในช่วงพีเอชที่เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียในระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน คือ ช่วง พีเอช 6.5 – 7.2 (มันสิน ตัณฑุเวศน์, 2542)

ตารางที่ 4.4 สภาพต่างทั้งหมดของทุกชุดการทดลอง

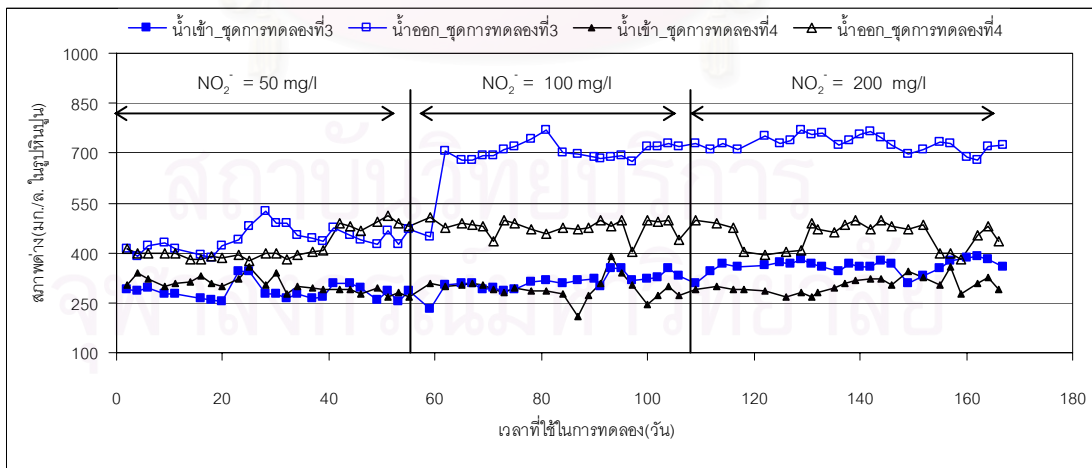
| ชุดการทดลองที่ | ช่วงการทดลองที่ 1 | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | ช่วงการทดลองที่ 3 | |
|-------------------------|---|--------|--|--------|--|--------|
| | สภาพต่างทั้งหมด (มก./ล. ในรูป หินปูน) | | สภาพต่างทั้งหมด (มก./ล. ในรูป หินปูน) | | สภาพต่างทั้งหมด (มก./ล. ในรูป หินปูน) | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | น้ำเข้า | น้ำออก | น้ำเข้า | น้ำออก |
| ชุดการทดลองที่ 1 | $\text{NO}_3^- : \text{SO}_4^{2-} = 100 : 50$ | | $\text{NO}_3^- : \text{SO}_4^{2-} = 100 : 100$ | | $\text{NO}_3^- : \text{SO}_4^{2-} = 100 : 150$ | |
| จำนวน | 23 | 23 | 24 | 24 | 11 | 11 |
| ค่าเฉลี่ย | 352.0 | 563.6 | 363.3 | 571.6 | 326.8 | 580.1 |
| SD | 20.58 | 20.91 | 23.22 | 19.96 | 18.21 | 30.69 |
| ค่าสูงสุด | 397 | 589 | 398 | 596 | 364 | 620 |
| ค่าต่ำสุด | 320 | 518 | 313 | 529 | 307 | 524 |
| ชุดการทดลองที่ 2 | $\text{NO}_3^- : \text{Cl}^- = 100 : 1,000$ | | $\text{NO}_3^- : \text{Cl}^- = 100 : 1,500$ | | $\text{NO}_3^- : \text{Cl}^- = 100 : 2,000$ | |
| จำนวน | 24 | 24 | 24 | 24 | 9 | 9 |
| ค่าเฉลี่ย | 546.8 | 629.1 | 533.3 | 706.7 | 741.8 | 846.4 |
| SD | 29.83 | 39.34 | 50.97 | 51.36 | 22.76 | 47.43 |
| ค่าสูงสุด | 589 | 694 | 690 | 792 | 789 | 910 |
| ค่าต่ำสุด | 490 | 557 | 478 | 622 | 718 | 786 |
| ชุดการทดลองที่ 3 | $\text{NO}_3^- : \text{NO}_2^- = 100 : 50$ | | $\text{NO}_3^- : \text{NO}_2^- = 100 : 100$ | | $\text{NO}_3^- : \text{NO}_2^- = 100 : 200$ | |
| จำนวน | 24 | 24 | 22 | 22 | 22 | 22 |
| ค่าเฉลี่ย | 281.1 | 442.3 | 316.0 | 706.5 | 363.1 | 730.8 |
| SD | 26.46 | 34.55 | 20.62 | 22.98 | 17.93 | 23.84 |
| ค่าสูงสุด | 346 | 524 | 354 | 768 | 390 | 771 |
| ค่าต่ำสุด | 233 | 385 | 284 | 674 | 310 | 678 |
| ชุดการทดลองที่ 4 | ไม่มีสารรบกวน | | ไม่มีสารรบกวน | | ไม่มีสารรบกวน | |
| จำนวน | 24 | 24 | 22 | 22 | 22 | 22 |
| ค่าเฉลี่ย | 302.9 | 421.0 | 292.3 | 477.8 | 303.0 | 451.3 |
| SD | 23.07 | 44.64 | 34.16 | 24.89 | 23.29 | 40.04 |
| ค่าสูงสุด | 356 | 510 | 390 | 505 | 356 | 496 |
| ค่าต่ำสุด | 266 | 375 | 208 | 402 | 268 | 379 |



(ก) ชุดการทดลองที่ 1 ที่มีสารรบกวนประเภทซัลเฟตและชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน



(ข) ชุดการทดลองที่ 2 ที่มีสารรบกวนประเภทคลอไรด์และชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน



(ค) ชุดการทดลองที่ 3 ที่มีสารรบกวนประเภทไนไตรท์และชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน

รูปที่ 4.4 สภาพต่างทั้งหมดตลอดการทดลองของทุกชุดการทดลอง

4) สภาพต่างทั้งหมด

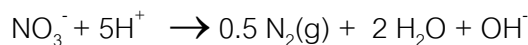
ชุดการทดลองที่ 1 ที่มีความเข้มข้นของซัลเฟตเท่ากับ 50, 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าสภาพต่างของน้ำเสียสังเคราะห์เฉลี่ยเท่ากับ 352.0, 363.3 และ 326.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ ส่วนน้ำที่ออกจากระบบมีค่าสภาพต่างเฉลี่ยเท่ากับ 563.6, 571.6 และ 580.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ก.4)

ชุดการทดลองที่ 2 ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์เท่ากับ 1,000, 1,500 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าสภาพต่างของน้ำเสียสังเคราะห์เฉลี่ยเท่ากับ 546.8, 533.3 และ 741.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ ส่วนน้ำที่ออกจากระบบมีค่าสภาพต่างเฉลี่ยเท่ากับ 629.1, 706.7 และ 846.4 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ข.4)

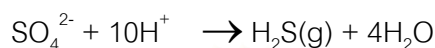
ชุดการทดลองที่ 3 ที่มีความเข้มข้นของไนไตรท์เท่ากับ 50, 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าสภาพต่างของน้ำเสียสังเคราะห์เฉลี่ยเท่ากับ 281.1, 316.0 และ 363.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ ส่วนน้ำที่ออกจากระบบมีค่าสภาพต่างเฉลี่ยเท่ากับ 442.3, 706.5 และ 730.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ค.4)

ชุดการทดลองที่ 4 ที่เดินระบบโดยไม่มีสารรบกวน มีค่าสภาพต่างทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์เฉลี่ยเท่ากับ 302.9, 292.3 และ 303.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ ส่วนน้ำที่ออกจากระบบมีค่าสภาพต่างเฉลี่ยเท่ากับ 421.0, 477.8 และ 451.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ง.4)

จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.4 ค่าสภาพต่างทั้งหมดของน้ำที่ออกจากระบบของทั้ง 4 ชุดการทดลอง มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าระบบ การที่สภาพต่างมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจาก ในการทดลองนี้ได้ทำการเติมโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต(NaHCO_3) เพื่อเพิ่มกำลังบัฟเฟอร์ให้กับน้ำเสียเข้าระบบที่ทำการสังเคราะห์ขึ้น สาเหตุที่ต้องเพิ่มกำลังบัฟเฟอร์ให้กับระบบ เนื่องจาก แบคทีเรียสร้างกรดจะสร้างกรดไขมันระเหยขึ้นมาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบ ถ้าหากระบบมีกำลังบัฟเฟอร์ไม่เพียงพอ จะทำให้ค่าพีเอชภายในระบบลดลงอย่างรวดเร็ว และอาจทำให้ระบบล้มเหลวได้ และสาเหตุอีกประการเนื่องจาก การเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันเปลี่ยนไนเตรทให้เป็นก๊าซไนโตรเจน(N_2) ซึ่งจะมีการนำไฮโดรเจนไอออน(H^+) ไปใช้ในการทำปฏิกิริยาและเกิดไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เพิ่มขึ้นในระบบ ดังสมการที่แสดงดังนี้

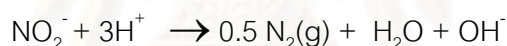


เมื่อพิจารณาแต่ละชุดการทดลองพบว่า ชุดการทดลองที่ 1 ที่มีสารบวกรวมประเภทซัลเฟต ค่าสภาพต่างในน้ำที่ออกจากระบบสูงมาก เนื่องจากในระบบมีปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน และปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชัน ซึ่งมีการนำไฮโดรเจนอิออน (H^+) ที่อยู่ในถังปฏิกรณ์ไปใช้ในการทำปฏิกิริยาเพื่อเปลี่ยนซัลเฟตให้เป็นซัลไฟด์ (S^{2-}) สมการการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวแสดงดังนี้



สำหรับแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าสภาพต่างของน้ำที่ออกจากระบบ เมื่อระดับความเข้มข้นของซีโอดีคิงที่และซัลเฟตเพิ่มขึ้น ในแต่ละอัตราส่วน แสดงให้เห็นว่า ค่าสภาพต่างทั้งหมดของน้ำที่ออกจากระบบมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำที่เข้าระบบ และมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามค่าซัลเฟตที่เพิ่มขึ้น แต่มีอัตราการเพิ่มที่ไม่มากนัก

ชุดการทดลองที่ 3 ที่มีสารบวกรวมประเภทไนไตรท์ มีแนวโน้มการเพิ่มสภาพต่างตามความเข้มข้นของไนไตรท์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก ในระบบมีไนเตรทและไนไตรท์ (ที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นในแต่ละช่วงการทดลอง) ร่วมทำปฏิกิริยาทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันเพิ่มขึ้น ไฮโดรเจนอิออนในระบบลดลง สภาพต่างในระบบจึงเพิ่มขึ้น ดังสมการ



การเพิ่มของสภาพต่างของน้ำที่ออกจากระบบ เมื่อเทียบกับน้ำเสียที่เตรียมเข้าระบบ เกิดจากระบบแอนแอโรบิกในถังปฏิกรณ์จะผลิตสภาพต่างในชั้น mineralization (การทำให้ให้เป็นแอม) ได้มากกว่าที่ถูกทำลายในชั้น acidification (การสร้างกรดไขมันระเหย) สำหรับแนวคิดการผลิตสภาพต่างของระบบไร้อากาศในชั้น mineralization โดยการผลิตรูปอิออนไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (HS^-) และทำลายไฮโดรเจนอิออน (H^+) แต่เดิมยังไม่เป็นที่เข้าใจของผู้วิจัย และเข้าใจว่าระบบไม่สามารถผลิตสภาพต่างขึ้นมาได้ ถ้าน้ำเสียที่เข้าระบบเป็นประเภทน้ำเสียคาร์โบไฮเดรต แต่อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลองซึ่งค่าสภาพต่างของน้ำเสียมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งที่แหล่งคาร์บอนที่ใช้ คือ น้ำตาลทราย ซึ่งอ้างอิงจากผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของ อรุษา เศรษฐวิธกิจ, 2542 เรื่องการสร้างค่าสภาพกรดและค่าสภาพต่างที่เกิดขึ้นในกระบวนการไร้อากาศ 2 ขั้นตอน คือ ชั้น acidification และชั้น mineralization ว่า "ชั้น acidification ระบบจะผลิตค่าสภาพกรด และมีการทำลายสภาพต่าง ขณะที่ชั้น mineralization ระบบจะผลิตค่าสภาพกรดและสภาพต่างได้ โดยค่าคาร์บอนอนินทรีย์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาในขั้นตอน mineralization จากการย่อยอะซิเตต (CH_3COO^-) ให้อยู่ในรูปอิออนไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) แต่เนื่องจาก ค่าพีเอชที่เบคที่เรียในระบบจะสามารถอยู่ได้มีค่าอยู่ในช่วงกลาง ดังนั้น

กรดอะซิติกที่เกิดขึ้นจากขั้นตอน acidification ส่วนใหญ่จะแตกตัวอยู่ในรูปอะซิเตต (CH_3COO^-) และคาร์บอนอนินทรีย์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการย่อยอะซิเตต (CH_3COO^-) โดยแบคทีเรียมีเทนหรือแบคทีเรียรีดิคัลซัลเฟต ให้อยู่ในรูปไอออนไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) จึงจะทำให้สมการการของปฏิกิริยาเกิดสมดุลในส่วนของประจุไฟฟ้า แต่การที่พบก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในรูปของก๊าซเกิดจากการเข้าสู่สมดุลของระบบคาร์บอเนตจากรูปไอออนไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) ที่เกิดขึ้น อีกทั้งเมื่อนำการหนีของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายน้ำเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาร่วมพิจารณา การเปลี่ยนแปลงค่าสภาพกรด และค่าสภาพต่าง ทำให้พบว่า ให้ค่าสภาพกรดของระบบมีค่าลดลงเล็กน้อย และมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงต่อค่าสภาพต่างที่เกิดในระบบ” ซึ่งตรงกับผลการทดลองที่ผู้วิจัยได้ทำมา

5) กรดไขมันระเหย

ชุดการทดลองที่ 1 ที่มีความเข้มข้นของซัลเฟตเท่ากับ 50, 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่ากรดไขมันระเหยของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าระบบเฉลี่ยเท่ากับ 82.7, 72.3 และ 78.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปกรดอะซิติก ตามลำดับ ส่วนน้ำที่ออกจากระบบมีค่ากรดไขมันระเหยเฉลี่ยเท่ากับ 136.0, 114.7 และ 112.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปกรดอะซิติก ตามลำดับ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ก.5)

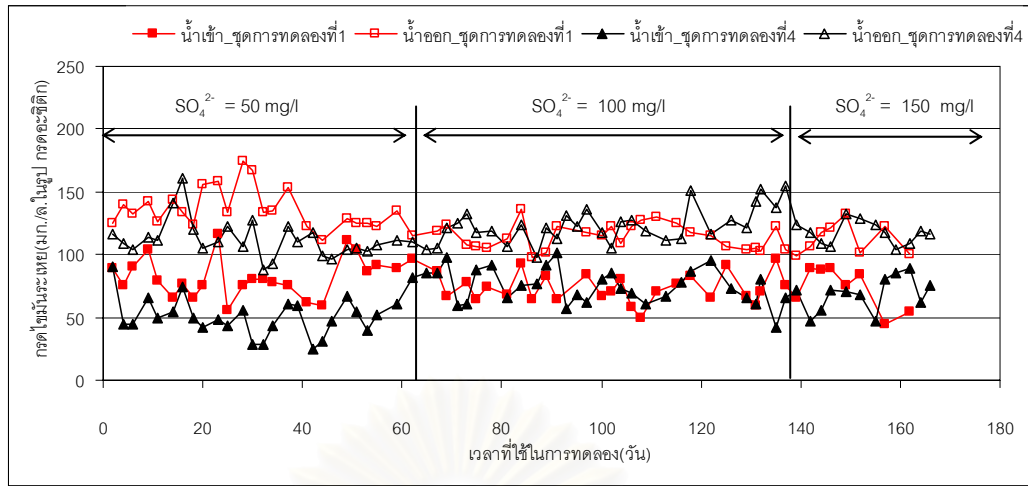
ชุดการทดลองที่ 2 ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์เท่ากับ 1,000, 1,500 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่ากรดไขมันระเหยของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าระบบเฉลี่ยเท่ากับ 224.4, 228.6 และ 194.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปกรดอะซิติก ตามลำดับ ส่วนน้ำที่ออกจากระบบมีค่ากรดไขมันระเหยเฉลี่ยเท่ากับ 265.4, 258.1 และ 263.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปกรดอะซิติก ตามลำดับ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ข.5)

ชุดการทดลองที่ 3 ที่มีความเข้มข้นของไนโตรเจนเท่ากับ 50, 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่ากรดไขมันระเหยของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าระบบเฉลี่ยเท่ากับ 117.8, 80.1 และ 77.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปกรดอะซิติก ตามลำดับ ส่วนน้ำที่ออกจากระบบมีค่ากรดไขมันระเหยเฉลี่ยเท่ากับ 131.6, 112.3 และ 101.4 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปกรดอะซิติก ตามลำดับ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ค.5)

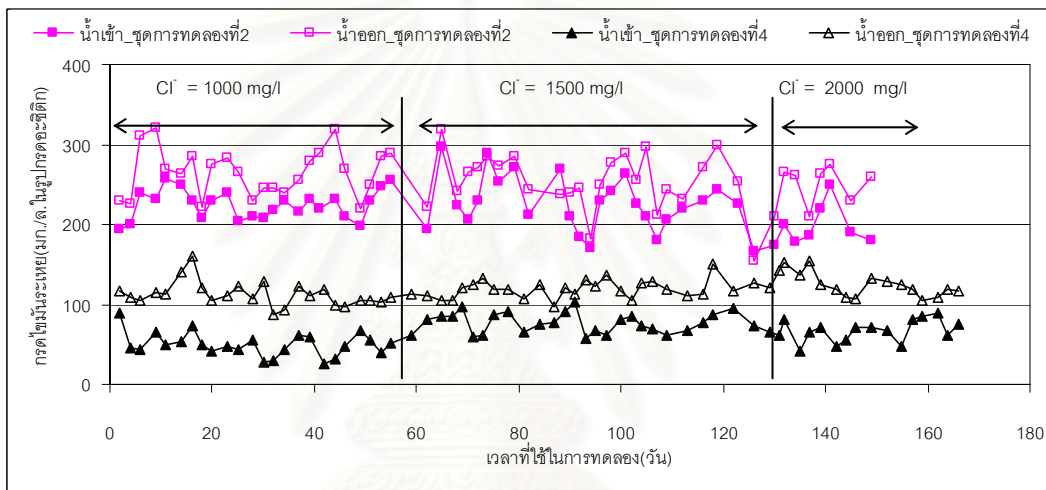
ชุดการทดลองที่ 4 ที่เดินระบบโดยไม่มีสารรบกวน มีค่ากรดไขมันระเหยของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าระบบเฉลี่ยเท่ากับ 49.9, 76.4 และ 70.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปกรดอะซิติก ตามลำดับ ส่วนน้ำที่ออกจากระบบมีค่ากรดไขมันระเหยเฉลี่ยเท่ากับ 112.3, 117.8 และ 124.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปกรดอะซิติก ตามลำดับ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ง.5)

ตารางที่ 4.5 กรดไขมันระเหยของทุกชุดการทดลอง

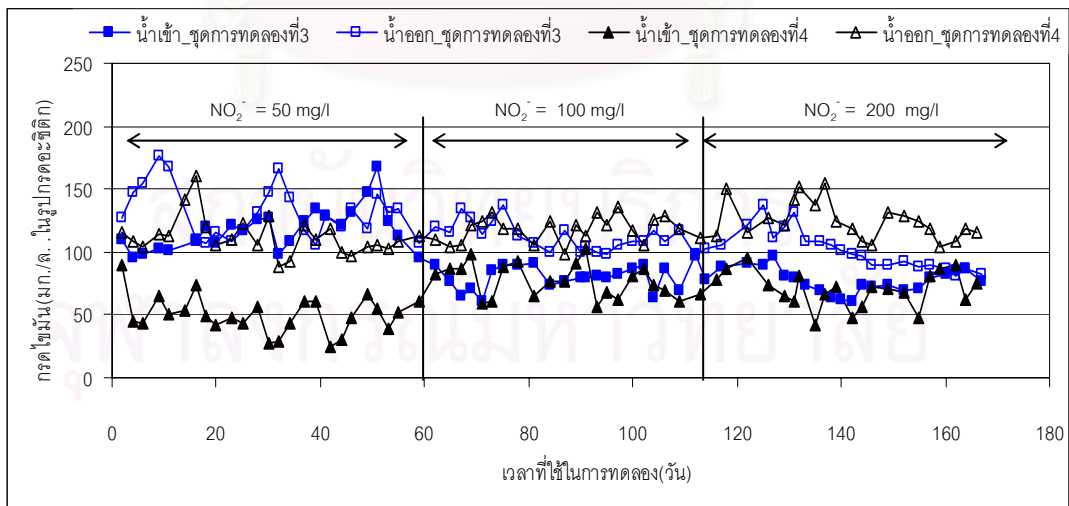
| ชุดการทดลองที่ | ช่วงการทดลองที่ 1 | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | ช่วงการทดลองที่ 3 | |
|-------------------------|---|--------|--|--------|--|--------|
| | กรดไขมันระเหย (มก./ล.ในรูปกรดอะซิติก) | | กรดไขมันระเหย (มก./ล.ในรูปกรดอะซิติก) | | กรดไขมันระเหย (มก./ล.ในรูปกรดอะซิติก) | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | น้ำเข้า | น้ำออก | น้ำเข้า | น้ำออก |
| ชุดการทดลองที่ 1 | $\text{NO}_3^- : \text{SO}_4^{2-} = 100 : 50$ | | $\text{NO}_3^- : \text{SO}_4^{2-} = 100 : 100$ | | $\text{NO}_3^- : \text{SO}_4^{2-} = 100 : 150$ | |
| จำนวน | 24 | 24 | 24 | 24 | 11 | 11 |
| ค่าเฉลี่ย | 82.7 | 136.0 | 72.3 | 114.7 | 78.3 | 112.5 |
| SD | 15.98 | 15.91 | 11.04 | 10.10 | 17.38 | 11.24 |
| ค่าสูงสุด | 116 | 174 | 93 | 136 | 98 | 132 |
| ค่าต่ำสุด | 56 | 112 | 49 | 98 | 44 | 99 |
| ชุดการทดลองที่ 2 | $\text{NO}_3^- : \text{Cl}^- = 100 : 1,000$ | | $\text{NO}_3^- : \text{Cl}^- = 100 : 1,500$ | | $\text{NO}_3^- : \text{Cl}^- = 100 : 2,000$ | |
| จำนวน | 24 | 24 | 24 | 24 | 9 | 9 |
| ค่าเฉลี่ย | 224.4 | 265.4 | 228.6 | 258.1 | 194.1 | 236.8 |
| SD | 18.32 | 29.88 | 33.24 | 31.05 | 26.13 | 39.28 |
| ค่าสูงสุด | 258 | 320 | 298 | 319 | 250 | 275 |
| ค่าต่ำสุด | 194 | 220 | 170 | 183 | 167 | 155 |
| ชุดการทดลองที่ 3 | $\text{NO}_3^- : \text{NO}_2^- = 100 : 50$ | | $\text{NO}_3^- : \text{NO}_2^- = 100 : 100$ | | $\text{NO}_3^- : \text{NO}_2^- = 100 : 200$ | |
| จำนวน | 24 | 24 | 22 | 22 | 22 | 22 |
| ค่าเฉลี่ย | 117.8 | 131.6 | 80.1 | 112.3 | 77.5 | 101.4 |
| SD | 17.25 | 20.71 | 9.81 | 11.35 | 9.75 | 15.61 |
| ค่าสูงสุด | 167 | 177 | 98 | 137 | 97 | 137 |
| ค่าต่ำสุด | 95 | 105 | 60 | 97 | 60 | 81 |
| ชุดการทดลองที่ 4 | ไม่มีสารบวกรวม | | ไม่มีสารบวกรวม | | ไม่มีสารบวกรวม | |
| จำนวน | 24 | 24 | 22 | 22 | 22 | 22 |
| ค่าเฉลี่ย | 49.9 | 112.3 | 76.4 | 117.8 | 70.0 | 124.2 |
| SD | 15.12 | 15.52 | 13.64 | 10.18 | 14.00 | 15.06 |
| ค่าสูงสุด | 90 | 161 | 102 | 136 | 95 | 155 |
| ค่าต่ำสุด | 25 | 88 | 57 | 98 | 42 | 104 |



(ก) ชุดการทดลองที่ 1 ที่มีสารบวกรบกวนประเภทซัลเฟตและชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารบวกรบกวน



(ข) ชุดการทดลองที่ 2 ที่มีสารบวกรบกวนประเภทคลอไรด์และชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารบวกรบกวน



(ค) ชุดการทดลองที่ 3 ที่มีสารบวกรบกวนประเภทไนไตรท์และชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารบวกรบกวน

รูปที่ 4.5 กรดไขมันระเหยตลอดการทดลองของทุกชุดการทดลอง

จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าค่ากรดไขมันระเหยเฉลี่ยของน้ำที่ออกจากระบบมีค่าสูงกว่าค่าของน้ำเข้าระบบเพียงเล็กน้อย เนื่องจาก น้ำเสียที่เข้าระบบเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่ต้องเตรียมใหม่ตลอด ดังนั้นจึงไม่มีการหมักที่นานนัก เมื่อนำมาทดสอบจึงมีค่ากรดไขมันระเหยน้อย ส่วนน้ำที่ออกจากระบบจะมีค่ากรดไขมันระเหยเพิ่มขึ้นนั้น เพราะแบคทีเรียสร้างกรดภายในถังปฏิกรณ์จะเปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นกรดไขมันระเหยในขั้นตอนการสร้างกรดไขมันระเหย(Acidogenesis) ซึ่งแบคทีเรียสร้างมีเทนจะใช้กรดอะซิติกได้มาจากกรดไขมันระเหยในขั้นตอนแรกเปลี่ยนให้เป็นก๊าซมีเทน (Methanogenesis) การที่มีสภาพกรดเกิดขึ้นอาจเป็นเพราะแบคทีเรียสร้างมีเทนไม่สามารถใช้กรดอะซิติกได้หมด ซึ่งมีปริมาณกรดไขมันระเหยที่เหลือจากการใช้มีปริมาณที่ไม่มาก จึงทำให้ค่าสภาพกรดไขมันระเหยของน้ำที่ออกมาจากระบบมีปริมาณที่ไม่สูงนัก

เมื่อพิจารณาจากอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมด พบว่า น้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์จากชุดการทดลองที่ 1 ที่มีความเข้มข้นของซัลเฟตเท่ากับ 50, 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดเฉลี่ยเท่ากับ 0.24 , 0.20 และ 0.19 ตามลำดับ น้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์จากชุดการทดลองที่ 2 ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์เท่ากับ 1,000, 1,500 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดเฉลี่ยเท่ากับ 0.42, 0.37 และ 0.28 ตามลำดับ น้ำเสียที่ออกมาจากถังปฏิกรณ์ของชุดการทดลองที่ 3 ที่มีความเข้มข้นของไนโตรเจนเท่ากับ 50, 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดเฉลี่ยเท่ากับ 0.29, 0.16 และ 0.14 ตามลำดับ น้ำเสียที่ออกมาจากถังปฏิกรณ์ของชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารบวกรวม มีค่าอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์เฉลี่ยเท่ากับ 0.27, 0.24 และ 0.28 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.4 แสดงว่าระบบมีกำลังบำบัดสูง และมีปริมาณกรดไขมันระเหยที่เป็นพิษต่อแบคทีเรียในระบบสะสมอยู่น้อยมาก

4.1.2 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัด

ชุดการทดลองที่ 1 ที่มีความเข้มข้นของซัลเฟตเท่ากับ 50, 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์เฉลี่ยเท่ากับ 1011, 953 และ 956 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนน้ำที่ออกจากระบบมีค่าซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 80, 54 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 92, 94 และ 89 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ก.6)

ชุดการทดลองที่ 2 ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์เท่ากับ 1,000, 1,500 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์เฉลี่ยเท่ากับ 1035, 1005 และ 1015

มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนน้ำที่ออกจากระบบมีค่าซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 78, 57 และ 90 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 92, 94 และ 91 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ข.6)

ชุดการทดลองที่ 3 ที่มีความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำเข้า 50, 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์เฉลี่ยเท่ากับ 1058, 1020 และ 1121 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนน้ำที่ออกจากระบบมีค่าซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 82, 60 และ 83 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 92, 94 และ 92 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ค.6)

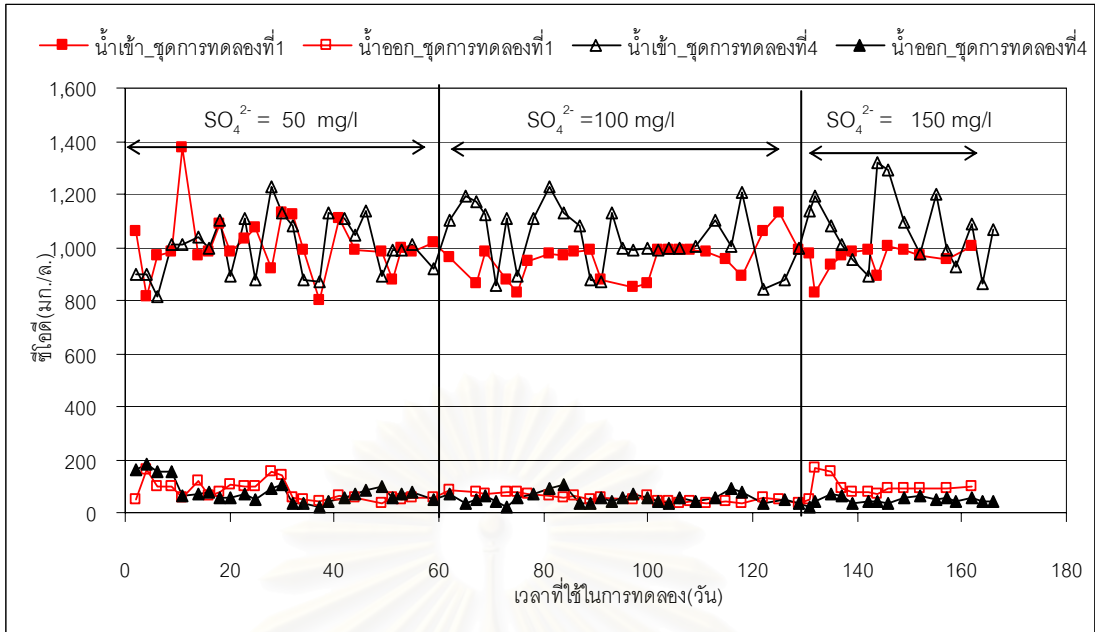
ชุดการทดลองที่ 4 ที่เดินระบบโดยไม่มีสารบวกรวม มีค่าซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์เฉลี่ยเท่ากับ 1005, 1034 และ 1050 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนน้ำที่ออกจากระบบมีค่าซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 80, 53 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 92, 95 และ 95 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ง.6) แสดงดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.6 - 4.8

เนื่องจากน้ำเสียที่เข้าระบบนี้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ แต่มีความเข้มข้นซีโอดีที่ไม่แน่นอนและมีค่าเฉลี่ยไม่เท่ากับ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามที่กำหนดตามแผนการทดลองนั้น เกิดจากการเตรียมน้ำเสียเข้าระบบแต่ละวันของผู้ทำการทดลอง การทดลองนี้ เริ่มทำการทดลองเมื่อตะกอนแบคทีเรียคุ่นเคยกับความเข้มข้นของซีโอดีและไนเตรทที่กำหนดไว้ จนมีค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและไนเตรทคงที่แล้ว จึงเริ่มทำการทดลอง

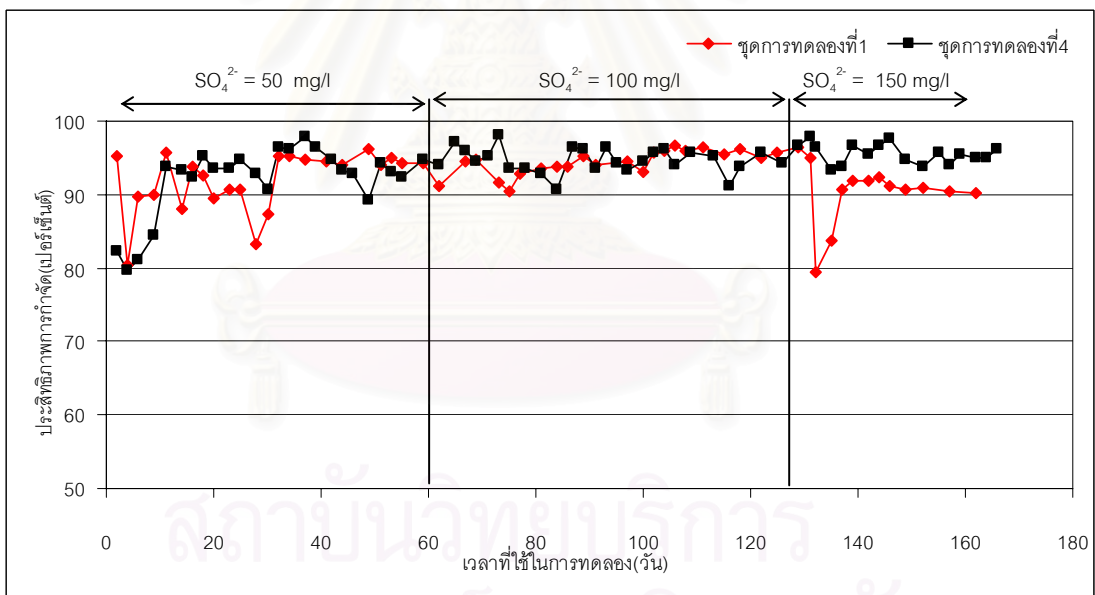
โดยใส่ความเข้มข้นของซัลเฟตในชุดการทดลองที่ 1 เท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อดูความเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีในช่วงแรกจะไม่ค่อยคงที่แต่ใช้เวลาเพียง 4 วัน ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดเริ่มคงที่จนถึงวันที่ 60 จึงเดินระบบโดยเพิ่มความเข้มข้นของซัลเฟตที่ใส่ในน้ำเสียที่เข้าระบบเป็น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจาก ตะกอนแบคทีเรียคุ่นเคยกับสารบวกรวมประเภทซัลเฟตแล้วจึงมีการปรับตัวได้เร็ว ประสิทธิภาพในการกำจัดจึงคงที่ค่อนข้างเร็ว จนถึงช่วงการทดลองที่ 3 เมื่อใส่ความเข้มข้นของซัลเฟตเท่ากับ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเริ่มลดลงและไม่คงที่ เนื่องจากไม่สามารถเดินระบบได้ต่อเนื่อง เพราะต้องมีการปิดระบบเมื่อตะกอนแบคทีเรียหลุดออกจากระบบ ซึ่งการที่ตะกอนแบคทีเรียในถังปฏิกรณ์เกิดการยกตัวลอยขึ้นบ่อยครั้ง ในการทดลองช่วงที่ 3 นั้น เนื่องจากการทดลองนี้ใช้เวลาในการเดินระบบเป็นเวลานานและใช้เชื้อแบคทีเรียที่ไม่คุ่นเคยกับซัลเฟต เมื่อใส่ซัลเฟตเข้าระบบเป็นระยะเวลาานทำให้มีปริมาณซัลเฟตเข้าไปสะสมอยู่ในเม็ดตะกอน เป็นพิษต่อแบคทีเรียในเม็ดตะกอนแบคทีเรีย

ตารางที่ 4.6 ซีโอดีและประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี

| ชุดการทดลองที่ | ช่วงการทดลองที่ 1 | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | | |
|-------------------------|----------------------------|---|--------|--|----------------|--|---------------------------|----------------|--------|---------------------------|
| | ซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร) | น้ำเข้า | น้ำออก | ประสิทธิภาพ ในการกำจัด | น้ำเข้า | น้ำออก | ประสิทธิภาพ ในการกำจัด | น้ำเข้า | น้ำออก | ประสิทธิภาพ ในการกำจัด |
| ชุดการทดลองที่ 1 | | $\text{NO}_3^- : \text{SO}_4^{2-} = 100 : 50$ | | $\text{NO}_3^- : \text{SO}_4^{2-} = 100 : 100$ | | $\text{NO}_3^- : \text{SO}_4^{2-} = 100 : 150$ | | | | |
| จำนวน | 23 | 23 | 23 | 24 | 24 | 24 | 11 | 11 | 11 | |
| ค่าเฉลี่ย | 10101 | 80 | 92 | 953 | 54 | 94 | 956 | 100 | 89 | |
| SD | 116.28 | 36.27 | 4.10 | 69.74 | 15.59 | 1.73 | 54.05 | 31.56 | 4.04 | |
| ค่าสูงสุด | 1373 | 159 | 96 | 1127 | 85 | 97 | 1004 | 170 | 92 | |
| ค่าต่ำสุด | 800 | 37 | 80 | 830 | 32 | 90 | 828 | 68 | 79 | |
| ชุดการทดลองที่ 2 | | $\text{NO}_3^- : \text{Cl}^- = 100 : 1,000$ | | $\text{NO}_3^- : \text{Cl}^- = 100 : 1,500$ | | $\text{NO}_3^- : \text{Cl}^- = 100 : 2,000$ | | | | |
| จำนวน | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 10 | 10 | 10 | |
| ค่าเฉลี่ย | 1035 | 78 | 92 | 1005 | 57 | 94 | 1016 | 90 | 91 | |
| SD | 106.17 | 33.31 | 2.98 | 54.81 | 21.99 | 1.96 | 32.59 | 13.49 | 1.28 | |
| ค่าสูงสุด | 1373 | 157 | 96 | 1155 | 122 | 97 | 1100 | 120 | 93 | |
| ค่าต่ำสุด | 946 | 37 | 85 | 899 | 30 | 89 | 986 | 72 | 88 | |
| ชุดการทดลองที่ 3 | | $\text{NO}_3^- : \text{NO}_2^- = 100 : 50$ | | $\text{NO}_3^- : \text{NO}_2^- = 100 : 100$ | | $\text{NO}_3^- : \text{NO}_2^- = 100 : 200$ | | | | |
| จำนวน | 24 | 24 | 24 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | |
| ค่าเฉลี่ย | 1058 | 82 | 92 | 1020 | 60 | 94 | 1120.68 | 82.67 | 92.44 | |
| SD | 121.19 | 40.90 | 3.18 | 124.55 | 17.20 | 1.75 | 155.36 | 34.77 | 3.49 | |
| ค่าสูงสุด | 1294 | 178 | 97 | 1203 | 107 | 97 | 1470 | 207 | 95.51 | |
| ค่าต่ำสุด | 803 | 33 | 85 | 803 | 33 | 90 | 889 | 47 | 81.84 | |
| ชุดการทดลองที่ 4 | | ไม่มีสารบวกรวม | | | ไม่มีสารบวกรวม | | | ไม่มีสารบวกรวม | | |
| จำนวน | 24 | 24 | 24 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | |
| ค่าเฉลี่ย | 1005 | 80 | 92 | 1034 | 53 | 95 | 1050 | 50 | 95 | |
| SD | 109.15 | 43.01 | 4.97 | 109.91 | 19.19 | 1.67 | 135.84 | 15.83 | 1.56 | |
| ค่าสูงสุด | 1225 | 183 | 98 | 1225 | 106 | 98 | 1320 | 89 | 98 | |
| ค่าต่ำสุด | 811 | 19 | 80 | 855 | 22 | 91 | 840 | 24 | 91 | |

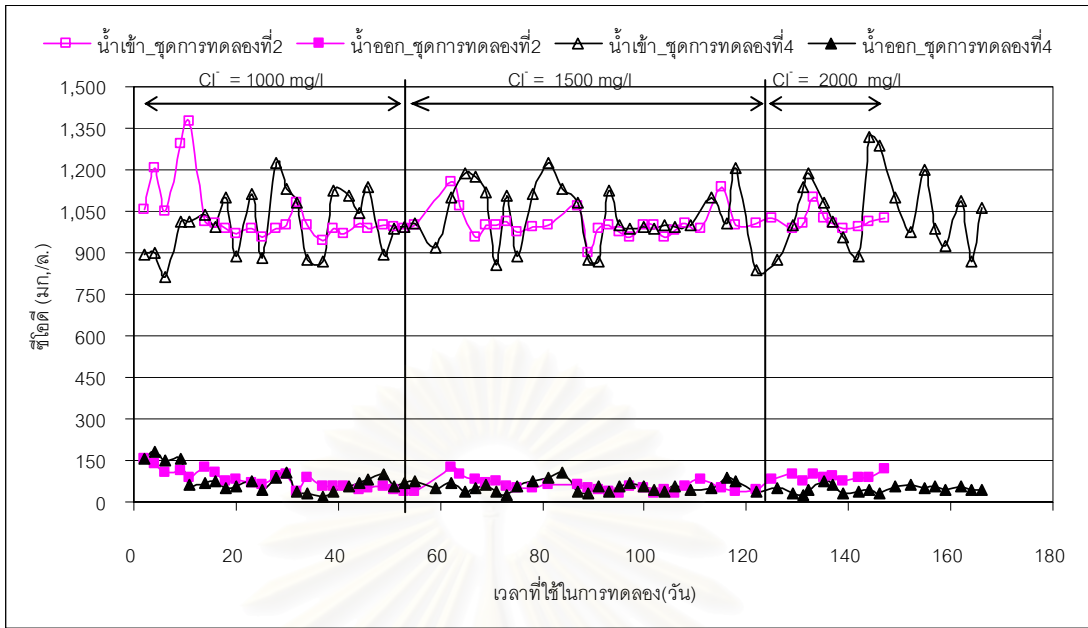


(ก) ปริมาณซัลเฟตในน้ำเข้า-น้ำออกของชุดการทดลองที่ 1 ที่มีซัลเฟต และชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน

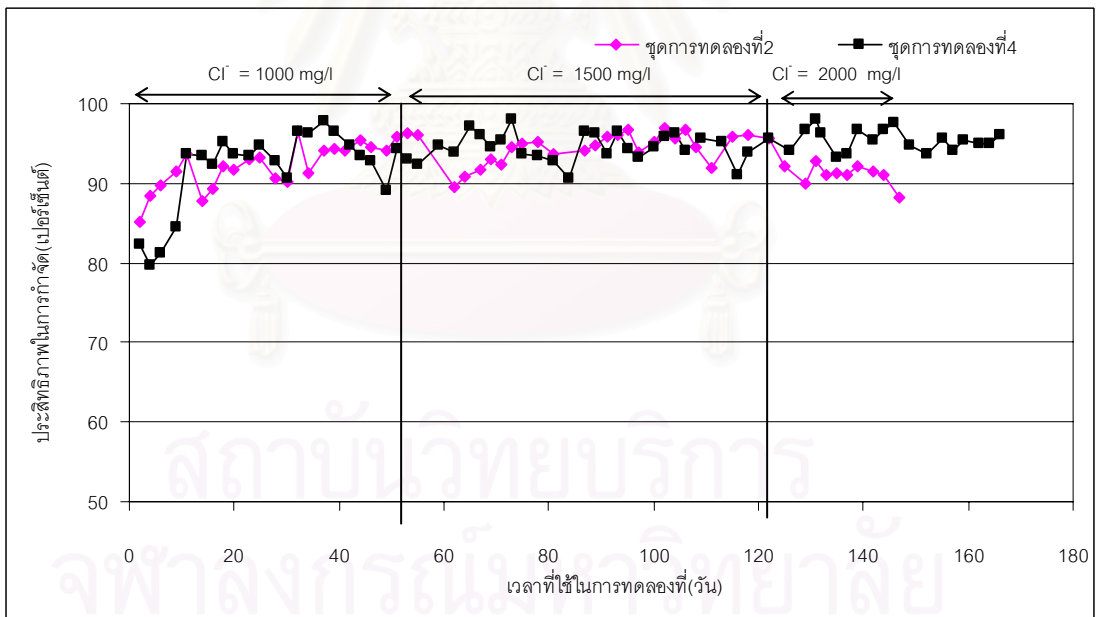


(ข) ประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตของชุดการทดลองที่ 1 และชุดการทดลองที่ 4

รูปที่ 4.6 ซัลเฟตและประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตตลอดการทดลองของชุดการทดลองที่ 1 ที่มีสารรบกวนประเภทซัลเฟตและชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน

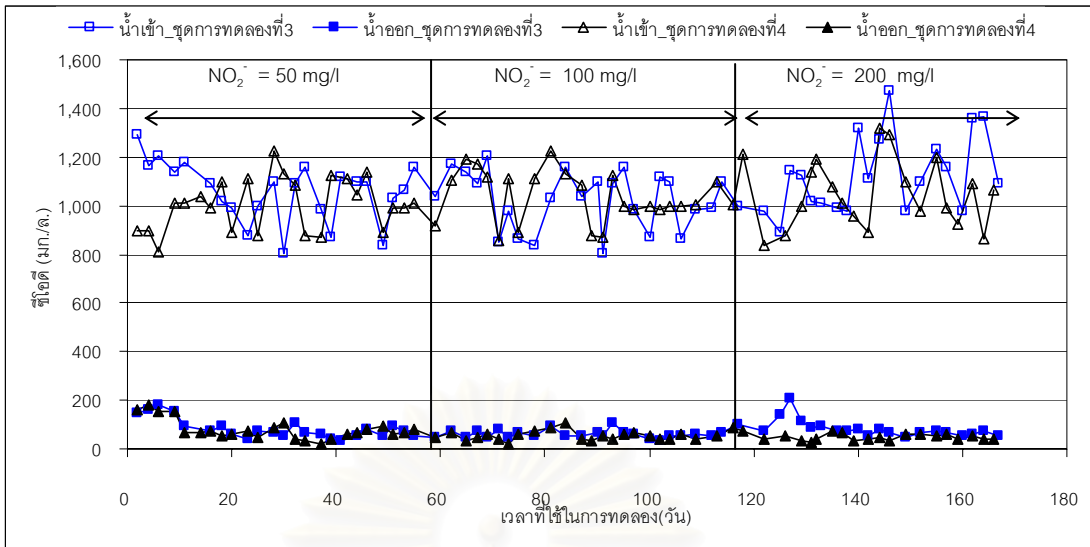


(ก) ปริมาณคลอไรด์ในน้ำเข้า-น้ำออกของชุดการทดลองที่ 2 ที่มีคลอไรด์และชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน

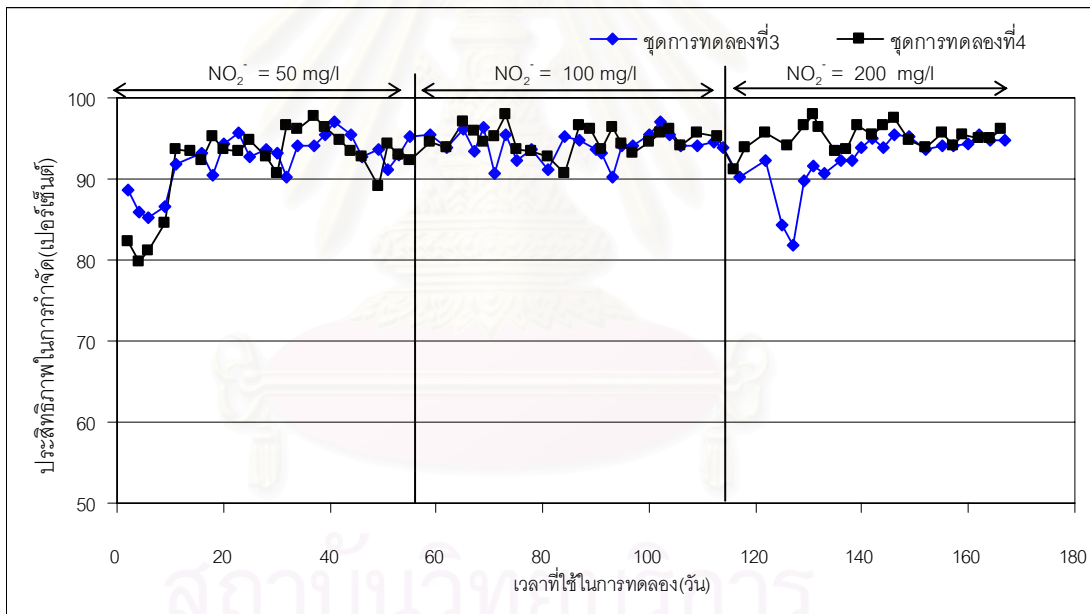


(ข) ประสิทธิภาพการกำจัดไอโอดีนของชุดการทดลองที่ 2 และชุดการทดลองที่ 4

รูปที่ 4.7 คลอไรด์และประสิทธิภาพในการกำจัดไอโอดีนตลอดการทดลองของชุดการทดลองที่ 2 ที่มีสารรบกวนประเภทคลอไรด์และชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน



(ก) ปริมาณซีไอดีในน้ำเข้า-น้ำออกของชุดการทดลองที่ 3 ที่มีไนไตรท์ และชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน



(ข) ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีของชุดการทดลองที่ 3 และชุดการทดลองที่ 4

รูปที่ 4.8 ซีไอดีและประสิทธิภาพในการกำจัดตลอดการทดลองของชุดการทดลองที่ 3 ที่มีสารรบกวนประเภทไนไตรท์และชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน

มีผลทำให้แบคทีเรียในเม็ดตะกอนมีสภาพไม่สมบูรณ์ และมีบางส่วนที่ตายเกิดเป็นช่องว่างกลางเม็ดตะกอน (โดยสังเกตจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(SEM) จากหัวข้อที่ 4.2) ทำให้เม็ดตะกอนแบคทีเรียเกิดการลอยตัวและถูกล้างออก (wash out) จากระบบ

ชุดการทดลองที่ 2 เริ่มทำการทดลองโดยใส่ความเข้มข้นของคลอไรด์เท่ากับ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อให้แบคทีเรียในระบบคุ้นเคยกับกับกับความเค็ม หลังจากระยะเวลาผ่านไป 1 อาทิตย์ จึงเติมโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์เท่ากับ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และเริ่มบันทึกผล จากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 จะเห็นว่า ถึงแม้จะมีคลอไรด์เข้าไปในระบบ แต่ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีก็มีค่าสูงอยู่ในช่วง 85 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของคลอไรด์ ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีคงที่ อยู่ในช่วง 90 - 95 เปอร์เซ็นต์ เพียงแต่ประสบปัญหาการยกขึ้นของตะกอนแบคทีเรีย ซึ่งสาเหตุของการที่ตะกอนแบคทีเรียในถังปฏิกรณ์เกิดการยกตัวลอยขึ้นบ่อยครั้ง ในการทดลองช่วงที่ 2 และ 3 นั้น เนื่องจากในการวิจัยมีการเติมปริมาณโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) แทนความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ความเข้มข้นอย่างน้อย 1 กิโลกรัมต่อลิตร ในน้ำเสียสังเคราะห์ทุกวัน ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นที่สูง เมื่อเติมเป็นเวลานาน ทำให้มีเกลือเกาะติดกับเม็ดตะกอนจับตัวเป็นก้อนใหญ่ สังเกตได้จากสภาพเม็ดตะกอนมีสีขาวจับอยู่ในถังปฏิกรณ์ ทำให้มีความหนืด เมื่อมีน้ำเสียป้อนเข้าทางส่วนล่างของถังปฏิกรณ์ และไหลผ่านชั้นตะกอนแบคทีเรีย ประกอบกับความเร็วน้ำที่ไหลขึ้น ทำให้เกิดการลอยตัวของชั้นตะกอนแบคทีเรียขึ้นสู่ด้านบน โดยไม่กระจายออกเป็นเม็ดตะกอนแยกออกจากกัน ลอยขึ้นไปปะทะกับแผ่นกั้นอุปกรณ์แยกสามสถานะและหลุดออกจากระบบ ระบบจึงไม่สามารถเดินได้ต่อเนื่อง

ชุดการทดลองที่ 3 เริ่มทำการทดลองโดยใส่ความเข้มข้นของไนโตรเจน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อดูถึงความเปลี่ยนแปลง จะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีในช่วงแรกมีค่าไม่คงที่จนถึงช่วงวันที่ 11 จึงมีค่าประสิทธิภาพในการกำจัดเริ่มคงที่จนถึงวันที่ 55 จึงเพิ่มความเข้มข้นของไนโตรเจนในน้ำเสียที่เข้าระบบเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จนถึงช่วงการทดลองที่ 3 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไนโตรเจนเท่ากับ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของทั้ง 2 ช่วงการทดลองมีค่าคงที่ จากกราฟจะเห็นว่า มีบางช่วงเวลาที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีอยู่ในเกณฑ์ต่ำ เนื่องจาก เม็ดตะกอนแบคทีเรียลอยขึ้นไปปิดที่อุปกรณ์แยกสามสถานะ ทำให้ไม่สามารถปล่อยก๊าซที่เกิดในระบบได้ ทำให้ตะกอนแบคทีเรียในระบบยกขึ้นลอยขึ้นมา จึงต้องปิดระบบเพื่อตรวจและล้างให้สะอาด ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดของช่วงเวลานั้นจึงมีค่าต่ำ

ชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีคงที่มีค่าอยู่ในช่วง 90 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป เนื่องจาก มีการเดินระบบในช่วงเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียเป็นระยะ

เวลานาน ตะกอนแบคทีเรียในระบบจึงมีความคั่งคเย กับความเข้มข้นของซีโอดีและไนเตรทในน้ำเสีย ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีอยู่ในเกณฑ์สูง แต่ก็ยังมีบางค่าที่จะต่ำกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ เพราะมีบางครั้งที่ระบบไม่สามารถเดินได้ปกติ เช่น กรณีเม็ดตะกอนจะหลุดเข้ามาในสายยางน้ำเสียที่ป้อนเข้าเครื่องสูบน้ำเวียนกลับ ทำให้เครื่องสูบน้ำไม่สามารถเดินได้ปกติ ระบบจึงต้องมีการหยุดเพื่อล้างสายยางและเครื่องสูบน้ำ ทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง

เมื่อเปรียบเทียบชุดการทดลองที่ 1 , 2 และ 3 ที่มีสารรบกวนประเภทซัลเฟต คลอไรด์ และไนไตรท์ กับชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยของอยู่ในช่วง 89 – 94 , 92 – 94 , 91 - 95 และ 92 - 95 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ไม่แตกต่างกัน มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีอยู่ในเกณฑ์สูง ดังนั้นสรุปได้ว่า สารรบกวนประเภทซัลเฟตที่ความเข้มข้น 50 -150 มิลลิกรัมต่อลิตร สารรบกวนประเภทคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 1,000 - 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และ สารรบกวนประเภทไนไตรท์ที่ความเข้มข้น 50 - 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่รบกวนต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของระบบบำบัดน้ำเสียแบบอีจีเอสบี

4.1.3 ไนเตรทและประสิทธิภาพการกำจัด

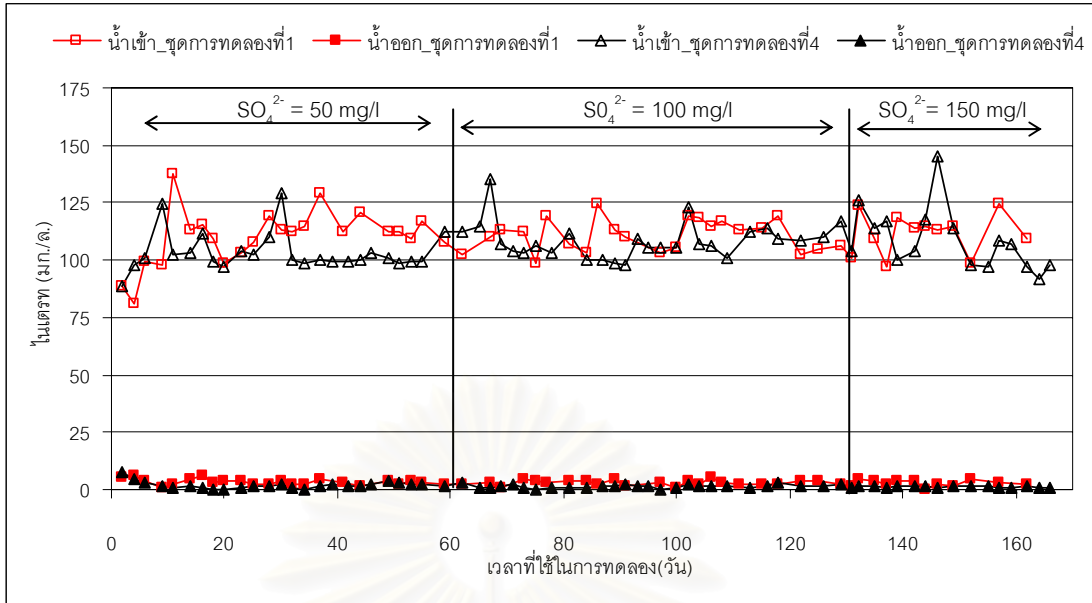
ชุดการทดลองที่ 1 ที่มีความเข้มข้นของซัลเฟตเท่ากับ 50,100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร มีความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำเสียสังเคราะห์เฉลี่ยเท่ากับ 110, 113 และ 111 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำที่ออกจากระบบเท่ากับ 3.3, 2.9 และ 2.9 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทเฉลี่ยเท่ากับ 98, 97 และ 97 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ก.7)

ชุดการทดลองที่ 2 ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์เท่ากับ 1,000, 1,500 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำเสียสังเคราะห์เฉลี่ยเท่ากับ 108, 109 และ 95 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำที่ออกจากระบบเท่ากับ 0.8, 0.6 และ 0.9 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทเฉลี่ยเท่ากับ 99, 99 และ 99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ข.7)

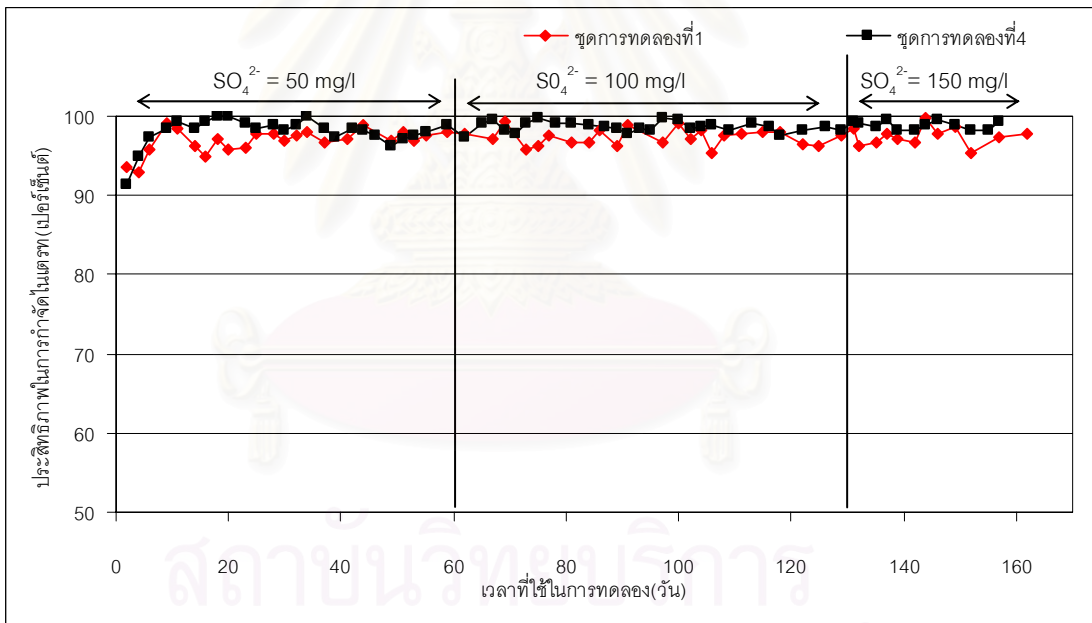
ชุดการทดลองที่ 3 ที่มีความเข้มข้นของไนไตรท์เท่ากับ 50, 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร มีความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำเสียสังเคราะห์เฉลี่ยเท่ากับ 105, 101 และ 112 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีไนเตรทในน้ำที่ออกจากระบบความเข้มข้นเท่ากับ 2.9, 1.8 และ 1.4 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทเฉลี่ยเท่ากับ 97, 98 และ 99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ค.7)

ตารางที่ 4.7 ไนเตรทและประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรท

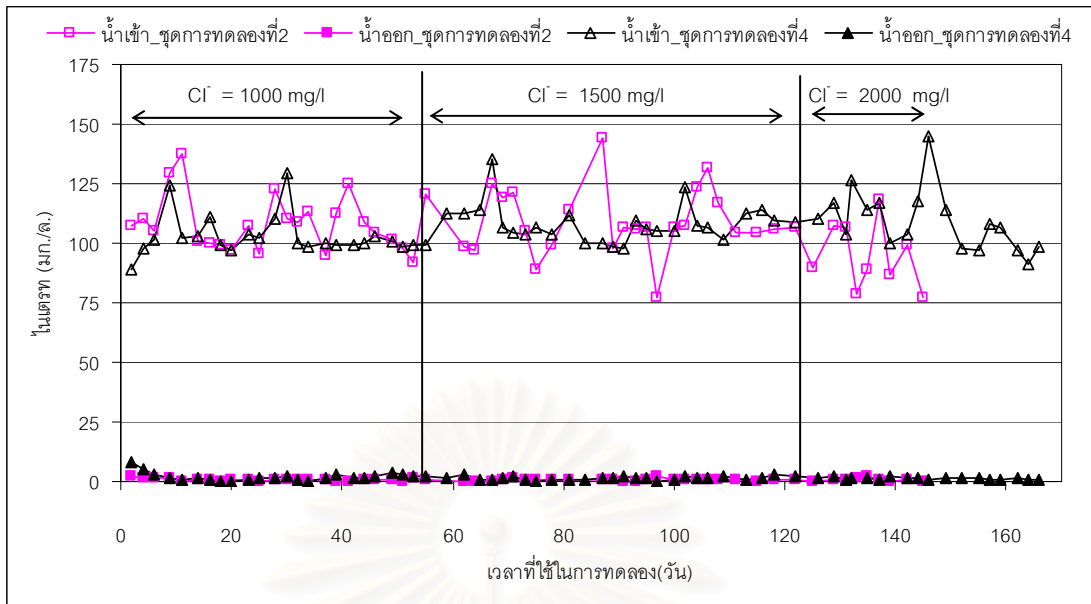
| ชุดการทดลองที่ | ช่วงการทดลองที่ 1 | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | |
|-------------------------|---|---------|--------|--|---------|--------|--|---------|--------|
| | ไนเตรท (มิลลิกรัม/ลิตร) | น้ำเข้า | น้ำออก | ประสิทธิภาพ ในการกำจัด | น้ำเข้า | น้ำออก | ประสิทธิภาพ ในการกำจัด | น้ำเข้า | น้ำออก |
| ชุดการทดลองที่ 1 | $\text{NO}_3^- : \text{SO}_4^{2-} = 100 : 50$ | | | $\text{NO}_3^- : \text{SO}_4^{2-} = 100 : 100$ | | | $\text{NO}_3^- : \text{SO}_4^{2-} = 100 : 150$ | | |
| จำนวน | 23 | 23 | 23 | 24 | 24 | 24 | 11 | 11 | 11 |
| ค่าเฉลี่ย | 110 | 3.3 | 97 | 111 | 2.9 | 97 | 113 | 2.9 | 97 |
| SD | 12.02 | 1.34 | 1.55 | 7.00 | 1.15 | 1.06 | 8.66 | 1.30 | 1.19 |
| ค่าสูงสุด | 137 | 6 | 99 | 124 | 5 | 99 | 125 | 4.6 | 100 |
| ค่าต่ำสุด | 81 | 0.8 | 93 | 99 | 0.7 | 95 | 97 | 0.4 | 95 |
| ชุดการทดลองที่ 2 | $\text{NO}_3^- : \text{Cl}^- = 100 : 1,000$ | | | $\text{NO}_3^- : \text{Cl}^- = 100 : 1,500$ | | | $\text{NO}_3^- : \text{Cl}^- = 100 : 2,000$ | | |
| จำนวน | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 9 | 9 | 9 |
| ค่าเฉลี่ย | 108 | 0.8 | 99 | 109 | 0.6 | 99 | 95 | 0.9 | 99 |
| SD | 11.71 | 0.51 | 0.48 | 14.06 | 0.51 | 0.63 | 13.86 | 0.74 | 0.86 |
| ค่าสูงสุด | 138 | 1.9 | 100 | 144 | 2.5 | 100 | 118 | 2.5 | 100 |
| ค่าต่ำสุด | 92 | 0 | 98 | 77 | 0 | 97 | 77 | 0.2 | 97 |
| ชุดการทดลองที่ 3 | $\text{NO}_3^- : \text{NO}_2^- = 100 : 50$ | | | $\text{NO}_3^- : \text{NO}_2^- = 100 : 100$ | | | $\text{NO}_3^- : \text{NO}_2^- = 100 : 200$ | | |
| จำนวน | 24 | 24 | 24 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 |
| ค่าเฉลี่ย | 105 | 2.3 | 97 | 101 | 1.8 | 98 | 112 | 1.4 | 99 |
| SD | 12.64 | 2.18 | 1.99 | 11.38 | 1.71 | 1.66 | 21.99 | 1.17 | 0.99 |
| ค่าสูงสุด | 129 | 8.9 | 100 | 120 | 6.0 | 100 | 169 | 4.7 | 100 |
| ค่าต่ำสุด | 80 | 0 | 92 | 80 | 0 | 94 | 77 | 0.2 | 96 |
| ชุดการทดลองที่ 4 | ไม่มีสารบวกรวม | | | ไม่มีสารบวกรวม | | | ไม่มีสารบวกรวม | | |
| จำนวน | 24 | 24 | 24 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 |
| ค่าเฉลี่ย | 103 | 2 | 98 | 108 | 1.3 | 99 | 109 | 1.4 | 99 |
| SD | 8.50 | 1.68 | 1.85 | 8.58 | 0.68 | 0.64 | 11.67 | 0.52 | 0.50 |
| ค่าสูงสุด | 129 | 7.7 | 100 | 135 | 2.9 | 100 | 145 | 2.7 | 99 |
| ค่าต่ำสุด | 89 | 0 | 91 | 98 | 0.3 | 97 | 91 | 0.6 | 98 |



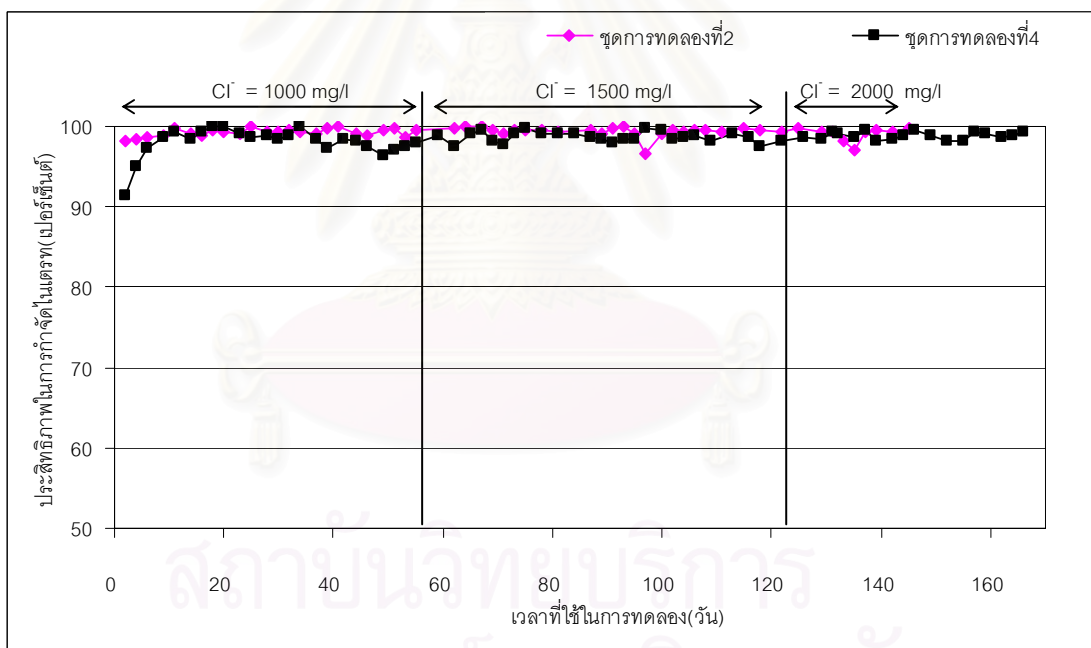
(ก) ปริมาณไนเตรทในน้ำเข้า-น้ำออกของชุดการทดลองที่ 1 ที่มีซัลเฟต และชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารบวกรวน



(ข) ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทของชุดการทดลองที่ 1 และชุดการทดลองที่ 4
รูปที่ 4.9 ไนเตรทและประสิทธิภาพในการกำจัดตลอดการทดลองของชุดการทดลองที่ 1 ที่มีสารบวกรวนประเภทซัลเฟตและชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารบวกรวน

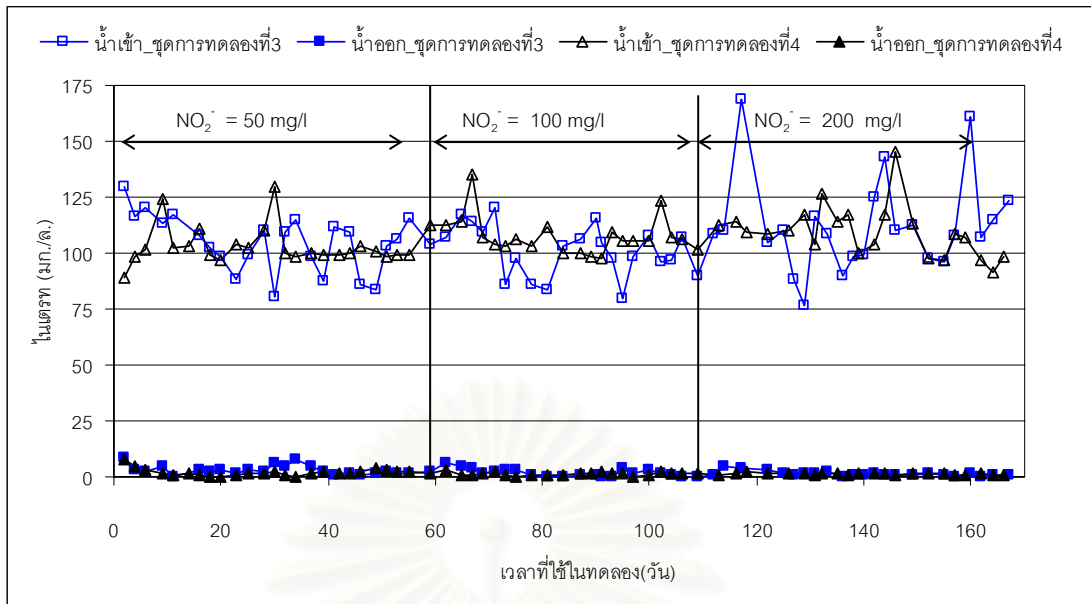


(ก) ปริมาณไนเตรทในน้ำเข้า-น้ำออกของชุดการทดลองที่ 2 ที่มีคลอไรด์ และชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารบกววน

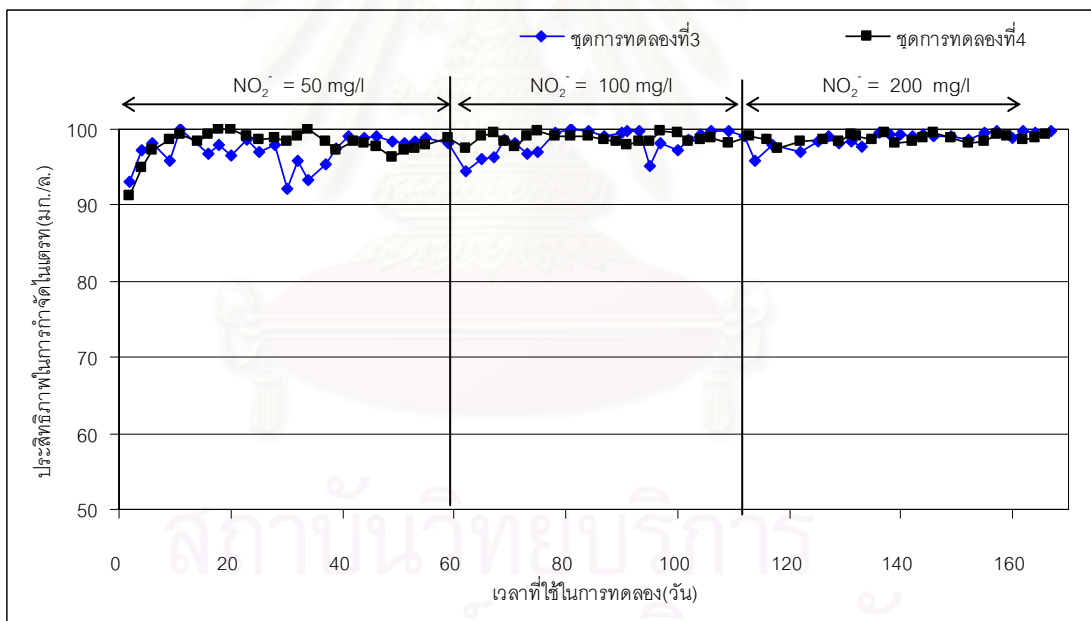


(ข) ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทของชุดการทดลองที่ 2 และชุดการทดลองที่ 4

รูปที่ 4.10 ไนเตรทและประสิทธิภาพในการกำจัดตลอดการทดลองของชุดการทดลองที่ 2 ที่มีสารบกววนประเภทคลอไรด์และชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารบกววน



(ก) ปริมาณไนเตรทในน้ำเข้า-น้ำออกของชุดการทดลองที่ 3 ที่มีไนไตรท์ และชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน



(ข) ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทของชุดการทดลองที่ 3 และชุดการทดลองที่ 4

รูปที่ 4.11 ไนเตรทและประสิทธิภาพในการกำจัดลดการทดลองของชุดการทดลองที่ 3 ที่มีสารรบกวนประเภทไนไตรท์และชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน

ชุดการทดลองที่ 4 ที่เดินระบบโดยไม่มีสารรบกวน มีความเข้มข้นไนเตรทของน้ำเสียสังเคราะห์เฉลี่ยเท่ากับ 103, 108 และ 109 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนน้ำออกจากระบบมีความเข้มข้นของไนเตรทเฉลี่ยเท่ากับ 2.0, 1.4 และ 1.4 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทเฉลี่ยเท่ากับ 98, 99 และ 99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ง.7)

จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.9 เมื่อเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของชุดการทดลองที่ 1 ทั้ง 3 ความเข้มข้นพบว่า มีค่าไม่ต่างกันมากอยู่ในช่วง 92 – 99 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบแต่ละช่วงการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้นของซัลเฟต 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วงแรกเปอร์เซ็นต์การกำจัดไนเตรทมีค่าน้อยกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจาก มีการปรับตัวของเชื้อแบคทีเรีย ทั้งที่มีค่าความเข้มข้นของซัลเฟตน้อยกว่าทุกช่วงการทดลอง เพราะ ดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียในระบบเริ่มปรับตัวเมื่อมีซัลเฟตในระบบ ทำให้ไม่สามารถทำหน้าที่ในการกำจัดไนเตรทได้ดี เมื่อแบคทีเรียปรับสภาพให้เข้ากับสภาวะที่มีซัลเฟตในระบบได้ ดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียจะสามารถกำจัดไนเตรทได้ดี ถึงแม้จะมีค่าความเข้มข้นของซัลเฟตเพิ่มขึ้นก็ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพมากนัก

จากรูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทของชุดการทดลองที่ 2 ที่มีคลอไรด์เป็นสารรบกวนทั้ง 3 ความเข้มข้นพบว่า มีค่าไม่ต่างกันมากอยู่ในช่วง 96 - 99 เปอร์เซ็นต์ ถือว่ามีค่าประสิทธิภาพในการกำจัดค่อนข้างสูง เนื่องจาก ดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียสามารถปรับตัวเข้ากับสภาวะที่มีคลอไรด์อยู่ในระบบ แม้ว่ามีความเข้มข้นสูง แต่คลอไรด์ไม่ได้มีสถานะเป็นตัวยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในปฏิกิริยาของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน ดังนั้นจึงไม่มีการแย่งใช้สารอาหารในระบบ

จากรูปที่ 4.11 เมื่อเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของชุดการทดลองที่ 3 ที่มีไนไตรท์เป็นสารรบกวนทั้ง 3 ความเข้มข้นพบว่า มีค่าไม่ต่างกันมากอยู่ในช่วง 97 – 98 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถ้าเปรียบเทียบแต่ละช่วงการทดลองพบว่า ช่วงการทดลองที่มีความเข้มข้นของไนไตรท์ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทน้อยที่สุด ทั้งที่มีค่าความเข้มข้นของไนไตรท์น้อยกว่าทุกช่วงการทดลอง เพราะจากการดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียในระบบต้องใช้ระยะเวลาในการปรับตัวเมื่อมีไนไตรท์เข้ามาเพิ่มในระบบ แต่ดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียก็ยังสามารถใช้ไนเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอนได้ดี ถึงแม้ปริมาณสารกลุ่มไนไตรเจนมากขึ้นก็ตาม จึงมีประสิทธิภาพในการกำจัดอยู่ในเกณฑ์สูง

เมื่อเปรียบเทียบชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ที่มีสารรบกวนประเภทซัลเฟต คลอไรด์ และไนไตรท์ กับชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดเฉลี่ย 98 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ระบบอ็อกซิเดชันมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทของทั้ง 4 ชุดการทดลอง

ซึ่งสามารถกำจัดไนเตรทได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ อาจเป็นเพราะแบคทีเรียที่ใช้ในระบบนั้น เป็นแบคทีเรียที่สมบูรณ์ ขนาดเม็ดใหญ่ และมีปริมาณที่มาก จึงสามารถกำจัดไนเตรทที่มีในระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นสรุปได้ว่า ที่ความเข้มข้นของสารรบกวนประเภทซัลเฟตที่ ความเข้มข้น 50 - 150 มิลลิกรัมต่อลิตร สารรบกวนประเภทคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 1,000 - 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของสารรบกวนประเภทไนไตรท์ 50 - 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่รบกวนต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรท ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.1.4 ประสิทธิภาพในการกำจัดสารรบกวนประเภทซัลเฟต คลอไรด์ และไนไตรท์

4.1.4.1 ซัลเฟตและประสิทธิภาพในการกำจัด

-ซัลเฟต

ชุดการทดลองที่ 1 ที่มีความเข้มข้นของซัลเฟตเท่ากับ 50, 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าซัลเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์เฉลี่ยเท่ากับ 54, 113 และ 154 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีซัลเฟตในน้ำที่ออกจากระบบเท่ากับ 19, 26 และ 64 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตเฉลี่ยเท่ากับ 64, 76 และ 57 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ก.8)

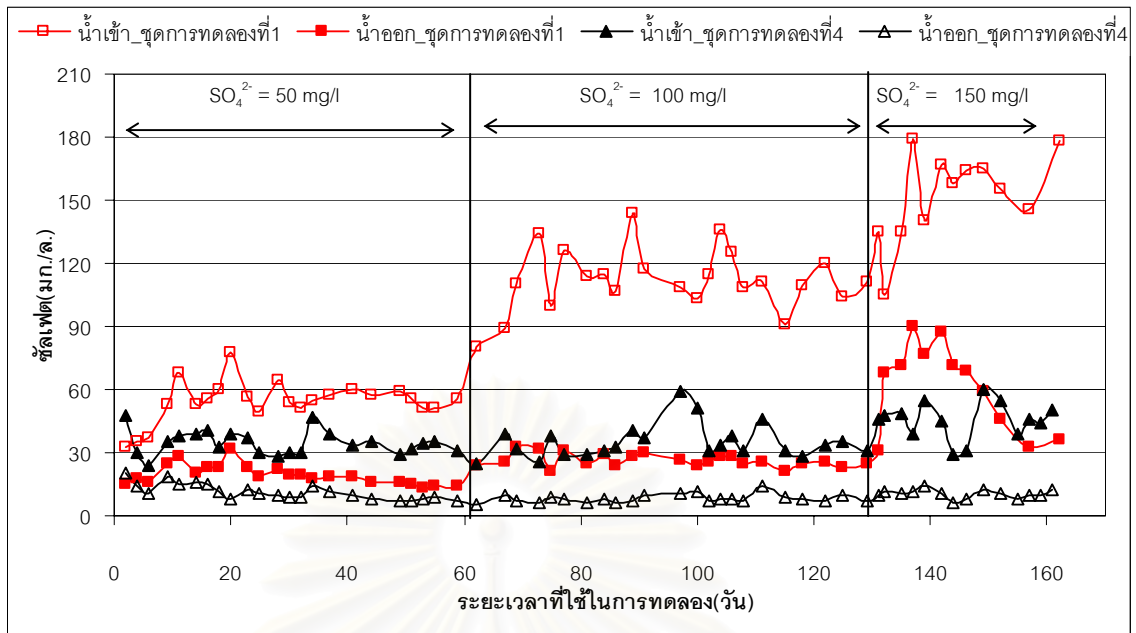
ชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน มีค่าซัลเฟตของน้ำเสียสังเคราะห์เฉลี่ยเท่ากับ 34, 37 และ 45 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนน้ำออกจากระบบมีซัลเฟตเฉลี่ยเท่ากับ 11, 9 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตเฉลี่ยเท่ากับ 68, 77 และ 77 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ง.9) แสดงดังตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.12

น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมเข้าสู่ระบบในช่วงแรก มีค่าความเข้มข้นของซัลเฟต 30 มิลลิกรัมต่อลิตร จากธาตุอาหารแมกนีเซียมที่ใช้แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) และธาตุเหล็กใช้สารเฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) ซึ่งเป็นสารอาหารที่จำเป็นของแบคทีเรีย ทำให้แบคทีเรียของระบบมีความคุ้นเคยกับซัลเฟตในปริมาณดังกล่าว ดังนั้น เมื่อเริ่มเดินระบบด้วยการเติมโซเดียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นของซัลเฟตเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงทำให้ระบบเดินได้โดยไม่มีกรยกขึ้นของตะกอนแบคทีเรีย ประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตมีค่าที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตคงที่ จนเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของซัลเฟตเป็น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้เม็ดตะกอนแบคทีเรียเกิดการยกขึ้นลอยขึ้นไปปิดทางออกของก๊าซ จนไม่สามารถเดินได้อย่างต่อเนื่อง และมีประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตลดลง

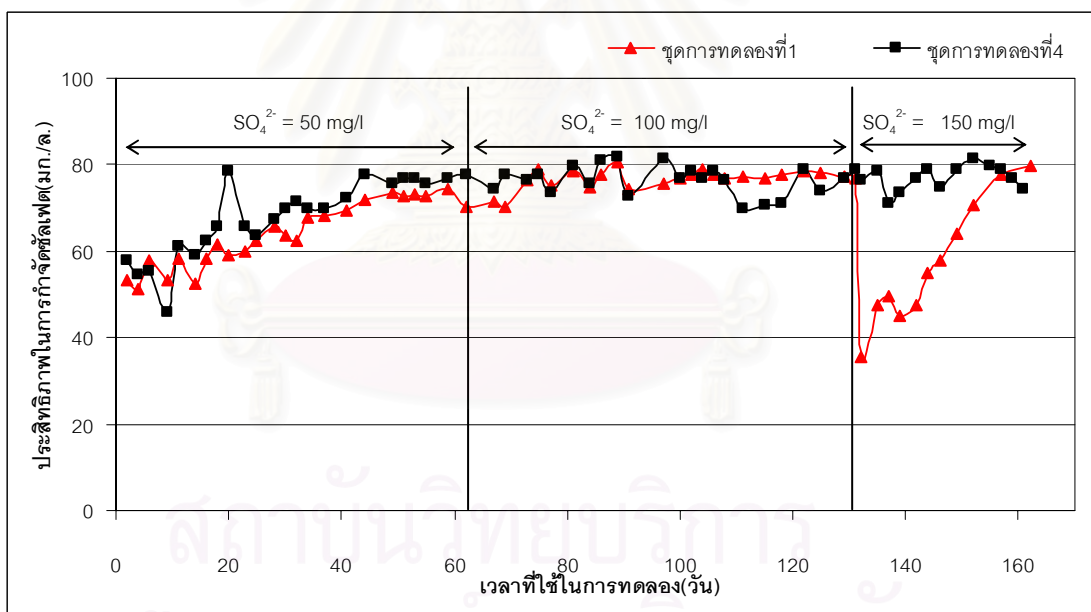
จากตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตมีค่าระหว่าง 60 – 75 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้ มีแนวโน้มเช่นเดียวกับประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี กล่าวคือ ในช่วงเริ่มต้นระบบแบบคทีเรียจะต้องปรับตัวให้คุ้นเคยและสามารถดำรงชีวิตอยู่ในน้ำเสียที่มีส่วนประกอบดังกล่าวให้ได้ เมื่อทำการทดลองต่อไปจะพบว่า ความเข้มข้นของซัลเฟตในน้ำที่ออกจากระบบ และมีประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตค่อนข้างคงที่ แสดงว่าแบบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตสามารถเจริญเติบโตขึ้นมาในน้ำเสียได้ และมีความสามารถในการใช้ซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในปฏิกิริยา โดยการเปลี่ยนซัลเฟตให้อยู่ในรูปอื่น ๆ ทำให้ความเข้มข้นของซัลเฟตในน้ำที่ออกจากระบบลดลงและค่อนข้างคงที่กว่าช่วงเริ่มต้นระบบ

ตารางที่ 4.8 ซัลเฟตและประสิทธิภาพในการกำจัดของชุดการทดลองที่ 1 และ 4

| ชุดการทดลองที่ 1 | ช่วงการทดลองที่ 1 | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | |
|------------------|--|--------|-----------------------|---|--------|-----------------------|---|--------|-----------------------|
| | ซัลเฟต (มก./ล.) | | | ซัลเฟต (มก./ล.) | | | ซัลเฟต (มก./ล.) | | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | ประสิทธิภาพในการกำจัด | น้ำเข้า | น้ำออก | ประสิทธิภาพในการกำจัด | น้ำเข้า | น้ำออก | ประสิทธิภาพในการกำจัด |
| ชุดการทดลองที่ 1 | NO ₃ ⁻ : SO ₄ ²⁻ =100 : 50 | | | NO ₃ ⁻ : SO ₄ ²⁻ =100 : 100 | | | NO ₃ ⁻ : SO ₄ ²⁻ =100 : 150 | | |
| จำนวน | 23 | 23 | 23 | 24 | 24 | 24 | 11 | 11 | 11 |
| ค่าเฉลี่ย | 54 | 19 | 64 | 113 | 26 | 76 | 154 | 64 | 57 |
| SD | 9.91 | 4.73 | 7.55 | 15.23 | 3.28 | 2.56 | 21.46 | 19.17 | 14.21 |
| ค่าสูงสุด | 77 | 32 | 75 | 143 | 33 | 80 | 179 | 90 | 80 |
| ค่าต่ำสุด | 32 | 14 | 51 | 80 | 21 | 70 | 105 | 33 | 36 |
| ชุดการทดลองที่ 4 | ไม่มีสารบวกรวม | | | ไม่มีสารบวกรวม | | | ไม่มีสารบวกรวม | | |
| จำนวน | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 12 | 12 | 12 |
| ค่าเฉลี่ย | 34 | 11.11 | 68 | 37 | 9 | 77 | 45 | 10 | 77 |
| SD | 6.02 | 3.88 | 8.87 | 8.21 | 2.00 | 3.33 | 9.33 | 2.31 | 2.96 |
| ค่าสูงสุด | 48 | 20 | 78 | 59 | 14 | 82 | 60 | 14 | 81 |
| ค่าต่ำสุด | 24 | 6 | 46 | 25 | 6 | 67 | 29 | 6 | 71 |



(ก) ปริมาณซัลเฟตน้ำเข้า-น้ำออกของชุดการทดลองที่ 1 ที่ $\text{NO}_3^- : \text{SO}_4^{2-}$ เท่ากับ 100:50 , 100:100 และ 100:150 และชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารบวกรวม



(ข) ประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตของชุดการทดลองที่ 1 และชุดการทดลองที่ 4

รูปที่ 4.12 ซัลเฟตและประสิทธิภาพในการกำจัดตลอดการทดลองของชุดการทดลองที่ 1 ที่มีสารบวกรวมประเภทซัลเฟตและชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารบวกรวม

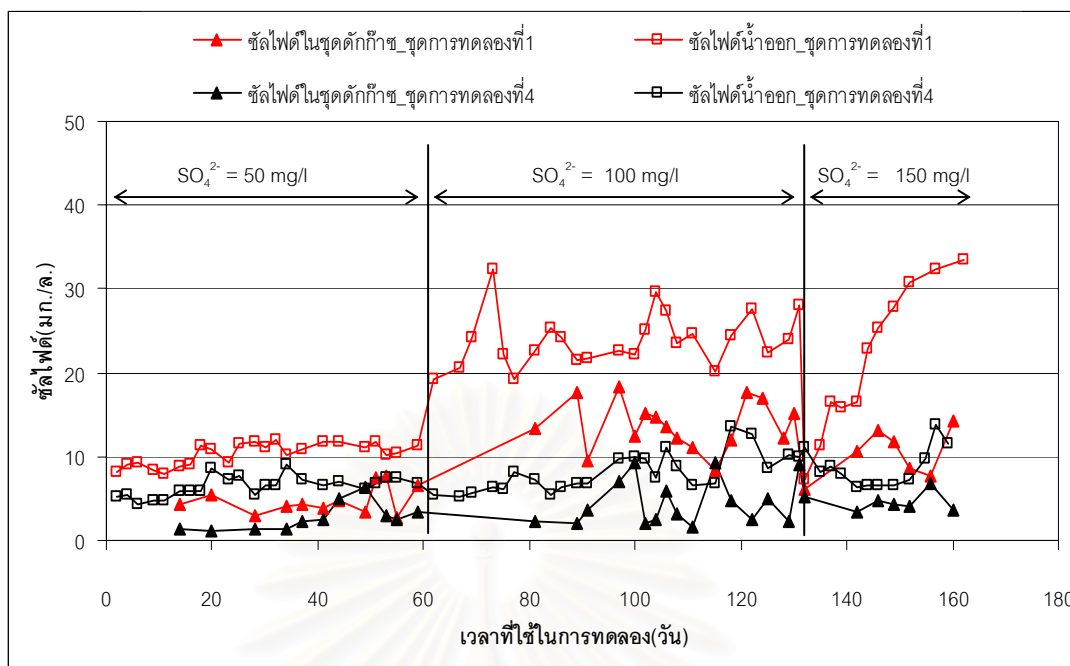
- ซัลไฟด์

ชุดการทดลองที่ 1 ที่มีความเข้มข้นของซัลเฟตเท่ากับ 50, 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณซัลไฟด์ในน้ำที่ออกจากระบบเท่ากับ 10, 24 และ 22 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และปริมาณซัลไฟด์ในชุดดักก๊าซเท่ากับ 5, 14 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ก.9)

ชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารบวกรวม มีซัลไฟด์ที่อยู่ในน้ำเสียที่ออกจากระบบเฉลี่ยเท่ากับ 6, 8 และ 8 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และปริมาณซัลไฟด์ในชุดดักก๊าซเท่ากับ 3, 5 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ง.10) แสดงดังตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.13

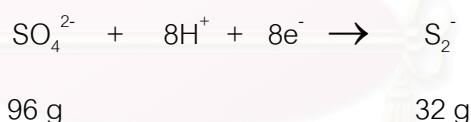
ตารางที่ 4.9 ซัลไฟด์ในน้ำออกและในชุดดักก๊าซของชุดการทดลองที่ 1 และ 4

| ชุดการทดลองที่ | ชุดการทดลองที่ 1 | | ชุดการทดลองที่ 2 | | ชุดการทดลองที่ 3 | |
|------------------|--|--------------|---|--------------|---|--------------|
| | ซัลไฟด์ (มก./ล.) | | ซัลไฟด์ (มก./ล.) | | ซัลไฟด์ (มก./ล.) | |
| | น้ำออก | ในชุดดักก๊าซ | น้ำออก | ในชุดดักก๊าซ | น้ำออก | ในชุดดักก๊าซ |
| ชุดการทดลองที่ 1 | NO ₃ ⁻ : SO ₄ ²⁻ =100 : 50 | | NO ₃ ⁻ : SO ₄ ²⁻ =100 : 100 | | NO ₃ ⁻ : SO ₄ ²⁻ =100 : 150 | |
| จำนวน | 23 | 12 | 24 | 16 | 11 | 7 |
| ค่าเฉลี่ย | 10 | 5 | 24 | 14 | 22 | 10 |
| SD | 1.32 | 1.67 | 3.27 | 2.96 | 8.91 | 2.96 |
| ค่าสูงสุด | 12 | 8 | 32 | 18 | 34 | 14 |
| ค่าต่ำสุด | 8 | 3 | 19 | 8 | 7 | 6 |
| ชุดการทดลองที่ 4 | ไม่มีสารบวกรวม | | ไม่มีสารบวกรวม | | ไม่มีสารบวกรวม | |
| จำนวน | 24 | 11 | 24 | 16 | 11 | 7 |
| ค่าเฉลี่ย | 6 | 3 | 8 | 5 | 8 | 5 |
| SD | 1.20 | 1.63 | 2.35 | 2.77 | 2.40 | 1.16 |
| ค่าสูงสุด | 9 | 6 | 14 | 9 | 14 | 7 |
| ค่าต่ำสุด | 4 | 1 | 5 | 2 | 6 | 3 |



รูปที่ 4.13 ซัลไฟด์ในน้ำออกและในชุดดักก๊าซของชุดการทดลองที่ 1 ที่มีสารบวกรูปประเภทซัลเฟตและชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารบวกรูป

จากตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.13 ปริมาณซัลไฟด์ที่อยู่ในน้ำออกมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามปริมาณซัลเฟตที่ใส่ในระบบเพิ่มขึ้น การที่ปริมาณซัลไฟด์เฉลี่ยในระบบมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจาก เกิดปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันโดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตในการเปลี่ยนซัลเฟตในระบบให้อยู่ในรูปซัลไฟด์ สมการการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าว แสดงได้ดังนี้



จากสมการ ซัลเฟตและซัลไฟด์มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 96 และ 32 ตามลำดับ ดังนั้น ตามหลักทฤษฎีซัลเฟตที่ลดลง 3 กรัม จะเปลี่ยนเป็นซัลไฟด์ 1 กรัม ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างซัลเฟตที่ลดลงกับซัลไฟด์ที่เกิดขึ้น จะกล่าวต่อไปในหัวข้อสมดุลมวลของสารในระบบ และจากปริมาณซัลไฟด์เฉลี่ยตลอดการทดลองมีค่ามากที่สุดที่ 33.54 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในระบบ มีปริมาณไม่มากจึงไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของแบคทีเรียภายในถังปฏิกรณ์ จากงานวิจัยของ Reis และ คณะ ,1992 (อ้างถึงในอนุตร เปียงแก้ว ,2542) พบว่า ไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันจะยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต เมื่อความเข้มข้นเท่ากับ 547 มิลลิกรัมต่อลิตร และงานวิจัยของ Koster และคณะ ,1986 (อ้างถึงในจันทิมา สกุลพานิช, 2548) พบว่า ช่วงพีเอช 6.4 - 7.2 การเจริญเติบโตของแบคทีเรียจะถูกยับยั้งที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร และช่วงพีเอช

7.8 – 8.0 ถูกยับยั้งที่ความเข้มข้น 90 มิลลิกรัมต่อลิตร และจากงานวิจัย Visser, 1994 (อ้างถึงใน มั่นสิน ตันทุลเวศน์, 2542) ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พีเอช 6.5 – 7.6 , 7.0 – 7.2 และ 7.8 - 8.0 ที่ความเข้มข้นของซัลไฟด์ 246 , 252 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้เกิดการยับยั้งการผลิตมีเทนจากกรดอะซิติกที่ 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งตลอดการทดลองมีพีเอชและอุณหภูมิอยู่ในช่วงดังที่กล่าวมา แต่ปริมาณซัลไฟด์ของน้ำออกมีปริมาณต่ำกว่าค่าที่เป็นพิษ ดังนั้น ซัลไฟด์ที่เกิดในระบบของชุดการทดลองนี้ จึงไม่มีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในระบบ และจากการทดลอง พบว่าปริมาณซัลไฟด์ในน้ำออกมีค่ามากกว่าปริมาณซัลไฟด์ที่อยู่ในชุดดักก๊าซ เนื่องจาก คุณสมบัติของซัลไฟด์มีความสามารถในการละลายน้ำสูงมาก ดังนั้น ซัลไฟด์ที่เกิดในระบบเปลี่ยนจากรูปซัลไฟด์ละลายน้ำไปอยู่ในรูปก๊าซไฮโดรซัลไฟด์ได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

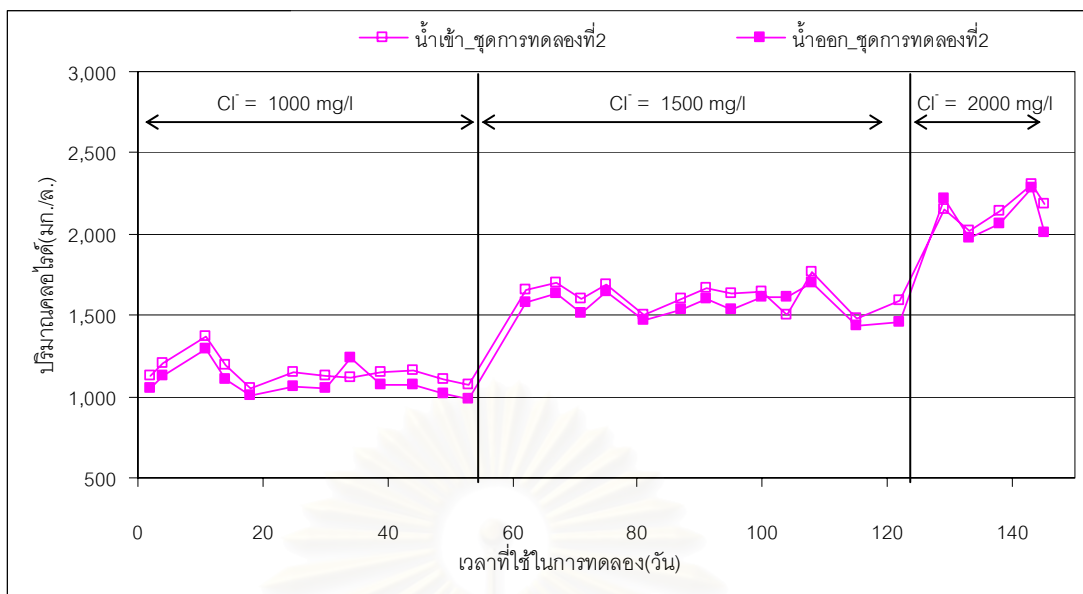
4.1.4.2 คลอไรด์และประสิทธิภาพในการกำจัด

ชุดการทดลองที่ 2 ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์เท่ากับ 1,000, 1,500 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ในน้ำเสียสังเคราะห์เฉลี่ยเท่ากับ 1,153, 1,618 และ 2,163 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนน้ำที่ออกจากระบบมีค่าความเข้มข้นของคลอไรด์เฉลี่ยเท่ากับ 1,090, 1,563 และ 2,108 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ข.8)

ซึ่งจากตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.14 ค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าระบบของชุดการทดลองที่ 2 นั้น มีค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่เข้าระบบมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ออกจากระบบ ดังนั้นสรุปได้ว่า ระบบบิโอดีเอสปีไม่สามารถกำจัดคลอไรด์ในน้ำเสีย แต่คลอไรด์ในน้ำเสียมีผลกับเซลล์ของตะกอนแบคทีเรีย โดยจะกล่าวในหัวข้อที่ 4.3

ตารางที่ 4.10 คลอไรด์และประสิทธิภาพในการกำจัดของชุดการทดลองที่ 2

| ชุดการทดลองที่ 2 | ช่วงการทดลองที่ 1 (NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 1,000) | | | ช่วงการทดลองที่ 2 (NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 1,500) | | | ช่วงการทดลองที่ 3 (NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 2,000) | | |
|------------------|---|--------|-----------------------|---|--------|-----------------------|---|--------|-----------------------|
| | คลอไรด์ (มิลลิกรัม/ลิตร) | | | คลอไรด์ (มิลลิกรัม/ลิตร) | | | คลอไรด์ (มิลลิกรัม/ลิตร) | | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | ประสิทธิภาพในการกำจัด | น้ำเข้า | น้ำออก | ประสิทธิภาพในการกำจัด | น้ำเข้า | น้ำออก | ประสิทธิภาพในการกำจัด |
| จำนวน | 12 | 12 | 12 | 13 | 13 | 13 | 5 | 5 | 5 |
| ค่าเฉลี่ย | 1153 | 1090 | 7 | 1618 | 1563 | 4 | 2163 | 2108 | 3 |
| SD | 81.21 | 90.71 | 2.23 | 84.81 | 80.92 | 2.04 | 101.98 | 137.68 | 3.31 |
| ค่าสูงสุด | 1370 | 1288 | 8 | 1765 | 1697 | 8 | 2308 | 2289 | 8 |
| ค่าต่ำสุด | 1049 | 987 | 0 | 1479 | 1433 | 0 | 2024 | 1971 | 0.00 |



รูปที่ 4.14 ปริมาณคลอไรด์ตลอดการทดลองของชุดการทดลองที่ 2

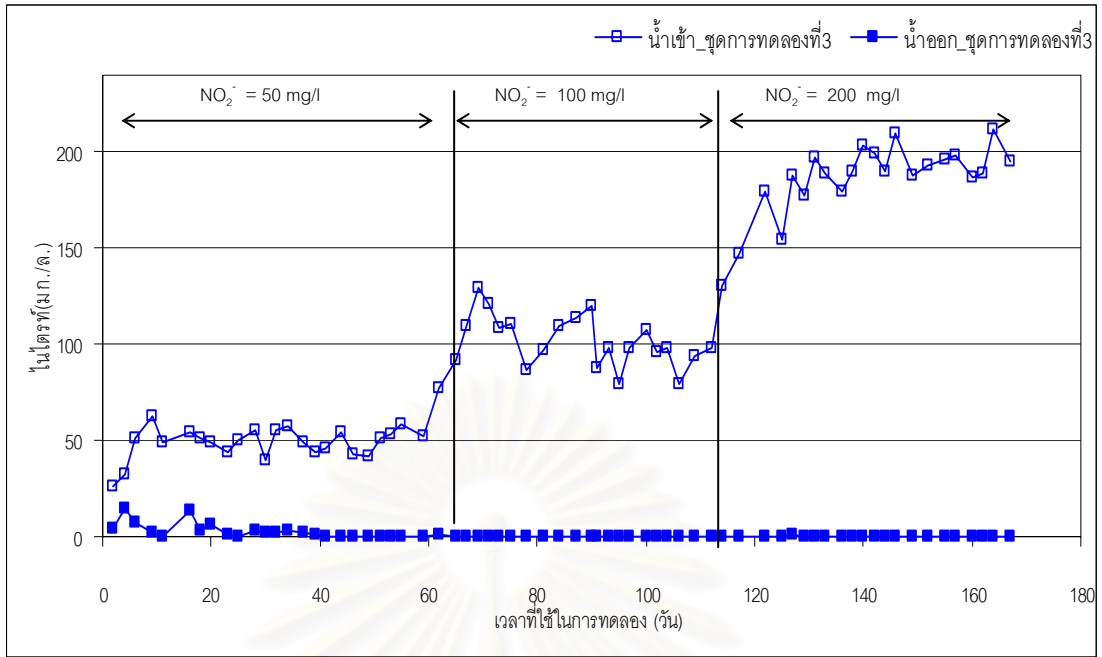
4.1.4.3 ไนไตรท์และประสิทธิภาพในการกำจัด

ชุดการทดลองที่ 3 ที่มีความเข้มข้นของไนไตรท์เท่ากับ 50, 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าไนไตรท์ในน้ำเสียสังเคราะห์เฉลี่ยเท่ากับ 49, 101 และ 186 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีไนไตรท์ในน้ำที่ออกจากระบบเท่ากับ 2.71, 0.13 และ 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดไนไตรท์เฉลี่ยเท่ากับ 94, 100 และ 100 เปอร์เซ็นต์ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ค.8) ตามลำดับ

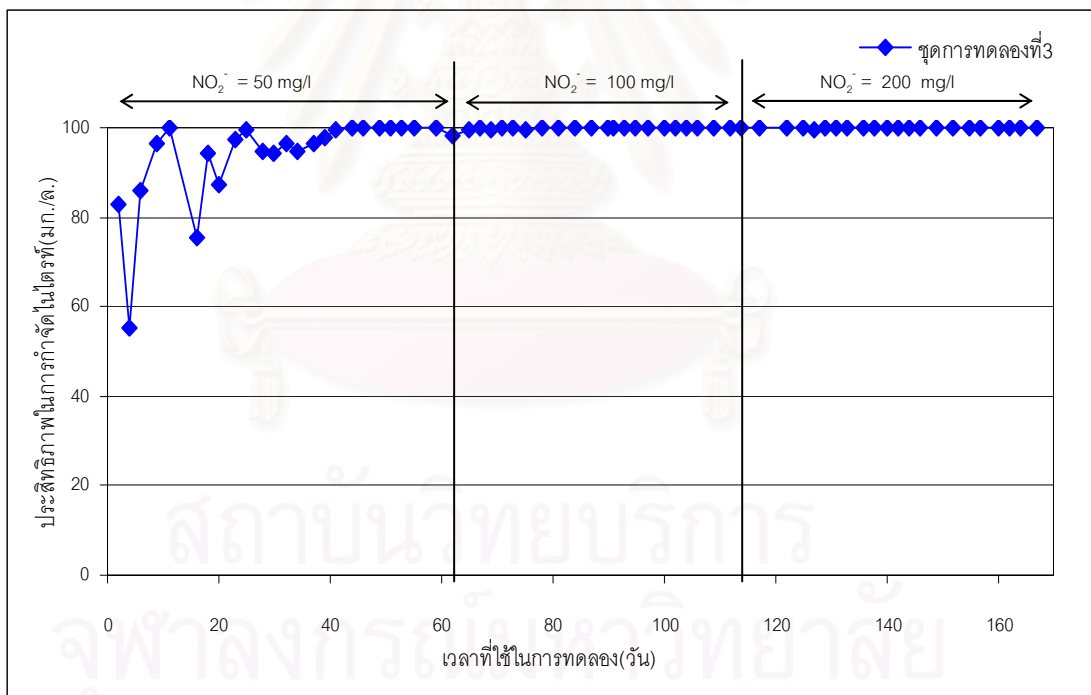
ชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารบวกรวม มีค่าไนไตรท์ในน้ำเสียสังเคราะห์เฉลี่ยเท่ากับ 0.03, 0.04 และ 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนน้ำออกจากระบบตรวจไม่พบไนไตรท์ในน้ำที่ออกจากระบบ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ง.8)

ตารางที่ 4.11 ไนไตรท์และประสิทธิภาพในการกำจัดของชุดการทดลองที่ 3

| ชุดการทดลองที่ 3 | ช่วงการทดลองที่ 1 ($\text{NO}_3^- : \text{NO}_2^- = 100 : 50$) | | | ช่วงการทดลองที่ 2 ($\text{NO}_3^- : \text{NO}_2^- = 100 : 100$) | | | ช่วงการทดลองที่ 3 ($\text{NO}_3^- : \text{NO}_2^- = 100 : 200$) | | |
|------------------|---|--------|-----------------------|--|--------|-----------------------|--|--------|-----------------------|
| | ไนไตรท์ (มิลลิกรัม/ลิตร) | | | ไนไตรท์ (มิลลิกรัม/ลิตร) | | | ไนไตรท์ (มิลลิกรัม/ลิตร) | | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | ประสิทธิภาพในการกำจัด | น้ำเข้า | น้ำออก | ประสิทธิภาพในการกำจัด | น้ำเข้า | น้ำออก | ประสิทธิภาพในการกำจัด |
| จำนวน | 24 | 24 | 24 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 |
| ค่าเฉลี่ย | 49 | 2.71 | 94 | 101 | 0.13 | 100 | 186 | 0.05 | 100 |
| SD | 8.25 | 3.92 | 10.29 | 14.08 | 0.28 | 0.34 | 19.52 | 0.18 | 0.10 |
| ค่าสูงสุด | 62 | 14.25 | 100 | 129 | 1.23 | 100 | 212 | 0.87 | 100 |
| ค่าต่ำสุด | 26 | 0.01 | 56 | 77 | 0.00 | 98 | 131 | 0.00 | 100 |



(ก) ปริมาณไนเตรทในน้ำเข้า - น้ำออกของชุดการทดลองที่ 3 ที่มีสารรบกวนประเภทไนเตรท



(ข) ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทของชุดการทดลองที่ 3

รูปที่ 4.15 ไนเตรทและประสิทธิภาพในการกำจัดลดการทดลองของชุดการทดลองที่ 3 ที่มีสารรบกวนประเภทไนเตรท

จากตารางตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.15 เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของชุดการทดลองที่ 3 ทั้ง 3 ความเข้มข้น ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนที่ มีค่าอยู่ในช่วง 99 - 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถ้าเปรียบเทียบแต่ละช่วงการทดลอง พบว่า ช่วงการทดลองที่มีความเข้มข้นของไนโตรเจน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนที่น้อยที่สุด ทั้งที่มีค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนน้อยกว่าทุกช่วงการทดลอง เพราะดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียในระบบใช้เวลาในการปรับตัวกับสารรบกวนประเภทไนโตรเจนที่เติมในระบบ เมื่อแบคทีเรียในระบบสามารถปรับตัวให้เข้ากับกับสภาวะในระบบที่มีไนโตรเจนแล้ว ดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียสามารถทำงานได้ดี เพราะมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนที่มีค่ามากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์

จากผลการทดลอง ไม่พบไนโตรเจนในน้ำออกของชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวนตรงกับงานวิจัยของ Convantes และคณะ, 2001 ที่ทำการวิจัยถึงอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงขึ้นไปจะไม่เหลือไนโตรเจนในน้ำออกโดยแปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนทั้งหมด 0.6, 0.8 และ 1.0 แปรค่าความเข้มข้นของไนโตรเจน 503, 510 และ 510 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ที่อัตราส่วน 0.6 จะเหลือปริมาณไนโตรเจนอยู่มากที่สุด และเมื่อทดลองใช้อัตราส่วน 0.4 จะทำให้เกิดไนโตรเจน 200 - 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นพิษต่อสุขภาพ ซึ่งอัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนของการทดลองผู้วิจัยเท่ากับ 44 โดยกำหนดความเข้มข้นของไนโตรเจน 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีความเข้มข้นของไนโตรเจนมากที่สุดเพียง 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

ดังนั้นสรุปได้ว่า เมื่อมีไนโตรเจนอยู่ในระบบอีจีเอสพีที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 50 - 200 มิลลิกรัมต่อลิตร เทียบเป็นอัตราส่วนระหว่างไนโตรเจนและไนโตรเจนเท่ากับ 1:0.5, 1:1 และ 1:2 ระบบอีจีเอสพีสามารถกำจัดไนโตรเจนได้ดีมาก โดยไม่มีผลกระทบต่อดีไนทริฟายอิงแบคทีเรีย เพราะดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียในระบบสามารถกำจัดไนโตรเจนได้ดี โดยไม่มีผลกระทบจากสารรบกวนประเภทไนโตรเจน

4.1.5 ก๊าซชีวภาพ

ชุดการทดลองที่ 1 ที่มีความเข้มข้นของซัลเฟตเท่ากับ 50, 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดเฉลี่ยเท่ากับ 5,188, 5,636 และ 5,684 มิลลิตรต่อวัน ตามลำดับ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ก.10)

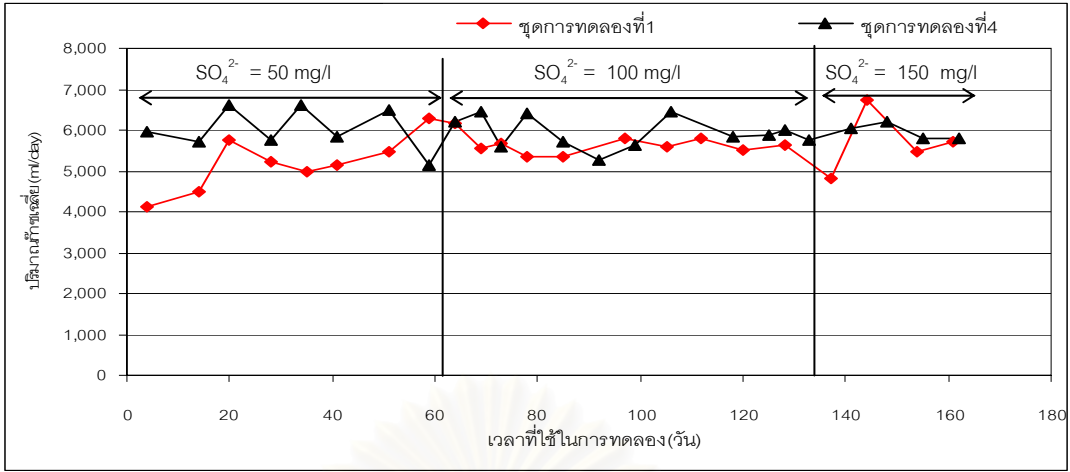
ชุดการทดลองที่ 2 ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์เท่ากับ 1,000, 1,500 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดเฉลี่ยเท่ากับ 5,955, 5,772 และ 5,571 มิลลิตรต่อวัน ตามลำดับ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ข.9)

ชุดการทดลองที่ 3 ที่มีความเข้มข้นของไนไตรท์เท่ากับ 50, 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดเฉลี่ยเท่ากับ 5,054, 5,573 และ 5,571 มิลลิลิตรต่อวัน ตามลำดับ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ค.9)

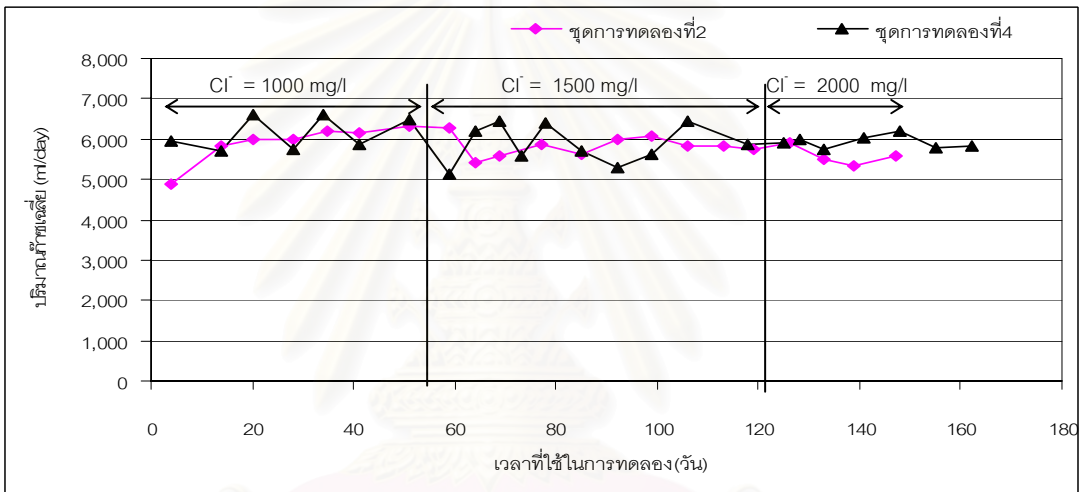
ชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน มีปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยเท่ากับ 6,016, 5,961 และ 5,917 มิลลิลิตรต่อวัน ตามลำดับ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ง.11) แสดงดังตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.16

ตารางที่ 4.12 ปริมาณก๊าซชีวภาพของทุกชุดการทดลอง

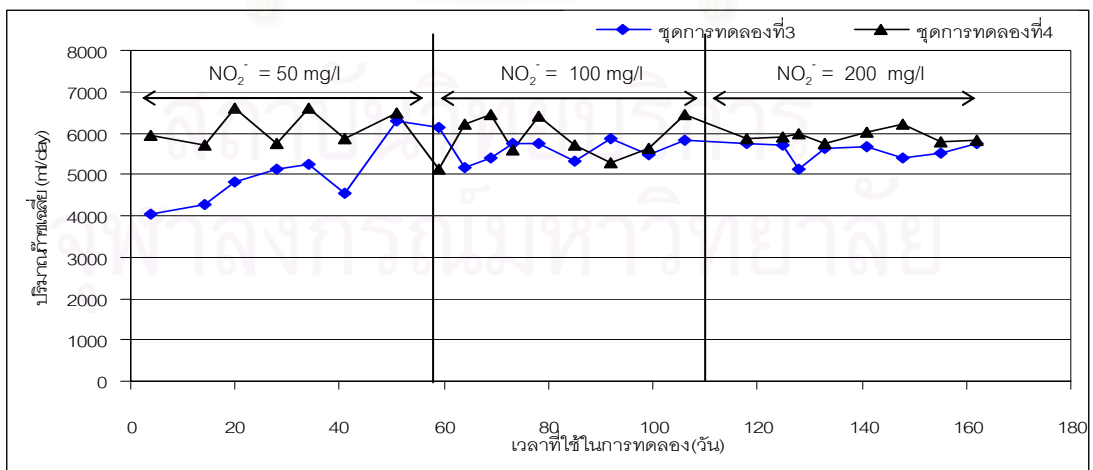
| ชุดการทดลองที่ | ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร/วัน) | | | |
|---|----------------------------|-----------|-----------|-------|
| | ค่าต่ำสุด | ค่าสูงสุด | ค่าเฉลี่ย | จำนวน |
| ชุดการทดลองที่ 1 | | | | |
| 1. $\text{NO}_3^- : \text{SO}_4^{2-} = 100 : 50$ | 4114 | 6300 | 5188 | 8 |
| 2. $\text{NO}_3^- : \text{SO}_4^{2-} = 100 : 100$ | 5331 | 6146 | 5636 | 8 |
| 3. $\text{NO}_3^- : \text{SO}_4^{2-} = 100 : 150$ | 4800 | 6750 | 5684 | 4 |
| ชุดการทดลองที่ 2 | | | | |
| 1. $\text{NO}_3^- : \text{Cl}^- = 100 : 1,000$ | 4880 | 6336 | 5955 | 8 |
| 2. $\text{NO}_3^- : \text{Cl}^- = 100 : 1,500$ | 5400 | 6090 | 5772 | 9 |
| 3. $\text{NO}_3^- : \text{Cl}^- = 100 : 2,000$ | 5333 | 5891 | 5571 | 8 |
| ชุดการทดลองที่ 3 | | | | |
| 1. $\text{NO}_3^- : \text{NO}_2^- = 100 : 50$ | 4042 | 6300 | 5054 | 8 |
| 2. $\text{NO}_3^- : \text{NO}_2^- = 100 : 100$ | 5167 | 5867 | 5573 | 8 |
| 3. $\text{NO}_3^- : \text{NO}_2^- = 100 : 200$ | 5143 | 5867 | 5571 | 8 |
| ชุดการทดลองที่ 4 | | | | |
| ช่วงการทดลองที่ 1 | 5143 | 6616 | 6016 | 8 |
| ช่วงการทดลองที่ 2 | 5280 | 6455 | 5961 | 8 |
| ช่วงการทดลองที่ 3 | 5760 | 6200 | 5917 | 8 |



(ก) ชุดการทดลองที่ 1 ที่มีสารบวกรูปแบบซัลเฟตและชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารบวกรูปแบบซัลเฟต



(ข) ชุดการทดลองที่ 2 ที่มีสารบวกรูปแบบคลอไรด์และชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารบวกรูปแบบคลอไรด์



(ค) ชุดการทดลองที่ 3 ที่มีสารบวกรูปแบบไนไตรท์และชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารบวกรูปแบบไนไตรท์

รูปที่ 4.16 ปริมาณก๊าซชีวภาพของทุกชุดการทดลอง

จากตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.16 ก) ค่าปริมาณก๊าซชีวภาพของชุดการทดลองที่ 1 ต่อดูดการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน ถึงแม้ว่าในระบบจะมีปริมาณซัลเฟตไม่เท่ากัน เนื่องจาก ปริมาณซัลเฟตที่เติมเมื่อเทียบกับซีโอดีที่ใส่ในระบบมีค่าน้อยมาก ดังนั้นค่าปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจึงมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน ซึ่งข้อมูลปริมาณก๊าซที่แสดงเป็นข้อมูลปริมาณก๊าซในช่วงที่ระบบสามารถเดินได้อย่างต่อเนื่อง

จากงานวิจัยของอนุตร เปียงแก้ว ,2542 พบว่า เมื่ออัตราส่วนของซีโอดีต่อซัลเฟตลดลง (ความเข้มข้นของซัลเฟตเพิ่มขึ้น) ปริมาณก๊าซที่ผลิตได้จะลดลง เนื่องจากเมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของซัลเฟต อัตราการเกิดก๊าซมีเทนมีค่าลดลง เพราะซีโอดีถูกใช้ไปโดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตมากขึ้น โดยที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 12, 6 และ 0.6 มีปริมาณก๊าซชีวภาพเท่ากับ 1,005, 886 และ 101 มิลลิลิตรต่อวัน ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างกับงานวิจัยนี้ เนื่องจากงานวิจัยนี้มีอัตราส่วนของซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 20, 10 และ 6.67 ค่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจึงไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจาก มีปริมาณซีโอดีที่อยู่ในระบบเหลือเพื่อทำให้แบคทีเรียสร้างมีเทน แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต และแบคทีเรียดีไนตริฟายอิงจึงสามารถใช้ได้อย่างเต็มที่

จากรูปที่ 4.16 ข) ค่าปริมาณก๊าซชีวภาพของชุดการทดลองที่ 2 ที่มีสารบวกรูปประเภทคลอไรด์ มีปริมาณก๊าซชีวภาพไม่คงที่ในช่วงต้นการทดลอง เพราะแบคทีเรียในระบบของชุดการทดลองที่ 2 ต้องมีการปรับตัวให้เข้ากับสภาพน้ำเสียที่มีคลอไรด์สูง แต่เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวปริมาณก๊าซชีวภาพจะเริ่มคงที่ เนื่องจากแบคทีเรียในระบบสามารถปรับสภาพได้ และมีความสามารถในการย่อยสลายสารเคมีได้ในปริมาณที่คงที่ ทำให้สรุปได้ว่า ในการทดลองนี้ น้ำเสียที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อยู่ในช่วง 1,000 – 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีผลน้อยมากกับอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในการทดลอง โดยค่าปริมาณก๊าซที่ผลิตได้มีค่าใกล้เคียงกัน

จากรูปที่ 4.16 ค) ค่าปริมาณก๊าซชีวภาพของทั้งชุดการทดลองที่ 3 ช่วงการทดลองที่ 1 ที่ความเข้มข้นไนโตรเจน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณก๊าซชีวภาพมีปริมาณที่น้อยกว่าชุดการทดลองที่ 4 เพราะแบคทีเรียในระบบของชุดการทดลองที่ 3 ต้องมีการปรับตัวให้เข้ากับสภาพน้ำเสียที่แตกต่างจากเดิม แต่เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวปริมาณก๊าซชีวภาพจะเริ่มคงที่ เนื่องจาก แบคทีเรียในระบบสามารถปรับสภาพได้ และมีความสามารถในการย่อยสลายสารเคมีได้ในปริมาณที่คงที่ หรือเหตุผลหนึ่งคือ งานวิจัยนี้มีอัตราส่วนของซีโอดีต่อไนโตรเจนเท่ากับ 20, 10 และ 5 ค่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจึงไม่แตกต่างกันมากนัก เพราะปริมาณซีโอดีที่อยู่ในระบบมีเหลือเพื่อทำให้แบคทีเรียสร้างมีเทน และแบคทีเรียดีไนตริฟายอิงจึงสามารถใช้ได้อย่างเต็มที่ ทำให้สรุปได้ว่าในการทดลองนี้ น้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไนโตรเจนอยู่ในช่วง 50 - 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่มีผลต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในการทดลอง โดยค่าปริมาณก๊าซที่ผลิตได้มีค่าใกล้เคียงกัน

4.1.6 ของแข็งแขวนลอยที่ออกจากระบบ

ชุดการทดลองที่ 1 ที่มีความเข้มข้นของซัลเฟตเท่ากับ 50, 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณของแข็งแขวนลอยที่ออกจากระบบเฉลี่ยเท่ากับ 20.6, 21.3 และ 39.6 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ก.11)

ชุดการทดลองที่ 2 ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์เท่ากับ 1,000, 1,500 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณของแข็งแขวนลอยที่ออกจากระบบเฉลี่ยเท่ากับ 30.2, 23.6 และ 41.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ข.10)

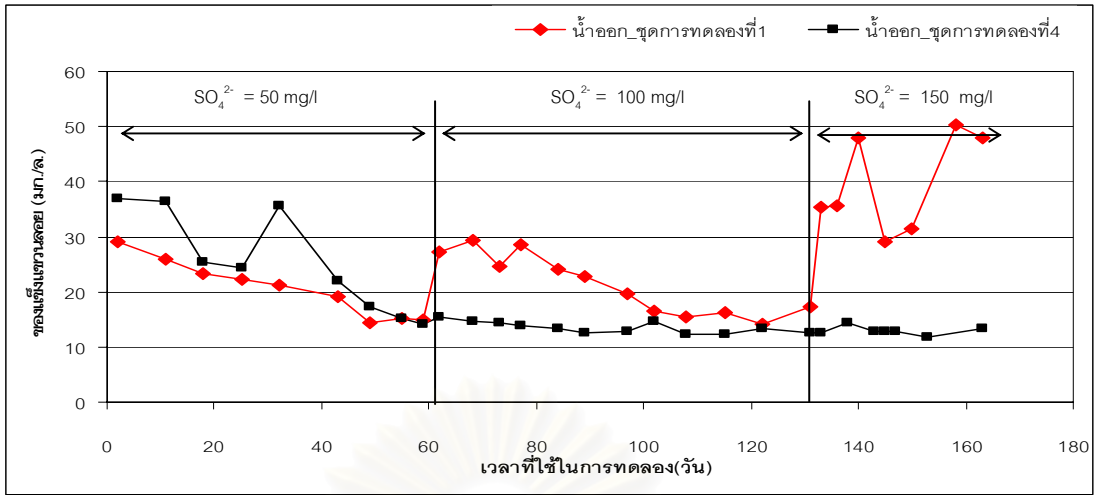
ชุดการทดลองที่ 3 ที่มีความเข้มข้นของไนไตรท์เท่ากับ 50, 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณของแข็งแขวนลอยที่ออกจากระบบเฉลี่ยเท่ากับ 27.5, 23.8 และ 23.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ค.10)

ชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารบกกวน มีปริมาณของแข็งแขวนลอยที่ออกจากระบบเฉลี่ยเท่ากับ 25.3, 13.8 และ 12.9 มิลลิกรัมต่อลิตร (รายละเอียดข้อมูลจากตารางภาคผนวก ง.12) แสดงดังตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.17

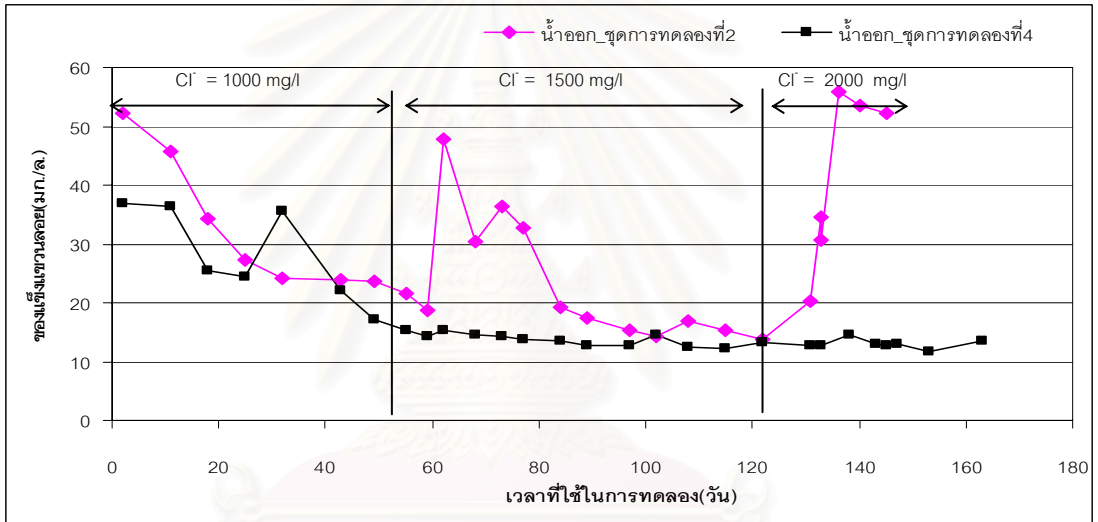
จากตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.17 ค่าปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำออกจากระบบของทุกชุดการทดลองมีค่าค่อนข้างต่ำ เนื่องจาก น้ำเข้าระบบที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียที่สังเคราะห์ขึ้น โดยใช้น้ำประปาในการเตรียมน้ำเสียและเติมสารเคมีต่างๆ ตามที่กำหนดไว้ ดังนั้น น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมไว้ จึงมีของแข็งแขวนลอยในปริมาณไม่มาก จากผลการทดลอง จะเห็นได้ว่า ช่วงเริ่มต้นเดินระบบและช่วงที่เพิ่มความเข้มข้นของสารบกกวนแต่ละครั้ง ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่มากับน้ำออกจะมีปริมาณมากขึ้น เนื่องจาก ตะกอนแบคทีเรียที่อยู่ในช่วงปรับตัวทำให้ตะกอนที่มีน้ำหนักเบาหลุดออกมากับน้ำออก ส่งผลให้ของแข็งแขวนลอยในน้ำออกมีปริมาณมาก การฟุ้งกระจายของตะกอนแบคทีเรียและการยกขึ้นของตะกอนที่จับเป็นก้อนในถังปฏิกรณ์ ทำให้ตะกอนหลุดออกมากับน้ำออกได้มากขึ้น เป็นการคัดเลือกตะกอนแบคทีเรียที่มีน้ำหนักรวมและไม่สามารถรวมตัวเป็นเม็ดตะกอนที่มีน้ำหนักรวมและไม่สามารถรวมเป็นเม็ดตะกอนที่มีน้ำหนักรวมได้ ให้นำหลุดออกไปจากระบบ แต่หลังจากระบบเริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัว ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำออกจะเริ่มคงที่

ตารางที่ 4.13 ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำออกของทุกชุดการทดลอง

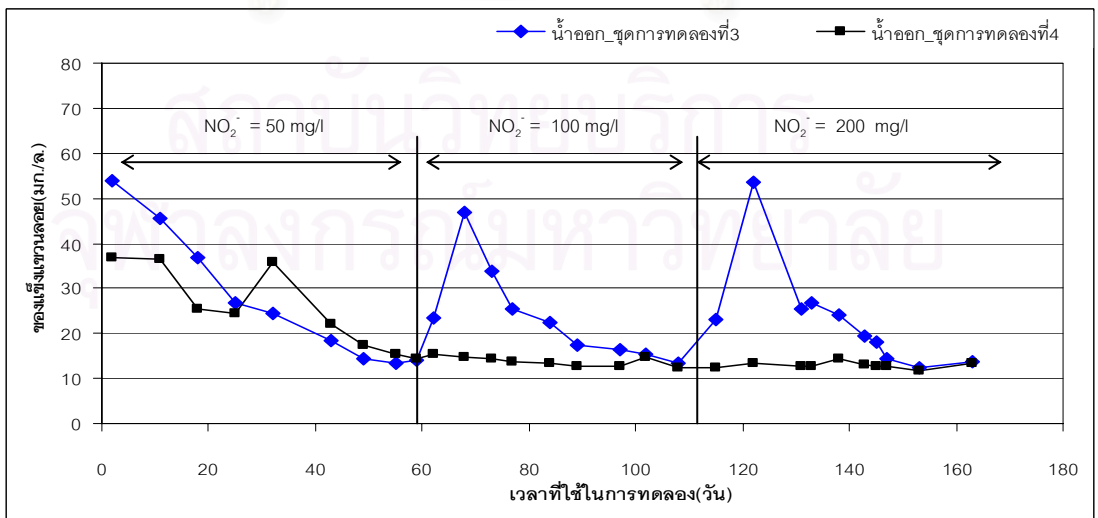
| ชุดการทดลองที่ | ช่วงการทดลองที่ 1 | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | ช่วงการทดลองที่ 3 | |
|-------------------------|---|--------|--|--------|--|--------|
| | ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัม/ลิตร) | | ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัม/ลิตร) | | ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัม/ลิตร) | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | น้ำเข้า | น้ำออก | น้ำเข้า | น้ำออก |
| ชุดการทดลองที่ 1 | $\text{NO}_3^- : \text{SO}_4^{2-} = 100 : 50$ | | $\text{NO}_3^- : \text{SO}_4^{2-} = 100 : 100$ | | $\text{NO}_3^- : \text{SO}_4^{2-} = 100 : 150$ | |
| จำนวน | - | 9 | - | 12 | - | 7 |
| ค่าเฉลี่ย | - | 20.6 | - | 21.3 | - | 39.6 |
| SD | - | 5.19 | - | 5.46 | - | 8.80 |
| ค่าสูงสุด | - | 29.2 | - | 29.3 | - | 50.3 |
| ค่าต่ำสุด | - | 14.3 | - | 14.2 | - | 29.1 |
| ชุดการทดลองที่ 2 | $\text{NO}_3^- : \text{Cl}^- = 100 : 1,000$ | | $\text{NO}_3^- : \text{Cl}^- = 100 : 1,500$ | | $\text{NO}_3^- : \text{Cl}^- = 100 : 2,000$ | |
| จำนวน | - | 9 | - | 11 | - | 6 |
| ค่าเฉลี่ย | - | 30.2 | - | 23.6 | - | 41.1 |
| SD | - | 11.60 | - | 11.38 | - | 14.75 |
| ค่าสูงสุด | - | 52.3 | - | 47.8 | - | 55.9 |
| ค่าต่ำสุด | - | 18.8 | - | 13.9 | - | 20.2 |
| ชุดการทดลองที่ 3 | $\text{NO}_3^- : \text{NO}_2^- = 100 : 50$ | | $\text{NO}_3^- : \text{NO}_2^- = 100 : 100$ | | $\text{NO}_3^- : \text{NO}_2^- = 100 : 200$ | |
| จำนวน | - | 9 | - | 9 | - | 10 |
| ค่าเฉลี่ย | - | 27.5 | - | 23.8 | - | 23.1 |
| SD | - | 14.82 | - | 10.59 | - | 11.85 |
| ค่าสูงสุด | - | 53.8 | - | 46.8 | - | 53.6 |
| ค่าต่ำสุด | - | 13.3 | - | 13.5 | - | 12.5 |
| ชุดการทดลองที่ 4 | ไม่มีสารบวกรวม | | ไม่มีสารบวกรวม | | ไม่มีสารบวกรวม | |
| จำนวน | - | 9 | - | 9 | - | 10 |
| ค่าเฉลี่ย | - | 25.3 | - | 13.8 | - | 12.9 |
| SD | - | 9.11 | - | 1.06 | - | 0.73 |
| ค่าสูงสุด | - | 36.9 | - | 15.5 | - | 14.5 |
| ค่าต่ำสุด | - | 14.2 | - | 12.4 | - | 11.8 |



(ก) ชุดการทดลองที่ 1 ที่มีสารรบกวนประเภทซัลเฟตและชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน



(ข) ชุดการทดลองที่ 2 ที่มีสารรบกวนประเภทคลอไรด์และชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน



(ค) ชุดการทดลองที่ 3 ที่มีสารรบกวนประเภทไนไตรท์และชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน

รูปที่ 4.17 ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำออกของทุกชุดการทดลอง

4.1.7 สมดุลมวลของสารในระบบ

1) สมดุลมวลของซีโอดี

การพิจารณาสมดุลมวลของซีโอดีในงานวิจัยนี้ ทำให้ทราบถึงความน่าเชื่อถือของข้อมูล โดยดูจากค่าเปรียบเทียบสมดุลมวลของซีโอดีภายหลังผ่านระบบกับสมดุลมวลซีโอดีก่อนเข้าระบบ (%COD recovery) นอกจากนี้ ยังนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณสัดส่วนของซีโอดีที่ถูกใช้โดยแบคทีเรียสร้างมีเทน แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต และแบคทีเรียดีไนตริฟายอิงได้ โดยดูจากค่าเปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นค่าในการพิจารณาเปรียบเทียบบทบาทของแบคทีเรียทั้ง 3 ชนิด ในความสามารถในการแย่งใช้สารอาหารภายในระบบ

งานวิจัยนี้ ซีโอดีของน้ำที่เข้าระบบเป็นซีโอดีของสารอินทรีย์ ซึ่งเกิดจากน้ำตาลทรายที่เติมลงไปเพื่อเป็นแหล่งคาร์บอนให้กับแบคทีเรีย เมื่อน้ำเสียผ่านระบบค่าซีโอดีของน้ำเข้าดังกล่าวจะเปลี่ยนรูปไปจากกิจกรรมการดำรงชีพของแบคทีเรียในระบบ สำหรับทฤษฎีเกี่ยวกับสมดุลมวลซีโอดีของระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน เมื่อมีซัลเฟตและไนเตรทอยู่ในน้ำเสียด้วย แสดงในหัวข้อ 2.9 และตัวอย่างการคำนวณสมดุลมวลของสารในระบบแสดงในภาคผนวก จ โดยผลการคำนวณข้อมูลของการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 สมดุลมวลของซีโอดีภายหลังผ่านระบบกับสมดุลมวลซีโอดีก่อนเข้าระบบ

(%COD recovery) ของทุกชุดการทดลอง

| ชุดการทดลองที่ | ความเข้มข้นซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | ความเข้มข้นซัลเฟต (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | ความเข้มข้นไนเตรต (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | ความเข้มข้นไนโตรท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | ก๊าซทั้งหมด ต่อวัน (มิลลิลิตร) | % CH ₄ | % COD recovery | | |
|------------------|---|--|--|------|---|-----|--|------|--------------------------------------|-------------------|-------------------|-------|-------|
| | เข้า | ออก | เข้า | ออก | เข้า | ออก | เข้า | ออก | | | | | |
| ชุดการทดลองที่ 1 | 1. NO ₃ ⁻ : SO ₄ ²⁻ = 100 : 50 | 1011 | 80 | 54 | 19 | 110 | 3.32 | - | - | 5188 | 73.53 | 61.07 | |
| | | 2. NO ₃ ⁻ : SO ₄ ²⁻ = 100 : 100 | 953 | 54 | 113 | 26 | 111 | 2.90 | - | - | 5636 | 68.12 | 65.54 |
| | | | 3. NO ₃ ⁻ : SO ₄ ²⁻ = 100 : 150 | 956 | 100 | 154 | 64 | 113 | 2.92 | - | - | 5684 | 66.65 |
| ชุดการทดลองที่ 2 | 1 NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 1,000 | 1035 | 78 | - | - | 108 | 0.80 | - | - | 5955 | 75.24 | 64.08 | |
| | | 2 NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 1,500 | 1005 | 57 | - | - | 109 | 0.62 | - | - | 5772 | 74.24 | 61.75 |
| | | | 3 NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 2,000 | 1015 | 90 | - | - | 95 | 0.86 | - | - | 5571 | 73.69 |

ตารางที่ 4.14 สมดุลมวลของซีโอดีภายหลังผ่านระบบกับสมดุลมวลซีโอดีก่อนเข้าระบบ
(% COD recovery) ของชุดการทดลอง (ต่อ)

| ชุดการทดลองที่ | ความเข้มข้นซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | ความเข้มข้นซัลเฟต (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | ความเข้มข้นไนเตรท (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | ความเข้มข้นไนโตรท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | ก๊าซทั้งหมด ต่อวัน (มิลลิลิตร) | % CH ₄ | % COD recovery |
|---|---|-----|---|-----|---|------|--|------|--------------------------------------|-------------------|-------------------|
| | เข้า | ออก | เข้า | ออก | เข้า | ออก | เข้า | ออก | | | |
| ชุดการทดลองที่ 3 | | | | | | | | | | | |
| 1 NO ₃ ⁻ :NO ₂ ⁻ = 100 : 50 | 1058 | 82 | - | - | 105 | 2.94 | 49 | 2.71 | 5054 | 69.86 | 54.45 |
| 2 NO ₃ ⁻ :NO ₂ ⁻ = 100 : 100 | 1020 | 60 | - | - | 101 | 1.75 | 101 | 0.14 | 5573 | 68.72 | 60.34 |
| 3 NO ₃ ⁻ :NO ₂ ⁻ = 100 : 200 | 1121 | 83 | - | - | 112 | 1.41 | 186 | 0.05 | 5571 | 67.83 | 61.37 |
| ชุดการทดลองที่ 4 | | | | | | | | | | | |
| ช่วงการทดลองที่ 1 | 1005 | 80 | 34 | 11 | 103 | 2.00 | - | - | 6016 | 77.61 | 69.36 |
| ช่วงการทดลองที่ 2 | 1034 | 53 | 37 | 9 | 108 | 1.35 | - | - | 5961 | 76.70 | 64.45 |
| ช่วงการทดลองที่ 3 | 1050 | 50 | 45 | 10 | 110 | 1.36 | - | - | 5917 | 78.36 | 64.42 |

จากตารางที่ 4.14 เมื่อพิจารณาค่าสมดุลมวลของซีโอดีภายหลังผ่านระบบกับสมดุลมวลซีโอดีก่อนเข้าระบบ(% COD recovery) จะเห็นว่ามีย่าน้อยกว่า 100 นั้น เนื่องจากไม่สามารถวัดปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกเปลี่ยนเป็นเซลล์แบคทีเรีย และที่ถูกใช้ในกระบวนการเมตาบอลิซึมของแบคทีเรียทั้ง 3 ชนิด เนื่องจากการหาค่าซีโอดีได้ทำการกรองตัวอย่างน้ำก่อนวิเคราะห์ ทำให้ค่าซีโอดีที่เกิดจากแบคทีเรียไม่ได้ถูกวัดไปทำให้ขาดข้อมูลส่วนนี้ไป ซึ่งในงานวิจัยนี้มีค่าอยู่ในช่วง 60 – 70 เปอร์เซ็นต์ เพราะความผิดพลาดในการเก็บก๊าซที่เกิดขึ้นทำให้เกิดรบกวนในขณะเก็บตัวอย่าง ทำให้ไม่สามารถเก็บก๊าซที่เกิดขึ้นได้ทั้งหมด ส่งผลต่อปริมาตรของก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ค่าสมดุลมวลของซีโอดีภายหลังผ่านระบบกับสมดุลมวลซีโอดีก่อนเข้าระบบ(% COD recovery) ที่ได้มีค่าน้อยกว่า 100 เปอร์เซ็นต์

จากข้อมูล ค่าสัดส่วนซีโอดีในรูปมีเทน สัดส่วนซีโอดีที่ถูกใช้ในกระบวนการซัลเฟตรีดักชัน และสัดส่วนซีโอดีที่ถูกใช้ในกระบวนการไนตริฟิเคชันที่ได้ จะนำมาใช้ในการคำนวณเปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอน (%electron flow) หรือ สัดส่วนการใช้ซีโอดีระหว่างแบคทีเรียสร้างมีเทน แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต และแบคทีเรียดีไนตริฟายอิง เพื่อนำมาพิจารณาเปรียบเทียบบทบาทระหว่างแบคทีเรียทั้ง 3 ชนิดในระบบ โดยเปอร์เซ็นต์สัดส่วนการใช้ซีโอดีของแบคทีเรียทั้ง 3 ชนิด ทั้ง 4 ชุดการทดลองแต่ละช่วงการทดลอง แสดงดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 เปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอน (% electron flow)

| ชุดการทดลองที่ | เปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอน (เปอร์เซ็นต์) | | |
|---|--|---------------------------------|---------------------------------|
| | แบคทีเรียสร้างมีเทน (MPB) | แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต (SRB) | แบคทีเรียดีไนตริฟายอิง (DNP) |
| ชุดการทดลองที่ 1 | | | |
| 1. $\text{NO}_3^- : \text{SO}_4^{2-} = 100 : 50$ | 83.97 | 4.34 | 11.69 |
| 2. $\text{NO}_3^- : \text{SO}_4^{2-} = 100 : 100$ | 78.79 | 10.12 | 11.10 |
| 3. $\text{NO}_3^- : \text{SO}_4^{2-} = 100 : 150$ | 78.10 | 10.53 | 11.37 |
| ชุดการทดลองที่ 2 | | | |
| 1 $\text{NO}_3^- : \text{Cl}^- = 100 : 1,000$ | 89.16 | - | 6.45 |
| 2 $\text{NO}_3^- : \text{Cl}^- = 100 : 1,500$ | 88.69 | - | 6.78 |
| 3 $\text{NO}_3^- : \text{Cl}^- = 100 : 2,000$ | 89.70 | - | 6.11 |
| ชุดการทดลองที่ 3 | | | |
| 1 $\text{NO}_3^- : \text{NO}_2^- = 100 : 50$ | 83.67 | - | 16.33 |
| 2 $\text{NO}_3^- : \text{NO}_2^- = 100 : 100$ | 80.83 | - | 19.17 |
| 3 $\text{NO}_3^- : \text{NO}_2^- = 100 : 200$ | 74.24 | - | 25.76 |
| ชุดการทดลองที่ 4 | | | |
| ช่วงการทดลองที่ 1 | 87.88 | 2.51 | 9.62 |
| ช่วงการทดลองที่ 2 | 86.75 | 3.05 | 10.21 |
| ช่วงการทดลองที่ 3 | 86.11 | 3.70 | 10.20 |

จากตารางที่ 4.15 สามารถเปรียบเทียบแต่ละชุดการทดลองพบว่า เปอร์เซ็นต์การไหลอิเล็กตรอนของแบคทีเรียสร้างมีเทนของชุดการทดลองที่ 1 ที่ความเข้มข้นของซัลเฟตเท่ากับ 50, 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเท่ากับ 80.97, 78.79 และ 78.10 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และเปอร์เซ็นต์การไหลอิเล็กตรอนของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตมีค่าเท่ากับ 4.34, 10.12 และ 10.53 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากงานวิจัยของ อนุตร เปียงแก้ว (2542) พบว่า เมื่อความเข้มข้นของซัลเฟตในน้ำเข้าเพิ่มขึ้นหรืออัตราส่วนของซีโอดีต่อซัลเฟตลดลง เปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอนของแบคทีเรียสร้างมีเทนมีค่าลดลง ขณะที่เปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอนของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งตรงกับค่าที่ได้จากการทดลอง ซึ่งอัตราการเพิ่มของเปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอนของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตมีค่าเพิ่มเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้น เรื่องอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต ไม่มีผลต่อค่าที่ได้จากการทดลองนี้

ชุดการทดลอง 2 ค่าเปอร์เซ็นต์การไหลอิเล็กตรอนหรือเปอร์เซ็นต์สัดส่วนการใช้ซีโอดีของแบคทีเรียสร้างมีเทนมีค่ามากกว่าแบคทีเรียดีไนตริฟายอิง นั่นคือ ในทุกช่วงการ

ทดลองของ แบบคที่เรียสร้างมีเทนเป็นแบบคที่เรียที่โดดเด่นในระบบ และสามารถใชชีไอดีได้มากที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบแต่ละช่วงการทดลองจะพบว่า เปอร์เซ็นต์การไหลอิเล็กตรอนของแบบคที่เรียสร้างมีเทนของชุดการทดลองที่ 2 ที่ความเข้มข้นของคลอไรด์เท่ากับ 1,000, 1,500 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเท่ากับ 89.16, 88.69 และ 89.70 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และเปอร์เซ็นต์การไหลอิเล็กตรอนของแบบคที่เรียดีไนโตรฟายอิงมีค่า เท่ากับ 6.45, 6.70 และ 6.11 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ดังนั้น ค่าเปอร์เซ็นต์การไหลอิเล็กตรอนของแบบคที่เรียสร้างมีเทน กับค่าเปอร์เซ็นต์การไหลอิเล็กตรอนของแบบคที่เรียดีไนโตรฟายอิงของแต่ละช่วงความเข้มข้นของคลอไรด์ มีค่าไม่ต่างกันมากนัก ทำให้สรุป อัตราส่วนชีไอดีต่อคลอไรด์ไม่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การไหลอิเล็กตรอน

ชุดการทดลอง 3 ค่าเปอร์เซ็นต์การไหลอิเล็กตรอนหรือเปอร์เซ็นต์สัดส่วนการใชชีไอดีของแบบคที่เรียสร้างมีเทนจะมีค่ามากกว่าแบบคที่เรียดีไนโตรฟายอิง นั่นคือ ในทุกช่วงการทดลอง แบบคที่เรียสร้างมีเทนยังคงเป็นแบบคที่เรียที่โดดเด่นในระบบ และสามารถใชชีไอดีได้มากที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบแต่ละช่วงการทดลองจะพบว่า เปอร์เซ็นต์การไหลอิเล็กตรอนของแบบคที่เรียสร้างมีเทนของชุดการทดลองที่ 3 ที่ความเข้มข้นของไนโตรท์เท่ากับ 50, 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเท่ากับ 83.67, 80.83 และ 74.24 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และเปอร์เซ็นต์การไหลอิเล็กตรอนของแบบคที่เรียดีไนโตรฟายอิงมีค่า เท่ากับ 16.33, 19.17 และ 25.76 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จากค่าที่ได้จากการทดลอง เห็นได้ว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การไหลอิเล็กตรอนของแบบคที่เรียสร้างมีเทน กับ ค่าเปอร์เซ็นต์การไหลอิเล็กตรอนของแบบคที่เรียดีไนโตรฟายอิงของช่วงการทดลองทั้ง 3 ความเข้มข้น มีค่าไม่ต่างกันมากนัก ทำให้สรุป อัตราส่วนชีไอดีต่อไนโตรท์ไม่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การไหลอิเล็กตรอน

ดังนั้น สรุปได้ว่า ในทุกชุดการทดลอง ค่าเปอร์เซ็นต์การไหลอิเล็กตรอนหรือเปอร์เซ็นต์สัดส่วนการใชชีไอดีของแบบคที่เรียสร้างมีเทนมีค่ามากกว่า แบบคที่เรียดีไนโตรฟายอิง และแบบคที่เรียรีดิวซ์ซัลเฟต ตามลำดับ นั่นคือ ในทุกช่วงการทดลองของทั้ง 4 ชุดการทดลองแบบคที่เรียสร้างมีเทนยังคงเป็นแบบคที่เรียที่โดดเด่นในระบบ และสามารถใชชีไอดีได้มากที่สุด โดยซัลเฟตที่ความเข้มข้น 50-150 มิลลิกรัมต่อลิตร คลอไรด์ที่ความเข้มข้น 1,000 – 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และไนโตรท์ที่ความเข้มข้น 50 – 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่มีผลต่อสัดส่วนของชีไอดีที่ถูกใช้โดยแบบคที่เรียสร้างมีเทน แบบคที่เรียรีดิวซ์ซัลเฟต และแบบคที่เรียดีไนโตรฟายอิงได้ ในระบบอีจีเอสพีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นชีไอดีและไนเตรท เท่ากับ 1,000 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

2) สมดุลมวลของไนโตรเจน

การพิจารณาสมดุลมวลของไนโตรเจนในงานวิจัยนี้ เป็นพารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งที่แสดงให้เห็นถึงความเชื่อถือของข้อมูล โดยจะเป็นการมองในแง่ของไนโตรเจนที่เข้าและออกในระบบเพียงอย่างเดียว โดยไม่คำนึงถึงซีโอดีเข้าระบบ (โดยกำหนดให้เนเตรทและไนไตรท์เป็นรูปของสารประกอบไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบ) โดยการคำนวณค่าเปรียบเทียบกับสมดุลมวลของไนโตรเจนภายหลังผ่านระบบกับสมดุลมวลไนโตรเจนก่อนเข้าระบบ (% nitrogen recovery) ของทุกชุดการทดลอง แสดงดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 สมดุลมวลของไนโตรเจนภายหลังผ่านระบบกับสมดุลมวลไนโตรเจนก่อนเข้าระบบ (% nitrogen recovery) ของทุกชุดการทดลอง

| ชุดการทดลองที่ | ความเข้มข้นไนเตรท (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | ความเข้มข้นไนไตรท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | %N ₂ | ก๊าซไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | % nitrogen recovery |
|--|---|------|--|------|-----------------|------------------------------------|--------------------|---------------------------|
| | เข้า | ออก | เข้า | ออก | | รูปไนเตรท | รูปการ ละลายน้ำ | |
| ชุดการทดลองที่ 1 | | | | | | | | |
| 1. NO ₃ ⁻ : SO ₄ ²⁻ = 100 : 50 | 110 | 3.32 | - | - | 7.45 | 77 | 5.57 | 78.11 |
| 2. NO ₃ ⁻ : SO ₄ ²⁻ = 100 : 100 | 111 | 2.90 | - | - | 5.22 | 5ต | 3.90 | 59.27 |
| 3. NO ₃ ⁻ : SO ₄ ²⁻ = 100 : 150 | 113 | 2.92 | - | - | 6.35 | 72 | 4.75 | 70.82 |
| ชุดการทดลองที่ 2 | | | | | | | | |
| 1 NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 1,000 | 108 | 0.80 | - | - | 5.74 | 68 | 4.29 | 67.51 |
| 2 NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 1,500 | 109 | 0.62 | - | - | 7.11 | 82 | 5.32 | 80.50 |
| 3 NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 2,000 | 95 | 0.86 | - | - | 6.28 | 69 | 4.70 | 79.52 |
| ชุดการทดลองที่ 3 | | | | | | | | |
| 1 NO ₃ ⁻ : NO ₂ ⁻ = 100 : 50 | 105 | 2.94 | 49 | 2.71 | 7.86 | 79.26 | 5.88 | 53.84 |
| 2 NO ₃ ⁻ : NO ₂ ⁻ = 100 : 100 | 101 | 1.75 | 101 | 0.13 | 15.67 | 174.24 | 11.72 | 79.30 |
| 3 NO ₃ ⁻ : NO ₂ ⁻ = 100 : 200 | 112 | 1.41 | 186 | 0.05 | 18.35 | 203.96 | 13.72 | 60.39 |

ตารางที่ 4.16 สมดุลมวลของไนโตรเจนภายหลังผ่านระบบกับสมดุลมวลไนโตรเจนก่อนเข้าระบบ (% nitrogen recovery) ของทุกชุดการทดลอง (ต่อ)

| ชุดการทดลองที่ | ความเข้มข้นไนเตรท (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | ความเข้มข้นไนไตรท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | %N ₂ | ก๊าซไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | % nitrogen recovery |
|-------------------|---|------|--|-----|-----------------|------------------------------------|--------------------|---------------------------|
| | เข้า | ออก | เข้า | ออก | | รูปไนเตรท | รูปการ ละลายน้ำ | |
| ชุดการทดลองที่ 4 | | | | | | | | |
| ช่วงการทดลองที่ 1 | 103 | 2.00 | - | - | 6.71 | 81 | 5.77 | 85.83 |
| ช่วงการทดลองที่ 2 | 108 | 1.35 | - | - | 5.85 | 70 | 5.03 | 70.53 |
| ช่วงการทดลองที่ 3 | 110 | 1.36 | - | - | 6.22 | 73 | 5.34 | 72.85 |

การพิจารณาสมดุลมวลของไนโตรเจนในงานวิจัยนี้ เป็นพารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งที่แสดงให้เห็นถึงความเชื่อถือของข้อมูล โดยจะเป็นการมองในแง่ของไนโตรเจนที่เข้าและออกในระบบเพียงอย่างเดียว โดยไม่คำนึงถึงซีโอดีเข้าระบบ (โดยกำหนดให้ไนเตรทและไนไตรท์เป็นรูปของสารประกอบไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบ) เนื่องจาก การวิเคราะห์ไนโตรเจนในน้ำออกจะวิเคราะห์เฉพาะรูปไนเตรทและไนไตรท์เท่านั้น ซึ่งไนโตรเจนที่อยู่ในรูปสารประกอบอื่นและไนโตรเจนที่เกิดขึ้นในสถานะก๊าซอาจเกิดการรั่วไหลในขณะเก็บตัวอย่าง ทำให้ก๊าซไนโตรเจนสูญหายออกไปจากระบบ ส่งผลรวมของก๊าซที่ได้มีค่าลดลง ปริมาตรของก๊าซไนโตรเจนที่ได้มีค่าเปลี่ยนแปลงไป ทำให้ค่าสมดุลมวลของไนโตรเจนภายหลังผ่านระบบกับสมดุลมวลไนโตรเจนก่อนเข้าระบบ(% nitrogen recovery) ที่ได้มีค่าน้อยกว่า 100 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น ค่าที่ได้ในการวิจัยนี้ ถือว่าเป็นข้อมูลน่าเชื่อถือ เพราะมีค่าสมดุลมวลของไนโตรเจนภายหลังผ่านระบบกับสมดุลมวลไนโตรเจนก่อนเข้าระบบ(% nitrogen recovery) ที่มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์

3) สมดุลมวลของซัลเฟอร์

จุดประสงค์สำหรับการพิจารณาสมดุลมวลซัลเฟอร์ในงานวิจัยนี้ คือ การตรวจสอบย้อนกลับถึงความถูกต้องของการวิเคราะห์ตัวอย่างในส่วนที่เกี่ยวข้องกับซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ โดยเมื่อพิจารณาในเชิงปริมาณค่าปริมาณซัลเฟอร์ในรูปซัลเฟตน้ำเข้า (ซึ่งกำหนดให้เป็นรูปของสารประกอบซัลเฟอร์ชนิดเดียวที่ถูกป้อนเข้าระบบ) เท่ากับผลรวมของ

- 1) ค่าปริมาณซัลเฟอร์ในรูปซัลเฟตที่เหลือในน้ำออก
- 2) ค่าปริมาณซัลเฟตในรูปซัลไฟด์ละลายน้ำทั้งหมด
- 3) ค่าปริมาณซัลเฟอร์ในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์
- 4) ค่าซัลเฟอร์ในรูปตะกอนผลึกโลหะหนักซัลไฟด์
- 5) ค่าปริมาณซัลเฟอร์ทั้งหมดที่ถูกใช้และสะสมอยู่ในเซลล์แบคทีเรีย

โดยในงานทดลองนี้ค่าปริมาณซัลเฟอร์ที่ทำการวัดสม่ำเสมอ คือ ค่าในข้อ 1) ถึง 3) ขณะที่ค่าในข้อ 4) และข้อ 5) ไม่มีการวัดและค่าโดยทั่วไปมีปริมาณค่อนข้างน้อยมากซึ่งจะไม่นำมาร่วมพิจารณา นอกจากนั้นจะนำค่าซัลไฟด์ละลายทั้งหมด ค่าพีเอช ค่าอุณหภูมิ และค่าสภาพนำไฟฟ้า มาร่วมคำนวณสัดส่วนการกระจายรูปซัลไฟด์ละลายน้ำออก ซึ่งจะอยู่ใน 3 รูปคือไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายที่ไม่แตกตัว ($H_2S_{(sol)}$) อีออนไบซัลไฟด์ (HS^-) และอีออนซัลไฟด์ (S_2^{2-}) โดยปัจจัยหลักที่มีผลต่อการกระจายรูปของซัลไฟด์ละลายน้ำออกคือ ค่าพีเอช เนื่องจากการกระจายรูป ดังกล่าว คือ การแตกตัวของกรดอ่อนนั่นเอง โดยซัลไฟด์ละลายน้ำออกจะอยู่ใน 2 รูปแรกขณะที่รูปอีออนซัลไฟด์ จะมีสัดส่วนน้อยมาก เนื่องจากพีเอชน้ำออก มีค่าประมาณ 7.8 ทำให้การแตกตัวของขั้นที่ 2 โดยอีออนไบซัลไฟด์เกิดขึ้นได้ยากมาก โดยประโยชน์ในการทราบปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ไม่แตกตัว คือสามารถนำมาใช้ในการระวังความล้มเหลวที่อาจเกิดขึ้นกับระบบอันเกิดจากพิษของซัลไฟด์ โดยทางทฤษฎีรูปของซัลไฟด์ ที่อันตรายต่อแบคทีเรียมากที่สุดคือ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายที่ไม่แตกตัว เนื่องจากเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุและผ่านเข้าสู่เซลล์แบคทีเรียได้ง่ายกว่า สำหรับรายละเอียดทฤษฎีเกี่ยวกับสมดุลมวลซัลเฟอร์ แสดงในหัวข้อ 2.9.2 บทที่ 2 ข้อมูลแสดงดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 สมดุลมวลของซัลเฟอร์ภายหลังผ่านระบบกับสมดุลมวลซัลเฟอร์ก่อนเข้าระบบ (% sulfur recovery) ของทุกชุดการทดลอง

| ชุดการทดลองที่ | ความเข้มข้นซัลเฟต (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | ซัลไฟด์ทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | ซัลไฟด์ในรูปก๊าซ (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | % sulfur recovery |
|-------------------------------------|---|-----|--------------------------------------|-----------|--|-----------|----------------------|
| | เข้า | ออก | รูปซัลไฟด์ | รูปซัลเฟต | รูปซัลไฟด์ | รูปซัลเฟต | |
| ชุดการทดลองที่ 1 | | | | | | | |
| 1. $NO_3^- : SO_4^{2-} = 100 : 50$ | 54 | 19 | 10 | 31 | 5 | 0.29 | 93.31 |
| 2. $NO_3^- : SO_4^{2-} = 100 : 100$ | 113 | 26 | 24 | 72 | 14 | 0.83 | 87.72 |
| 3. $NO_3^- : SO_4^{2-} = 100 : 150$ | 154 | 64 | 22 | 66 | 10 | 0.62 | 84.75 |
| ชุดการทดลองที่ 4 | | | | | | | |
| ช่วงการทดลองที่ 1 | 34 | 11 | 6 | 19 | 3 | 0.16 | 89.07 |
| ช่วงการทดลองที่ 2 | 37 | 9 | 8 | 25 | 5 | 0.27 | 92.61 |
| ช่วงการทดลองที่ 3 | 45 | 10 | 8 | 25 | 5 | 0.27 | 79.77 |

ตารางที่ 4.17 จะเห็นได้ว่าทุกช่วงการทดลองในชุดการทดลองที่ 1 และ 4 มีค่าสมดุลมวลของซัลเฟอร์ภายหลังผ่านระบบกับสมดุลมวลซัลเฟอร์ก่อนเข้าระบบ(%sulfur recovery) มีค่าน้อยกว่า 100 เพียงเล็กน้อย สาเหตุเนื่องมาจาก ในการทำการวิจัยครั้งนี้ได้ปรับวิธีการวิเคราะห์ซัลไฟด์ในน้ำออกและซัลไฟด์ในรูปก๊าซ เพื่อแก้ปัญหาเรื่องความดันพาร์เชียลของก๊าซ

ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และซัลไฟด์ละลายน้ำซึ่งจะมีค่าลดลงเมื่อตัวอย่างน้ำสัมผัสอากาศ ซึ่งทำให้ค่าซัลไฟด์ที่วัดได้น้อยกว่าค่าที่เกิดขึ้นจริง จึงเก็บตัวอย่างน้ำโดยหลีกเลี่ยงการเกิดการปนเปื้อนของตัวอย่างน้ำเป็นการลดโอกาสการหนีออกจากตัวอย่างน้ำของซัลไฟด์ นอกจากนี้การที่ค่าซัลเฟตและซัลไฟด์ที่วัดได้มีค่าน้อยกว่าที่เกิดขึ้นจริงนั้น ยังมีสาเหตุมาจาก ซัลเฟอร์ส่วนหนึ่งอยู่ในรูปตะกอนผลึกโลหะซัลไฟด์และอีกส่วนหนึ่งถูกใช้และสะสมอยู่ในเซลล์แบคทีเรีย เนื่องจากซัลเฟอร์เป็นธาตุอาหารที่จำเป็นของแบคทีเรียในระบบ ซึ่งทำให้ค่าสมมูลมวลของซัลเฟอร์ภายหลังผ่านระบบกับสมมูลมวลซัลเฟอร์ก่อนเข้าระบบ(% sulfur recovery) มีค่าน้อยกว่า 100 เปอร์เซ็นต์ แต่ก็มีความเป็นไปได้ที่จะทำให้ค่าที่ได้จากการวิจัยนี้ เชื่อถือได้

เมื่อนำค่าสมมูลมวลของซีโอดี ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ มาเปรียบเทียบพบว่า ค่าสมมูลมวลของซีโอดีภายหลังผ่านระบบกับสมมูลมวลซีโอดีก่อนเข้าระบบ(% COD recovery) มีค่าน้อยที่สุด เนื่องจาก วิธีการคิดสมมูลมวลซีโอดีมีหลักการคิด โดยที่ซีโอดีเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ คิดจากสัดส่วนก๊าซมีเทนเป็นหลัก ซึ่งในการคำนวณไม่ได้คิดค่าซีโอดีที่เปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จึงทำให้ค่าที่ได้มีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง

ค่าสมมูลมวลของไนโตรเจนภายหลังผ่านระบบ กับสมมูลมวลไนโตรเจนก่อนเข้าระบบ(%nitrogen recovery) ที่ได้มีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง เนื่องจาก การคำนวณเรื่องก๊าซไนโตรเจนที่เกิดขึ้นนั้น ใช้การคำนวณจากการเปลี่ยนไนเตรทให้เป็นก๊าซไนโตรเจน โดยใช้เปอร์เซ็นต์ก๊าซไนโตรเจนมาประกอบในการคำนวณ ซึ่งการวิเคราะห์พารามิเตอร์ดังกล่าว ต้องมีความระมัดระวังอย่างมาก ในการเก็บหรือการนำไปฉีดในเครื่อง Gas Chromatography เพื่อให้ค่าที่ได้มีความผิดพลาดน้อยที่สุด ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่มีความผิดพลาดในขั้นตอนนี้

4.2 การศึกษาเม็ดตะกอนแบคทีเรีย

ลักษณะของเม็ดตะกอนแบคทีเรีย

ตะกอนแบคทีเรียที่ใช้ในการทดลองเริ่มต้นมีลักษณะเม็ด ขนาดเฉลี่ย 2 – 4 มิลลิเมตร สีน้ำตาลเข้ม จากการตรวจสอบลักษณะเม็ดตะกอนแบคทีเรียจากระบบอีจีเอสบี ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope ; SEM) หลังจากจบการทดลอง โดยทำการเลือกตัวอย่างเม็ดตะกอนแบคทีเรียที่เป็นตัวแทนเม็ดตะกอนหลายๆ เม็ดที่ส่งจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

โครงสร้างภายนอกและบริเวณผิวชั้นนอก

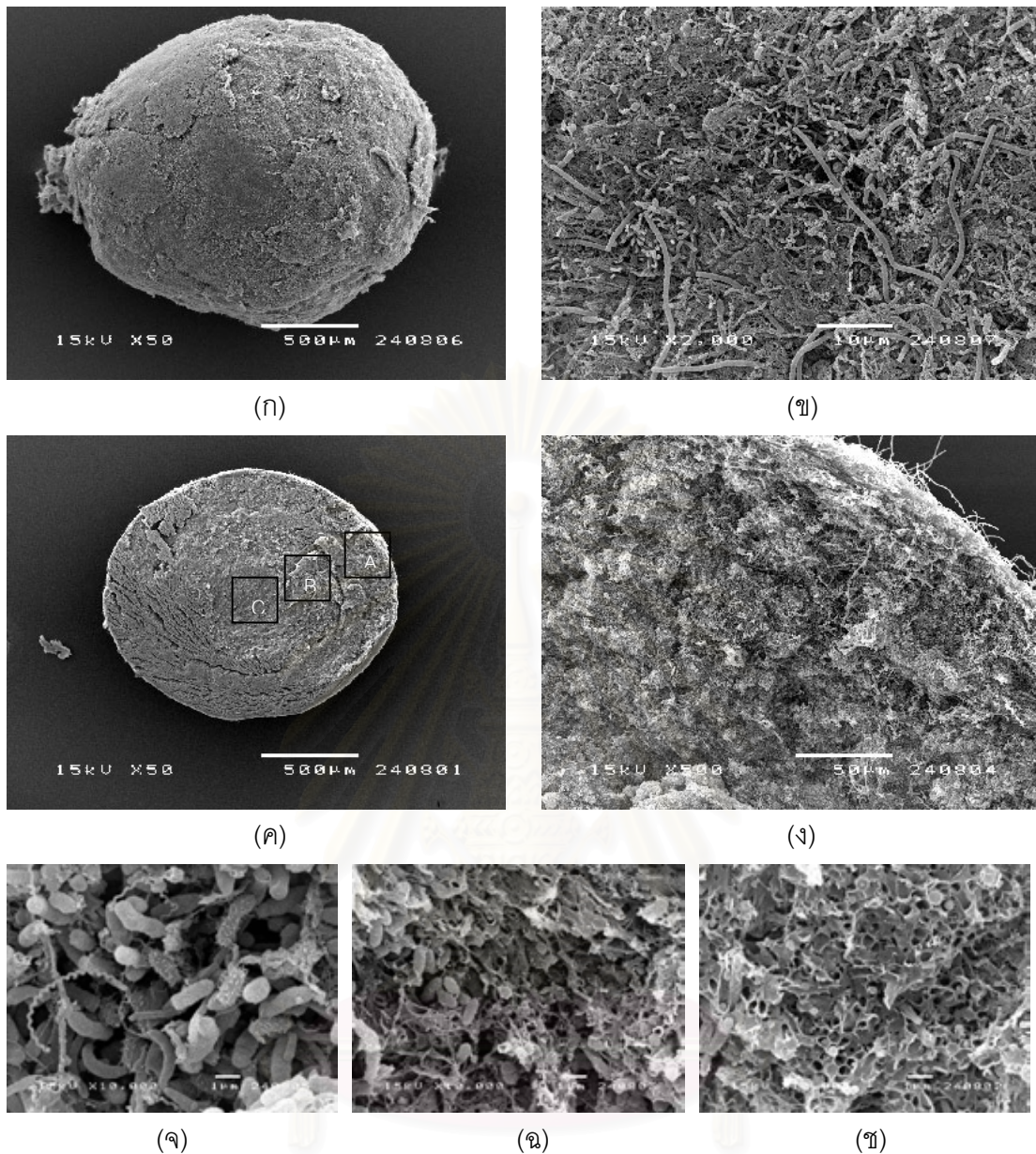
จากรูปที่ 4.18 – 4.21 จะเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายนอกของเม็ดตะกอนแบคทีเรียโดยทั่วไป พบว่า โครงสร้างภายนอกไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน

โดยมีลักษณะผิวนอกค่อนข้างเรียบ รูปร่างมีทั้งแบบทรงกลมและทรงรี โดยส่วนใหญ่จะมีลักษณะเม็ดที่ค่อนข้างกลม และพบรอยแตกบริเวณผิวภายนอกของเม็ดตะกอนแบคทีเรีย ซึ่งเกิดจากการผุกร่อน เนื่องจาก การเคลื่อนตัวกระทบและเสียดสีกันระหว่างเม็ดตะกอนแบคทีเรียภายในถังปฏิกรณ์

ลักษณะของแบคทีเรียที่ผิวชั้นนอกของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ โดยทั่วไปในทุกชุดของการทดลองและก่อนเริ่มต้นการทดลองมีลักษณะคล้ายกัน โดยที่บริเวณผิวภายนอกจะมีแบคทีเรียหลายชนิดอยู่รวมกลุ่มกัน จากการสังเกตรูปร่างของเซลล์แบคทีเรีย จะพบแบคทีเรียที่มีลักษณะรูปร่างแบบเส้นใย แบบกลม และแบบแท่ง ซึ่งแบคทีเรียที่พบบริเวณผิวภายนอกนี้จะเป็นแบคทีเรียสร้างกรด (Acidogens) ที่มีความหลากหลาย ที่เกิดจากการแข่งขันในการแย่งอาหารกันสูง เพราะเป็นการสัมผัสโดยตรงกับสารอาหารในน้ำเสีย (Fang และคณะ, 1994 อ้างถึงใน จันทิมา สกุลพานิช , 2548) รวมตัวกันโดยอาศัยการยึดเกาะ ด้วยแบคทีเรียที่เป็นเส้นใย ทำให้โครงสร้างของแบคทีเรียมีความแข็งแรงขึ้น จึงสามารถอยู่ทนในระบบที่มีแรงเฉือนหรือความปั่นป่วนภายในระบบได้ ทำให้พบการเปลี่ยนแปลงที่บริเวณผิวชั้นนอกน้อย จากภาพ 4.18 - 4.21 ข) พบว่าความแตกต่างของแบคทีเรียที่อยู่ผิวชั้นนอก โดยเม็ดตะกอนที่ได้จากชุดการทดลองที่ 1 ที่มีซัลเฟตมีสภาพเส้นใยที่ไม่สมบูรณ์มีขนาดเล็กและมีการผุกร่อนค่อนข้างมาก ส่วนผิวชั้นนอกของเม็ดตะกอนจากชุดการทดลองที่ 2, 3 และ 4 พบแบคทีเรียประเภทเส้นใยที่สมบูรณ์เป็นจำนวนมาก และยังพบแบคทีเรียแบบเกลียวอยู่ปะปนด้วย

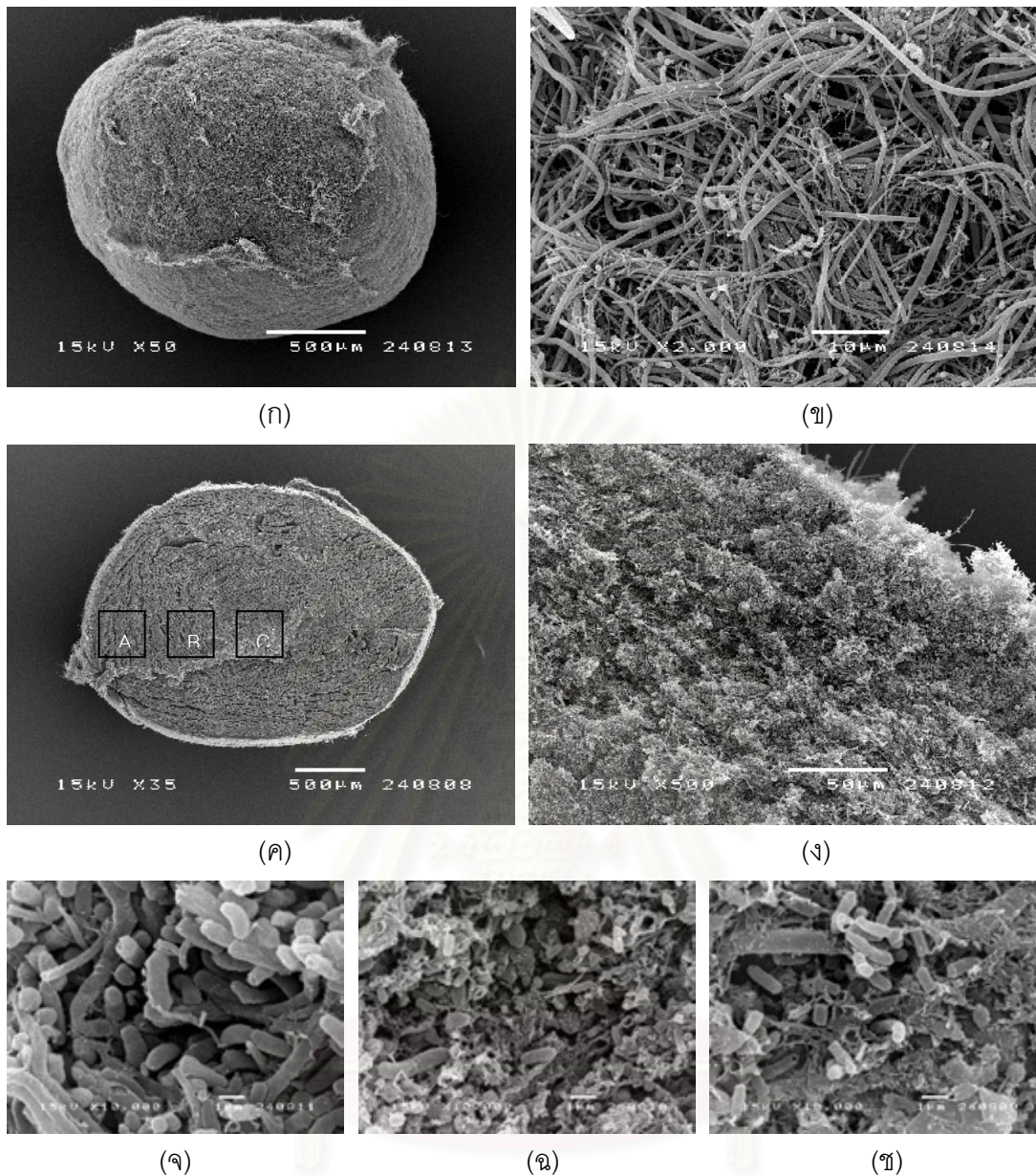
โครงสร้างภายในและบริเวณผิวชั้นใน

เมื่อทำการศึกษาภาคตัดขวางของเม็ดตะกอนแบคทีเรีย โดยการผ่าครึ่งเม็ดตะกอนแบคทีเรียและแบ่งโครงสร้างภายในออกเป็น บริเวณ ได้แก่ บริเวณชั้นนอก ชั้นกลาง และชั้นในของเม็ดตะกอน พบว่าโครงสร้างภายในของเม็ดตะกอนแบคทีเรียมีลักษณะไม่แตกต่างกัน คือไม่มีการแยกชั้นที่ชัดเจน และมีความหลากหลายของแบคทีเรียต่ำกว่าบริเวณผิวชั้นนอก โดยลักษณะของแบคทีเรียที่พบส่วนใหญ่จะมีรูปร่างแบบแท่ง และแบบกลม ซึ่งเป็นกลุ่มของแบคทีเรียที่สร้างมีเทน



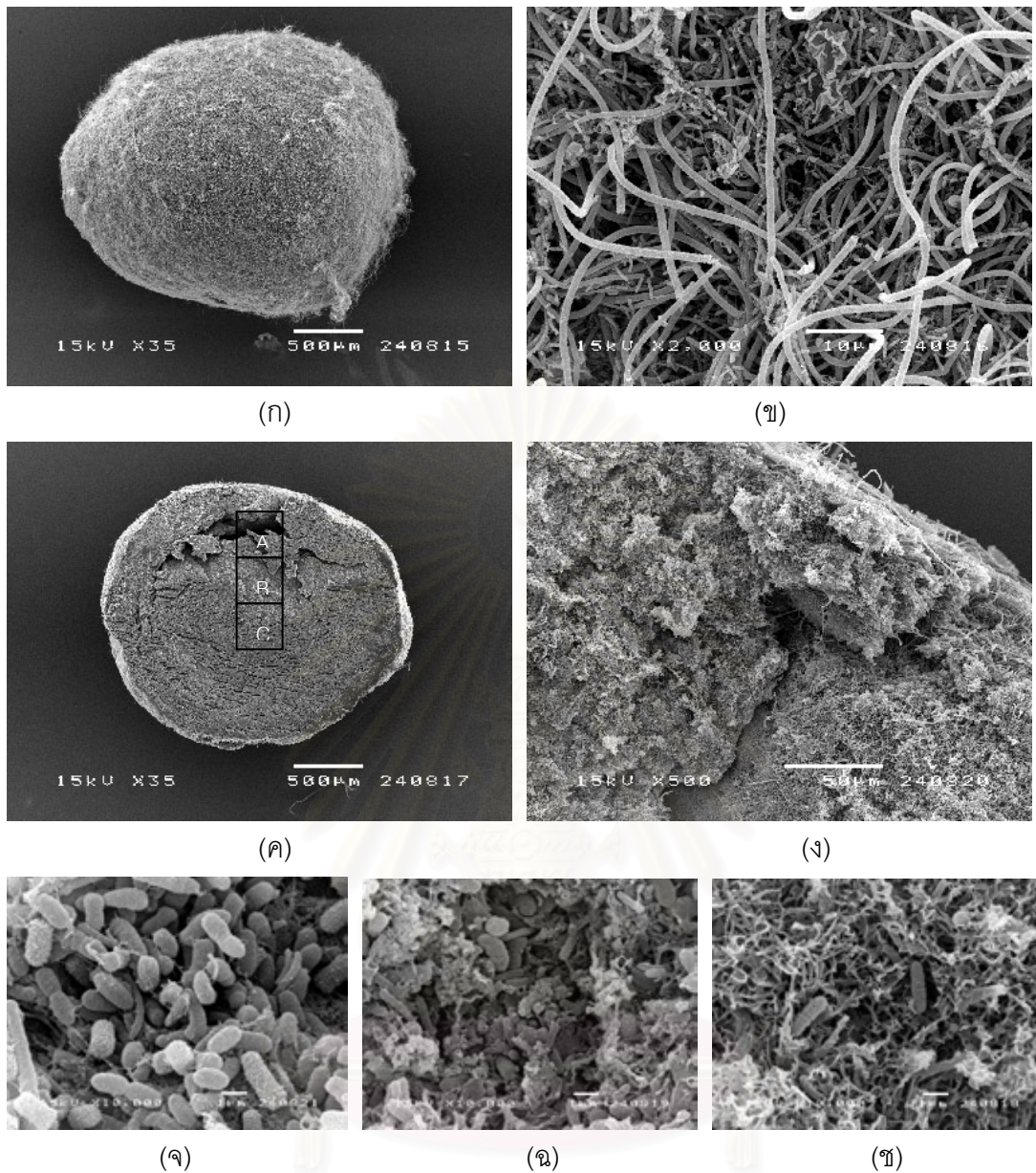
รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope ; SEM) ของเมล็ดตะกอนแบคทีเรีย จากถังปฏิกรณ์ของชุดการทดลองที่ 1 ที่มีซิลเฟต เมื่อสิ้นสุดการทดลอง

- ก) บริเวณผิวภายนอกของเมล็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่กำลังขยาย 50 เท่า
- ข) บริเวณผิวภายนอกของเมล็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า
- ค) บริเวณผิวภายในของเมล็ดตะกอนจุลินทรีย์เมื่อผ่าครึ่งที่กำลังขยาย 50 เท่า
- ง) บริเวณชั้นนอกของเมล็ดตะกอนจุลินทรีย์ (จุด A) ที่กำลังขยาย 500 เท่า
- จ) บริเวณชั้นนอกของเมล็ดตะกอนจุลินทรีย์ (จุด A) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า
- ฉ) บริเวณชั้นกลางของเมล็ดตะกอนจุลินทรีย์ (จุด B) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า
- ช) บริเวณชั้นในของเมล็ดตะกอนจุลินทรีย์ (จุด C) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า



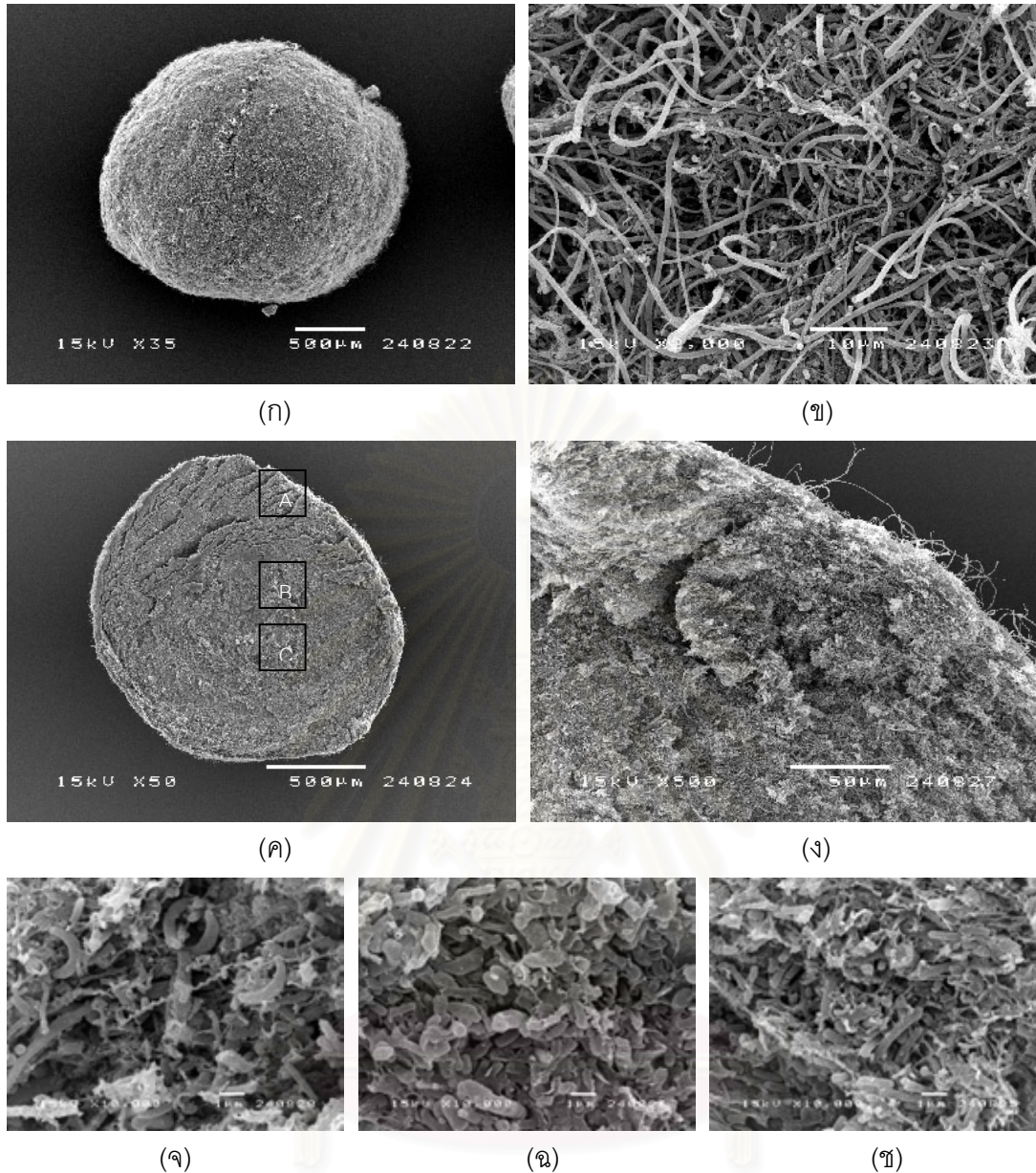
รูปที่ 4.19 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope ; SEM) ของเมล็ดตะกอนแบบที่เรีย จากถังปฏิกรณ์ของชุดการทดลองที่ 2 ที่มีลวดโรต เมื่อสิ้นสุดการทดลอง

- ก) บริเวณผิวภายนอกของเมล็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่กำลังขยาย 50 เท่า
- ข) บริเวณผิวภายนอกของเมล็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า
- ค) บริเวณผิวภายในของเมล็ดตะกอนจุลินทรีย์เมื่อผ่าครึ่งที่กำลังขยาย 35 เท่า
- ง) บริเวณชั้นนอกของเมล็ดตะกอนจุลินทรีย์ (จุด A) ที่กำลังขยาย 500 เท่า
- จ) บริเวณชั้นนอกของเมล็ดตะกอนจุลินทรีย์ (จุด A) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า
- ฉ) บริเวณชั้นกลางของเมล็ดตะกอนจุลินทรีย์ (จุด B) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า
- ช) บริเวณชั้นในของเมล็ดตะกอนจุลินทรีย์ (จุด C) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า



รูปที่ 4.20 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope ; SEM) ของเมมเบรนดัดแปลงจากถักราชภัฏของชุดการทดลองที่ 3 ที่มีไนไตรท์ เมื่อสิ้นสุดการทดลอง

- ก) บริเวณผิวภายนอกของเมมเบรนจุลินทรีย์ที่กำลังขยาย 35 เท่า
- ข) บริเวณผิวภายนอกของเมมเบรนจุลินทรีย์ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า
- ค) บริเวณผิวภายในของเมมเบรนจุลินทรีย์เมื่อผ่าครึ่งที่กำลังขยาย 35 เท่า
- ง) บริเวณชั้นนอกของเมมเบรนจุลินทรีย์ (จุด A) ที่กำลังขยาย 500 เท่า
- จ) บริเวณชั้นนอกของเมมเบรนจุลินทรีย์ (จุด A) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า
- ฉ) บริเวณชั้นกลางของเมมเบรนจุลินทรีย์ (จุด B) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า
- ช) บริเวณชั้นในของเมมเบรนจุลินทรีย์ (จุด C) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า



รูปที่ 4.21 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope ; SEM) ของ
 เม็ดตะกอนแบคทีเรีย จากถังปฏิกรณ์ของชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารบวม เมื่อ
 สิ้นสุดการทดลอง

- ก) บริเวณผิวภายนอกของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่กำลังขยาย 35 เท่า
- ข) บริเวณผิวภายนอกของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า
- ค) บริเวณผิวภายในของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เมื่อผ่าครึ่งที่กำลังขยาย 50 เท่า
- ง) บริเวณชั้นนอกของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (จุด A) ที่กำลังขยาย 500 เท่า
- จ) บริเวณชั้นนอกของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (จุด A) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า
- ฉ) บริเวณชั้นกลางของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (จุด B) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า
- ช) บริเวณชั้นในของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (จุด C) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

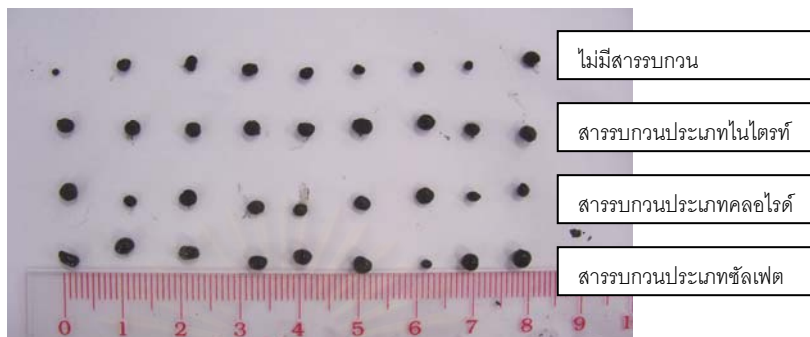
จากรูปที่ 4.18 - 4.21 จะเห็นได้ว่า ไม่พบความแตกต่างของโครงสร้างภายนอกและภายในของเม็ดตะกอนแบคทีเรีย ถึงแม้ว่าน้ำเสียที่ใช้ในแต่ละการทดลองของชุดการทดลองจะไม่เหมือนกัน งานวิจัยของ จันทิมา สกุลพานิช ,2548 พบว่า ภายในเม็ดตะกอนแบคทีเรียในอยู่ระบบยูเอเอสบีที่บำบัดน้ำเสียประเภทในเตรทและซัลเฟต พบแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียดีไนตริฟายอิง รวมอยู่กับแบคทีเรียสร้างกรดและแบคทีเรียสร้างมีเทน ซึ่งกลุ่มแบคทีเรียหลักที่พบภายในเม็ดตะกอนเป็นกลุ่มแบคทีเรียสร้างมีเทน เมื่อพิจารณาจากการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนและจากเปอร์เซ็นต์การไหลอิเล็กตรอน และงานวิจัยของ Isa และคณะ,1986 (อ้างถึงใน ปรีชา ทดนาที , 2547) ว่าแบคทีเรียสร้างมีเทนมีความสามารถในการเกาะติดกันเป็นเม็ดตะกอนมากกว่าแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียดีไนตริฟายอิง ซึ่งตรงกับงานวิจัยของ Visser และคณะ,1994 ที่ศึกษาการรวมตัวเป็นเม็ดตะกอนและการเกาะติดของแบคทีเรียสร้างมีเทน และแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตในถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีพบว่า แบคทีเรียสร้างมีเทนมีความสามารถในการสร้างเม็ดตะกอนโดยใช้ระยะเวลาไม่นาน ดังนั้นในระบบจึงควรมีแบคทีเรียสร้างมีเทนอยู่ด้วย เพราะแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตขาดความสามารถในการสร้างเม็ดตะกอนในเวลาอันสั้น

และเมื่อเปรียบเทียบภาพที่ 4.18 , 4.20 และ 4.21 จ) ฉ) และ ข) จะเห็นว่า ตรงกลางเม็ดตะกอน (จุด C) ที่มาจากถังปฏิกรณ์ของชุดการทดลองที่มีซัลเฟต และไนโตรเจน มีโพรงเป็นช่องว่างจำนวนมากกว่าเม็ดตะกอนจากชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่สารบวกรวม ซึ่งทำให้ความหนาแน่นของแบคทีเรียในเม็ดตะกอนลดน้อยลง ซึ่งอาจเหตุผลหนึ่งที่ทำให้เม็ดตะกอนแบคทีเรียในชุดการทดลองที่มีซัลเฟตเป็นสารบวกรวม เกิดการยกชั้นบ่อยครั้งเพราะความไม่สมบูรณ์ของเม็ดตะกอนที่ใช้ในการทำงานวิจัยมาเป็นเวลานาน

การเปลี่ยนแปลงขนาดเม็ดตะกอนแบคทีเรีย

เมื่อทำการเก็บตัวอย่างเม็ดตะกอนหลังสิ้นสุดการทดลอง จะพบว่า ส่วนบนของถังปฏิกรณ์ของทุกชุดการทดลอง มีลักษณะการเรียงตัวของเม็ดตะกอนแบคทีเรียเหมือนกันคือ บริเวณส่วนบนของถังปฏิกรณ์พบแบคทีเรียมีลักษณะเป็นฟล็อกสีดำ ที่อุปกรณ์แยกสามสถานะมีแบคทีเรียมีลักษณะเป็นฟล็อก และส่วนล่างของถังปฏิกรณ์จะพบตะกอนแบคทีเรียที่มีลักษณะเม็ดใหญ่ขึ้น โดยเม็ดตะกอนจะมีขนาดที่เล็กลงตามลำดับจากด้านล่างของถังปฏิกรณ์ไล่ขึ้นไปตามลำดับความสูงของถังปฏิกรณ์ จากการเก็บตัวอย่าง สุ่มเม็ดตะกอนแบคทีเรียมีขนาดและปริมาณที่แตกต่างกัน จึงทำการวัดขนาดเม็ดตะกอนแบคทีเรียด้วยเครื่อง Particle Size Analyzer แต่พบปัญหา เนื่องจากเครื่องสามารถวัดขนาดเม็ดตะกอนได้ขนาดใหญ่ที่สุดเพียง 0.9 มิลลิเมตร ซึ่งขนาดเฉลี่ยของเม็ดตะกอนที่พบในถังปฏิกรณ์จะมีขนาดเฉลี่ยใหญ่กว่า จึงเปลี่ยนวิธีการโดยใช้เวอร์เนียร์วัดขนาดเม็ดตะกอนโดยตรง นำเม็ดตะกอนปริมาตร 5 มิลลิเมตรมาวัดที่ละเม็ด ทำเป็นกลุ่มขนาดเฉลี่ยแต่ที่ไม่เลือก

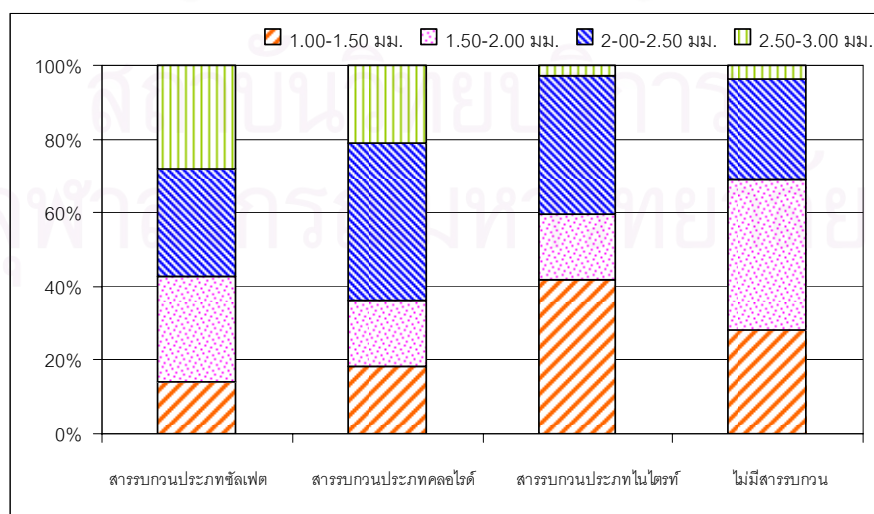
ขนาดที่เป็นที่พึงพอใจมากที่สุด เนื่องจากพิจารณาแล้วเห็นว่า ขนาดที่มีผลในการทำปฏิกิริยาต่าง ๆ นั้น จะมีลักษณะเป็นเม็ดมากกว่าเป็นฟล็อกที่ยังไม่สามารถจับตัวเป็นเม็ดได้ โดยผลการวัดขนาดที่ได้ แสดงดังตารางที่ 4.18



รูปที่ 4.22 เม็ดตะกอนแบคทีเรียของทุกชุดการทดลองเมื่อสิ้นสุดการทดลอง

ตารางที่ 4.18 ขนาดเม็ดตะกอนแบคทีเรียในถังปฏิกรณ์ของทุกชุดการทดลอง

| ชุดการทดลองที่ ประเภทของสารรบกวน | | ขนาดเม็ด (มิลลิเมตร) | | | | รวม (เม็ด) |
|-------------------------------------|--------------------|----------------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| | | 1.00 - 1.50 | 1.50 - 2.00 | 2.00 - 2.50 | 2.50 - 3.00 | |
| 1 ซัลเฟต | จำนวนเฉลี่ย (เม็ด) | 31 | 63 | 65 | 62 | 221 |
| | เปอร์เซ็นต์ | 14.03 | 28.51 | 29.41 | 28.05 | 100 |
| 2 คลอไรด์ | จำนวนเฉลี่ย (เม็ด) | 51 | 49 | 119 | 59 | 278 |
| | เปอร์เซ็นต์ | 18.35 | 17.63 | 42.81 | 21.22 | 100 |
| 3 ไนโตรท์ | จำนวนเฉลี่ย (เม็ด) | 94 | 40 | 84 | 6 | 224 |
| | เปอร์เซ็นต์ | 41.96 | 17.86 | 37.50 | 2.68 | 100 |
| 4 ไม่มีสาร รบกวน | จำนวนเฉลี่ย (เม็ด) | 71 | 103 | 68 | 10 | 252 |
| | เปอร์เซ็นต์ | 28.17 | 40.87 | 26.98 | 3.97 | 100 |



รูปที่ 4.23 ขนาดของเม็ดตะกอนของทุกชุดการทดลอง

ตารางที่ 4.18 และรูปที่ 4.23 แสดงขนาดเม็ดตะกอนแบบที่เรียที่สุ่มเก็บตัวอย่างจากทุกชุดการทดลองเมื่อสิ้นสุดการทดลอง โดยเปรียบเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ของขนาดเม็ด แต่ละชุดการทดลอง พบว่า ขนาดของเม็ดตะกอนของชุดการทดลองที่ 1 ที่มีสารรบกวนประเภทซิลเฟต จะมีขนาดเฉลี่ย อยู่ในช่วง 1.50 – 2.00, 2.00 - 2.50 และ 2.50 - 3.00 มิลลิเมตร เพราะขนาดทั้ง 3 ขนาดมีจำนวนเท่าๆ กัน ในชุดการทดลองที่ 2 ที่มีสารรบกวนประเภทคลอไรด์จะมีขนาดเม็ดเฉลี่ยจำนวนมากที่สุดที่มีขนาด 2.00 -2.50 มิลลิเมตร ส่วนชุดการทดลองที่ 3 มีสารรบกวนประเภทไนไตรท์ จะมีขนาดเม็ดเฉลี่ยจำนวนมากที่สุด มีขนาด 1.00 – 1.50 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่เล็กที่สุดที่ทำการวัด ส่วนชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน จะมีขนาดจะมีขนาดเฉลี่ย อยู่ในช่วง 1.00 – 1.50, 1.50 – 2.00 และ 2.00 - 2.50 มิลลิเมตร เพราะขนาดทั้ง 3 ขนาด มีจำนวนเท่าๆกัน

จากรูป 4.22 และ 4.23 จะเห็นได้ว่า ชุดการทดลองที่ 3 ที่มีสารรบกวนประเภทไนไตรท์ มีเม็ดตะกอนขนาดเล็กจำนวนมากที่สุด และรูปที่ 4.20 ข) มีโพรงช่องว่างจำนวนมากตรงกลางเม็ดตะกอน ซึ่งตรงกับงานวิจัยของ Schulze ,1988 (อ้างถึงใน ปรีชา ทดนาที,2547) ว่า ตะกอนแบบที่เรียแบบเม็ดของระบบยูเอเอสพีที่น้ำเสียมีความเข้มข้นของแอมโมเนียสูง จะได้ตะกอนจุลินทรีย์ที่มีขนาดเล็ก และมีความหนาแน่นต่ำ

เม็ดตะกอนแบบที่เรียที่ใหญ่ที่สุด คือ เม็ดตะกอนที่ได้จากถังปฏิกรณ์ของชุดการทดลองที่ 1 ซึ่งจากงานวิจัยของ จันทิมา สกกุลพานิช, 2548 พบว่า น้ำเสียที่มีซิลเฟตและไนเตรทสามารถพัฒนาเม็ดตะกอนแบบที่เรียให้มีขนาดใหญ่ขึ้นได้ แต่ทั้งนี้จะต้องอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการสร้างเม็ด ได้แก่ การไม่มีปัจจัยจำกัดเรื่องสารอาหารหลักและสารอาหารที่ให้กับระบบพีเอชของระบบต้องอยู่ในช่วงที่เหมาะสม คือ 6.5 – 7.8 ไม่มีสารพิษยับยั้งการทำงานของระบบ และความเร็วไหลขั้นต่ำต้องไม่สูงเกินไป เพราะจะทำให้เกิดการแตกออกของเม็ดตะกอนได้และในระบบควรมีแบบที่เรียสร้างมีเทนอยู่ด้วย เพราะแบบที่เรียรีดิคซ์ซิลเฟตขาดความสามารถในการเกาะเม็ดตะกอนซึ่งตรงกับสภาพแวดล้อมภายในระบบของชุดการทดลองที่มีซิลเฟตของผู้วิจัย

เมื่อเปรียบเทียบขนาดตะกอนกับประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีและไนเตรท พบว่า ชุดการทดลองที่มีสารรบกวนประเภทซิลเฟต มีเปอร์เซ็นต์เม็ดตะกอนขนาดใหญ่มากที่สุด มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีและไนเตรท (89 – 95 % และ 96 – 98 % ตามลำดับ) ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีและไนเตรทของชุดการทดลองที่ 3 ที่มีสารรบกวนประเภทไนไตรท์ที่มีเปอร์เซ็นต์ขนาดเม็ดตะกอนเล็กมากที่สุด (92-94 % และ 97-98 % ตามลำดับ) พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดมีค่าไม่ต่างกัน ซึ่งได้ผลใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Pereira, 2002 และ Sabry, 2008 ที่ศึกษาประสิทธิภาพของสลัดจ์แบบเม็ดและแบบแขวนลอยในระบบอีจีเอสพีและยูเอเอสพี พบว่า สลัดจ์ทั้ง 2 แบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีใกล้เคียงเช่นเดียวกัน

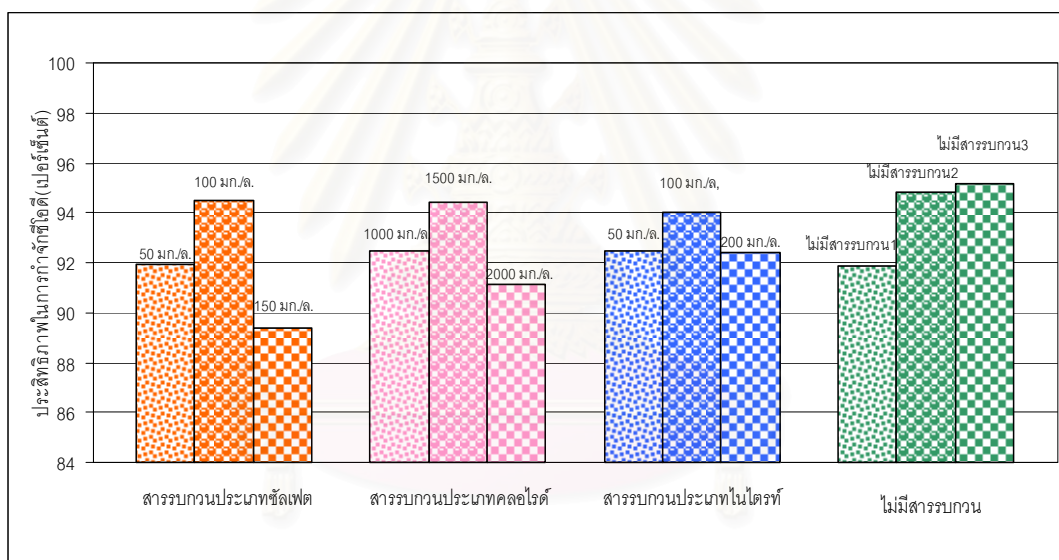
สรุปได้ว่า ขนาดของเม็ดตะกอนแบคทีเรียที่อยู่ในระบบอีจีเอสบีไม่ผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีและไนเตรท แต่ทั้งนี้เม็ดตะกอนแบคทีเรียต้องมีขนาดไม่ต่างกันมากกว่า 2 มิลลิเมตร และมีขนาดเม็ดตะกอนอยู่ในช่วง 1 – 3 มิลลิเมตร

4.3 การวิเคราะห์เปรียบเทียบเทียบผลของมลสารอินอลบที่มีผลต่อระบบอีจีเอสบี

เพื่อให้เห็นผลของสารอินอลบที่มีต่อระบบอีจีเอสบีได้ชัดเจน จึงนำผลการทดลองมาทำการเปรียบเทียบ ดังนี้

4.3.1 ประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทและซีไอดี

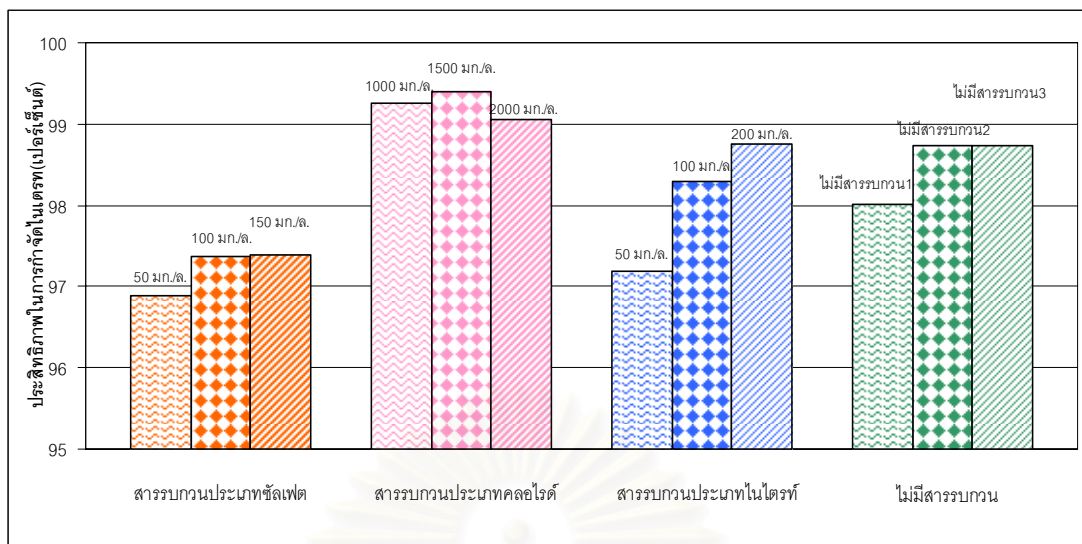
ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดี และไนเตรท ของชุดการทดลองที่มีสารรบกวนประเภทซัลเฟต คลอไรด์ และไนไตรท์ ที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.1.2 และ 4.1. สามารถนำมาสรุป แสดงเป็นกราฟเพื่อเปรียบเทียบให้เห็นอย่างชัดเจน โดยนำค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดซีไอดีและไนเตรทเป็นตัวแทนของแต่ละชุดการทดลอง



รูปที่ 4.24 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีของทุกชุดการทดลอง

หมายเหตุ

- *ไม่มีสารรบกวน 1 คือ ค่าที่ได้จากชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน ในช่วงเวลาระหว่างวันที่ 2 เมษายน 2550 - 29 พฤษภาคม 2550
- *ไม่มีสารรบกวน 2 คือ ค่าที่ได้จากชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน ในช่วงเวลาระหว่างวันที่ 30 พฤษภาคม 2550 - 20 กรกฎาคม 2550
- *ไม่มีสารรบกวน 3 คือ ค่าที่ได้จากชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน ในช่วงเวลาระหว่างวันที่ 21 กรกฎาคม 2550 - 14 กันยายน 2550



รูปที่ 4.25 ประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทของทุกชุดการทดลอง

ตารางที่ 4.19 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีและไนเตรท

| ผู้วิจัย | หัวข้อวิทยานิพนธ์ | วิธีการวิจัย / ผลการวิจัย |
|-------------------------------|--|--|
| พุทธิกุล ทองเนื้อสูง, 2551 | ผลของมลสารอินทรีย์ ที่มีผลต่อการกำจัด ไนเตรทโดยระบบ อีจีเอสบี | -ความเข้มข้นซีไอดี 1000 มก./ล. -ความเข้มข้นไนเตรท 100 มก./ล. -ค่าการะบรทุกสารอินทรีย์ 6.6 กก.ซีไอดี/ลบ.ม. -เวลากักเก็บ 3.8 ชม. ประสิทธิภาพกำจัดซีไอดี 89 – 95 % -ความเข้มข้นซัลเฟต 50 -150 มก./ล. ประสิทธิภาพกำจัดไนเตรท 97 % -ความเข้มข้นคลอไรด์ 1,000 – 2,000 มก./ล. ประสิทธิภาพกำจัดไนเตรท 99 % -ความเข้มข้นไนโตรเจน 50 -200 มก./ล.. ประสิทธิภาพกำจัดไนเตรท 97 – 99 % |
| อนุดร เปียงแก้ว, 2542 | การควบคุมระดับการ เกิดซัลเฟตรีดักชันด้วย ปริมาณซัลเฟตและ ชนิดของแหล่งคาร์บอน (ยูเอเอสบี) | -ความเข้มข้นซีไอดี 500 มก./ล. -ค่าการะบรทุกสารอินทรีย์ 1.33 กก.ซีไอดี/ลบ.ม. -ความเข้มข้นซัลเฟต 42, 84 และ 840 มก./ล. ประสิทธิภาพกำจัดซีไอดี 89.4, 92.3 และ 89.5 % |

ตารางที่ 4.19 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและไนเตรท(ต่อ)

| ผู้วิจัย | หัวข้อวิทยานิพนธ์ | วิธีการวิจัย / ผลการวิจัย |
|-----------------------------|---|---|
| จันทิมา สกุลพานิช , 2548 | การบำบัดน้ำเสียที่มี ซัลเฟตและไนเตรทสูง โดยใช้ระบบยูเอเอสบี | -ความเข้มข้นซีโอดี 600 มก./ล. -ค่าภาระบรทุกสารอินทรีย์ 3.6 กก.ซีโอดี/ลบ.ม. -ความเข้มข้นซัลเฟต 90 มก./ล. -ความเข้มข้นไนเตรท 60 มก./ล. ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีอยู่ 71 – 75 % ประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรท 66 – 69 % |
| ณัฐริกา ตันติวงศ์ , 2550 | ผลของคลอไรด์ที่มีต่อ การกำจัดน้ำเสีย ปิโตรเคมีโดยใช้ระบบ ยูเอเอสบี | -ความเข้มข้นซีโอดี 1,000 มก./ล. -ค่าภาระบรทุกสารอินทรีย์ 0.32 กก.ซีโอดี/ลบ.ม. -ความเข้มข้นคลอไรด์ 600, 1200 และ 2400 มก./ล. ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี 86.85, 91.84 , 90.49 % |
| Pereira,M.A., 2002 | ศึกษาระบบอีจีเอสบีใน การกำจัด oleic acid โดยใช้สัลดจ์แบบเม็ด และแบบตะกอน แขวนลอย | -ความเข้มข้นซีโอดี 800 มก./ล. -ค่าภาระบรทุกสารอินทรีย์ 6.2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม. -เวลากักเก็บ 1 วัน -เมื่อใช้สัลดจ์แบบเม็ดและแบบแขวนลอย ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี 68.8 และ 69.4% |
| Ruiz และ คณะ, 2006 | กระบวนการไนตริฟิเคชัน และดีไนตริฟิเคชันใน การกำจัดไนโตรเจน ในน้ำเสียโดยใช้ไนโตรท ที่ได้จากถังซีเอสทีอาร์ นำมาบำบัดโดยระบบ ยูเอเอสบี | -ความเข้มข้นซีโอดี 1700 มก./ล. -ค่าภาระบรทุกสารอินทรีย์ 3.5 กก.ซีโอดี/ลบ.ม. -เวลากักเก็บ 2.9 ชม. -ความเข้มข้นไนโตรเจน (ไนเตรท+ไนโตรท) 500 มก./ล. - ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจน 93.5 % |
| Sabry,T.,2008 | การเดินระบบยูเอเอสบี โดยใช้สัลดจ์แบบ ตะกอนแขวนลอยและ แบบเม็ดในการบำบัด น้ำเสียที่ hydraulic shock load แตกต่าง กัน | -ความเข้มข้นซีโอดี 700-1000 มก./ล. -ค่าภาระบรทุกสารอินทรีย์ 6 กก.ซีโอดี/ลบ.ม. -เวลากักเก็บ 4 ชม. -เมื่อใช้สัลดจ์แบบเม็ดและแบบแขวนลอย ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี 87 และ 86 % |

ระบบอีจีเอสปีทั้ง 4 ชุดการทดลองของผู้วิจัย มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทและซีโอดี อยู่ในช่วง 97-99 และ 89- 95 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สรุปได้ว่า สารรบกวนประเภทซัลเฟต คลอไรด์ และ ไนไตรท์ ไม่มีผลกับประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี และไนเตรทของระบบอีจีเอสปี เพราะแบคทีเรียที่อยู่ในระบบมีจำนวนมาก โดยมีความสามารถในการกำจัดสูง สามารถปรับตัวกับสารแปลกปลอมที่เข้ามาในระบบได้ ซึ่งตะกอนแบคทีเรียที่ใช้นำมาจากโรงงานผลิตน้ำอัดลมที่ใช้ในการกำจัดน้ำเสียประเภทน้ำตาลที่มีความเข้มข้นสูง ดังนั้น เมื่อนำมาใช้ในการทดลองที่ความเข้มข้นซีโอดีเท่ากับ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีสูง ซึ่งทุกชุดการทดลอง มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทมากกว่า 97 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่า ความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำที่ออกจากระบบมีปริมาณที่น้อยมาก ซึ่งตรงกับงานวิจัยของ Convantes และคณะ ,2001 พบว่า ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงจะไม่เหลือไนเตรทในน้ำออก โดยแปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนทั้งหมด 0.6, 0.8 และ 1.0 แปรค่าความเข้มข้นไนเตรท 503 , 510 และ 510 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า อัตราส่วน 0.6 เหลือปริมาณไนเตรทอยู่มากที่สุด ในขณะที่งานวิจัยของผู้วิจัยใช้อัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 4 คงที่ (ความเข้มข้นของซีโอดีและไนเตรทเท่ากับ 1,000 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ) เท่ากับ 44 อัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนของชุดการทดลองที่ 3 ที่มีสารรบกวนประเภทไนไตรท์ (ความเข้มข้นของซีโอดีและไนเตรทเท่ากับ 1,000 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ความเข้มข้นของไนไตรท์เท่ากับ 50 , 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร) เท่ากับ 26 ,16 และ 12 เป็นค่าอัตราส่วนที่สูงกว่า ดังนั้นจึงไม่มีปริมาณไนเตรทเหลือในน้ำที่ออกจากระบบ เพราะมีคาร์บอนที่เป็นสารให้อิเล็กตรอนอยู่อย่างเหลือเฟือ

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้และงานวิจัยอื่นๆ ที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน พบว่า ในชุดการทดลองที่ 1 ที่มีสารรบกวนซัลเฟต ที่ความเข้มข้นซีโอดี 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และซัลเฟตเท่ากับ 100 และ 150 มิลลิกรัม (อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 10 และ 6.67 ตามลำดับ) มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี 94.49 และ 89.40 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีใกล้เคียงกับงานวิจัยของอนุตร เปียงแก้ว, 2542 ที่ซีโอดีเท่ากับ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร และซัลเฟตเท่ากับ 42 และ 84 มิลลิกรัมต่อลิตร (อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 11.94 และ 5.95) มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี 89.4 และ 92.3 เปอร์เซ็นต์

เมื่อนำผลการทดลองชุดที่ 1 เปรียบเทียบกับงานวิจัยของ จันทิมา สกุลพานิช ,2548 ที่ความเข้มข้นซีโอดี ซัลเฟต และไนเตรทเท่ากับ 600, 90 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 6.66 และอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรทเท่ากับ 10) มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี และไนเตรท เท่ากับ 71-75 และ 66 - 69 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าประสิทธิภาพในการกำจัดที่อยู่ในเกณฑ์สูง แต่มีค่าต่ำกว่าประสิทธิภาพในงานวิจัยของผู้วิจัยที่มีความเข้มข้นซีโอดี

ซัลเฟต และไนเตรทเท่ากับ 1,000, 150 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 6.67 และอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรทเท่ากับ 10) มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี และไนเตรท เท่ากับ 94 และ 97 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ผลจากชุดการทดลองที่ 2 ที่ความเข้มข้นซีโอดี 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นคลอไรด์ 1,000, 1,500 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (อัตราส่วนซีโอดีต่อคลอไรด์เท่ากับ 1, 0.6 และ 0.5 ตามลำดับ) มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี 92, 94 และ 91 เปอร์เซ็นต์ มาเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ ญัฐริกา ตันติวงศ์ ,2550 ที่ความเข้มข้นซีโอดี 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นคลอไรด์ 600, 1,200 และ 2,400 มิลลิกรัมต่อลิตร (อัตราส่วนซีโอดีต่อคลอไรด์เท่ากับ 1.67, 0.83 และ 0.41 ตามลำดับ) มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี 87, 92 และ 90 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่อยู่ในเกณฑ์สูงมีค่าใกล้เคียงกัน

ผลจากชุดการทดลองชุดที่ 3 ที่ความเข้มข้นของซีโอดีและไนเตรทเท่ากับ 1,000 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ความเข้มข้นของไนโตรเจนเท่ากับ 50, 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรท 97 - 99 เปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Ruiz และคณะ,2006 ความเข้มข้นซีโอดี 1,700 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นไนโตรเจน (ไนเตรท+ไนไตรท์) 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจน 93.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของไนโตรเจนที่เข้าระบบที่มากกว่ากับประสิทธิภาพในการกำจัดที่มีค่าใกล้เคียงกัน ระบบยูเอเอสบีของงานวิจัยของ Ruiz มีประสิทธิภาพที่มากกว่าระบบอีจีเอสบีของผู้วิจัย

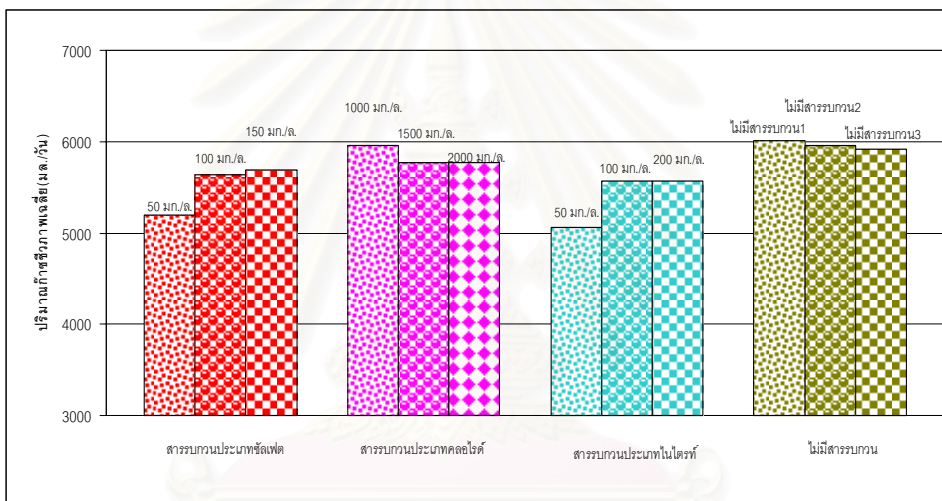
แต่เมื่อนำค่าการบรรเทาทุกสารอินทรีย์ของงานวิจัยของผู้วิจัย, อนุตร เปียงแก้ว, จันทิมา สกุดพานิช, ญัฐริกา ตันติวงศ์ และ Ruiz มาร่วมพิจารณา สรุปได้ว่า ในสภาวะที่การบรรเทาทุกสารอินทรีย์สูงกว่า ระบบอีจีเอสบีมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีใกล้เคียงกันกับระบบยูเอเอสบี แสดงว่า ระบบอีจีเอสบีสามารถบรรเทาทุกสารอินทรีย์สูงได้ดีกว่าระบบยูเอเอสบี เนื่องจากระบบอีจีเอสบีมีการถ่ายเทมวลสารที่ดีกว่าระบบยูเอเอสบี (Kato และคณะ, 1994) ทำให้มีความเหมาะสมที่จะใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำ และยังสามารถใช้บำบัดสารอินทรีย์ ที่มีความเป็นพิษที่มีความเข้มข้นสูง ๆ

งานวิจัย Pereira ,2002 และ Sabry ,2008 เป็นงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกับงานของผู้วิจัย พบว่า ที่ความเข้มข้นของซีโอดีและการบรรเทาทุกสารอินทรีย์ของทั้ง 3 งานวิจัยมีค่าใกล้เคียงกัน ระบบอีจีเอสบีของ Pereira มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี 69 เปอร์เซ็นต์ และระบบยูเอเอสบีของ Sabry มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี 87 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่างานของผู้วิจัย เพราะน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการบำบัดของ Pereira และ Sabry คือ oleic acid และน้ำมัน ซึ่งเป็นสารที่ย่อยยากกว่าน้ำตาลทรายที่นำมาเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ของผู้วิจัย เพราะ สารอาหารต่างชนิดกัน

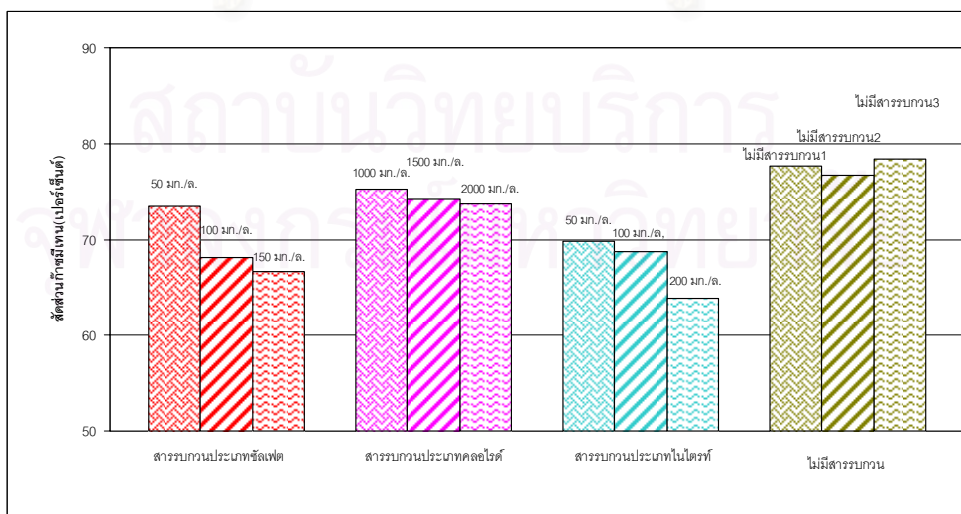
มีอัตราการย่อยสลายที่แตกต่างกัน โดยสารอาหารพวกคาร์โบไฮเดรตจะมีอัตราการย่อยสลายที่เร็วกว่าพวกโปรตีนและไขมัน (Schmidt และ Ahring, 1995) ดังนั้น ประสิทธิภาพในการบำบัดของผู้วิจัยจึงมีค่าที่สูงกว่า ซึ่งเมื่อดูประสิทธิภาพในการทำงานของระบบต่างๆของงานวิจัย ทั้งหมด สามารถสรุปได้ว่าระบบบำบัดน้ำเสียดังกล่าว (ยูเอเอสบี และ อีจีเอสบี) มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่อยู่ในเกณฑ์สูง แล้วแต่จุดประสงค์ของงานที่จะนำไปใช้ โดยต้องนำที่ข้อดี ข้อเสียไปปรับปรุงและพัฒนา ให้มีประสิทธิภาพและเหมาะสมสำหรับการใช้งานแต่ละประเภท

4.3.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพและสัดส่วนก๊าซมีเทน

จากผลการทดลอง ที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1.5 สามารถสรุปสัดส่วนของก๊าซแต่ละชนิดที่เกิดขึ้นและปริมาณก๊าซเฉลี่ยของทั้ง 4 ชุดการทดลอง เป็นกราฟเปรียบเทียบให้เห็นอย่างชัดเจน แสดงได้ดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 ปริมาตรก๊าซเฉลี่ยของทุกชุดการทดลอง



รูปที่ 4.27 เปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนของทุกชุดการทดลอง

จากรูปที่ 4.26 และ 4.27 สามารถอธิบายได้ว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดของชุดการทดลองที่มีสารบวกรวมซัลเฟต คลอไรด์และไนโตรเจน มีปริมาณใกล้เคียงกันและมีปริมาณก๊าซที่เกิดน้อยกว่าปริมาณก๊าซที่เกิดของชุดการทดลองที่ไม่มีสารบวกรวมเล็กน้อย เนื่องจาก การปรับตัวของแบคทีเรียเมื่อมีสารบวกรวมอยู่ในระบบ

เมื่อเปรียบเทียบเรื่องสัดส่วนการเกิดก๊าซมีเทนพบว่า ชุดการทดลองที่ 1 ที่มีความเข้มข้นของซัลเฟตเพิ่มขึ้น สัดส่วนของก๊าซมีเทนจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด ชุดการทดลองที่ 2 และ 3 ที่มีความเข้มข้นคลอไรด์และไนโตรเจนเพิ่มขึ้น สัดส่วนของก๊าซมีเทนจะลดลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ชุดการทดลองที่ 1 และ 3 สัดส่วนของก๊าซมีเทนลดลง เมื่อความเข้มข้นของซัลเฟตและไนโตรเจนเพิ่มขึ้น เนื่องจาก บทบาทของแบคทีเรียสร้างมีเทน (Methane Forming Bacteria) โดโนแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต (Sulfate Reducing Bacteria) และแบคทีเรียดีไนตริฟายอิง (Denitrifying Bacteria) แย่งทำหน้าที่ในระบบ เพราะในระบบมีสารรับอิเล็กตรอนประเภทซัลเฟต และไนเตรทเพิ่มขึ้น จึงมีการแย่งสารอินทรีย์ในน้ำเสียเพื่อทำปฏิกิริยา ทำให้แบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทนผลิตก๊าซมีเทนลดลง ส่วนชุดการทดลองที่ 2 ที่สัดส่วนก๊าซมีเทนลดลง เนื่องจาก ระดับความเข้มข้นของคลอไรด์ หรือค่าความเค็มที่ความเข้มข้นสูง ทำให้เกิดความต่างศักย์ของออสโมสระหว่างภายในและภายนอกเซลล์แบคทีเรียนำมาซึ่งสภาวะ Osmosis stress มีผลต่อเม็ดตะกอนแบคทีเรียไม่สมบูรณ์ ไม่สามารถทำงานได้อย่างเต็มที่ จึงผลิตก๊าซได้ปริมาณที่แตกต่างจากเดิม

การที่แบคทีเรียในระบบของชุดการทดลอง ที่มีสารบวกรวมประเภทซัลเฟต และไนโตรเจน ผลิตก๊าซมีเทนได้น้อยลง เนื่องจาก ในการวิจัยใช้ความเข้มข้นซีโอดี 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเทียบกับจำนวนเม็ดตะกอนในถังปฏิกรณ์ และสารรับอิเล็กตรอน (คาร์บอนไดออกไซด์ ซัลเฟต ไนเตรท และไนโตรเจน) ทำให้ ความเข้มข้นซีโอดีที่ใช้ในการวิจัยมีค่าต่ำ จะส่งผลให้ระดับของสารอาหารที่ลดลงเรื่อยๆ ตามความลึกในเม็ดตะกอนแบคทีเรีย ทำให้เม็ดตะกอนแบคทีเรีย มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาในการย่อยสลายสารอาหารที่ต่ำ สามารถอธิบายได้โดย สมการโมโนต์ (Kato และ คณะ, 1994) คือ อัตราการย่อยสลายขึ้นอยู่กับค่า K_s ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงคุณลักษณะจำเพาะของแบคทีเรียต่อสารอาหารนั้นๆ ซึ่งเมื่อค่าการถ่ายเทมวลสารผ่านไบโอฟิล์ม (biofilm) ที่ห่อหุ้มอยู่รอบนอกของกลุ่มเซลล์แบคทีเรียหรือเม็ดตะกอนแบคทีเรีย (Apparent K_s) มีค่าสูงกว่าค่าการถ่ายเทมวลสารเข้าไปยังเซลล์ของแบคทีเรีย (Intrinsic K_s) เพราะข้อจำกัดหรืออุปสรรคในการถ่ายเทมวลสารผ่านไบโอฟิล์ม (biofilm) ทำให้ความเข้มข้นของสารอาหารที่ต่ำลงเรื่อยๆ ตามความลึกในเม็ดตะกอนแบคทีเรีย และไม่มีอาหารที่เพียงพอต่อแบคทีเรียที่อยู่ในชั้นในของเม็ดตะกอนแบคทีเรีย ซึ่งลักษณะโครงสร้างของเม็ดตะกอนแบคทีเรียในระบบอจีเอสบี มีแบคทีเรียสร้างมีเทนอยู่ในชั้นกลาง และชั้นในของเม็ดตะกอน (Guiot, Pauss และ Corterton, 1992 อ้างถึงใน ตูลชัย แจ่มใส, 2545) ทำให้แบคทีเรียที่อยู่ชั้นในของเม็ดตะกอนจะขาด

อาหาร เกิดการย่อยสลายตัวเองกลายเป็นโพรงว่างบริเวณแกนกลางของเม็ดตะกอนแบคทีเรีย ส่งผลให้เกิดการล้างออก (wash out) ของเม็ดตะกอนแบคทีเรีย จากการที่มีก๊าซสะสมตัวอยู่ในเม็ดตะกอน นอกจากนี้โครงสร้างเม็ดตะกอนแบคทีเรียที่จับตัวกันหลวมๆ ยังสามารถเกิดการแตกสลายเนื่องจากความปั่นป่วนทางกลศาสตร์ในถังปฏิกรณ์ได้ ทำให้แบคทีเรียในระบบบางส่วนไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ไม่สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้เต็มที่ และมีบางส่วนที่หลุดออกนอกระบบ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อการโดยมุ่งศึกษาถึงประสิทธิภาพของระบบอ็อกซิเจนในการกำจัดไนเตรทในน้ำเสียที่มีสารรบกวนประเภทซัลเฟต คลอไรด์ และไนไตรท์ เป็นสารรบกวน กำหนด การป้อนน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกรณ์อ็อกซิเจนด้วยความเร็ว 3 ม./ชม. มีเวลา กักเก็บน้ำ 3.8 ชม. มีค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 6.6 กก.ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ใช้น้ำตาลทรายเป็นน้ำ เสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นซีโอดี 1,000 มก./ล. และมีความเข้มข้นของไนเตรท 100 มก./ล. สรุปผล การทดลอง ได้ดังนี้

1. ชุดการทดลองที่ 1 ที่ความเข้มข้นของซัลเฟตเท่ากับ 50 - 150 มก./ล. มีประสิทธิภาพ ในการกำจัดซีโอดีและไนเตรท 89 - 95 % และ 96 - 98 % ตามลำดับ ชุดการทดลองที่ 2 ที่ความ เข้มข้นของคลอไรด์เท่ากับ 1,000 - 2,000 มก./ล. มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและไนเตรท 91 - 94 % และ 98 - 99 % ตามลำดับ ชุดการทดลองที่ 3 ที่ความเข้มข้นของไนไตรท์เท่ากับ 50 - 200 มก./ล. มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและไนเตรท 92 - 94 % และ 97 - 98 % ตามลำดับ และชุดการทดลองที่ไม่มีสารรบกวน มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี 92 - 95% และมี ประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทมากกว่า 98 - 99 %

2. ระบบอ็อกซิเจนมีประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟต 57- 77% และมีประสิทธิภาพใน การกำจัดไนไตรท์สูงถึง 97 - 99 % มีประสิทธิภาพในการกำจัดคลอไรด์เพียง 3 - 6 % แสดงว่า ระบบอ็อกซิเจนมีประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตที่ความเข้มข้น 50 - 150 มก./ล. มีประสิทธิภาพ ในการกำจัดไนไตรท์ที่ความเข้มข้น 50 - 200 มก./ล. อยู่ในเกณฑ์ดีมาก แต่ไม่สามารถกำจัด คลอไรด์ที่มีในระบบได้

3. ระบบอ็อกซิเจนที่ไม่มีสารรบกวนมีปริมาณก๊าซเฉลี่ย 5,900 - 6,000 มล./วัน ซึ่ง ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดจากระบบอ็อกซิเจนที่มีสารรบกวนประเภทซัลเฟต , คลอไรด์ และไนไตรท์ มีปริมาณก๊าซเฉลี่ย 5,100 - 5,600, 5,500 - 5,900 และ 5,000 - 5,500 มล./วัน ตามลำดับ ดังนั้น สารรบกวนซัลเฟต และไนไตรท์มีผลทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดจากระบบอ็อกซิเจนลดลง

4. ค่าเปอร์เซ็นต์การไหลอิเล็กทรอนิกส์ หรือเปอร์เซ็นต์สัดส่วนการใช้ซีโอดีของแบคทีเรีย สร้างมีเทนของทุกชุดการทดลอง มีค่ามากกว่า แบคทีเรียดีไนตริฟายอิง และแบคทีเรียรีดิคัล ซัลเฟต ตามลำดับ นั่นคือ ในทุกช่วงการทดลองของทั้ง 4 ชุดการทดลองแบคทีเรียสร้างมีเทน ยังคงเป็นแบคทีเรียที่โดดเด่นในระบบ สามารถใช้ซีโอดีได้มากที่สุด และเมื่อความเข้มข้น

ซัลเฟตและไนไตรท์เพิ่มขึ้น ค่าเปอร์เซ็นต์การไหลอิเล็กทรอนิกส์ของแบคทีเรียรีดิคัลซัลเฟตและแบคทีเรียดีไนตริฟายอิงมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

5. จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Screening Electron Microscope) แสดงให้เห็นว่า โครงสร้างและลักษณะภายในของเม็ดตะกอนทุกชุดการทดลอง ไม่พบความแตกต่างของสายพันธุ์แบคทีเรีย และไม่มีการแยกออกเป็นชั้นอย่างเด่นชัด โดยแบคทีเรียสายพันธุ์หลักๆ ที่พบภายในเม็ดตะกอนแบคทีเรีย คือ กลุ่มแบคทีเรียสร้างมีเทน (Methanogens)

6. ขนาดของเม็ดตะกอนแบคทีเรียที่พบในถังปฏิกรณ์ ที่เม็ดตะกอนแบคทีเรียมีขนาด 1 – 3 มิลลิเมตร และมีขนาดต่างกันไม่มากกว่า 2 มิลลิเมตร ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีและไนเตรท

จากผลการทดลองทั้งหมด สรุปได้ว่า ระบบอิจีเอสบีเป็นระบบที่มีความสามารถทนต่อสารรบกวนอินทรีย์ในปริมาณที่ระบุไว้ ดังนั้น ระบบอิจีเอสบีจึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการใช้กำจัดซีไอดี และไนเตรท ในการบำบัดน้ำเสียที่มีส่วนประกอบของซัลเฟต คลอไรด์ หรือไนไตรท์

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรทำการศึกษาประสิทธิภาพของระบบอิจีเอสบีโดย

1. นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจริงอื่นๆ ของซัลเฟต คลอไรด์ หรือไนไตรท์ เช่น น้ำเสียจากโรงงานผลิตสแตนเลส โรงงานปลากระป๋อง โรงงานผักกาดดองกระป๋อง หรือน้ำเสียจากสะพานปลา

2. เพิ่มความเข้มข้นและระดับความเข้มข้นของสารรบกวนแต่ละชนิดให้ละเอียดมากขึ้น เพื่อทราบถึงระดับความเข้มข้นของสารรบกวนที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบอิจีเอสบี

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กัลยาณี เกษเมธีการุณ. การพัฒนาระบบอีจีเอสบี - ถึงกรองชีวภาพสำหรับการบำบัดน้ำเสีย
สะพานปลา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
- กิตติศักดิ์ ต้นชนะชัย. การใช้ยูเอเอสบีบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอาหารทะเลแช่แข็ง. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
- ควบคุมมลพิษ, กรม. โครงการพัฒนาระบบการจัดการน้ำเสียที่มีความเค็ม. กรมควบคุมมลพิษ
กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2544
- จันทิมา สกุลพานิช. การบำบัดน้ำเสียที่มีซัลเฟตและไนเตรทสูงโดยใช้ระบบยูเอเอสบี. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, 2548
- ชฎารัตน์ อนันต์. ผลของความเค็มที่มีต่อการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของกระบวนการ
แอกทิเวเต็ดสลัดจ์แบบฟลูอิดด็อกซ์ 3 ขั้นตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
- ชำนาญ กายประสิทธิ์. การใช้ยูเอเอสบีในการบำบัดน้ำเสียเข้มข้นสูง. วิทยานิพนธ์ปริญญา
โทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, 2538.
- ณัฐริกา ตันตวงศ์. ผลของคลอไรด์ที่มีต่อการกำจัดซีโอทีในน้ำเสียที่เค็มโดยใช้ระบบยูเอเอสบี
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550
- ทัศน์นะ ศิริเตียวศรี. การประยุกต์กระบวนการยูเอเอสบี-อีจีเอสบี ในการบำบัดน้ำเสียจากศูนย์การค้า
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และ วิบูลย์ลักษณ์ วิสุทติกิติ. คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 3.
กรุงเทพมหานคร :สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2540.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์, การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร
:สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2544.

- ธีระ เกรอต. วิศวกรรมน้ำเสียการบำบัดทางชีวภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
- พีรพงษ์ ทิพย์าท. การบำบัดน้ำเสียความเข้มข้นต่ำโดยระบบยูเอเอสบี. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, 2530.
- ปรีชา ทดนาที. ผลของเม็ดตะกอนหัวเชื้อจุลินทรีย์จากแหล่งต่างกันต่อการเดินระบบอ็อกซิเจนในการบำบัดน้ำเสียความเข้มข้นต่ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- ตุลชัย แจ่มใส. ประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์แบบชั้นเม็ดตะกอนขยายตัวสำหรับบำบัดน้ำเสีย ชุมชน. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- ภูคำ พิมพ์จักร. การใช้กระบวนการยูเอเอสบี-แอนออกซิก-แอโรบิก ในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเค็ม และไนโตรเจนสูงจากน้ำเสียสะพานปลา. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- รองเพชร บุญช่วยดี. การใช้เซลล์ตรึงในการบำบัดน้ำเสียชุมชนที่มีความเข้มข้นต่ำด้วยระบบอ็อกซิเจน. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- มันลิน ตันทุลเวศน์. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม. เล่มที่ 2. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- อนุตร เปียงแก้ว. การควบคุมระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันด้วยปริมาณซัลเฟต และชนิดของ แหล่งคาร์บอน. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- อรทัย ชวาลภาฤทธิ์. คู่มือวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: วิศวกรรม สถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2545.
- อุรธา เศรษฐีศรีกิจ. ผลของความเข้มข้นซีโอไซด์ และซัลเฟตต่อระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

ภาษาอังกฤษ

Bilanovic, D., Battistoni, P., Cecchi, F., Pavan, P. and Mata-Alvarez, J. Denitrification under high nitrate concentration and alternating anoxic conditions.

- Water Research. 33 (1999) : 3311 – 3320.
- Cervantes, F., Rosa, A. and Gomez, J. Nitrogen removal from wastewater at low C/N ratio with ammonium and acetate as electron donors. Bioresource Technology. 79 (2001) : 165-170
- Gilles, P., Nicolas, B. and Rene, M. Interactions between methanogen and nitrate reducing bacteria during the anaerobic digestion of an industrial sulfate rich wastewater. Microbial Ecology. 29 (1999) : 341-350.
- Hanne, V.H. and Birgitte, K.A. Integrated removal of nitrate and carbon in an UASB reactors : Operating performance. Water Research. 30 (1996) : 1451 – 1458.
- Kato, M.T., Field, J.A., Versteeg, P. and Lettinga, G. Feasibility of Expanded Granular Sludge Bed reactors for the anaerobic treatment of low-strength soluble wastewaters. Biotechnology and Bioengineering. 44 (1994) : 469 – 479.
- Kato, M.T., Rebac, S. and Lettinga, G. Anaerobic treatment of low-strength brewery wastewaters in Expanded Granular Sludge Bed reactor. Bioch. Biotech. 76 (1999) : 15 – 32.
- Kato, M.T., Florencio, L. and Arantes, R.F.M. Post treatment of UASB effluent in an Expanded Granular Sludge Bed reactor type using flocculent sludge. Water Science and Technology. 48 (2003) : 279 – 284.
- Lenore, S.,C.,Arnold, E.,G. Standard methods for the Examination of Water and wastewater. 20th ed Washington : American Public Health Association.(1998)
- Lettinga, G., van Velsen, A.F.M., Hobma, S.W., de Zeew, W. and Klapwijk. Use of UASB reactors concept for biological wastewater treatment. Biotechnology and Bioengineering. 22 (1980) : 699 – 734.
- Lettinga, G., Hulshoff Pol, L.W., Koster, I.W., Wiegant, W.M., de Zeew, W.J., Rinzema, A., Grin, P.C., Roersma, R.E. and Hobma, S.W. High rate anaerobic wastewater treatment using the UASB reactors under a wide range of temperature condition. Biotechnology and Genetic Engineering. 2 (1984) : 253 – 284.
- Lettinga, G. and Hulshoff Pol, L.W. Advance reactor design, operation and economy. Water Science and Technology. 18 (1986) : 99 – 108.
- Patnaik, P. Handbook of Inorganic Chemical. 2nd ed. United States of America : McGraw-Hill, 2003.

- Pereira, M.A., Mota, M. and Alves, M.M. Operation of an anaerobic filter and an EGSB reactor for the treatment of an oleic acid-based effluent: influence of inoculum quality. Process Biochemistry. 37 (2002) : 1026-1031.
- Pereira, M.A., Roest, K., Stams, A.J.M., Mota, M., Alves, M. and Akkermans, A.D.L. Molecular monitoring of microbial diversity in expanded granular sludge bed (EGSB) reactor treating oleic acid. FEMS Microbiology Ecology. 41 (2002) : 95 -103.
- Rebac, S., Ruskova, J., Gerbens, S., Jules B.V. L., Alfons J.M.S., and Lettinga G. High-rate anaerobic treatment of wastewater under psychrophilic conditions. Fermentation and Bioengineering. 5 (1995) : 499-506.
- Rinzema, A., Van veen, H. and Lettinga, G. Anaerobic digestion of triglyceride emulsions in Expanded Granular Sludge Bed reactor with modified sludge separators. Environment biotechnology : Principles and application. Singapore : McGraw-Hill Education, 2001.
- Rittmann, B.E. and McCarty, P.L. Environment biotechnology : Principles and applications. Singapore : McGraw-Hill Higher Education, 2001.
- Ruiz, G., Jeison, D., Rubilar, O., Ciudad, G. and Chamy, R. Nitrification-Denitrification via nitrate accumulation for nitrogen removal from wastewaters. Bioresource Technology. 97(2006) : 330-335.
- Sabry, T. Application of the UASB inoculated with flocculent and granular sludge in treating sewage at different hydraulic shock loads. Bioresource Technology. 99 (2008) : 4073 – 4077.
- Schmidt, J.E. and Ahring, B.K. Granular sludge formation in Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) reactors. Biotechnology and Bioengineering. 49(1995) : 229 – 246.
- van Haandel, A.C. and Lettinga, G. Anaerobic Sewage Treatment. Chichester John Wiley & Sons Ltd., 1994
- Visser, A., Alphenaar, P.A., Gao, Y., van Rossum G., and Lettinga, G. Granulation and immobilization of methanogenic and sulfate-reduction bacteria in high-rate anaerobic reactors. Applied and Environmental Microbiology. 40(1994) : 575-581.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ผลการทดลองของชุดการทดลองที่ 1 ที่มีสารรบกวนประเภทซัลเฟต

ตารางที่ ก.1 คุณณภูมิของชุดการทดลองที่ 1

| คุณณภูมิ (องศาเซลเซียส) | | | | | | | | |
|-------------------------|--|--------|-------------------|---|--------|-------------------|---|--------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | |
| วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : SO ₄ ²⁻ =100 : 50 | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : SO ₄ ²⁻ =100 : 100 | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : SO ₄ ²⁻ =100 : 150 | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก |
| 2/4/2550 | 31.2 | 30.4 | 1/6/2550 | 31.2 | 31.4 | 11/8/2550 | 29.6 | 29.8 |
| 4/4/2550 | 31.7 | 31.0 | 6/6/2550 | 31.4 | 31.6 | 14/8/2550 | 29.5 | 29.8 |
| 6/4/2550 | 30.6 | 29.4 | 8/6/2550 | 30.0 | 30.2 | 16/8/2550 | 29.0 | 29.1 |
| 9/4/2550 | 31.9 | 28.1 | 12/6/2550 | 30.2 | 30.8 | 18/8/2550 | 28.0 | 28.4 |
| 11/4/2550 | 33.2 | 30.0 | 14/6/2550 | 29.8 | 30.0 | 21/8/2550 | 28.4 | 28.9 |
| 14/4/2550 | 32.8 | 30.4 | 16/6/2550 | 28.7 | 28.7 | 23/8/2550 | 27.0 | 27.4 |
| 16/4/2550 | 30.4 | 29.3 | 20/6/2550 | 28.1 | 28.4 | 25/8/2550 | 29.1 | 29.6 |
| 18/4/2550 | 29.1 | 28.8 | 23/6/2550 | 29.4 | 29.6 | 28/8/2550 | 30.6 | 30.9 |
| 20/4/2550 | 30.1 | 30.2 | 25/6/2550 | 29.6 | 29.9 | 31/8/2550 | 29.8 | 31.4 |
| 23/4/2550 | 31.9 | 29.6 | 28/6/2550 | 29.1 | 29.4 | 5/9/2550 | 30.1 | 28.5 |
| 25/4/2550 | 29.5 | 29.7 | 30/6/2550 | 28.6 | 28.9 | 10/9/2550 | 31.4 | 29.3 |
| 28/4/2550 | 29.1 | 29.3 | 6/7/2550 | 29.0 | 29.3 | | | |
| 30/4/2550 | 31.1 | 30.1 | 9/7/2550 | 30.1 | 30.4 | | | |
| 2/5/2550 | 29.2 | 29.4 | 11/7/2550 | 30.6 | 30.7 | | | |
| 4/5/2550 | 30.1 | 30.3 | 13/7/2550 | 29.7 | 30.1 | | | |
| 7/5/2550 | 29.5 | 30.6 | 15/7/2550 | 29.4 | 29.6 | | | |
| 11/5/2550 | 30.5 | 31.1 | 17/7/2550 | 28.2 | 28.5 | | | |
| 14/5/2550 | 30.7 | 31.2 | 20/7/2550 | 28.8 | 29.0 | | | |
| 19/5/2550 | 29.7 | 29.8 | 24/7/2550 | 29.4 | 29.7 | | | |
| 21/5/2550 | 29.8 | 30.1 | 27/7/2550 | 29.3 | 28.4 | | | |
| 23/5/2550 | 28.9 | 29.0 | 31/7/2550 | 28.6 | 27.9 | | | |
| 25/5/2550 | 29.0 | 28.8 | 3/8/2550 | 28.6 | 28.9 | | | |
| 29/5/2550 | 28.0 | 30.2 | 7/8/2550 | 27.5 | 27.6 | | | |
| | | | 9/8/2550 | 28.6 | 28.9 | | | |
| จำนวน | 23 | 23 | จำนวน | 24 | 24 | จำนวน | 11 | 11 |
| ค่าเฉลี่ย | 30.3 | 29.9 | ค่าเฉลี่ย | 29.3 | 29.5 | ค่าเฉลี่ย | 29.3 | 29.4 |
| SD | 1.32 | 0.78 | SD | 0.95 | 1.04 | SD | 1.23 | 1.13 |
| ค่าสูงสุด | 33.2 | 31.2 | ค่าสูงสุด | 31.4 | 31.6 | ค่าสูงสุด | 31.4 | 31.4 |
| ค่าต่ำสุด | 28.0 | 28.1 | ค่าต่ำสุด | 27.5 | 27.6 | ค่าต่ำสุด | 27.0 | 27.4 |

ตารางที่ ก.2 ไออาร์พีของชุดการทดลองที่ 1

| ไออาร์พี (มิลลิวัตต์) | | | | | | | | |
|-----------------------|--|--------|-------------------|---|--------|-------------------|---|--------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | |
| วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : SO ₄ ²⁻ =100 : 50 | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : SO ₄ ²⁻ =100 : 100 | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : SO ₄ ²⁻ =100 : 150 | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก |
| 2/4/2550 | - | -284 | 1/6/2550 | - | -320 | 11/8/2550 | - | -276 |
| 4/4/2550 | - | -295 | 6/6/2550 | - | -344 | 14/8/2550 | - | -285 |
| 6/4/2550 | - | -336 | 8/6/2550 | - | -310 | 16/8/2550 | - | -310 |
| 9/4/2550 | - | -262 | 12/6/2550 | - | -389 | 18/8/2550 | - | -367 |
| 11/4/2550 | - | -321 | 14/6/2550 | - | -325 | 21/8/2550 | - | -220 |
| 14/4/2550 | - | -335 | 16/6/2550 | - | -350 | 23/8/2550 | - | -279 |
| 16/4/2550 | - | -307 | 20/6/2550 | - | -271 | 25/8/2550 | - | -336 |
| 18/4/2550 | - | -358 | 23/6/2550 | - | -290 | 28/8/2550 | - | -285 |
| 20/4/2550 | - | -361 | 25/6/2550 | - | -364 | 31/8/2550 | - | -320 |
| 23/4/2550 | - | -319 | 28/6/2550 | - | -310 | 5/9/2550 | - | -250 |
| 25/4/2550 | - | -296 | 30/6/2550 | - | -350 | 10/9/2550 | - | -287 |
| 28/4/2550 | - | -275 | 6/7/2550 | - | -344 | | | |
| 30/4/2550 | - | -295 | 9/7/2550 | - | -372 | | | |
| 2/5/2550 | - | -338 | 11/7/2550 | - | -380 | | | |
| 4/5/2550 | - | -284 | 13/7/2550 | - | -392 | | | |
| 7/5/2550 | - | -290 | 15/7/2550 | - | -346 | | | |
| 11/5/2550 | - | -304 | 17/7/2550 | - | -355 | | | |
| 14/5/2550 | - | -356 | 20/7/2550 | - | -360 | | | |
| 19/5/2550 | - | -329 | 24/7/2550 | - | -376 | | | |
| 21/5/2550 | - | -344 | 27/7/2550 | - | -381 | | | |
| 23/5/2550 | - | -316 | 31/7/2550 | - | -386 | | | |
| 25/5/2550 | - | -388 | 3/8/2550 | - | -333 | | | |
| 29/5/2550 | - | -390 | 7/8/2550 | - | -311 | | | |
| | | | 9/8/2550 | - | -347 | | | |
| จำนวน | - | 23 | จำนวน | - | 24 | จำนวน | - | 11 |
| ค่าเฉลี่ย | - | -321.0 | ค่าเฉลี่ย | - | -346.1 | ค่าเฉลี่ย | - | -292.3 |
| SD | - | 34.73 | SD | - | 32.32 | SD | - | 40.20 |
| ค่าสูงสุด | - | -390 | ค่าสูงสุด | - | -392 | ค่าสูงสุด | - | -367 |
| ค่าต่ำสุด | - | -262 | ค่าต่ำสุด | - | -271 | ค่าต่ำสุด | - | -220 |

ตารางที่ ก.3 พีเอชของชุดการทดลองที่ 1

| พีเอช | | | | | | | | |
|-------------------|--|--------|-------------------|---|--------|-------------------|---|--------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | |
| วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : SO ₄ ²⁻ =100 : 50 | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : SO ₄ ²⁻ =100 : 100 | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : SO ₄ ²⁻ =100 : 150 | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก |
| 2/4/2550 | 7.93 | 8.37 | 1/6/2550 | 8.20 | 6.88 | 11/8/2550 | 8.15 | 7.04 |
| 4/4/2550 | 7.91 | 7.34 | 6/6/2550 | 8.56 | 6.79 | 14/8/2550 | 8.23 | 7.50 |
| 6/4/2550 | 7.89 | 7.14 | 8/6/2550 | 8.26 | 6.97 | 16/8/2550 | 7.67 | 7.37 |
| 9/4/2550 | 8.00 | 6.67 | 12/6/2550 | 8.02 | 6.82 | 18/8/2550 | 7.67 | 7.43 |
| 11/4/2550 | 7.80 | 6.95 | 14/6/2550 | 8.13 | 6.99 | 21/8/2550 | 7.46 | 7.39 |
| 14/4/2550 | 7.79 | 7.09 | 16/6/2550 | 8.94 | 6.80 | 23/8/2550 | 7.55 | 7.32 |
| 16/4/2550 | 7.70 | 6.79 | 20/6/2550 | 8.39 | 6.77 | 25/8/2550 | 7.98 | 7.48 |
| 18/4/2550 | 8.00 | 7.12 | 23/6/2550 | 7.89 | 6.65 | 28/8/2550 | 7.54 | 7.36 |
| 20/4/2550 | 7.94 | 7.25 | 25/6/2550 | 7.94 | 6.97 | 31/8/2550 | 8.03 | 7.45 |
| 23/4/2550 | 7.95 | 7.05 | 28/6/2550 | 7.98 | 6.86 | 5/9/2550 | 7.99 | 7.56 |
| 25/4/2550 | 7.95 | 7.11 | 30/6/2550 | 7.93 | 6.75 | 10/9/2550 | 7.84 | 7.36 |
| 28/4/2550 | 7.36 | 7.10 | 6/7/2550 | 8.13 | 6.98 | | | |
| 30/4/2550 | 7.92 | 7.12 | 9/7/2550 | 8.20 | 6.90 | | | |
| 2/5/2550 | 7.80 | 7.01 | 11/7/2550 | 8.56 | 6.85 | | | |
| 4/5/2550 | 7.95 | 7.20 | 13/7/2550 | 8.29 | 6.93 | | | |
| 7/5/2550 | 7.44 | 7.06 | 15/7/2550 | 8.58 | 6.59 | | | |
| 11/5/2550 | 8.13 | 7.30 | 17/7/2550 | 8.13 | 6.88 | | | |
| 14/5/2550 | 7.89 | 7.06 | 20/7/2550 | 8.16 | 6.87 | | | |
| 19/5/2550 | 7.89 | 7.10 | 24/7/2550 | 7.80 | 6.95 | | | |
| 21/5/2550 | 7.88 | 7.20 | 27/7/2550 | 7.82 | 6.89 | | | |
| 23/5/2550 | 7.58 | 7.32 | 31/7/2550 | 7.74 | 6.92 | | | |
| 25/5/2550 | 7.46 | 7.25 | 3/8/2550 | 7.76 | 6.94 | | | |
| 29/5/2550 | 7.66 | 7.32 | 7/8/2550 | 8.00 | 7.11 | | | |
| | | | 9/8/2550 | 7.94 | 6.95 | | | |
| จำนวน | 23 | 23 | จำนวน | 24 | 24 | จำนวน | 11 | 11 |
| ค่าเฉลี่ย | 7.8 | 7.17 | ค่าเฉลี่ย | 8.14 | 6.88 | ค่าเฉลี่ย | 7.83 | 7.39 |
| SD | 0.20 | 0.31 | SD | 0.30 | 0.11 | SD | 0.26 | 0.14 |
| ค่าสูงสุด | 8.1 | 8.37 | ค่าสูงสุด | 8.94 | 7.11 | ค่าสูงสุด | 8.23 | 7.56 |
| ค่าต่ำสุด | 7.4 | 6.67 | ค่าต่ำสุด | 7.74 | 6.59 | ค่าต่ำสุด | 7.46 | 7.04 |

ตารางที่ ก.4 สภาพต่างทั้งหมดของชุดการทดลองที่ 1

| สภาพต่างทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต) | | | | | | | | |
|---|--|--------|-------------------|---|--------|-------------------|---|--------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | |
| วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : SO ₄ ²⁻ =100 : 50 | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : SO ₄ ²⁻ =100 : 100 | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : SO ₄ ²⁻ =100 : 150 | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก |
| 2/4/2550 | 340 | 582 | 1/6/2550 | 350 | 587 | 11/8/2550 | 307 | 600 |
| 4/4/2550 | 350 | 579 | 6/6/2550 | 339 | 584 | 14/8/2550 | 310 | 610 |
| 6/4/2550 | 368 | 570 | 8/6/2550 | 345 | 576 | 16/8/2550 | 329 | 589 |
| 9/4/2550 | 390 | 529 | 12/6/2550 | 325 | 579 | 18/8/2550 | 340 | 524 |
| 11/4/2550 | 320 | 550 | 14/6/2550 | 313 | 564 | 21/8/2550 | 317 | 620 |
| 14/4/2550 | 340 | 538 | 16/6/2550 | 325 | 583 | 23/8/2550 | 320 | 568 |
| 16/4/2550 | 379 | 546 | 20/6/2550 | 364 | 546 | 25/8/2550 | 309 | 589 |
| 18/4/2550 | 345 | 559 | 23/6/2550 | 375 | 574 | 28/8/2550 | 315 | 605 |
| 20/4/2550 | 325 | 578 | 25/6/2550 | 364 | 545 | 31/8/2550 | 339 | 569 |
| 23/4/2550 | 368 | 518 | 28/6/2550 | 386 | 533 | 5/9/2550 | 345 | 532 |
| 25/4/2550 | 352 | 549 | 30/6/2550 | 398 | 544 | 10/9/2550 | 364 | 575 |
| 28/4/2550 | 368 | 589 | 6/7/2550 | 368 | 529 | | | |
| 30/4/2550 | 397 | 582 | 9/7/2550 | 375 | 589 | | | |
| 2/5/2550 | 336 | 552 | 11/7/2550 | 395 | 576 | | | |
| 4/5/2550 | 338 | 537 | 13/7/2550 | 356 | 594 | | | |
| 7/5/2550 | 339 | 548 | 15/7/2550 | 385 | 586 | | | |
| 11/5/2550 | 330 | 586 | 17/7/2550 | 365 | 590 | | | |
| 14/5/2550 | 345 | 577 | 20/7/2550 | 356 | 549 | | | |
| 19/5/2550 | 336 | 583 | 24/7/2550 | 372 | 589 | | | |
| 21/5/2550 | 365 | 579 | 27/7/2550 | 339 | 578 | | | |
| 23/5/2550 | 346 | 568 | 31/7/2550 | 371 | 596 | | | |
| 25/5/2550 | 344 | 589 | 3/8/2550 | 390 | 573 | | | |
| 29/5/2550 | 376 | 574 | 7/8/2550 | 375 | 587 | | | |
| | | | 9/8/2550 | 389 | 568 | | | |
| จำนวน | 23 | 23 | จำนวน | 24 | 24 | จำนวน | 11 | 11 |
| ค่าเฉลี่ย | 352.0 | 563.6 | ค่าเฉลี่ย | 363.3 | 571.6 | ค่าเฉลี่ย | 326.8 | 580.1 |
| SD | 20.58 | 20.91 | SD | 23.22 | 19.96 | SD | 18.21 | 30.69 |
| ค่าสูงสุด | 397.0 | 589.0 | ค่าสูงสุด | 398.0 | 596.0 | ค่าสูงสุด | 364.0 | 620.0 |
| ค่าต่ำสุด | 320.0 | 518.0 | ค่าต่ำสุด | 313.0 | 529.0 | ค่าต่ำสุด | 307.0 | 524.0 |

ตารางที่ ก.5 กรดไขมันระเหยของชุดการทดลองที่ 1

| กรดไขมันระเหย (มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต) | | | | | | | | |
|---|--|--------|-------------------|---|--------|-------------------|---|--------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | |
| วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : SO ₄ ²⁻ =100 : 50 | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : SO ₄ ²⁻ =100 : 100 | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : SO ₄ ²⁻ =100 : 150 | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก |
| 2/4/2550 | 89 | 125 | 1/6/2550 | 87 | 119 | 11/8/2550 | 97 | 123 |
| 4/4/2550 | 76 | 140 | 6/6/2550 | 67 | 124 | 14/8/2550 | 76 | 104 |
| 6/4/2550 | 90 | 132 | 8/6/2550 | 78 | 108 | 16/8/2550 | 66 | 99 |
| 9/4/2550 | 104 | 142 | 12/6/2550 | 64 | 107 | 18/8/2550 | 89 | 106 |
| 11/4/2550 | 79 | 126 | 14/6/2550 | 74 | 105 | 21/8/2550 | 88 | 117 |
| 14/4/2550 | 66 | 143 | 16/6/2550 | 68 | 113 | 23/8/2550 | 89 | 121 |
| 16/4/2550 | 77 | 134 | 20/6/2550 | 93 | 136 | 25/8/2550 | 76 | 132 |
| 18/4/2550 | 65 | 124 | 23/6/2550 | 64 | 98 | 28/8/2550 | 84 | 102 |
| 20/4/2550 | 76 | 156 | 25/6/2550 | 83 | 102 | 31/8/2550 | 44 | 123 |
| 23/4/2550 | 116 | 159 | 28/6/2550 | 64 | 122 | 5/9/2550 | 54 | 100 |
| 25/4/2550 | 56 | 134 | 30/6/2550 | 84 | 117 | 10/9/2550 | 98 | 110 |
| 28/4/2550 | 75 | 174 | 6/7/2550 | 67 | 115 | | | |
| 30/4/2550 | 81 | 167 | 9/7/2550 | 70 | 123 | | | |
| 2/5/2550 | 80 | 134 | 11/7/2550 | 80 | 109 | | | |
| 4/5/2550 | 78 | 135 | 13/7/2550 | 58 | 123 | | | |
| 7/5/2550 | 75 | 153 | 15/7/2550 | 49 | 127 | | | |
| 11/5/2550 | 62 | 122 | 17/7/2550 | 70 | 130 | | | |
| 14/5/2550 | 59 | 112 | 20/7/2550 | 77 | 125 | | | |
| 19/5/2550 | 112 | 129 | 24/7/2550 | 83 | 117 | | | |
| 21/5/2550 | 104 | 125 | 27/7/2550 | 66 | 115 | | | |
| 23/5/2550 | 87 | 125 | 31/7/2550 | 92 | 106 | | | |
| 25/5/2550 | 92 | 122 | 3/8/2550 | 67 | 104 | | | |
| 29/5/2550 | 89 | 135 | 7/8/2550 | 59 | 105 | | | |
| 29/5/2550 | 96 | 115 | 9/8/2550 | 71 | 103 | | | |
| จำนวน | 24 | 24 | จำนวน | 24 | 24 | จำนวน | 11 | 11 |
| ค่าเฉลี่ย | 82.7 | 136.0 | ค่าเฉลี่ย | 72.3 | 114.7 | ค่าเฉลี่ย | 78.3 | 112.5 |
| SD | 15.98 | 15.91 | SD | 11.04 | 10.10 | SD | 17.38 | 11.24 |
| ค่าสูงสุด | 116.0 | 174.0 | ค่าสูงสุด | 93.0 | 136.0 | ค่าสูงสุด | 98.0 | 132.0 |
| ค่าต่ำสุด | 56.0 | 112.0 | ค่าต่ำสุด | 49.0 | 98.0 | ค่าต่ำสุด | 44.0 | 99.0 |

ตารางที่ ก.6 ซีโอดีของชุดการทดลองที่ 1

| ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|---|--------|----------|-------------------|--|--------|----------|-------------------|--|--------|----------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | | |
| วัน/เดือน/ปี | NO ₃ : SO ₄ ²⁻ =100 : 50 | | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ : SO ₄ ²⁻ =100 : 100 | | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ : SO ₄ ²⁻ =100 : 150 | | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | %removal | | น้ำเข้า | น้ำออก | %removal | | น้ำเข้า | น้ำออก | %removal |
| 2/4/2550 | 1058 | 51 | 95.18 | 1/6/2550 | 958 | 85 | 91.13 | 11/8/2550 | 828 | 170 | 79.47 |
| 4/4/2550 | 815 | 159 | 80.49 | 6/6/2550 | 860 | 77 | 94.53 | 14/8/2550 | 931 | 152 | 83.67 |
| 6/4/2550 | 971 | 101 | 89.60 | 8/6/2550 | 985 | 68 | 94.62 | 16/8/2550 | 967 | 90 | 90.69 |
| 9/4/2550 | 981 | 98 | 90.01 | 12/6/2550 | 879 | 74 | 91.58 | 18/8/2550 | 983 | 79 | 91.96 |
| 11/4/2550 | 1373 | 59 | 95.70 | 14/6/2550 | 830 | 80 | 90.36 | 21/8/2550 | 992 | 80 | 91.94 |
| 14/4/2550 | 971 | 116 | 88.05 | 16/6/2550 | 944 | 67 | 92.90 | 23/8/2550 | 890 | 68 | 92.36 |
| 16/4/2550 | 985 | 61 | 93.81 | 20/6/2550 | 974 | 63 | 93.53 | 25/8/2550 | 1004 | 89 | 91.14 |
| 18/4/2550 | 1090 | 80 | 92.66 | 23/6/2550 | 967 | 59 | 93.90 | 28/8/2550 | 986 | 92 | 90.67 |
| 20/4/2550 | 980 | 103 | 89.49 | 25/6/2550 | 985 | 62 | 93.71 | 31/8/2550 | 970.0 | 89 | 90.82 |
| 23/4/2550 | 1033 | 96 | 90.71 | 28/6/2550 | 989 | 47 | 95.25 | 5/9/2550 | 956 | 91 | 90.48 |
| 25/4/2550 | 1072 | 101 | 90.58 | 30/6/2550 | 877 | 53 | 93.96 | 10/9/2550 | 1004 | 98 | 90.24 |
| 28/4/2550 | 919 | 153 | 83.35 | 6/7/2550 | 846 | 47 | 94.44 | | | | |
| 30/4/2550 | 1132 | 143 | 87.37 | 9/7/2550 | 865 | 60 | 93.06 | | | | |
| 2/5/2550 | 1122 | 53 | 95.28 | 11/7/2550 | 987 | 42 | 95.74 | | | | |
| 4/5/2550 | 989 | 48 | 95.15 | 13/7/2550 | 991 | 40 | 95.96 | | | | |
| 7/5/2550 | 800 | 42 | 94.75 | 15/7/2550 | 987 | 32 | 96.76 | | | | |
| 11/5/2550 | 1108 | 62 | 94.40 | 17/7/2550 | 989 | 41 | 95.85 | | | | |
| 14/5/2550 | 987 | 59 | 94.02 | 20/7/2550 | 985 | 35 | 96.45 | | | | |
| 19/5/2550 | 984 | 37 | 96.24 | 24/7/2550 | 955 | 43 | 95.52 | | | | |
| 21/5/2550 | 879 | 53 | 93.97 | 27/7/2550 | 889 | 33 | 96.29 | | | | |
| 23/5/2550 | 994 | 49 | 95.07 | 31/7/2550 | 1059 | 53 | 94.99 | | | | |
| 25/5/2550 | 985 | 57 | 94.21 | 3/8/2550 | 1127 | 48 | 95.74 | | | | |
| 29/5/2550 | 1020 | 59 | 94.22 | 7/8/2550 | 988 | 35 | 96.46 | | | | |
| | | | | 9/8/2550 | 978 | 48 | 95.09 | | | | |
| จำนวน* | 23 | 23 | 23 | จำนวน* | 24 | 24 | 24 | จำนวน | 11 | 11 | 11 |
| ค่าเฉลี่ย* | 1010.78 | 80.00 | 91.93 | ค่าเฉลี่ย* | 952.83 | 54.08 | 94.47 | ค่าเฉลี่ย | 955.55 | 99.82 | 89.40 |
| SD* | 116.28 | 36.27 | 4.10 | SD* | 69.74 | 15.59 | 1.73 | SD | 54.05 | 31.56 | 4.04 |
| ค่าสูงสุด | 1373 | 159 | 96.2 | ค่าสูงสุด | 1127 | 85 | 96.8 | ค่าสูงสุด | 1004 | 170 | 92.4 |
| ค่าต่ำสุด | 800 | 37 | 80.5 | ค่าต่ำสุด | 830 | 32 | 90.4 | ค่าต่ำสุด | 828 | 68 | 79.5 |

ตารางที่ ก.7 ไนเตรทของชุดการทดลองที่ 1

| ไนเตรท (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|---|--------|----------|-------------------|--|--------|----------|-------------------|--|--------|----------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | | |
| วัน/เดือน/ปี | NO ₃ : SO ₄ ²⁻ =100 : 50 | | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ : SO ₄ ²⁻ =100 : 100 | | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ : SO ₄ ²⁻ =100 : 150 | | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | %removal | | น้ำเข้า | น้ำออก | %removal | | น้ำเข้า | น้ำออก | %removal |
| 2/4/2550 | 88.67 | 5.71 | 93.56 | 6/1/2550 | 102.24 | 2.33 | 97.72 | 11/8/2550 | 123.46 | 4.56 | 96.31 |
| 4/4/2550 | 81.25 | 5.78 | 92.89 | 6/6/2550 | 110.24 | 3.24 | 97.06 | 14/8/2550 | 109.34 | 3.74 | 96.58 |
| 6/4/2550 | 99.23 | 4.14 | 95.83 | 6/8/2550 | 113.23 | 0.68 | 99.40 | 16/8/2550 | 97.37 | 2.15 | 97.79 |
| 9/4/2550 | 98.10 | 0.77 | 99.22 | 6/12/2550 | 112.22 | 4.80 | 95.73 | 18/8/2550 | 118.35 | 3.45 | 97.08 |
| 11/4/2550 | 137.32 | 2.01 | 98.54 | 14/6/2550 | 98.75 | 3.78 | 96.17 | 21/8/2550 | 113.62 | 3.80 | 96.66 |
| 14/4/2550 | 113.25 | 4.25 | 96.25 | 16/6/2550 | 118.97 | 2.86 | 97.60 | 23/8/2550 | 114.64 | 0.35 | 99.69 |
| 16/4/2550 | 115.54 | 5.80 | 94.98 | 20/6/2550 | 106.78 | 3.47 | 96.75 | 25/8/2550 | 113.35 | 2.45 | 97.84 |
| 18/4/2550 | 109.23 | 3.24 | 97.03 | 23/6/2550 | 103.44 | 3.45 | 96.66 | 28/8/2550 | 114.42 | 1.44 | 98.74 |
| 20/4/2550 | 98.77 | 4.08 | 95.87 | 25/6/2550 | 124.35 | 2.33 | 98.13 | 31/8/2550 | 98.78 | 4.55 | 95.39 |
| 23/4/2550 | 103.33 | 4.13 | 96.01 | 28/6/2550 | 113.43 | 4.23 | 96.27 | 5/9/2550 | 124.76 | 3.22 | 97.42 |
| 25/4/2550 | 107.45 | 2.35 | 97.81 | 30/6/2550 | 109.78 | 1.22 | 98.89 | 10/9/2550 | 109.57 | 2.45 | 97.76 |
| 28/4/2550 | 119.24 | 2.55 | 97.86 | 7/6/2550 | 103.34 | 3.43 | 96.68 | | | | |
| 30/4/2550 | 113.25 | 3.44 | 96.96 | 7/9/2550 | 105.35 | 0.95 | 99.10 | | | | |
| 2/5/2550 | 112.22 | 2.64 | 97.65 | 7/11/2550 | 119.34 | 3.44 | 97.12 | | | | |
| 4/5/2550 | 114.89 | 2.35 | 97.95 | 13/7/2550 | 118.67 | 2.09 | 98.24 | | | | |
| 7/5/2550 | 129.24 | 4.25 | 96.71 | 15/7/2550 | 114.57 | 5.35 | 95.33 | | | | |
| 11/5/2550 | 112.24 | 3.21 | 97.14 | 17/7/2550 | 116.75 | 2.96 | 97.46 | | | | |
| 14/5/2550 | 120.56 | 1.27 | 98.95 | 20/7/2550 | 113.23 | 2.57 | 97.73 | | | | |
| 19/5/2550 | 112.34 | 3.54 | 96.85 | 24/7/2550 | 113.86 | 2.18 | 98.08 | | | | |
| 21/5/2550 | 112.65 | 2.35 | 97.91 | 27/7/2550 | 119.01 | 2.33 | 98.04 | | | | |
| 23/5/2550 | 108.99 | 3.47 | 96.82 | 31/7/2550 | 102.15 | 3.65 | 96.43 | | | | |
| 25/5/2550 | 116.86 | 2.86 | 97.55 | 3/8/2550 | 104.73 | 3.85 | 96.32 | | | | |
| 29/5/2550 | 107.88 | 2.24 | 97.92 | 7/8/2550 | 106.43 | 2.67 | 97.49 | | | | |
| | | | | 9/8/2550 | 101.25 | 1.65 | 98.37 | | | | |
| จำนวน | 23 | 23 | 23 | จำนวน | 24 | 24 | 24 | จำนวน | 11 | 11 | 11 |
| ค่าเฉลี่ย | 110.11 | 3.32 | 96.88 | ค่าเฉลี่ย | 110.50 | 2.90 | 97.37 | ค่าเฉลี่ย | 112.51 | 2.92 | 97.39 |
| SD | 12.02 | 1.34 | 1.55 | SD | 7.00 | 1.15 | 1.06 | SD | 8.66 | 1.30 | 1.19 |
| ค่าสูงสุด | 137.32 | 5.80 | 99.22 | ค่าสูงสุด | 124.35 | 5.35 | 99.40 | ค่าสูงสุด | 124.76 | 4.56 | 99.69 |
| ค่าต่ำสุด | 81.25 | 0.77 | 92.89 | ค่าต่ำสุด | 98.75 | 0.68 | 95.33 | ค่าต่ำสุด | 97.37 | 0.35 | 95.39 |

ตารางที่ ก.8 ซัลเฟตของชุดการทดลองที่ 1

| ซัลเฟต (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|---|--------|----------|-------------------|--|--------|----------|-------------------|--|--------|----------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | | |
| วัน/เดือน/ปี | NO ₃ : SO ₄ ²⁻ =100 : 50 | | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ : SO ₄ ²⁻ =100 : 100 | | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ : SO ₄ ²⁻ =100 : 150 | | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | %removal | | น้ำเข้า | น้ำออก | %removal | | น้ำเข้า | น้ำออก | %removal |
| 2/4/2550 | 32.32 | 15.12 | 53.22 | 1/6/2550 | 80.46 | 23.78 | 70.45 | 11/8/2550 | 105.29 | 67.89 | 35.52 |
| 4/4/2550 | 35.44 | 17.28 | 51.25 | 6/6/2550 | 89.45 | 25.38 | 71.63 | 14/8/2550 | 135.36 | 71.03 | 47.53 |
| 6/4/2550 | 36.77 | 15.49 | 57.88 | 8/6/2550 | 110.34 | 32.69 | 70.37 | 16/8/2550 | 179.45 | 90.12 | 49.78 |
| 9/4/2550 | 52.88 | 24.74 | 53.22 | 12/6/2550 | 134.22 | 31.47 | 76.55 | 18/8/2550 | 140.23 | 77.16 | 44.98 |
| 11/4/2550 | 68.33 | 28.53 | 58.25 | 14/6/2550 | 99.46 | 20.76 | 79.13 | 21/8/2550 | 166.86 | 87.66 | 47.46 |
| 14/4/2550 | 52.97 | 20.24 | 52.34 | 16/6/2550 | 126.46 | 31.28 | 75.26 | 23/8/2550 | 158.36 | 71.24 | 55.01 |
| 16/4/2550 | 55.77 | 23.34 | 58.15 | 20/6/2550 | 113.44 | 24.56 | 78.35 | 25/8/2550 | 163.74 | 68.93 | 57.90 |
| 18/4/2550 | 60.13 | 23.11 | 61.57 | 23/6/2550 | 114.56 | 28.77 | 74.89 | 28/8/2550 | 164.64 | 59.44 | 63.90 |
| 20/4/2550 | 77.35 | 31.78 | 58.92 | 25/6/2550 | 106.46 | 23.57 | 77.86 | 31/8/2550 | 155.67 | 45.76 | 70.60 |
| 23/4/2550 | 56.46 | 22.71 | 59.77 | 28/6/2550 | 143.44 | 28.04 | 80.45 | 5/9/2550 | 145.89 | 32.56 | 77.68 |
| 25/4/2550 | 49.35 | 18.60 | 62.31 | 30/6/2550 | 117.55 | 29.89 | 74.57 | 10/9/2550 | 178.26 | 36.12 | 79.74 |
| 28/4/2550 | 64.55 | 22.17 | 65.66 | 6/7/2550 | 108.66 | 26.45 | 75.66 | | | | |
| 30/4/2550 | 53.88 | 19.62 | 63.59 | 9/7/2550 | 103.45 | 23.91 | 76.89 | | | | |
| 2/5/2550 | 51.03 | 19.21 | 62.36 | 11/7/2550 | 114.46 | 25.78 | 77.48 | | | | |
| 4/5/2550 | 54.33 | 17.48 | 67.83 | 13/7/2550 | 135.55 | 28.60 | 78.90 | | | | |
| 7/5/2550 | 57.55 | 18.21 | 68.35 | 15/7/2550 | 124.97 | 28.02 | 77.58 | | | | |
| 11/5/2550 | 60.24 | 18.53 | 69.24 | 17/7/2550 | 108.39 | 25.04 | 76.90 | | | | |
| 14/5/2550 | 57.25 | 16.09 | 71.89 | 20/7/2550 | 110.97 | 25.20 | 77.29 | | | | |
| 19/5/2550 | 58.96 | 15.65 | 73.45 | 24/7/2550 | 90.45 | 21.00 | 76.78 | | | | |
| 21/5/2550 | 55.67 | 15.15 | 72.78 | 27/7/2550 | 109.30 | 24.60 | 77.49 | | | | |
| 23/5/2550 | 51.06 | 13.66 | 73.25 | 31/7/2550 | 120.12 | 25.69 | 78.61 | | | | |
| 25/5/2550 | 50.86 | 13.79 | 72.89 | 3/8/2550 | 104.22 | 23.02 | 77.91 | | | | |
| 29/5/2550 | 55.85 | 14.22 | 74.53 | 7/8/2550 | 110.76 | 25.12 | 77.32 | | | | |
| | | | | 9/8/2550 | 134.56 | 31.24 | 76.78 | | | | |
| จำนวน | 23 | 23 | 23 | จำนวน | 24 | 24 | 24 | จำนวน | 11 | 11 | 11 |
| ค่าเฉลี่ย | 54.30 | 19.34 | 63.60 | ค่าเฉลี่ย | 112.99 | 26.41 | 76.46 | ค่าเฉลี่ย | 153.98 | 64.36 | 57.28 |
| SD | 9.91 | 4.73 | 7.55 | SD | 15.23 | 3.28 | 2.56 | SD | 21.46 | 19.17 | 14.21 |
| ค่าสูงสุด | 77.35 | 31.78 | 74.53 | ค่าสูงสุด | 143.44 | 32.69 | 80.45 | ค่าสูงสุด | 179.45 | 90.12 | 79.74 |
| ค่าต่ำสุด | 32.32 | 13.66 | 51.25 | ค่าต่ำสุด | 80.46 | 20.76 | 70.37 | ค่าต่ำสุด | 105.29 | 32.56 | 35.52 |

ตารางที่ ก.9 ซัลไฟด์ของชุดการทดลองที่ 1

| ซัลไฟด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | | | | | | | |
|----------------------------|--|------------|-------------------|---|------------|-------------------|---|------------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | |
| วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : SO ₄ ²⁻ =100 : 50 | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : SO ₄ ²⁻ =100 : 100 | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : SO ₄ ²⁻ =100 : 150 | |
| | น้ำออก | ซูดดักก๊าซ | | น้ำออก | ซูดดักก๊าซ | | น้ำออก | ซูดดักก๊าซ |
| 2/4/2550 | 8.24 | - | 1/6/2550 | 19.24 | - | 11/8/2550 | 7.32 | 6.04 |
| 4/4/2550 | 9.04 | - | 6/6/2550 | 20.61 | - | 14/8/2550 | 11.23 | - |
| 6/4/2550 | 9.38 | - | 8/6/2550 | 24.13 | - | 16/8/2550 | 16.48 | - |
| 9/4/2550 | 8.27 | - | 12/6/2550 | 32.43 | - | 18/8/2550 | 15.78 | - |
| 11/4/2550 | 7.86 | - | 14/6/2550 | 22.26 | - | 21/8/2550 | 16.55 | 10.55 |
| 14/4/2550 | 8.92 | 4.24 | 16/6/2550 | 19.15 | - | 23/8/2550 | 22.92 | - |
| 16/4/2550 | 9.12 | - | 20/6/2550 | 22.67 | 13.31 | 25/8/2550 | 25.45 | 13.21 |
| 18/4/2550 | 11.22 | - | 23/6/2550 | 25.24 | - | 28/8/2550 | 27.89 | 11.72 |
| 20/4/2550 | 10.82 | 5.50 | 25/6/2550 | 24.11 | - | 31/8/2550 | 30.75 | 8.68 |
| 23/4/2550 | 9.25 | - | 28/6/2550 | 21.45 | 17.70 | 4/9/2550 | 32.33 | 7.79 |
| 25/4/2550 | 11.45 | - | 30/6/2550 | 21.64 | 9.48 | 8/9/2550 | 33.54 | 14.17 |
| 28/4/2550 | 11.75 | 3.02 | 6/7/2550 | 22.58 | 18.27 | | | |
| 30/4/2550 | 11.11 | - | 9/7/2550 | 22.25 | 12.35 | | | |
| 2/5/2550 | 12.01 | - | 11/7/2550 | 25.14 | 15.22 | | | |
| 4/5/2550 | 10.21 | 4.01 | 13/7/2550 | 29.64 | 14.70 | | | |
| 7/5/2550 | 10.94 | 4.23 | 15/7/2550 | 27.46 | 13.54 | | | |
| 11/5/2550 | 11.84 | 3.87 | 17/7/2550 | 23.61 | 12.15 | | | |
| 14/5/2550 | 11.76 | 4.82 | 20/7/2550 | 24.71 | 11.06 | | | |
| 19/5/2550 | 11.15 | 3.46 | 24/7/2550 | 20.04 | 8.33 | | | |
| 21/5/2550 | 11.85 | 7.52 | 27/7/2550 | 24.44 | 12.00 | | | |
| 23/5/2550 | 10.22 | 7.60 | 31/7/2550 | 27.66 | 17.60 | | | |
| 25/5/2550 | 10.33 | 2.61 | 3/8/2550 | 22.45 | 16.97 | | | |
| 29/5/2550 | 11.24 | 6.55 | 7/8/2550 | 24.00 | 12.27 | | | |
| | | | 9/8/2550 | 28.11 | 15.23 | | | |
| จำนวน | 23 | 12 | จำนวน | 24 | 16 | จำนวน | 11 | 7 |
| ค่าเฉลี่ย | 10.35 | 4.79 | ค่าเฉลี่ย | 23.96 | 13.76 | ค่าเฉลี่ย | 21.84 | 10.31 |
| SD | 1.32 | 1.67 | SD | 3.27 | 2.96 | SD | 8.91 | 2.96 |
| ค่าสูงสุด | 12.01 | 7.60 | ค่าสูงสุด | 32.43 | 18.27 | ค่าสูงสุด | 33.54 | 14.17 |
| ค่าต่ำสุด | 7.86 | 2.61 | ค่าต่ำสุด | 19.15 | 8.33 | ค่าต่ำสุด | 7.32 | 6.04 |

ตารางที่ ก.10 ก๊าซชีวภาพของชุดการทดลองที่ 1

| ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร/วัน) | | | | | |
|----------------------------|---|-------------------|--|-------------------|--|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | ช่วงการทดลองที่ 3 | |
| วัน/เดือน/ปี | $\text{NO}_3^- : \text{SO}_4^{2-} = 100 : 50$ | วัน/เดือน/ปี | $\text{NO}_3^- : \text{SO}_4^{2-} = 100 : 100$ | วัน/เดือน/ปี | $\text{NO}_3^- : \text{SO}_4^{2-} = 100 : 150$ |
| 6/4/2550 | 4114 | 3/6/2550 | 6146 | 15/8/2550 | 4800 |
| 14/4/2550 | 4500 | 8/6/2550 | 5558 | 22/8/2550 | 6750 |
| 20/4/2550 | 5760 | 12/6/2550 | 5657 | 1/9/2550 | 5486 |
| 28/4/2550 | 5236 | 17/6/2550 | 5342 | 8/9/2550 | 5702 |
| 4/5/2550 | 4985 | 24/6/2550 | 5331 | | |
| 11/5/2550 | 5143 | 6/7/2550 | 5793 | | |
| 21/5/2550 | 5462 | 14/7/2550 | 5600 | | |
| 29/5/2550 | 6300 | 21/7/2550 | 5814 | | |
| | | 29/7/2550 | 5500 | | |
| | | 6/8/2550 | 5620 | | |
| จำนวน | 8 | จำนวน | 10 | จำนวน | 4 |
| ค่าเฉลี่ย | 5188 | ค่าเฉลี่ย | 5636 | ค่าเฉลี่ย | 5684 |
| SD | 688 | SD | 241 | SD | 808 |
| ค่าสูงสุด | 6300 | ค่าสูงสุด | 6146 | ค่าสูงสุด | 6750 |
| ค่าต่ำสุด | 4114 | ค่าต่ำสุด | 5331 | ค่าต่ำสุด | 4800 |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.11 ของแข็งแขวนลอยที่ออกจากระบบของชุดการทดลองที่ 1

| ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | | | | | | | |
|-------------------------------------|--|--------|-------------------|---|--------|-------------------|---|--------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | |
| วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : SO ₄ ²⁻ =100 : 50 | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : SO ₄ ²⁻ =100 : 100 | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : SO ₄ ²⁻ =100 : 150 | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก |
| 2/4/2550 | - | 29.15 | 1/6/2550 | - | 27.32 | 11/8/2550 | - | 35.28 |
| 11/4/2550 | - | 25.86 | 6/6/2550 | - | 29.25 | 14/8/2550 | - | 35.67 |
| 18/4/2550 | - | 23.24 | 12/6/2550 | - | 24.62 | 18/8/2550 | - | 47.88 |
| 25/4/2550 | - | 22.27 | 16/6/2550 | - | 28.56 | 23/8/2550 | - | 29.11 |
| 2/5/2550 | - | 21.24 | 23/6/2550 | - | 24.14 | 28/8/2550 | - | 31.35 |
| 11/5/2550 | - | 19.14 | 28/6/2550 | - | 22.67 | 5/9/2550 | - | 50.34 |
| 19/5/2550 | - | 14.28 | 6/7/2550 | - | 19.52 | 10/9/2550 | - | 47.88 |
| 25/5/2550 | - | 15.15 | 11/7/2550 | - | 16.38 | | | |
| 29/5/2550 | - | 14.87 | 17/7/2550 | - | 15.37 | | | |
| | | | 24/7/2550 | - | 16.28 | | | |
| | | | 31/7/2550 | - | 14.22 | | | |
| | | | 9/8/2550 | - | 17.20 | | | |
| จำนวน | - | 9 | จำนวน | - | 12 | จำนวน | - | 7 |
| ค่าเฉลี่ย | - | 20.6 | ค่าเฉลี่ย | - | 21.3 | ค่าเฉลี่ย | - | 39.6 |
| SD | - | 5.19 | SD | - | 5.46 | SD | - | 8.80 |
| ค่าสูงสุด | - | 29.2 | ค่าสูงสุด | - | 29.3 | ค่าสูงสุด | - | 50.3 |
| ค่าต่ำสุด | - | 14.3 | ค่าต่ำสุด | - | 14.2 | ค่าต่ำสุด | - | 29.1 |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ผลการทดลองของชุดการทดลองที่ 2 ที่มีสารบวกรวมประเภทคลอไรด์

ตารางที่ ข.1 คุณณภูมิของชุดการทดลองที่ 2

| คุณณภูมิ (องศาเซลเซียส) | | | | | | | | |
|-------------------------|--|--------|-------------------|--|--------|-------------------|--|--------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | |
| วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 1,000 | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 1,500 | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 2,000 | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก |
| 2/4/2550 | 30.4 | 30.4 | 1/6/2550 | 31.4 | 31.6 | 3/8/2550 | 29.8 | 30.0 |
| 4/4/2550 | 30.5 | 31.0 | 3/6/2550 | 30.0 | 30.2 | 7/8/2550 | 29.8 | 30.1 |
| 6/4/2550 | 29.3 | 29.4 | 6/6/2550 | 30.2 | 30.8 | 9/8/2550 | 29.1 | 29.4 |
| 9/4/2550 | 28.1 | 28.1 | 8/6/2550 | 29.1 | 29.6 | 11/8/2550 | 28.4 | 28.5 |
| 11/4/2550 | 29.3 | 30.0 | 10/6/2550 | 30.6 | 30.9 | 14/8/2550 | 28.9 | 28.8 |
| 14/4/2550 | 29.9 | 30.1 | 12/6/2550 | 31.2 | 31.4 | 16/8/2550 | 27.4 | 27.6 |
| 16/4/2550 | 29.0 | 29.3 | 14/6/2550 | 28.1 | 28.4 | 18/8/2550 | 31.4 | 31.6 |
| 18/4/2550 | 28.4 | 28.8 | 17/6/2550 | 29.4 | 29.6 | 22/8/2550 | 28.6 | 28.9 |
| 20/4/2550 | 30.2 | 30.2 | 20/6/2550 | 29.6 | 29.9 | 26/8/2550 | 29.1 | 29.3 |
| 23/4/2550 | 31.9 | 32.4 | 26/6/2550 | 29.8 | 30.0 | | | |
| 25/4/2550 | 29.7 | 29.7 | 28/6/2550 | 28.7 | 28.7 | | | |
| 28/4/2550 | 28.9 | 29.3 | 30/6/2550 | 29.0 | 29.3 | | | |
| 30/4/2550 | 28.5 | 30.1 | 2/7/2550 | 30.1 | 30.4 | | | |
| 2/5/2550 | 30.0 | 29.4 | 4/7/2550 | 30.6 | 30.7 | | | |
| 4/5/2550 | 31.2 | 30.3 | 6/7/2550 | 29.1 | 29.4 | | | |
| 7/5/2550 | 28.4 | 30.6 | 9/7/2550 | 28.6 | 28.9 | | | |
| 9/5/2550 | 29.1 | 30.0 | 11/7/2550 | 29.3 | 29.6 | | | |
| 11/5/2550 | 30.0 | 30.7 | 13/7/2550 | 27.8 | 27.9 | | | |
| 14/5/2550 | 29.2 | 29.8 | 15/7/2550 | 28.6 | 28.9 | | | |
| 16/5/2550 | 30.1 | 30.2 | 17/7/2550 | 27.5 | 27.6 | | | |
| 19/5/2550 | 30.4 | 30.2 | 20/7/2550 | 29.7 | 30.1 | | | |
| 21/5/2550 | 31.0 | 31.8 | 24/7/2550 | 29.1 | 29.6 | | | |
| 23/5/2550 | 30.5 | 30.4 | 27/7/2550 | 28.2 | 28.5 | | | |
| 25/5/2550 | 29.7 | 30.1 | 31/7/2550 | 28.8 | 29.0 | | | |
| 31/5/2550 | 29.8 | 30.5 | | | | | | |
| จำนวน | 25 | 25 | จำนวน | 24 | 24 | จำนวน | 9 | 9 |
| ค่าเฉลี่ย | 29.7 | 30.1 | ค่าเฉลี่ย | 29.4 | 29.6 | ค่าเฉลี่ย | 29.2 | 29.4 |
| SD | 0.94 | 0.87 | SD | 1.02 | 1.04 | SD | 1.11 | 1.14 |
| ค่าสูงสุด | 31.9 | 32.4 | ค่าสูงสุด | 31.4 | 31.6 | ค่าสูงสุด | 31.4 | 31.6 |
| ค่าต่ำสุด | 28.1 | 28.1 | ค่าต่ำสุด | 27.5 | 27.6 | ค่าต่ำสุด | 27.4 | 27.6 |

ตารางที่ ข.2 ไออาร์พีของชุดการทดลองที่ 2

| ไออาร์พี (มิลลิโวลต์) | | | | | | | | |
|-----------------------|--|--------|-------------------|--|--------|-------------------|--|--------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | |
| วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 1,000 | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 1,500 | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 2,000 | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก |
| 2/4/2550 | - | -282 | 1/6/2550 | - | -322 | 3/8/2550 | - | -304 |
| 4/4/2550 | - | -295 | 3/6/2550 | - | -295 | 7/8/2550 | - | -273 |
| 6/4/2550 | - | -319 | 6/6/2550 | - | -313 | 9/8/2550 | - | -225 |
| 9/4/2550 | - | -264 | 8/6/2550 | - | -394 | 11/8/2550 | - | -230 |
| 11/4/2550 | - | -298 | 10/6/2550 | - | -288 | 14/8/2550 | - | -245 |
| 14/4/2550 | - | -279 | 12/6/2550 | - | -353 | 16/8/2550 | - | -257 |
| 16/4/2550 | - | -306 | 14/6/2550 | - | -253 | 18/8/2550 | - | -266 |
| 18/4/2550 | - | -356 | 17/6/2550 | - | -292 | 22/8/2550 | - | -235 |
| 20/4/2550 | - | -369 | 20/6/2550 | - | -329 | 26/8/2550 | - | -216 |
| 23/4/2550 | - | -310 | 26/6/2550 | - | -313 | | | |
| 25/4/2550 | - | -299 | 28/6/2550 | - | -350 | | | |
| 28/4/2550 | - | -272 | 30/6/2550 | - | -338 | | | |
| 30/4/2550 | - | -296 | 2/7/2550 | - | -371 | | | |
| 2/5/2550 | - | -304 | 4/7/2550 | - | -389 | | | |
| 4/5/2550 | - | -286 | 6/7/2550 | - | -390 | | | |
| 7/5/2550 | - | -298 | 9/7/2550 | - | -340 | | | |
| 9/5/2550 | - | -300 | 11/7/2550 | - | -355 | | | |
| 11/5/2550 | - | -354 | 13/7/2550 | - | -325 | | | |
| 14/5/2550 | - | -327 | 15/7/2550 | - | -350 | | | |
| 16/5/2550 | - | -392 | 17/7/2550 | - | -381 | | | |
| 19/5/2550 | - | -317 | 20/7/2550 | - | -320 | | | |
| 21/5/2550 | - | -311 | 24/7/2550 | - | -338 | | | |
| 23/5/2550 | - | -332 | 27/7/2550 | - | -344 | | | |
| 25/5/2550 | - | -327 | 31/7/2550 | - | -338 | | | |
| 31/5/2550 | - | -337 | | | | | | |
| จำนวน | - | 25 | จำนวน | - | 24 | จำนวน | - | 9 |
| ค่าเฉลี่ย | - | -313.2 | ค่าเฉลี่ย | - | -336.7 | ค่าเฉลี่ย | - | -250.1 |
| SD | - | 30.81 | SD | - | 34.86 | SD | - | 27.80 |
| ค่าสูงสุด | - | -392 | ค่าสูงสุด | - | -394 | ค่าสูงสุด | - | -304 |
| ค่าต่ำสุด | - | -264 | ค่าต่ำสุด | - | -253 | ค่าต่ำสุด | - | -216 |

ตารางที่ ข.3 พีเอชของชุดการทดลองที่ 2

| พีเอช | | | | | | | | |
|-------------------|--|--------|-------------------|--|--------|-------------------|--|--------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | |
| วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 1,000 | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 1,500 | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 2,000 | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก |
| 2/4/2550 | 7.91 | 7.01 | 1/6/2550 | 7.89 | 6.84 | 3/8/2550 | 8.24 | 6.93 |
| 4/4/2550 | 7.94 | 7.96 | 3/6/2550 | 7.77 | 6.67 | 7/8/2550 | 8.46 | 6.99 |
| 6/4/2550 | 7.89 | 7.07 | 6/6/2550 | 7.84 | 6.83 | 9/8/2550 | 7.98 | 6.78 |
| 9/4/2550 | 8.20 | 7.20 | 8/6/2550 | 7.58 | 6.75 | 11/8/2550 | 7.94 | 6.87 |
| 11/4/2550 | 7.60 | 6.85 | 10/6/2550 | 7.94 | 6.87 | 14/8/2550 | 7.99 | 6.94 |
| 14/4/2550 | 7.84 | 6.75 | 12/6/2550 | 7.00 | 6.57 | 16/8/2550 | 7.90 | 6.93 |
| 16/4/2550 | 7.84 | 7.31 | 14/6/2550 | 7.98 | 6.77 | 18/8/2550 | 8.02 | 6.97 |
| 18/4/2550 | 7.80 | 7.20 | 17/6/2550 | 7.79 | 6.84 | 22/8/2550 | 7.91 | 6.99 |
| 20/4/2550 | 7.90 | 7.29 | 20/6/2550 | 8.19 | 6.83 | 26/8/2550 | 7.99 | 6.85 |
| 23/4/2550 | 7.91 | 7.01 | 26/6/2550 | 8.15 | 6.79 | | | |
| 25/4/2550 | 7.93 | 7.02 | 28/6/2550 | 8.22 | 6.73 | | | |
| 28/4/2550 | 7.93 | 6.97 | 30/6/2550 | 7.94 | 6.64 | | | |
| 30/4/2550 | 7.64 | 6.79 | 2/7/2550 | 7.88 | 6.81 | | | |
| 2/5/2550 | 7.90 | 7.59 | 4/7/2550 | 7.78 | 6.99 | | | |
| 4/5/2550 | 7.09 | 6.99 | 6/7/2550 | 7.57 | 6.93 | | | |
| 7/5/2550 | 7.93 | 6.99 | 9/7/2550 | 7.94 | 6.75 | | | |
| 9/5/2550 | 7.37 | 7.21 | 11/7/2550 | 7.99 | 6.78 | | | |
| 11/5/2550 | 7.01 | 6.93 | 13/7/2550 | 8.24 | 6.88 | | | |
| 14/5/2550 | 8.07 | 7.30 | 15/7/2550 | 8.16 | 6.87 | | | |
| 16/5/2550 | 7.89 | 6.89 | 17/7/2550 | 7.88 | 6.81 | | | |
| 19/5/2550 | 7.89 | 6.75 | 20/7/2550 | 7.83 | 6.82 | | | |
| 21/5/2550 | 7.69 | 6.89 | 24/7/2550 | 7.57 | 6.69 | | | |
| 23/5/2550 | 7.94 | 6.87 | 27/7/2550 | 7.66 | 6.83 | | | |
| 25/5/2550 | 7.98 | 6.44 | 31/7/2550 | 7.75 | 6.87 | | | |
| จำนวน | 24 | 24 | จำนวน | 24 | 24 | จำนวน | 9 | 9 |
| ค่าเฉลี่ย | 7.80 | 7.05 | ค่าเฉลี่ย | 7.86 | 6.80 | ค่าเฉลี่ย | 8.05 | 6.92 |
| SD | 0.28 | 0.31 | SD | 0.27 | 0.09 | SD | 0.18 | 0.07 |
| ค่าสูงสุด | 8.20 | 7.96 | ค่าสูงสุด | 8.24 | 6.99 | ค่าสูงสุด | 8.46 | 6.99 |
| ค่าต่ำสุด | 7.01 | 6.44 | ค่าต่ำสุด | 7.00 | 6.57 | ค่าต่ำสุด | 7.90 | 6.78 |

ตารางที่ ข.4 สภาพต่างทั้งหมดของชุดการทดลองที่ 2

| สภาพต่างทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต) | | | | | | | | |
|---|--|--------|-------------------|--|--------|-------------------|--|--------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | |
| วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 1,000 | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 1,500 | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 2,000 | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก |
| 2/4/2550 | 585 | 648 | 1/6/2550 | 544 | 630 | 3/8/2550 | 737 | 890 |
| 4/4/2550 | 567 | 645 | 3/6/2550 | 587 | 659 | 7/8/2550 | 789 | 910 |
| 6/4/2550 | 589 | 670 | 6/6/2550 | 509 | 667 | 9/8/2550 | 743 | 880 |
| 9/4/2550 | 545 | 656 | 8/6/2550 | 576 | 726 | 11/8/2550 | 758 | 790 |
| 11/4/2550 | 535 | 676 | 10/6/2550 | 507 | 763 | 14/8/2550 | 720 | 786 |
| 14/4/2550 | 532 | 694 | 12/6/2550 | 530 | 792 | 16/8/2550 | 735 | 798 |
| 16/4/2550 | 564 | 619 | 14/6/2550 | 551 | 690 | 18/8/2550 | 722 | 866 |
| 18/4/2550 | 567 | 655 | 17/6/2550 | 690 | 766 | 22/8/2550 | 754 | 875 |
| 20/4/2550 | 587 | 680 | 20/6/2550 | 578 | 780 | 26/8/2550 | 718 | 823 |
| 23/4/2550 | 567 | 588 | 26/6/2550 | 623 | 687 | | | |
| 25/4/2550 | 564 | 621 | 28/6/2550 | 523 | 743 | | | |
| 28/4/2550 | 538 | 598 | 30/6/2550 | 487 | 792 | | | |
| 30/4/2550 | 589 | 557 | 2/7/2550 | 589 | 698 | | | |
| 2/5/2550 | 515 | 576 | 4/7/2550 | 495 | 629 | | | |
| 4/5/2550 | 523 | 598 | 6/7/2550 | 488 | 710 | | | |
| 7/5/2550 | 578 | 623 | 9/7/2550 | 490 | 680 | | | |
| 9/5/2550 | 520 | 590 | 11/7/2550 | 503 | 622 | | | |
| 11/5/2550 | 539 | 610 | 13/7/2550 | 523 | 692 | | | |
| 14/5/2550 | 549 | 629 | 15/7/2550 | 509 | 735 | | | |
| 16/5/2550 | 550 | 642 | 17/7/2550 | 510 | 667 | | | |
| 19/5/2550 | 490 | 559 | 20/7/2550 | 498 | 687 | | | |
| 21/5/2550 | 498 | 689 | 24/7/2550 | 502 | 730 | | | |
| 23/5/2550 | 535 | 651 | 27/7/2550 | 510 | 755 | | | |
| 25/5/2550 | 497 | 624 | 31/7/2550 | 478 | 661 | | | |
| จำนวน | 24 | 24 | จำนวน | 24 | 24 | จำนวน | 9 | 9 |
| ค่าเฉลี่ย | 546.8 | 629.1 | ค่าเฉลี่ย | 533.3 | 706.7 | ค่าเฉลี่ย | 741.8 | 846.4 |
| SD | 29.83 | 39.34 | SD | 50.97 | 51.36 | SD | 22.76 | 47.43 |
| ค่าสูงสุด | 589 | 694 | ค่าสูงสุด | 690.0 | 792.0 | ค่าสูงสุด | 789.0 | 910.0 |
| ค่าต่ำสุด | 490 | 557 | ค่าต่ำสุด | 478.0 | 622 | ค่าต่ำสุด | 718.0 | 786.0 |

ตารางที่ ข.5 กรดไขมันระเหยของชุดการทดลองที่ 2

| กรดไขมันระเหย (มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต) | | | | | | | | |
|---|--|--------|-------------------|--|--------|-------------------|--|--------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | |
| วัน/เดือน/ ปี | NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 1,000 | | วัน/เดือน/ ปี | NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 1,500 | | วัน/เดือน/ ปี | NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 2,000 | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก |
| 2/4/2550 | 194 | 230 | 1/6/2550 | 195 | 221 | 3/8/2550 | 167 | 155 |
| 4/4/2550 | 200 | 225 | 3/6/2550 | 298 | 319 | 7/8/2550 | 174 | 210 |
| 6/4/2550 | 240 | 310 | 6/6/2550 | 223 | 241 | 9/8/2550 | 200 | 265 |
| 9/4/2550 | 232 | 320 | 8/6/2550 | 205 | 266 | 11/8/2550 | 179 | 262 |
| 11/4/2550 | 258 | 270 | 10/6/2550 | 230 | 271 | 14/8/2550 | 187 | 210 |
| 14/4/2550 | 249 | 264 | 12/6/2550 | 290 | 285 | 16/8/2550 | 220 | 264 |
| 16/4/2550 | 230 | 285 | 14/6/2550 | 253 | 274 | 18/8/2550 | 250 | 275 |
| 18/4/2550 | 208 | 221 | 17/6/2550 | 272 | 286 | 22/8/2550 | 190 | 230 |
| 20/4/2550 | 230 | 275 | 20/6/2550 | 211 | 243 | 26/8/2550 | 180 | 260 |
| 23/4/2550 | 240 | 284 | 26/6/2550 | 269 | 238 | | | |
| 25/4/2550 | 203 | 265 | 28/6/2550 | 210 | 240 | | | |
| 28/4/2550 | 210 | 230 | 30/6/2550 | 185 | 246 | | | |
| 30/4/2550 | 207 | 245 | 2/7/2550 | 170 | 183 | | | |
| 2/5/2550 | 218 | 245 | 4/7/2550 | 230 | 250 | | | |
| 4/5/2550 | 229 | 240 | 6/7/2550 | 241 | 278 | | | |
| 7/5/2550 | 216 | 256 | 9/7/2550 | 264 | 290 | | | |
| 9/5/2550 | 231 | 280 | 11/7/2550 | 226 | 255 | | | |
| 11/5/2550 | 220 | 290 | 13/7/2550 | 210 | 298 | | | |
| 14/5/2550 | 231 | 319 | 15/7/2550 | 180 | 211 | | | |
| 16/5/2550 | 210 | 270 | 17/7/2550 | 205 | 243 | | | |
| 19/5/2550 | 198 | 220 | 20/7/2550 | 220 | 232 | | | |
| 21/5/2550 | 230 | 250 | 24/7/2550 | 230 | 271 | | | |
| 23/5/2550 | 247 | 286 | 27/7/2550 | 244 | 299 | | | |
| 25/5/2550 | 255 | 290 | 31/7/2550 | 225 | 254 | | | |
| จำนวน | 24 | 24 | จำนวน | 24 | 24 | จำนวน | 9 | 9 |
| ค่าเฉลี่ย | 224.4 | 265.4 | ค่าเฉลี่ย | 228.6 | 258.1 | ค่าเฉลี่ย | 194.1 | 236.8 |
| SD | 18.32 | 29.88 | SD | 33.24 | 31.05 | SD | 26.13 | 39.28 |
| ค่าสูงสุด | 258.0 | 320.0 | ค่าสูงสุด | 298.0 | 319.0 | ค่าสูงสุด | 250.0 | 275.0 |
| ค่าต่ำสุด | 194.0 | 220.0 | ค่าต่ำสุด | 170.0 | 183.0 | ค่าต่ำสุด | 167.0 | 155.0 |

ตารางที่ ข.6 ซีโอดีของชุดการทดลองที่ 2

| ซีโอดี (มีลิกรัมต่อลิตร) | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|--|--------|----------|-------------------|--|--------|----------|-------------------|--|--------|----------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | | |
| วัน/เดือน/ ปี | NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 1,000 | | | วัน/เดือน/ ปี | NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 1,500 | | | วัน/เดือน/ ปี | NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 2,000 | | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | %removal | | น้ำเข้า | น้ำออก | %removal | | น้ำเข้า | น้ำออก | %removal |
| 2/4/2550 | 1058 | 157 | 85.16 | 1/6/2550 | 1155 | 122 | 89.44 | 3/8/2550 | 1022 | 81 | 92.07 |
| 4/4/2550 | 1204 | 140 | 88.37 | 3/6/2550 | 1067 | 98 | 90.82 | 7/8/2550 | 986 | 100 | 89.86 |
| 6/4/2550 | 1048 | 108 | 89.69 | 6/6/2550 | 958 | 79 | 91.75 | 9/8/2550 | 1005 | 72 | 92.84 |
| 9/4/2550 | 1294 | 110 | 91.50 | 8/6/2550 | 1003 | 69 | 93.12 | 11/8/2550 | 1100 | 98 | 91.09 |
| 11/4/2550 | 1373 | 86 | 93.74 | 10/6/2550 | 997 | 77 | 92.28 | 14/8/2550 | 1023 | 89 | 91.30 |
| 14/4/2550 | 1010 | 124 | 87.72 | 12/6/2550 | 1010 | 56 | 94.46 | 16/8/2550 | 1006 | 91 | 90.95 |
| 16/4/2550 | 1004 | 107 | 89.34 | 14/6/2550 | 978 | 50 | 94.89 | 18/8/2550 | 989 | 78 | 92.11 |
| 18/4/2550 | 990 | 77 | 92.22 | 17/6/2550 | 993 | 47 | 95.27 | 21/8/2550 | 994 | 85 | 91.45 |
| 20/4/2550 | 968 | 80 | 91.74 | 20/6/2550 | 1002 | 63 | 93.71 | 23/8/2550 | 1010 | 90 | 91.09 |
| 23/4/2550 | 988 | 69 | 93.02 | 26/6/2550 | 1067 | 62 | 94.19 | 26/8/2550 | 1023 | 120 | 88.27 |
| 25/4/2550 | 957 | 65 | 93.21 | 28/6/2550 | 899 | 47 | 94.77 | | | | |
| 28/4/2550 | 987 | 92 | 90.68 | 30/6/2550 | 987 | 42 | 95.74 | | | | |
| 30/4/2550 | 1003 | 98 | 90.23 | 2/7/2550 | 998 | 39 | 96.09 | | | | |
| 2/5/2550 | 1084 | 38 | 96.49 | 4/7/2550 | 976 | 33 | 96.62 | | | | |
| 4/5/2550 | 997 | 88 | 91.17 | 6/7/2550 | 958 | 58 | 93.94 | | | | |
| 7/5/2550 | 946 | 56 | 94.08 | 9/7/2550 | 1003 | 49 | 95.13 | | | | |
| 9/5/2550 | 986 | 55 | 94.42 | 11/7/2550 | 997 | 30 | 96.99 | | | | |
| 11/5/2550 | 967 | 58 | 94.00 | 13/7/2550 | 956 | 41 | 95.71 | | | | |
| 14/5/2550 | 1004 | 45 | 95.52 | 15/7/2550 | 979 | 32 | 96.73 | | | | |
| 16/5/2550 | 986 | 53 | 94.62 | 17/7/2550 | 1004 | 54 | 94.62 | | | | |
| 19/5/2550 | 998 | 58 | 94.19 | 20/7/2550 | 988 | 79 | 92.00 | | | | |
| 21/5/2550 | 991 | 42 | 95.76 | 24/7/2550 | 1137 | 47 | 95.86 | | | | |
| 23/5/2550 | 989 | 37 | 96.26 | 27/7/2550 | 998 | 40 | 95.99 | | | | |
| 25/5/2550 | 998 | 40 | 95.99 | 31/7/2550 | 1009 | 43 | 95.74 | | | | |
| จำนวน | 24 | 24 | 24 | จำนวน | 24 | 24 | 24 | จำนวน | 10 | 10 | 10 |
| ค่าเฉลี่ย | 1034.58 | 78.46 | 92.46 | ค่าเฉลี่ย | 1004.93 | 56.54 | 94.41 | ค่าเฉลี่ย | 1015.80 | 90.40 | 91.10 |
| SD | 106.17 | 33.31 | 2.98 | SD | 54.81 | 21.99 | 1.96 | SD | 32.59 | 13.49 | 1.28 |
| ค่าสูงสุด | 1373 | 157 | 96 | ค่าสูงสุด | 1155 | 122 | 97 | ค่าสูงสุด | 1100 | 120 | 93 |
| ค่าต่ำสุด | 946 | 37 | 85 | ค่าต่ำสุด | 899 | 30 | 89 | ค่าต่ำสุด | 986 | 72 | 88 |

ตารางที่ ข.7 ไนเตรทของชุดการทดลองที่ 2

| ไนเตรท (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|---|--------|----------|-------------------|---|--------|----------|-------------------|---|--------|----------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | | |
| วัน/เดือน/ปี | NO ₃ : Cl ⁻ = 100 : 1,000 | | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ : Cl ⁻ = 100 : 1,500 | | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ : Cl ⁻ = 100 : 2,000 | | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | %removal | | น้ำเข้า | น้ำออก | %removal | | น้ำเข้า | น้ำออก | %removal |
| 2/4/2550 | 107.58 | 1.89 | 98.24 | 1/6/2550 | 98.79 | 0.23 | 99.77 | 3/8/2550 | 89.99 | 0.29 | 99.68 |
| 4/4/2550 | 110.24 | 1.78 | 98.39 | 3/6/2550 | 97.11 | 0.00 | 100.00 | 7/8/2550 | 107.56 | 0.61 | 99.43 |
| 6/4/2550 | 104.98 | 1.46 | 98.61 | 6/6/2550 | 124.96 | 0.00 | 100.00 | 9/8/2550 | 106.27 | 0.70 | 99.34 |
| 9/4/2550 | 129.64 | 1.46 | 98.87 | 8/6/2550 | 118.88 | 0.63 | 99.47 | 11/8/2550 | 78.98 | 1.45 | 98.16 |
| 11/4/2550 | 137.83 | 0.26 | 99.81 | 10/6/2550 | 120.97 | 1.22 | 98.99 | 14/8/2550 | 89.01 | 2.55 | 97.14 |
| 14/4/2550 | 101.10 | 0.95 | 99.06 | 12/6/2550 | 105.44 | 0.51 | 99.52 | 16/8/2550 | 118.09 | 0.88 | 99.25 |
| 16/4/2550 | 100.14 | 1.09 | 98.91 | 14/6/2550 | 88.91 | 0.44 | 99.51 | 18/8/2550 | 87.13 | 0.35 | 99.60 |
| 18/4/2550 | 99.46 | 0.34 | 99.66 | 17/6/2550 | 98.98 | 0.37 | 99.63 | 22/8/2550 | 98.98 | 0.76 | 99.23 |
| 20/4/2550 | 96.98 | 0.56 | 99.42 | 20/6/2550 | 113.98 | 0.71 | 99.38 | 26/8/2550 | 76.99 | 0.19 | 99.75 |
| 23/4/2550 | 107.62 | 1.02 | 99.05 | 26/6/2550 | 143.91 | 0.62 | 99.57 | | | | |
| 25/4/2550 | 95.87 | 0.00 | 100.00 | 28/6/2550 | 97.68 | 0.78 | 99.20 | | | | |
| 28/4/2550 | 122.95 | 0.76 | 99.38 | 30/6/2550 | 106.78 | 0.35 | 99.67 | | | | |
| 30/4/2550 | 110.32 | 0.68 | 99.38 | 2/7/2550 | 105.89 | 0.00 | 100.00 | | | | |
| 2/5/2550 | 108.64 | 0.46 | 99.58 | 4/7/2550 | 106.87 | 1.05 | 99.02 | | | | |
| 4/5/2550 | 113.22 | 0.77 | 99.32 | 6/7/2550 | 76.97 | 2.53 | 96.71 | | | | |
| 7/5/2550 | 94.76 | 0.83 | 99.12 | 9/7/2550 | 106.78 | 0.86 | 99.19 | | | | |
| 9/5/2550 | 112.17 | 0.36 | 99.68 | 11/7/2550 | 107.66 | 0.55 | 99.49 | | | | |
| 11/5/2550 | 125.36 | 0.00 | 100.00 | 13/7/2550 | 123.84 | 0.91 | 99.27 | | | | |
| 14/5/2550 | 108.46 | 0.89 | 99.18 | 15/7/2550 | 131.98 | 0.56 | 99.58 | | | | |
| 16/5/2550 | 104.47 | 1.09 | 98.96 | 17/7/2550 | 116.89 | 0.43 | 99.63 | | | | |
| 19/5/2550 | 101.49 | 0.43 | 99.58 | 20/7/2550 | 104.56 | 0.65 | 99.38 | | | | |
| 21/5/2550 | 97.89 | 0.32 | 99.67 | 24/7/2550 | 104.56 | 0.24 | 99.77 | | | | |
| 23/5/2550 | 91.68 | 1.22 | 98.67 | 27/7/2550 | 105.85 | 0.55 | 99.48 | | | | |
| 25/5/2550 | 120.78 | 0.65 | 99.46 | 31/7/2550 | 106.91 | 0.61 | 99.43 | | | | |
| จำนวน | 24 | 24 | 24 | จำนวน | 24 | 24 | 24 | จำนวน | 9 | 9 | 9 |
| ค่าเฉลี่ย | 108.48 | 0.80 | 99.25 | ค่าเฉลี่ย | 108.96 | 0.62 | 99.40 | ค่าเฉลี่ย | 94.78 | 0.86 | 99.07 |
| SD | 11.71 | 0.51 | 0.48 | SD | 14.06 | 0.51 | 0.63 | SD | 13.86 | 0.74 | 0.86 |
| ค่าสูงสุด | 137.83 | 1.89 | 100.00 | ค่าสูงสุด | 143.91 | 2.53 | 100.00 | ค่าสูงสุด | 118.09 | 2.55 | 99.75 |
| ค่าต่ำสุด | 91.68 | 0.00 | 98.24 | ค่าต่ำสุด | 76.97 | 0.00 | 96.71 | ค่าต่ำสุด | 76.99 | 0.19 | 97.14 |

ตารางที่ ข.8 คลอไรด์ของชุดการทดลองที่ 2

| คลอไรด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|--|---------|----------|-------------------|--|---------|----------|-------------------|--|---------|----------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | | |
| วัน/เดือน/ ปี | NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 1,000 | | | วัน/เดือน/ ปี | NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 1,500 | | | วัน/เดือน/ ปี | NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 2,000 | | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | %removal | | น้ำเข้า | น้ำออก | %removal | | น้ำเข้า | น้ำออก | %removal |
| 2/4/2550 | 1125 | 1047 | 6.93 | 1/6/2550 | 1659 | 1580 | 4.76 | 7/8/2550 | 2156 | 2215 | 0.00 |
| 4/4/2550 | 1204 | 1125 | 6.56 | 6/6/2550 | 1702 | 1636 | 3.88 | 11/8/2550 | 2024 | 1971 | 2.62 |
| 11/4/2550 | 1370 | 1288 | 5.99 | 10/6/2550 | 1599 | 1512 | 5.44 | 16/8/2550 | 2140 | 2063 | 3.60 |
| 14/4/2550 | 1189 | 1106 | 6.98 | 14/6/2550 | 1690 | 1646 | 2.60 | 21/8/2550 | 2308 | 2289 | 0.82 |
| 18/4/2550 | 1049 | 1005 | 4.19 | 20/6/2550 | 1502 | 1466 | 2.40 | 23/8/2550 | 2189 | 2004 | 8.45 |
| 25/4/2550 | 1150 | 1062 | 7.65 | 26/6/2550 | 1602 | 1534 | 4.24 | | | | |
| 30/4/2550 | 1130 | 1052 | 6.90 | 30/6/2550 | 1670 | 1602 | 4.07 | | | | |
| 4/5/2550 | 1120 | 1240 | 0.00 | 4/7/2550 | 1629 | 1534 | 5.83 | | | | |
| 9/5/2550 | 1155 | 1073 | 7.10 | 9/7/2550 | 1644 | 1608 | 2.19 | | | | |
| 14/5/2550 | 1159 | 1075 | 7.25 | 13/7/2550 | 1504 | 1611 | 0.00 | | | | |
| 19/5/2550 | 1106 | 1020 | 7.78 | 17/7/2550 | 1765 | 1697 | 3.85 | | | | |
| 23/5/2550 | 1075 | 987 | 8.19 | 24/7/2550 | 1479 | 1433 | 3.11 | | | | |
| | | | | 31/7/2550 | 1588 | 1455 | 8.38 | | | | |
| จำนวน | 12 | 12 | 12 | จำนวน | 13 | 13 | 13 | จำนวน | 5 | 5 | 5 |
| ค่าเฉลี่ย | 1152.67 | 1090.00 | 6.29 | ค่าเฉลี่ย | 1617.92 | 1562.62 | 3.90 | ค่าเฉลี่ย | 2163.40 | 2108.40 | 3.10 |
| SD | 81.21 | 90.71 | 2.23 | SD | 84.81 | 80.92 | 2.04 | SD | 101.98 | 137.68 | 3.31 |
| ค่าสูงสุด | 1370 | 1288 | 8.19 | ค่าสูงสุด | 1765 | 1697 | 8.38 | ค่าสูงสุด | 2308 | 2289 | 8.45 |
| ค่าต่ำสุด | 1049 | 987 | 0.00 | ค่าต่ำสุด | 1479 | 1433 | 0.00 | ค่าต่ำสุด | 2024 | 1971 | 0.00 |

ตารางที่ ข.9 ก๊าซชีวภาพของชุดการทดลองที่ 2

| ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร/วัน) | | | | | |
|----------------------------|--|-------------------|--|-------------------|--|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | ช่วงการทดลองที่ 3 | |
| วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 1,000 | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 1,500 | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 2,000 |
| 6/4/2550 | 4880 | 3/6/2550 | 5400 | 4/8/2550 | 5891 |
| 14/4/2550 | 5806 | 8/6/2550 | 5580 | 11/8/2550 | 5486 |
| 20/4/2550 | 6000 | 16/6/2550 | 5867 | 17/8/2550 | 5333 |
| 28/4/2550 | 5977 | 24/6/2550 | 5620 | 25/8/2550 | 5574 |
| 4/5/2550 | 6207 | 1/7/2550 | 5971 | | |

ตารางที่ ข.9 ก๊าซชีวภาพของชุดการทดลองที่ 2 (ต่อ)

| ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร/วัน) | | | | | |
|----------------------------|--|-------------------|--|-------------------|--|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | ช่วงการทดลองที่ 3 | |
| วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 1,000 | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 2,000 | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 1,500 |
| 11/5/2550 | 6171 | 8/7/2550 | 6090 | | |
| 21/5/2550 | 6336 | 15/7/2550 | 5838 | | |
| 29/5/2550 | 6261 | 22/7/2550 | 5832 | | |
| | | 28/7/2550 | 5750 | | |
| จำนวน | 8 | จำนวน | 9 | จำนวน | 4 |
| ค่าเฉลี่ย | 5955 | ค่าเฉลี่ย | 5772 | ค่าเฉลี่ย | 5571 |
| SD | 467 | SD | 211 | SD | 235 |
| ค่าสูงสุด | 6336 | ค่าสูงสุด | 6090 | ค่าสูงสุด | 5891 |
| ค่าต่ำสุด | 4880 | ค่าต่ำสุด | 5400 | ค่าต่ำสุด | 5333 |

ตารางที่ ข.10 ของแข็งแขวนลอยของชุดการทดลองที่ 2

| ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | | | | | | | |
|-------------------------------------|--|--------|-------------------|--|--------|-------------------|--|--------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | |
| วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 1,000 | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 1,500 | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 2,000 | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก |
| 2/4/2550 | - | 52.31 | 1/6/2550 | - | 47.83 | 9/8/2550 | - | 20.15 |
| 11/4/2550 | - | 45.67 | 6/6/2550 | - | 30.37 | 11/8/2550 | - | 34.50 |
| 18/4/2550 | - | 34.23 | 12/6/2550 | - | 36.25 | 14/8/2550 | - | 30.56 |
| 25/4/2550 | - | 27.25 | 16/6/2550 | - | 32.64 | 18/8/2550 | - | 55.91 |
| 2/5/2550 | - | 24.16 | 23/6/2550 | - | 19.17 | 23/8/2550 | - | 53.44 |
| 11/5/2550 | - | 23.99 | 28/6/2550 | - | 17.35 | 25/8/2550 | - | 52.17 |
| 19/5/2550 | - | 23.67 | 6/7/2550 | - | 15.44 | | | |
| 25/5/2550 | - | 21.46 | 11/7/2550 | - | 14.35 | | | |
| 29/5/2550 | - | 18.79 | 17/7/2550 | - | 16.76 | | | |
| | | | 24/7/2550 | - | 15.32 | | | |
| | | | 31/7/2550 | - | 13.88 | | | |
| จำนวน | - | 9 | จำนวน | - | 11 | จำนวน | - | 6 |
| ค่าเฉลี่ย | - | 30.2 | ค่าเฉลี่ย | - | 23.6 | ค่าเฉลี่ย | - | 41.1 |
| SD | - | 11.60 | SD | - | 11.38 | SD | - | 14.75 |
| ค่าสูงสุด | - | 52.3 | ค่าสูงสุด | - | 47.8 | ค่าสูงสุด | - | 55.9 |
| ค่าต่ำสุด | - | 18.8 | ค่าต่ำสุด | - | 13.9 | ค่าต่ำสุด | - | 20.2 |

ภาคผนวก ค

ผลการทดลองของชุดการทดลองที่ 3 ที่มีสารบรอนประเภทไนไตรท์

ตารางที่ ค.1 คุณณหภูมิจุดการทดลองที่ 3

| คุณณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | | | | | | | | |
|--------------------------|---|--------|-------------------|--|--------|-------------------|--|--------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | |
| วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ :NO ₂ ⁻ = 100 : 50 | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ :NO ₂ ⁻ = 100 : 100 | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ :NO ₂ ⁻ = 100 : 200 | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก |
| 2/4/2550 | 30.3 | 30.4 | 1/6/2550 | 29.6 | 29.8 | 24/7/2550 | 29.1 | 29.2 |
| 4/4/2550 | 30.5 | 31.0 | 4/6/2550 | 29.5 | 29.8 | 27/7/2550 | 28.8 | 29.0 |
| 6/4/2550 | 29.0 | 29.4 | 6/6/2550 | 29.4 | 29.5 | 31/7/2550 | 28.6 | 28.9 |
| 9/4/2550 | 28.0 | 28.1 | 8/6/2550 | 29.1 | 29.9 | 3/8/2550 | 27.5 | 28.2 |
| 11/4/2550 | 29.8 | 30.0 | 10/6/2550 | 29.0 | 29.4 | 5/8/2550 | 28.6 | 28.9 |
| 16/4/2550 | 30.1 | 30.4 | 12/6/2550 | 28.0 | 28.4 | 7/8/2550 | 30.1 | 29.4 |
| 18/4/2550 | 29.1 | 29.3 | 14/6/2550 | 28.4 | 29.0 | 9/8/2550 | 28.4 | 28.1 |
| 20/4/2550 | 28.5 | 28.7 | 17/6/2550 | 27.0 | 27.4 | 11/8/2550 | 29.3 | 29.3 |
| 23/4/2550 | 30.1 | 30.2 | 20/6/2550 | 29.1 | 29.6 | 14/8/2550 | 29.4 | 29.5 |
| 25/4/2550 | 32.0 | 32.4 | 23/6/2550 | 31.2 | 31.4 | 16/8/2550 | 29.1 | 28.3 |
| 28/4/2550 | 29.5 | 29.7 | 26/6/2550 | 31.4 | 31.6 | 18/8/2550 | 29.2 | 29.4 |
| 30/4/2550 | 29.1 | 29.3 | 28/6/2550 | 28.6 | 28.9 | 21/8/2550 | 29.4 | 29.7 |
| 2/5/2550 | 29.9 | 30.4 | 30/6/2550 | 29.0 | 29.3 | 23/8/2550 | 29.3 | 29.6 |
| 4/5/2550 | 29.2 | 29.4 | 2/7/2550 | 30.0 | 30.2 | 25/8/2550 | 29.1 | 29.3 |
| 7/5/2550 | 30.1 | 30.3 | 4/7/2550 | 30.2 | 30.8 | 28/8/2550 | 29.4 | 29.6 |
| 9/5/2550 | 30.4 | 30.4 | 6/7/2550 | 29.8 | 30.0 | 31/8/2550 | 30.6 | 30.7 |
| 11/5/2550 | 31.0 | 31.2 | 9/7/2550 | 28.7 | 28.7 | 3/9/2550 | 29.7 | 30.1 |
| 14/5/2550 | 30.5 | 30.7 | 11/7/2550 | 28.1 | 28.5 | 5/9/2550 | 30.5 | 30.7 |
| 16/5/2550 | 29.7 | 29.8 | 13/7/2550 | 30.0 | 29.4 | 8/9/2550 | 29.1 | 29.4 |
| 19/5/2550 | 29.8 | 30.1 | 15/7/2550 | 30.1 | 30.4 | 10/9/2550 | 28.2 | 28.5 |
| 21/5/2550 | 28.4 | 29.0 | 18/7/2550 | 30.6 | 30.7 | 12/9/2550 | 28.8 | 29.0 |
| 23/5/2550 | 28.5 | 28.8 | 21/7/2550 | 29.7 | 30.1 | 14/9/2550 | 28.5 | 26.7 |
| 25/5/2550 | 30.0 | 30.2 | | | | | | |
| 29/5/2550 | 31.2 | 31.4 | | | | | | |
| จำนวน | 24 | 24 | จำนวน | 22 | 22 | จำนวน | 22 | 22 |
| ค่าเฉลี่ย | 29.8 | 30.0 | ค่าเฉลี่ย | 29.4 | 29.7 | ค่าเฉลี่ย | 29.1 | 29.2 |
| SD | 0.95 | 0.96 | SD | 1.04 | 0.99 | SD | 0.72 | 0.88 |
| ค่าสูงสุด | 32.0 | 32.4 | ค่าสูงสุด | 31.4 | 31.6 | ค่าสูงสุด | 30.6 | 30.7 |
| ค่าต่ำสุด | 28.0 | 28.1 | ค่าต่ำสุด | 27.0 | 27.4 | ค่าต่ำสุด | 27.5 | 26.7 |

ตารางที่ ค.2 ไออาร์พีของชุดการทดลองที่ 3

| ไออาร์พี (มิลลิโวลท์) | | | | | | | | |
|-----------------------|--|--------|-------------------|---|--------|-------------------|---|--------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | |
| วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : NO ₂ ⁻ = 100 : 50 | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : NO ₂ ⁻ = 100 : 100 | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : NO ₂ ⁻ = 100 : 200 | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก |
| 2/4/2550 | - | -272 | 1/6/2550 | - | -320 | 24/7/2550 | - | -313 |
| 4/4/2550 | - | -288 | 4/6/2550 | - | -302 | 27/7/2550 | - | -337 |
| 6/4/2550 | - | -345 | 6/6/2550 | - | -290 | 31/7/2550 | - | -350 |
| 9/4/2550 | - | -261 | 8/6/2550 | - | -224 | 3/8/2550 | - | -342 |
| 11/4/2550 | - | -320 | 10/6/2550 | - | -324 | 5/8/2550 | - | -297 |
| 16/4/2550 | - | -336 | 12/6/2550 | - | -350 | 7/8/2550 | - | -288 |
| 18/4/2550 | - | -300 | 14/6/2550 | - | -370 | 9/8/2550 | - | -298 |
| 20/4/2550 | - | -352 | 17/6/2550 | - | -356 | 11/8/2550 | - | -300 |
| 23/4/2550 | - | -366 | 20/6/2550 | - | -300 | 14/8/2550 | - | -353 |
| 25/4/2550 | - | -315 | 22/6/2550 | - | -310 | 16/8/2550 | - | -324 |
| 28/4/2550 | - | -291 | 23/6/2550 | - | -365 | 18/8/2550 | - | -346 |
| 30/4/2550 | - | -327 | 26/6/2550 | - | -351 | 21/8/2550 | - | -321 |
| 2/5/2550 | - | -333 | 28/6/2550 | - | -368 | 23/8/2550 | - | -355 |
| 4/5/2550 | - | -327 | 30/6/2550 | - | -315 | 25/8/2550 | - | -310 |
| 7/5/2550 | - | -355 | 2/7/2550 | - | -366 | 28/8/2550 | - | -354 |
| 9/5/2550 | - | -374 | 4/7/2550 | - | -277 | 31/8/2550 | - | -345 |
| 11/5/2550 | - | -380 | 6/7/2550 | - | -293 | 3/9/2550 | - | -320 |
| 14/5/2550 | - | -354 | 9/7/2550 | - | -363 | 5/9/2550 | - | -354 |
| 16/5/2550 | - | -337 | 11/7/2550 | - | -357 | 8/9/2550 | - | -338 |
| 19/5/2550 | - | -341 | 13/7/2550 | - | -384 | 10/9/2550 | - | -335 |
| 21/5/2550 | - | -310 | 15/7/2550 | - | -326 | 12/9/2550 | - | -315 |
| 23/5/2550 | - | -388 | 18/7/2550 | - | -331 | 14/9/2550 | - | -360 |
| 25/5/2550 | - | -390 | 21/7/2550 | - | -317 | | | |
| 29/5/2550 | - | -326 | | | | | | |
| จำนวน | - | 24 | จำนวน | - | 23 | จำนวน | - | 22 |
| ค่าเฉลี่ย | - | -332.8 | ค่าเฉลี่ย | - | -328.7 | ค่าเฉลี่ย | - | -329.8 |
| SD | - | 34.70 | SD | - | 37.79 | SD | - | 22.12 |
| ค่าสูงสุด | - | -390 | ค่าสูงสุด | - | -384 | ค่าสูงสุด | - | -360 |
| ค่าต่ำสุด | - | -261 | ค่าต่ำสุด | - | -224 | ค่าต่ำสุด | - | -288 |

ตารางที่ ค.3 พีเอชของชุดการทดลองที่ 3

| พีเอช | | | | | | | | |
|-------------------|---|--------|-------------------|--|--------|-------------------|--|--------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | |
| วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ :NO ₂ ⁻ = 100 : 50 | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ :NO ₂ ⁻ = 100 : 100 | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ :NO ₂ ⁻ = 100 : 200 | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก |
| 2/4/2550 | 7.95 | 7.23 | 1/6/2550 | 8.00 | 7.42 | 24/7/2550 | 8.18 | 7.95 |
| 4/4/2550 | 7.91 | 7.35 | 4/6/2550 | 7.98 | 7.53 | 27/7/2550 | 8.13 | 7.88 |
| 6/4/2550 | 7.93 | 7.08 | 6/6/2550 | 8.00 | 7.47 | 31/7/2550 | 8.15 | 7.83 |
| 9/4/2550 | 7.90 | 7.09 | 8/6/2550 | 8.00 | 7.44 | 3/8/2550 | 8.22 | 7.96 |
| 11/4/2550 | 7.90 | 7.20 | 10/6/2550 | 7.86 | 7.56 | 5/8/2550 | 8.25 | 7.93 |
| 16/4/2550 | 7.79 | 7.29 | 12/6/2550 | 7.85 | 7.34 | 7/8/2550 | 7.92 | 7.79 |
| 18/4/2550 | 7.84 | 7.64 | 14/6/2550 | 8.20 | 7.45 | 9/8/2550 | 7.84 | 7.57 |
| 20/4/2550 | 8.13 | 7.27 | 17/6/2550 | 8.19 | 7.46 | 11/8/2550 | 7.82 | 7.36 |
| 23/4/2550 | 7.95 | 7.23 | 20/6/2550 | 8.10 | 7.51 | 14/8/2550 | 8.00 | 7.70 |
| 25/4/2550 | 7.94 | 7.34 | 23/6/2550 | 7.77 | 7.25 | 16/8/2550 | 7.89 | 7.57 |
| 28/4/2550 | 7.89 | 7.30 | 26/6/2550 | 8.30 | 7.57 | 18/8/2550 | 7.67 | 7.25 |
| 30/4/2550 | 7.90 | 7.49 | 28/6/2550 | 8.25 | 7.45 | 21/8/2550 | 7.86 | 7.43 |
| 2/5/2550 | 7.91 | 7.14 | 30/6/2550 | 8.15 | 7.34 | 23/8/2550 | 7.78 | 7.35 |
| 4/5/2550 | 7.60 | 7.26 | 2/7/2550 | 8.46 | 7.45 | 25/8/2550 | 7.75 | 7.24 |
| 7/5/2550 | 7.45 | 7.20 | 4/7/2550 | 8.25 | 7.39 | 28/8/2550 | 8.10 | 7.35 |
| 9/5/2550 | 7.62 | 6.84 | 6/7/2550 | 8.19 | 7.43 | 31/8/2550 | 7.99 | 7.15 |
| 11/5/2550 | 8.19 | 7.33 | 9/7/2550 | 8.25 | 7.46 | 3/9/2550 | 8.03 | 7.27 |
| 14/5/2550 | 7.93 | 7.52 | 11/7/2550 | 8.22 | 7.33 | 5/9/2550 | 7.59 | 7.35 |
| 16/5/2550 | 8.02 | 7.38 | 13/7/2550 | 8.44 | 7.45 | 8/9/2550 | 8.04 | 7.46 |
| 19/5/2550 | 7.66 | 7.32 | 15/7/2550 | 8.26 | 7.32 | 10/9/2550 | 7.85 | 7.57 |
| 21/5/2550 | 7.89 | 7.60 | 18/7/2550 | 7.98 | 7.46 | 12/9/2550 | 7.88 | 7.36 |
| 23/5/2550 | 8.01 | 7.20 | 21/7/2550 | 7.88 | 7.25 | 14/9/2550 | 7.75 | 7.40 |
| 25/5/2550 | 7.97 | 7.00 | | | | | | |
| 29/5/2550 | 7.99 | 7.35 | | | | | | |
| จำนวน | 24 | 24 | จำนวน | 22 | 22 | จำนวน | 22 | 22 |
| ค่าเฉลี่ย | 7.89 | 7.28 | ค่าเฉลี่ย | 8.1 | 7.4 | ค่าเฉลี่ย | 7.94 | 7.53 |
| SD | 0.16 | 0.18 | SD | 0.19 | 0.09 | SD | 0.18 | 0.26 |
| ค่าสูงสุด | 8.19 | 7.64 | ค่าสูงสุด | 8.46 | 7.57 | ค่าสูงสุด | 8.25 | 7.96 |
| ค่าต่ำสุด | 7.45 | 6.84 | ค่าต่ำสุด | 7.77 | 7.25 | ค่าต่ำสุด | 7.59 | 7.15 |

ตารางที่ ค.4 สภาพต่างทั้งหมดของชุดการทดลองที่ 3

| สภาพต่างทั้งหมด (มีลิกกรัมต่อลิตร ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต) | | | | | | | | |
|---|---|--------|-------------------|--|--------|-------------------|--|--------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | |
| วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ :NO ₂ ⁻ = 100 : 50 | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ :NO ₂ ⁻ = 100 : 100 | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ :NO ₂ ⁻ = 100 : 200 | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก |
| 2/4/2550 | 291 | 413 | 1/6/2550 | 302 | 705 | 24/7/2550 | 368 | 729 |
| 4/4/2550 | 285 | 390 | 4/6/2550 | 307 | 680 | 27/7/2550 | 357 | 710 |
| 6/4/2550 | 295 | 420 | 6/6/2550 | 310 | 679 | 31/7/2550 | 364 | 750 |
| 9/4/2550 | 277 | 430 | 8/6/2550 | 289 | 693 | 3/8/2550 | 371 | 730 |
| 11/4/2550 | 275 | 410 | 10/6/2550 | 293 | 694 | 5/8/2550 | 368 | 739 |
| 16/4/2550 | 265 | 392 | 12/6/2550 | 284 | 710 | 7/8/2550 | 381 | 771 |
| 18/4/2550 | 257 | 385 | 14/6/2550 | 288 | 720 | 9/8/2550 | 366 | 754 |
| 20/4/2550 | 256 | 419 | 17/6/2550 | 311 | 740 | 11/8/2550 | 356 | 759 |
| 23/4/2550 | 346 | 439 | 20/6/2550 | 317 | 768 | 14/8/2550 | 345 | 724 |
| 25/4/2550 | 344 | 478 | 23/6/2550 | 309 | 701 | 16/8/2550 | 368 | 736 |
| 28/4/2550 | 278 | 524 | 26/6/2550 | 315 | 698 | 18/8/2550 | 359 | 755 |
| 30/4/2550 | 276 | 490 | 28/6/2550 | 320 | 687 | 21/8/2550 | 356 | 765 |
| 2/5/2550 | 265 | 487 | 30/6/2550 | 300 | 684 | 23/8/2550 | 375 | 745 |
| 4/5/2550 | 275 | 455 | 2/7/2550 | 352 | 690 | 25/8/2550 | 368 | 726 |
| 7/5/2550 | 265 | 442 | 4/7/2550 | 354 | 692 | 28/8/2550 | 310 | 699 |
| 9/5/2550 | 268 | 434 | 6/7/2550 | 319 | 674 | 31/8/2550 | 332 | 712 |
| 11/5/2550 | 310 | 476 | 9/7/2550 | 320 | 720 | 3/9/2550 | 353 | 732 |
| 14/5/2550 | 307 | 451 | 11/7/2550 | 326 | 719 | 5/9/2550 | 378 | 730 |
| 16/5/2550 | 296 | 439 | 13/7/2550 | 352 | 730 | 8/9/2550 | 386 | 689 |
| 19/5/2550 | 257 | 427 | 15/7/2550 | 331 | 721 | 10/9/2550 | 390 | 678 |
| 21/5/2550 | 287 | 468 | 18/7/2550 | 310 | 730 | 12/9/2550 | 379 | 721 |
| 23/5/2550 | 255 | 426 | 21/7/2550 | 344 | 709 | 14/9/2550 | 358 | 723 |
| 25/5/2550 | 284 | 473 | | | | | | |
| 29/5/2550 | 233 | 447 | | | | | | |
| จำนวน | 24 | 24 | จำนวน | 22 | 22 | จำนวน | 22 | 22 |
| ค่าเฉลี่ย | 281.1 | 442.3 | ค่าเฉลี่ย | 316.0 | 706.5 | ค่าเฉลี่ย | 363.1 | 730.8 |
| SD | 26.46 | 34.55 | SD | 20.62 | 22.98 | SD | 17.93 | 23.84 |
| ค่าสูงสุด | 346.0 | 524.0 | ค่าสูงสุด | 354.0 | 768.0 | ค่าสูงสุด | 390.0 | 771.0 |
| ค่าต่ำสุด | 233.0 | 385.0 | ค่าต่ำสุด | 284.0 | 674.0 | ค่าต่ำสุด | 310.0 | 678.0 |

ตารางที่ ค.5 กรดไขมันระเหยของชุดการทดลองที่ 3

| กรดไขมันระเหย (มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต) | | | | | | | | |
|---|--|--------|-------------------|---|--------|-------------------|---|--------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | |
| วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : NO ₂ ⁻ = 100 : 50 | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : NO ₂ ⁻ = 100 : 100 | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : NO ₂ ⁻ = 100 : 200 | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก |
| 2/4/2550 | 110 | 127 | 1/6/2550 | 89 | 120 | 24/7/2550 | 78 | 102 |
| 4/4/2550 | 96 | 147 | 4/6/2550 | 77 | 115 | 27/7/2550 | 88 | 106 |
| 6/4/2550 | 98 | 155 | 6/6/2550 | 65 | 134 | 31/7/2550 | 91 | 122 |
| 9/4/2550 | 102 | 177 | 8/6/2550 | 71 | 127 | 3/8/2550 | 90 | 137 |
| 11/4/2550 | 101 | 167 | 10/6/2550 | 60 | 114 | 5/8/2550 | 97 | 111 |
| 16/4/2550 | 108 | 110 | 12/6/2550 | 85 | 124 | 7/8/2550 | 81 | 120 |
| 18/4/2550 | 120 | 107 | 14/6/2550 | 89 | 137 | 9/8/2550 | 79 | 131 |
| 20/4/2550 | 107 | 116 | 17/6/2550 | 90 | 113 | 11/8/2550 | 74 | 109 |
| 23/4/2550 | 122 | 108 | 20/6/2550 | 91 | 107 | 14/8/2550 | 70 | 108 |
| 25/4/2550 | 117 | 117 | 23/6/2550 | 74 | 100 | 16/8/2550 | 63 | 105 |
| 28/4/2550 | 126 | 131 | 26/6/2550 | 76 | 117 | 18/8/2550 | 62 | 101 |
| 30/4/2550 | 127 | 148 | 28/6/2550 | 79 | 99 | 21/8/2550 | 60 | 98 |
| 2/5/2550 | 98 | 166 | 30/6/2550 | 80 | 104 | 23/8/2550 | 73 | 97 |
| 4/5/2550 | 108 | 143 | 2/7/2550 | 81 | 99 | 25/8/2550 | 72 | 90 |
| 7/5/2550 | 124 | 117 | 4/7/2550 | 79 | 98 | 28/8/2550 | 74 | 89 |
| 9/5/2550 | 135 | 105 | 6/7/2550 | 83 | 105 | 31/8/2550 | 70 | 92 |
| 11/5/2550 | 128 | 128 | 9/7/2550 | 86 | 109 | 3/9/2550 | 71 | 88 |
| 14/5/2550 | 122 | 120 | 11/7/2550 | 89 | 108 | 5/9/2550 | 80 | 89 |
| 16/5/2550 | 131 | 134 | 13/7/2550 | 64 | 117 | 8/9/2550 | 83 | 87 |
| 19/5/2550 | 147 | 118 | 15/7/2550 | 86 | 109 | 10/9/2550 | 85 | 81 |
| 21/5/2550 | 167 | 146 | 18/7/2550 | 70 | 117 | 12/9/2550 | 86 | 86 |
| 23/5/2550 | 125 | 131 | 21/7/2550 | 98 | 97 | 14/9/2550 | 77 | 82 |
| 25/5/2550 | 112 | 134 | | | | | | |
| 29/5/2550 | 95 | 107 | | | | | | |
| จำนวน | 24 | 24 | จำนวน | 22 | 22 | จำนวน | 22 | 22 |
| ค่าเฉลี่ย | 117.8 | 131.6 | ค่าเฉลี่ย | 80.1 | 112.3 | ค่าเฉลี่ย | 77.5 | 101.4 |
| SD | 17.25 | 20.71 | SD | 9.81 | 11.35 | SD | 9.75 | 15.61 |
| ค่าสูงสุด | 167.0 | 177.0 | ค่าสูงสุด | 98.0 | 137.0 | ค่าสูงสุด | 97.0 | 137.0 |
| ค่าต่ำสุด | 95.0 | 105.0 | ค่าต่ำสุด | 60.0 | 97.0 | ค่าต่ำสุด | 60.0 | 81.0 |

ตารางที่ ค.6 ซีไอดีของชุดการทดลองที่ 3

| ซีไอดี (มีลลิกรัมต่อลิตร) | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|--|--------|----------|-------------------|---|--------|----------|-------------------|---|--------|----------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | | |
| วัน/เดือน/ ปี | NO ₃ : NO ₂ = 100 : 50 | | | วัน/เดือน/ ปี | NO ₃ : NO ₂ = 100 : 100 | | | วัน/เดือน/ ปี | NO ₃ : NO ₂ = 100 : 200 | | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | %removal | | น้ำเข้า | น้ำออก | %removal | | น้ำเข้า | น้ำออก | %removal |
| 2/4/2550 | 1294 | 147 | 88.64 | 1/6/2550 | 1173 | 73 | 93.78 | 24/7/2550 | 1100 | 67 | 93.91 |
| 4/4/2550 | 1165 | 163 | 86.01 | 4/6/2550 | 1140 | 45 | 96.05 | 27/7/2550 | 998 | 98 | 90.18 |
| 6/4/2550 | 1204 | 178 | 85.22 | 6/6/2550 | 1090 | 72 | 93.39 | 31/7/2550 | 978 | 76 | 92.23 |
| 9/4/2550 | 1137 | 153 | 86.54 | 8/6/2550 | 1203 | 44 | 96.34 | 3/8/2550 | 889 | 140 | 84.25 |
| 11/4/2550 | 1176 | 97 | 91.75 | 10/6/2550 | 853 | 79 | 90.78 | 5/8/2550 | 1142 | 207 | 81.84 |
| 16/4/2550 | 1088 | 75 | 93.11 | 12/6/2550 | 978 | 45 | 95.42 | 7/8/2550 | 1123 | 115 | 89.76 |
| 18/4/2550 | 1020 | 97 | 90.49 | 14/6/2550 | 864 | 67 | 92.25 | 9/8/2550 | 1020 | 86 | 91.54 |
| 20/4/2550 | 989 | 57 | 94.24 | 17/6/2550 | 837 | 53 | 93.67 | 11/8/2550 | 1008 | 94 | 90.66 |
| 23/4/2550 | 874 | 38 | 95.65 | 20/6/2550 | 1030 | 91 | 91.17 | 14/8/2550 | 990 | 76 | 92.32 |
| 25/4/2550 | 995 | 72 | 92.76 | 23/6/2550 | 1155 | 55 | 95.24 | 16/8/2550 | 977 | 75 | 92.32 |
| 28/4/2550 | 1100 | 69 | 93.73 | 26/6/2550 | 1040 | 54 | 94.81 | 18/8/2550 | 1320 | 80 | 93.94 |
| 30/4/2550 | 803 | 54 | 93.28 | 28/6/2550 | 1100 | 69 | 93.73 | 21/8/2550 | 1109 | 56 | 94.95 |
| 2/5/2550 | 1094 | 107 | 90.22 | 30/6/2550 | 803 | 54 | 93.28 | 23/8/2550 | 1270 | 78 | 93.86 |
| 4/5/2550 | 1159 | 68 | 94.13 | 2/7/2550 | 1094 | 107 | 90.22 | 25/8/2550 | 1470 | 67 | 95.44 |
| 7/5/2550 | 986 | 59 | 94.02 | 4/7/2550 | 1159 | 68 | 94.13 | 28/8/2550 | 978 | 47 | 95.19 |
| 9/5/2550 | 873 | 40 | 95.42 | 6/7/2550 | 986 | 59 | 94.02 | 31/8/2550 | 1100 | 70 | 93.64 |
| 11/5/2550 | 1120 | 33 | 97.05 | 9/7/2550 | 873 | 40 | 95.42 | 3/9/2550 | 1230 | 73 | 94.07 |
| 14/5/2550 | 1099 | 51 | 95.36 | 11/7/2550 | 1120 | 33 | 97.05 | 5/9/2550 | 1159 | 69 | 94.05 |
| 16/5/2550 | 1099 | 79 | 92.81 | 13/7/2550 | 1099 | 51 | 95.36 | 8/9/2550 | 980 | 56 | 94.29 |
| 19/5/2550 | 837 | 53 | 93.67 | 15/7/2550 | 864 | 51 | 94.10 | 10/9/2550 | 1358 | 61 | 95.51 |
| 21/5/2550 | 1030 | 91 | 91.17 | 18/7/2550 | 987 | 59 | 94.02 | 12/9/2550 | 1367 | 71 | 94.81 |
| 23/5/2550 | 1062 | 76 | 92.84 | 21/7/2550 | 994 | 54 | 94.57 | 14/9/2550 | 1089 | 56 | 94.86 |
| 25/5/2550 | 1155 | 55 | 95.24 | | | | | | | | |
| 29/5/2550 | 1040 | 48 | 95.38 | | | | | | | | |
| จำนวน | 24 | 24 | 24 | จำนวน | 22 | 22 | 22 | จำนวน | 22 | 22 | 22 |
| ค่าเฉลี่ย | 1058.29 | 81.67 | 92.45 | ค่าเฉลี่ย | 1020.10 | 60.11 | 94.04 | ค่าเฉลี่ย | 1120.68 | 82.67 | 92.44 |
| SD | 121.19 | 40.90 | 3.18 | SD | 124.55 | 17.20 | 1.75 | SD | 155.36 | 34.77 | 3.49 |
| ค่าสูงสุด | 1294 | 178 | 97.05 | ค่าสูงสุด | 1203 | 107 | 97.05 | ค่าสูงสุด | 1470 | 207 | 95.51 |
| ค่าต่ำสุด | 803 | 33 | 85.22 | ค่าต่ำสุด | 803 | 33 | 90.22 | ค่าต่ำสุด | 889 | 47 | 81.84 |

ตารางที่ ค.7 ในเตรทของชุดการทดลองที่ 3

| ไมเตรท (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|---|--------|----------|-------------------|--|--------|----------|-------------------|--|--------|----------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | | |
| วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ :NO ₂ ⁻ = 100 : 50 | | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ :NO ₂ ⁻ = 100 : 100 | | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ :NO ₂ ⁻ = 100 : 200 | | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | %removal | | น้ำเข้า | น้ำออก | %removal | | น้ำเข้า | น้ำออก | %removal |
| 2/4/2550 | 129.33 | 8.87 | 93.14 | 1/6/2550 | 107.15 | 5.99 | 94.41 | 24/7/2550 | 109.97 | 4.56 | 95.85 |
| 4/4/2550 | 116.15 | 3.13 | 97.31 | 4/6/2550 | 117.53 | 4.62 | 96.07 | 27/7/2550 | 168.94 | 3.67 | 97.83 |
| 6/4/2550 | 120.14 | 2.35 | 98.04 | 6/6/2550 | 114.10 | 4.24 | 96.28 | 31/7/2550 | 104.57 | 3.24 | 96.90 |
| 9/4/2550 | 113.17 | 4.62 | 95.92 | 8/6/2550 | 109.10 | 1.51 | 98.61 | 3/8/2550 | 109.99 | 1.65 | 98.50 |
| 11/4/2550 | 117.16 | 0.00 | 100.00 | 10/6/2550 | 120.13 | 2.35 | 98.04 | 5/8/2550 | 87.96 | 0.87 | 99.01 |
| 16/4/2550 | 108.18 | 3.45 | 96.81 | 12/6/2550 | 85.78 | 2.78 | 96.76 | 7/8/2550 | 76.89 | 1.44 | 98.13 |
| 18/4/2550 | 102.16 | 2.11 | 97.93 | 14/6/2550 | 97.95 | 2.90 | 97.04 | 9/8/2550 | 116.76 | 1.89 | 98.38 |
| 20/4/2550 | 98.19 | 3.44 | 96.50 | 17/6/2550 | 86.14 | 0.43 | 99.50 | 11/8/2550 | 108.91 | 2.60 | 97.61 |
| 23/4/2550 | 87.94 | 1.21 | 98.62 | 20/6/2550 | 83.57 | 0.00 | 100.00 | 14/8/2550 | 89.76 | 0.34 | 99.62 |
| 25/4/2550 | 99.15 | 2.97 | 97.01 | 23/6/2550 | 103.11 | 0.25 | 99.76 | 16/8/2550 | 98.67 | 0.78 | 99.21 |
| 28/4/2550 | 110.10 | 2.32 | 97.89 | 26/6/2550 | 106.19 | 1.00 | 99.06 | 18/8/2550 | 99.15 | 0.67 | 99.32 |
| 30/4/2550 | 80.33 | 6.23 | 92.24 | 28/6/2550 | 115.65 | 0.64 | 99.44 | 21/8/2550 | 124.79 | 1.19 | 99.05 |
| 2/5/2550 | 109.74 | 4.55 | 95.85 | 30/6/2550 | 104.65 | 0.26 | 99.75 | 23/8/2550 | 143.11 | 0.84 | 99.41 |
| 4/5/2550 | 115.19 | 7.66 | 93.35 | 2/7/2550 | 97.85 | 0.17 | 99.83 | 25/8/2550 | 109.77 | 0.91 | 99.17 |
| 7/5/2550 | 98.16 | 4.56 | 95.35 | 4/7/2550 | 79.66 | 3.78 | 95.25 | 28/8/2550 | 112.11 | 1.11 | 99.01 |
| 9/5/2550 | 87.63 | 2.20 | 97.49 | 6/7/2550 | 98.58 | 1.78 | 98.19 | 31/8/2550 | 97.88 | 1.36 | 98.61 |
| 11/5/2550 | 112.10 | 1.01 | 99.10 | 9/7/2550 | 107.65 | 2.91 | 97.30 | 3/9/2550 | 95.98 | 0.55 | 99.43 |
| 14/5/2550 | 109.39 | 1.24 | 98.87 | 11/7/2550 | 96.08 | 1.31 | 98.64 | 5/9/2550 | 107.76 | 0.18 | 99.83 |
| 16/5/2550 | 86.24 | 0.87 | 98.99 | 13/7/2550 | 96.49 | 0.68 | 99.30 | 8/9/2550 | 160.91 | 1.90 | 98.82 |
| 19/5/2550 | 83.27 | 1.35 | 98.38 | 15/7/2550 | 106.95 | 0.23 | 99.78 | 10/9/2550 | 106.88 | 0.27 | 99.75 |
| 21/5/2550 | 103.10 | 2.01 | 98.05 | 18/7/2550 | 89.46 | 0.11 | 99.88 | 12/9/2550 | 115.13 | 0.57 | 99.50 |
| 23/5/2550 | 106.32 | 1.68 | 98.42 | 21/7/2550 | 108.57 | 1.03 | 99.05 | 14/9/2550 | 123.44 | 0.41 | 99.67 |
| 25/5/2550 | 115.95 | 1.45 | 98.75 | | | | | | | | |
| 29/5/2550 | 104.17 | 1.97 | 98.11 | | | | | | | | |
| จำนวน | 24 | 24 | 24 | จำนวน | 22 | 22 | 22 | จำนวน | 22 | 22 | 22 |
| ค่าเฉลี่ย | 104.72 | 2.97 | 97.17 | ค่าเฉลี่ย | 101.47 | 1.77 | 98.27 | ค่าเฉลี่ย | 101.47 | 1.77 | 98.27 |
| SD | 12.64 | 2.18 | 1.99 | SD | 11.38 | 1.71 | 1.66 | SD | 11.38 | 1.71 | 1.66 |
| ค่าสูงสุด | 129.33 | 8.87 | 100.00 | ค่าสูงสุด | 120.13 | 5.99 | 100.00 | ค่าสูงสุด | 120.13 | 5.99 | 100.00 |
| ค่าต่ำสุด | 80.33 | 0.00 | 92.24 | ค่าต่ำสุด | 79.66 | 0.00 | 94.41 | ค่าต่ำสุด | 79.66 | 0.00 | 94.41 |

ตารางที่ ค.8 ไนโตรท์ของชุดการทดลองที่ 3

| ไนโตรท์ (มีลิกรัมต่อลิตร) | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|--|--------|----------|-------------------|---|--------|----------|-------------------|---|--------|----------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | | |
| วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : NO ₂ ⁻ = 100 : 50 | | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : NO ₂ ⁻ = 100 : 100 | | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ : NO ₂ ⁻ = 100 : 200 | | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | %removal | | น้ำเข้า | น้ำออก | %removal | | น้ำเข้า | น้ำออก | %removal |
| 2/4/2550 | 25.61 | 4.347 | 83.02 | 1/6/2550 | 77.15 | 1.232 | 98.40 | 24/7/2550 | 130.87 | -0.045 | 100.00 |
| 4/4/2550 | 31.99 | 14.251 | 55.45 | 4/6/2550 | 91.53 | 0.265 | 99.71 | 27/7/2550 | 146.88 | -0.011 | 100.00 |
| 6/4/2550 | 51.11 | 7.087 | 86.13 | 6/6/2550 | 109.21 | 0.216 | 99.80 | 31/7/2550 | 178.97 | -0.015 | 100.00 |
| 9/4/2550 | 62.34 | 2.099 | 96.63 | 8/6/2550 | 129.10 | 0.512 | 99.60 | 3/8/2550 | 154.55 | -0.010 | 100.00 |
| 11/4/2550 | 49.02 | 0.013 | 99.97 | 10/6/2550 | 121.45 | 0.043 | 99.96 | 5/8/2550 | 187.96 | 0.870 | 99.54 |
| 16/4/2550 | 54.09 | 13.224 | 75.55 | 12/6/2550 | 108.78 | 0.014 | 99.99 | 7/8/2550 | 176.89 | 0.012 | 99.99 |
| 18/4/2550 | 51.08 | 2.878 | 94.37 | 14/6/2550 | 110.95 | 0.330 | 99.70 | 9/8/2550 | 196.76 | -0.022 | 100.00 |
| 20/4/2550 | 49.10 | 6.146 | 87.48 | 17/6/2550 | 86.35 | 0.024 | 99.97 | 11/8/2550 | 188.94 | 0.025 | 99.99 |
| 23/4/2550 | 43.97 | 1.240 | 97.18 | 20/6/2550 | 96.78 | 0.043 | 99.96 | 14/8/2550 | 179.66 | 0.011 | 99.99 |
| 25/4/2550 | 49.58 | 0.298 | 99.40 | 23/6/2550 | 109.11 | 0.023 | 99.98 | 16/8/2550 | 189.45 | 0.004 | 100.00 |
| 28/4/2550 | 55.05 | 2.978 | 94.59 | 26/6/2550 | 113.22 | 0.038 | 99.97 | 18/8/2550 | 203.40 | 0.023 | 99.99 |
| 30/4/2550 | 40.17 | 2.343 | 94.17 | 28/6/2550 | 120.13 | 0.012 | 99.99 | 21/8/2550 | 198.86 | 0.033 | 99.98 |
| 2/5/2550 | 54.87 | 1.987 | 96.38 | 30/6/2550 | 87.96 | 0.012 | 99.99 | 23/8/2550 | 190.23 | 0.012 | 99.99 |
| 4/5/2550 | 57.60 | 2.998 | 94.79 | 2/7/2550 | 97.85 | 0.013 | 99.99 | 25/8/2550 | 210.10 | 0.013 | 99.99 |
| 7/5/2550 | 49.08 | 1.679 | 96.58 | 4/7/2550 | 79.66 | 0.035 | 99.96 | 28/8/2550 | 187.56 | 0.034 | 99.98 |
| 9/5/2550 | 43.82 | 0.987 | 97.75 | 6/7/2550 | 98.58 | 0.012 | 99.99 | 31/8/2550 | 193.45 | 0.031 | 99.98 |
| 11/5/2550 | 46.05 | 0.126 | 99.73 | 9/7/2550 | 107.65 | 0.042 | 99.96 | 3/9/2550 | 195.98 | 0.043 | 99.98 |
| 14/5/2550 | 54.70 | 0.082 | 99.85 | 11/7/2550 | 96.25 | 0.023 | 99.98 | 5/9/2550 | 197.76 | 0.045 | 99.98 |
| 16/5/2550 | 43.12 | 0.032 | 99.93 | 13/7/2550 | 98.49 | 0.023 | 99.98 | 8/9/2550 | 186.98 | 0.023 | 99.99 |
| 19/5/2550 | 41.64 | 0.024 | 99.94 | 15/7/2550 | 78.95 | 0.002 | 100.00 | 10/9/2550 | 188.90 | 0.054 | 99.97 |
| 21/5/2550 | 51.55 | 0.035 | 99.93 | 18/7/2550 | 93.46 | 0.009 | 99.99 | 12/9/2550 | 211.99 | 0.022 | 99.99 |
| 23/5/2550 | 53.16 | 0.046 | 99.91 | 21/7/2550 | 98.52 | 0.022 | 99.98 | 14/9/2550 | 194.97 | 0.011 | 99.99 |
| 25/5/2550 | 57.98 | 0.053 | 99.91 | | | | | | | | |
| 29/5/2550 | 52.09 | 0.042 | 99.92 | | | | | | | | |
| จำนวน | 24 | 24 | 24 | จำนวน | 22 | 22 | 22 | จำนวน | 22 | 22 | 22 |
| ค่าเฉลี่ย | 48.70 | 2.71 | 93.69 | ค่าเฉลี่ย | 100.51 | 0.13 | 99.86 | ค่าเฉลี่ย | 185.96 | 0.05 | 99.97 |
| SD | 8.25 | 3.92 | 10.29 | SD | 14.08 | 0.28 | 0.34 | SD | 19.52 | 0.18 | 0.10 |
| ค่าสูงสุด | 62.34 | 14.25 | 99.97 | ค่าสูงสุด | 129.10 | 1.23 | 100.00 | ค่าสูงสุด | 211.99 | 0.87 | 100.00 |
| ค่าต่ำสุด | 25.61 | 0.01 | 55.45 | ค่าต่ำสุด | 77.15 | 0.00 | 98.40 | ค่าต่ำสุด | 130.87 | 0.00 | 99.54 |

ตารางที่ ค.9 ก๊าซชีวภาพของชุดการทดลองที่ 3

| ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร/วัน) | | | | | |
|----------------------------|--|-------------------|---|-------------------|---|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | ช่วงการทดลองที่ 3 | |
| วัน/เดือน/ปี | $\text{NO}_3^- : \text{NO}_2^- = 100 : 50$ | วัน/เดือน/ปี | $\text{NO}_3^- : \text{NO}_2^- = 100 : 100$ | วัน/เดือน/ปี | $\text{NO}_3^- : \text{NO}_2^- = 100 : 200$ |
| 6/4/2550 | 4042 | 3/6/2550 | 5167 | 27/7/2550 | 5750 |
| 14/4/2550 | 4255 | 8/6/2550 | 5400 | 3/8/2550 | 5691 |
| 20/4/2550 | 4800 | 12/6/2550 | 5760 | 6/8/2550 | 5143 |
| 28/4/2550 | 5143 | 17/6/2550 | 5760 | 11/8/2550 | 5628 |
| 4/5/2550 | 5236 | 24/6/2550 | 5314 | 19/8/2550 | 5673 |
| 11/5/2550 | 4533 | 1/7/2550 | 5867 | 26/8/2550 | 5400 |
| 21/5/2550 | 6300 | 8/7/2550 | 5486 | 2/9/2550 | 5520 |
| 29/5/2550 | 6120 | 15/7/2550 | 5829 | 9/9/2550 | 5760 |
| จำนวน | 8 | จำนวน | 8 | จำนวน | 8 |
| ค่าเฉลี่ย | 5054 | ค่าเฉลี่ย | 5573 | ค่าเฉลี่ย | 5571 |
| SD | 822 | SD | 265 | SD | 211 |
| ค่าสูงสุด | 6300 | ค่าสูงสุด | 5867 | ค่าสูงสุด | 5760 |
| ค่าต่ำสุด | 4042 | ค่าต่ำสุด | 5167 | ค่าต่ำสุด | 5143 |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.10 ของแข็งแขวนลอยที่ออกจากระบบของชุดการทดลองที่ 3

| ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | | | | | | | |
|-------------------------------------|---|--------|-------------------|--|--------|-------------------|--|--------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | |
| วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ :NO ₂ ⁻ = 100 : 50 | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ :NO ₂ ⁻ = 100 : 100 | | วัน/เดือน/ปี | NO ₃ ⁻ :NO ₂ ⁻ = 100 : 200 | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก |
| 2/4/2550 | - | 53.85 | 1/6/2550 | - | 23.44 | 24/7/2550 | - | 23.11 |
| 11/4/2550 | - | 45.65 | 6/6/2550 | - | 46.77 | 31/7/2550 | - | 53.56 |
| 18/4/2550 | - | 36.76 | 12/6/2550 | - | 33.67 | 9/8/2550 | - | 25.35 |
| 25/4/2550 | - | 26.63 | 16/6/2550 | - | 25.36 | 11/8/2550 | - | 26.72 |
| 2/5/2550 | - | 24.35 | 23/6/2550 | - | 22.33 | 16/8/2550 | - | 24.25 |
| 11/5/2550 | - | 18.44 | 28/6/2550 | - | 17.55 | 21/8/2550 | - | 19.45 |
| 19/5/2550 | - | 14.29 | 6/7/2550 | - | 16.43 | 23/8/2550 | - | 18.13 |
| 25/5/2550 | - | 13.25 | 11/7/2550 | - | 15.56 | 25/8/2550 | - | 14.35 |
| 29/5/2550 | - | 14.22 | 17/7/2550 | - | 13.46 | 31/8/2550 | - | 12.53 |
| | | | | | | 10/9/2550 | - | 13.57 |
| จำนวน | - | 9 | จำนวน | - | 9 | จำนวน | - | 10 |
| ค่าเฉลี่ย | - | 27.5 | ค่าเฉลี่ย | - | 23.8 | ค่าเฉลี่ย | - | 23.1 |
| SD | - | 14.82 | SD | - | 10.59 | SD | - | 11.85 |
| ค่าสูงสุด | - | 53.8 | ค่าสูงสุด | - | 46.8 | ค่าสูงสุด | - | 53.6 |
| ค่าต่ำสุด | - | 13.3 | ค่าต่ำสุด | - | 13.5 | ค่าต่ำสุด | - | 12.5 |

ภาคผนวก ง

ผลการทดลองของชุดการทดลองที่ 4 ที่ไม่มีสารรบกวน

ตารางที่ ง.1 คุณลักษณะของชุดการทดลองที่ 4

| คุณลักษณะ (องศาเซลเซียส) | | | | | | | | |
|--------------------------|---------------|--------|-------------------|---------------|--------|-------------------|---------------|--------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | |
| วัน/เดือน/ปี | ไม่มีสารรบกวน | | วัน/เดือน/ปี | ไม่มีสารรบกวน | | วัน/เดือน/ปี | ไม่มีสารรบกวน | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก |
| 2/4/2550 | 30.3 | 30.4 | 1/6/2550 | 29.6 | 29.8 | 24/7/2550 | 28.2 | 29.1 |
| 4/4/2550 | 30.5 | 31.0 | 3/6/2550 | 29.5 | 29.8 | 27/7/2550 | 28.8 | 29.0 |
| 6/4/2550 | 29.0 | 29.4 | 6/6/2550 | 29.0 | 29.1 | 31/7/2550 | 29.4 | 29.7 |
| 9/4/2550 | 28.0 | 28.1 | 8/6/2550 | 28.0 | 28.4 | 3/8/2550 | 29.3 | 29.6 |
| 11/4/2550 | 29.8 | 30.0 | 10/6/2550 | 28.4 | 28.9 | 7/8/2550 | 27.8 | 27.9 |
| 14/4/2550 | 30.1 | 30.4 | 12/6/2550 | 27.0 | 27.4 | 9/8/2550 | 29.5 | 29.1 |
| 16/4/2550 | 28.9 | 29.3 | 14/6/2550 | 29.1 | 29.6 | 11/8/2550 | 27.5 | 28.3 |
| 18/4/2550 | 28.5 | 28.8 | 17/6/2550 | 30.6 | 30.9 | 14/8/2550 | 28.6 | 28.9 |
| 20/4/2550 | 30.1 | 30.2 | 20/6/2550 | 31.2 | 31.4 | 16/8/2550 | 28.6 | 28.5 |
| 23/4/2550 | 32.0 | 32.4 | 23/6/2550 | 31.4 | 31.6 | 18/8/2550 | 28.7 | 28.6 |
| 25/4/2550 | 29.5 | 29.7 | 26/6/2550 | 30.0 | 30.2 | 21/8/2550 | 29.0 | 29.3 |
| 28/4/2550 | 29.1 | 29.3 | 28/6/2550 | 30.2 | 30.8 | 23/8/2550 | 29.2 | 29.6 |
| 30/4/2550 | 30.0 | 30.1 | 30/6/2550 | 29.8 | 30.0 | 25/8/2550 | 28.1 | 28.3 |
| 2/5/2550 | 29.2 | 29.4 | 2/7/2550 | 28.7 | 28.7 | 25/8/2550 | 27.8 | 27.9 |
| 4/5/2550 | 30.1 | 30.3 | 4/7/2550 | 28.1 | 28.4 | 28/8/2550 | 28.4 | 28.5 |
| 7/5/2550 | 30.4 | 30.6 | 6/7/2550 | 29.4 | 29.6 | 31/8/2550 | 29.7 | 30.1 |
| 9/5/2550 | 31.0 | 31.1 | 9/7/2550 | 29.6 | 29.9 | 3/9/2550 | 29.4 | 30.2 |
| 11/5/2550 | 30.5 | 30.7 | 11/7/2550 | 29.1 | 29.4 | 5/9/2550 | 30.5 | 30.3 |
| 14/5/2550 | 29.7 | 29.8 | 13/7/2550 | 28.6 | 28.9 | 8/9/2550 | 29.1 | 29.2 |
| 16/5/2550 | 29.8 | 30.1 | 15/7/2550 | 29.0 | 29.3 | 10/9/2550 | 28.2 | 28.6 |
| 19/5/2550 | 28.9 | 29.0 | 17/7/2550 | 30.1 | 30.4 | 12/9/2550 | 28.9 | 29.1 |
| 23/5/2550 | 28.5 | 28.8 | 20/7/2550 | 30.6 | 30.7 | 14/9/2550 | 28.5 | 26.2 |
| 25/5/2550 | 30.0 | 30.2 | | | | | | |
| 29/5/2550 | 31.2 | 31.4 | | | | | | |
| จำนวน | 24 | 24 | จำนวน | 22 | 22 | จำนวน | 22 | 22 |
| ค่าเฉลี่ย | 29.8 | 30.0 | ค่าเฉลี่ย | 29.4 | 29.7 | ค่าเฉลี่ย | 28.8 | 28.9 |
| SD | 0.93 | 0.95 | SD | 1.07 | 1.04 | SD | 0.71 | 0.92 |
| ค่าสูงสุด | 32.0 | 32.4 | ค่าสูงสุด | 31.4 | 31.6 | ค่าสูงสุด | 30.5 | 30.3 |
| ค่าต่ำสุด | 28.0 | 28.1 | ค่าต่ำสุด | 27.0 | 27.4 | ค่าต่ำสุด | 27.5 | 26.2 |

ตารางที่ ง.2 ไออาร์พีของชุดการทดลองที่ 4

| ไออาร์พี (มิลลิวัตต์) | | | | | | | | |
|-----------------------|---------------|--------|-------------------|---------------|--------|-------------------|---------------|--------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | |
| วัน/เดือน/ปี | ไม่มีสารรบกวน | | วัน/เดือน/ปี | ไม่มีสารรบกวน | | วัน/เดือน/ปี | ไม่มีสารรบกวน | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก |
| 2/4/2550 | - | -323 | 1/6/2550 | - | -273 | 24/7/2550 | - | -335 |
| 4/4/2550 | - | -333 | 3/6/2550 | - | -283 | 27/7/2550 | - | -344 |
| 6/4/2550 | - | -298 | 6/6/2550 | - | -338 | 31/7/2550 | - | -334 |
| 9/4/2550 | - | -300 | 8/6/2550 | - | -299 | 3/8/2550 | - | -310 |
| 11/4/2550 | - | -320 | 10/6/2550 | - | -326 | 7/8/2550 | - | -293 |
| 14/4/2550 | - | -354 | 12/6/2550 | - | -331 | 9/8/2550 | - | -326 |
| 16/4/2550 | - | -371 | 14/6/2550 | - | -308 | 11/8/2550 | - | -367 |
| 18/4/2550 | - | -359 | 17/6/2550 | - | -350 | 14/8/2550 | - | -322 |
| 20/4/2550 | - | -388 | 20/6/2550 | - | -361 | 16/8/2550 | - | -361 |
| 23/4/2550 | - | -310 | 23/6/2550 | - | -310 | 18/8/2550 | - | -372 |
| 25/4/2550 | - | -368 | 26/6/2550 | - | -292 | 21/8/2550 | - | -383 |
| 28/4/2550 | - | -351 | 28/6/2550 | - | -325 | 23/8/2550 | - | -350 |
| 30/4/2550 | - | -360 | 30/6/2550 | - | -360 | 25/8/2550 | - | -330 |
| 2/5/2550 | - | -398 | 2/7/2550 | - | -327 | 25/8/2550 | - | -345 |
| 4/5/2550 | - | -344 | 4/7/2550 | - | -345 | 28/8/2550 | - | -395 |
| 7/5/2550 | - | -270 | 6/7/2550 | - | -370 | 31/8/2550 | - | -323 |
| 9/5/2550 | - | -297 | 9/7/2550 | - | -382 | 3/9/2550 | - | -336 |
| 11/5/2550 | - | -361 | 11/7/2550 | - | -356 | 5/9/2550 | - | -325 |
| 14/5/2550 | - | -355 | 13/7/2550 | - | -337 | 8/9/2550 | - | -395 |
| 16/5/2550 | - | -380 | 15/7/2550 | - | -344 | 10/9/2550 | - | -373 |
| 19/5/2550 | - | -320 | 17/7/2550 | - | -310 | 12/9/2550 | - | -364 |
| 23/5/2550 | - | -331 | 20/7/2550 | - | -375 | 14/9/2550 | - | -402 |
| 25/5/2550 | - | -319 | | | | | | |
| 29/5/2550 | - | -343 | | | | | | |
| จำนวน | - | 24 | จำนวน | - | 22 | จำนวน | - | 22 |
| ค่าเฉลี่ย | - | -339.7 | ค่าเฉลี่ย | - | -331.9 | ค่าเฉลี่ย | - | -349.3 |
| SD | - | 31.93 | SD | - | 30.01 | SD | - | 29.40 |
| ค่าสูงสุด | - | -398 | ค่าสูงสุด | - | -382 | ค่าสูงสุด | - | -402 |
| ค่าต่ำสุด | - | -270 | ค่าต่ำสุด | - | -273 | ค่าต่ำสุด | - | -293 |

ตารางที่ ง.3 พิเศษของชุดการทดลองที่ 4

| พิเศษ | | | | | | | | |
|-------------------|---------------|--------|-------------------|---------------|--------|-------------------|---------------|--------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | |
| วัน/เดือน/ปี | ไม่มีสารรบกวน | | วัน/เดือน/ปี | ไม่มีสารรบกวน | | วัน/เดือน/ปี | ไม่มีสารรบกวน | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก |
| 2/4/2550 | 8.00 | 7.09 | 1/6/2550 | 7.57 | 6.87 | 24/7/2550 | 7.75 | 7.27 |
| 4/4/2550 | 7.91 | 7.27 | 3/6/2550 | 7.60 | 6.90 | 27/7/2550 | 7.52 | 7.31 |
| 6/4/2550 | 7.98 | 7.23 | 6/6/2550 | 7.86 | 6.92 | 31/7/2550 | 7.71 | 7.23 |
| 9/4/2550 | 8.00 | 7.34 | 8/6/2550 | 7.59 | 7.42 | 3/8/2550 | 7.64 | 7.34 |
| 11/4/2550 | 8.00 | 7.32 | 10/6/2550 | 7.74 | 7.39 | 7/8/2550 | 7.64 | 7.03 |
| 14/4/2550 | 7.86 | 7.40 | 12/6/2550 | 7.69 | 7.10 | 9/8/2550 | 7.34 | 7.32 |
| 16/4/2550 | 7.85 | 7.49 | 14/6/2550 | 7.69 | 7.10 | 11/8/2550 | 7.81 | 7.35 |
| 18/4/2550 | 8.19 | 7.14 | 17/6/2550 | 7.78 | 7.37 | 14/8/2550 | 7.88 | 7.65 |
| 20/4/2550 | 8.01 | 7.26 | 20/6/2550 | 7.76 | 7.25 | 16/8/2550 | 7.60 | 7.57 |
| 23/4/2550 | 7.99 | 7.30 | 23/6/2550 | 7.47 | 7.30 | 18/8/2550 | 7.45 | 7.05 |
| 25/4/2550 | 7.89 | 6.84 | 26/6/2550 | 7.62 | 7.52 | 21/8/2550 | 7.55 | 7.20 |
| 28/4/2550 | 7.86 | 7.33 | 28/6/2550 | 7.44 | 7.45 | 23/8/2550 | 7.47 | 7.15 |
| 30/4/2550 | 8.04 | 7.52 | 30/6/2550 | 7.59 | 7.35 | 25/8/2550 | 7.59 | 7.09 |
| 2/5/2550 | 7.63 | 7.38 | 2/7/2550 | 7.55 | 7.25 | 25/8/2550 | 7.60 | 7.25 |
| 4/5/2550 | 8.00 | 7.42 | 4/7/2550 | 7.70 | 7.15 | 28/8/2550 | 7.25 | 7.04 |
| 7/5/2550 | 7.93 | 7.26 | 6/7/2550 | 7.70 | 7.15 | 31/8/2550 | 7.69 | 7.35 |
| 9/5/2550 | 8.02 | 7.46 | 9/7/2550 | 7.81 | 7.19 | 3/9/2550 | 7.48 | 7.25 |
| 11/5/2550 | 7.47 | 7.30 | 11/7/2550 | 7.75 | 7.10 | 5/9/2550 | 7.66 | 7.27 |
| 14/5/2550 | 7.62 | 7.52 | 13/7/2550 | 7.55 | 7.25 | 8/9/2550 | 7.56 | 7.19 |
| 16/5/2550 | 7.44 | 7.45 | 15/7/2550 | 7.57 | 7.18 | 10/9/2550 | 7.47 | 7.05 |
| 19/5/2550 | 7.59 | 7.35 | 17/7/2550 | 7.47 | 7.00 | 12/9/2550 | 7.61 | 7.25 |
| 23/5/2550 | 7.55 | 7.25 | 20/7/2550 | 7.60 | 7.45 | 14/9/2550 | 7.59 | 7.46 |
| 25/5/2550 | 7.50 | 7.24 | | | | | | |
| 29/5/2550 | 7.48 | 7.20 | | | | | | |
| จำนวน | 24 | 24 | จำนวน | 22 | 22 | จำนวน | 22 | 22 |
| ค่าเฉลี่ย | 7.83 | 7.31 | ค่าเฉลี่ย | 7.64 | 7.21 | ค่าเฉลี่ย | 7.58 | 7.26 |
| SD | 0.22 | 0.15 | SD | 0.12 | 0.19 | SD | 0.14 | 0.16 |
| ค่าสูงสุด | 8.19 | 7.52 | ค่าสูงสุด | 7.86 | 7.52 | ค่าสูงสุด | 7.88 | 7.65 |
| ค่าต่ำสุด | 7.44 | 6.84 | ค่าต่ำสุด | 7.44 | 6.87 | ค่าต่ำสุด | 7.25 | 7.03 |

ตารางที่ ง.4 สภาพต่างทั้งหมดของชุดการทดลองที่ 4

| สภาพต่างทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต) | | | | | | | | |
|---|---------------|--------|-------------------|---------------|--------|-------------------|---------------|--------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | |
| วัน/เดือน/ปี | ไม่มีสารรบกวน | | วัน/เดือน/ปี | ไม่มีสารรบกวน | | วัน/เดือน/ปี | ไม่มีสารรบกวน | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก |
| 2/4/2550 | 304 | 413 | 1/6/2550 | 310 | 505 | 24/7/2550 | 301 | 490 |
| 4/4/2550 | 340 | 400 | 3/6/2550 | 300 | 477 | 27/7/2550 | 292 | 476 |
| 6/4/2550 | 320 | 398 | 6/6/2550 | 302 | 487 | 31/7/2550 | 289 | 402 |
| 9/4/2550 | 300 | 397 | 8/6/2550 | 310 | 485 | 3/8/2550 | 287 | 396 |
| 11/4/2550 | 310 | 399 | 10/6/2550 | 303 | 482 | 7/8/2550 | 269 | 405 |
| 14/4/2550 | 314 | 380 | 12/6/2550 | 288 | 436 | 9/8/2550 | 279 | 407 |
| 16/4/2550 | 330 | 379 | 14/6/2550 | 281 | 497 | 11/8/2550 | 268 | 490 |
| 18/4/2550 | 309 | 391 | 17/6/2550 | 294 | 489 | 14/8/2550 | 281 | 470 |
| 20/4/2550 | 301 | 387 | 20/6/2550 | 284 | 470 | 16/8/2550 | 296 | 463 |
| 23/4/2550 | 320 | 394 | 23/6/2550 | 284 | 456 | 18/8/2550 | 308 | 486 |
| 25/4/2550 | 356 | 375 | 26/6/2550 | 275 | 476 | 21/8/2550 | 317 | 496 |
| 28/4/2550 | 304 | 397 | 28/6/2550 | 208 | 472 | 23/8/2550 | 320 | 470 |
| 30/4/2550 | 339 | 398 | 30/6/2550 | 270 | 477 | 25/8/2550 | 322 | 496 |
| 2/5/2550 | 278 | 379 | 2/7/2550 | 308 | 496 | 25/8/2550 | 305 | 479 |
| 4/5/2550 | 298 | 396 | 4/7/2550 | 390 | 482 | 28/8/2550 | 344 | 471 |
| 7/5/2550 | 296 | 405 | 6/7/2550 | 341 | 497 | 31/8/2550 | 327 | 484 |
| 9/5/2550 | 289 | 407 | 9/7/2550 | 305 | 402 | 3/9/2550 | 304 | 397 |
| 11/5/2550 | 290 | 490 | 11/7/2550 | 245 | 496 | 5/9/2550 | 356 | 398 |
| 14/5/2550 | 289 | 479 | 13/7/2550 | 273 | 495 | 8/9/2550 | 278 | 379 |
| 16/5/2550 | 276 | 468 | 15/7/2550 | 298 | 496 | 10/9/2550 | 310 | 455 |
| 19/5/2550 | 294 | 495 | 17/7/2550 | 271 | 440 | 12/9/2550 | 325 | 482 |
| 23/5/2550 | 268 | 510 | 20/7/2550 | 290 | 499 | 14/9/2550 | 288 | 436 |
| 25/5/2550 | 279 | 487 | | | | | | |
| 29/5/2550 | 266 | 479 | | | | | | |
| จำนวน | 24 | 24 | จำนวน | 22 | 22 | จำนวน | 22 | 22 |
| ค่าเฉลี่ย | 302.9 | 421.0 | ค่าเฉลี่ย | 292.3 | 477.8 | ค่าเฉลี่ย | 303.0 | 451.3 |
| SD | 23.07 | 44.64 | SD | 34.16 | 24.89 | SD | 23.29 | 40.04 |
| ค่าสูงสุด | 356 | 510 | ค่าสูงสุด | 390 | 505 | ค่าสูงสุด | 356 | 496 |
| ค่าต่ำสุด | 266 | 375 | ค่าต่ำสุด | 208 | 402 | ค่าต่ำสุด | 268 | 379 |

ตารางที่ ๓.5 กรดไขมันระเหยของชุดการทดลองที่ 4

| กรดไขมันระเหย (มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต) | | | | | | | | |
|---|---------------|--------|-------------------|---------------|--------|-------------------|---------------|--------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | |
| วัน/เดือน/ปี | ไม่มีสารรบกวน | | วัน/เดือน/ปี | ไม่มีสารรบกวน | | วัน/เดือน/ปี | ไม่มีสารรบกวน | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก |
| 2/4/2550 | 90 | 116 | 1/6/2550 | 61 | 112 | 24/7/2550 | 67 | 111 |
| 4/4/2550 | 45 | 109 | 3/6/2550 | 82 | 110 | 27/7/2550 | 78 | 113 |
| 6/4/2550 | 44 | 104 | 6/6/2550 | 86 | 104 | 31/7/2550 | 87 | 151 |
| 9/4/2550 | 65 | 114 | 8/6/2550 | 86 | 105 | 3/8/2550 | 95 | 116 |
| 11/4/2550 | 50 | 112 | 10/6/2550 | 98 | 121 | 7/8/2550 | 73 | 127 |
| 14/4/2550 | 54 | 141 | 12/6/2550 | 59 | 125 | 9/8/2550 | 65 | 121 |
| 16/4/2550 | 74 | 161 | 14/6/2550 | 61 | 132 | 11/8/2550 | 61 | 142 |
| 18/4/2550 | 49 | 120 | 17/6/2550 | 88 | 118 | 14/8/2550 | 81 | 152 |
| 20/4/2550 | 42 | 105 | 20/6/2550 | 92 | 119 | 16/8/2550 | 42 | 137 |
| 23/4/2550 | 48 | 110 | 23/6/2550 | 65 | 106 | 18/8/2550 | 66 | 155 |
| 25/4/2550 | 43 | 123 | 26/6/2550 | 76 | 124 | 21/8/2550 | 72 | 124 |
| 28/4/2550 | 56 | 106 | 28/6/2550 | 77 | 98 | 23/8/2550 | 47 | 118 |
| 30/4/2550 | 28 | 128 | 30/6/2550 | 91 | 121 | 25/8/2550 | 56 | 109 |
| 2/5/2550 | 29 | 88 | 2/7/2550 | 102 | 113 | 25/8/2550 | 72 | 106 |
| 4/5/2550 | 43 | 93 | 4/7/2550 | 57 | 131 | 28/8/2550 | 71 | 132 |
| 7/5/2550 | 61 | 122 | 6/7/2550 | 68 | 122 | 31/8/2550 | 68 | 129 |
| 9/5/2550 | 60 | 110 | 9/7/2550 | 62 | 136 | 3/9/2550 | 47 | 124 |
| 11/5/2550 | 25 | 118 | 11/7/2550 | 81 | 117 | 5/9/2550 | 81 | 118 |
| 14/5/2550 | 31 | 99 | 13/7/2550 | 86 | 105 | 8/9/2550 | 86 | 104 |
| 16/5/2550 | 47 | 97 | 15/7/2550 | 73 | 126 | 10/9/2550 | 89 | 109 |
| 19/5/2550 | 67 | 104 | 17/7/2550 | 69 | 128 | 12/9/2550 | 62 | 119 |
| 23/5/2550 | 55 | 105 | 20/7/2550 | 61 | 119 | 14/9/2550 | 75 | 116 |
| 25/5/2550 | 39 | 103 | | | | | | |
| 29/5/2550 | 52 | 108 | | | | | | |
| จำนวน | 24 | 24 | จำนวน | 22 | 22 | จำนวน | 22 | 22 |
| ค่าเฉลี่ย | 49.9 | 112.3 | ค่าเฉลี่ย | 76.4 | 117.8 | ค่าเฉลี่ย | 70.0 | 124.2 |
| SD | 15.12 | 15.52 | SD | 13.64 | 10.18 | SD | 14.00 | 15.06 |
| ค่าสูงสุด | 90.0 | 161.0 | ค่าสูงสุด | 102.0 | 136.0 | ค่าสูงสุด | 95.0 | 155.0 |
| ค่าต่ำสุด | 25.0 | 88.0 | ค่าต่ำสุด | 57.0 | 98.0 | ค่าต่ำสุด | 42.0 | 104.0 |

ตารางที่ ง.6 ซีโอดีของชุดการทดลองที่ 4

| ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|----------------|--------|----------|-------------------|----------------|--------|----------|-------------------|----------------|--------|----------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | | |
| วัน/เดือน/ ปี | ไม่มีสารบรบกวน | | | วัน/เดือน/ ปี | ไม่มีสารบรบกวน | | | วัน/เดือน/ ปี | ไม่มีสารบรบกวน | | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | %removal | | น้ำเข้า | น้ำออก | %removal | | น้ำเข้า | น้ำออก | %removal |
| 2/4/2550 | 896 | 159 | 82.25 | 1/6/2550 | 916 | 49 | 94.65 | 24/7/2550 | 1100 | 53 | 95.18 |
| 4/4/2550 | 900 | 183 | 79.67 | 3/6/2550 | 1103 | 67 | 93.93 | 27/7/2550 | 1004 | 89 | 91.14 |
| 6/4/2550 | 811 | 153 | 81.13 | 6/6/2550 | 1190 | 35 | 97.06 | 31/7/2550 | 1209 | 75 | 93.80 |
| 9/4/2550 | 1011 | 157 | 84.47 | 8/6/2550 | 1173 | 47 | 95.99 | 3/8/2550 | 840 | 37 | 95.59 |
| 11/4/2550 | 1011 | 64 | 93.67 | 10/6/2550 | 1120 | 62 | 94.46 | 7/8/2550 | 875 | 51 | 94.17 |
| 14/4/2550 | 1040 | 69 | 93.37 | 12/6/2550 | 855 | 40 | 95.32 | 9/8/2550 | 997 | 33 | 96.69 |
| 16/4/2550 | 993 | 76 | 92.35 | 14/6/2550 | 1108 | 22 | 98.01 | 11/8/2550 | 1137 | 24 | 97.93 |
| 18/4/2550 | 1100 | 53 | 95.18 | 17/6/2550 | 890 | 57 | 93.60 | 14/8/2550 | 1190 | 43 | 96.39 |
| 20/4/2550 | 890 | 57 | 93.60 | 20/6/2550 | 1110 | 73 | 93.42 | 16/8/2550 | 1080 | 72 | 93.33 |
| 23/4/2550 | 1110 | 73 | 93.42 | 23/6/2550 | 1225 | 88 | 92.82 | 18/8/2550 | 1011 | 64 | 93.67 |
| 25/4/2550 | 880 | 46 | 94.77 | 26/6/2550 | 1132 | 106 | 90.64 | 21/8/2550 | 957 | 32 | 96.66 |
| 28/4/2550 | 1225 | 88 | 92.82 | 28/6/2550 | 1084 | 38 | 96.49 | 23/8/2550 | 890 | 40 | 95.51 |
| 30/4/2550 | 1132 | 106 | 90.64 | 30/6/2550 | 877 | 33 | 96.24 | 25/8/2550 | 1320 | 44 | 96.67 |
| 2/5/2550 | 1084 | 38 | 96.49 | 2/7/2550 | 870 | 56 | 93.56 | 25/8/2550 | 1290 | 32 | 97.52 |
| 4/5/2550 | 877 | 33 | 96.24 | 4/7/2550 | 1127 | 40 | 96.45 | 28/8/2550 | 1097 | 57 | 94.80 |
| 7/5/2550 | 870 | 19 | 97.82 | 6/7/2550 | 997 | 57 | 94.28 | 31/8/2550 | 978 | 61 | 93.76 |
| 9/5/2550 | 1127 | 40 | 96.45 | 9/7/2550 | 987 | 67 | 93.21 | 3/9/2550 | 1200 | 52 | 95.67 |
| 11/5/2550 | 1109 | 58 | 94.77 | 11/7/2550 | 996 | 55 | 94.48 | 5/9/2550 | 988 | 58 | 94.13 |
| 14/5/2550 | 1045 | 69 | 93.40 | 13/7/2550 | 987 | 42 | 95.74 | 8/9/2550 | 923 | 43 | 95.34 |
| 16/5/2550 | 1137 | 82 | 92.79 | 15/7/2550 | 998 | 38 | 96.19 | 10/9/2550 | 1089 | 54 | 95.04 |
| 19/5/2550 | 893 | 97 | 89.14 | 17/7/2550 | 995 | 59 | 94.07 | 12/9/2550 | 866 | 43 | 95.03 |
| 23/5/2550 | 989 | 57 | 94.24 | 20/7/2550 | 1002 | 43 | 95.71 | 14/9/2550 | 1065 | 41 | 96.15 |
| 25/5/2550 | 991 | 69 | 93.04 | | | | | | | | |
| 29/5/2550 | 1009 | 78 | 92.27 | | | | | | | | |
| จำนวน | 24 | 24 | 24 | จำนวน | 22 | 22 | 22 | จำนวน | 22 | 22 | 22 |
| ค่าเฉลี่ย | 1005.42 | 80.17 | 91.83 | ค่าเฉลี่ย | 1033.72 | 53.36 | 94.83 | ค่าเฉลี่ย | 1050.26 | 49.89 | 95.19 |
| SD | 109.15 | 43.01 | 4.97 | SD | 109.91 | 19.19 | 1.67 | SD | 135.84 | 15.83 | 1.56 |
| ค่าสูงสุด | 1225 | 183 | 97.82 | ค่าสูงสุด | 1225 | 106 | 98.01 | ค่าสูงสุด | 1320 | 89 | 97.93 |
| ค่าต่ำสุด | 811 | 19 | 79.67 | ค่าต่ำสุด | 855 | 22 | 90.64 | ค่าต่ำสุด | 840 | 24 | 91.14 |

ตารางที่ ง.7 ไนเตรทของชุดการทดลองที่ 4

| ไนเตรท (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|---------------|--------|----------|-------------------|---------------|--------|----------|-------------------|---------------|--------|----------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | | |
| วัน/เดือน/ ปี | ไม่มีสารรบกวน | | | วัน/เดือน/ ปี | ไม่มีสารรบกวน | | | วัน/เดือน/ ปี | ไม่มีสารรบกวน | | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | %removal | | น้ำเข้า | น้ำออก | %removal | | น้ำเข้า | น้ำออก | %removal |
| 2/4/2550 | 88.93 | 7.74 | 91.29 | 1/6/2550 | 112.34 | 1.22 | 98.91 | 24/7/2550 | 112.23 | 1.07 | 99.05 |
| 4/4/2550 | 98.12 | 4.92 | 94.99 | 3/6/2550 | 112.33 | 2.92 | 97.40 | 27/7/2550 | 114.24 | 1.49 | 98.70 |
| 6/4/2550 | 101.22 | 2.75 | 97.28 | 6/6/2550 | 114.25 | 0.94 | 99.18 | 31/7/2550 | 109.35 | 2.70 | 97.53 |
| 9/4/2550 | 124.24 | 1.83 | 98.53 | 8/6/2550 | 135.44 | 0.49 | 99.64 | 3/8/2550 | 108.56 | 1.86 | 98.29 |
| 11/4/2550 | 102.24 | 0.76 | 99.26 | 10/6/2550 | 106.75 | 1.82 | 98.30 | 7/8/2550 | 110.25 | 1.55 | 98.59 |
| 14/4/2550 | 103.14 | 1.68 | 98.37 | 12/6/2550 | 104.05 | 2.28 | 97.81 | 9/8/2550 | 116.89 | 1.95 | 98.33 |
| 16/4/2550 | 111.24 | 0.69 | 99.38 | 14/6/2550 | 103.36 | 0.86 | 99.17 | 11/8/2550 | 104.02 | 0.71 | 99.32 |
| 18/4/2550 | 98.99 | 0.00 | 100.00 | 17/6/2550 | 106.46 | 0.33 | 99.69 | 14/8/2550 | 126.44 | 1.23 | 99.03 |
| 20/4/2550 | 96.94 | 0.00 | 100.00 | 20/6/2550 | 103.37 | 0.91 | 99.12 | 16/8/2550 | 113.86 | 1.52 | 98.67 |
| 23/4/2550 | 103.55 | 0.99 | 99.05 | 23/6/2550 | 111.46 | 0.99 | 99.11 | 18/8/2550 | 116.83 | 0.59 | 99.49 |
| 25/4/2550 | 102.54 | 1.48 | 98.55 | 26/6/2550 | 99.76 | 1.01 | 98.99 | 21/8/2550 | 99.75 | 1.84 | 98.16 |
| 28/4/2550 | 110.03 | 1.27 | 98.85 | 28/6/2550 | 99.85 | 1.32 | 98.68 | 23/8/2550 | 103.73 | 1.73 | 98.33 |
| 30/4/2550 | 129.33 | 2.16 | 98.33 | 30/6/2550 | 98.37 | 1.52 | 98.45 | 25/8/2550 | 117.55 | 1.31 | 98.89 |
| 2/5/2550 | 100.32 | 1.03 | 98.97 | 2/7/2550 | 97.57 | 2.09 | 97.86 | 25/8/2550 | 145.00 | 0.76 | 99.48 |
| 4/5/2550 | 98.78 | 0.00 | 100.00 | 4/7/2550 | 109.44 | 1.68 | 98.46 | 28/8/2550 | 113.64 | 1.27 | 98.88 |
| 7/5/2550 | 99.97 | 1.51 | 98.49 | 6/7/2550 | 105.63 | 1.77 | 98.32 | 31/8/2550 | 97.88 | 1.73 | 98.23 |
| 9/5/2550 | 99.23 | 2.67 | 97.31 | 9/7/2550 | 105.26 | 0.31 | 99.71 | 3/9/2550 | 96.99 | 1.66 | 98.29 |
| 11/5/2550 | 99.12 | 1.64 | 98.35 | 11/7/2550 | 105.35 | 0.51 | 99.52 | 5/9/2550 | 108.25 | 0.79 | 99.27 |
| 14/5/2550 | 100.18 | 1.77 | 98.23 | 13/7/2550 | 123.35 | 1.99 | 98.39 | 8/9/2550 | 106.88 | 0.95 | 99.11 |
| 16/5/2550 | 103.11 | 2.49 | 97.59 | 15/7/2550 | 107.11 | 1.48 | 98.62 | 10/9/2550 | 96.87 | 1.42 | 98.53 |
| 19/5/2550 | 100.83 | 3.71 | 96.32 | 17/7/2550 | 106.46 | 1.26 | 98.82 | 12/9/2550 | 91.44 | 1.05 | 98.85 |
| 23/5/2550 | 98.63 | 2.81 | 97.15 | 20/7/2550 | 101.19 | 1.90 | 98.12 | 14/9/2550 | 98.18 | 0.66 | 99.33 |
| 25/5/2550 | 99.14 | 2.50 | 97.48 | | | | | | | | |
| 29/5/2550 | 99.35 | 1.97 | 98.02 | | | | | | | | |
| จำนวน | 24 | 24 | 24 | จำนวน | 22 | 22 | 22 | จำนวน | 22 | 22 | 22 |
| ค่าเฉลี่ย | 102.88 | 2.02 | 97.99 | ค่าเฉลี่ย | 107.69 | 1.35 | 98.74 | ค่าเฉลี่ย | 109.49 | 1.36 | 98.74 |
| SD | 8.50 | 1.68 | 1.85 | SD | 8.58 | 0.68 | 0.64 | SD | 11.67 | 0.52 | 0.50 |
| ค่าสูงสุด | 129.33 | 7.74 | 100.00 | ค่าสูงสุด | 135.44 | 2.92 | 99.71 | ค่าสูงสุด | 145.00 | 2.70 | 99.49 |
| ค่าต่ำสุด | 88.93 | 0.00 | 91.29 | ค่าต่ำสุด | 97.57 | 0.31 | 97.40 | ค่าต่ำสุด | 91.44 | 0.59 | 97.53 |

ตารางที่ ง.8 ไนไตรท์ของชุดการทดลองที่ 4

| ไนไตรท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|---------------|--------|----------|-------------------|---------------|--------|----------|-------------------|---------------|--------|----------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | | |
| วัน/เดือน/ปี | ไม่มีสารรบกวน | | | วัน/เดือน/ปี | ไม่มีสารรบกวน | | | วัน/เดือน/ปี | ไม่มีสารรบกวน | | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | %removal | | น้ำเข้า | น้ำออก | %removal | | น้ำเข้า | น้ำออก | %removal |
| 2/4/2550 | 0.023 | 0.001 | 94.20 | 1/6/2550 | 0.0211 | 0.0074 | 64.99 | 24/7/2550 | 0.0469 | 0.0181 | 61.38 |
| 4/4/2550 | 0.032 | 0.005 | 84.93 | 3/6/2550 | 0.0610 | 0.0141 | 100.00 | 27/7/2550 | 0.0053 | 0.0001 | 98.51 |
| 6/4/2550 | 0.023 | 0.005 | 78.11 | 6/6/2550 | 0.0027 | 0.0082 | 100.00 | 31/7/2550 | 0.0213 | 0.0079 | 62.92 |
| 9/4/2550 | 0.051 | 0.034 | 32.21 | 8/6/2550 | 0.0155 | 0.0000 | 100.00 | 3/8/2550 | 0.0241 | 0.0000 | 100.00 |
| 11/4/2550 | 0.035 | 0.009 | 75.60 | 10/6/2550 | 0.0235 | 0.0127 | 45.77 | 7/8/2550 | 0.0256 | 0.0032 | 87.66 |
| 14/4/2550 | 0.015 | 0.002 | 84.34 | 12/6/2550 | 0.0156 | 0.0141 | 9.87 | 9/8/2550 | 0.0272 | 0.0005 | 98.04 |
| 16/4/2550 | 0.000 | 0.005 | 100.00 | 14/6/2550 | 0.0469 | 0.0013 | 97.14 | 11/8/2550 | 0.0267 | 0.0054 | 79.65 |
| 18/4/2550 | 0.002 | 0.001 | 52.38 | 17/6/2550 | 0.0580 | 0.0065 | 88.79 | 14/8/2550 | 0.0279 | 0.0036 | 87.24 |
| 20/4/2550 | 0.121 | 0.006 | 94.87 | 20/6/2550 | 0.0468 | 0.0074 | 84.29 | 16/8/2550 | 0.0254 | 0.0003 | 98.72 |
| 23/4/2550 | 0.011 | 0.006 | 42.38 | 23/6/2550 | 0.0492 | 0.0026 | 94.82 | 18/8/2550 | 0.0326 | 0.0064 | 80.20 |
| 25/4/2550 | 0.045 | 0.005 | 89.78 | 26/6/2550 | 0.0477 | 0.0047 | 90.21 | 21/8/2550 | 0.0233 | 0.0007 | 97.20 |
| 28/4/2550 | 0.024 | 0.006 | 76.40 | 28/6/2550 | 0.0398 | 0.0056 | 85.81 | 23/8/2550 | 0.0428 | 0.0083 | 80.55 |
| 30/4/2550 | 0.061 | 0.005 | 91.39 | 30/6/2550 | 0.0218 | 0.0065 | 70.33 | 25/8/2550 | 0.0429 | 0.0095 | 77.77 |
| 2/5/2550 | 0.081 | 0.008 | 89.90 | 2/7/2550 | 0.0124 | 0.0026 | 79.03 | 25/8/2550 | 0.0854 | 0.0053 | 93.74 |
| 4/5/2550 | 0.056 | 0.006 | 89.07 | 4/7/2550 | 0.0876 | 0.0014 | 98.46 | 28/8/2550 | 0.0654 | 0.0098 | 85.05 |
| 7/5/2550 | 0.028 | 0.005 | 81.71 | 6/7/2550 | 0.0934 | 0.0016 | 98.34 | 31/8/2550 | 0.0678 | 0.0053 | 92.18 |
| 9/5/2550 | 0.025 | 0.006 | 74.36 | 9/7/2550 | 0.0254 | 0.0087 | 65.75 | 3/9/2550 | 0.0866 | 0.0086 | 90.02 |
| 11/5/2550 | 0.034 | 0.004 | 87.53 | 11/7/2550 | 0.0326 | 0.0030 | 90.85 | 5/9/2550 | 0.0877 | 0.0085 | 90.36 |
| 14/5/2550 | 0.045 | 0.004 | 90.58 | 13/7/2550 | 0.0746 | 0.0026 | 96.54 | 8/9/2550 | 0.0643 | 0.0048 | 92.58 |
| 16/5/2550 | 0.024 | 0.006 | 73.21 | 15/7/2550 | 0.0646 | 0.0003 | 99.50 | 10/9/2550 | 0.0753 | 0.0005 | 99.28 |
| 19/5/2550 | 0.049 | 0.005 | 89.08 | 17/7/2550 | 0.0547 | 0.0054 | 90.08 | 12/9/2550 | 0.0233 | 0.0065 | 71.97 |
| 23/5/2550 | 0.057 | 0.006 | 90.04 | 20/7/2550 | 0.0612 | 0.0053 | 91.36 | 14/9/2550 | 0.0543 | 0.0063 | 88.32 |
| 25/5/2550 | 0.049 | 0.001 | 97.04 | | | | | | | | |
| 29/5/2550 | 0.051 | 0.007 | 85.65 | | | | | | | | |
| จำนวน | 24.000 | 24.000 | 24 | จำนวน | 22 | 22 | 22 | จำนวน | 22 | 22 | 22 |
| ค่าเฉลี่ย | 0.039 | 0.006 | 81.031 | ค่าเฉลี่ย | 0.043 | 0.006 | 83.724 | ค่าเฉลี่ย | 0.0446 | 0.0054 | 86.9690 |
| SD | 0.026 | 0.006 | 16.809 | SD | 0.025 | 0.004 | 21.749 | SD | 0.0248 | 0.0044 | 11.2009 |
| ค่าสูงสุด | 0.121 | 0.034 | 100 | ค่าสูงสุด | 0.093 | 0.014 | 100 | ค่าสูงสุด | 0.0877 | 0.0181 | 100 |
| ค่าต่ำสุด | 0.000 | 0.001 | 32.21 | ค่าต่ำสุด | 0.003 | 0.000 | 9.872 | ค่าต่ำสุด | 0.0053 | 0.0000 | 61.3757 |

ตารางที่ ง.9 ซัลเฟตของชุดการทดลองที่ 4

| ซัลเฟต (มิลลิกรัมซัลเฟต ต่อลิตร) | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|---------------|--------|----------|-------------------|---------------|--------|----------|-------------------|---------------|--------|----------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | | |
| วันเดือนปี | ไม่มีสารรบกวน | | | วันเดือนปี | ไม่มีสารรบกวน | | | วันเดือนปี | ไม่มีสารรบกวน | | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | %removal | | น้ำเข้า | น้ำออก | %removal | | น้ำเข้า | น้ำออก | %removal |
| 2/4/2550 | 47.85 | 20.15 | 57.88 | 1/6/2550 | 39.11 | 9.95 | 74.56 | 9/8/2550 | 48.94 | 10.44 | 78.66 |
| 4/4/2550 | 30.25 | 13.71 | 54.67 | 6/6/2550 | 32.11 | 7.10 | 77.89 | 11/8/2550 | 38.99 | 11.21 | 71.26 |
| 6/4/2550 | 23.95 | 10.69 | 55.35 | 8/6/2550 | 25.34 | 5.94 | 76.55 | 14/8/2550 | 54.78 | 14.48 | 73.56 |
| 9/4/2550 | 34.87 | 18.94 | 45.67 | 10/6/2550 | 38.25 | 8.46 | 77.89 | 16/8/2550 | 44.78 | 10.40 | 76.78 |
| 11/4/2550 | 37.93 | 14.70 | 61.24 | 12/6/2550 | 28.79 | 7.61 | 73.56 | 18/8/2550 | 29.46 | 6.20 | 78.97 |
| 14/4/2550 | 39.07 | 16.03 | 58.97 | 14/6/2550 | 29.42 | 5.95 | 79.77 | 21/8/2550 | 31.23 | 7.91 | 74.67 |
| 16/4/2550 | 41.02 | 15.40 | 62.45 | 17/6/2550 | 31.11 | 7.64 | 75.44 | 23/8/2550 | 59.88 | 12.58 | 78.99 |
| 18/4/2550 | 32.97 | 11.29 | 65.77 | 20/6/2550 | 32.24 | 6.16 | 80.88 | 25/8/2550 | 54.67 | 10.26 | 81.24 |
| 20/4/2550 | 38.60 | 8.32 | 78.44 | 23/6/2550 | 40.87 | 7.36 | 81.98 | 28/8/2550 | 38.77 | 7.83 | 79.80 |
| 23/4/2550 | 37.15 | 12.68 | 65.88 | 26/6/2550 | 36.78 | 10.05 | 72.68 | 31/8/2550 | 45.67 | 9.60 | 78.97 |
| 25/4/2550 | 29.89 | 10.89 | 63.55 | 28/6/2550 | 58.69 | 10.82 | 81.57 | 5/9/2550 | 43.68 | 10.11 | 76.86 |
| 28/4/2550 | 28.66 | 9.36 | 67.33 | 30/6/2550 | 51.46 | 11.89 | 76.89 | 10/9/2550 | 49.89 | 12.69 | 74.56 |
| 30/4/2550 | 29.56 | 8.94 | 69.77 | 6/7/2550 | 31.24 | 6.67 | 78.66 | | | | |
| 2/5/2550 | 30.13 | 8.65 | 71.29 | 9/7/2550 | 33.09 | 7.68 | 76.78 | | | | |
| 4/5/2550 | 46.90 | 14.17 | 69.78 | 11/7/2550 | 37.68 | 8.04 | 78.66 | | | | |
| 7/5/2550 | 38.96 | 11.74 | 69.87 | 13/7/2550 | 31.24 | 7.33 | 76.55 | | | | |
| 9/5/2550 | 33.95 | 9.35 | 72.46 | 15/7/2550 | 45.67 | 13.81 | 69.77 | | | | |
| 11/5/2550 | 35.26 | 7.91 | 77.57 | 17/7/2550 | 30.94 | 9.11 | 70.56 | | | | |
| 14/5/2550 | 28.89 | 7.03 | 75.66 | 20/7/2550 | 27.86 | 8.01 | 71.24 | | | | |
| 16/5/2550 | 31.78 | 7.39 | 76.75 | 24/7/2550 | 33.97 | 7.16 | 78.91 | | | | |
| 19/5/2550 | 34.67 | 8.02 | 76.86 | 27/7/2550 | 35.67 | 9.35 | 73.78 | | | | |
| 23/5/2550 | 35.57 | 8.66 | 75.66 | 31/7/2550 | 31.27 | 7.23 | 76.89 | | | | |
| 25/5/2550 | 30.76 | 7.12 | 76.86 | 3/8/2550 | 45.67 | 9.61 | 78.96 | | | | |
| 29/5/2550 | 24.67 | 5.51 | 77.67 | 7/8/2550 | 47.88 | 11.21 | 76.58 | | | | |
| จำนวน | 24 | 24 | 24 | จำนวน | 24 | 24 | 24 | จำนวน | 12 | 12 | 12 |
| ค่าเฉลี่ย | 34.30 | 11.11 | 67.81 | ค่าเฉลี่ย | 36.51 | 8.51 | 76.54 | ค่าเฉลี่ย | 45.06 | 10.31 | 77.03 |
| SD | 6.02 | 3.88 | 8.87 | SD | 8.21 | 2.00 | 3.33 | SD | 9.33 | 2.31 | 2.96 |
| ค่าสูงสุด | 47.85 | 20.15 | 78.44 | ค่าสูงสุด | 58.69 | 13.81 | 81.98 | ค่าสูงสุด | 59.88 | 14.48 | 81.24 |
| ค่าต่ำสุด | 23.95 | 5.51 | 45.67 | ค่าต่ำสุด | 25.34 | 5.94 | 69.77 | ค่าต่ำสุด | 29.46 | 6.20 | 71.26 |

ตารางที่ ง.10 ซัลไฟด์ของชุดการทดลองที่ 4

| ซัลไฟด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | | | | | | | |
|----------------------------|---------------|------------|-------------------|---------------|------------|-------------------|---------------|------------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | |
| วัน/เดือน/ปี | ไม่มีสารรบกวน | | วัน/เดือน/ปี | ไม่มีสารรบกวน | | วัน/เดือน/ปี | ไม่มีสารรบกวน | |
| | น้ำออก | ชุดดักก๊าซ | | น้ำออก | ชุดดักก๊าซ | | น้ำออก | ชุดดักก๊าซ |
| 2/4/2550 | 5.14 | - | 1/6/2550 | 5.22 | - | 11/8/2550 | 8.24 | 5.23 |
| 4/4/2550 | 5.44 | - | 6/6/2550 | 5.64 | - | 14/8/2550 | 8.81 | - |
| 6/4/2550 | 4.23 | - | 8/6/2550 | 6.23 | - | 16/8/2550 | 7.89 | - |
| 9/4/2550 | 4.83 | - | 12/6/2550 | 6.22 | - | 18/8/2550 | 6.25 | - |
| 11/4/2550 | 4.73 | - | 14/6/2550 | 8.25 | - | 21/8/2550 | 6.45 | 3.31 |
| 14/4/2550 | 5.98 | 1.31 | 16/6/2550 | 7.25 | - | 23/8/2550 | 6.52 | - |
| 16/4/2550 | 5.93 | - | 20/6/2550 | 5.38 | 2.32 | 25/8/2550 | 6.49 | 4.78 |
| 18/4/2550 | 5.88 | - | 23/6/2550 | 6.24 | - | 28/8/2550 | 7.35 | 4.31 |
| 20/4/2550 | 8.65 | 1.07 | 25/6/2550 | 6.78 | - | 31/8/2550 | 9.66 | 4.02 |
| 23/4/2550 | 7.23 | - | 28/6/2550 | 6.72 | 2.00 | 4/9/2550 | 13.78 | 6.76 |
| 25/4/2550 | 7.78 | - | 30/6/2550 | 9.83 | 3.65 | 8/9/2550 | 11.56 | 3.64 |
| 28/4/2550 | 5.45 | 1.27 | 6/7/2550 | 9.97 | 7.06 | | | |
| 30/4/2550 | 6.45 | - | 9/7/2550 | 9.78 | 9.25 | | | |
| 2/5/2550 | 6.66 | - | 11/7/2550 | 7.46 | 2.05 | | | |
| 4/5/2550 | 9.03 | 1.44 | 13/7/2550 | 11.06 | 2.56 | | | |
| 7/5/2550 | 7.24 | 2.18 | 15/7/2550 | 8.79 | 5.79 | | | |
| 9/5/2550 | 6.66 | - | 17/7/2550 | 6.55 | 3.12 | | | |
| 11/5/2550 | 6.98 | 2.51 | 20/7/2550 | 6.75 | 1.53 | | | |
| 14/5/2550 | 6.05 | 4.92 | 24/7/2550 | 13.65 | 9.20 | | | |
| 16/5/2550 | 6.78 | - | 27/7/2550 | 12.65 | 4.85 | | | |
| 19/5/2550 | 7.36 | 6.25 | 31/7/2550 | 8.65 | 2.51 | | | |
| 23/5/2550 | 7.56 | 3.02 | 3/8/2550 | 10.23 | 5.06 | | | |
| 25/5/2550 | 6.77 | 2.42 | 7/8/2550 | 9.87 | 2.34 | | | |
| 29/5/2550 | 5.45 | 3.36 | 9/8/2550 | 11.13 | 9.12 | | | |
| จำนวน | 24 | 11 | จำนวน | 24 | 16 | จำนวน | 11 | 7 |
| ค่าเฉลี่ย | 6.43 | 2.70 | ค่าเฉลี่ย | 8.35 | 4.52 | ค่าเฉลี่ย | 8.45 | 4.58 |
| SD | 1.20 | 1.63 | SD | 2.35 | 2.77 | SD | 2.40 | 1.16 |
| ค่าสูงสุด | 9.03 | 6.25 | ค่าสูงสุด | 13.65 | 9.25 | ค่าสูงสุด | 13.78 | 6.76 |
| ค่าต่ำสุด | 4.23 | 1.07 | ค่าต่ำสุด | 5.22 | 1.53 | ค่าต่ำสุด | 6.25 | 3.31 |

ตารางที่ ง.11 ก๊าซชีวภาพของชุดการทดลองที่ 4

| ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร/วัน) | | | | | |
|----------------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | ช่วงการทดลองที่ 3 | |
| วัน/เดือน/ปี | ไม่มีสารบกกวน | วัน/เดือน/ปี | ไม่มีสารบกกวน | วัน/เดือน/ปี | ไม่มีสารบกกวน |
| 6/4/2550 | 5959 | 3/6/2550 | 6197 | 27/7/2550 | 5850 |
| 14/4/2550 | 5723 | 8/6/2550 | 6455 | 3/8/2550 | 5891 |
| 20/4/2550 | 6600 | 12/6/2550 | 5574 | 6/8/2550 | 6000 |
| 28/4/2550 | 5760 | 17/6/2550 | 6400 | 11/8/2550 | 5760 |
| 4/5/2550 | 6616 | 24/6/2550 | 5723 | 19/8/2550 | 6039 |
| 11/5/2550 | 5850 | 1/7/2550 | 5280 | 26/8/2550 | 6200 |
| 21/5/2550 | 6480 | 8/7/2550 | 5620 | 2/9/2550 | 5790 |
| 29/5/2550 | 5143 | 15/7/2550 | 6442 | 9/9/2550 | 5810 |
| จำนวน | 8 | จำนวน | 8 | จำนวน | 8 |
| ค่าเฉลี่ย | 6016 | ค่าเฉลี่ย | 5961 | ค่าเฉลี่ย | 5917 |
| SD | 516 | SD | 465 | SD | 151 |
| ค่าสูงสุด | 6616 | ค่าสูงสุด | 6455 | ค่าสูงสุด | 6200 |
| ค่าต่ำสุด | 5143 | ค่าต่ำสุด | 5280 | ค่าต่ำสุด | 5760 |

ตารางที่ ง.12 ของแข็งแขวนลอยที่ออกจากระบบของชุดการทดลองที่ 4

| ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | | | | | | | |
|-------------------------------------|---------------|--------|-------------------|---------------|--------|-------------------|---------------|--------|
| ช่วงการทดลองที่ 1 | | | ช่วงการทดลองที่ 2 | | | ช่วงการทดลองที่ 3 | | |
| วัน/เดือน/ปี | ไม่มีสารรบกวน | | วัน/เดือน/ปี | ไม่มีสารรบกวน | | วัน/เดือน/ปี | ไม่มีสารรบกวน | |
| | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก | | น้ำเข้า | น้ำออก |
| 2/4/2550 | - | 36.92 | 1/6/2550 | - | 15.45 | 24/7/2550 | - | 12.24 |
| 11/4/2550 | - | 36.35 | 6/6/2550 | - | 14.67 | 31/7/2550 | - | 13.25 |
| 18/4/2550 | - | 25.33 | 12/6/2550 | - | 14.28 | 9/8/2550 | - | 12.67 |
| 25/4/2550 | - | 24.36 | 16/6/2550 | - | 13.78 | 11/8/2550 | - | 12.65 |
| 2/5/2550 | - | 35.67 | 23/6/2550 | - | 13.46 | 16/8/2550 | - | 14.46 |
| 11/5/2550 | - | 22.12 | 28/6/2550 | - | 12.67 | 21/8/2550 | - | 12.89 |
| 19/5/2550 | - | 17.24 | 6/7/2550 | - | 12.72 | 23/8/2550 | - | 12.73 |
| 25/5/2550 | - | 15.25 | 11/7/2550 | - | 14.64 | 25/8/2550 | - | 12.88 |
| 29/5/2550 | - | 14.23 | 17/7/2550 | - | 12.35 | 31/8/2550 | - | 11.77 |
| | | | | | | 10/9/2550 | - | 13.49 |
| จำนวน | - | 9 | จำนวน | - | 9 | จำนวน | - | 10 |
| ค่าเฉลี่ย | - | 25.3 | ค่าเฉลี่ย | - | 13.8 | ค่าเฉลี่ย | - | 12.9 |
| SD | - | 9.11 | SD | - | 1.06 | SD | - | 0.73 |
| ค่าสูงสุด | - | 36.9 | ค่าสูงสุด | - | 15.5 | ค่าสูงสุด | - | 14.5 |
| ค่าต่ำสุด | - | 14.2 | ค่าต่ำสุด | - | 12.4 | ค่าต่ำสุด | - | 11.8 |

ภาคผนวก จ

การวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซและการคำนวณสมมูลมวลในระบบ

ความดันพาร์เชียลก๊าซชีวภาพ คือ สัดส่วนของก๊าซแต่ละชนิดที่เป็นองค์ประกอบของก๊าซทั้งหมด โดยก๊าซชีวภาพในงานวิจัยแต่ละชนิดที่เป็นองค์ประกอบของก๊าซ 4 ชนิด คือ ก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และก๊าซไนโตรเจน แต่เนื่องจากมีการติดตั้งชุดดักก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ไว้ก่อนหน้าอุปกรณ์วัดปริมาตรก๊าซแบบแทนที่น้ำ ดังนั้นปริมาตรของก๊าซที่ได้จะประกอบด้วย ก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจน

จากผลการวิเคราะห์ก๊าซด้วยเครื่อง Gas Chromatography เมื่อนำมาคำนวณสัดส่วนของก๊าซแต่ละชนิด โดยกำหนดว่าตัวอย่างก๊าซที่นำมาวิเคราะห์มีเฉพาะก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนเท่านั้น จะได้ผลดังกล่าวที่ จ.1

ตารางที่ จ.1 สัดส่วนของก๊าซแต่ละชนิดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatography

| ชุดการทดลองที่ | % N ₂ | % CO ₂ | % CH ₄ |
|--|------------------|-------------------|-------------------|
| ชุดการทดลองที่ 1 | | | |
| 1. NO ₃ ⁻ : SO ₄ ²⁻ =100 : 50 | 7.45 | 13.47 | 73.53 |
| 2. NO ₃ ⁻ : SO ₄ ²⁻ =100 : 100 | 5.22 | 11.12 | 68.12 |
| 3. NO ₃ ⁻ : SO ₄ ²⁻ =100 : 150 | 6.35 | 14.53 | 66.65 |
| ชุดการทดลองที่ 2 | | | |
| 1 NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 1,000 | 5.74 | 14.55 | 75.24 |
| 2 NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 1,500 | 7.11 | 14.86 | 74.24 |
| 3 NO ₃ ⁻ : Cl ⁻ = 100 : 2,000 | 6.28 | 12.35 | 73.69 |
| ชุดการทดลองที่ 3 | | | |
| 1 NO ₃ ⁻ : NO ₂ ⁻ = 100 : 50 | 7.86 | 13.23 | 69.86 |
| 2. NO ₃ ⁻ : SO ₄ ²⁻ =100 : 100 | 15.67 | 10.76 | 68.72 |
| 3. NO ₃ ⁻ : SO ₄ ²⁻ =100 : 150 | 18.35 | 9.45 | 63.83 |
| ชุดการทดลองที่ 4 | | | |
| ช่วงการทดลองที่ 1 | 6.71 | 13.89 | 77.61 |
| ช่วงการทดลองที่ 2 | 5.85 | 13.06 | 76.70 |
| ช่วงการทดลองที่ 3 | 6.22 | 12.38 | 78.36 |

ตัวอย่าง การคำนวณสมดุลมวลซีโอดี

จากข้อมูลในตารางที่ 4.14 ของชุดการทดลองที่ 1 ที่ความเข้มข้นของไนเตรทต่อซัลเฟตเท่ากับ $\text{NO}_3^- : \text{SO}_4^{2-} = 100 : 50$ มิลลิกรัม/ลิตร อัตราการไหลของน้ำเสียของระบบ 25 ลิตรต่อวัน

| | | |
|---------------------|---------|------------------|
| ซีโอดีเข้า | 1010.78 | มิลลิกรัมต่อลิตร |
| ซีโอดีออก | 80.00 | มิลลิกรัมต่อลิตร |
| ซัลเฟตเข้า | 54.30 | มิลลิกรัมต่อลิตร |
| ซัลเฟตออก | 19.34 | มิลลิกรัมต่อลิตร |
| ไนเตรทเข้า | 110.11 | มิลลิกรัมต่อลิตร |
| ไนเตรทออก | 3.32 | มิลลิกรัมต่อลิตร |
| ก๊าซทั้งหมดต่อวัน | 5188 | มิลลิลิตร |
| สัดส่วนของก๊าซมีเทน | 73.53 | เปอร์เซ็นต์ |

จากสมการที่ 2.10 หัวข้อที่ 2.9.1

$$\% \text{COD recovery} = [(\text{solubleCOD}_{\text{eff}} + \text{CH}_{4\text{gas}}\text{-COD} + \text{solubleCH}_4\text{-COD} + \Delta\text{SO}_4^{2-}\text{-COD} + \Delta\text{NO}_3^-\text{-COD}) / \text{COD}_{\text{in}}] \times 100 \quad \dots\dots\dots 2.10$$

เมื่อ

COD_{in} = ซีโอดีทั้งหมดก่อนเข้าระบบ

$\text{solubleCOD}_{\text{eff}}$ = ซีโอดีละลายหลังผ่านระบบ

$\text{CH}_{4\text{gas}}\text{-COD}$ = ซีโอดีในรูปก๊าซมีเทน

$\text{solubleCH}_4\text{-COD}$ = ซีโอดีในรูปมีเทนละลายน้ำ

COD_{acc} = ซีโอดีที่ถูกสะสมในเซลล์จุลินทรีย์

$\Delta\text{SO}_4^{2-}\text{-COD}$ = ซีโอดีที่ถูกใช้ในกระบวนการซัลเฟตรีดักชัน

$\Delta\text{NO}_3^-\text{-COD}$ = ซีโอดีที่ถูกใช้ในกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน

COD_{in} = 1010.78 มิลลิกรัม/ลิตร

$\text{solubleCOD}_{\text{eff}}$ = 80.00 มิลลิกรัม/ลิตร

$\text{CH}_{4\text{gas}}\text{-COD}$ = $(\text{Total gas volume} \times \% \text{CH}_4 \times 16 \times 4) / (24.86 \times Q)$
 = $(5188 \times 0.7353 \times 16 \times 4) / (24.86 \times 25)$
 = 392.83 มิลลิกรัม/ลิตร ในรูปซีโอดี

$$\begin{aligned} \text{solubleCH}_4\text{-COD} &= K_{\text{hCH}_4} \times \text{Partial Pressure of CH}_4 \times 16,000 \times 4 \\ &= 12.4 \times 10^{-4} \times 0.7353 \times 16,000 \times 4 \\ &= 58.35 \quad \text{มิลลิกรัม/ลิตร ในรูปซีไอดี} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta\text{SO}_4^{2-}\text{-COD} &= (\text{ซัลเฟตเข้า} - \text{ซัลเฟตออก}) \times 2/3 \\ &\quad (\text{ซัลเฟตที่ถูกรีดิวซ์ 1 มิลลิกรัม ต้องใช้ซีไอดี 2/3 มิลลิกรัม}) \\ &= (54.30 - 19.34) \times 2/3 \\ &= 25.31 \quad \text{มิลลิกรัม/ลิตร ในรูปซีไอดี} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta\text{NO}_3^- \text{-COD} &= (\text{ไนเตรทเข้า} - \text{ไนเตรทออก}) \times 2 / 3.4 \\ &= (\text{ไนเตรทที่ถูกรีดิวซ์ 1 มิลลิกรัม ต้องใช้ซีไอดี 2/3.4 มิลลิกรัม}) \\ &= (110.11 - 3.32) \times 2 / 3.4 \\ &= 62.82 \quad \text{มิลลิกรัม/ลิตร ในรูปซีไอดี} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น \%COD recovery} &= [(80+392.83+58.35+25.31+62.82)/1010.78] \times 100 \\ &= 61.10 \% \end{aligned}$$

สัดส่วนการใช้อิเล็กตรอนของแบคทีเรียในระบบ

$$\begin{aligned} \% \text{electron flow to MBP} &= [(\text{CH}_4\text{-COD})/(\text{CH}_4\text{-COD}+\Delta\text{SO}_4^{2-}\text{-COD}+\Delta\text{NO}_3^- \text{-COD})] \times 100 \\ &\dots\dots\dots 2.12 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{electron flow to SRP} &= [(\Delta\text{SO}_4^{2-}\text{-COD})/(\text{CH}_4\text{-COD}+\Delta\text{SO}_4^{2-}\text{-COD}+\Delta\text{NO}_3^- \text{-COD})] \times 100 \\ &\dots\dots\dots 2.13 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{electron flow to DNB} &= [(\Delta\text{NO}_3^- \text{-COD})/(\text{CH}_4\text{-COD}+\Delta\text{SO}_4^{2-}\text{-COD}+\Delta\text{NO}_3^- \text{-COD})] \times 100 \\ &\dots\dots\dots 2.14 \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \% \text{electron flow to MBP} &= [(392.83+58.35)/(392.83+58.35+25.31+62.82)] \times 100 \\ &= 83.67 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{electron flow to SRP} &= [25.31/(392.83+58.35+25.31+62.82)] \times 100 \\ &= 4.34 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{electron flow to DNB} &= [62.82/(392.83+58.35+25.31+62.82)] \times 100 \\ &= 11.69 \% \end{aligned}$$

จากข้อมูลในตารางที่ 4.14 ของชุดการทดลองที่ 3 ที่ความเข้มข้นของไนเตรทต่อไนไตรท์ เท่ากับ $\text{NO}_3^- : \text{NO}_2^- = 100 : 50$ มิลลิกรัม/ลิตร อัตราการไหลของน้ำเสียของระบบ 25 ลิตรต่อวัน

| | | |
|---------------------|---------|------------------|
| ซีไอดีเข้า | 1058.29 | มิลลิกรัมต่อลิตร |
| ซีไอดีออก | 81.67 | มิลลิกรัมต่อลิตร |
| ไนเตรทเข้า | 104.72 | มิลลิกรัมต่อลิตร |
| ไนเตรทออก | 2.94 | มิลลิกรัมต่อลิตร |
| ไนไตรท์เข้า | 48.69 | มิลลิกรัมต่อลิตร |
| ไนไตรท์ออก | 2.71 | มิลลิกรัมต่อลิตร |
| ก๊าซทั้งหมดต่อวัน | 5054 | มิลลิลิตร |
| สัดส่วนของก๊าซมีเทน | 69.86 | เปอร์เซ็นต์ |

$$\% \text{COD recovery} = [(\text{solubleCOD}_{\text{eff}} + \text{CH}_{4\text{gas}}\text{-COD} + \text{solubleCH}_4\text{-COD} + \Delta \text{SO}_4^{2-}\text{-COD} + \Delta \text{NO}_3^- \text{-COD} + \Delta \text{NO}_2^- \text{-COD}) / \text{COD}_{\text{in}}] \times 100$$

เมื่อ

| | | |
|--------------------------------------|---|--|
| COD_{in} | = | ซีไอดีทั้งหมดก่อนเข้าระบบ |
| $\text{solubleCOD}_{\text{eff}}$ | = | ซีไอดีละลายหลังผ่านระบบ |
| $\text{CH}_{4\text{gas}}\text{-COD}$ | = | ซีไอดีในรูปก๊าซมีเทน |
| $\text{solubleCH}_4\text{-COD}$ | = | ซีไอดีในรูปมีเทนละลายน้ำ |
| COD_{acc} | = | ซีไอดีที่ถูกสะสมในเซลล์จุลินทรีย์ |
| $\Delta \text{SO}_4^{2-}\text{-COD}$ | = | ซีไอดีที่ถูกใช้ในกระบวนการซัลเฟตรีดักชัน |
| $\Delta \text{NO}_3^- \text{-COD}$ | = | ซีไอดีที่ถูกใช้ในกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน |
| $\Delta \text{NO}_2^- \text{-COD}$ | = | ซีไอดีที่ถูกใช้ในกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน |

$$\text{COD}_{\text{in}} = 1058.29 \text{ มิลลิกรัม/ลิตร}$$

$$\text{solubleCOD}_{\text{eff}} = 81.67 \text{ มิลลิกรัม/ลิตร}$$

$$\begin{aligned} \text{CH}_{4\text{gas}}\text{-COD} &= (\text{Total gas volume} \times \% \text{CH}_4 \times 16 \times 4) / (24.86 \times Q) \\ &= (5054 \times 0.6986 \times 16 \times 4) / (24.86 \times 25) \\ &= 363.58 \text{ มิลลิกรัม/ลิตร ในรูปซีไอดี} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{solubleCH}_4\text{-COD} &= K_{\text{hCH}_4} \times \text{Partial Pressure of CH}_4 \times 16,000 \times 4 \\ &= 12.4 \times 10^{-4} \times 0.6986 \times 16,000 \times 4 \\ &= 55.44 \text{ มิลลิกรัม/ลิตร ในรูปซีไอดี} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta \text{NO}_3^- \text{-COD} &= (\text{ไนเตรทเข้า} - \text{ไนเตรทออก}) \times 2 / 3.4 \\
 &= (\text{ไนเตรทที่ถูกรีดิวซ์ 1 มิลลิกรัม ต้องใช้ซีไอดี 2/3.4 มิลลิกรัม}) \\
 &= (104.72 - 2.94) \times 2 / 3.4 \\
 &= 59.87 \quad \text{มิลลิกรัม/ลิตร ในรูปซีไอดี}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta \text{NO}_2^- \text{-COD} &= (\text{ไนไตรท์เข้า} - \text{ไนไตรท์ออก}) \times 1 / 2.1 \\
 &= (\text{ไนไตรท์ที่ถูกรีดิวซ์ 1 มิลลิกรัม ต้องใช้ซีไอดี 1 / 2.1 มิลลิกรัม}) \\
 &= (48.697 - 2.71) \times 1 / 2.1 \\
 &= 21.90 \quad \text{มิลลิกรัม/ลิตร ในรูปซีไอดี}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น \%COD recovery} &= [(81.67+363.58 +55.44+59.87+21.90)/ 1058.29] \times 100 \\
 &= 54.45 \%
 \end{aligned}$$

สัดส่วนการใช้ซีไอดีของแบคทีเรียในระบบ

$$\begin{aligned}
 \% \text{electron flow to MBP} &= [(\text{CH}_4\text{-COD}) / (\text{CH}_4\text{-COD} + \Delta \text{NO}_3^- \text{-COD} + \Delta \text{NO}_2^- \text{-COD})] \times 100 \\
 & \dots\dots\dots 2.9
 \end{aligned}$$

%electron flow to MBP =

$$\begin{aligned}
 & [(\Delta \text{NO}_3^- \text{-COD} + \Delta \text{NO}_2^- \text{-COD}) / (\text{CH}_4\text{-COD} + \Delta \text{SO}_4^{2-} \text{-COD} + \Delta \text{NO}_3^- \text{-COD} + \Delta \text{NO}_2^- \text{-COD})] \times 100 \\
 & \dots\dots\dots 2.11
 \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned}
 \% \text{electron flow to MBP} &= [(363.58+55.44) / (363.58+55.44+59.87+21.90)] \times 100 \\
 &= 83.67 \%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \% \text{electron flow to DNB} &= [(65.665+35.544) / (363.58+55.44+59.87+21.90)] \times 100 \\
 &= 16.38 \%
 \end{aligned}$$

สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างการคำนวณสมดุลมวลของไนโตรเจน

จากข้อมูลตารางที่ 4.16 ของชุดการทดลองที่ 1 ที่ความเข้มข้นของไนเตรตต่อซัลเฟตเท่ากับ $\text{NO}_3^- : \text{SO}_4^{2-} = 100 : 50$ มิลลิกรัม/ลิตร อัตราการไหลของน้ำเสียของระบบ 25 ลิตรต่อวัน

| | | |
|------------------------|--------|------------------|
| ไนเตรตเข้า | 110.11 | มิลลิกรัมต่อลิตร |
| ไนเตรตออก | 3.32 | มิลลิกรัมต่อลิตร |
| ก๊าซทั้งหมดต่อวัน | 5188 | มิลลิลิตร |
| สัดส่วนของก๊าซไนโตรเจน | 7.45 | เปอร์เซ็นต์ |

จากสมการ 2.15 ในหัวข้อ 2.9.3

$$\% \text{nitrogen recovery} = [(\text{NO}_3^- \text{ eff} + \text{N}_{2\text{gas}} + \text{soluble N}_{2\text{gas}}) / \text{NO}_3^- \text{ in}] \times 100 \dots\dots\dots 2.15$$

เมื่อ

- $\text{NO}_3^- \text{ in}$ = ไนโตรเจนในรูปไนเตรตที่อยู่ในน้ำเข้า
- $\text{NO}_3^- \text{ eff}$ = ไนโตรเจนในรูปไนเตรตที่อยู่ในน้ำออก
- $\text{N}_{2\text{gas}}$ = ไนโตรเจนในรูปก๊าซไนโตรเจน
- $\text{soluble N}_{2\text{gas}}$ = ไนโตรเจนในรูปก๊าซไนโตรเจนที่ละลายน้ำ

$$\begin{aligned} \text{N}_{2\text{gas}} &= (\text{Total gas volume} \times \% \text{N}_2 / 24.86) \times 28 \times 124 / (28 \times Q) \\ &= (5188 \times 0.0745 / 24.86) \times 28 \times 124 / (28 \times 25) \\ &= 77.11 \text{ มิลลิกรัม/ลิตร ในรูปไนเตรต} \end{aligned}$$

(จากสมการ $2\text{NO}_3^- + 12\text{H}^+ + 10\text{e}^- \rightarrow \text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ นั่นคือ ไนเตรต 2 โมล เกิด

เป็นก๊าซไนโตรเจน 1 โมล)

$$\begin{aligned} \text{soluble N}_{2\text{gas}} &= K_{\text{HN}_2} \times \text{Partial Pressure of N}_2 \times 28,000 \times 124/28 \\ &= 6.03 \times 10^{-4} \times 0.0745 \times 28,000 \times 124/28 \\ &= 5.57 \text{ มิลลิกรัม/ลิตร ในรูปไนเตรต} \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \% \text{ nitrogen recovery} &= [(3.32+77.11+5.57)/110.11] \times 100 \\ &= 78.11 \% \end{aligned}$$

จากข้อมูลตารางที่ 4.16 ของชุดการทดลองที่ 3 ที่ความเข้มข้นของไนเตรตต่อซัลเฟต เท่ากับ $\text{NO}_3^- : \text{NO}_2^- = 100 : 50$ มิลลิกรัม/ลิตร อัตราการไหลของน้ำเสียของระบบ 25 ลิตรต่อวัน

| | | |
|------------------------|--------|------------------|
| ไนเตรตเข้า | 104.72 | มิลลิกรัมต่อลิตร |
| ไนเตรตออก | 2.94 | มิลลิกรัมต่อลิตร |
| ไนไตรท์เข้า | 48.69 | มิลลิกรัมต่อลิตร |
| ไนไตรท์ออก | 2.71 | มิลลิกรัมต่อลิตร |
| ก๊าซทั้งหมดต่อวัน | 5054 | มิลลิลิตร |
| สัดส่วนของก๊าซไนโตรเจน | 7.86 | เปอร์เซ็นต์ |

จากสมการ 2.18 ในหัวข้อ 2.9.3

$$\% \text{nitrogen recovery} = [(\text{NO}_3^- \text{ eff} + \text{N}_{2\text{gas}} + \text{soluble N}_{2\text{gas}}) / \text{NO}_3^- \text{ in}] \times 100 \dots\dots\dots 2.18$$

เมื่อ

- $\text{NO}_3^- \text{ in}$ = ไนโตรเจนในรูปไนเตรตที่อยู่ในน้ำเข้า
- $\text{NO}_3^- \text{ eff}$ = ไนโตรเจนในรูปไนเตรตที่อยู่ในน้ำออก
- $\text{N}_{2\text{gas}}$ = ไนโตรเจนในรูปก๊าซไนโตรเจน
- $\text{soluble N}_{2\text{gas}}$ = ไนโตรเจนในรูปก๊าซไนโตรเจนที่ละลายน้ำ

ซึ่งในระบบมีไนไตรท์ จึงใช้สมการดังนี้

$$\% \text{nitrogen recovery} = [(\text{NO}_3^- \text{ eff} + \text{NO}_2^- \text{ eff} + \text{N}_{2\text{gas}} + \text{soluble N}_{2\text{gas}}) / (\text{NO}_3^- \text{ in} + \text{NO}_2^- \text{ in})] \times 100$$

เมื่อ

- $\text{NO}_2^- \text{ in}$ = ไนโตรเจนในรูปไนไตรท์ที่อยู่ในน้ำเข้า
- $\text{NO}_2^- \text{ eff}$ = ไนโตรเจนในรูปไนไตรท์ที่อยู่ในน้ำออก

$$\begin{aligned} \text{N}_{2\text{gas}} &= (\text{Total gas volume} \times \% \text{N}_2 / 24.86) \times 28 \times 124 / (28 \times Q) \\ &= (5071 \times 0.0786 / 24.86) \times 28 \times 124 / (28 \times 25) \\ &= 79.523 \text{ มิลลิกรัม/ลิตร ในรูปไนเตรต} \\ &= 17.956 \text{ มิลลิกรัม/ลิตร ในรูปไนโตรเจน} \end{aligned}$$

(จากสมการ $2\text{NO}_3^- + 12\text{H}^+ + 10\text{e}^- \rightarrow \text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ นั่นคือ ไนเตรต 2 โมล เกิดเป็นก๊าซไนโตรเจน 1 โมล)

$$\text{soluble N}_{2\text{gas}} = K_{\text{hN}_2} \times \text{Partial Pressure of N}_2 \times 28,000 \times 124 / 28$$

$$\begin{aligned}
 &= 6.03 \times 10^{-4} \times 0.0786 \times 28,000 \times 124/28 \\
 &= 5.877 \text{ มิลลิกรัม/ลิตร ในรูปไนเตรท} \\
 &= 1.327 \text{ มิลลิกรัม/ลิตร ในรูปไนโตรเจน}
 \end{aligned}$$

| | | |
|-------------|---------|------------------------------|
| ไนเตรทเข้า | 104.72 | มิลลิกรัมต่อลิตร |
| | = 23.65 | มิลลิกรัม/ลิตร ในรูปไนโตรเจน |
| ไนเตรทออก | 2.94 | มิลลิกรัมต่อลิตร |
| | = 0.66 | มิลลิกรัม/ลิตร ในรูปไนโตรเจน |
| ไนไตรท์เข้า | 48.69 | มิลลิกรัมต่อลิตร |
| | = 14.82 | มิลลิกรัม/ลิตร ในรูปไนโตรเจน |
| ไนไตรท์ออก | 2.71 | มิลลิกรัมต่อลิตร |
| | = 0.82 | มิลลิกรัม/ลิตร ในรูปไนโตรเจน |

ดังนั้น

$$\begin{aligned}
 \% \text{ nitrogen recovery} &= [(0.66+0.82+17.956+1.327) / (23.65+14.82)] \times 100 \\
 &= 53.84 \%
 \end{aligned}$$

ตัวอย่างการคำนวณสมดุลมวลของซัลเฟอร์

จากข้อมูลตารางที่ 4.17 ของชุดการทดลองที่ 1 ที่ความเข้มข้นของไนเตรทต่อซัลเฟตเท่ากับ $\text{NO}_3^- : \text{SO}_4^{2-} = 100 : 50$ มิลลิกรัม/ลิตร อัตราการไหลของน้ำเสียของระบบ 25 ลิตรต่อวัน

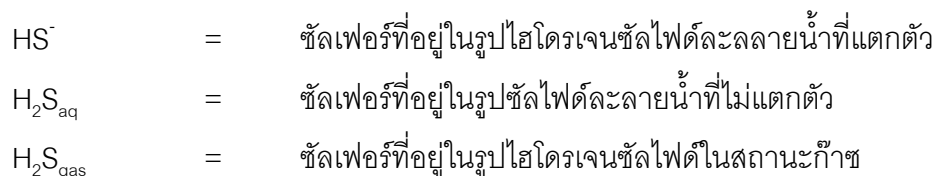
| | | |
|----------------------|-------|------------------------------|
| ซัลเฟตเข้า | 54.30 | มิลลิกรัมต่อลิตร |
| ซัลเฟตออก | 19.34 | มิลลิกรัมต่อลิตร |
| ซัลไฟด์น้ำออกทั้งหมด | 10.35 | มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปซัลไฟด์ |
| ซัลไฟด์ในรูปก๊าซ | 4.79 | มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปซัลไฟด์ |

จากสมการ 2.13 ในหัวข้อ 2.9.2

$$\% \text{ sulfur recovery} = [(\text{SO}_4^{2-}{}_{\text{eff}} + \text{S}^{2-} + \text{HS}^- + \text{H}_2\text{S}_{\text{aq}} + \text{H}_2\text{S}_{\text{gas}}) / \text{SO}_4^{2-}{}_{\text{in}}] \times 100 \dots\dots\dots 2.13$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 \text{SO}_4^{2-}{}_{\text{in}} &= \text{ซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปซัลเฟตที่อยู่ในน้ำเข้า} \\
 \text{SO}_4^{2-}{}_{\text{eff}} &= \text{ซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปซัลเฟตที่ออก} \\
 \text{S}^{2-} &= \text{ซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปซัลไฟด์อิสระ}
 \end{aligned}$$



โดย $\text{S}_2^- + \text{HS}^- + \text{H}_2\text{S}_{\text{aq}}$ คือ ปริมาณซัลไฟด์น้ำออกทั้งหมด

$$\text{ซัลไฟด์ทั้งหมด} = (10.35 \times 3) \text{ (ซัลไฟด์ 1 กรัม มาจากซัลเฟต 3 กรัม)}$$

$$= 31.05 \text{ มิลลิกรัม/ลิตร ในรูปซัลเฟต}$$

$$\text{ซัลไฟด์ในรูปก๊าซ} = \text{ก๊าซซัลไฟด์} \times \text{ปริมาตรชุดดักก๊าซ} \times 3/Q$$

$$= 4.79 \times 0.5 \times 3 / 24$$

$$= 0.29 \text{ มิลลิกรัม/ลิตร ในรูปซัลเฟต}$$

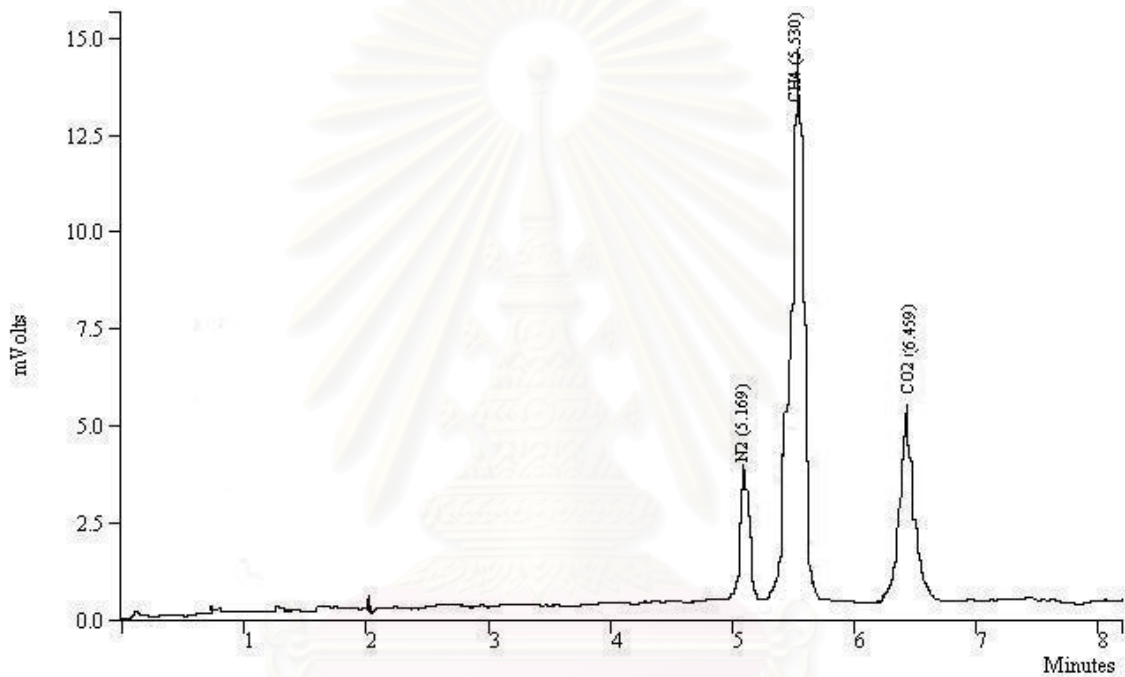
$$\text{นั่น \% sulfur recovery} = [(19.34+31.85+0.29)/ 54.30] \times 100$$

$$= 93.31 \%$$

ตารางที่ ๑.2 ค่าคงที่ K_n ของก๊าซต่างๆ (10^{-4} โมล/ลิตร-บรรยากาศ) (มันลีน ตัณพุลเวศม์,2545)

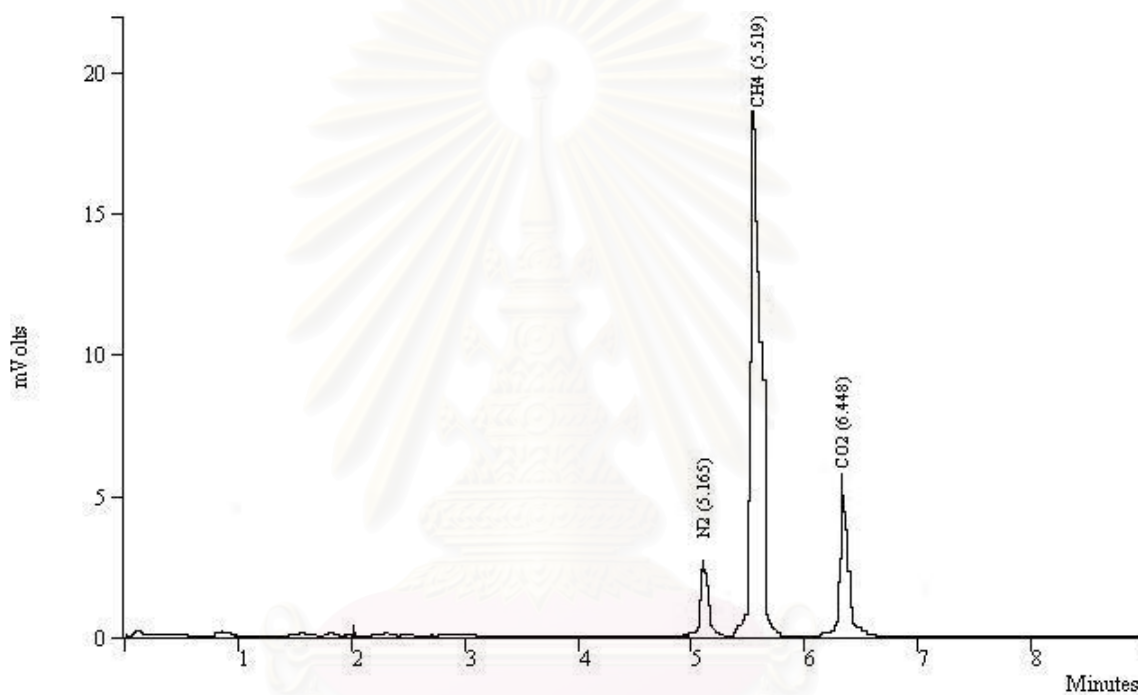
| T °C | Air | CO | CO ₂ | C ₂ H ₂ | H ₂ | H ₂ S | CH ₄ | NO | N ₂ | O ₂ |
|------|------|-----|-----------------|-------------------------------|----------------|------------------|-----------------|------|----------------|----------------|
| 0 | 12.9 | 764 | 15.8 | 44.2 | 9.62 | 2,070 | 24.8 | 32.9 | 10.5 | 21.8 |
| 10 | 10.1 | 535 | 12.6 | 29.4 | 8.75 | 1,520 | 18.7 | 25.5 | 8.33 | 17.0 |
| 20 | 8.38 | 392 | 10.4 | 21.2 | 8.14 | 1,150 | 14.8 | 21.1 | 6.93 | 13.8 |
| 30 | 7.20 | 299 | 8.96 | 16.3 | 7.63 | 914 | 12.4 | 17.9 | 6.03 | 11.7 |
| 40 | 6.40 | 239 | 7.93 | 13.2 | 7.40 | 748 | 10.7 | 15.8 | 5.35 | 10.4 |
| 50 | 5.88 | 197 | 7.30 | 11.1 | 7.28 | 630 | 9.64 | 14.2 | 4.92 | 9.46 |
| 60 | 5.50 | 163 | 6.77 | 9.85 | 7.28 | 540 | 8.88 | 13.3 | 4.63 | 8.85 |
| 70 | 5.30 | | 6.58 | 8.93 | 7.30 | 467 | 8.34 | 12.7 | 4.44 | 8.40 |
| 80 | 5.20 | | 6.58 | 8.40 | 7.37 | 412 | 8.15 | 12.4 | 4.41 | 8.10 |
| 90 | 5.15 | | 6.57 | 8.10 | 7.40 | 386 | 8.04 | 12.3 | 4.41 | 7.98 |
| 100 | 5.20 | | 6.57 | 8.03 | 7.46 | 376 | 7.93 | 12.1 | 4.41 | 7.93 |

| | | | |
|-------------------|-----------------------------------|-------------------------|--------------------|
| Data file: | c:\documents and | Operator(Calc): | jantarawan |
| Channel: | Front = TCD RESULTS | Calc Date: | 26/5/2550 11:22:59 |
| Sample ID: | R1 | Times Calculated: | 3 |
| Operator(Inj): | jantarawan | Calculation Method: | c:\documenta and |
| Injection Date: | 25/5/2550 14:34:27 | Instrument(Calc): | Varian Star #1 |
| Injection Method: | c:\star\install 3 aug 2005\cp7429 | Run Mode: | Analysis |
| Run Time(min): | 14.987 | Peak Measurement: | Peak Area |
| Workstation: | GC-3800 | Calculation Type | External Std. |
| Instrument(Inj): | Varian Star #1 | Calibration Level: | N/A |
| | | Verification Tolerance: | N/A |



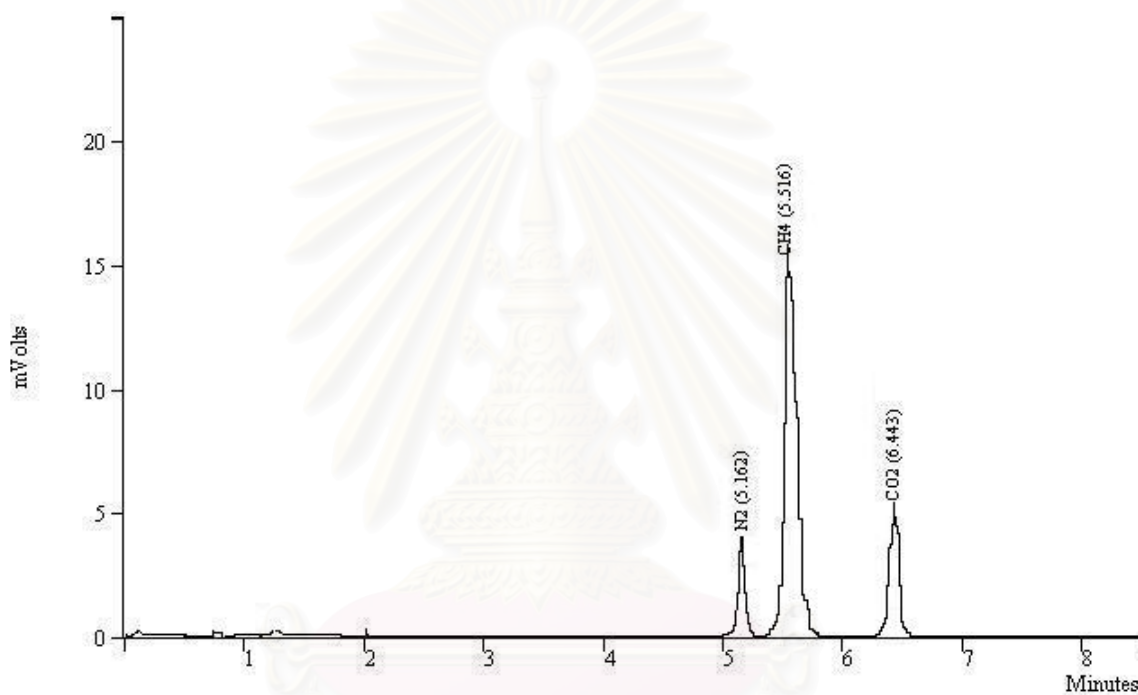
| Peak No | Peak Name | Result (%volume) | Ret Time (min) | Time Offset (min) | Peak Area (count) | Rel Ret Time | Sep. Code | Width 1/2 (sec) | Status Codes | Group |
|---------------|-----------|------------------|----------------|-------------------|-------------------|--------------|-----------|-----------------|--------------|-------|
| 1 | N2 | 7.4512 | 5.169 | 0.003 | 10569 | 0.00 | VV | 0.0 | | 0 |
| 2 | CH4 | 73.5318 | 5.530 | -0.013 | 104304 | 0.00 | BB | 2.3 | C | 0 |
| 3 | CO2 | 13.465 | 6.459 | 0.012 | 19100 | 0.00 | BB | 2.6 | | 0 |
| Totals | | 94.448 | | 0.002 | 133973 | | | | | |

Data file: c:\documents and Operator(Calc): jantarawan
 Channel: Front = TCD RESULTS Calc Date: 26/5/2550 11:21:29
 Sample ID: R2 Times Calculated: 3
 Operator(Inj): jantarawan Calculation Method: c:\documenta and
 Injection Date: 25/5/2550 14:59:15 Instrument(Calc): Varian Star #1
 Injection Method: c:\star\install 3 aug 2005\cp7429 Run Mode: Analysis
 Run Time(min): 14.987 Peak Measurement: Peak Area
 Workstation: GC-3800 Calculation Type: External Std.
 Instrument(Inj): Varian Star #1 Calibration Level: N/A
 Verification Tolerance: N/A



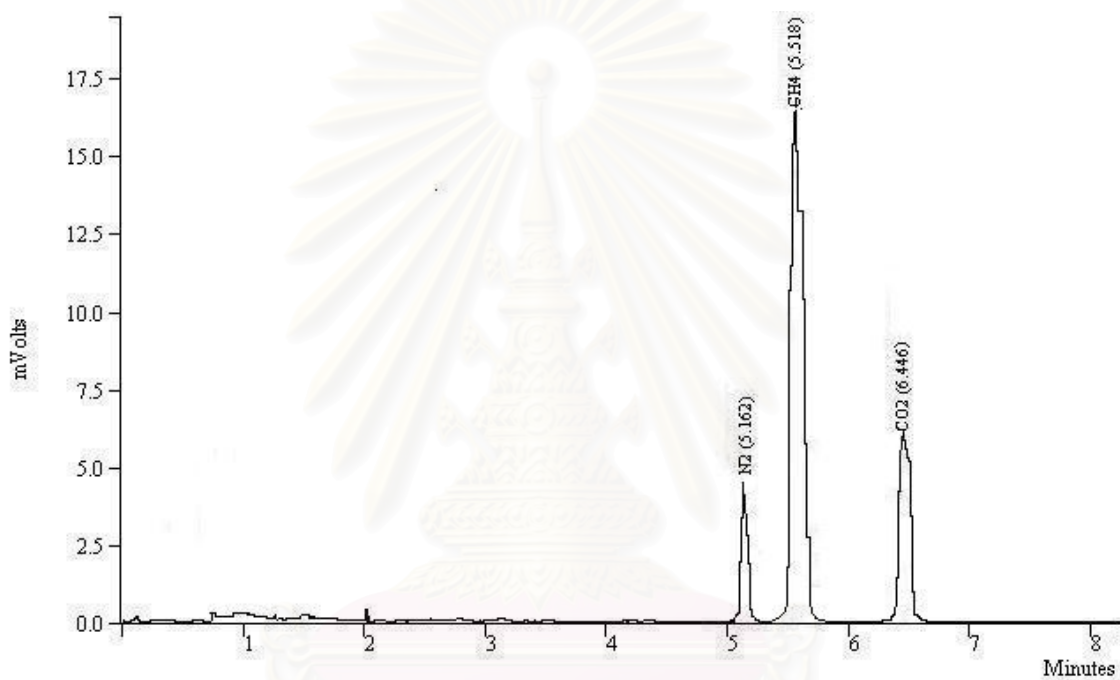
| Peak No | Peak Name | Result (%volume) | Ret Time (min) | Time Offset (min) | Peak Area (count) | Rel Ret Time | Sep. Code | Width 1/2 (sec) | Status Codes | Group |
|---------------|-----------|------------------|----------------|-------------------|-------------------|--------------|-----------|-----------------|--------------|-------|
| 1 | N2 | 5.7412 | 5.165 | -0.001 | 9330 | 0.00 | VV | 0.0 | | 0 |
| 2 | CH4 | 75.2402 | 5.519 | -0.024 | 122273 | 0.00 | BB | 2.3 | C | 0 |
| 3 | CO2 | 14.5527 | 6.448 | 0.001 | 23650 | 0.00 | BB | 2.6 | | 0 |
| Totals | | 95.534 | | -0.024 | 155253 | | | | | |

| | | | |
|-------------------|-----------------------------------|-------------------------|--------------------|
| Data file: | c:\documents and | Operator(Calc): | jantarawan |
| Channel: | Front = TCD RESULTS | Calc Date: | 26/5/2550 11:28:10 |
| Sample ID: | R3 | Times Calculated: | 3 |
| Operator(Inj): | jantarawan | Calculation Method: | c:\documenta and |
| Injection Date: | 25/5/2550 16:18:03 | Instrument(Calc): | Varian Star #1 |
| Injection Method: | c:\star\install 3 aug 2005\cp7429 | Run Mode: | Analysis |
| Run Time(min): | 14.987 | Peak Measurement: | Peak Area |
| Workstation: | GC-3800 | Calculation Type | External Std. |
| Instrument(Inj): | Varian Star #1 | Calibration Level: | N/A |
| | | Verification Tolerance: | N/A |



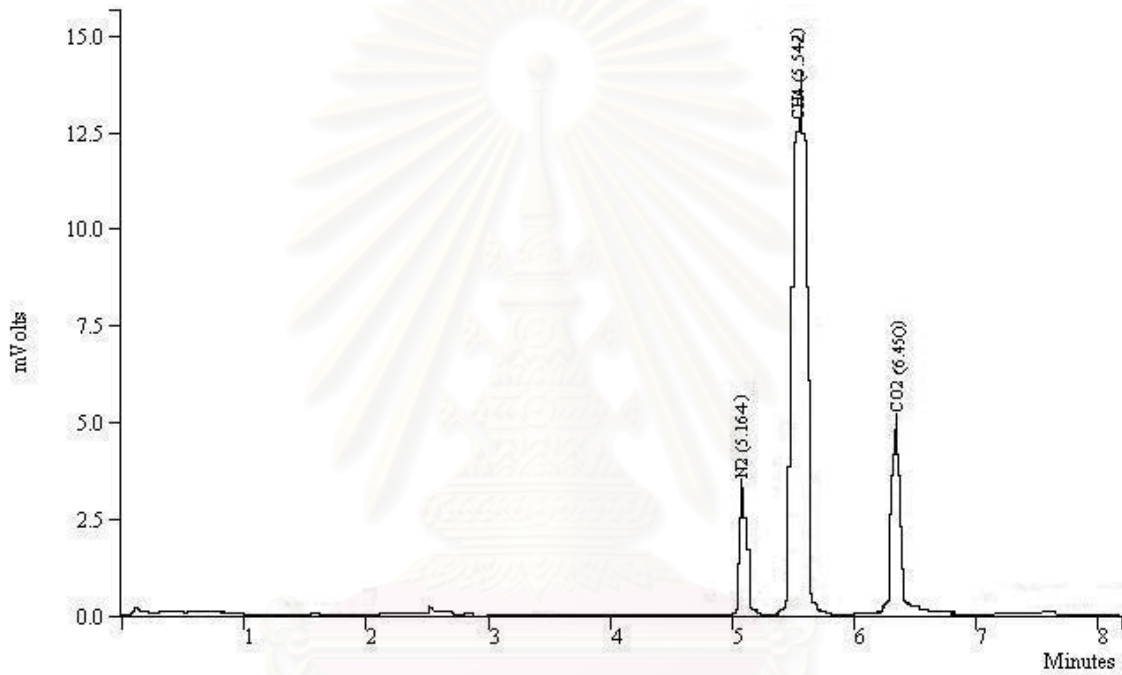
| Peak No | Peak Name | Result (%volume) | Ret Time (min) | Time Offset (min) | Peak Area (count) | Rel Ret Time | Sep. Code | Width 1/2 (sec) | Status Codes | Group |
|---------------|-----------|------------------|----------------|-------------------|-------------------|--------------|-----------|-----------------|--------------|-------|
| 1 | N2 | 7.8597 | 5.162 | -0.004 | 16980 | 0.00 | VV | 0.0 | | 0 |
| 2 | CH4 | 69.8641 | 5.516 | -0.027 | 150935 | 0.00 | BB | 2.3 | C | 0 |
| 3 | CO2 | 13.2296 | 6.443 | -0.004 | 28581 | 0.00 | BB | 2.6 | | 0 |
| Totals | | 90.953 | | -0.035 | 196497 | | | | | |

| | | | |
|-------------------|-----------------------------------|-------------------------|--------------------|
| Data file: | c:\documents and | Operator(Calc): | jantarawan |
| Channel: | Front = TCD RESULTS | Calc Date: | 26/5/2550 11:30:40 |
| Sample ID: | R4 | Times Calculated: | 3 |
| Operator(Inj): | jantarawan | Calculation Method: | c:\documenta and |
| Injection Date: | 25/5/2550 16:46:18 | Instrument(Calc): | Varian Star #1 |
| Injection Method: | c:\star\install 3 aug 2005\cp7429 | Run Mode: | Analysis |
| Run Time(min): | 14.987 | Peak Measurement: | Peak Area |
| Workstation: | GC-3800 | Calculation Type | External Std. |
| Instrument(Inj): | Varian Star #1 | Calibration Level: | N/A |
| | | Verification Tolerance: | N/A |



| Peak No | Peak Name | Result (%volume) | Ret Time (min) | Time Offset (min) | Peak Area (count) | Rel Ret Time | Sep. Code | Width 1/2 (sec) | Status Codes | Group |
|---------------|-----------|------------------|----------------|-------------------|-------------------|--------------|-----------|-----------------|--------------|-------|
| 1 | N2 | 6.7124 | 5.162 | -0.004 | 10611 | 0.00 | VV | 0.0 | | 0 |
| 2 | CH4 | 77.6077 | 5.518 | -0.025 | 122679 | 0.00 | BB | 2.3 | C | 0 |
| 3 | CO2 | 13.8945 | 6.446 | -0.001 | 21964 | 0.00 | BB | 2.6 | | 0 |
| Totals | | 98.215 | | -0.030 | 155253 | | | | | |

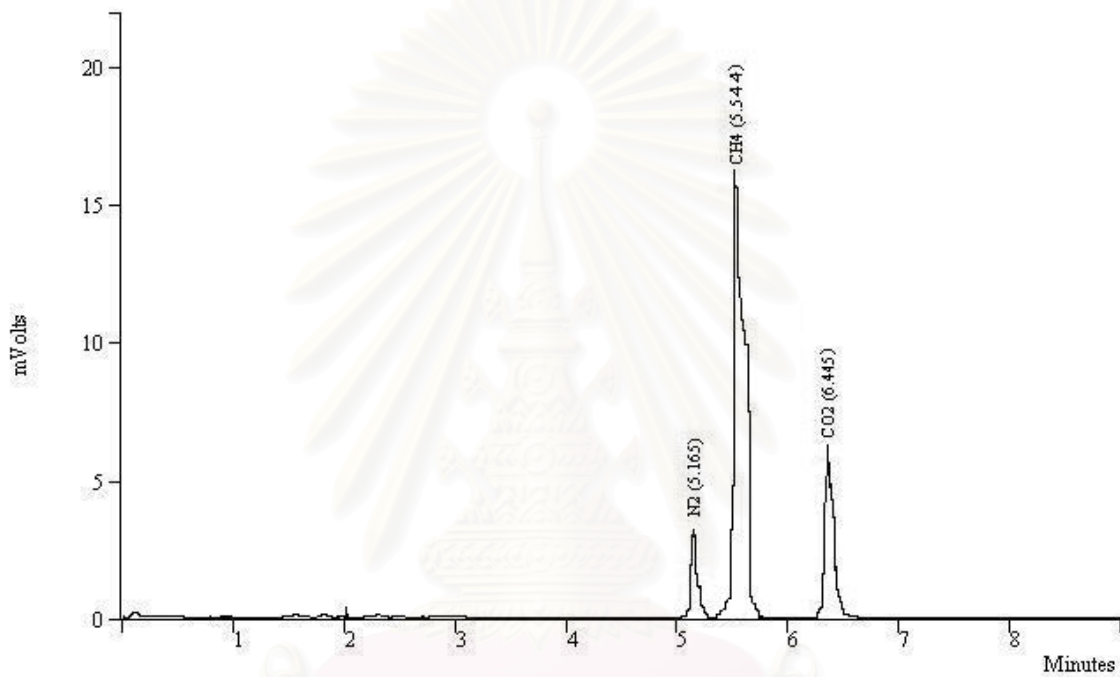
Data file: c:\documents and Operator(Calc): jantarawan
 Channel: Front = TCD RESULTS Calc Date: 9/8/2550 09:40:33
 Sample ID: R1-1 Times Calculated: 4
 Operator(Inj): jantarawan Calculation Method: c:\documenta and
 Injection Date: 8/8/2550 16:30:11 Instrument(Calc): Varian Star #1
 Injection Method: c:\star\install 3 aug 2005\cp7429 Run Mode: Analysis
 Run Time(min): 14.987 Peak Measurement: Peak Area
 Workstation: GC-3800 Calculation Type External Std.
 Instrument(Inj): Varian Star #1 Calibration Level: N/A
 Verification Tolerance: N/A



| Peak No | Peak Name | Result (%volume) | Ret Time (min) | Time Offset (min) | Peak Area (count) | Rel Ret Time | Sep. Code | Width 1/2 (sec) | Status Codes | Group |
|---------------|-----------|------------------|----------------|-------------------|-------------------|--------------|-----------|-----------------|--------------|-------|
| 1 | N2 | 5.2215 | 5.164 | -0.002 | 9101 | 0.00 | VV | 0.0 | | 0 |
| 2 | CH4 | 68.1209 | 5.542 | -0.001 | 118734 | 0.00 | BB | 2.3 | C | 0 |
| 3 | CO2 | 11.1175 | 6.450 | 0.003 | 19378 | 0.00 | BB | 2.6 | | 0 |
| Totals | | 84.460 | | 0.000 | 147213 | | | | | |

Data file: c:\documents and Operator(Calc): jantarawan

| | | | |
|-------------------|-----------------------------------|-------------------------|--------------------|
| Channel: | Front = TCD RESULTS | Calc Date: | 30/7/2550 15:25:37 |
| Sample ID: | R2-1 | Times Calculated: | 3 |
| Operator(Inj): | jantarawan | Calculation Method: | c:\documenta and |
| Injection Date: | 30/7/2550 11:06:30 | Instrument(Calc): | Varian Star #1 |
| Injection Method: | c:\star\install 3 aug 2005\cp7429 | Run Mode: | Analysis |
| Run Time(min): | 14.987 | Peak Measurement: | Peak Area |
| Workstation: | GC-3800 | Calculation Type | External Std. |
| Instrument(Inj); | Varian Star #1 | Calibration Level: | N/A |
| | | Verification Tolerance: | N/A |

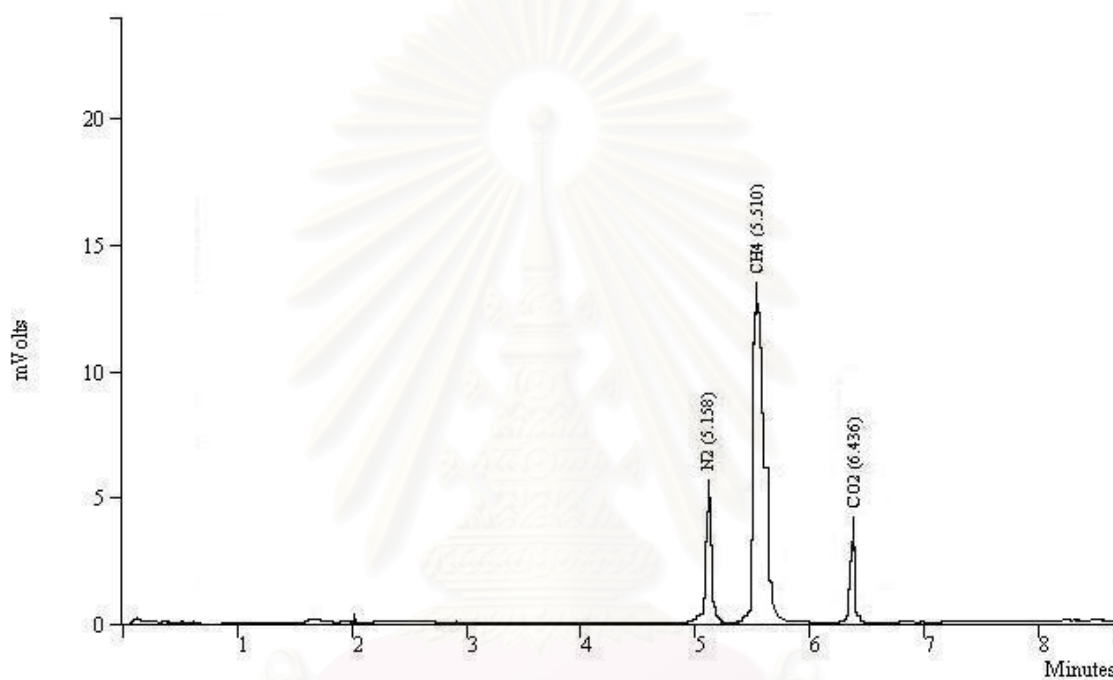


| Peak No | Peak Name | Result (%volume) | Ret Time (min) | Time Offset (min) | Peak Area (count) | Rel Ret Time | Sep. Code | Width 1/2 (sec) | Status Codes | Group |
|---------------|-----------|------------------|----------------|-------------------|-------------------|--------------|-----------|-----------------|--------------|-------|
| 1 | N2 | 7.1125 | 5.165 | -0.001 | 14228 | 0.00 | VV | 0.0 | | 0 |
| 2 | CH4 | 74.2446 | 5.544 | 0.001 | 148519 | 0.00 | BB | 2.3 | C | 0 |
| 3 | CO2 | 14.8625 | 6.445 | -0.002 | 29731 | 0.00 | BB | 2.6 | | 0 |
| Totals | | 96.220 | | -0.002 | 192478 | | | | | |

Data file: c:\documents and

Operator(Calc): jantarawan

| | | | |
|-------------------|-----------------------------------|-------------------------|--------------------|
| Channel: | Front = TCD RESULTS | Calc Date: | 22/7/2550 10:17:05 |
| Sample ID: | R3-1 | Times Calculated: | 3 |
| Operator(Inj): | jantarawan | Calculation Method: | c:\documenta and |
| Injection Date: | 21/7/2550 15:05:25 | Instrument(Calc): | Varian Star #1 |
| Injection Method: | c:\star\install 3 aug 2005\cp7429 | Run Mode: | Analysis |
| Run Time(min): | 14.987 | Peak Measurement: | Peak Area |
| Workstation: | GC-3800 | Calculation Type | External Std. |
| Instrument(Inj); | Varian Star #1 | Calibration Level: | N/A |
| | | Verification Tolerance: | N/A |

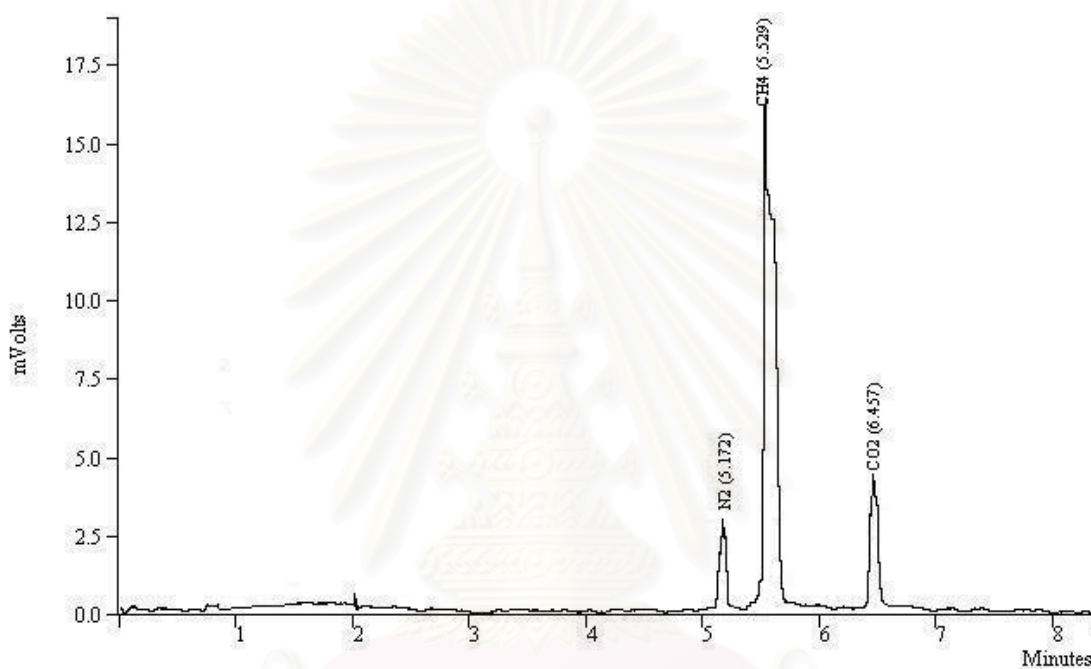


| Peak No | Peak Name | Result (%volume) | Ret Time (min) | Time Offset (min) | Peak Area (count) | Rel Ret Time | Sep. Code | Width 1/2 (sec) | Status Codes | Group |
|---------------|-----------|------------------|----------------|-------------------|-------------------|--------------|-----------|-----------------|--------------|-------|
| 1 | N2 | 15.6711 | 5.158 | -0.008 | 36470 | 0.00 | VV | 0.0 | | 0 |
| 2 | CH4 | 68.7165 | 5.510 | -0.033 | 159919 | 0.00 | BB | 2.3 | C | 0 |
| 3 | CO2 | 10.7572 | 6.436 | -0.011 | 25034 | 0.00 | BB | 2.6 | | 0 |
| Totals | | 95.145 | | -0.052 | 221424 | | | | | |

Data file: c:\documents and

Operator(Calc): jantarawan

Channel: Front = TCD RESULTS Calc Date: 22/7/2550 10:55:29
 Sample ID: R4-1 Times Calculated: 3
 Operator(Inj): jantarawan Calculation Method: c:\documenta and
 Injection Date: 21/7/2550 15:35:34 Instrument(Calc): Varian Star #1
 Injection Method: c:\star\install 3 aug 2005\cp7429 Run Mode: Analysis
 Run Time(min): 14.985 Peak Measurement: Peak Area
 Workstation: GC-3800 Calculation Type External Std.
 Instrument(Inj): Varian Star #1 Calibration Level: N/A
 Verification Tolerance: N/A

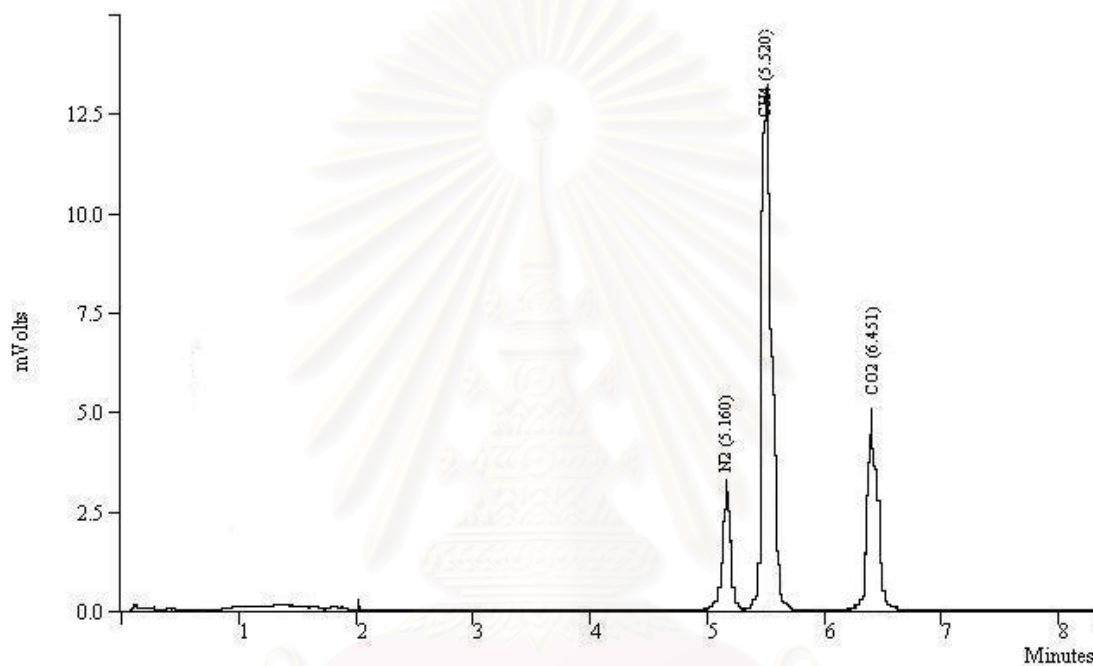


| Peak No | Peak Name | Result (%volume) | Ret Time (min) | Time Offset (min) | Peak Area (count) | Rel Ret Time | Sep. Code | Width 1/2 (sec) | Status Codes | Group |
|---------------|-----------|------------------|----------------|-------------------|-------------------|--------------|-----------|-----------------|--------------|-------|
| 1 | N2 | 5.8519 | 5.172 | 0.006 | 9925 | 0.00 | VV | 0.0 | | 0 |
| 2 | CH4 | 76.7032 | 5.529 | -0.014 | 130088 | 0.00 | BB | 2.3 | C | 0 |
| 3 | CO2 | 13.0624 | 6.457 | 0.010 | 22154 | 0.00 | BB | 2.6 | | 0 |
| Totals | | 95.618 | | 0.002 | 162166 | | | | | |

Data file: c:\documents and

Operator(Calc): jantarawan

| | | | |
|-------------------|-----------------------------------|-------------------------|--------------------|
| Channel: | Front = TCD RESULTS | Calc Date: | 11/9/2550 15:45:15 |
| Sample ID: | R1-2 | Times Calculated: | 4 |
| Operator(Inj): | jantarawan | Calculation Method: | c:\documenta and |
| Injection Date: | 11/9/2550 14:11:36 | Instrument(Calc): | Varian Star #1 |
| Injection Method: | c:\star\install 3 aug 2005\cp7429 | Run Mode: | Analysis |
| Run Time(min): | 14.987 | Peak Measurement: | Peak Area |
| Workstation: | GC-3800 | Calculation Type | External Std. |
| Instrument(Inj): | Varian Star #1 | Calibration Level: | N/A |
| | | Verification Tolerance: | N/A |

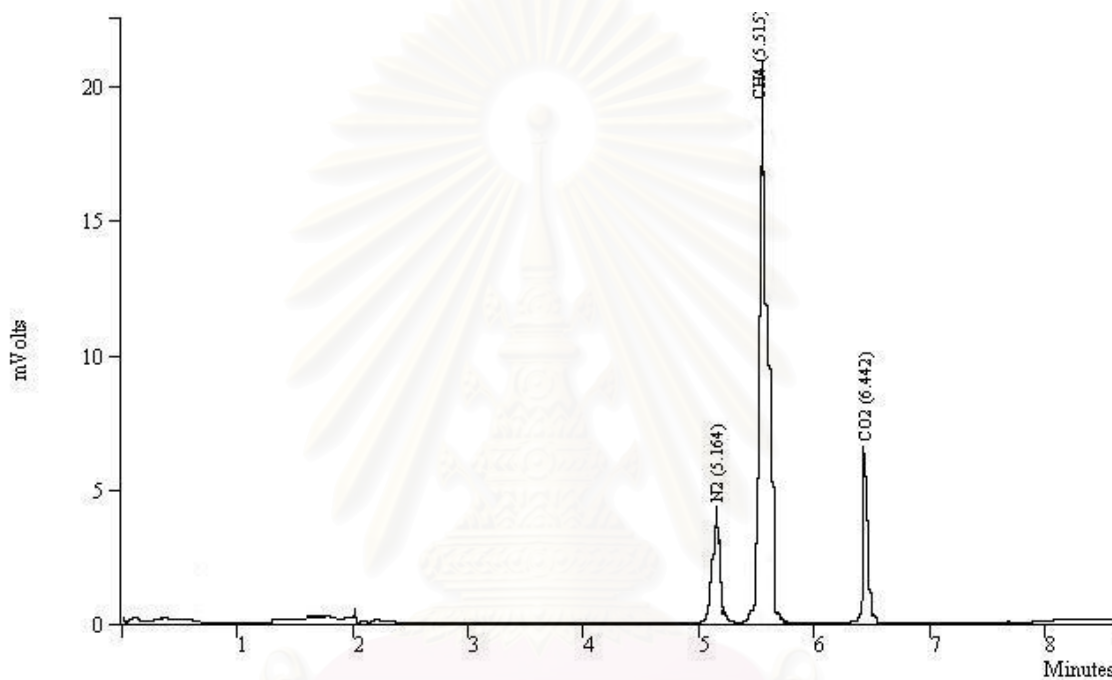


| Peak No | Peak Name | Result (%volume) | Ret Time (min) | Time Offset (min) | Peak Area (count) | Rel Ret Time | Sep. Code | Width 1/2 (sec) | Status Codes | Group |
|---------------|-----------|------------------|----------------|-------------------|-------------------|--------------|-----------|-----------------|--------------|-------|
| 1 | N2 | 6.35427 | 5.160 | -0.006 | 9618 | 0.00 | VV | 0.0 | | 0 |
| 2 | CH4 | 66.6464 | 5.520 | -0.023 | 100875 | 0.00 | BB | 2.3 | C | 0 |
| 3 | CO2 | 14.5342 | 6.451 | 0.004 | 21999 | 0.00 | BB | 2.6 | | 0 |
| Totals | | 87.535 | | -0.025 | 132491 | | | | | |

Data file: c:\documents and

Operator(Calc): jantarawan

| | | | |
|-------------------|-----------------------------------|-------------------------|--------------------|
| Channel: | Front = TCD RESULTS | Calc Date: | 27/9/2550 14:50:20 |
| Sample ID: | R2-2 | Times Calculated: | 3 |
| Operator(Inj): | jantarawan | Calculation Method: | c:\documenta and |
| Injection Date: | 27/9/2550 13:37:12 | Instrument(Calc): | Varian Star #1 |
| Injection Method: | c:\star\install 3 aug 2005\cp7429 | Run Mode: | Analysis |
| Run Time(min): | 14.987 | Peak Measurement: | Peak Area |
| Workstation: | GC-3800 | Calculation Type | External Std. |
| Instrument(Inj): | Varian Star #1 | Calibration Level: | N/A |
| | | Verification Tolerance: | N/A |

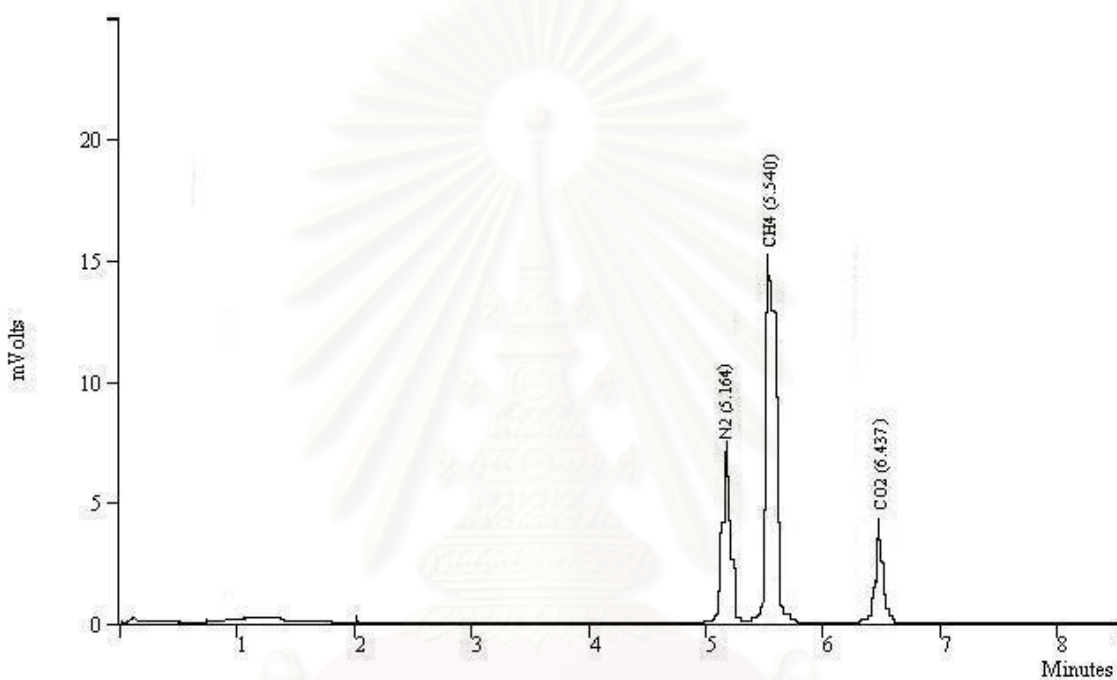


| Peak No | Peak Name | Result (%volume) | Ret Time (min) | Time Offset (min) | Peak Area (count) | Rel Ret Time | Sep. Code | Width 1/2 (sec) | Status Codes | Group |
|---------------|-----------|------------------|----------------|-------------------|-------------------|--------------|-----------|-----------------|--------------|-------|
| 1 | N2 | 6.2849 | 5.164 | -0.002 | 12502 | 0.00 | VV | 0.0 | | 0 |
| 2 | CH4 | 73.6946 | 5.515 | -0.028 | 146600 | 0.00 | BB | 2.3 | C | 0 |
| 3 | CO2 | 12.3527 | 6.442 | -0.005 | 24573 | 0.00 | BB | 2.6 | | 0 |
| Totals | | 92.332 | -0.035 | | 183675 | | | | | |

Data file: c:\documents and

Operator(Calc): jantarawan

| | | | |
|-------------------|-----------------------------------|-------------------------|--------------------|
| Channel: | Front = TCD RESULTS | Calc Date: | 13/9/2550 16:27:46 |
| Sample ID: | R3-2 | Times Calculated: | 3 |
| Operator(Inj): | jantarawan | Calculation Method: | c:\documenta and |
| Injection Date: | 13/9/2550 15:13:56 | Instrument(Calc): | Varian Star #1 |
| Injection Method: | c:\star\install 3 aug 2005\cp7429 | Run Mode: | Analysis |
| Run Time(min): | 14.987 | Peak Measurement: | Peak Area |
| Workstation: | GC-3800 | Calculation Type | External Std. |
| Instrument(Inj); | Varian Star #1 | Calibration Level: | N/A |
| | | Verification Tolerance: | N/A |

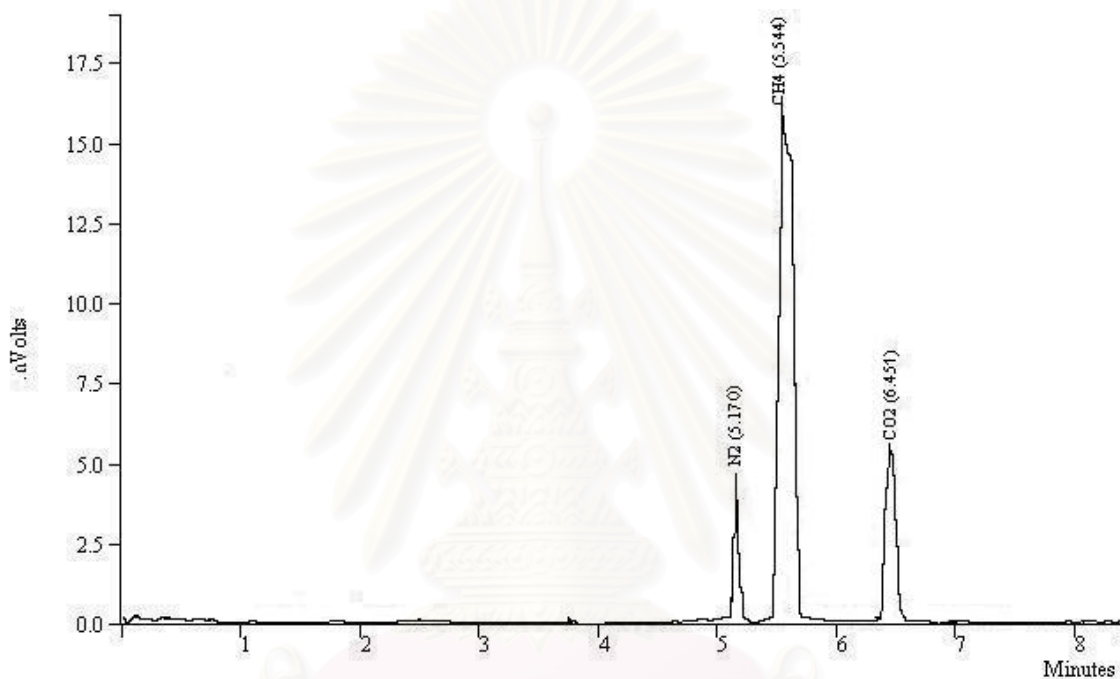


| Peak No | Peak Name | Result (%volume) | Ret Time (min) | Time Offset (min) | Peak Area (count) | Rel Ret Time | Sep. Code | Width 1/2 (sec) | Status Codes | Group |
|---------------|-----------|------------------|----------------|-------------------|-------------------|--------------|-----------|-----------------|--------------|-------|
| 1 | N2 | 18.3482 | 5.164 | -0.002 | 43757 | 0.00 | VV | 0.0 | | 0 |
| 2 | CH4 | 63.8361 | 5.540 | -0.003 | 152235 | 0.00 | BB | 2.3 | C | 0 |
| 3 | CO2 | 9.4524 | 6.437 | -0.010 | 22542 | 0.00 | BB | 2.6 | | 0 |
| Totals | | 91.637 | | -0.015 | 218534 | | | | | |

Data file: c:\documents and

Operator(Calc): jantarawan

| | | | |
|-------------------|-----------------------------------|-------------------------|--------------------|
| Channel: | Front = TCD RESULTS | Calc Date: | 13/9/2550 16:40:55 |
| Sample ID: | R4-2 | Times Calculated: | 3 |
| Operator(Inj): | jantarawan | Calculation Method: | c:\documenta and |
| Injection Date: | 13/9/2550 15:31:11 | Instrument(Calc): | Varian Star #1 |
| Injection Method: | c:\star\install 3 aug 2005\cp7429 | Run Mode: | Analysis |
| Run Time(min): | 14.985 | Peak Measurement: | Peak Area |
| Workstation: | GC-3800 | Calculation Type | External Std. |
| Instrument(Inj); | Varian Star #1 | Calibration Level: | N/A |
| | | Verification Tolerance: | N/A |



| Peak No | Peak Name | Result (%volume) | Ret Time (min) | Time Offset (min) | Peak Area (count) | Rel Ret Time | Sep. Code | Width 1/2 (sec) | Status Codes | Group |
|---------------|-----------|------------------|----------------|-------------------|-------------------|--------------|-----------|-----------------|--------------|-------|
| 1 | N2 | 6.2215 | 5.170 | 0.004 | 10405 | 0.00 | VV | 0.0 | | 0 |
| 2 | CH4 | 78.3584 | 5.544 | 0.001 | 131053 | 0.00 | BB | 2.3 | C | 0 |
| 3 | CO2 | 12.3815 | 6.451 | 0.004 | 20708 | 0.00 | BB | 2.6 | | 0 |
| Totals | | 96.961 | 0.009 | | 162166 | | | | | |

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพุทธิกุล ทองเนื้อสูง เกิดเมื่อวันที่ 21 กรกฎาคม 2519 ที่ อำเภอเมือง จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ สำเร็จการศึกษา ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปี พ.ศ.2541

ได้เข้าศึกษาระดับปริญญาโท ของหลักสูตรวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2547 สำเร็จการศึกษา ปี พ.ศ. 2550

ปัจจุบัน รับราชการ ตำแหน่ง วิศวกรโยธา 4 สำนักอนุรักษ์และฟื้นฟูแหล่งน้ำ กรมทรัพยากรน้ำ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย